



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Elements of Short Period
Climate Predictions

短期气候预测基础

© 孙照渤 陈海山 谭桂容 李忠贤 邓伟涛 曾刚 彭丽霞

短期气候预测基础

孙照渤 陈海山 谭桂容 李忠贤 编著
邓伟涛 曾 刚 彭丽霞

 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 简 介

本书用现代气候概念,总结了短期气候变化及其预测的最新理论研究成果和实践经验,以近40年长期预报教学为基础,构建了现代短期气候预测的理论框架。全书共10章和一个附录,分为五个部分:气候系统及其变化和预测;气候系统各个圈层的变化特征及其与短期气候变化和预测的关系;短期气候预测方法介绍,包括物理统计学方法、数值方法和评分方法,这部分还重点介绍了中国夏季降水的预测方法;年代际气候变化和人类活动对气候变化的影响简介,作为短期气候预测的背景;本书还包括了9个实习和相应的计算机程序。每一章都附有复习思考题。

本书可作为高等学校大气科学类专业及相关专业学生的教科书,也可供气象、海洋、水文、地理、环境、农业、林业、航空和航海等有关部门的专业人员、师生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

短期气候预测基础/孙照渤等编著. —北京:气象出版社,2010.10

ISBN 978-7-5029-5064-4

I. ①短… II. ①孙… III. ①短期天气预报
IV. ①P456.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 195621 号

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

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇 王萃萃

封面设计:博雅思企划

责任校对:永 通

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:720 mm×960 mm 1/16

字 数:510千字

版 次:2010年11月第1版

定 价:46.00元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:24.5

印 次:2010年11月第1次印刷

印 数:1~5000册

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

前 言

我校建校初期就在天气动力学专业开设了长期预报课程,以已故的中国工程院院士章基嘉先生为主,编写出版了相应的教材。该课程一直是我校大气科学专业的主干必修课程之一,为形成我校大气科学专业的特色做出了重要贡献。

20 世纪 70 年代后期以来,气候变化及其预测引起了世界各国政府和科学家的高度重视,取得了突破性的研究成果,但是缺乏能够反映新成果的教材。本世纪之初,为了完成中国气象局的培训任务,我们编写了一本短期气候变化及其预测的讲义并多次应用。随后,根据本科生的教学要求,又听取了各方面的意见,反复修改,写成了这本教材,在近 10 年的教学实践中受到好评。

气候变化及其预测的研究成果涉及诸多方面。在一本主要为大学本科生使用的教材里如何构建课程框架和取材是一个很困难的问题。这需要考虑三个问题:培养目标和学时要求;学科自身的理论体系;实际应用的要求。我们根据国内外气候研究的进展和我国气候预测的现状,为本教材构建的框架是:在现代气候基本概念和气候变化理论的基础上,以短期气候变化和预测为主要内容。

为了既体现出学科自身的特点,又符合大学本科教材的要求,我们广泛听取了校内外专家学者的意见,提出了教学大纲和内容安排,几经修改,最后确定本教材共设 10 章。其中第 1 章讲述气候、气候系统、气候变化和气候预测的基本概念和性质。第 2~5 章分别讲述气候系统各成员的性质及其相互作用,并讨论了在短期气候预测中的应用。第 6~9 章讲述了短期气候预测方法,包括统计学方法、动力数值方法和统计与动力相结合的方法;作为各种方法的综合应用,特别介绍了我国夏季降水的成因和预测;还介绍了预测评分方法。第 10 章介绍了年代际和更长时间尺度的气候变化以及人类活动对气候变化的影响,作为短期气候变化及其预测的背景。最后的附录给出了 9 个实习和计算机程序。每一章还给出了复习思考题。

对于这本教材的框架和内容安排,作者非常感谢所有关心和支持这本书的专家学者,特别感谢教育部大气科学教学指导委员会的各位专家学者,在宜昌和福州的两次会上他们都提出了非常重要的建议。我校副校长管兆勇、陆维松、江志红三位教授,大气科学学院领导郭品文、徐海明和李栋梁三位教授,王盘兴、吴洪宝等教授都给出了很好的建议,作者衷心地感谢他们。

本教材以孙照渤为主先后邀请了朱伟军、闵锦忠、陈海山、谭桂容、李忠贤、邓伟涛、曾刚、彭丽霞、唐卫亚、秦正坤等参加了编写,刘向文,顾伟宗等也为这本教材做了很多工作。最近的这一稿是由孙照渤、陈海山、谭桂容、李忠贤、邓伟涛、曾刚、彭丽霞共同完成的。

本书可作为大气科学专业及相关专业学生的教科书和研究生的教学参考书,也可供气象、海洋、水文、地理、环境、农业、林业、航空和航海等有关部门的专业人员、师生和研究人员参考。

感谢大气科学学院和教务处的领导与同事们对本书的关心和支持。感谢气象出版社李太宇编审在出版过程中给与很多鼓励和帮助。

虽经多次修改,但是作者水平有限,错误和不足在所难免,欢迎读者和各方面的专家学者提出批评意见。

南京信息工程大学 孙照渤

2010年8月

目 录

前 言

第 1 章 气候系统及其变化和预测	(1)
1.1 气候和气候状态	(1)
1.2 气候系统及其性质	(3)
1.3 气候变化及其原因	(11)
1.4 气候预测的性质	(19)
1.5 短期气候变化及其预测	(23)
复习思考题	(24)
第 2 章 大气环流的基本状况	(25)
2.1 控制大气环流的基本因子	(25)
2.2 平均水平环流	(31)
2.3 平流层大气环流的若干问题	(35)
2.4 东亚大气环流和季风	(43)
2.5 大气环流表征方法	(49)
复习思考题	(61)
第 3 章 大气低频变化及其遥相关	(62)
3.1 大气低频变化的基本特征	(62)
3.2 大气遥相关	(66)
3.3 不同时间尺度的低频变化	(71)
3.4 大气低频变化的可能原因	(78)
复习思考题	(81)

第 4 章 海气相互作用与短期气候预测	(82)
4.1 海洋的基本特性	(82)
4.2 ENSO 及其对气候的影响	(94)
4.3 不同海区海温对东亚气候的影响	(106)
4.4 海冰对气候变化的影响	(110)
4.5 海洋资料在短期气候预测中的应用	(117)
复习思考题	(119)
第 5 章 陆面过程与短期气候预测	(120)
5.1 陆面过程在气候预测中的重要性	(120)
5.2 土壤湿度和土壤温度的影响	(125)
5.3 植被的影响	(131)
5.4 积雪的影响	(135)
5.5 陆面资料在短期气候预测中的应用	(143)
复习思考题	(144)
第 6 章 气候模式及其在短期气候预测中的应用	(145)
6.1 气候模式	(145)
6.2 当代气候模拟	(166)
6.3 气候敏感性试验	(179)
6.4 短期气候的数值预测	(186)
复习思考题	(193)
第 7 章 短期气候预测的物理统计方法	(194)
7.1 统计预测方法	(194)
7.2 动力—统计预测方法	(207)
7.3 集成预报	(215)
7.4 短期气候预测业务系统	(219)
复习思考题	(222)
第 8 章 中国东部夏季降水预测	(223)
8.1 中国夏季降水的主要特征及其三类雨型	(223)
8.2 影响中国汛期降水的主要物理因子	(232)

8.3 中国夏季降水的预测	(247)
复习思考题	(255)
第9章 预测评估方法	(256)
9.1 预测评估方法	(256)
9.2 预测评估方法在短期气候预测中的应用	(261)
复习思考题	(263)
第10章 年代际与长期气候变化	(264)
10.1 年代际气候变化	(264)
10.2 长期气候变化	(278)
10.3 人类活动对气候变化的影响	(285)
复习思考题	(293)
参考文献	(294)
实 习	(316)
实习1 大气环流状况的表征	(316)
实习2 大气环流分型	(318)
实习3 大气遥相关	(319)
实习4 预测因子的选择(1)——合成分析方法	(320)
实习5 预测因子的选择(2)——奇异值分解方法	(322)
实习6 我国夏季降水雨型的预测	(323)
实习7 夏季区域降水的定量预测	(326)
实习8 数值模式结果在短期气候预测中的应用	(328)
实习9 预测评分	(329)
附 录 实习参考程序	(331)

第 1 章 气候系统及其变化和预测

1.1 气候和气候状态

1.1.1 气候概念

长期以来,气候被看作表征地球大气的一些基本要素的平均值,一般认为 30 年的平均值就可以表征气候的基本特征了,并且认为这些平均值是基本稳定的。但是,随着科学的发展和观测资料的增加,人们发现气候是变化的,不是一个定常的物理特征量。经典的气候概念受到了挑战,气候概念得到了扩展。

经典气候概念受到的挑战主要是在两方面:一方面是气候平均值概念,大量观测事实表明,30 年平均的气候平均值是变化的,是不稳定的,这说明气候变化在时间域上是多尺度的;另一方面人们认识到气候变化与海洋、陆地、冰雪、生物和人类活动相互影响,引起了全球变化,在空间上具有全球性特点,并与区域性的气候变化相互影响,形成了气候系统概念。

现代气候概念是指气候系统在一个时间段内的平均状态及其变化或变率。气候一般可用气候系统的平均值和高阶矩统计量来表示,例如方差,协方差等。这些统计量表示了一段时间内气候系统的结构和行为。

常用的表示气候的要素有温度,降水,海平面高度等。

1.1.2 气候状态

对于大气而言,即使外强迫稳定不变,内部系统在时间和空间上也总是处在随机变化中。因此,可以把对应于同一外强迫作用下的所有可能的气候变化考虑为一个大的集合。对于固定的外强迫,可以假定统计量的极限值是唯一的,而且是各态历经的,所以就能用时间平均代替总体平均,那么我们就可以用平均值及方差、协方差等高阶矩统计量构成的一组总体上的平均量,连同对外部系统状态的描述来定义气候状态(Leith,1978)。

如果我们按传统把大气看作内部系统,就能按照大气的状态及海洋、冰雪圈、陆

地和其他外强迫的平均条件来定义气候状态。因此,对于大气来说,平均时段必须至少超过天气系统的平均生命期。据此,我们就可定义一个月、一个季度、一年、十年等的气候状态。传统上用 30 年(由世界气象组织确定)的平均值和高阶矩来确定气候状态。这对大气来说虽是一个特例,却仍是一个有用的概念。

对于不同的外界条件,又可以得到内部系统的另一个不同的气候状态。因此,我们可以定义气候变化为同一种类的两个气候状态之间的差异。例如,两个典型的八月份的气候状态之差异、两个典型的十年的气候状态之差异,等,这种差异既包括平均值的差异,也包括高阶矩的差异。而气候距平则定义为一个给定时段的某个气候状态与同等状态的总体之偏差。

气候状态是不断变化的,气候变化是指气候平均状态(平均值)和离差(方差)两者中一个或两个一起出现了统计意义上显著的变化。平均值变化,表明气候变化进入另一个气候态;离差,则表示气候变化幅度。离差值增大,表明气候变化的幅度增大,气候状态不稳定性增加,气候变化敏感性也增大。图 1.1.1 以温度为例说明气候变化与平均值变化和离差值变化的关系。假定某一地区或地点的温度时间平均值(月、季或年)服从正态分布,则该地区的温度平均值在多年平均温度处出现的概率最大,偏冷和偏热的天气出现的概率较小;极冷或极热的天气(一般在 2 倍标准差 σ 以上)出现的概率很小,称为极端气候事件。假如由于气候变暖的作用,平均值增加(图 1.1.1a),在离差不变的条件下,这时偏热天气出现的概率明显增加,并且极热天气出现的概率也明显增加,也就是说极端高温气候事件增加。图 1.1.1b 则说明平均值不变,但离差增加后,也会造成极端气候事件(偏冷或偏热以及极冷或极热)出现的概率增大。图 1.1.1 说明,对于一个服从正态分布的气候变量来说,气候变化可以由气候平均值或离差的变化描述,当其中的一个量变化而另一个不变化的时候,也能说明气候变化与极端气候事件出现的关系。但是应该指出,当平均值和离差同时变化的时候,气候变化与极端气候事件的关系就复杂得多了,当然,大多数气候变量并不服从正态分布,情况就更复杂了。

对天气和气候的研究表明,控制天气和气候变化的物理规律本质上是相同的。然而,方程在天气、气候这两类问题中的应用却是有区别的。对于天气预报,大气几乎依惯性运动,缓慢作用的边界条件可以忽略。例如,在一周以内的天气预报中,海表温度和雪、冰盖的扰动可不予考虑。可是,对于气候变化研究来说,当预报时间拉长时,这些外界条件的变化就会渐渐地影响大气,不仅要考虑大气的内部作用,还要考虑大气与外部系统之间复杂的相互作用,因此,对于气候变化来说,外界强迫作用就变得非常重要了。另外,对于气候问题来说,关心的是时间的平均值,而不是某一瞬时的大气状态。

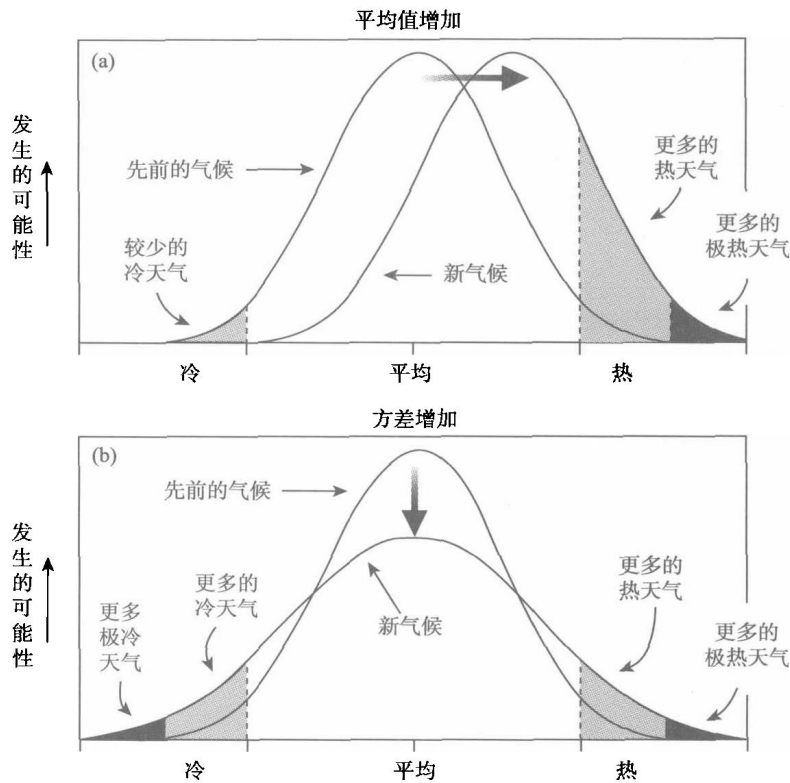


图 1.1.1 气候变化与气候平均值(a)和变化幅度(b)变化之间的关系
(横坐标表示温度,纵坐标表示出现概率,引自 IPCC 2001)

1.2 气候系统及其性质

气候系统的提出是气候学研究进入一个新阶段的重要标志之一。正如我们已看到的,气候系统是由五个主要分量构成的综合系统,这五个相互作用和相互联系的分量是:大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈。在这个意义上,人们不仅要研究大气内部过程对气候变化的影响,同时也要考虑海洋、冰雪、地表以及生物状况对气候变化的作用。即把气候变化视为气候系统的总体行为。上述各子系统之间的各种物理、化学以及生物过程的相互作用,就决定了气候的长期平均状态、变化和变率的情况,以及各种时间尺度的变化。

1.2.1 气候系统分量

1974 年由世界气象组织和国际科学联盟理事会联合召开的国际讨论会所提出的气候系统的概念可以用图 1.2.1 表示。它既包括了大气和海洋等子系统内部的各

种过程,例如大气和海洋环流、大气中水的相变以及海洋中盐度的变化等,也反映了各个子系统间的相互作用,例如海—气相互作用、陆—气相互作用、冰—海相互作用、大气—冰雪相互作用以及气候(大气)—生物相互作用等。越来越多的事实表明,上述各种相互作用过程对气候及其变化的影响是复杂的,也是十分重要的。

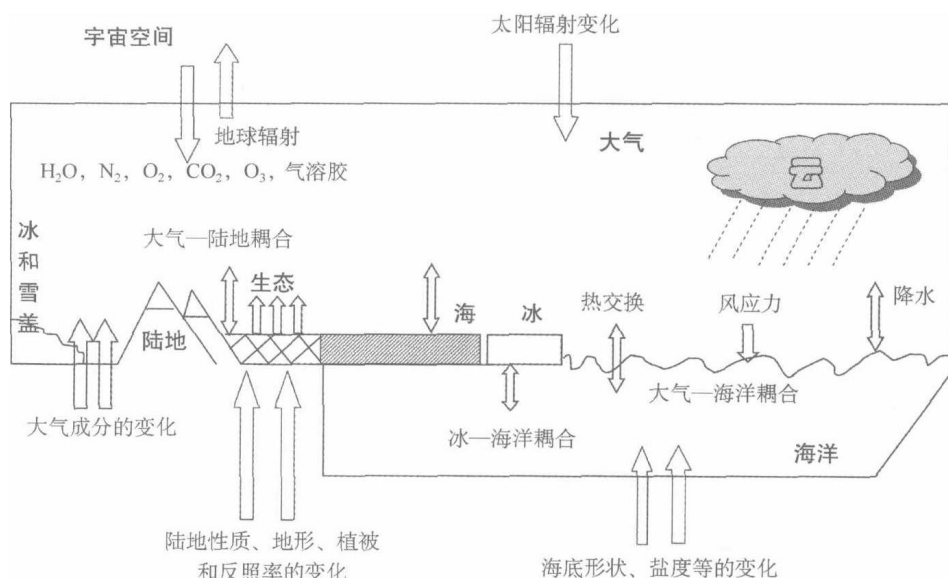


图 1.2.1 气候系统示意图

大气运动及气候的状态和变化都同太阳辐射有着非常重要的关系,因为太阳辐射为大气和海洋的运动以及生物活动提供了最基本的能源。太阳活动等所引起的太阳辐射的改变也必然对地球气候及其变化发生重要影响。因此,气候系统还应包括天文因素(主要是太阳活动)的影响在内。

下面我们简单介绍气候系统的各个分量。

(1) 大气圈

地球大气圈是指分布在地球表面上薄薄的一层气体混合物。在垂直方向上,大气质量的 99% 以上分布在仅仅 30 km 的高度内,在水平方向上,大气的水平尺度则以南北极之间的距离表示,具有 20 000 km 的量级。可以看出,大气圈的厚度相对于水平尺度来说是地球表面非常薄的一层。然而,尽管大气圈相对来说很薄,并且相对气候系统的其他成员来说具有小的质量和厚度,它却是气候系统的重要分量,其特性在时间和空间上多种多样,并具有很大的变率。可以把大气圈分为几层,各层在成分、温度、稳定性及能量学等方面都各有差异(图 1.2.2),由地表面开始,主要有对流层、平流层、中间层和热层,每两层之间由称为顶的隔层(如对流层顶)分开。直到中间层顶,就氮、氧和其他惰性气体的浓度而言,大气的成分实际上是均匀的。在那些

变化的成分中,水汽主要分布在对流层低层,臭氧分布在平流层中层,二氧化碳在中间层顶以下是充分混合的。大气成分由于诸如液态和固态水(云)、尘粒、硫酸盐气溶胶及火山灰等各种悬浮物的存在而进一步复杂化了。这些悬浮物的浓度也随时间和地点变化。

大气圈对外部强迫的响应时间比气候系统中其他分量短得多。所谓响应时间,指的是施加一个小扰动到系统的边界条件或边界强迫上,该系统重新平衡到一个新状态所需要的时间。大气的响应时间达几天到几周的量级。响应时间短主要是由于大气有相对大的可压缩性,小的比热容和密度。这些特性使大气更易于流动,也更不稳定。大气中存在大尺度环流,如中纬度地区存在天气系统等涡旋运动,在行星边界层和急流附近存在随机、湍流运动。重力作用使大气分层,密度最大的层在地球表面。重力作用还使大气在垂直方向上处于准静力平衡状态。

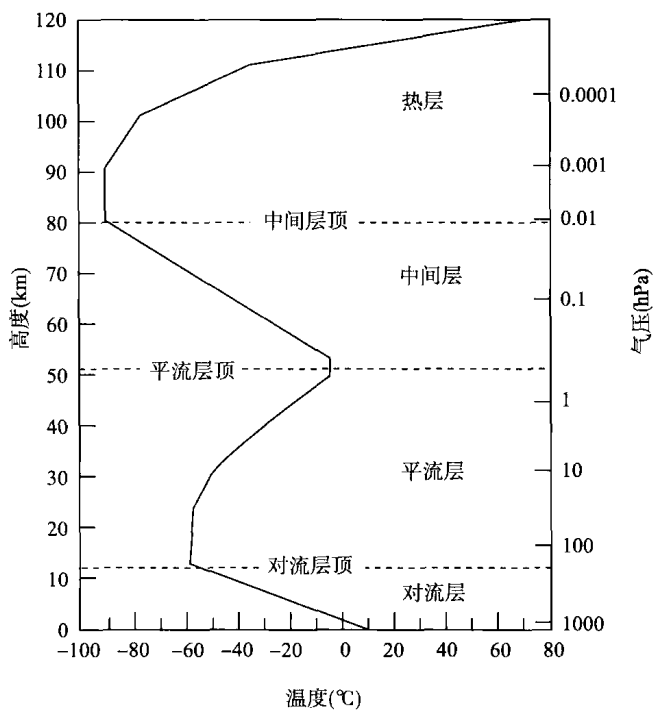


图 1.2.2 理想大气温度垂直廓线及大气垂直分层

大气运动发生在旋转的地球上,通过太阳的不均匀加热使大气运动更为复杂。因此,大气运动的研究本质上是在旋转影响下的流体运动问题。由于除了地球旋转外,还有诸如不均匀的热力学和力学表面条件等许多因子影响,结果使得大气运动成为一个复杂的过程。然而,当我们忽略流动中不规则的细节时,就发现大气运动明显存在全球规模的有组织的倾向。在对流层内,主要特征是低纬度为东风气流,中高纬为西风

气流,具有行星尺度特点,而且一个地区与另一个地区之间的大气运动有相互联系。

为了演示大气中各种过程的巨大差异性及其不同尺度运动的相对重要性,在图 1.2.3 给出了周期从数秒到几年的动能谱。大部分的动能集中在低频段即在 10^0 d^{-1} 、 10^{-1} d^{-1} 附近及 10^{-2} d^{-1} 至 10^{-3} d^{-1} 之间。第一、三个峰值分别与年循环、日循环相联系,而第二个峰值(周期为几天至几周)与发生在中纬度沿极锋的大尺度瞬变扰动相联系,频率为约 10^3 d^{-1} 的相对极大值是由于小尺度的湍流运动所致,这些湍流运动与分子摩擦一起被包括在内能中。因此,在环流的动能中不包括这种尺度的贡献,尽管湍流运动在大气和海洋边界层中很重要。

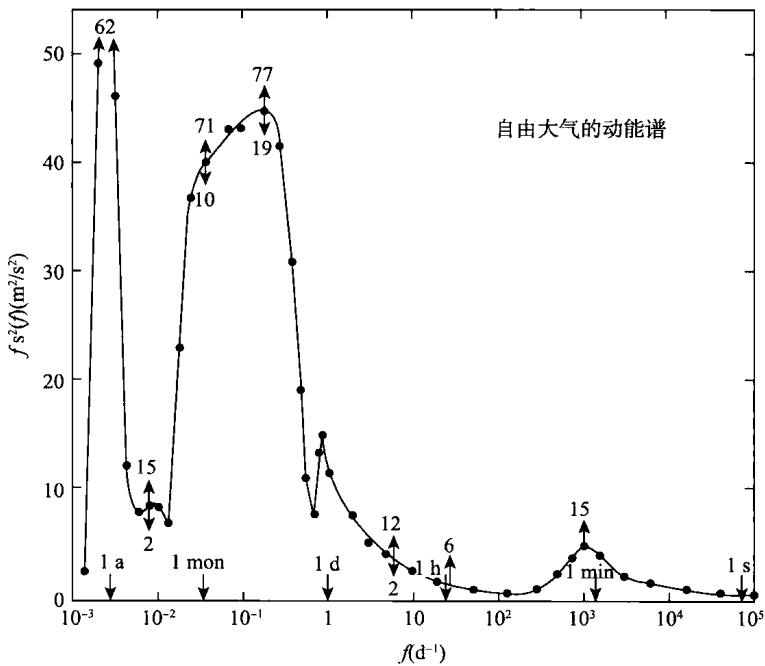


图 1.2.3 从 10^{-3} d^{-1} 到 10^5 d^{-1} 的大气动能谱 (Peixoto 和 Oort, 1995)

(2) 水圈

水圈由分布在地球上的所有液态水构成。它包括海洋、内海、湖泊、河流及地下水。对于气候研究,海洋是水圈中最重要的,它们覆盖了约三分之二的地球表面。结果是到达地球的太阳辐射的大部分落在海洋上并被海洋所吸收。鉴于海洋有大的质量和比热容,它们构成一个大的存储器来储存能量。海洋对能量的吸收引起的海表温度变化比陆地上的温度变化要慢。由于海洋有大的热惯性,它对温度的变化起着缓冲器和调节器的作用。因为海洋的密度比大气大得多,它有更大的机械惯性和更显著的层结。海洋的顶层部分是活动性最强的,它包含厚度达 100 m 量级的表面混合层。

比起大气,海洋有更缓慢的环流。它构成了大尺度准水平环流圈,存在海流和缓

慢的温盐环流(即与温度、盐分变化相联系的密度变化所引起的翻转)。在更小尺度上,环流呈现为扰动状,但湍流比大气中要弱得多。海洋的响应时间或张弛时间变化大,在顶层的混合层内为数周到几个月,在几百米深的斜温层响应时间达几个季度,而在深海甚至达几个世纪到几百万年。在热带地区,由于存在更强的直射太阳辐射,在海洋中形成了能量的盈余,海流则把存储的一部分能量从热带输送到较冷的中纬度和极区。

大气和海洋有很强的耦合。通过海气交界面能量、质量和动量的交换,海气相互作用发生在不同时空尺度上。这可以从海洋性气团到大陆性气团的变性看出来。通过蒸发进入大气中的水汽交换为水循环提供了水蒸气及部分能量,导致凝结、降水和径流。另一方面,降水强烈地影响海洋盐度的分布。

在某些地区及某一时间内,当海洋和大气的内涵特性(如温度和盐度)的梯度很大时,大气和海洋可存在各种内部相互作用。

湖泊、河流和地下水是水分循环中大陆分支的基本要素,因此也是全球气候中的重要因子。它们还影响区域性和局地性气候。例如,在靠近海岸的地方,河流是影响海洋盐度的重要因子。

(3) 冰雪圈

冰雪圈由地球表面积存的大量的雪和冰构成。它包括格陵兰和南极地区范围很广的冰原,以及其他的大陆冰川、雪原、海冰及永冻带。冰雪圈是地球上最大的淡水储存库,但它在气候系统中的作用主要在于其对太阳辐射的高反射率和很低的热传导性。大陆雪盖和海冰的季节性变化可以导致大陆地区的海洋表面混合层的能量收支有较大的年变化,有时也造成较大的年际变化。除了季节变化外,冰雪圈较大的变化还可以在更长的时间尺度上发生。由于雪和冰对太阳辐射的反照率高,而海冰相对于海水而言,其热扩散性又较低,在高纬度地区雪原和冰原均可充作其下层的陆面和水面的热绝缘层,阻止陆地和水体向大气中散失热量。近地面大气的强冷却作用使大气非常稳定,阻止了对流的发生,从而可形成更冷的局地性气候。

虽然大的陆地冰原不能以足够快的变化来影响季节或年际时间尺度的气候,在高达数万年的更长时间尺度的气候变化中,例如发生在更新世的冰期和间冰期中,它起了主要作用。冰川作用可使海平面发生变化,强度可达 100 m 甚至更多,这将影响大陆的形状和边界。由于冰原的质量和致密性很大,它们依自身动力学条件按很慢的速度移动,有时在海洋上的冰原可以破裂形成冰山,在重力作用下高山冰川慢慢下移,在几个世纪的进程中可以扩展和消亡,当然这取决于局地降雪的积累及温度条件。

(4) 岩石圈

岩石圈包括大陆和海床,其大陆地形可以影响大气运动。岩石圈的上层为活动层,那里的温度和含水量可随大气和海洋的运动而变化。除了这一层外,岩石圈的响

应时间是气候系统所有分量中最长的,在本书所考虑的时间尺度内,认为活动层以下的岩石圈是不变的因子。

岩石圈与大气之间,通过质量、角动量、感热的输送以及通过大气边界层的摩擦对动能的耗散,有很强的相互作用。质量输送以水蒸气、降水和降雪形式为主,其次还通过其他粒子和尘埃的形式输送。火山从岩石圈向大气中喷射物质和能量,增加了空气的混浊度。增加的颗粒物质及喷射出的可在平流层中凝聚的含硫气体一起构成了所谓的气溶胶。它们可以显著地影响大气的辐射平衡,从而对地球的气候起重要作用。岩石圈和大气之间也有大尺度的角动量输送,这是通过大气与大陆地形之间的力矩作用实现的。

大陆岩石圈活动层内部的各种过程对气候及其变化也具有重要的影响。

(5)生物圈

生物圈由地面植被、大陆动物群、海洋的植物及动物群构成。植被改变了地表粗糙度、地表反射率、蒸发、径流及土壤的比热容。而且,通过光合作用和呼吸作用,生物还可以影响大气和海洋的二氧化碳平衡。整体来讲,生物圈对大气圈的气候变化是敏感的。人们正是通过过去这种气候变化在化石、树木年轮、花粉等中所留下的信号来获得地球古气候信息的。

特别应该指出人类还通过工业、农业、城市化、污染等活动与气候系统发生相互作用,因此,人类活动影响气候变化的研究受到了各国政府和科学家的重视。

气候系统各个分量之间有复杂的相互作用,图 1.2.1 给出了气候系统之间存在的相互作用过程。

1.2.2 气候系统的性质

气候系统的各分量都是非均匀的热力学—动力学系统。它们可以用化学成分、热力学及动力学状态加以描述。一般地说,化学成分可以用化学元素及分子式来表示,例如大气是由氮(N)、氧(O)、氢(H)、碳(C)等元素组成,热力学状态可以用温度、气压、比湿、比能、密度和盐度等来表示,而力学状态是由另一些表征运动的变量,例如力、速度和加速度等来表示。

组成气候系统的每个子系统都是开放的非孤立系统。作为一个整体,全球气候系统从能量角度而言是非孤立系统,对于与外层空间的物质交换而言则是一个封闭系统。大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈构成了一个由复杂物理过程联系起来的串级系统。这些物理过程包括穿越边界的能量、动量和物质输送,并且存在大量的反馈机制。

气候系统各不同分量的变化是多时间尺度的。在不同子系统之间时间尺度变化很大,甚至在同一个子系统内变化的时间尺度差别也很大。大气边界层内的时间尺度从几分钟到数小时。自由大气的时间尺度由数周到几个月。海洋表面混合层的时

间尺度是数周到几年。对于深海水则从几十年到几千年。海冰是几周到几十年。内陆水和植被由几个月至几百年。对冰川来说其时间尺度为世纪量级,而冰原的时间尺度是几千年甚至更长。地壳构造现象的时间尺度在千万年的量级。

气候系统可以看作内部系统和外部系统组成。由于气候系统内部的复杂性以及不同的系统有不同的响应时间,为方便起见,可依序考虑内部系统。首先,总把那些具有最短响应时间的系统看成是同一级的内部系统,于是就可把所有其他分量看成是外部系统。例如,对于由数小时到几个月的时间尺度,大气可以看成是气候系统的唯一内部分量,而海洋、冰雪、陆地表面、生物圈都可处理成边界条件和外强迫。对于由数月到几百年的时间尺度,气候内部系统必须包括大气和海洋,也应考虑雪盖、海冰和生物圈。对于时间尺度超过几百年的气候变化研究,还必须再加上整个冰雪圈和生物圈,而把岩石圈看成是外强迫。

图 1.2.4 给出了气候系统不同分量的时间尺度示意分布。该图还列出了一些能在气候系统中产生扰动的外部过程。因而,整个气候系统必须看成是连续演变的,在时间上系统的某些部分领先,而另一些部分则滞后,各个子系统之间的强非线性相互作用在许多时间和空间尺度上都可以发生。因此,气候系统的各个子系统之间并不是永远处于相互平衡中,即使在各个子系统内部也不是永远处于平衡中。特别重要的是各个子系统存在相互反馈作用,这在后面将要介绍。

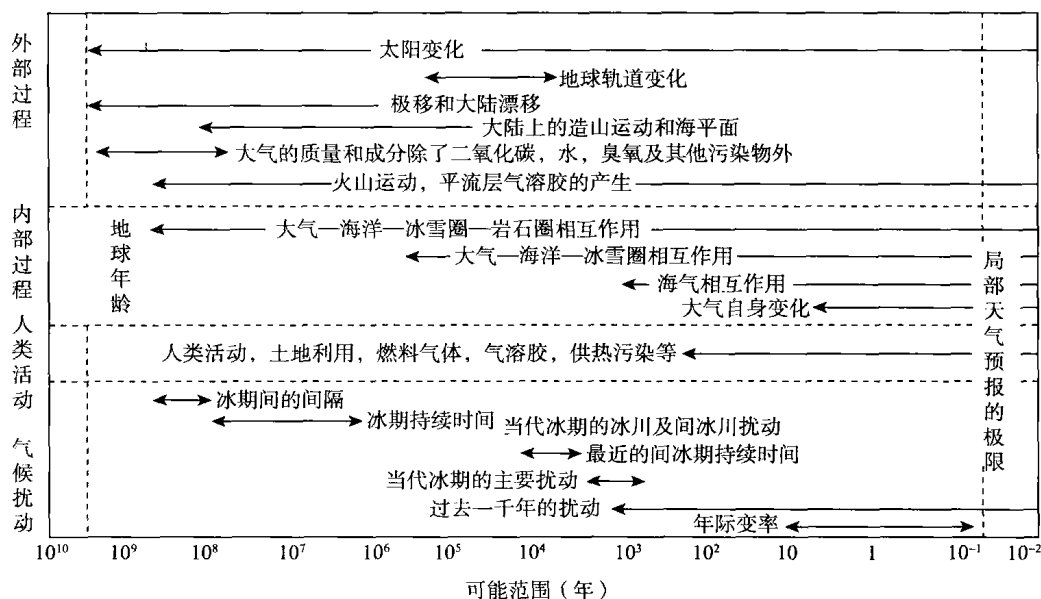


图 1.2.4 在 10^{-2} 年至 10^{10} 年范围内, 气候系统不同分量及其某些外部强迫因子的特征时间尺度 (根据美国国家科学院 1975; Bergman 等, 1981 资料重新绘制)