

[英] J. T. 霍顿 著

# 大气物理学



科学出版社

# 大气物理学

[英] J. T. 霍顿 著

中国科学院大气物理研究所 译

科学出版社

1981

## 内 容 简 介

本书比较全面地论述了决定行星大气的环流和结构的物理过程。应用热力学、辐射传输学和流体力学的基本原理推导出一些描述行星大气的简单物理模式，并着重把这些模式应用于地球大气。本书还较详细地讨论了全球大气的观测技术，特别是卫星观测技术。

本书可作为大气物理和气象专业高年级学生和研究生参考书，也可供有关专业的研究工作者参考。

J. T. Houghton

## THE PHYSICS OF ATMOSPHERES

Cambridge University Press 1977

## 大 气 物 理 学

〔英〕J. T. 霍顿 著

中国科学院大气物理研究所 译

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1981年1月第一版 开本：787×1092 1/4

1981年1月第一次印刷 印张：7 1/4

印数：0001—3,310 字数：160,000

统一书号：13031·1417

本社书号：1958·13—15

定价：1.20元

## 译者的话

大气物理学是涉及到许多学科的应用基础科学。采用最新技术来探测地球大气的状态参数和利用近代数理方法来描述大气物理过程的内在规律性，是当今大气物理学的显著特点。目前，这方面较系统的专著还很少。我们将著名大气物理学家 J. T. Houghton 教授所著《大气物理学》(1977年第一版)译出，供大气物理专业教学和科研工作者参考。

这本书论述了决定行星大气的环流和结构的物理过程。特别着重于基础物理学论证，应用热力学、辐射传输学和流体力学的基本原理推导出描述行星大气的简单的物理模式，并将这些模式应用于地球大气来解决全球大气的环流和运动的基本问题。本书在大气辐射，辐射传输和卫星观测技术等方面有独到之处，并收集了当代在这些方面的最新研究成果。另外，用大量的习题来扩展和加深相应章节的内容以及培养读者的独立思考能力也是本书的显著特点。

大气物理学不仅涉及到许多学科，而且近些年来还发展了许多新的分支。目前，国内各学科之间在专业术语的译名方面还存在许多不统一现象，这给翻译工作带来了一定的困难。在翻译过程中我们力求将所涉及到的各学科术语统一起来。在处理以人名命名的定律、定义等时除众所周知的给出中文名字外，一律保留原文。限于译者水平，不妥和错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

本书由中国科学院大气物理所集体译出。参加翻译工作的有王明星（序言，附录，习题解答和解题提示），孔琴心（第一、二章），任丽新（第三、六章），周凤仙（第四、五章），石广玉（第七、八章），赵高祥（第九、十章），吕位秀（第十一章），王庚辰（第十二、十三章）。由王明星同志进行总校。中国科学院大气物理研究所研究员周秀骥同志最后校阅、审定了译稿。

## 前 言

最近十几年来，三个重要因素使人们对大气科学的兴趣大为增加。第一，人类与日俱增的工业生产活动使污染和人们在有意无意中改变环境的可能性成为十分突出的中心问题。第二，面对人口的迅速增长，世界粮食资源问题使我们更加意识到气候变动的严重影响，特别是对发展中国家的影响。第三，人造卫星的出现和电子计算机的发展给大气研究提供了更有力的工具，使我们有可能把大气作为一个整体来加以研究。

目前，全球大气研究集中于一个大规模的国际研究计划——全球大气研究计划。这一计划是由大气科学家（通过国际科学联合会理事会）和各国气象局（通过世界气象组织）共同组织的。其目的是研究关于整个大气（所以用“全球”这个词）的环流和运动特性的一些基本问题以及气候变迁的机制。

本书正是在这一全球大气研究计划所涉及的领域内编写的。目的是向物理专业本科学生和毕业生介绍控制行星大气环流和结构的物理过程。在本书写作中，我着重于基础物理学，并尽可能地把经典热力学、辐射传输和流体力学的基本原理用于大气，以建立简单的物理模式。

本书是作为教科书编写的。因而，书中包括了大量习题。其中一些增补了每章中的基本材料，另一些则是对课文内容

的进一步阐述。在保证篇幅适中的前提下，我力图介绍中性大气(电离大气和磁层除外)物理学中所有主要研究领域,这就需要严格选择材料。可是,我希望这是一本适中的书,读者可以从了解到整个大气的概况,并知道大气物理学正在研究的领域。为了帮助学生进一步学习,书中包括了一个比较重要的参考书目。同时还附有一些附录,概述了对研究工作者有参考价值的有关大气的资料。

因为大气科学涉及到物理学和化学中的许多传统的课题,符号、术语和单位问题可能比一般学科更复杂。我力求使用各学科通用的符号,尽量避免为了一致而使用不常用的符号。一般都采用 SI 单位制,只有一个例外是气压。我采用了气象业务中世界通用的单位——毫巴,而不用帕斯卡。

我非常感激许多同事和学生在写本书过程中所给予的帮助。动力学章节的许多概念和材料取自 R. S. Harwood 博士在牛津大学讲学时极好的大气动力学讲义,他还对有关章节提出了许多宝贵的批评和建议。C. D. Walshaw 博士、G. D. Peskett 博士、R. Hide 教授、P. A. Sheppard 教授以及使用过本书初稿的牛津大学的毕业生都对本书各部分提出过不少批评与建议。C. D. Rodgers 博士、M. Corney 夫人和 R. J. Wells 先生帮助收集了附录中的某些资料。M. J. Wale 先生帮助编写了习题答案和解题提示。D. Wrigley 先生校对了清样并编写了索引。我特别感激打印手稿的 C. M. Wagstaff 小姐和描图的 B. Lindner 小姐以及为本书的出版作了许多有益贡献的剑桥大学出版社的职员们。

J. T. 霍顿

1976年3月

# 目 录

前言.....	(ix)
第一章 基本概念.....	(1)
1.1 行星大气.....	(1)
1.2 平衡温度.....	(2)
1.3 流体静力学方程.....	(3)
1.4 绝热直减率.....	(4)
1.5 Sandström 定理.....	(6)
习题.....	(7)
第二章 辐射平衡模式.....	(9)
2.1 黑体辐射.....	(9)
2.2 吸收和发射.....	(10)
2.3 灰体大气中的辐射平衡.....	(12)
2.4 辐射时间常数.....	(15)
2.5 温室效应.....	(16)
习题.....	(18)
第三章 热力学.....	(19)
3.1 干空气的熵.....	(19)
3.2 饱和空气的铅直运动.....	(20)
3.3 温熵图.....	(23)
3.4 气柱的总势能.....	(25)
3.5 可用势能.....	(26)
3.6 纬向能和涡旋能.....	(31)
习题.....	(32)



第四章 较复杂的辐射传输 .....	(37)
4.1 辐射传输的积分方程 .....	(37)
4.2 对频率的积分 .....	(38)
4.3 辐射过程引起的加热率 .....	(39)
4.4 单谱线 .....	(41)
4.5 大气路径的透过率 .....	(44)
4.6 由平流层上部和中层下部的二氧化碳发射所引起 的冷却 .....	(45)
4.7 臭氧对太阳辐射的吸收 .....	(46)
4.8 谱带模式 .....	(47)
4.9 连续吸收 .....	(48)
4.10 全球辐射收支 .....	(49)
习题 .....	(50)
第五章 高层大气 .....	(55)
5.1 高层大气的温度结构 .....	(55)
5.2 扩散分离 .....	(59)
5.3 氢的逃逸 .....	(61)
5.4 热层的能量平衡 .....	(64)
5.5 光化学过程 .....	(65)
5.6 热力学平衡的破坏 .....	(70)
习题 .....	(76)
第六章 云 .....	(80)
6.1 云的形成 .....	(80)
6.2 云滴的增长 .....	(80)
6.3 云的辐射特性 .....	(83)
6.4 云中的辐射传输 .....	(84)
习题 .....	(86)

<b>第七章 动力学</b> .....	(89)
7.1 全微商和偏微商 .....	(89)
7.2 运动方程 .....	(90)
7.3 地转近似 .....	(93)
7.4 旋衡运动 .....	(94)
7.5 等压面 .....	(95)
7.6 热成风方程 .....	(96)
7.7 连续方程 .....	(97)
习题 .....	(99)
<b>第八章 大气波</b> .....	(105)
8.1 引言 .....	(105)
8.2 声波 .....	(105)
8.3 重力波 .....	(107)
8.4 罗斯贝波 .....	(111)
8.5 涡度方程 .....	(115)
8.6 三维罗斯贝型波 .....	(117)
习题 .....	(123)
<b>第九章 湍流</b> .....	(126)
9.1 雷诺数 .....	(126)
9.2 雷诺应力 .....	(127)
9.3 埃克曼解 .....	(129)
9.4 混合长假说 .....	(131)
9.5 埃克曼泵 .....	(132)
9.6 大气湍流谱 .....	(134)
习题 .....	(137)
<b>第十章 大气环流</b> .....	(140)
10.1 实验室实验 .....	(140)
10.2 对流环流 .....	(142)

10.3	惯性不稳定 .....	(148)
10.4	正压不稳定 .....	(148)
10.5	斜压不稳定 .....	(151)
10.6	斜坡对流 .....	(155)
10.7	能量输送 .....	(155)
10.8	角动量输送 .....	(158)
	习题 .....	(160)
<b>第十一章 数值模拟 .....</b>		<b>(163)</b>
11.1	正压模式 .....	(163)
11.2	斜压模式 .....	(164)
11.3	初始方程模式 .....	(166)
11.4	考虑地形 .....	(168)
11.5	对流 .....	(169)
11.6	湿过程 .....	(169)
11.7	辐射传输 .....	(170)
11.8	次网格尺度过程 .....	(174)
11.9	穿过地表面的传输 .....	(175)
11.10	其它模式 .....	(176)
	习题 .....	(177)
<b>第十二章 全球观测 .....</b>		<b>(178)</b>
12.1	需要什么样的观测 .....	(178)
12.2	常规观测 .....	(179)
12.3	卫星遥测 .....	(179)
12.4	大气温度的遥测 .....	(181)
12.5	大气成分的遥测 .....	(187)
12.6	从遥测平台上进行观测 .....	(189)
	习题 .....	(191)

### 第十三章 大气的可预报性和气候变化

13.1 短期可预报性 .....	(194)
13.2 长期变化 .....	(195)
13.3 大气的反馈过程 .....	(195)
13.4 气候模拟 .....	(197)
附录 .....	(199)
I. 常用物理常数和干空气的资料 .....	(199)
II. 水汽的性质 .....	(200)
III. 大气成分 .....	(202)
IV. 位势高度和几何高度的关系 .....	(203)
V. 模式大气 (0—105 公里) .....	(203)
VI. 平均参考大气 (110—500公里) .....	(212)
VII. 普朗克函数 .....	(212)
VIII. 太阳辐射 .....	(213)
IX. 氧和臭氧对太阳辐射的吸收 .....	(216)
X. 光谱带资料 .....	(218)
书目 .....	(225)
文中引用过的参考书 .....	(227)
习题答案和解题提示 .....	(230)

# 第一章 基本概念

## 1.1 行星大气

行星大气是围绕行星的气体层。表1给出了最靠近我们的几个行星大气的资料,从中看出,不同行星的大气在化学成分和物理结构方面都有很大差别。

表 1

	平均表面温度 (K)	表面压力 (大气压)*	重力加速度 (米·秒 <sup>2</sup> )	主要成分	
金星	750	90	8.84	>90%CO <sub>2</sub>	被厚云完全覆盖
地球	280	1	9.81	N <sub>2</sub> 78%** O <sub>2</sub> 21%	约50%被水云覆盖
火星	240	0.007	3.76	>80%CO <sub>2</sub>	一些很薄的水云
木星	134***	2***	26	H <sub>2</sub> , He	NH <sub>3</sub> 云

\* 1大气压是地球表面的平均压力 =  $1.013 \times 10^5$  帕斯卡 (牛顿米<sup>-2</sup>) = 1013毫巴 (此气象上用的压力单位将在全书中使用)。

\*\* 关于地球大气的详细成分见附录Ⅱ。

\*\*\* 在云顶。

为了完全了解一种大气,我们需要知道它的演化以及确定其质量和成分的过程。我们还必须知道它的物理结构和密度分布、成分和大气内的运动。

就地球大气而论,为了在数天或数周之前预告它的状态,需要很详细的资料。进而由于我们对气候变化的关心,还必

须了解决定大气数年和数百年间平均状态的诸因素。

本书将限于大气研究中的物理过程的描述，大部分应用于地球大气。我们将首先应用热力学，辐射传输和流体力学的基本物理原理，导出能够用以了解大气结构和演变的主要特征的简单模式。在以后的章节里，我们将叙述观测大气的方法并且指明近代大气科学中正在研究的主要问题。

## 1.2 平衡温度

令被吸收的太阳辐射和被发射的红外辐射相平衡，可用下式粗略估计行星表面的有效温度

$$4\pi a^2 \sigma T_e^4 = \pi a^2 (1-A) F / R^2 \quad (1.1)$$

式中  $\sigma$  是斯蒂芬-玻尔兹曼常数， $a$  是离太阳距离  $R$  (天文单位) 处的行星半径， $F (= 1370 \text{ 瓦} \cdot \text{米}^{-2})$  是通过垂直于太阳光束方向的地球表面 (即当  $R = 1$ ) 的太阳辐射流通量， $A$  是反照率，即整个行星对入射太阳能反射的比率。(1.1) 式的右边是被吸收的太阳辐射，左边是行星作为一个温度为  $T_e$  的黑体所发射的辐射。表 2 列举了某些行星在 (1.1) 式中的各种参数值，并且将温度近似测量值  $T_m$  与由 (1.1) 式计算的温度值进行比较。

表 2

	$R$	$A$	$T_e$ (K)	$T_m$ (K)	$M_r$	自转周期 (天)
金星	0.72	0.77	227	230	44	243
地球	1.00	0.30	256	250	28.8	1.00
火星	1.52	0.15	216	220	44	1.03
木星	5.20	0.58	98	130	2	0.41

理论计算和实际测量值是很一致的,木星是个例外,它吸收的太阳辐射仅仅占维持它的观测温度所需要的入射能一半左右,因此,另一半能量必须由它内部产生(参考习题1.2)。

表2中金星的有效温度与表1中行星的表面温度有很大差别。对所有波长大于1毫米的辐射,完全覆盖金星的浓云基本上是不透明的。这些云的作用犹如一个辐射罩,它阻挡几乎所有从低层大气发射的辐射逸出,而只允许少量的太阳辐射通过(见1.5节)。这种能够使表面维持高温的过程有时称作“温室效应”。这种效应对地球的影响虽然比对金星小,但也是存在的,以致地球的平均表面温度接近290 K。

### 1.3 流体静力学方程

由于行星大气处于行星引力场中,所以它的密度随高度减少。因为垂直运动通常很小,静力平衡假定是一个好的出发点。如果 $\rho$ 是密度, $p$ 是从表面垂直向上测量的高度 $z$ 处的压力,则有

$$dp = -\rho g dz \quad (1.2)$$

由于行星大气的总厚度通常比行星的半径小,在大气层内重力加速度 $g$ 近似为常数(参考习题1.5)。

从分子重量为 $M_r$ (见表2),温度为 $T$ 的理想气体状态方程可得

$$\rho = \frac{M_r p}{RT} \quad (1.3)$$

式中 $R$ 是克分子气体的气体常数。

因此方程(1.2)变成

$$dp/p = -dz/H$$

积分后给出高度  $z$  处的压力  $p$

$$p = p_0 \exp \left\{ - \int_0^z dz/H \right\} \quad (1.4)$$

式中  $p_0$  是  $z=0$  处的压力,  $H = RT/M_r g$  称作均质大气高度, 它是使气压减小  $e$  倍所需要的高度增量。对于地球低层大气,  $H$  在6公里(在  $T = 210K$ )到8.5公里(在  $T = 290K$ )之间变化。在很高的大气层中, 分子重量不再是常数, 而且温度非常高, 这种情况将在5.2节中更详细地讨论。

#### 1.4 绝热直减率

行星大气最简单的模式是假定大气对所有辐射透明, 不含有液态粒子并且它的下边界温度为行星表面温度, 这个表面的平均温度由1.2节简单的计算来确定。考虑在这种大气内, 压力为  $p$ , 温度为  $T$ , 比容为  $V$  的“气块”的铅直运动。我们假定大气处在由(1.2)描述的流体静力平衡状态。于是, 重力和浮力相平衡, 它们将不会在单位质量的热力学第一定律的表达式中出现, 因此有

$$dq = c_v dT + p dV \quad (1.5)$$

式中  $c_v$  是定容比热。如果没有热量进入或离开这气块, 那么运动是绝热的, 热量  $dq$  等于零。

状态方程(1.3) ( $1/V = \rho$ )的微分形式是

$$\begin{aligned} p dV + V dp &= R dT / M_r \\ &= (c_p - c_v) dT \end{aligned} \quad (1.6)$$

因为对于理想气体  $c_p - c_v = R/M_r$ , 式中  $c_p$  是定压比热。将(1.6)中的  $p dV$  代入(1.5)式, 我们得到

$$c_p dT - V dp = dq = 0 \quad (1.7)$$



将方程(1.2)代入上式得

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} = -\Gamma_d \quad (1.8)$$

$\Gamma_d$  称为干空气的绝热直减率, 对于地球大气,  $c_p = 1005$  焦耳·千克<sup>-1</sup>,  $\Gamma_d \approx 10\text{K} \cdot \text{公里}^{-1}$ .

因此, 如果大气由于与地面接触而被加热, 并因此引起了铅直运动, 则我们可以预期在大气的铅直方向存在均匀的温度梯度, 其值约为  $10\text{K} \cdot \text{公里}^{-1}$ .

讨论在具有图 1.1 中温度分布  $b$  的大气内所发生的铅直运动的稳定性是有益的。如果一个初始位置在  $X$  的气块绝热地抬升, 它将沿着干绝热线  $a$  升到  $X'$ , 在那里它将被  $X''$  条件

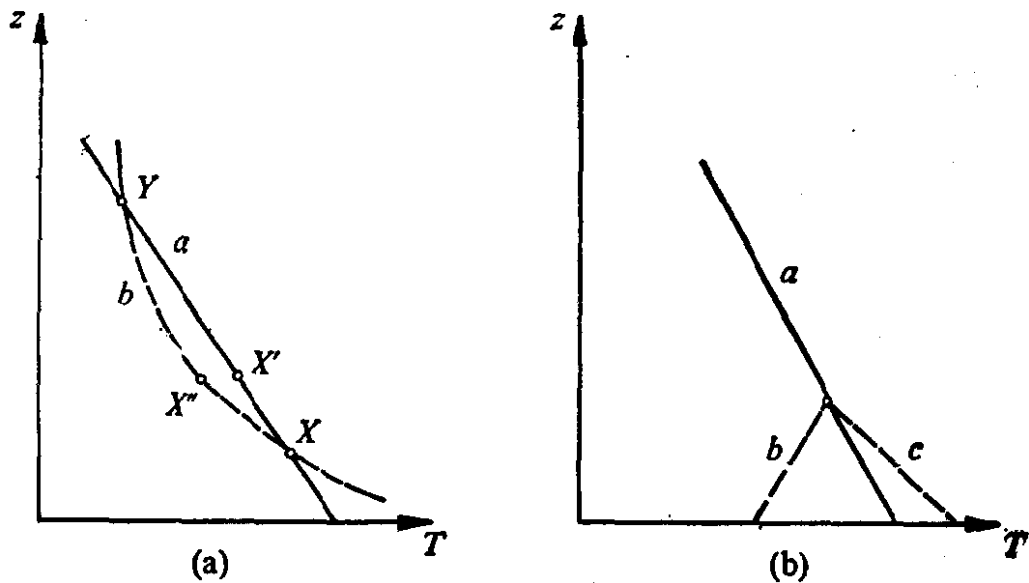


图1.1 (a)温度廓线  $b$  的稳定性.

(b) 绝热温度直减率  $a$ ; 逆温状态  $b$ , 即温度随高度增加, 例如, 当地面比大气冷却得更快时则出现逆温; 超绝热状态  $c$  不能持续很久并且决不会在大尺度上发生