

大气环流概论

李丽平 秦育婧 编著
智海施宁 王盘兴



科学出版社

大气环流概论

李丽平 秦育婧 编著
智海 施宁 王盘兴



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书概述了大气环流学发展历史和研究方法。重点介绍了全球月(季)平均风、压、温场的基本观测事实及相互联系,它们随纬度、高度、季节的变化及北、南半球间的差异,初步分析了它们的物理成因。用动力诊断方法,从大气中的角动量平衡、热量与水分平衡、动能平衡与能量循环等方面讨论了大气环流维持机制。结合中国科学院大气物理研究所两个大气环流模式,初步介绍了大气环流研究的数值模拟方法,还概要介绍了大气环流研究中的转盘试验方法。另外,本书重视培养学生的分析能力,对常用的大气环流基本分析方法,包括环流分解、谐波分析和球函数分析、平均经圈环流的质量流函数计算等方法,给出了简要介绍并编写了实习。

本书适用于大气科学各专业及地学相关专业本科教学,也可供相关专业研究生、科研工作者及业务人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气环流概论/李丽平等编著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-037694-7

I. ①大… II. ①李… III. 大气环流-概论 IV. ①P434

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第118260号

责任编辑:伍宏发 曾佳佳/责任校对:韩 杨

责任印制:赵德静/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张:9 1/2

字数:190 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

大气环流学是大气科学中研究行星尺度大气运动基本状态、形成原因和维持机制的分支，本书概要介绍大气环流学基础知识和研究方法，故取名为“大气环流概论”。大气环流既是中短期天气变化的背景，又是区域气候异常的直接原因，故大气环流学是大气科学重要分支；又因为在组成气候系统的五个圈层（大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈）的相互作用中，大气环流扮演了最活跃的角色，因而大气环流学是地学许多学科相关专业关注的焦点。所以，在大气科学和地学相关专业开设“大气环流概论”课程十分必要。

本书是南京信息工程大学（原南京气象学院）大气环流学课程的教学成果。自1981年上半年章基嘉先生为气象学系天气动力学专业1977级本科生开设“大气环流”课程以来，该课程作为我校本科教学独立课程设置的历史已延续30余年。此期间，该课程教学经历了较大变动，学时数由早期的64学时、56学时逐渐稳定为1987年后的34学时，授课范围则已从天气动力学专业拓展至气候学、大气物理学、海洋学等专业。章基嘉先生（1980，1991）、王盘兴教授（2005，2006）先后编写过该课程的讲义，许多教师参与了该课程的教学实践。

为适应当前本科教学的需要，在前人工作基础上，李丽平副教授按教学大纲要求，主持了本书的编写工作，秦育婧、智海、施宁博士参与了有关章节的写作，王盘兴教授为全书的选材和定稿做了大量工作。本书的编写以大气环流学经典著作为指导，兼顾该分支的最新发展，较大幅度更新了图表资料，充分考虑了教学需要。但大气环流学是一门涉及面宽、发展迅速和相对艰深的学问，受作者学识限制，本书不足与错误之处在所难免，恳请读者批评指正，以便改进。

雷兆崇教授对本书第6章提出了宝贵修改意见，倪冬鸿编审为全书文字、公式、图表编排做了大量工作，谨致谢。博士研究生孙晓娟、杨玮等完成了本书部分计算和图表的制作，在此一并致谢。

作 者

2013年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大气环流与大气环流学	1
1.2 大气环流学的发展简史	1
1.3 大气环流学的研究方法	7
第 2 章 大气环流的基本观测事实	8
2.1 基本控制因子和基本制约关系	8
2.2 环流分解	13
2.3 平均纬向环流和平均经圈环流	17
2.4 平均水平环流	24
2.5 平均温度场	31
2.6 地气系统辐射收支及热量交换	36
2.7 总结	41
第 3 章 大气中的角动量平衡	42
3.1 角动量及相关物理定律	42
3.2 角动量连续方程	43
3.3 极冠区大气的角动量倾向方程	44
3.4 角动量平衡方程	47
3.5 P 、 F 诊断结果	48
3.6 m 诊断结果	50
3.7 完成角动量输送的环流系统	60
3.8 总结	63
第 4 章 大气中的热量平衡与水分平衡	64
4.1 热量	64
4.2 热量倾向方程	65
4.3 极冠区全热量平衡方程	65
4.4 纬向平均温度场的维持机制和诊断结果	66
4.5 大气中的水分平衡	78
4.6 总结	80

第 5 章 大气中的动能平衡与能量循环	81
5.1 动能方程	81
5.2 有效位能方程	83
5.3 大气热机效率及特征速率估计	85
5.4 全球纬向平均动能 K_e 和涡动动能 K_e 方程	86
5.5 全球纬向平均有效位能 A_e 和涡旋有效位能 A_e 方程	88
5.6 诊断分析结果	89
5.7 总结	90
第 6 章 大气环流数值模拟简介	91
6.1 理论基础与方法发展	91
6.2 数值模式简介	92
6.3 数值试验举例	100
6.4 总结	113
第 7 章 转盘试验简介	114
7.1 转盘试验装置	115
7.2 轴对称极赤温差下旋转流体自由运动的模拟	115
7.3 转盘试验的意义	119
7.4 总结	119
参考文献	120
附录 气候位势高度场波谱定量分析	122
1 谐波分析方法及应用	122
2 球函数分析方法及应用	126
实习一 北半球 1 月、7 月 500hPa 气候高度场定常波强度分析	135
实习二 1 月、7 月 40°N 500hPa 等压面气候高度场谐波分析	137
实习三 4 月、10 月平均经圈环流质量流函数计算及分析	140
复习思考题	143

第1章 绪 论

1.1 大气环流与大气环流学

1) 大气环流

大气环流一般是指大范围大气运行的现象。它的水平空间尺度在数千千米以上，垂直空间尺度在10km以上，时间尺度是1~2日以上。这种大尺度大气运行的基本状态不但影响天气的类型及其改变，也影响气候的形成；而它们的年际变化（即环流异常）与气候异常有直接关系。因此，大气环流研究对大气科学许多分支具有重要的理论和应用价值。

2) 大气环流学

大气环流学是大气科学中研究大气环流的分支。但是，由于大气环流概念具有极其广泛的内涵，大气科学不同分支的专家对大气环流是什么存在不同认识。例如，气候学专家倾向于认为它是指大范围大气长时期的平均状态；天气学专家认为它是指全球范围或某些较大区域里大气的瞬时变化；短期气候预测专家认为它是指由永久性、半永久性大气活动中心，季风以及赤道辐合带，高空急流，行星尺度波动等系统构成的整体。这种认识分歧导致至今难以对大气环流学做出严格的界定。

我们从大气环流学发展历史及经典著作的主流出发，同时考虑本书作为大气科学本科生及相关专业研究生教材使用时的要求，将大气环流学理解为“研究行星尺度大气运动的基本状态、形成原因和维持机制”的大气科学分支。

1.2 大气环流学的发展简史

洛伦茨（Lorenz, 1976）认为：假如一个理论在动力学推理上没有毛病，并且和提出这个理论的时代所具有的观测事实相符合，则应当认为它对当时的知识做了有价值的贡献。1976年，Lorenz在美国气象学会第56届年会上作的“关于大气环流主要思想的发展”的演讲，将之前的大气环流学发展归结为四个阶段：单圈环流阶段，三圈环流阶段，确立大型涡旋作用阶段，阐明大型涡旋成因阶段。下面简要列出四个阶段的观测基础和主要理论工作。

1) 单圈环流阶段 (1686~1836 年)

观测基础：航海发现低纬三大洋上存在信风。

理论工作：

早在 1686 年，英国天文学家哈雷 (Halley) 就曾尝试对信风成因给出说明。Halley 注意到在分隔开的热带三大洋上，存在着相似的信风风系，它们可分解为向热赤道辐合的北风 (北半球)、南风 (南半球) 分量和一致的东风分量。他认为太阳加热的经向差异是大气运动的原动力，低纬相对强的加热会引起空气的上升，而高纬则会有空气的下沉，根据质量连续性原理，会出现热带低空空气向赤道流动和高空空气向两极流动的现象，这定性给出了热带经向环流的动力成因。但他认为，信风的东风分量起因于空气随太阳的向西运动，这难以解释中纬度西风带的起因。因此，他的工作在动力学推理上存在缺陷，不能视为大气环流理论。

哈得来 (Hadley, 1735)^①给出了半球子午面上单圈环流和地面风带的分布 (图 1.1, 该图是 Lorenz 据 Hadley 论文绘制)。Hadley 对子午面上单圈环流 (它包含热带信风带的 v 分量) 成因的解释与 Halley 相同。而对热带信风带东风分量 (相对速度 $u < 0$) 成因的解释，使用了惯性系间相对运动概念。地球自转造成的地面牵连速度 u_0 指向东，正比于 $\cos\varphi$ ，故赤道处 u_0 大于副热带。按图 1.1，副热带近地面气块 ($u = 0$) 向赤道运动时，保持绝对速度 $u_a = u_0 + u$ 不变，必有信风带中的 $u < 0$ (东风)。这样求得的信风东风速率过大 (约高于观测结果一个量级)，Hadley 将实际信风东风速率较小归因于摩擦。

Hadley 给出的全球大气环流图案 (图 1.1)，其热带区域地面、子午面部分和极区子午面部分均与观测相符，热带外地面及中纬子午面部分则与观测不符。Lorenz (1967) 历史地评价了 Hadley 对信风成因的解释，肯定了他对大气环流学发展做出的卓越贡献。今天我们知道，信风东风分量的估算应当根据角动量守恒而非动量守恒的原理进行。但 Hadley 论文发表的时间 (1735) 距牛顿 (Newton)《自然哲学的数学原理》出版 (1687) 还不到 50 年，而较科氏力 (Coriolis, 1835) 提出整整早了 100 年。

2) 三圈环流阶段 (1837~1887 年)

观测基础：中纬地面风具有向极分量，而不是 Hadley 给出的向赤道分量。

^① 乔治·哈得来 (1685~1768)，生于英国伦敦，律师、物理学家和气象学家。负责英国皇家协会气象观测 7 年，第一次深入研究了热带信风和洋流，解释了信风维持的机制。为纪念其对气象学的贡献，命名热带经圈环流为哈得来环流 (Hadley cell)，英国气候预测与研究所以他的名字命名 (Hadley Centre for Climate Prediction and Research)。

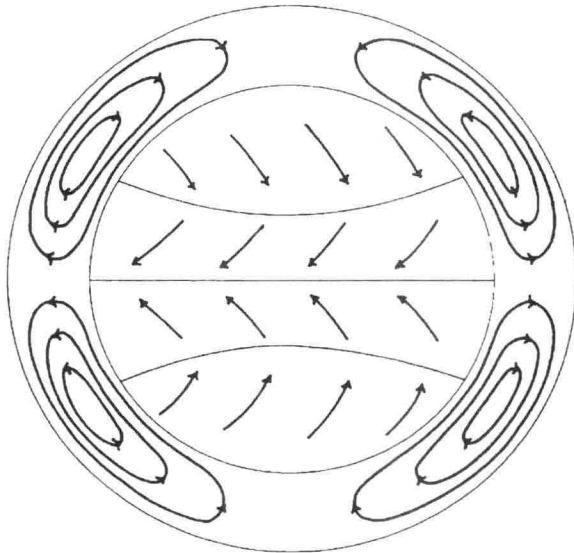


图 1.1 Hadley (1735) 设想的大气环流图案 (Lorenz, 1967)

理论工作：

汤姆孙 (Thomson, 1857, 1892) 给出子午面上的两圈环流和地面上的两个风带 (图 1.2)。费雷尔 (Ferrel, 1859, 1865) 给出子午面上三圈环流及地面纬向均匀的三个风带 (图 1.3、图 1.4)。

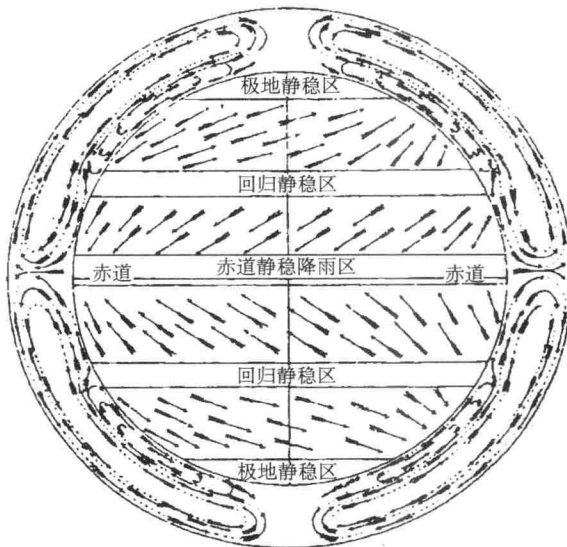


图 1.2 Thomson (1857, 1892) 设想的大气环流图案 (Lorenz, 1967)

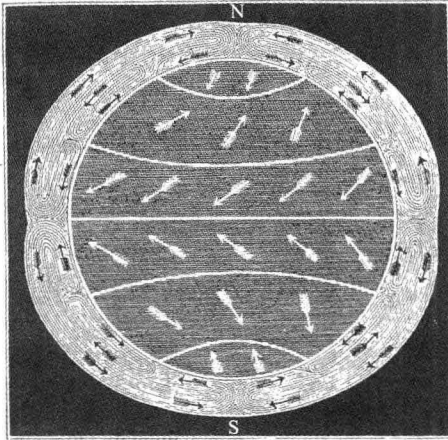


图 1.3 Ferrel (1859) 在修正版中提出的大气环流图案 (Lorenz, 1967)

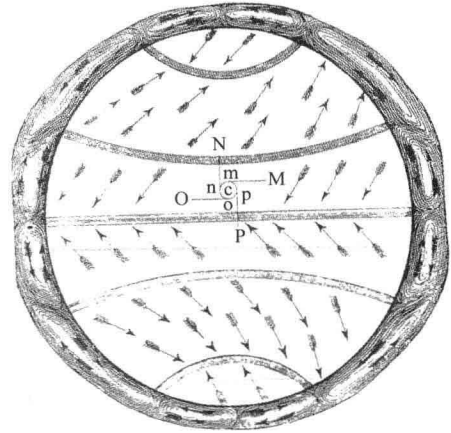


图 1.4 Ferrel (1865) 设想的大气环流图案 (Lorenz, 1967)

他们的工作建立在一个新的物理概念上：当空气相对于自转的地球运动时，在科氏力的作用下，热带对流层上部东风带中的气块，在向极运动中将逐渐转为南风、西南风和西风（北半球）以及北风、西北风和西风（南半球），并在两半球副热带辐合下沉；而在两半球极区对流层下部，科氏力作用在向赤道运动气块上，使其转为东风，运动终止于高纬，并在热力、动力作用下产生辐合上升。结果在两半球热带-副热带及极地-高纬形成两个经向尺度较小（与单圈环流比）的热力正环流。

而在中纬纬带，Thomson 和 Ferrel 注意到地面气层中摩擦力会使偏西风随着高度的减小而迅速减小，而向极的气压梯度却减小缓慢，故在近地面层中出现一个较大的非平衡力，它迫使空气向极地运动，这与中纬对流层下部 $v > 0$ 的观测事实相符。据此，Thomson 和 Ferrel 的大气环流图案（图 1.2、图 1.3、图 1.4）上均给出了中纬子午面上的闭合环流圈；其中，Ferrel (1865) 给出的图 1.4 为现代观测证实。图 1.4 上的中纬环流圈由动力强迫产生，它在高温处下沉，低温处上升，是热力反环流。

3) 确立大型涡旋作用阶段 (1888~1947 年)

观测基础：间接和直接高空观测发现，中纬高空存在大型涡旋，而不是单纯的纬向均匀气流。

理论工作：

与子午面上三圈环流确认的同时，直接地面观测和间接高空观测（云运动方向）发现，中纬地面和高空也不是单纯的纬向均匀气流，环流由东北风和西南风按经度交替排列构成，像极地和热带气团的活动，多弗（Dove, 1837）给出了它们的图（图 1.5）。比奇洛（Bigelow, 1902）描述了中纬地区风带中的这种不对称涡旋环流，并认为它们能将低纬大气从太阳辐射所得的多余热量向高纬输送。

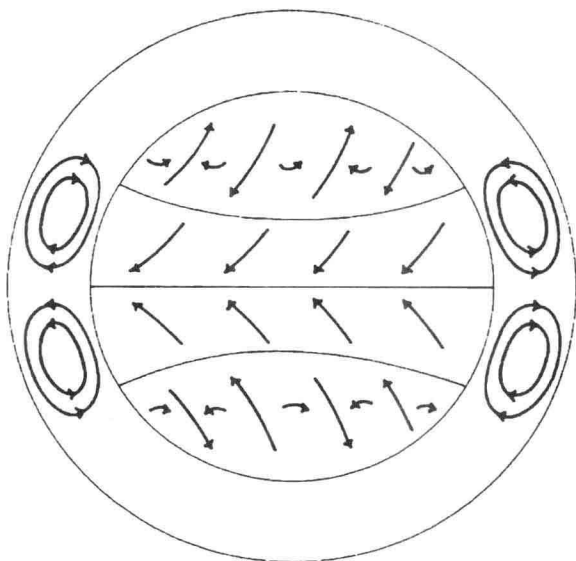


图 1.5 Dove (1837) 设想的大气环流图案 (Lorenz, 1967)

德凡特 (Defant, 1921) 假定中纬大型涡旋能像湍涡一样将热量从低纬高温处向高纬低温处传输，应用湍流理论计算了直径为数千千米的大型涡旋向极输送的热量，发现计算结果与所要求的输送很一致，从而认为这种大型涡旋可以看做湍涡（黏性）。

已经认识到，平衡需要西风角动量和热量在中纬大气高空向极输送，但中纬高空并不存在纬向平均的向极气流。杰弗里斯 (Jeffreys, 1926) 发现中纬大型涡旋能将西风角动量从低值处向高值处（西风急流）传输，因而认为不能将其一般地比作湍涡。因此，他提出中纬角动量和热量的输送是由不对称的大型涡动完成的，这种传输机制与湍流传输机制完全不同。

V. 皮叶克尼斯 (V. Bjerknes, 1937) 给出温带气旋的纬向不对称结构。他研究了形如 Thomson 环流图案和 Ferrel 环流图案，认为它们对于不对称扰动是不稳定的，观测到的温带气旋和反气旋是不对称扰动发展的结果。不久，罗斯贝

(Rossby, 1941, 1947) 给出中纬长波理论, 导出了与实际情况相当吻合的环流形式。

J. 皮叶克尼斯 (J. Bjerknes, 1948)、普里斯特利 (Priestley, 1949)、斯塔尔 (Starr, 1948) 用高空观测资料计算证实, 大型涡旋能将角动量由低值处向高值处 (西风急流) 输送, 这与湍涡的作用相反。因为湍涡动量输送是流体“黏性”现象的本质, 大型涡旋动量输送与湍涡存在本质差异, 故称后者为“负黏性”现象。“负黏性”现象的发现, 确立了大型涡旋在大气环流维持中的作用。

4) 阐明大型涡旋成因阶段 (1948 年~20 世纪 70 年代)

观测基础: 第二次世界大战后全球大气三维观测系统建立、完善和观测资料积累。

理论工作:

伊迪 (Eady, 1950)、查尼 (Charney, 1959) 的研究指出, 大型涡旋的产生符合斜压不稳定理论, 不稳定区及最大不稳定波长由纬向平均西风的垂直切变决定。Lorenz 提出斜压不稳定现象, 通过求解动力方程给出了接近实际的大型涡旋的数值解, 且模拟出其主要特征。

Lorenz (1976) 在其演讲的结束语中指出: 我们目前对大气中各种相态水的作用了解得还不够全面, 最终必须同时考虑热力和辐射两种作用; 还不能充分了解有着巨大水体的热带地区和热带外区域间的相互联系。他还称, 或许到 20 世纪末, 我们会突然发现我们正在开始第五个阶段。

在 20 世纪 80 年代以来的新阶段中, 人造卫星与电子计算机用于大气科学研究极大地推动了大气环流学的发展。新田尚 (1987) 提出大气环流研究中的两个问题: ①人类活动 (如工业化产生的热量与 CO_2) 对大气环流有何影响? ②大气环流与气候及其变化有何关系? 而人们在全球观测系统建立和观测资料的积累 (它们是大气环流研究的基础), 大气环流数值模拟方法发展 (它是大气环流重要的研究方法), 热带大气环流及其与热带外大气的相互作用研究, 大气圈与地球其他圈层 (水圈、岩石圈、冰雪圈、生物圈) 的相互作用, 以及大气环流异常 (包括人类活动的影响) 等方面做了大量的研究工作。1988 年, 世界气象组织 (WMO) 和联合国环境规划署联合设立联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC), 其第一工作组主要从科学角度评估气候系统和气候变化, 告诉人们气候变化是否发生、发生原因和发生速度, 这在很大程度上取决于大气环流研究。这一阶段的工作有待总结。

1.3 大气环流学的研究方法

现代大气环流学已形成以下四种既相互联系,又彼此不同的研究方法。

(1) 诊断分析:采用实测资料,确定大气环流平均状况(气候态)、变率及异常(异常态),称为统计诊断。用观测资料计算动力学方程中相应项,分析不同物理过程在大气环流维持中的作用,称为动力诊断。

(2) 数值模拟:依据大气运动方程组和有关物理过程,发展多种研究大气环流的数值模式(大气环流模式 AGCM、海气耦合模式 A-OGCM、海陆气耦合模式 A-L-OGCM 等)。然后按不同目的,改变运行模式的初始条件、边界条件甚至物理过程,通过对运行结果的分析,考察大气环流的运行和变化规律。

(3) 理论研究:求解简化后的大气运动方程组,探讨大气环流特定现象的物理成因及维持机制等。

(4) 转盘试验:它根据流体力学中相似理论,设计出可模拟地球大气某些运动特征的旋转圆盘或圆环,通过调节转速、圆环内圈与外圈的温差、盘底形状,来研究实际大气运动与地转、经向温度、地形的关系,给出具有直观性的结果。但由于技术原因,这一方法现在相对少用。

叶笃正评论前三种方法的关系是:理论研究是数值模拟和诊断分析的升华,并为模拟和诊断分析提供指导;对观测事实的数值模拟有助于认识大气环流的机制,检验和发展理论成果;诊断分析则为理论研究和数值模拟提供观测依据和深入发展的基础。

Lorenz (1976) 指出:经验告诉我们,一个研究工作者如不首先观测大气环流,他将把自己放在一个相当不利的地位;至今,我们甚至还没有完成观测大气环流之后再加以解释这样一个原来认为是较简单的任务。

本书主要用作大气科学本科高年级学生学习大气环流的教材,也可供相关学科研究生、教师与专业技术人员参考。我们选择大气环流的基本观测事实(第2章)、大气环流的维持机制(第3~5章)、大气环流数值模拟简介(第6章)和转盘试验简介(第7章)为讲课主要内容。理论研究不单独列章,是考虑了本书的读者。根据专业和学时差别,教师可以补充讲解或略去有关内容。

第2章 大气环流的基本观测事实

观测事实是大气环流研究的出发点和成果检验的标准。全球观测网的建设,观测、数据处理手段的现代化,资料的积累对大气环流学发展有决定意义。对大气状态进行现代三维观测(无线电探空仪、飞机航测)始于20世纪30年代。第二次世界大战后,形成了高空探测网,且统一了时次(世界时0时、6时、12时、18时)。20世纪60年代以来,气象卫星和电子计算机的迅速发展从根本上改变了气象观测,“世界天气监测网”(World Weather Watch, WWW)及“全球大气研究计划”(global atmospheric research program, GARP)使全球大气观测日趋完善。全球大气环流模式从根本上改变了观测数据的处理,实现了地面、高空和卫星观测资料的同化,获得了全球三维多要素场的最优估算,产生了以NCEP/NCAR、ECMWF为代表的全球、多要素、长序列再分析资料,为研究大气环流基本事实提供了基础。

本章介绍大气环流的基本观测事实。2.1节、2.2节分别从本质和现象两方面,介绍学习大气环流基本观测事实的方法,其余各节介绍基本观测事实。要求掌握它们的形态特征及相互联系,初步理解其物理成因。

2.1 基本控制因子和基本制约关系

即使将大气环流理解为月、季时间尺度的平均状态,它仍然具有十分复杂的形态。这种复杂性既表现为它具有三维(3D)结构、年变化(即季节变化)和年际异常、半球际差异,并且涉及多种物理属性(运动、力、热、辐射、相变等),因此需要涉及多种气象要素(V 、 p 、 T 、 R 、 q 等)。Lorenz估计,要表示大气环流全部可能重要的定量统计特征,必须使用数以百计(或更可能是以千计)张图。因此,将基本事实作纯粹现象学描述将导致烦琐哲学。

我们采用物理成因与环流形态相结合的叙述方式,介绍大气环流的基本观测事实。这一节介绍与物理成因有关的两个方面:控制大气环流的基本因子和制约压、温、风空间分布的基本关系;下一节给出与环流形态有关的环流分解。它们不仅是本章的讲解重点,还将贯穿本课程其余各章。

2.1.1 大气环流的基本控制因子

叶笃正等 (1958)^① 将大气环流的成因归结为如下五个方面：大气尺度和成分、太阳辐射、地球的转动、地球表面的不均匀性、地面摩擦。下面简要说明之。

1) 大气尺度和成分

由美国标准大气 (图 2.1) 的 p - z 关系知, 约 30km (略低于 10hPa 等压面平均高度) 以下的大气质量占总质量的 99%, 而其水平尺度可以用地球半径度量。因此, 大气是覆盖地面的极薄一层气体。由卫星在太空拍摄的地球边缘图像可以看到大气层确实是很薄的。

对水平范围达到行星尺度的运动 (大气环流属此类运动), 其水平尺度远大于垂直尺度, 在一些假定下, 可从连续方程导出垂直运动速度 (w) 与经向水平运动速度 (v_{φ}) 之比的量级 $O\left(\frac{w}{v_{\varphi}}\right) < \frac{1}{100}$ 的结论。故大气环流主要表现为水平运动。

驱动大气环流的能量源于地气系统吸收的太阳辐射 (短波) 能。大气是地气系统的子系统, 它对太阳短波辐射的直接吸收, 对地面能量 (长波辐射、潜热、感热) 的吸收、转换和放射都与大气成分有关, 因此大气成分也是影响大气环流的因素。例如, O_3 的存在决定了极区平流层 T 、 p 、 V 场的季节变化。又如, 工业化使大气中 CO_2 等温室气体含量增加, 导致 20 世纪中叶以来全球气温增高 (“全球增暖” 现象), 这已取得认同。

2) 太阳辐射

大气环流的原动力是太阳辐射。其中, 太阳辐射能随纬度分布的不均匀尤其重要, 它导致大气辐射差额 (定义为吸收太阳短波辐射能与放出长波辐射能之差) 低纬 (约南、北纬 30° 之间) 为正, 中、高纬为负, 造成 T 、 p 的经向差异, 驱动了大气运动。对此, 2.6 节将作深入讨论。

^① 叶笃正 (1916~), 中国科学院院士。1940 年毕业于清华大学 (当时为西南联大), 1948 年获美国芝加哥大学博士学位, 1950 年回国。曾任中国科学院地球物理研究所和大气物理研究所研究员, 大气物理研究所所长, 中国科学院副院长。我国当代杰出的气象学家, 国际知名的气象学大师。早期从事大气环流和长波动力学研究, 提出长波能量频散理论, 对动力气象学做出了重要贡献。20 世纪 50 年代提出夏季青藏高原是大气热源的见解, 开拓了大地形热力作用的研究。1958 年, 与陶诗言等提出了北半球大气环流的季节性突变, 是大气环流的开创性研究; 与朱抱真合著的《大气环流的若干基本问题》, 是具有国际影响力的大气环流学经典著作。

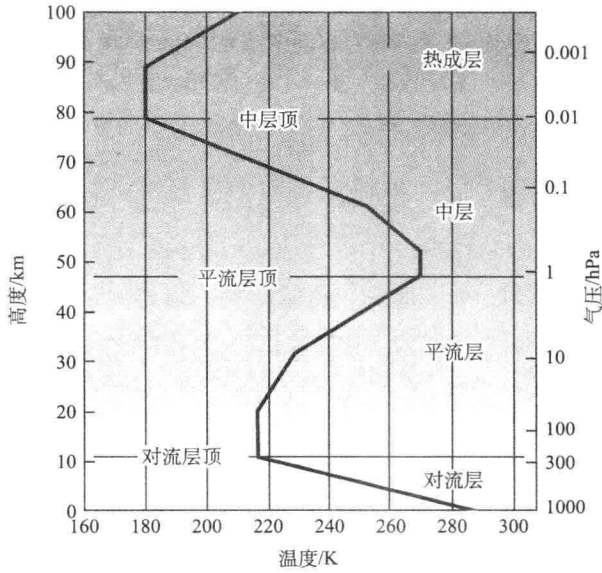


图 2.1 美国标准大气的温度垂直廓线 (Wallace et al., 2006)

3) 地球的转动

地球的转动分为公转和自转 (图 2.2)。

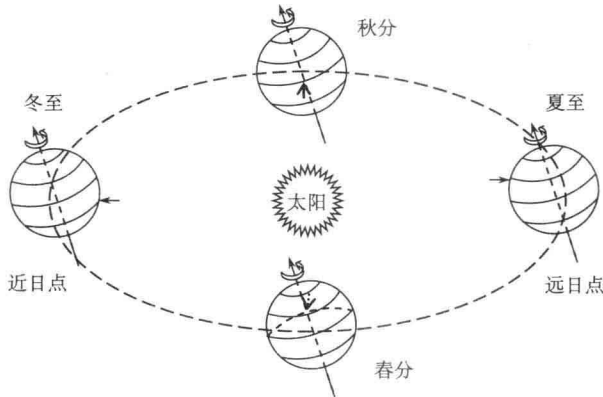


图 2.2 地球公转和季节

公转是地球绕日的转动，公转一周的时间 (回归年) 为 365 日 5 时 48 分 46

秒。因黄道^①与赤道成一定交角 ($23^{\circ}26'$)，导致太阳直射纬度随季节而变，春分、秋分直射赤道，冬至、夏至直射南回归线、北回归线。公转造成地气系统辐射平衡地理分布随季节而变，它决定了大气环流的季节变化。另外，公转轨道为椭圆，冬至、夏至地球分别位于近日点、远日点，日地距离相差 $0.05 \times 10^8 \text{ km}$ ，达日地平均距离 $1.496 \times 10^8 \text{ km}$ (一个天文单位) 的 3.34% ，它造成到达地球太阳辐射能的季节变化。

自转是地球绕地轴的转动，自转一周的时间 (恒星日) 为 23 时 56 分 4 秒。自转引起局地辐射平衡的昼夜变化，它是大气环流日变化的主要原因。自转对大气运动有深刻影响，这种影响与运动时、空尺度有关；空间尺度越大、速度缓慢 (因而时间尺度越大) 的运动受地转影响越显著，大气环流正是这种运动，故深受其影响。自转对大气环流的影响还与纬度有关 ($f = 2\Omega \sin\varphi$)，中、高纬度大气环流由于 f 大而呈更明显的水平属性；强的地转效应不利于有效位能的释放，因而锋面和急流 (可视为行星锋带) 这些斜压系统可以稳定存在。低纬地转效应弱，更利于对流的发生，系统呈现正压性。

4) 地球表面的不均匀性

地表的不均匀性造成了平均环流的纬向非对称性 (定常波) 和半球际差异。地表不均匀性主要表现在如下两个方面。

海陆面积及分布差异对大气环流的影响。全球海洋面积占总面积的 70.8% ，北、南半球海洋面积与半球面积比分别为 60.7% 、 80.9% ；故相对而言，北、南半球分别为陆半球和水半球。而两半球海陆分布也有重大差异，在中纬度地区，北半球为两大陆、两大洋，而南半球为较单纯的海洋带；在极区和高纬度地区，北半球为大陆包围海洋 (北冰洋)，南半球为海洋包围陆地 (南极洲)。海陆热力性质的差异巨大 (海洋热惯性远大于陆地)，导致北、南半球大气环流的许多明显差异。这种影响是全方位的，特别是对定常波的强度、季风现象等。

地形起伏对大气环流的影响。一方面，气流通过尺度巨大的山脉时将发生爬坡、绕流，产生波动，它们随基本气流的季节变化而变化。另一方面，由地形引起的加热作用也很重要，如青藏高原海拔平均为 4 km ，夏季它直接加热对流层中部大气，是南亚高压、印度低压和亚洲夏季风形成的重要因素。

地球表面的不均匀性可能更广泛地涉及气候系统的五个圈层 (水圈、冰雪圈、生物圈、岩石圈、大气圈) 及其相互作用。气候系统其他圈层对大气圈的影响是多方面和多时空尺度的，在大气环流变化及异常上得到反映，导致气候变化

^① 黄道是地球绕太阳公转的轨道平面与天球相交的大圆，即太阳在天球上的周年视运动轨迹，它用于确定季节。