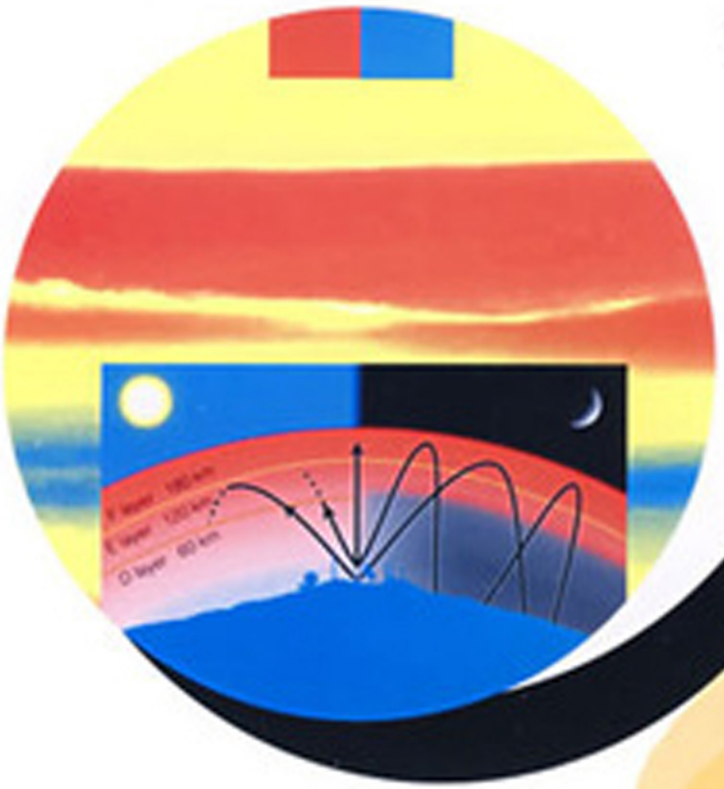
高等院校素质教育通选课教材

大气概论

李万彪 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

高等院校素质教育通选课教材

大气概论

李万彪　编著

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

大气概论/李万彪编著. —北京：北京大学出版社，2009.3
(高等院校素质教育通选课教材)
ISBN 978-7-301-14939-3

Ⅰ.大… Ⅱ.李… Ⅲ.大气科学—高等学校—教材 Ⅳ.P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 016594 号

书　　名：大气概论
著作责任者：李万彪　编著
责 任 编 辑：王树通
封 面 设 计：林胜利
标 准 书 号：ISBN 978-7-301-14939-3/P·0067
出 版 发 行：北京大学出版社(北京市海淀区成府路 205 号　100871)
网　　址：http://www.pup.cn　电子信箱：zpup@pup.pku.edu.cn
电　　话：邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62752021　出版部 62754962
印 刷 者：
经 销 者：新华书店
　　787 毫米×980 毫米　16 开本　14 印张　306 千字
　　2009 年 3 月第 1 版　2009 年 3 月第 1 次印刷
定　　价：25.00 元

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究
举报电话：(010)62752024　　电子信箱：fd@pup.pku.edu.cn

内 容 简 介

本书是作者多年来讲授通选课“大气概论”教学经验的结晶。内容几乎涉及大气科学的各个方面，但侧重强调基本的大气科学概念和原理。全书共分十四章，从地球大气起源和组成讲起，接着讲授温度、湿度、云、降水、气压、风等大气的基本要素；在介绍了全球大气环流后，描述了一些常见天气过程，如雷暴和台风等；随后是对人类活动影响大气环境、天气预报和气候变化的讨论；最后将大气中发生的一些光学现象一起介绍给大家。

本书从大气科学的基本概念和原理入手，由浅入深地描述。即使没有数学的微积分知识，也能理解本书涉及的各个方程和公式。尽管如此，读者应侧重了解大气科学的基本概念和原理。为了便于教学，每章末附有习题，书的附录部分附有常用物理常数表。

本书主要供大学本科生作为素质教育通选课教材使用，但也可作为中学生的参考书，或大气科学专业大学生、研究生的专业参考书使用。

前　言

“大气概论”作为北京大学素质教育通选课已经讲授了多次。开设此课的目的就是把大气科学最基础的知识和原理介绍给非大气科学专业的文、理、工、医等学科大学生，以引导大家了解周围大气变化、大气各种现象、天气变化的原理，并能学以致用、正确指导日常生活；促进大家关心天气、关心生态与人文环境的健康，养成注意天气变化和观察大气现象的习惯，为人类可持续发展、认识未知世界作出新贡献。

在作者的教学实践中，不断涉猎到中国古代对大气科学研究的贡献，也注意到课程教学不仅要学习国外许多数学家、物理学家和气象学家等建立的大气科学基础理论，更重要的是要和中华文化中的科学传统衔接起来，引导学员培养认真求实的科学精神。中华文化中科学文化的传统，十分注重“实践”，而这恰恰是大气科学学科所要必须面对的。看看北宋沈括所著的《梦溪笔谈》的记载，可以领略中国传统的脚踏实地的科学精神。这种精神在我们当前社会中，恰恰是许多学者、知识分子所缺乏的。

此外，作者也喜欢涉猎一些与大气科学发展有关的科学名人的轶事，融合在课程中。在进行较广泛的了解之后，也不禁对他们肃然起敬。这些科学名人包括国内外数学、物理、化学和气象等学科专家，他们个别人的一生如同大气中的一些现象，例如一些人如闪电耀眼迅忽，生命短暂，使人扼腕叹惜。另外，有的人在生前就看到自己的成果得到证实，也使我们这些后来人同样感到欣慰。在学习大气科学和了解这些科学家的同时，也深切感受到大气的风云变幻如同我们个人的经历、如同人世间的沧桑变化一样，需要我们在认识大气的同时，也去思考和认识人生人世，培养正确的人生观，为社会进步贡献力量。

正是有了这些感触，才触发作者写此教材的想法。恰逢北京大学近年来对素质教育课的大力支持和资助，得以在北京大学出版社立项出版。

本书共分十四章。第一章介绍大气科学的研究简史，大气演化、组成和结构。第二至七章，介绍大气现象的气象要素，即辐射和温度、水汽、云、降水及风等，包括基本能量传输和平衡过程、大气热力学过程和风形成的理论。第八章描述全球性的大气运动，即大气环流，这是各种我们常见天气现象活动的舞台。第九至十一章介绍一些影响我们日常生活常见、剧烈的天气现象和过程，包括锋与气旋、雷暴、龙卷风和台风。第十二章告诉大家人类活动影响了我们所处的大气环境，以及人类对天气进行预测活动，即天气预报。第十三章涉及我们地球的气候变迁，说明人类文明的发展已经影响到气候的变化。最后一章，即第十四章大气光象，将大气中发生的一些光学美景的现象的形成原理介绍给大家，探索它们如何形成，了解它们出现的地方，并鼓励大家到大自然去找寻并欣赏这些美景。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

本书力求通俗易懂，满足包括高中以及以上大众学习和参考，为了说明大气科学中的一些理论问题，也用到了一些不涉及微积分的计算公式。但懂得微积分的读者，也不难从这些计算公式中进行简单变化，而得到积分式。希望读者能够从简单的计算中理解大气的一些概念，掌握新的知识和思想观点。

由于现代大气科学分门别类太多，一个人的能力有限，很难像古人所说的“上至天文，下至地理，三教九流，诸子百家，无所不通；古今兴废，圣贤所传，无所不览。”（见《三国演义》第八十六回。）本书涉猎较为广泛的大气学科内容，并涉及物理、化学和中国古代对大气科学的研究等方面的内容，因此谬误也自然在所难免，请读者给予批评指正。

编　者

2009 年 1 月

目　　录

第一章　绪论 …… (1)

1.1　大气演化和组成 …… (1)

1.2　大气热力状态 …… (4)

1.3　大气结构 …… (6)

1.4　研究简史 …… (9)

第二章　能量与温度 …… (12)

2.1　热力学基本概念 …… (12)

2.2　辐射 …… (14)

2.3　太阳辐射在大气中的传输 …… (17)

2.4　辐射平衡 …… (20)

2.5　空气温度 …… (23)

第三章　水汽 …… (27)

3.1　水汽的特性 …… (27)

3.2　湿度的表示方法 …… (29)

3.3　露、霜、雾天气 …… (33)

3.4　湿度测量 …… (36)

第四章　看云 …… (39)

4.1　云状分类 …… (39)

4.2　特殊的云 …… (44)

4.3　云的观测 …… (45)

4.4　云的尺度分布和维数 …… (49)

第五章　云的形成 …… (52)

5.1　基本热力学过程 …… (52)

5.2　大气静力稳定度 …… (55)

5.3　云的生成与演变 …… (60)

5.4　看云识天气 …… (64)

第六章　降水 …… (67)

6.1　降水理论 …… (67)

6.2　降水类型 …… (72)

6.3 降水测量 …… (78)
6.4 人工降水 …… (79)
第七章 气压和风 …… (81)
7.1 气压 …… (81)
7.2 影响大气运动的力 …… (84)
7.3 风与气压的关系 …… (86)
7.4 风的测量和应用 …… (91)
第八章 大气环流 …… (96)
8.1 运动尺度 …… (96)
8.2 地方性的风 …… (97)
8.3 全球性的风 …… (99)
8.4 海气相互作用 …… (108)
第九章 锋与气旋 …… (112)
9.1 气团 …… (112)
9.2 锋 …… (115)
9.3 锋面气旋 …… (121)
第十章 雷暴和龙卷 …… (129)
10.1 雷暴分类及形成 …… (129)
10.2 普通雷暴和强雷暴 …… (131)
10.3 雷暴的运动 …… (135)
10.4 雷电现象 …… (136)
10.5 龙卷 …… (141)
第十一章 台风 …… (145)
11.1 剖析台风 …… (145)
11.2 在热带洋面上诞生 …… (148)
11.3 生命史 …… (150)
11.4 形成机制 …… (154)
11.5 台风灾害和预警 …… (155)
第十二章 人类活动 …… (160)
12.1 大气环境变化 …… (160)
12.2 天气预报 …… (168)
第十三章 气候变迁 …… (175)
13.1 全球气候的形成和分类 …… (175)
13.2 气候监测与重建 …… (177)

13.3 变化的气候 …… (179)
13.4 气候变化的可能原因 …… (182)
13.5 未来气候的可能变化 …… (187)
第十四章 大气光象 …… (190)
14.1 光学物理基础 …… (190)
14.2 大气分子引起的光学现象 …… (196)
14.3 水滴和冰晶引起的光学现象 …… (202)
14.4 气溶胶与云雾 …… (206)
14.5 大气能见度 …… (209)
参考文献 …… (211)
附录 …… (212)

第一章　绪　　论

大气是包围地球的空气的总称。它同阳光和水一样是地球上一切生命赖以生存的重要物质之一。许多人经常说起“人生在世”，可我们从来都没有真正想一下“在世”究竟在哪里。正确地说，大气是我们的家，是我们“在世”的地方。

生活在大气圈中，我们看不见大气，也摸不着它。但可以感受到它无时无刻不在变化，无时无刻不在显示它的存在。有时蓝天白云阳光明媚，有时乌云滚滚狂风暴雨——大自然展示出一幕幕变化万千的景象，陪衬着人间演绎的一幕幕悲喜闹剧。通过了解大气，既可以静观天下风云，又可体味人间冷暖。与我们休戚相关、荣辱与共的大气层，你能不尝试去了解、欣赏和探索它吗？

1.1　大气演化和组成

地球从诞生到现在，已经经历了巨大的沧桑变化，地球早期大气与我们现在呼吸的大气也完全不同。古代中国就认为空间由气组成，《列子・天瑞》中说：

> 天，积气耳，亡处亡气。

“亡”是无的意思。又说：

> 虹霓也，云雾也，风雨也，四时也，此积气之成乎天者也。

可见，“虹霓”、“云雾”和“风雨”等皆由气组成，至于气究竟是什么就不知道了。

我们现在的地球大气以氮、氧为主，这样的组成在太阳系中是唯一的。与地球邻近的金星和火星大气，主要组成成分是氧化物 CO_2，而外层行星（木星、土星、天王星和海王星）的大气主要是还原成分，例如 CH_4。另外，从太空看，地球是蔚蓝色的，这是因为液态水和空气分子的散射造成的。

地球大气随着地球的形成而出现和演化，现在已无法获得近 46 亿年的漫长阶段的大气样本，因此对大气演化问题的研究难度很大，只能用逻辑推理方法进行研究。现在大家认可的地球大气的演化大体上可以分为原始大气、次生大气（还原大气）和现代大气（氧化大气）三个阶段。

参考现在宇宙中的发现，地球原始大气（第一代大气），由氢、氦和氢的化合物如甲烷和氨组成。多数科学家相信，初期地球炽热的地表，使这些气体获得较高能量，它们从地球逃逸。估计到 45 亿年前或晚些时候，地球上是没有大气的。

尽管如此，第二代更厚的大气逐渐覆盖地表，这主要是由熔岩、火山和蒸汽孔冒出的气

体(设想与现在地球喷发一样),有约 80%的水汽、约 10%的二氧化碳以及氮气等。这些气体(主要是水汽和 CO_2)构成了次生大气(还原大气)。

随着时间的流逝,数百万年过去了,丰富的水汽形成云,雨下了数千年,形成河、湖和海洋。现在科学家还相信,地表上的一些水是年轻地球与无数流星或彗星碰撞生成的。这段时间,CO_2 溶入海洋,通过生化过程,很多 CO_2 变成含 CO_2 的水成岩如石灰石等。水汽减少、二氧化碳减少,而氮气在大气中变得丰富起来,且化学性质不活泼。氧气可能是经过缓慢的增长,高能量射线使水汽光分解成氢气和氧气,氢气较轻逃逸到宇宙空间。这些缓慢增加的氧气提供了早期生物的演化(约 20～30 亿年前),植物生长又加速了氧气的增加(通过光合作用,即植物、太阳光、水汽和二氧化碳等的共同参与,生成氧气)。因此,植物进化后,大气中氧气快速增加。可能在数亿年前,达到了现在的组成,称为现代大气(氧化大气)。

关于地球大气的起源和演化有多种学说,尽管都有许多不清楚的地方,但都有一个共识,就是把大气看成是地球系统中的一部分。地球系统是由大气圈、水圈、岩石圈和生物圈组成的,这些圈层是相互联系,并可以互相转化的。现代大气中的 N_2、O_2 和 CH_4 等,比正常平衡浓度高,它们没有处于化学平衡状态。而较多的氧气或许与大气中其他成分燃烧产生化合物,但这却没有发生。通过研究发现,现在地球大气中的 4 种主要成分(氮、氧、氢和碳)也属于生物圈的最丰富的前 5 种组成成分。这显示生态过程在大气演化中起了主要的作用,或许也是造成现在大气化学不平衡状态的原因。

盖娅假说(Gaia hypothesis)支持了上述观点,它是英国大气化学家拉夫拉克(Lovelock,1919—)在 1972 年创立的学说。盖娅假说认为生物圈对大气的影响是有目的性的。生物圈和大气圈一起可以看成是一个生态系统,通过生物群落的新陈代谢和发展进化,这个系统维持了在化学组成和地球气候最适宜条件下的生物圈状态。被广泛接受的达尔文理论(Darwin,1809—1882,英国)的观点是生物群落适应环境,与盖娅假说是矛盾的,因此,盖娅假说具有争议性。不管怎样,由于生物活动的影响,大气完全被重塑成现在这个模样了。

按各种组成在大气过程的作用,现代大气可分为:① 混合气体——干洁空气,主要组成为氮气、氧气、氩和二氧化碳;② 共存的水的三种相态(水汽、水粒、冰粒)——云雾,对大气热力过程相当重要;③ 固态或液态之其他小颗粒子——气溶胶,对大气化学、云、降水和大气辐射较重要,但对于大气热力过程可以被忽略。表 1.1 列出近地面的现代大气组成成分、含量和摩尔质量值。

表 1.1　近地面的现代大气组成

不变成分			可变成分		
名称	体积百分比/(%)	摩尔质量/g·mol^{-1}	名称	体积百分比/(%)	摩尔质量/g·mol^{-1}
N_2	78.084	28.013	H_2O	0～4	18.015
O_2	20.948	31.999	CO_2	0.0365	44.010

需要全本请访问 www.ertongbook.com

续表

不变成分			可变成分		
名称	体积百分比/(%)	摩尔质量/g·mol^{-1}	名称	体积百分比/(%)	摩尔质量/g·mol^{-1}
Ar	0.934	39.948	CH_4	0.000 17	16.04
Ne	0.001 818	20.183	N_2O	0.000 03	44.01
He	0.000 524	4.003	O_3	0.000 004	47.998
Kr	0.000 114	83.80	微粒(尘、烟灰等)	0.000 001	
Xe	0.000 008 7	131.30	CFCs(氯氟烃)	0.000 000 02	

干洁大气是除去水的三相物质和气溶胶以外的纯净大气,由多种气体混合组成,其中主要成分有约78%的氮气和约21%的维持生命的氧气,这个比例在0～90 km的大气层几乎不变。N_2、O_2和Ar三种气体就占了空气体积的99.966%,如果再加上CO_2,剩下的微量成分(浓度在1～20 ppm[①],如CH_4)和痕量成分(浓度在1 ppm以下,如O_3等)所占的体积是极微小的。表1.1中大气不变成分是指平均寿命大于1000a(年),各成分之间大致保持固定的比例。可变成分平均寿命为几年到十几年,它们在大气中所占的比例随时间和地点而变。另外,平均寿命短于1a的变化很快的气体成分,如碳、硫和氮的化合物,含量微少,但在某些局部地区浓度可能很大,造成灾害。

在地球表面,大气成分维持动态平衡,即生成速率与消亡速率相等。例如,土壤细菌靠生物过程耗费氮气,但是动植物腐烂放出氮气回到大气。对于氧气来说,与其他物质生成氧化物或呼吸作用放出CO_2都使O_2耗减,但太阳光使CO_2和水经过植物的光合作用使O_2增加。

可变的水汽和CO_2在天气和气候变化中作用很大。水汽在空气中变化幅度很大,只有在空气中发生相变后,变成云雾时它才是可见的。水是地球表面正常情况下唯一三态存在的东西。大气中因为水汽的作用,不仅可成云致雨,而且在过程中,从汽态到液态水或固态冰时,释放热量(潜热)。另外,水汽是温室气体,强烈吸收地球放射能量的一部分(类似温室的玻璃一样,阻止了里面热量出去和外面空气混合),在维持地球能量平衡方面起了重要作用。

CO_2也是温室气体,尽管占的体积比小,但很重要。它通过植物腐烂、火山喷发、动物呼气、燃料(如石油、天然气等)燃烧、毁林(燃烧、遗弃腐烂)等过程生成,通过光合作用,CO_2储存到植物体内得以清除。此外,海洋是个CO_2的大储库,浮游植物吸收CO_2进入组织器官,溶入海表水,再通过混合进入到深水层。估计海洋CO_2的储量是大气总量的50多倍。美国夏威夷观测站从1958年开始观测,发现海洋中CO_2的含量到现在已增加15%以上。还发现CO_2含量还有季节变化,冬夏可相差6 ppm(由于北半球大陆上的植被冬枯夏荣的结果,也就是植物在夏季大量吸收CO_2因而使大气中CO_2浓度相对降低)。从1800年至今CO_2含量增加了

① ppm是体积分数,指在相同的温度和压强下,大气中某种气体对空气的体积之比,1 ppm=10^{-6}.

25%以上，年平均增加0.4%左右，以此增加率，科学家估计，21世纪末CO_2含量会从2001年的374 ppm增加到500 ppm以上。许多数学模型，考虑了包括CO_2在内的温室气体的增加，估计到2100年全球平均温度会上升1.4～5.8℃(与1990年比较)，直接影响到天气变化。

水汽和CO_2不是唯一的温室气体。其他的温室气体还包括：CH_4、N_2O和CFCs等，当前也受到了重视，主要是因为它们的浓度也在增加。

1.2 大气热力状态

大气在物理特性上属于流体，除具有一般流体的连续性、流动性和黏滞性等特点外，还具有可压缩性。这是因为大气密度ρ的空间分布与压强p和温度T有关，所以大气的运动与热量传递(例如从温度高向温度低传)有关。ρ、p和T不同，就构成了大气的状态变化。

密度是单位体积中空气的质量，取决于组成空气的元素质量和数目，例如分子质量和分子数。大气是可压缩的，意味着使大气分子靠近来增大密度。地球表面空气受到的压缩比大气上部要大，因此地球表面大气密度最大，随高度增加而减小。压强是单位面积上受到的压力(常用单位为hPa，1 hPa=100 Pa，1 Pa=$N \cdot m^{-2}$)，有两种压强，一种是流体静压强(hydrostatic pressure)，是由于上方空气的重量引起的，另一种是动压强(dynamic pressure)，因为空气的运动引起。在气象上，动压强通常很小，所以一般假设大气压强只取决于流体静压。

气温表征空气的冷热程度，它标志空气分子无规则运动的剧烈程度，温度越高就表示平均来说分子热运动越剧烈。温度是大量分子热运动的集体表现，单个分子没有意义。温度T与分子无规则运动平均速度v的关系为

$$T = \alpha \cdot \mu \cdot v^2 \tag{1.2.1}$$

其中，$\alpha=4.01\times10^{-2}\ K \cdot m^{-2} \cdot s^2$，是一个常数，$\mu$是单位为$g \cdot mol^{-1}$的分子摩尔质量值。

气体被加热时，分子运动快，分子之间由于碰撞强度大会远离一些，因此空气变稀。相反，分子被冷却速度就变慢，彼此靠紧。所以，常说热而稀疏、冷而密集的空气。对我们个人的行为常常有“冷静”一说，这可从温度与运动的这种物理关系解释。温度高的时候，分子处在纷扰不安的状态，就是吵闹，如同仪器的“杂音”。人若是心平气和，则相当于低温状态，微弱的信号皆可感知，对周遭的环境和健康状况，渐渐能够明察秋毫，因为“灵敏度”提高了。因此，我们才能“冷静”地去处理所面临的事情。

不考虑大气中的液态和固态成分，大气在自然状态下，可看成理想气体。分子之间无相互作用力，大气体积只依赖于温度、气压和分子数，这样的气体就是理想气体。干空气的状态变化可用状态方程来描述，即

$$p = \rho R_d T \tag{1.2.2}$$

其中$R_d=287.05\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$，是干空气的气体常数。

此外，根据道尔顿分压定律(Dalton，1766—1844，英国)，气体总压强是组成气体的各

成分的分压强之和。水汽在自然状态下可看作是理想气体，因此从水汽和干空气的状态可以确定湿空气（由干空气和水汽组成）的状态。水汽的状态方程类似干空气的方程，只需将气压 p 密度 ρ 和气体常数换成水汽的分压力 e、密度 ρ_v 和气体常数 R_v 即可，其中 $R_v=461.5\,\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$。

考虑静止的大气，某一截面积为 A 的气柱，对 z 高度上厚度为 Δz 的某一气层，在垂直方向上受到三个力的作用（如图 1.1）：向下的重力 $mg=(\rho\cdot\Delta z\cdot A)g$、向上的压力和向下的压力。其中，向上和向下的压力的差异是气压梯度力 $F=p_b\cdot A-p_t\cdot A=-\Delta p\cdot A$，它与气块重力在垂直方向上平衡，称为流体静力平衡。这里 p_b 和 p_t 分别是气层下底面和上底面的压强，$\Delta p=p_t-p_b$。由此，得到流体静力方程为

$$\frac{\Delta p}{\Delta z}=-\rho g \tag{1.2.3}$$

其中，g 是重力加速度（$9.8\,\mathrm{m\cdot s^{-2}}$）。

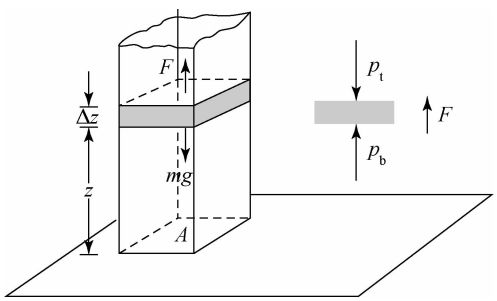


图 1.1　静力平衡大气中垂直方向力的平衡

从(1.2.3)式出发，可以获得气压随高度的变化关系，这是高度表测量高度的基础。对于等温大气（温度随高度不变的大气），气压随高度的变化方程，即压高公式为

$$p(z)=p_0\exp(-z/H) \tag{1.2.4}$$

其中气压标高 $H=\dfrac{R_dT}{g}$是压强降低到表面压强 p_0 的 $1/e=1/2.718\,28\approx37\%$时的高度。对于密度，也有类似的表达式。

虽然实际大气并不是等温大气，气压仍然随高度接近指数变化（见图 1.2），根据与美国 1976 年标准大气的比较，可以按标高 $H=7.29\,\mathrm{km}$ 近似（与之这相对应的平均温度约为 280 K），而密度标高为 8.55 km。一个经验规则是，气压大概每 5.5 km 高度降低为原来的 1/2。

对于单位截面积垂直气柱，从某一等压面 p 到大气上界之间的气柱质量为 $m\approx p/g$，因此，对于以等压面 p_2 和 p_1 为上下界的气层，单位截面积气柱的质量 m 占整个气柱质量 m_0 的百分比为

$$\frac{m}{m_0}=\frac{p_1-p_2}{p_0} \tag{1.2.5}$$

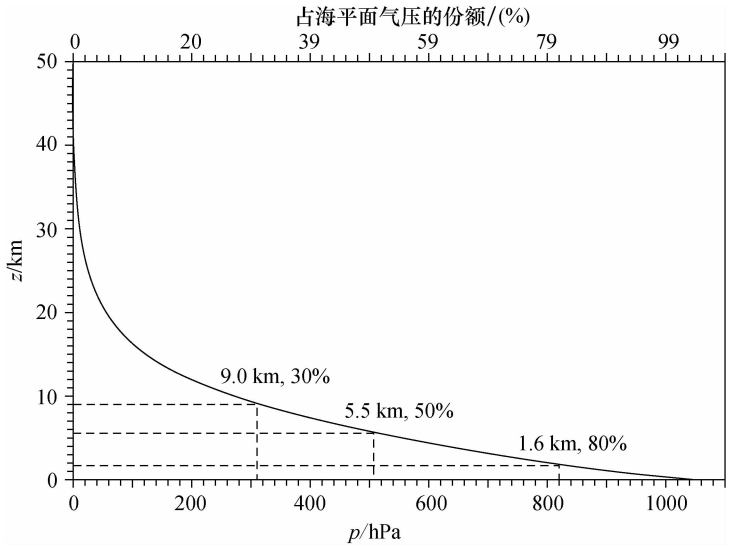


图 1.2　气压随高度的变化

其中 p_0 为海平面气压。接近珠穆朗玛峰高度，气压为 300 hPa，已处于约 70％质量的大气上面。到 50 km，为 1 hPa，约 99.9％质量的大气在这个高度以下。

1.3　大气结构

大气与地球尺度比起来，非常薄。如果假设地球是一个篮球，大气也就是一张纸那么厚。大气向外延伸数百千米，逐渐变得越来越薄，因此大气顶部没有明显的边界。如同麦克阿瑟(MacArthur，1880—1964，美国)说的“老战士不会死，他们只是慢慢地消逝”一样，大气也是慢慢消逝的，最终与外太空融为一体，不会忽然截止。

上面已经知道大气压强和密度随高度接近指数减小，这种单调的变化无法反映大气垂直结构。温度的垂直变化则要比气压和密度复杂许多。定义大气减温率表示温度随高度变化的大小，数学上表示为

$$\Gamma = -\frac{\Delta T}{\Delta z} \tag{1.3.1}$$

定义时加了一个负号，这样如果温度随高度减小，减温率就是正值。如果温度随高度增加，减温率是负值，称为逆温。

按照温度垂直分布(即减温率的正负)特征，大气可分为 8 层(见图 1.3)，类似 8 层高楼，其中我们人类活动在最底层。这 8 层为对流层、对流层顶、平流层、平流层顶、中层、中层顶、热层和外逸层。其中对流层顶、平流层顶和中层顶属于过渡气层。

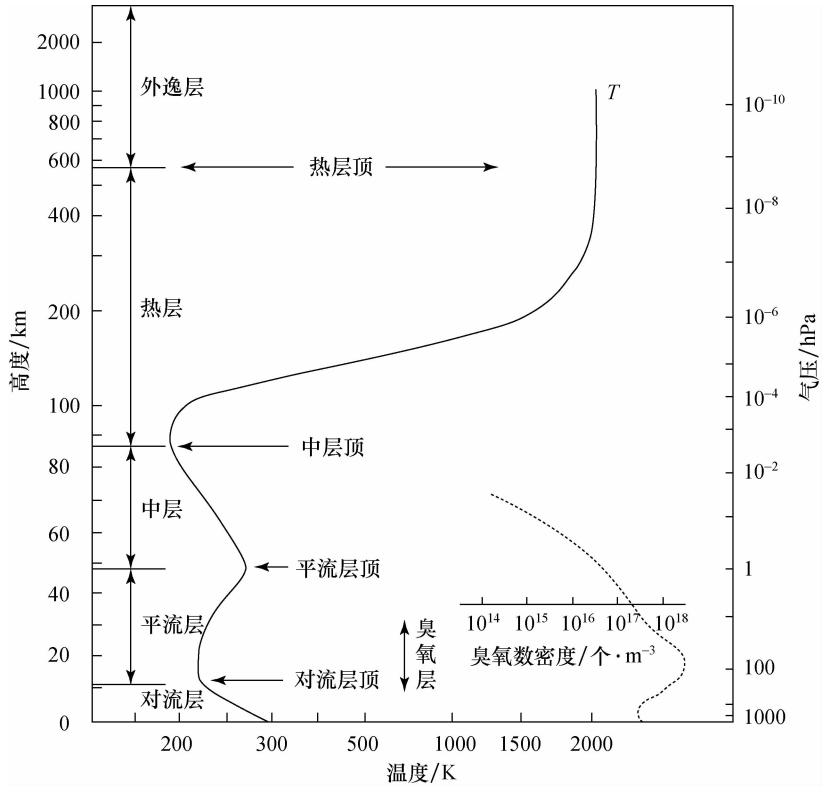


图 1.3　按温度垂直分布特征进行的大气垂直分层图(美国标准大气,1976)

对流层平均范围 0～11 km,厚度随季节和地域而变,例如在热带夏季对流层高。对流层中温度随高度减小,减温率平均为 6.5℃ · km^{-1},这个减温率也随多种因素而变化,甚至有时出现逆温情况。温度减小是因为阳光加热地面,而地面又加热它上面的空气。在飞机及大型气球尚未发明之前,人类的活动只限于对流层,因此,诗人苏东坡(1036—1101,宋)也感慨,

我欲乘风归去,又恐琼楼玉宇,高处不胜寒。

对流层内集中了大气的 3/4 质量和 90%以上的水汽,有强烈的垂直运动,而且气象要素(例如:温度、气压等)的水平分布也不均匀。对流层内包含了地球上我们熟悉的所有天气,因为对流层的特点为云和降水的形成以及天气系统的发生、发展等提供了有利条件。

平流层范围是 11～50 km,气温随高度开始不变,然后是逆温。层内对流微弱、气流平稳、水汽极少,因此平流层是平静的气层,天空晴朗,能见度很好。平流层内的臭氧层吸收紫外太阳能,使平流层温度增高,出现逆温。而在 50 km 处,吸收的能量只加热很少的分子,因此达较高的温度。因为空气稀薄,能量从平流层上层到下层的传输速度非常慢。有时,对流层中发展旺盛的雷暴积雨云的顶部可以伸展到平流层下部。在高纬地区有时在日出前和日

落后，会出现贝母云（或珠母云），其组成仍然不清楚。

中层（或中间层）的范围为50～85 km，气温随高度下降。因为几乎没有臭氧吸收太阳辐射，氮和氧等气体能吸收的太阳能也已被上层大气吸收。这样造成大气分子失去的能量比得到的多，温度随高度变得越来越低。在85 km处，大气达到它的最低平均温度－90℃。中层有强烈的垂直对流，也称高空对流层。由于水汽少，几乎没有什么天气发生。只是有时在高纬地区的黄昏时候，在该层顶部附近，看到银白色的夜光云，有可能是浮尘反射阳光所形成。

热层在85～550 km，气温随高度再次升高，这是因为氮原子和氧原子吸收了大量的太阳短波辐射。因为热层内空气稀薄，分子稀少，即使吸收很少的太阳能，也可以导致温度的巨大增加。但这里的温度只有动力学意义（温度是分子、原子等运动速度的量度），这里温度资料的获取是依赖废弃卫星轨道的降低而获得的。因为空气分子对卫星的撞击使得卫星轨道降低，通过探测卫星轨道的高低获取空气分子的运动速度，从而获得热层温度。在极地附近的热层中，夜晚可观测到极光现象。这是因为太阳高速带电粒子使高层稀薄的空气分子或原子激发，继而这些分子或原子再通过发射辐射（发出的光，即极光）回到原来的稳定状态。

热层温度趋近于常数的高度是热层顶，热层顶以上是外逸层，大约550 km以上，空气非常稀薄，原子、分子可脱离地球引力逃到外太空。观测表明，外逸层的高度可以从2000 km向外伸展，这可以代表我们大气的上界（天的高度）。外逸层之下的大气直到地面有时也统称为气压层，在此大气层中流体静力学公式尚能成立。

根据计算，气体逃逸速度为

$$v_e = \left(\frac{2 \cdot G \cdot M}{r+h}\right)^{1/2} \approx 10\,732\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} \tag{1.3.2}$$

其中，G为万有引力常数，$G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{m^3 \cdot s^{-2} \cdot kg^{-1}}$，$M$是地球质量$5.975\times10^{24}$ kg，r是地球平均半径，$h=550$ km。

根据温度与分子平均速度的关系，可以计算在此逃逸速度为平均速度情况下，H_2需要约9000 K的温度，而比较重的O_2则需要约147 000 K的温度。外逸层没有这么高的温度让H_2或O_2逃逸，而O_2对我们生命至关重要。但是，仍会有高于平均速度的一些原子会逃逸。

除了通过温度垂直分布特征分层外，还有其他分层类型。

一种是考虑热层以下，大气组成保持均一（78%的氮气，21%的氧气），称为均质层。在这层中，干空气摩尔质量为$28.9644\ \mathrm{g \cdot mol^{-1}}$。此以上的稀薄空气成分则不均匀，扩散使很重的分子（如N_2和O_2）、原子集中到这一层的低部，轻的（如H_2和He）浮到上层。从约90 km到大气顶的这一区域常称为非均质层。

另一种是在60～1000 km之间，由于高空大气的分子、原子等在太阳短波辐射等作用下电离而形成离子和自由电子，故称为电离层。自下而上根据电性结构不均匀，称为D、E和F区。电离层对调频电波无影响，但会吸收和反射调幅电波，因此影响电波传播和无线电通讯。

需要全本请访问 www.ertongbook.com