

大气物理学

〈加〉 J.V. Iribarne

H.-R. Cho

ATMOSPHERIC
PHYSICS

气象出版社

大气物理学

J. V. 艾里巴恩 著
H. - R. 襍

唐东昇 巴文伦 译
张杏珍 校

气象出版社

1984

内 容 简 介

本书共分七章,其中包括大气概述、大气化学、辐射、大气热力学和垂直稳定度、云物理学、大气电学和大气动力学,是一本内容广泛的基础性教学参考书。每章后面附有思考题和习题,书后还附有思考题及习题的部分答案和解题提示,供读者作练习时参考。

本书可供气象教学和从事气象工作的科技人员阅读,也可供从事环境保护、空间研究、航空部门和从事研究地球大气的专业人员参考。

J. V. Iribarne and H. -R. Cho

Atmospheric Physics

D. Reidel Publishing Company

1980

大 气 物 理 学

[加] J. V. 艾里巴恩 著
H. - R. 襍

唐东昇 巴文伦 译

张杏珍 校

责任编辑 陶国庆

* * *

气 象 出 版 社 出 版

(北京西郊白石桥路46号)

北京印刷一厂印刷 新华书店北京发行所发行

* * *

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 7.75 字数: 201 千字

1985年 3月第一版 1985年 3月第一次印刷

印数: 1—6,000 统一书号: 13194·0196

定价: 2.10元

译者的话

本书是加拿大多伦多大学J. V. 艾里巴恩和H. -R. 襍所著, 试图作为大学课程中关于大气科学的一本内容广泛的基础性教科书。作者根据近二十年来大气科学迅速发展所获得的成果, 同时考虑到环境科学、空间研究、航空发展与地球大气的密切关系, 对大气中各种物理现象和物理过程进行了较全面的论述。该书与已经问世的同类书相比, 具有内容丰富、书中插图新颖、概念和论据的阐述清晰易懂等优点, 并且专设了大气化学和大气电学的章节; 内容的编排可根据不同需要进行不同的选择。该书可作为气象教学和从事气象工作的科技人员的参考书, 也可供从事环境保护、空间研究、航空部门和从事研究与地球大气有关的项目的专业人员参考。

本书第一章、第四章、第五章和第七章由唐东昇翻译; 第二章、第三章和第六章由巴文伦翻译。全书由张杏珍校对。

译本承蒙汪庆甲教授审阅, 并提出宝贵意见, 在此谨表深忱的谢意。

因水平有限, 译文有错误或不当之处, 敬希读者指正。

1983年2月

序 言

最近几十年间，大气科学非常迅速的发展以及对某些应用问题（如与环境有关的问题）的关注，促使大学课程要引入这方面的内容。因而，需要有好的教科书。

近几年来已有几种具有不同学术水平和不同倾向的合适的书问世。其中大多数，范围相当有限，特别是有些书的内容，只局限于动力学及其在气象方面的应用。因而仍需要有一本有关地球大气的基本而且较全面的评著。这本短著试图满足这种需要。

本书打算作为一本教科书，用作大学二年级或三年级的课程。它仅要求具备基础数学和从大学一年级普通物理课程中能够获得的物理知识。它适合于两种用途：其一，为正在或将在其它领域（例如：地球物理学，地理学，环境科学，空间研究）工作，但有兴趣获得一般知识的学生提供这方面总复习的内容；其二，对以后专修大气科学某一领域的学生，作一般性的和初步的入门介绍。本书内容十分广泛，从目录可以看出。举例说，它包括有同类书中通常缺少的化学和电学的章节，它尝试引入有关大气的大量基本概念和论据，而无需所有专门的预备知识。本书题目多样性的编排，使教师能够有选择地舍去一些特殊问题，而不失连贯性。每章附有问答题和习题，这些即使是初级的，也会帮助读者增进对各种问题的了解。

在摘引各种原始资料时，多布森、古迪和沃克编著的优秀的基础教科书，以及高水平的专论对我们有很大的帮助。书后列有文献目录，附有简要评注。希望它能帮助读者指出进一步阅读的方向。

目 录

序 言

第一章 大气概述 (1)

§ 1 大气的各个区域和延伸..... (1)

§ 2 匀和层和非匀和层、标高..... (3)

§ 3 温度分布: 对流层、平流层、中间层、热层..... (7)

§ 4 电离层..... (9)

§ 5 外逸层..... (15)

§ 6 极光..... (16)

§ 7 磁层..... (19)

思考题和习题..... (23)

第二章 大气化学 (26)

§ 1 空气的组成..... (26)

§ 2 次要成分..... (28)

§ 3 大气化学中重要化合物概述..... (30)

§ 4 水物质..... (32)

§ 5 主要元素的循环..... (38)

§ 6 硫化合物..... (38)

§ 7 氮化合物..... (41)

§ 8 碳化合物..... (44)

§ 9 光化污染..... (46)

§ 10 大气气溶胶..... (48)

§ 11 其它行星的大气..... (51)

思考题和习题..... (53)

第三章 辐射..... (56)

§ 1 定律..... (56)

§ 2 太阳辐射..... (62)

§ 3 地球辐射·····	(77)
思考题和习题·····	(89)
第四章 大气热力学和垂直稳定度 ·····	(92)
§ 1 大气系统·····	(92)
§ 2 用于空气和云的热力学第一定律·····	(93)
§ 3 大气中的主要过程·····	(95)
§ 4 冷却·····	(96)
§ 5 没有凝结的绝热膨胀和位温·····	(98)
§ 6 有凝结的绝热膨胀·····	(99)
§ 7 水平混合·····	(101)
§ 8 垂直混合·····	(102)
§ 9 垂直稳定度: 条件不稳定和潜在不稳定·····	(103)
§ 10 位势不稳定或对流不稳定·····	(107)
思考题和习题·····	(110)
第五章 云物理学 ·····	(113)
§ 1 云的分类·····	(113)
§ 2 大气中水汽的凝结和云凝结核 (CCN) ·····	(118)
§ 3 水滴的凝结增长·····	(121)
§ 4 云滴·····	(123)
§ 5 碰撞和并合引起的增长·····	(124)
§ 6 暖雨·····	(128)
§ 7 冰的形成·····	(129)
§ 8 冰晶过程引起的雪、雹和雨·····	(131)
§ 9 冰晶降水·····	(135)
§ 10 人工影响降水·····	(141)
思考题和习题·····	(143)
第六章 大气电学 ·····	(147)
§ 1 大气的电性质·····	(147)
§ 2 晴天电场与空间电荷·····	(148)
§ 3 大气离子·····	(152)

§ 4	电导率.....	(153)
§ 5	大气电学的基本问题.....	(155)
§ 6	雷暴电学.....	(157)
§ 7	闪电.....	(161)
	思考题和习题.....	(168)
第七章	大气动力学	(171)
§ 1	空气运动的描述.....	(171)
§ 2	作用在大气中气块上的几个主要的力.....	(174)
§ 3	气块的加速度.....	(178)
§ 4	连续方程.....	(181)
§ 5	运动的尺度.....	(184)
§ 6	大尺度大气运动的一些重要特征.....	(186)
§ 7	中纬度大尺度环流系统中气压梯度和风的关系.....	(189)
§ 8	热力环流.....	(196)
§ 9	大气环流.....	(198)
§ 10	气团和锋.....	(210)
§ 11	中纬度气旋.....	(213)
	思考题和习题.....	(223)
	参考书目	(224)
	部分思考题和习题答案及分解提示	(228)
	常数表	(238)
	单位	(240)

第一章 大气概述

§ 1 大气的各个区域和延伸

大气是围绕地球的气体外壳，它受重力吸引，最大密度紧靠地球表面，随着高度增加，逐渐变得稀薄，最后与行星际气体没有什么区别。

因此，大气没有明确的上限(顶)。如果从地球表面向上推移，可以划分出性质不同，物理现象和化学现象有很大差异的几个区域。我们要想了解大气，首先需要引用一种分类法，帮助我们分别研究这些现象。下面我们讨论图1.1上的图示。

先看最下面的一千米。这里使用的是对数标尺，因此图的上部各个区域实际上比图的下部各个区域要厚得多。

右边是气压标尺，每一高度上每单位面积的气压由在它上面的全部空气重量决定。这一重量为：

$$\int_z^{\infty} g \rho \, dz$$

式中 ρ = 密度， g = 重力加速度， z = 高度（质量乘以重力加速度，对 z 高度以上积分）。 g 值只随高度缓慢地变化。因此，可以把气压粗略地看成正比于 $\int_z^{\infty} \rho \, dz$ ，也就是正比于 z 高度以上的全部质量。通过比较右边的气压标尺与左边的高度标尺，我们可以看出：

质量的90%是在约第一个20千米（顶部在100毫巴面上）以内。

质量的99.9%是在约第一个50千米（顶部在1毫巴面上）以内。

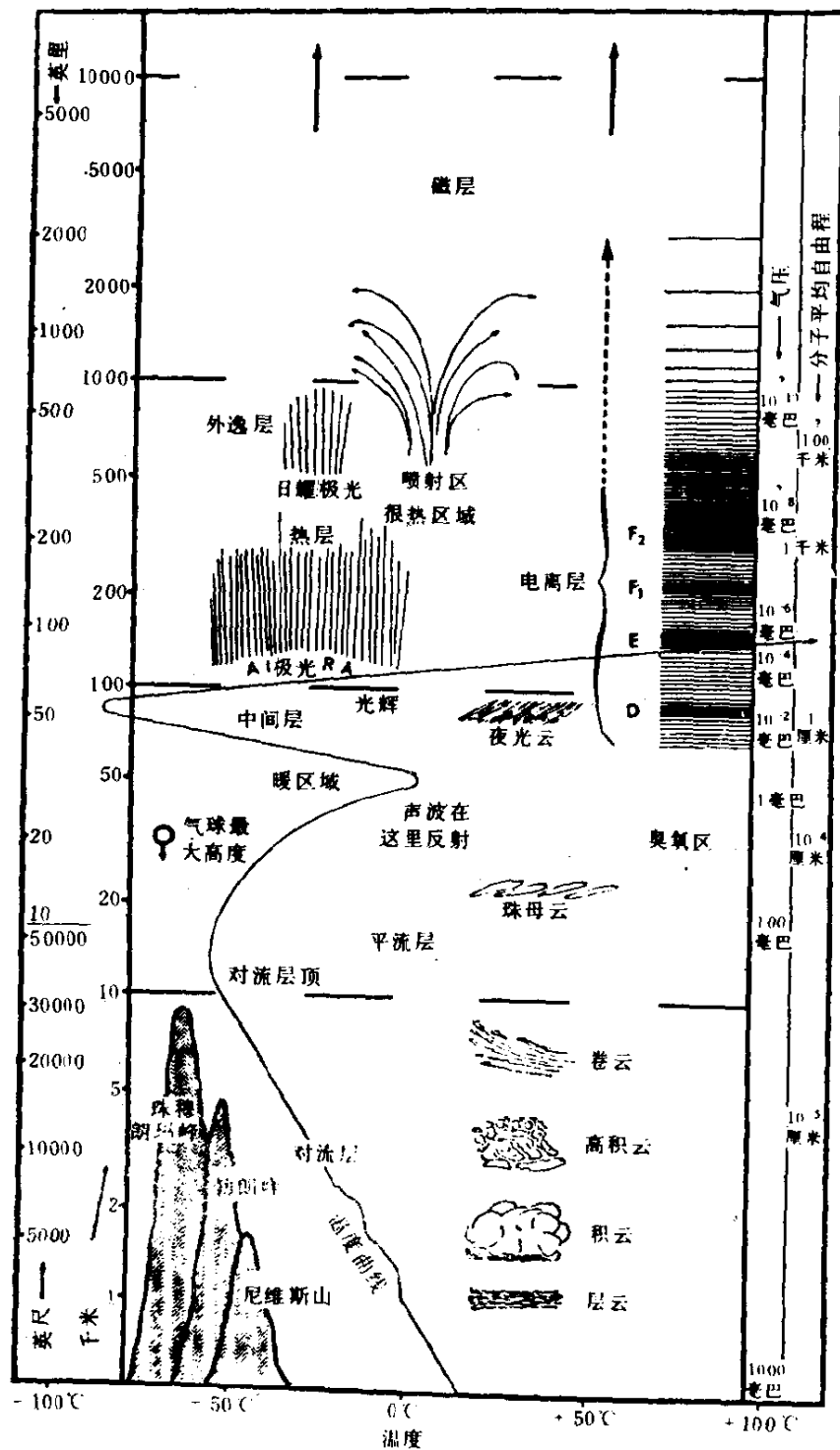


图 1.1 大气:

地球大气主要特性的图示 (本图的解释见第一章内容)。

在100千米高度上,气压大约降至 10^{-3} 毫巴,也就是说,在此高度以上,大气质量只有地面的 10^{-6} 倍(一百万分之一)。而在1000千米高度以上,只有 10^{-13} 倍。如果这些距离与地球的半径(约6370千米)比较,那么,很显然,从大气质量的观点来看,大气外壳即使有扩散极限,也只是围绕行星的一个很薄的气层。

§ 2 匀和层和非匀和层、标高

大气的“厚度”可用称为标高的参数来表示。关于标高,我们将在下面定义。我们可以把大气基本上看作是处于静力平衡的流体,这就是说,对单位截面无穷小的气层来说,有如下关系(参看图1.2):

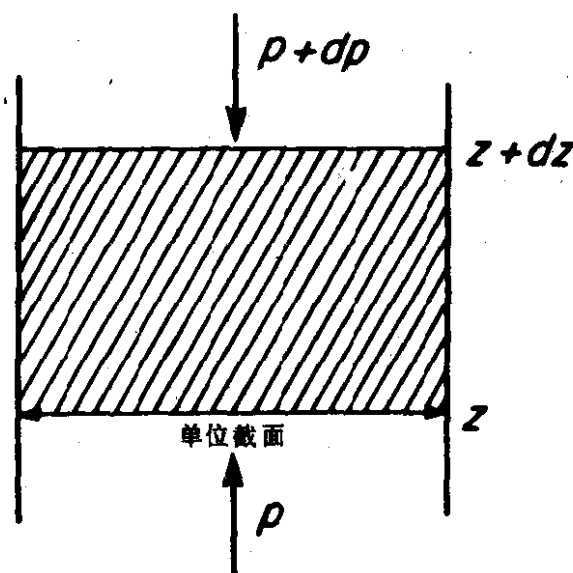


图 1.2 单位截面和厚度 dz 的空气柱气层

气压梯度引起的向上的力=重力

$$-dp = g \cdot \rho \cdot dz \quad (1.1)$$

关系式1.1(其中 p =气压)称为流体静力方程。

现在我们把各种大气温压条件下的空气看作是各种理想气体的混合。这样做,误差最大为百分之几。气压越低,其性质越接近理想气体。对每一种成分来说,则有

$$p_i V = n_i R T \quad (1.2)$$

式中 p_i = 成分 i 的分压, V = 体积, n_i = 成分 i 的摩尔数, R = 通用气体常数, T = 绝对温度。

$$p = \sum p_i \quad (\text{道尔顿定律})$$

$$p V = n R T \quad (1.3)$$

式中 p = 全压, n = 全摩尔数, 平均分子量定义为 $M = m/n = (\sum n_i M_i)/n$, 其中 m = 质量, M_i = 成分 i 的分子量。

方程 (1.3) 也可写成

$$p = \frac{R T}{M} \rho \quad (1.4)$$

消去 (1.1) 和 (1.4) 式中的 ρ , 则流体静力方程可以表示为:

$$d \ln p = - \frac{g M}{R T} dz \quad (1.5)$$

进行积分

$$p = p_0 \exp \left(- \int_0^z \frac{g M}{R T} dz \right) = p_0 \exp \left(- \int_0^z \frac{dz}{H} \right) \quad (1.6)$$

我们规定式中参数 $H = R T / g M$ 。这一参数叫作大气 (局地) 标高。下面我们将会了解到, 在 100 千米以下, M 可看作常数, g 决定于 z , 但每 100 千米, 它只变化 3 %。因此, 在 100 千米以下, H 的变化粗略地正比于 T 。当 $T = 273 \text{ K}$ 时 ($g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$, $M = 28.96$), 得到

$$H = 8 \text{ 千米} \quad (1.7)$$

可见, 如果温度是均匀的, (1.6) 式可写成

$$p = p_0 \cdot e^{-z/H} \quad (1.8)$$

H 表示气压按因子 $e^{-1} = 0.37$ 降低的高度, 也就是在这个高度以下, 大气质量约占 2/3。事实上, T 随高度变化时, H 也变化, 但在 100 千米高度以下, 变化的范围只有 5 — 9 千米。

至此, 我们假设了大气空气是固定成分的各种气体的混合, 而且是完全的混合。所以方程 (1.6) 中 M 是常数。但这不是贯穿整

个大气的情况。现在我们比较严密地讨论这一问题。如果要求出重力场中各种混合气体的平衡分布，统计力学告诉我们，这里各类分子都有自己单独的分布，也就是说，各种气体，根据自己的 M 值，符合以下方程：

$$p_i = p_{0i} \exp \left(- \int_0^z \frac{dz}{H_i} \right) \quad (1.9)$$

由此可知，重的分子主要是在低层；轻的分子主要是在高层。为了清楚地理解这一点，简便起见，我们设想 g 和 T 是常数，因此 H 只随 M 值变化。现在我们只讨论两种气体的混合：

$$\text{气体 1} \quad H_1 = \frac{RT}{gM_1}, p_1 = p_{01} e^{-z/H_1}$$

$$\text{气体 2} \quad H_2 = \frac{RT}{gM_2}, p_2 = p_{02} e^{-z/H_2}$$

$$M_1 > M_2 \quad H_1 < H_2$$

我们还设想，气体 1 主要是在近地面处，则两种气体的分布，即两种分压 p_1 和 p_2 的分布，如图1.3所示。由于方程(1.9)中指数 H 值不同，两条曲线就会在某一高度上相交。在这个高度以上，轻的气体 2 就是主要的。

我们在前面的论证中没有考虑这一点，是因为这类平衡很长时间才能达到。在100千米高度以下，混合机制（如湍流和对流翻转）很强，大气空气进行充分的混合。与此同时，流体静力分布很快地建立起来。我们可以假设，在每一瞬间，基本上属于这样的情况。在100千米高度以上，情况就不同了，那里基本上没有什么混合。因此，在100千米以下，除了痕量气体以外，空气的成分是常数，应用方程(1.6)式比较合适；在100千米以上，成分相应地开始变化，用方程(1.9)式来描述平衡更为合适。可是这仍旧远不是实际的情况。因为在这种高度上，还有另外一些因子也影响这些成分。这些因子中主要有太阳辐射的光化作用。这个问题，我们将留在后面探讨。这里我们保持这样的情景：在100千米以下

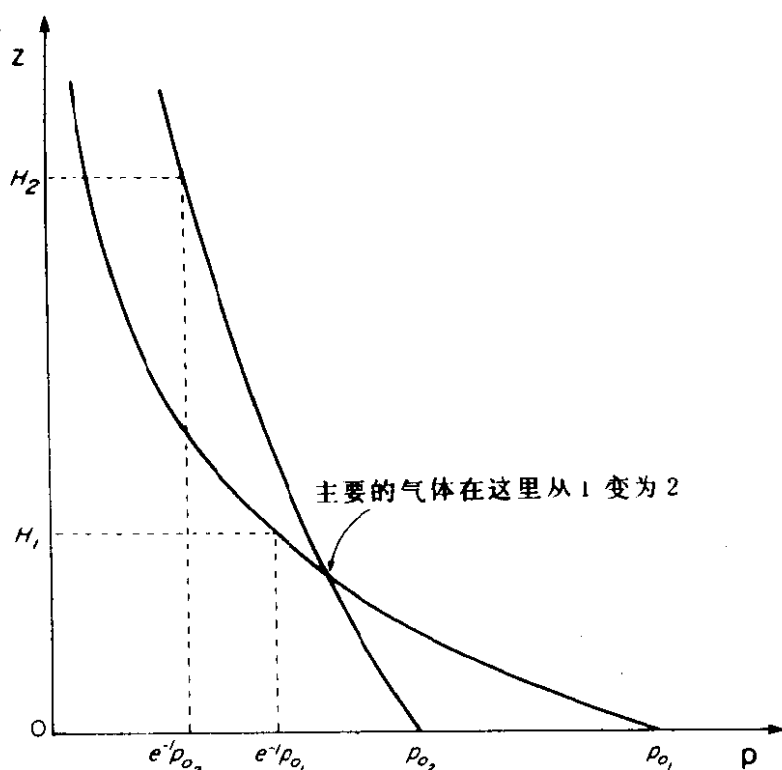


图 1.3 扩散平衡中两种气体的高度分布

p = 分压, z = 相对于参考面的高度, p_{01} , p_{02} = z 为零的气体 1 和气体 2 的分压, H_1 , H_2 = 气体 1 和气体 2 的标高。如设 H_1 和 H_2 为常数, 则两条曲线呈指数分布。

的气层中, 化学成分保持不变 (水汽和某些痕量气体除外)。因而称为匀和层; 在 100 千米以上, 成分发生变化, 称为非匀和层。

上面, 我们根据化学成分对大气区域进行了初步的分类。在这方面, 我们还应指出具有特别重要意义的痕量气体——臭氧。臭氧是平流层中的光化作用形成的, 最大浓度出现在 20—30 千米高度。臭氧层吸收太阳辐射的短波波段, 是造成约 50 千米高度上温度出现最高值的原因 (参见第三章 §2.4 节)。

水汽是大气低层极易变化的一种重要气体, 我们将在后面进行研究。这里我们只是指出一点, 由于水汽的凝结, 在对流层中 (大气最低层, 见后) 形成各种类型的云 (其代表性高度参见图

1.1)。一般的云都出现在对流层中，但在两个很高的高度上偶然也会出现云，这就是珠母云和夜光云。珠母云是由于它的鲜艳光色而得名，它出现在约27千米的高度上，高度范围很狭。珠母云可能是由冻结微滴组成的，而不是由冰晶组成。夜光云可能是由集积在陨星尘埃上的冰晶组成，它出现在80—100千米高度上，可在日落但仍有余辉时看到。

如果把地球的标高与大气的成分和重力加速度不同的其它行星的标高进行比较，那是有意义的。

表 1.1* 行星大气的标高

	气 体	平均分子质量 (原子质量 单位)	重力加速度 (厘米·秒 ⁻²)	平均表面温度 (K)	标 高 (千米)
金 星	CO ₂	44	888	700	14.9
地 球	N ₂ , O ₂	29	981	288	8.4
火 星	CO ₂	44	373	210	10.6
木 星	H ₂	2**	2620	160***	25.3

* 引自古迪和沃克合著一书（见参考文献）。

** 在木星上，氨可能很充足（4原子质量单位），使平均分子质量明显增加，因而使标高降低。

*** 木星云顶部附近的温度。

对大气各个区域，除了根据化学成分，还可根据温度分布、电子密度等进行分类。其中根据温度分布进行分类尤其重要，下面我们就进行讨论。

§ 3 温度分布：对流层、平流层、中间层、热层

图1.1上标有一条温度随高度典型分布的曲线。从地面开始到某一高度，温度随高度通常以每千米5—7度的速率降低，它是随时间和地点而变化的。有时甚至出现这样一个浅薄的层，层中温度随高度升高，这称为逆温层。后面我们还会谈到温度分布及

它与垂直稳定度的关系（第四章）。我们所讨论的这个区域称为对流层。在对流层中，有各种天气现象发生，影响生活在地面上的人们。由于一些众所周知的原因，对流层也是人们最了解的一个区域。对流层含有全部空气质量的 $\frac{4}{5}$ ，其上限可用温度趋势突变来确定，在曲线上常表现为不连续。温度停止下降显得有些突然，然后维持不变，或者开始微微的升高。这一界限称为对流层顶，其高度也与时间和地点有关（在赤道比在两极高），变化在7—17千米之间。在中纬度，对流层顶的温度为 -50 — -55°C 。

下一个区域，温度逐渐升高，在50千米高度，最高值达到零度左右。这一区域称为平流层，其上限（温度最高值高度）称为平流层顶。然后，温度重又下降，这个区域称为中间层。在约85千米高度，温度降到最低值 -100°C 左右，这个高度称为中间层顶。从这一高度开始，整个区域温度开始稳定上升。这一区域称为热层。热层中的温度值很高（图1.1上只标出其开始增加的部分），并且维持不变。在500千米高度上，温度值在 400 — 2000°C 之间，这与白昼时间、太阳活动情况和纬度有关。日变化达到 500 — 800°C ；最低值在日出前后，最高值约在下午两点。图1.4是用自然高度标尺表示的温度分布。应该说明，热层中这样高的温度，并不意味着物体，比如说卫星，通过这一区域时会受到很大的影响。因为气压很低（在500千米高度上为 10^{-8} 毫巴），不可能有可观的热量传输。物体实际上是处在空气非常稀薄的环境*中。这种气压条件下的温度意义，只要考虑到它是量度分子平均动能就容易理解了。

大气中温度的这种独特分布，从物理学的角度看，是与辐射吸收有关的（参见第三章）。产生在高层大气中的电离和分解的反应，造成了象热层这样的高温。平流层顶出现的温度最高值，与臭氧的存在有关。地面上通常又出现温度最高值，这是由于地面大量吸收到达这里的剩余的太阳辐射所致。

* 卫星温度决定于辐射交换。

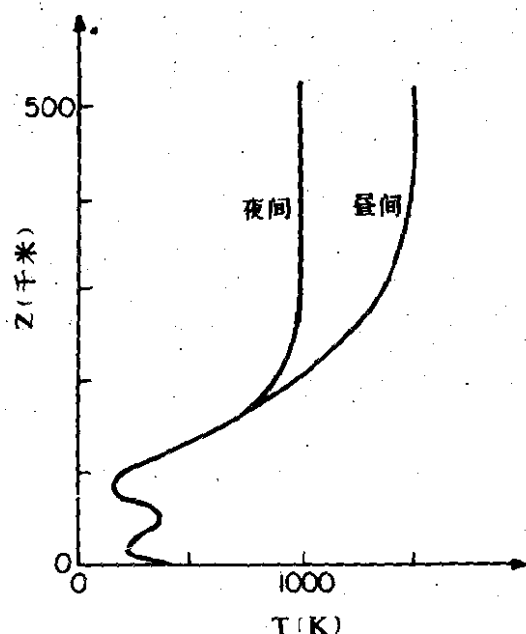


图 1.4 温度的垂直分布 (典型曲线, 参看正文)

要想全面描述图1.1, 我们还需要提及高层大气物理学的一些问题。下面我们要作比前几节主要内容更为详细的叙述, 这是因为在本书的其余部分 (第三章辐射除外) 不打算进一步展开这些问题。另一方面, 有关低层大气物理学, 将在下面各章进行比较充分的讨论。

§ 4 电 离 层

在高层, 太阳辐射的短波波长产生大量的电离原子和电离分子以及自由电子, 因此存在电子密度的垂直分布, 存在与光化过程有关, 或者决定于光化过程的高密度特征层或特征区。因而, 其典型的分布, 昼夜是不同的。如果从这一观点出发进行讨论, 这些区域称为电离层。

在地面上, 用波段为 1—20 兆赫 (波长 300—15 米) 的无线电波来研究电离层比较方便。使用的仪器叫作电离层探测仪。电离层探测仪主要由一个脉冲发送器和一个接收器组成。发送器垂直向上发射一定频率的短脉冲 (图1.5)。当这一电磁辐射穿过电离