

The background of the cover features a series of concentric circles. At the center is a solid purple circle. Surrounding it are several rings of varying widths and colors, including light gray, off-white, and a textured beige. A dark horizontal band cuts across the middle of the cover, containing the title in blue text.

理论气候学概论

● 汤懋苍 等编著

● 高 家 出 版 社

理论气候学概论

汤懋苍 等编著

气象出版社

内 容 简 介

本书从大气热力学观点出发,较系统地阐述了气候形成和变化的理论,全书共十一章,第一、二、三、四章是基础知识,包括气候变化的基本事实,气候的基本特性和基本方程;第五、六、七章是大气热力学模式,包括能量模式、熵模式和随机模式;最后几章论述了气候变化的原因,包括周期性外源强迫,气候系统内部的自持振荡和非周期性外因三部分。

本书可供研究机构和高等院校气候专业研究生和高年级学生作为教材或参考书,也可供从事气候科研业务及教学的人员参考。

理论气候学概论

汤懋苍 等编著

责任编辑:曾令慧

*

气象出版社 出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

气象出版社发行 全国各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 9.625 字数: 213千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

印数: 1—1000 定价: 6.90元

ISBN 7-5029-0321-6/P·0180

前 言

气候是人类赖以生存的基础支柱之一，此支柱现正面临来自人类本身和自然界的联合威胁，从而可能危及人类的生存环境。未来气候将如何变化？这已不仅仅是气候学家所关心，而是全人类都关心的问题。当今世界，研究气候成因和气候变化的学者已远远超出气象学家的范畴，海洋、水文、地理、地质、冰川、沙漠……，几乎包括地球科学所有分支的一大批优秀学者，甚至地学以外的，如物理、天文等学者，都投入到气候变化的研究行列中来了。面对着气候学如此一个大发展、大融合、大深化的黄金时代，作为气候学界的一名老兵，在兴奋不已的同时、深感有责任将茫茫九派的各种观点加以梳理、总结，以启迪，帮助后学青年。

气候变化理论的研究，尚存在两类观点迥异的方法。一类是以大气动力学方程组为基础，用大气环流数值模式（GCM）对气候形成进行数值模拟。它对平均气候的模拟现已达到“逼真”的地步，这无疑是气候形成理论研究的历史长河中一块闪闪发光的里程碑。但当用此类方法于气候变化的预测时，在理论上和实用上都遇到了困难。理论上现已公认：GCM对大气可预报性的时间限度是2—3个星期，这显然不是气候的时间尺度；实用上将复杂的GCM积分一年或十年是绝大多数计算机所不能的。另一类方法是以气候系统各子系统的能量收支方程为基础，甚或加入某种“极值”约束，考虑各子系统的相互反馈，如实地将气候变化看成是整个气候系统变化中的一部分。比起大气动力学方法，这是气象学

中较不成熟的方法。作为一本教科书应该将两类方法兼收并蓄，但因前一类方法已有专门著作介绍，本书将着重介绍后一类方法。

本书初稿是1986年以来作者在兰州大学和兰州高原大气所给研究生讲课的讲稿。全书分为十一章：第1—4章是理论气候学的基础知识，5—7章介绍三种气候模式，8—11章是气候变化的原因分析。因为近年来关于气候形成与变化的理论文章实是繁花似锦，本书在取材中难免有挂一漏万之憾，甚或取材不当，敬请读者和有关专家鉴谅。

本书所用的符号很多，且显得较乱，这是因为理论气候学牵涉的学科面太广，同时本学科又尚在创建之初，各学者所用符号多不统一，且不少学者追求的是物理概念上的清新，在数学表达上要求尽量简洁，因此引入了不少派生符号。这样，我们想统一全书的符号几乎是不可能了，看来只有待本学科进一步发展，才可望使符号统一。对那些在书中多次出现的符号，我们在书后列出了一符号表以便读书查阅。

本书由汤懋苍负责编著。其中第六、七、十一等三章的初稿分别由李天时、李丁民和杨成彬编写，汤懋苍修改定稿。写作过程中曾与丑纪范教授讨论多次，收益不浅。张建统计了本书所用资料、誊抄原稿和英文打字，杨良清绘图、李超统一了全书的数学符号。在此，作者均一一致谢。

作 者

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
§1 “气候”定义演变的几个阶段 ¹	(1)
§2 理论气候学发展简史	(3)
§3 控制气候系统的外参数	(5)
§4 “天候谱”的自然分段	(7)
第二章 气候变化的观测事实	(13)
§1 古气候的观测手段和方法	(13)
§2 全球气候变化的主要观测结果	(16)
§3 气候变化的区域不同步性	(25)
第三章 制约气候系统的热力学方程	(42)
§1 大气能量平衡方程(热力学第一定律)	(42)
§2 地-气界面的热量平衡方程	(45)
§3 下垫面的热平衡方程	(50)
§4 地-气系统的能量平衡方程	(51)
§5 熵平衡方程	(54)
§6 Fokker-planck方程	(58)
第四章 全球气候系统的基本特性	(60)
§1 反馈性	(60)
§2 敏感性	(62)
§3 可预报性	(69)
第五章 能量平衡模式	(75)
§1 零维模式	(75)
§2 垂直一维模式	(82)

§3	水平一维模式	(88)
§4	径向二维模式	(104)
第六章	熵模式	(109)
§1	“极值原理”和熵	(109)
§2	Paltridge的熵模式	(111)
§3	几个最小熵交换模式介绍	(125)
§4	熵模式中的多平衡态现象	(133)
第七章	随机模式	(135)
§1	模式思想	(135)
§2	简单随机模式	(137)
§3	一般随机模式介绍	(145)
§4	几种随机模式介绍	(148)
§5	零维随机模式	(152)
附录	Taylor 关系式 (7.10) 的求法	(159)
第八章	气候系统对周期性外源的强迫响应	(161)
§1	气候的日变化和年变化	(161)
§2	米兰柯维奇 (Milankovitch) 周期	(163)
§3	地球轨道参数及其对太阳辐射的影响	(168)
§4	银河年与大冰期	(173)
第九章	气候系统的自由振荡	(182)
§1	地-气 (垂直) 能量交换的自持振荡	(182)
§2	大气运动中的慢波	(192)
§3	大气中的准半月 (或准两周) 振荡	(195)
§4	极冰收扩的自由振荡	(198)
第十章	短期气候变化原因简析	(203)
§1	太阳活动 (日地关系)	(203)
§2	海洋的作用	(225)
§3	陆-气相互作用	(237)
§4	地温与短期气候变化	(241)

第十一章 微量气体、气溶胶与气候变化·····	(256)
§1 温室效应·····	(256)
§2 自然界中的碳循环·····	(258)
§3 微量气体影响气候的途径·····	(262)
§4 温室效应的数值模拟·····	(265)
§5 气溶胶的气候效应·····	(274)
参考文献·····	(280)
符号表·····	(298)

第一章 绪 论

§1 “气候”定义演变的几个阶段

理论气候学是研究气候形成和气候变化机制的一门学科。什么是气候？这是所有气候学应首先弄明白的。关于气候的定义经历了几个演变阶段。它说明对气候学的研究在一步步地深化。

1. 古典阶段（本世纪初以前）：气候是大气的平均状态。气候学是研究各种气象要素的地理分布和年、日变化的学科。这实质上是“地理气候学”的定义。

2. 近代阶段（70年代以前）：随着“近代天气学”的发展，有人把气候定义为“气候是天气的总和”。这实质上是“天气气候学”的定义。随着数理统计的广泛用于气候统计，有人提出：“气候是大气众多状态的一个统计集合”。这可以看作是“统计气候学”的定义。也有人从气候成因的角度提出：“气候是辐射、地理因素和大气环流三者相互作用下的特征性天气状况”。应该说大气环流是气候的一部分内容，而不应该看成是气候的成因。近代阶段是气候学大发展的时期，所以各种二级气候学的定义是很多的。

3. 现代阶段（自70年代以来）：1974年在斯德哥尔摩召开的WMO-ICSU的联席会上，明确地提出了“气候系统”的概念，这是气候学研究进入一个新阶段的标志。所谓“气候系统”指的是大气圈与冰圈（海洋）、冰雪圈、岩石圈和生物圈相互作用的整体，其示意图见图1.1。以后有人建议

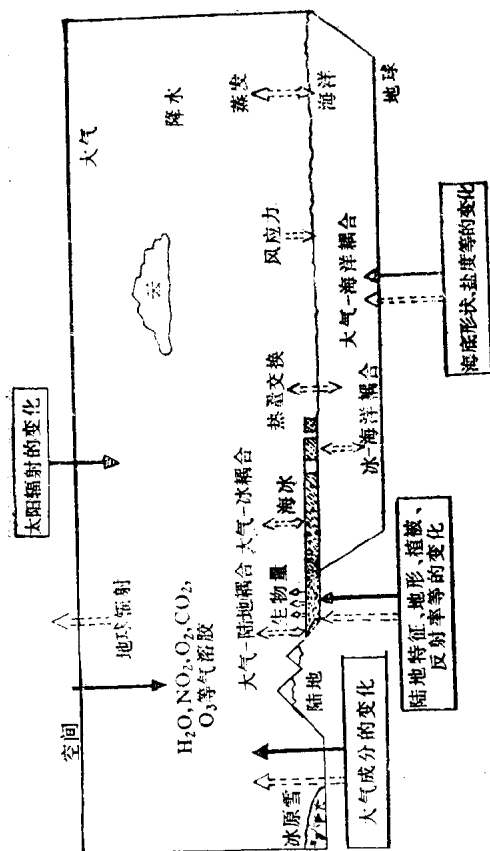


图1.1 大气-海洋-冰-陆地表面-生物量耦合气候系统示意图
 实线箭头是气候变化外部过程的例子，空心箭头是气候变化内部过程的例子（取自美国GARP委员会气候变化小组委员会报告：1974）

应将天文圈加入其中。还有人认为人类以“智慧圈”的形式影响着气候系统。相应地对“气候”的定义也拓展为：气候是天-地-生相互作用下的大气系统的较长时间的平均状态。

相信随着研究的深入，气候的定义还会相应改变，最后有可能回到最老的定义-气候是大气的平均状态。当然，其内涵比起上世纪人们对这几个字的理解要深刻得多。

§2 理论气候学发展简史

理论气候学的研究对象是有关气候形成和气候变化的物理机制。在70年代以前，这一学科分支曾被称为“动力气候学”。这一名称最早是德国学者 Dove (1827) 在100多年前提出的，但正式把它定为一门新的学科分支的是 T. Begeron (1929)。他认为动力气候学的任务是：探讨和研究造成地球上各不同地区的天气特征的大气环流的机制。而其所用方法也局限于挪威学派的气团锋面的分析方法。由此可见当时挪威学派在气象界的统治地位。按照字面理解，“动力气候学”应该是以大气动力学为出发点探索气候形成和变化的机制的学科分支。它应该是“理论气候学”的一部分，而不是全部。事实上，气候理论的研究工作一直是沿着大气动力学和大气热力学两个方向进行的。这两个方面相互渗透，相互补充，相得益彰。理论气候学的发展历史也可划分为三个阶段：

1. 本世纪50年代以前，动力气候学与热力气候学两个方面是平行发展的。前者主要是按照 Begeron 的观点，将气团源地、移动、变性、出现频率、盛行地区和锋面活动的分析方法应用于研究气候；后者主要是研究辐射与气候的关系。如 R. Emden (1913) 从辐射平衡理论出发，成功地解

释了平流层的平均温度。Milankovitch (1930) 对万年尺度的气候振动周期的解释, 是这一时期热力气候学的杰出代表。

2. 本世纪50—70年代是动力气候学大发展的时期。最早的突出成果是1956年 Phillips 用一个简单的斜压准地转模式第一次成功地进行了大气环流的数值模拟。以后逐步发展到用原始方程, 所考虑的物理过程越来越细, 相当成功地模拟出了全球各季平均的温、压、风、湿以及降水场。这些模式对气候形成的模拟是如此之成功, 以致于几乎所有气候理论工作者都被吸引进去了, 甚至使“热力气候学”几乎处于停滞状态。但是, 随着时间的推移, 人们逐渐认识到, 以大气动力学为基础的大气环流数值模式对大气环流的平均状态及时间尺度在两周以内的变化模拟是相当成功的。可是, 对更长时间的气候变化则效果并不理想, 甚至无能为力。这就促使人们不得不回过头来再研究“热力气候学”。

3. 本世纪70年代以来是热力气候学再发展的时期。最初的代表作是1969年 Budyko 和 Sellers 分别提出的能量平衡模式, 以后相继有 Paltridge 的熵模式和 Hasselmann 的随机气候模式等等。这些模式可统称为热力学模式。它们对气候平均状态的模拟几乎可与大气环流模式相匹敌, 而且计算量却要小几个量级。而且在气候敏感性试验方面可能还优于大气环流模式。为什么这些简单的热力学模式在模拟气候变化方面不比动力学模式来得差? 看来是有其哲学背景的。

从时间尺度上分, 大气中存在着慢、中、快过程, 按协同观点是“慢参数役使快参数”。类似于 Hasselmann 提出的, 可将天气过程称为快过程, 气候过程称为慢过程。与动力学模式要将次天气尺度的过程参数化一样, 在热力学模

式中也要将“次气候尺度”的快过程（天气过程）进行参数化。度量天气过程的最重要变数是速度（动能），度量气候过程的最重要变数是温度（内能），二者之间的耗散特征时间之比大致为 5 天:3 个月。故在气候模式中将与风速（或动能）有关的项进行参数化是有必要的、合理的（如 Adem 将平流项参数化为大型扩散项 $\nabla \cdot \nabla T = K \nabla^2 T$ ）。

以大气动力学方程为基础的“动力气候学”的成就集中表现在大气环流模式（GCM）的数值试验上。这方面已有专门的教材，本书不拟涉及这些内容，我们仅从大气热力学方程出发来讲述气候形成与变化的理论。故本书也可称为热力学气候学。

§3 控制气候系统的外参数

地球经历了大约 45 亿年的历史，演变至今成为一个适合于高等智慧动物生存的美丽星体。这当然不是上帝的恩赐，而是由一系列外参数恰到好处地组合所决定的。

首先是太阳的辐射强度和日地平均距离。这两个参数决定了太阳常数（ S_0 ），加上地球表面的反射率（裸岩 $\alpha_s \approx 0.3$ ）就决定了地球上的辐射平衡温度（ $T_s \approx 254K$ ，由 $\frac{S_0}{4}(1 - \alpha_s) = \sigma T_s^4$ 算得）。这个温度值对于形成地球上的生命具有基本的重要性！考虑到大气中所含水汽的花房效应，水汽含量不同，所导致的结果各异。图 1.2 为金星、地球、火星三者的平衡温度随水汽含量的变化图。在金星上，由于平衡温度太高，致使水汽永远不会凝结成水；火星则由于温度过低，水汽直接凝固成冰而不会有液态水出现；只有地球的平衡温度正好适合于液态水存在，而水是生命形成的基础之

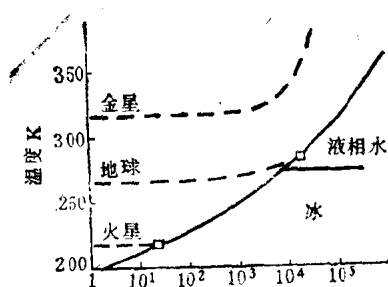


图1.2 金星、地球及火星上表面水汽增加
与表面温度变化关系
(Goodv, 1972)

其次是地球的质量、半径和自转速度。这三者的组合使地球表面的重力加速度（ g ）足够大，使得地球上气体分子所需的逃逸速度远大于在平衡温度下空气分子的运动速度，结果大气层得以存在和维持。

于是，在地球上同时具备阳光、空气和水，使生命得以存在。这三个要素当然也是气候系统形成的基础。不过，气候系统还为更多的外参数所制约。例如受到地球公转和地轴倾斜的控制而有四季，受地表状况（海、陆及地形起伏）的制约而形成多种气候型等等。

苏联学者 Golitsyn 研究了各行星大气的运动状况，得到三组无因次的相似判据。即：

$$\pi_{\omega} = \frac{\omega r}{C_s}, \quad \pi_{\kappa} = \frac{H}{r}, \quad \pi_m = \frac{\tau_0}{\tau_i}$$

其中， ω ：行星旋转角速度， r ：行星半径， $C_s = (KRT/\mu)^{\frac{1}{2}}$ 是声速（ $K = C_p/C_v$ ， R 为通用气体常数， μ 是气体的分子

量), H 是大气层的特征高度, $\tau_* = \frac{r}{C_*} \tau = C_p T_* M_* / Q_A$ 是大气热惯性的特征时间, M_* 是单位气柱的大气质量, $Q_A = \frac{S_0}{4} (1 - \alpha)$ 。

对所有行星 π_* , π_m 均小于 1, 故运动特征的差别主要决定于 π_* (它可称为旋转 Mach 数)。对于金星, $\pi_* < 1$, 对于火星和地球 $\pi_* \approx 1$, 而对于大行星 (如木星、土星) $\pi_* > 1$ 。所以, 火星上的大气环流状况应与地球上的比较接近。

理论气候学的重要内容在于阐述各种外参数在气候形成中的作用, 推算气候系统内部对外参数变化的响应, 弄清其中的物理机制, 从而对气候变化作出合理的预测。

§4 “天候谱”的自然分段

日常谈及的“短、中、长期天气”、“短期气候”、“历

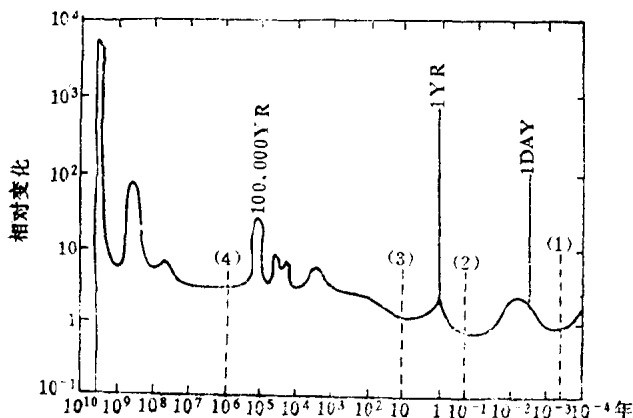


图1.3 气候变化的相对谱曲线
虚线所示(1)一(4)处于相对变化的极小值处 (Saltzman, 1983)

史气候”、“地质气候”等名词，表明气候变化具有阶段性。如何客观地划分这种阶段性？每一阶段的本质特征是什么？Saltzman (1983) 根据 Mitchell 估算的气候序列的相对方差谱（图1.3），取其极小值的位置（分别位于1小时，3个月，10年和 10^6 年）将气候谱分为5段。这就提出了一个划分气候时段的客观标准。但是，各段之间的本质特征是什么？仍有待阐述。下面我们从能量观点来说明之。

1. 大气中动能、凝结潜能和内能的耗散特征时间。

1) 全球大气的总动能约为 8×10^{20} J（焦耳），动能的生成率（平均来说即等于耗散率）为 2×10^{15} W，故动能耗散的特征时间为

$$\tau_{\text{kin}} = \frac{8 \times 10^{20}}{2 \times 10^{15}} \approx 5(\text{d})$$

2) 全球平均的气柱水汽含量为 2.4g/cm^2 ，全球年平均降水量是780mm或 2.14mm/d ，故潜热耗散的特征时间是 $\tau_{\text{L}} = \frac{24}{2.14} \approx 11(\text{d})$

3) 全球大气的内能是 $C_v M_a \bar{T}_a$ （ M_a 为大气质量， $\bar{T}_a$ 为全球平均温度），平均的逸出长波辐射应与吸收的短波辐射相等，即 $Q_A = \frac{S_0}{4}(1 - \alpha_s)$ 。于是，内能的耗散特征时间为

$$\tau_i = \frac{C_v M_a \bar{T}_a}{Q_A} \approx 3\text{个月} \quad (\text{取 } \bar{T}_a = 255\text{K}, \alpha_s = 0.3)$$

根据这三个特征时间可将三个月以内的天候谱划为三段：（1）5天以内（习惯称为短期天气），以动能转换为特征；（2）5—10天（习惯称为中期天气），以潜热转换为

1) d 为单位天的英文表示法——编者注。

特征；（3）10天—3个月（习惯称为长期天气），以内能转换为特征。

2. 为从能量观点讨论三个月以上的气候谱的分段问题，首先要从所测得的各种时间尺度的温度变幅（见表1.1，详细介绍见第二章）推出相应的能通量变幅。

表1.1 “气候谱”的温度变幅（以陆地上的半球平均值为准）

时间尺度	日*	天气周期	节气周期	月	季	年*	年
变幅(°C)	≈10	5—10	≈5	3—5	2—3	10—15	≈0.5

时间尺度	10年	10 ² 年	10 ³ 年	10 ⁴ 年	10 ⁵ 年*	10 ⁶ 年	10 ⁷ 年	3×10 ⁸ 年*
变幅(°C)	0.1—0.3	≈0.5	1—2	3—5	≈10	1—3	3—5	15—20

* 为强迫振荡

考虑全球的平均情况（零维模式），地-气系统的能量平衡方程简化为：

$$E' = H'_s + H'_a = \int_{-\infty}^0 C_s \rho_s \frac{\partial T'_s}{\partial t} dz + \int_0^{\infty} C_a \rho_a \frac{\partial T'_a}{\partial t} dz \quad (1.1)$$

式中“'”号代表扰动值（例如距平值）；E：地-气系统边界上（大气顶或地球深部）的能通量；H：单位柱体的内能变化率；下标“s”表示下垫面；“a”代表大气。

假定外源（例如太阳）对地-气系统的加热，首先是加热地表面，然后再以热传导的方式同时向大气和下垫面内部加热；再假定地表温度扰动是一谐波（频率为 ω ），在无穷高处和无穷远处扰动恒为零，则由热传导方程可解得