



“十二五”江苏省高等学校重点教材

大气环流动力学

孙照渤 朱伟军◎编著

ATMOSPHERIC GENERAL
CIRCULATION DYNAMICS

 气象出版社
China Meteorological Press

大气环流动力学

Atmospheric General Circulation Dynamics

孙照渤 朱伟军 编著



气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书是作者长期从事研究生大气环流教学和科学研究实践的总结。书中主要内容是以现代科学观点,讨论了大气环流的观测事实和理论,并用简易动力学模式及数值模拟结果分析了驱动和维持大气环流的机制。其内容包括纬向平均大气环流的观测事实和维持过程、球面大气环流的观测事实和形成机制,还专门讨论了大气低频变化、热带大尺度大气环流、中层大气环流以及大气环流数值模拟。

本书可以作为大气科学类各专业以及相关学科专业的研究生和高年级本科生的教材或者参考书,也可以供气象、海洋、水文、地理、环境、农业、林业、航空、航海和航天等有关专业人员在业务、教学和科学研究工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气环流动力学 / 孙照渤, 朱伟军编著. — 北京: 气象出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-5029-6423-8

I. ①大… II. ①孙… ②朱… III. ①大气环流-动力学 IV. ①P434

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 216544 号

Daqi Huanliu Donglixue

大气环流动力学

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) 010-68409198(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑: 李太宇 倪东鸿

终 审: 邵俊年

责任校对: 王丽梅

责任编辑: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京京科印刷有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

印 张: 26

字 数: 520 千字

版 次: 2016 年 6 月第 1 版

印 次: 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 50.00 元

编写说明

1984年夏天我从英国访问进修回国后,学校要求我给气象学专业的研究生开设一门大气环流课程。我接受了这个任务之后,经过一年的准备,于1985年9月开始上课。迄今为止,已经讲授了31次,是我从事教学工作以来讲授次数最多的课程。在这31年的教学中,讲课内容不断更新,听课的学生也不断变化,不仅仅有我校的硕士生、个别留学生和部分博士生,还有南京大学气象系和江苏省水利科学研究院的个别研究生也自己跑来听课。本书就是我以多年的讲稿为基础,作为研究生教材整理编写而成的。

我校建校初期,已故章基嘉院士曾为本科生讲授过《大气环流》课程,后来这门课程由章先生的学生王盘兴教授主讲。20世纪70年代末,章基嘉先生也给本校研究生开设了《大气环流》课程,主要讲授纬向对称大气环流。这门课程的开设,对学习大气环流知识和理解大气运动的本质具有重要意义。

20世纪70年代以来,大气环流研究取得了实质性的进展,主要是对纬向非对称大气环流观测事实的解释和理论研究取得了新的认识。特别引人注目的结果包括:大气低频变化及其遥相关;球面 Rossby(罗斯贝)波动理论;中纬度风暴轴的发现与研究;热带大气环流新观测事实的发现、赤道波动以及热带大气对非绝热加热的响应;大气环流数值模拟。这些实质性的进展,使得对大气环流的认识进入了一个全新的阶段。取得这些进展主要应该归因于:计算机技术飞速发展;全球气象观测系统进一步发展和完善,使得气象资料的数量急剧增加,资料质量大幅度提高;现代数理统计方法及其软件的开发和广泛应用,使得分析处理海量气象资料有了可能;大气环流模式的创立和不断完善,数值模拟得以飞速发展和广泛应用,使得在实验室无法实现的大气环流变化实验可以在计算机上进行,从此大气科学可以用现代科学手段进行科学试验研究。如何把这些

新成果应用到气象教学中,就成为摆在气象教学工作者面前的任务。

根据大气环流学科取得的实质性进展和研究生教学的实际情况,我把要开设的研究生大气环流课程设计为讲授纬向非对称大气环流,强调观测事实和理论分析并重。选定的教学参考资料有:1978年夏季在美国NCAR(美国国家大气研究中心)举办的大气环流高级讲习班的教学安排及其有关材料,以及当时刚出版的《大气中的大尺度动力过程》(*Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere*)。这本书由国际上相应领域里最前沿的科学家共同编写,深入地讨论了纬向非对称大气环流的观测事实及其动力学理论。其内容不仅体现了学科的前瞻性,而且具有理论的严谨性,语言也准确精练,当然也是一本不容易读懂的好书。1987年我与合作者共同翻译出版了这本书。在翻译过程中,适逢该书的编著者B. J. Hoskins教授来南京访问,我向他请教了该书中的很多科学问题和用于研究生教学的问题,他不仅逐一回答了问题,而且还给予了很多非常有价值的建议,使我受益匪浅。他专门为该书的中文版撰写了前言。在前言中,他特别肯定了要把基础理论研究的最新成果用于研究生教学中。此后,我以这本书为主要教学参考书,不断补充大气环流领域研究的新成果,更新教学内容,已经在我校讲了31次。1988年春夏之交还应邀到兰州大学为气象学专业的硕士研究生讲了1次这门课程。

这门课程开设初期,也称为《大气环流》,后来为了避免与本科生《大气环流》发生课程名称混淆,开始称为《高等大气环流》。进入21世纪以后,研究生人数迅速增加,大部分研究生在本科生阶段没有学过纬向对称大气环流知识。因此,我在讲课中又增加了纬向对称大气环流的有关内容,本书也包含了这部分内容。现在,这本书取名为《大气环流动力学》。

让我欣慰的是,这门课程得到了同学们的欢迎,特别是已经工作多年卓有建树的同学也对这门课程给予了充分肯定,有的还向我索要讲课材料,使我感到无限欣慰。“问渠那得清如许,为有源头活水来。”回想起31年前设计开设这门课程的初期,曾得到章基嘉先生、丑纪范先生、陈受钧先生、王绍武先生和吴国雄先生等很多专家学者的指导和帮助,也曾得到B. J. Hoskins教授很多帮助和支持。每当回想起他们,我就会心潮澎湃,感动不已。前辈科学家们的帮助与支持是顺利开设这门课程的“源头活水”,衷心地感谢他们!

为了便于学习,很多人建议我编写一本教材,我也曾经草拟了一个提纲,征求了校内外很多专家学者的意见,得到了当时以伍荣生先生为主任的教育部大气科学教学指导委员会专家们支持,曾经列入教育部研究生教材建设“十五”规划。我非常感谢他们的支持!但是终因事务繁多,一直没能完成,我内心很是歉疚。直到 2006 年春天以后,我才有时间得以重新考虑如何完成这个任务。

随着大气科学的发展,大气环流研究成果的丰富程度可以用“浩瀚”来形容。要编写这门课程的教材,既要考虑大气环流学科体系的要求和相对成熟的成果,也要考虑作为教科书的体系和容量的要求。要达到这样的目标,不仅在内容上要斟酌取舍,而且在文字和图表上也要力求清晰准确。作为第一步,整理和补充了讲稿并印成讲义,在教学中应用,并反复听取了管兆勇、江志红、周伟灿、闵锦忠、王盘兴、郭品文、陈海山、徐海明、李栋梁、沈新勇、张文君等教授们的意见和建议,气象出版社李太宇和我校倪东鸿编审也给出了非常好的建议,很多研究生同学也对讲义提出了许多宝贵的意见和建议。根据这些意见和建议,反复修改和补充,才得以完成这本书。在本书即将出版之际,我校王会军院士给予了很多关心。杨修群、张耀存、钟中、肖天贵和李小凡等教授对本书的编写提出了宝贵的建议。周诗健先生阅读了全书并给出了很好的建议。借此机会,向所有关心、支持和帮助本书编写出版的专家学者们表示衷心感谢!

20 世纪 70 年代以来,国内外科学家在大气环流研究领域取得了丰硕的新研究成果,主要包括:以平均经圈环流动力学研究为基础,对 Hadley(哈得来)环流和 Ferrel(费雷尔)环流的驱动和维持机制有了新的认识;大气定常波的新观测事实及其理论解释;大气低频变化及其遥相关;中纬度球面上 Rossby 波动理论;中纬度瞬变波与纬向平均气流和时间平均三维气流的相互作用,特别是中纬度风暴轴的发现和研究;热带大气环流新观测事实的发现、赤道波动以及热带大气对非绝热加热的响应;中层大气环流的新观测事实及其理论;海气相互作用,特别是对 ENSO 现象的研究,不仅为气候变化的全球性提供了范例,而且为全球气候系统模式的研制提供了成功经验;大气环流数值模拟,特别是对温室气体导致全球气候变暖的模拟研究,以及对数值模拟结果的解释而引起的对简易模式和诊断分析的再认识。

如此丰富的最新成果,必须全面地体现在这本教材中,但是国内外尚没有现成的大气环流教科书体系可以借鉴。经过 31 年的教学实践、反复研究并听取专家们的建议,建立了《大气环流动力学》的课程体系。全书为四个部分共 10 章:第一部分:大气环流基础,包含第 1 章;第二部分:纬向对称大气环流,包含第 2、3 章;第三部分:纬向非对称大气环流,包含第 4、5、6、7、8、9 章;其中又分为:大气定常波和低频变化,热带外大气定常波理论,热带外大气瞬变波观测事实及其理论,热带大气环流观测事实及其理论,中层大气环流的观测事实及其理论;第四部分:大气环流数值模拟,包含第 10 章。

各章的主要内容:第 1 章讨论了大气环流的定义、控制大气环流的基本因子,给出了描写大气环流的动力学方程组及其常用的近似关系。通过简单的历史回顾,分析了大气环流研究面临的科学问题和困难。值得注意的是,根据大气低频变化可能成因的研究成果,本书把大气内部动力学过程列为了控制大气环流的第 6 个基本因子。第 2 章讨论了大气环流物理量和物理通量的分解方案,分别给出了纬向平均和水平大气环流的多年平均观测事实,并给出一些解释。特别是在讨论平均经圈环流时,分析比较了在等压面和等熵面上计算得到的平均经圈环流的差别,为讨论平均经圈环流的驱动和维持机制建立了观测事实基础。因为时间平均是最常用的大气环流分析方法,所以本章仔细地讨论了时间平均问题及其应用中需要注意的问题。第 3 章讨论了纬向平均大气环流的维持机制,特别是以 Held-Hou(赫尔德—霍)动力学模式为基础,从物理学角度讨论了平均经圈环流的驱动和维持机制。第 4 章给出了气候平均定常波的观测事实和解释,讨论了激发定常波的强迫作用。第 5 章首先简单介绍了数字滤波原理以及数字滤波器的应用,得到了大气低频变化的分布特征;接着重点讨论了大气遥相关问题,包括大气遥相关分析方法、主要的大气遥相关型、遥相关型的时间演变以及遥相关型的理论解释;最后还讨论了形成大气低频变化的可能原因。第 6 章是本书的难点和重点。首先采用简易动力学模式讨论了热带外地区对流层中定常和准定常 Rossby 波的纬向、经向、垂直传播问题;以地形为波动强迫源,讨论了激发出的波动与地形的关系以及能量的传播路径;然后讨论了热力强迫对大气环流的作用及其处理方法;最后分析比较了激发定常波的强迫作用的相对重

要性。第7章首先介绍了中纬度瞬变波的定义、结构、作用、分离方法、观测事实和能量学特征,讨论了中纬度风暴轴的观测事实、空间结构和维持机制。为了深入认识瞬变波的动力学特征,介绍了 Eady(伊迪)斜压不稳定理论和斜压波生命史,进而讨论了瞬变波与纬向平均气流和时间平均三维气流的相互作用。第8章介绍了热带地区大尺度大气环流的观测事实、赤道波动以及热带大气环流对定常热力强迫的响应;在此基础上,讨论了热带与热带外大气环流的相互作用。第9章介绍了中层大气环流的观测事实,包括中层纬向对称大气环流、臭氧、极涡以及热带中层大气环流;讨论了平流层爆发性增温(SSW)和准两年振荡(QBO)的观测事实和理论研究结果;介绍了平流层与对流层之间的相互作用。第10章讨论了大气环流的数值模拟,介绍了大气环流模式和气候系统模式,讨论了数值试验方法,并举例说明了数值试验方法的应用,特别是对温室气体导致全球气候变暖的模拟研究,以及对数值模拟结果的解释而引起的对简易模式和诊断分析的再认识。应该指出,大气环流模拟不仅仅包含大气环流数值模拟,还应该包括大气环流的实验室模拟。但是,由于实验条件限制,实验室模拟有较大局限性。近年来,大气环流数值模拟不仅得到快速发展,而且得到越来越广泛的应用,因此本书没有包含大气环流的实验室模拟内容。

由于这本书是教材而不是专著,因此,在建立这本教材的上述体系和编排内容的过程中,力求能体现教材的系统性和教学内容的逻辑性,同时也要吸收大气环流动力学的全部内容和最新成果,力求达到教科书所要求的条理清楚和循序渐进原则。

在编写过程中,力求做到理论与实际密切结合。科学理论不仅仅来源于实际,其正确性也需要在实际应用中得以证明。教材必须充分体现理论与实际密切结合的本质特征。事实证明,理论与实际密切结合的教材有利于教学和学生阅读。为了做到这一点,《大气环流动力学》这本教材的所有理论内容都有实际观测事实配合,而且在理论分析方法上也特别注意从实际资料出发,用归纳法讨论理论问题。

这本书作为教材,在编写过程中,必须要遵守教学规律,尽量吸取编者31年来的教学经验教训,注意突出基本概念、基本事实、基本理论、基本方法和基本应用。书中内容既包含相对成熟的最新科研成果,也由浅

入深、循序渐进,尽量体现科学内容的内在科学逻辑,力求语言简洁严谨、具有可读性。

可以看出,本书内容涵盖了大气环流学科的主要问题,实际讲课时需要根据同学们的具体情况和学时安排,对本书内容及其次序有所取舍和调整。为了培养研究生的独立能力,我在上课时还要推荐有关阅读材料,并组织课堂讨论,也都收到了比较好的教学效果。

本书的第7章是由朱伟军编写的,其余部分是由孙照渤编写的,最后由孙照渤协调了各章的内容,统一了行文笔调。在编写过程中李忠贤、邓伟涛、何编博士帮助收集了很多资料。研究生周放、施健、高佳琦、王超、刘华和徐青竹等同学参与了本书部分插图的制作和打字工作,借此机会向他们表示感谢!

尽管在编写过程中,我们给自己提出了一些要求,但是由于作者水平有限,书中一定还会有不足之处,有待进一步完善。衷心地期盼着专家和读者不吝赐教,以便不断修改,弥补不足,减少遗憾。

本书列为2015年度江苏省立项建设重点教材(新编类)。在撰写过程中得到“大气科学专业主干课程群”国家级教学团队建设项目、“江苏高校品牌专业建设工程”资助项目(PPZY2015A016)的支持,特此致谢!

本书即将出版,借此机会,衷心感谢所有关心和支持本书顺利出版的专家学者和朋友们!

南京信息工程大学 孙照渤

2016年6月于南京

目 录

编写说明

第 1 章 大气环流基础	(1)
1.1 大气环流的定义	(1)
1.2 控制大气环流的基本因子	(2)
1.2.1 大气自身的特殊尺度	(2)
1.2.2 太阳辐射能随纬度分布的不均匀	(3)
1.2.3 地球自转	(5)
1.2.4 地球表面的不均匀性	(6)
1.2.5 地面摩擦	(7)
1.2.6 大气内部动力学过程	(8)
1.3 动力学方程组	(8)
1.4 科学问题	(14)
1.4.1 历史背景	(14)
1.4.2 科学问题与困难	(17)
复习思考题	(19)
第 2 章 观测到的大气环流	(20)
2.1 资料	(20)
2.1.1 站点资料	(20)
2.1.2 再分析资料	(21)
2.2 大气环流分解	(21)
2.2.1 大气环流物理量的分解	(21)
2.2.2 物理量通量的分解	(23)
2.3 时间平均	(23)
2.4 纬圈平均环流	(28)
2.4.1 纬圈平均温度场	(28)
2.4.2 纬圈平均的纬向风	(30)
2.4.3 纬圈平均的涡动动量通量	(31)

2.4.4	纬圈平均的经向速度和垂直速度	(33)
2.4.5	平均经圈环流	(34)
2.4.6	纬圈平均的大气水分含量	(39)
2.5	时间平均的水平环流	(42)
2.5.1	平均温度的水平分布	(42)
2.5.2	平均海平面气压场	(45)
2.5.3	对流层中部的平均环流	(45)
2.5.4	对流层急流	(48)
2.5.5	平流层底部的平均环流	(51)
	复习思考题	(53)
第3章	维持大气环流的基本过程	(54)
3.1	大气中的角动量平衡	(54)
3.1.1	角动量连续方程	(55)
3.1.2	角动量平衡方程	(57)
3.1.3	大气中角动量的输送	(60)
3.1.4	有利于角动量输送的气压场形式	(62)
3.1.5	纬圈环流的维持机制	(66)
3.1.6	经圈环流的维持机制	(67)
3.2	大气中的热量平衡和水分平衡	(69)
3.2.1	热量连续方程和水汽连续方程	(70)
3.2.2	大气中感热的经向输送	(71)
3.2.3	大气中位能的输送及其与热量输送的关系	(77)
3.2.4	热量垂直输送的估计	(79)
3.3	大气中的动能平衡	(80)
3.3.1	大气中动能的制造和消耗	(80)
3.3.2	对流层下半部平均运动场中的动能制造与消耗	(85)
3.3.3	动能的输送	(87)
3.4	大气中的能量循环	(90)
3.4.1	大气中的能量循环	(90)
3.4.2	有效位能	(101)
3.4.3	Lorenz 能量方框图	(103)
	复习思考题	(105)
第4章	气候平均定常波的观测特征	(106)
4.1	气候平均定常波的定义	(106)

4.2 北半球气候平均定常波的经向结构	(107)
4.3 气候平均定常波的观测特征	(109)
4.3.1 北半球冬季定常波	(109)
4.3.2 北半球夏季定常波	(114)
4.3.3 南半球定常波	(119)
4.3.4 热带定常波	(126)
4.4 激发定常波的强迫作用	(128)
4.4.1 地形强迫作用	(129)
4.4.2 非绝热加热作用	(129)
4.4.3 大气瞬变波的作用	(131)
4.5 定常波的数值模拟	(134)
复习思考题	(135)
第5章 大气低频变化及其遥相关	(136)
5.1 大气低频变化的基本特征	(136)
5.1.1 数字滤波器	(136)
5.1.2 低频变化的地理分布	(139)
5.2 大气遥相关型	(141)
5.2.1 北半球冬季海平面气压遥相关型	(142)
5.2.2 北半球冬季 500 hPa 位势高度场遥相关	(144)
5.2.3 北半球夏季 500 hPa 位势高度场遥相关	(146)
5.2.4 大气遥相关型的分析方法	(146)
5.2.5 大气遥相关型的理论解释	(152)
5.3 大气遥相关型的时间演变	(153)
5.4 大气低频变化的可能成因	(158)
5.4.1 大气对外源强迫的响应	(158)
5.4.2 大气内部过程的作用	(159)
复习思考题	(162)
第6章 热带外对流层中定常和准定常波动理论	(163)
6.1 科学问题	(163)
6.2 Rossby 波的纬向传播	(164)
6.2.1 模式	(165)
6.2.2 定常波型与地形的配置	(166)
6.2.3 北半球大地形激发的纬向 Rossby 波列	(166)

6.2.4 共振现象	(169)
6.3 Rossby 波的经向传播	(171)
6.3.1 球面大气中的 Rossby 波	(171)
6.3.2 Rossby 波和 Rossby 波射线	(175)
6.3.3 常角速度气流中 Rossby 波的经向传播	(180)
6.3.4 实际大气中 Rossby 波的经向传播	(181)
6.4 Rossby 波的垂直传播	(183)
6.4.1 模式	(183)
6.4.2 简单条件下 Rossby 波的垂直传播	(185)
6.4.3 比较接近实际条件下 Rossby 波的垂直传播	(189)
6.5 热力作用	(194)
6.5.1 一般性讨论	(195)
6.5.2 水平平流为主时大气的响应	(196)
6.5.3 垂直平流为主时大气的响应	(197)
6.5.4 数值结果	(198)
6.6 激发定常波的强迫作用比较	(200)
6.7 纬向对称气候中的准定常涡动	(209)
复习思考题	(211)
第 7 章 中纬度瞬变波	(212)
7.1 瞬变波的基本概念	(212)
7.1.1 定义	(212)
7.1.2 瞬变波的结构	(213)
7.1.3 瞬变波作用的一般性讨论	(217)
7.2 瞬变波的观测特征	(219)
7.2.1 用纬偏差表示瞬变波	(220)
7.2.2 根据时空谱结构分离出瞬变波	(223)
7.2.3 瞬变波个例分析	(224)
7.2.4 中纬度风暴轴和急流	(224)
7.3 瞬变波能量学	(230)
7.3.1 瞬变波能量循环	(230)
7.3.2 谱能量学	(232)
7.4 斜压不稳定与斜压波生命史	(234)
7.4.1 Eady 斜压不稳定理论	(234)
7.4.2 斜压波生命史	(241)

7.5 纬向平均气流与瞬变波的相互作用	(246)
7.5.1 基本方程	(246)
7.5.2 EP 通量	(248)
7.5.3 斜压波生命史中的 EP 通量	(253)
7.6 时间平均三维气流与瞬变波的相互作用	(255)
7.6.1 基本方程	(255)
7.6.2 E 矢量	(256)
7.6.3 北半球冬季垂直平均的高频瞬变波 E 矢量分布	(260)
复习思考题	(262)
第 8 章 热带大尺度大气环流	(263)
8.1 热带大气运动的主要特点	(263)
8.2 纬向平均的热带大气环流	(264)
8.3 热带大尺度大气环流的观测特征	(266)
8.3.1 赤道辐合带	(269)
8.3.2 赤道波扰动	(269)
8.3.3 非洲波动	(271)
8.3.4 季风	(271)
8.3.5 Walker 环流	(278)
8.3.6 越赤道气流	(279)
8.3.7 ENSO	(282)
8.3.8 季节内振荡	(289)
8.4 热带大气环流的动力结构	(293)
8.4.1 热带大尺度运动的尺度分析	(293)
8.4.2 赤道波动	(296)
8.4.3 定常强迫运动	(301)
8.5 热带与热带外地区大气环流的相互作用	(304)
8.5.1 热带外对热带地区的影响	(304)
8.5.2 热带对热带外地区的影响	(306)
复习思考题	(307)
第 9 章 中层大气环流	(308)
9.1 中层大气的温度结构和环流	(308)
9.2 中层大气环流的观测特征	(309)
9.2.1 纬向平均大气环流	(309)

9.2.2	化学痕量成分输送	(314)
9.2.3	臭氧	(315)
9.2.4	极涡	(319)
9.2.5	热带中层大气环流	(323)
9.3	平流层爆发性增温	(324)
9.3.1	观测事实	(324)
9.3.2	理论	(329)
9.4	准两年振荡	(332)
9.4.1	观测特征	(333)
9.4.2	理论	(336)
9.5	平流层与对流层之间的交换	(339)
	复习思考题	(344)
第 10 章	大气环流的数值模拟	(345)
10.1	历史背景	(345)
10.2	大气环流模式	(347)
10.3	气候系统模式	(351)
10.3.1	气候系统模式分量	(351)
10.3.2	耦合器	(358)
10.3.3	当代气候状态的数值模拟	(360)
10.4	数值试验方法及其应用	(369)
10.4.1	数值试验方法	(369)
10.4.2	例 1: 大气内部动力学过程对冬季中纬度大气环流 异常的影响	(371)
10.4.3	例 2: 应用数值模式制作短期气候预测	(377)
10.4.4	例 3: 耦合模式比较计划中 CO ₂ 增加试验	(379)
10.4.5	例 4: IPCC 报告在主要温室气体排放情景下引起 全球气温增加的预估	(381)
	复习思考题	(385)
	主要参考文献	(386)

第1章 大气环流基础

本章讨论大气环流的定义、控制大气环流的基本因子,并给出描写大气环流的方程组。为了能比较深刻地认识大气环流的科学问题,还简要地介绍了大气环流研究的发展历史和面临的科学难题。

1.1 大气环流的定义

大气是一种地球流体,其运动具有非常复杂的结构。大气运动可用一组动力学方程来描写。可是到目前为止还无法得到这个方程组的解析解,因此也就不可能用数学推导方法求得大气运动的解。对大气运动的认识主要是基于观测结果得到的。大气环流研究的目标就是要正确描述大气运动的基本特征,并要解释引起这些基本特征的原因及其过程。

广义地说,大气环流包含了全球各种时空尺度的大气运动。但是无论从科学研究的角度还是从应用的角度看,这都过于复杂,以致于无法得出有价值的结论。因此,一般都要根据研究对象的特点或者应用的要求,取其中某一时间尺度或某一空间尺度的大气运动来进行研究。因此,大气环流有时指大气的瞬变状态,有时指大气的平均状态。在历史时期,人们主要研究纬向平均大气环流,从而能给出大气环流在经向的变化。但是如果对大气运动仅仅做时间平均,就会发现,大气运动并不是纬向对称的,而是随经度强烈变化的,这是因为海陆分布和地形等随经度变化所引起的。由于大气环流的时间平均与气候变化有密切关系,因此有时把大气环流看成一些永久性的或半永久性的天气气候特征,例如急流、赤道辐合带、主要的半永久性气旋和反气旋等。

随着科学的发展,对大气环流的定义也逐步有了共识。早在20世纪50年代叶笃正和朱抱真(1958)就给出了一个定义:一般所说的大气环流的对象是有关大范围的大气运动现象,它的水平空间尺度在数千千米以上,垂直空间尺度是10 km以上,时间尺度是1~2 d以上。莫宁(Monin,1986)给出的定义是:大气环流是大尺度大气状态分量的统计集合。Grotjahn(1993)给出的定义是:大气环流是指大气变量的大尺度分布特征,其空间尺度在水平上大于100 km,时间尺度上为数天以上的大气变化。Holton(2004)给出的定义是:大气环流是指能滤去个别天气系统随机变化的时

间平均大气状态,但是这种时间平均要保留月、季变化。

可以看出,随着大气科学的发展,大气环流定义的核心问题集中在时间尺度和空间尺度两个方面。因此,本书中所用的大气环流定义为:大气环流是指行星尺度的大气运动在时间上的平均状态,这样的平均既要滤去个别天气系统的随机变化,又要保留大尺度大气运动的统计集合特征。

1.2 控制大气环流的基本因子

大气环流的基本特征是盛行以极地为中心的纬向气流。在对流层的中纬度地区存在西风急流,而在低纬度存在东风,在极地近地面层还存在一个东风薄层。对流层中的这种风场结构会随着季节变化发生地理位置和强度的变化,但是其纬向气流的基本特征始终保持。至于在对流层以上的大气环流,其纬向气流的特征更加突出。同时也应注意到,大气盛行的纬向气流也随经度有所变化,从全球冬季和夏季的平均图中可以看出,既存在槽脊,也存在闭合环流系统。也就是说,大气环流在时间上和空间上都是不均匀的。大气环流之所以有这样的状态,是由控制大气环流的基本因子决定的。目前的研究表明,控制大气环流的基本因子主要为:大气自身的特殊尺度、太阳辐射能随纬度分布的不均匀、地球自转、地球表面的不均匀性、地面摩擦以及大气内部动力学过程。

1.2.1 大气自身的特殊尺度

观测表明,大气质量的 99% 集中在离地面 36 km 以下的大气中,但是大气环流的水平尺度则可以用地球半径来度量。因此,在讨论大气环流时可以把大气看成是覆盖在地球表面极薄的一层气体。这个现象具有原则性意义,它决定了大气环流中垂直运动与水平运动量级的比值。尺度分析表明,这个比值小于 1/100。这说明,大气环流中垂直运动是非常小的,可见大气环流具有准水平性。因为大气环流具有准水平性,所以用若干标准等压面图就可以表示大气环流的主要特征了。同时也必须指出,垂直运动虽小,但它在动力学方面却具有重要意义,在大气环流的一些问题中也是不能忽略的。

大气自身的特殊尺度不仅决定了大气运动的准水平性,同时也与大气环流的准地转性有密切关系。大气自身的特殊尺度特性决定了大气是地球表面很薄的一层气体,其垂直运动远小于水平运动。在这种情况下, Rossby (罗斯贝) 数 Ro 远小于 1, 因此大气运动是准地转的。在中纬度, 如令 $U=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $L=10^6 \text{ m}$, $f=10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 则可以得到 Rossby 数 $Ro \approx 10^{-1}$, 对于水平尺度为千千米以上的运动来说就是准地转运动。