

动力气象学 教程

吕美仲 彭永清 编著

气象出版社

·
▽
,
*

☆
✱
△
△
✱
☆
△
↑
|||
||
D
C
S
▽
↑

⇄)(⊗ ⊞ ⊕ ⊙ ⊚ ⊛ ⊜ ⊝ ⊞ ⊟ ⊠ ⊡ ⊢ ⊣ ⊤ ⊥ ⊦ ⊧ ⊨ ⊩ ⊪ ⊫ ⊬ ⊭ ⊮ ⊯ ⊰ ⊱ ⊲ ⊳ ⊴ ⊵ ⊶ ⊷ ⊸ ⊹ ⊺ ⊻ ⊼ ⊽ ⊾ ⊿

动力气象学教程

吕美仲 彭水清 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书全面而系统地阐述了动力气象学中基本概念和原理,较详尽的介绍处理大气动力学问题常用的数学方法,并以一定篇幅讨论了现代动力气象理论中一些最重要的问题,对问题阐述深入浅出、通俗易懂。本书经国家气象局高等学校气象类教材编审领导小组审查,确认为大学本科通用教材。

本书适合作高等院校理科类气象专业动力气象学教材,也可供从事气象、环保、水文、农林等科技工作者阅读参考。

动力气象学教程

吕美仲 彭永清 编著
责任编辑 黄丽荣

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

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本: 850×1168 1/32 印张: 14.5 字数: 374千字

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数: 1-4000 定价: 3.15元

ISBN 7-5029-0430-1/P·0248 (课)

前 言

本书是遵照1985年全国高等学校理科气象专业教学研讨会上制定的动力气象学教学方案，和1987年成都会议上通过的教材编写大纲的要求编写的。

动力气象学是大气科学的一门重要的分支学科。由于动力气象学愈来愈广泛地应用了数学和物理学中最新成果，研究的问题也愈来愈广泛深入。然而作为大气科学各专业基础理论课，所涉及的仅是该学科中一些基本的比较成熟的内容。根据我们的教学经验，要达到预定的教学目的，必须把重点放在物理概念和基本原理的阐述和处理动力气象学问题常用的数学方法上，并要适当介绍近代动力气象学理论的基础知识及其新进展。此外，作为一本教材，阐述问题应要求脉络清楚、前后连贯、逐步深入，力求深入浅出、简明易懂、便于自学。我们基本上是按这样的要求撰写的。

全书共分十二章，前六章讲述了动力气象学基本原理，这部分内容是动力气象学的基础；后六章讲述了近代动力气象学理论的基础知识，讨论了一些重要问题，其中相当一部分反映了动力气象学的新进展。

本书的序、第一、二、三章和第七、八、九章由空军气象学院吕美仲执笔；第四、五、六章和第十、十一、十二章由南京气象学院彭永清执笔，但全书各章节都经过两人讨论、相互修改，最后是共同定稿的。

编写工作是在国家气象局科教司直接领导下进行的。高等学校气象类教材编写领导小组的专家们，曾给予我们许多具体的指

导，特别是包澄澜、刘式适教授，曾仔细审查过本书编写的纲目，并提出了不少宝贵意见，初稿完成后刘式适教授又对全书进行了审查；气象出版社对本书的出版给予了热忱的支持，在此我们一并表示言轻意重的感谢。我们还要感谢南京气象学院、南京空军气象学院的领导和老师们的关心与支持。

由于编者学识水平有限，书中肯定存在许多不足之处，殷切希望读者提出宝贵意见。

编著者共识

一九八九年八月

目 录

序	(1)
第一章 描写大气运动的基本方程组	(9)
§1.1 全导数和局地导数	(10)
§1.2 旋转参考系中运动方程的矢量形式	(13)
§1.3 质量守恒定律——连续方程	(23)
§1.4 状态方程、热力学能量方程、水汽方程	(26)
§1.5 球坐标系中基本方程组	(32)
§1.6 局地直角坐标系中基本方程组	(43)
§1.7 闭合运动方程组, 初始条件和边界条件	(45)
第二章 尺度分析与基本方程组的简化	(48)
§2.1 尺度概念, 大气运动的尺度分类	(49)
§2.2 基本方程组的尺度分析	(54)
§2.3 无量纲方程, 动力学参数	(67)
§2.4 β 平面近似	(71)
§2.5 静力平衡大气, p 坐标系	(72)
第三章 自由大气中平衡流场	(86)
§3.1 自然坐标系	(86)
§3.2 平衡流场的基本型式与性质	(93)
§3.3 地转风随高度的变化、热成风	(102)
§3.4 地转偏差	(106)
第四章 环流定理、涡度方程和散度方程	(109)
§4.1 环流与环流定理	(109)
§4.2 涡度与涡度矢量方程	(116)
§4.3 泰勒-普劳德曼定理	(119)
§4.4 铅直涡度方程	(120)

§4.5	p坐标系中的涡度方程和散度方程	(126)
§4.6	位势涡度方程	(130)
第五章 大气行星边界层		(137)
§5.1	大气运动的湍流特性和平均运动方程组	(138)
§5.2	大气行星边界层及其特征	(146)
§5.3	属性的湍流输送通量及其参数化	(148)
§5.4	湍流运动发展的判据	(152)
§5.5	近地面层风随高度的分布	(156)
§5.6	埃克曼层风随高度的分布	(160)
§5.7	埃克曼抽吸与旋转减弱	(170)
第六章 大气能量学		(176)
§6.1	大气能量的主要形式	(176)
§6.2	大气能量方程	(179)
§6.3	静力平衡条件下大气中的能量转换	(185)
§6.4	有效位能	(194)
§6.5	大气中动能的消耗	(198)
§6.6	实际大气中的能量循环	(200)
§6.7	能量的转换过程	(206)
第七章 大气中的基本波动		(211)
§7.1	波动的基本概念	(212)
§7.2	微扰动法, 基本方程组的线性化	(223)
§7.3	声波和拉姆 (Lamb) 波	(226)
§7.4	重力外波, 重力惯性外波	(234)
§7.5	重力内波, 惯性内波, 重力惯性内波	(241)
§7.6	罗斯贝波	(255)
§7.7	“噪音”与滤波	(258)
第八章 波包、群速与能量的传播		(266)
§8.1	摄动法与多尺度方法	(267)
§8.2	波包的传播, 群速	(276)
§8.3	罗斯贝波的频散, 上游效应	(285)
§8.4	非均匀波动, 波作用量守恒	(293)

§8.5	球面上罗斯贝波的经向频散, 大圆理论	(301)
第九章	地转适应过程与准地转演变过程	(307)
§9.1	大尺度运动过程的阶段性	(308)
§9.2	正压大气中的地转适应过程	(310)
§9.3	斜压大气中的地转适应过程	(324)
§9.4	准地转运动的分类	(330)
§9.5	准地转运动方程组	(335)
§9.6	准地转位势倾向方程与 ω 方程	(344)
§9.7	Q 矢量, 非热成风产生的二级环流的诊断	(353)
第十章	大气运动的稳定性理论	(358)
§10.1	流体动力学稳定性概念	(358)
§10.2	惯性不稳定	(360)
§10.3	开尔文-赫姆霍兹不稳定	(362)
§10.4	正压不稳定	(366)
§10.5	斜压不稳定	(370)
第十一章	低纬度热带大气动力学	(378)
§11.1	热带运动系统概述	(378)
§11.2	热带大气运动的尺度分析	(381)
§11.3	热带扰动的生成与发展	(389)
§11.4	台风的结构及其发展	(397)
§11.5	热带行星尺度波动	(409)
第十二章	非线性动力学基础	(415)
§12.1	低阶动力学系统的轨迹特征及其稳定性	(416)
§12.2	正压涡度方程的截谱模式与指数循环	(430)
§12.3	Lorenz 系统	(435)
§12.4	非线性波动性质简述	(442)
附录一	物理常数	(449)
附录二	符号表	(450)

序

动力气象学 (*Dynamic Meteorology*) 是大气科学的一个分支, 是应用物理学定律研究大气运动的动力过程、热力过程, 以及它们之间相互关系, 从理论上探讨大气环流、天气系统演变和其它大气运动过程的学科。空气是一种流体, 如果说流体力学研究的是流体运动的一般规律, 那么动力气象学研究的则是发生自转地球上且密度随高度递减的空气流体运动的特殊规律。从这个意义上来说, 它又是流体力学的一个分支。

一、基本假设

天气和气候的变化是和大气运动联系在一起。当我们研究地球大气的宏观运动时, 完全可以不考虑那些离散分子的结构, 把大气视为连续流体。表征大气运动状态和热力状态的各种物理量, 例如大气运动的速度、气压、密度和温度等, 一般认为是空间点和时间的连续函数, 并且经常假设这些场变量的各阶微商也是空间点和时间的连续函数。

研究大气宏观运动时, 还把大气作为理想气体来处理 (在无水汽凝结时), 气压、密度、温度之间的关系将满足理想气体的状态方程。大气是可压缩流体, 大气受热后, 温度场变化会引起气压场变化, 从而也会引起大气运动的变化。这就是说, 大气热力状态变化会引起大气运动状态变化, 反之亦然。因此, 大气动力学过程与热力学过程不能截然分开, 它们之间是相互影响, 相互制约的。

将大气视为可压缩连续流体, 这是研究大气运动的基本出发点, 因而可以广泛地应用流体力学和热力学原理探讨大气运动的具体规律。

二、地球大气的动力学和热力学特性

将大气作为流体力学研究对象时，应该注意到地球大气本身的一些特性。

第一，大气是重力场中旋转流体。地球大气时时受到重力场作用，在重力场作用下，90%的大气质量集中在厚度仅为10km左右的对流层中。这一特征大气厚度与地球半径相比是微不足道的。大气所固有的这一铅直厚度，决定了水平尺度以千公里计的大范围大气运动一定是准水平的，铅直速度远小于水平速度。重力场抑制了铅直运动的发展，使得在铅直方向上气压梯度力与重力近似地相平衡，这就是所谓静力平衡。静力平衡是大气运动的重要性质之一。覆盖在地球表面上的大气随地球一同绕地轴以常值角速度 ($\Omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) 不停地旋转着。因此，研究相对于地球的大气运动时，必须要考虑科里奥利力的作用。科里奥利力的作用大小和大气运动的水平尺度有关，在比较小的尺度运动中，科里奥利力的作用相对而言并不重要，常可以略去，但在大尺度运动中科里奥利力作用就显得很重要。特别是中纬度大尺度运动中，科里奥利力与水平气压梯度力基本上相平衡。这种近似平衡关系称作地转平衡，这是旋转地球上大尺度大气运动又一重要性质。地球近于正球体，它的旋转角速度矢量在垂直于地表面方向上的分量 ($\Omega \sin \varphi$, φ 是纬度) 随纬度是改变的，这对大尺度运动具有重要的动力作用。每日天气图上看到的西风带中波动就与此作用有关 (第七章)。地球旋转对大气运动来说还是一个稳定因子。大尺度运动中科里奥利力总是力图与水平气压梯度力相平衡，使得大气内能、位能转化为动能的可能性减小，锋面的存在，说明了本来在非旋转系统中可以释放出的位能，在旋转大气中就不能完全被释放出来了 (第六章)。此外，斜压扰动不稳定发展中，地球旋转对波长较长的波动具有很强的稳定作用 (第十章)。

第二，大气是层结流体。大气的密度随高度是改变的。对于均质流体，若象大气一样没有“自由面”，这时重力对运动几乎不起重要作用。然而对于层结流体，与重力相联系的阿基米德净浮力对运动却有重要影响。在不稳定层结大气中，阿基米德净浮力可使积云对流得以发展，在稳定层结大气中可以产生重力内波（第七章）。即使对于大尺度扰动的斜压不稳定发展，大气层结也有重要作用（第十章）。

第三，大气中含有水份。水份在相变过程中会使大气得到热量或失去热量，因而为大气运动提供了另外一个能源、能汇。例如，低纬度扰动和台风的发展就与积云对流释放的凝结潜热有关，对流凝结释放的潜热是低纬度扰动发展的重要能源（第十一章）。

第四，大气的下边界是不均匀的。地球陆地表面不但起伏不平，而且其热力性质也不完全一样，使得大气的下边界层中运动具有明显的湍流性质。海陆分布所决定的非均匀加热，起伏不平的大地形对大尺度运动的热力和动力强迫作用，对大气环流的形成有重要影响。

大气本身的一些特性和外界环境的影响，决定了大气运动的复杂性，这固然给我们研究大气运动具体规律带来了困难，但也激起了人们对它研究的兴趣。

三、大气运动的多尺度性

前已提到运动的尺度。所谓运动的空间尺度，是指运动系统的空间范围。因为大气运动系统的水平范围与铅直范围往往有较大的差异，所以空间尺度又区分为水平空间尺度和铅直空间尺度，或简称为水平尺度和铅直尺度。运动的时间尺度是指运动过程经历一个阶段所需的时间，例如，对于波动，时间尺度可认为就是它的周期。

大气运动无论在时间尺度上还是水平尺度上都具有很宽的尺

度谱，其范围从边界层中的湍涡，直到遍及全球的平均纬向环流。积雨云或对流单体的水平尺度为一到十公里，飑线、背风波和低纬的对流群（云团）的水平尺度为数十公里到二、三百公里；温带气旋反气旋以及西风带中的长波，其水平尺度以千公里计；超长波和几乎环绕地球的热带辐合带的水平尺度可以和地球半径相比拟，等等。不同尺度运动系统在性质上有很大差异，对天气影响也不同。例如，西风带中长波具有准水平、地转平衡性质，它对天气影响的范围较广；强烈的局地风暴，是一种小尺度强对流运动，一般说来它是非静力平衡的，铅直上升运动极强，造成的天气很严重，但范围较小。这些不同尺度运动系统之间还存在着相互作用。小尺度运动系统往往是在大尺度运动系统背景条件下产生发展的，反过来，它对大尺度运动系统发展变化又有反馈作用。例如，在低纬，小尺度对流往往在条件不稳定大气中热带扰动某些部位上得以发展，而小尺度对流凝结潜热的释放又为热带扰动的发展提供了能源，这种凝结潜热释放的反馈作用，可以造成热带扰动不稳定发展（第十一章）。

依据流体力学和热力学原理建立起来的大气运动方程组，表征了大气运动的普遍规律。从物理上来看，它几乎描写了各种尺度运动和它们之间的相互作用，因而在数学形式上这组方程是高度非线性的。我们很难找到其一般解答并不足以为奇。为了得到可供实用的结果，在动力气象学中常对各种运动系统进行尺度分类，利用尺度分析法（第二章）分析各类运动系统的一般性质，建立各类运动系统的物理模型（或称数学模式），使得模式中只包含决定该类运动系统性质最本质的物理过程，然后再根据该数学模式研究该类运动系统的具体规律。所建立的数学模式显然比起原始的大气运动方程组要简单得多，这不但便于数学处理，而且所得结论物理意义也清楚。这样处理问题的方法对解决大气动力学问题具有原则意义。

四、动力气象学发展简史与发展动向

近代动力气象学起源于北欧，在20世纪20年代，维·皮叶克尼斯 (V. Bjerknes) 等提出了锋面学说。相应地在苏联，也有以柯钦 (Кочин) 为首所做的一系列工作。到了30年代，由于无线电探空仪的使用，对高空的大气运动形式有了新的认识，发现了北半球中纬度高空在具有自西向东的绕极环流之上，迭加有波长达数千公里的波动，这些波动除有自身的结构和运动规律外，还与低空的锋面气旋存在内在的联系。对于这种现象，罗斯贝 (Rossby, 1939) 首先在理论上指出，这是由于科里奥利参数 $f = 2\Omega \sin\varphi$ 随纬度变化，即 β 效应而引起的一种涡旋性波动，从而提出了著名的行星波 (即长波) 理论。这是动力气象学历史上一个重大发展，并由此引伸出一系列理论研究。例如，提出了大气运动的地转适应理论 (罗斯贝, 1938)；行星波的能量频散理论 (罗斯贝, 1949；叶笃正, 1949)；发现了西风带中的急流并研究了其在大气环流中的作用 (罗斯贝, 1947, 帕尔门 (Palmen), 1951)；提出了行星波的斜压不稳定理论 (恰尼 (Charney), 1947；伊台 (Eccay), 1949) 和行星波正压不稳定理论 (郭晓岚, 1949)；还有大气运动的尺度分析理论 (恰尼, 1949) 等。这一系列研究为数值天气预报奠定了理论基础。50年代初首次成功地作出数值天气预报 (恰尼、菲耶托夫 (R. Fjortoft) 冯·诺意曼 (Von Neuman), 1950)，开始了将动力气象学理论应用于制作客观与定量预报的新阶段。在此基础上还开始了对大气环流进行数值模拟 (菲利普斯 (Phillips) 1956)。60年代，以第二类条件性不稳定 (缩写为 CISK) (恰尼等, 1964)、积云对流参数化 (郭晓岚, 1965)，及热带波动 (松野 (Matsuno), 1966) 为代表的热带大气动力学有了很大发展。近20年来，随着观测工具的进步和观测资料的丰富，又揭露了很多的新现象，丰富了感性知识，同时也促进了动力气象学发展。在中小

尺度动力学方面，除对中小尺度系统进行结构分析外，开展了对中尺度稳定性研究，提出了对称不稳定、横波不稳定概念，还对中尺度系统进行了数值模拟。在平流层动力学方面，除分析平流层环流特征外，对爆发性增温、准两年振荡现象进行深入的诊断分析，并建立了相应的理论。在大气环流方面，对大气环流遥相关、大气对外源强迫的响应、以及大气中低频系统活动等方面的研究取得了很大的成就，促进了行星波理论新发展。在非线性动力学方面，劳伦兹 (Lorenz) 早在 1963 年研究热对流时，就提出了被人们称之为劳伦兹非线性系统，并提出了“确定性非周期流”概念，这一思想还对其他学科有深远影响。分叉理论和劳伦兹怪引子理论发展，给湍流的研究开创了新的局面。自劳伦兹之后，气象学家们重视了对大气运动多平衡态、大气环流突变、大气非线性波、不同尺度运动非线性相互作用的研究等。

由于观测资料的丰富，探测手段的逐步现代化，计算机和计算技术的迅速发展，数学物理学的推进，使得动力气象学正在进入一个新的发展阶段。这个阶段的重要标致是普遍地把运动系统作为三维、瞬变、具有强迫耗散的非线性动力学系统来研究。在研究方法上，观测分析、解析研究、数值模拟齐头并进，对各种尺度运动系统及其相互作用的研究齐头并进。人们还普遍重视了海洋和大气的相互作用，已经建立起来的地球流体动力学可期望在这个阶段取得迅速发展。

五、物理量纲，国际单位制 (SI)

表征一个物理系统的性质，往往需要引进许多物理量。这些物理量并不都是独立的，它们之间存在着一定的关系。若选定了几个基本物理量，则其它的物理量就可用这几个基本物理量表示。例如，在力学范畴内，长度、质量、时间可以认为是独立的基本物理量，而速度、加速度、力、功等，可以写成这几个基本物理量的乘幂和比率的形式，这在物理学中称之为量纲（因次）。

发生在大气中的动力学过程和热力学过程是动力气象学研究的主要内容，它所涉及到的物理量的量纲可由长度、质量、时间和热力学温度这四个基本物理量纲表示。

知道物理量的量纲是不够的，为了量度和比较物理量的大小，必须给出基本物理量的量度单位。本书中将采用国际单位制（国际代号为SI）。长度、质量、时间和热力学温度都是SI单位制中所规定的基本单位，如表1所示。其它的物理量单位均可

表1 SI中基本单位

物理量名称	单位名称	单位代号	
		中文	国际
长度	米	米	<i>m</i>
质量	千克	千克	<i>kg</i>
时间	秒	秒	<i>s</i>
温度	开尔文	开	<i>K</i>

由这些基本单位导出，有些重要的导出单位将给予专门的代号。在动力气象学中经常遇到的具有专门代号的导出单位如表2所示。此外，表示平面角大小的单位为弧度（*rad*），角速度的单位为弧度/秒（*rad·s⁻¹*），是SI中的辅助单位。

表2 SI中导出单位

物理量名称	单位名称	单位代号	
		中文	国际
频率	赫兹	赫兹	<i>Hz(s⁻¹)</i>
力	牛顿	牛顿	<i>N(kg·m·s⁻²)</i>
压力	帕斯卡	帕斯卡	<i>Pa(N·m⁻²)</i>
能	焦耳	焦耳	<i>J(N·m)</i>
功率	瓦特	瓦特	<i>W(J·s⁻¹)</i>

在实际应用时，SI中有些物理量单位有时显得太小或太大，如用帕斯卡表示大气压强就显得太小。为了方便起见，常在单位前面加一个词冠，以表示该单位要乘以10的整数次幂。词冠的名

称与符号如表 3 所示。词冠的符号和紧接在后面的单位符号一起也可作为一个整体看待。

表3 表示10的整数次幂的词冠

倍数	名称	符号
10^6	兆	<i>M</i>
10^3	千	<i>k</i>
10^2	百	<i>h</i>
10^1	十	<i>da</i>
10^{-1}	分	<i>d</i>
10^{-2}	厘	<i>c</i>
10^{-3}	毫	<i>m</i>
10^{-6}	微	μ

本书在个别的方面，也采用了允许使用的其他单位制。

(1) 为了表示方便，时间单位有采用时 (*HR*)，和天 (*d*) 的。

(2) 讨论观测温度时，仍采用摄氏温标，摄氏温标与热力学温标之间的关系为

$$T_c = T - T_0$$

T_0 表示摄氏度数 ($^{\circ}\text{C}$)， T 代表以 K 表示的热力学温度，而 $T_0 = 273.15K$ 。此关系式可看出， $1K$ 等于 1°C 。

第一章 描写大气运动的基本方程组

一切天气现象都与大气运动有关。尽管大气运动是很复杂的，但大气运动始终要遵循某些基本物理定律。支配大气运动状态和热力状态变化的基本物理定律有：牛顿第二定律、质量守恒定律、热力学能量守恒定律、气体实验定律等。这些基本物理定律的数学表达式构成了研究大气运动具体规律的基本出发方程组。本章的目的，就是给出描写大气运动的基本方程组。

在此之前须要指出，分析流体运动有两种基本方法（或称两种基本体系），一是拉格朗日方法，一是欧拉方法。拉格朗日方法以流体中某一物质体积元（又称微团）为研究对象，研究它的空间位置及其物理属性随时间变化的规律，并进而推广到整个流体的运动。欧拉方法则以流体空间中某一固定体积元（可视为空间中固定点）为研究对象，研究不同流体微团通过某一固定点时的运动状态及其它物理属性变化的规律，从而掌握流场中各物理量的空间分布及其变化规律。物理量的空间分布称为物理量场，其数学表达式称为场函数。因此，也可以说欧拉方法把整个流体运动问题归结为研究各种物理量场的特征及其变化规律问题。由于各场变量之间的关系可以依据基本物理定律用一组偏微分方程表示出来，多数流体力学问题用欧拉方法进行分析研究将是方便的，而拉格朗日方法在解决具体问题时常会遇到数学上困难，所以欧拉方法得到广泛应用。

经典力学和热力学常以个别物体和个别热力学系统作为研究对象，物理定律可以直接用于研究个别空气微团运动状态和热力状态变化问题，但不能直接用于研究物理量场的变化规律。如果