

大气



物理学

大气物理学编写组 编



南京大学出版社

大气物理学

上册

大气物理学编写组



南京大学出版社

1990·南京

内 容 简 介

本书共分六章，其中包括大气概况、大气静力学、大气热力学、大气层结的静力稳定度、大气中辐射能的传输和大气动力学。是大气科学的基础理论部分。

本书可作大学本科气象类各专业的大气物理学教材，亦可供从事气象工作的科技人员，环境保护、空间研究、农林水、地理、渔业以及军事等专业人员参考。

本书配有《大气物理学习题解》，已由南京大学出版社出版。

大 气 物 理 学

大气物理学编写组

南京大学出版社出版

(南京大学校内)

江苏省新华书店发行

江苏村前印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张13.5 字数 300千

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数 1—1000

ISBN 7-305-00472-3

前 言

本书是根据南京大学大气科学系四个专业(大气物理、大气环境、天气动力学和气候学)的代表讨论确定的“大气物理学”教学大纲编写而成。它是该系四个专业的主干课——“大气物理学基础”课的教材。本课程也是全校的重点课程之一,曾多次获得全校优秀教学质量奖。

本书的编写力求由简到繁,深入浅出,适合大学生水平。全书共分六章。第一章:大气概况(陈士仁编写);第二章:大气静力学(蒋龙海编写);第三章:大气热力学(庄荫模编写);第四章:大气层结的静力稳定度(庄荫模编写);第五章:大气中辐射能的传输(蒋龙海编写);第六章:大气动力学(陈士仁编写)。附录包含了有关的天文基本知识(蒋龙海编写)。

本书在编写过程中,曾得到大气科学系和大气物理教研室领导的关心和支持,又承石宗祥同志为本书描绘插图,谨此致谢。基于我们水平有限,时间仓促,教材中不妥之处难免,望读者指正。

大气物理学编写组

1989年10月

目 录

前言

- 第一章 大气概况**.....(1)
 - 1.1 大气的起源与气体成分(1)
 - 1.2 大气气溶胶..... (14)
 - 1.3 描述大气的主要参量——气象要素(21)
 - 1.4 大气物理属性水平分布的不均匀性——气团和锋.....(34)
 - 1.5 大气物理属性的铅直分布——大气分层.....(43)
 - 1.6 空气状态方程(50)
 - 1.7 大气运动的湍流性质(55)
- 第二章 大气静力学**.....(60)
 - 2.1 大气静力学基本方程(60)
 - 2.2 大气压高公式(66)
 - 2.3 模式大气(67)
 - 2.4 气压场基本型式及其随高度变化(79)
 - 2.5 世界海平面平均气压分布(89)
 - 2.6 气压随时间变化(93)
- 第三章 大气热力学**.....(98)
 - 3.1 大气热流入量方程(98)

3.2	未饱和湿空气的绝热过程	(104)
3.3	饱和湿空气的绝热变化	(110)
3.4	大气多元过程和多元方程	(123)
3.5	大气等压冷却过程下的露点和霜点	(126)
3.6	大气等压蒸发过程下的湿球温度和湿球 位温	(128)
3.7	大气水平等压混合过程——混合雾	(129)
3.8	大气垂直混合过程	(131)
3.9	热力学图表及其应用	(133)
第四章	大气层结的静力稳定度	(160)
4.1	静力稳定度	(160)
4.2	气块法层结稳定度	(161)
4.3	条件性不稳定和不稳定能量	(168)
4.4	整层空气抬升或下沉时层结稳定度的 变化及下沉逆温	(173)
4.5	判定稳定度的薄层法	(177)
4.6	挟卷及其对稳定度的影响	(184)
第五章	大气中辐射能的传输	(194)
5.1	基本概念	(194)
5.2	热辐射的基本定律	(204)
5.3	大气对辐射的吸收	(212)
5.4	大气对辐射的散射	(228)
5.5	太阳辐射及其在大气中的传输	(238)
5.6	地球辐射	(255)
5.7	大气中红外辐射的传输	(262)
5.8	爱尔塞色大气辐射图	(269)

5.9	大气和地面的辐射收支	(278)
5.10	全球能量平衡	(282)
5.11	世界海平面平均气温分布	(293)
5.12	气温的日变化和年变化	(299)
第六章	大气动力学	(306)
6.1	大气气流场	(306)
6.2	大气运动方程	(319)
6.3	自由大气中的平衡运动	(333)
6.4	地转风的高度变化——热成风	(344)
6.5	大气的非平衡运动——地转偏差	(351)
6.6	大气边界层中的风速廓线	(356)
6.7	大气的铅直运动	(363)
6.8	环流与涡度	(370)
6.9	大气能量方程	(390)
附录	有关的天文基本知识	(395)
1.	地球和地球坐标(地理坐标)	(395)
2.	天球和天球坐标	(396)
3.	球面三角学的基本公式之一——一边的余弦 公式	(403)
4.	天体的周日视运动	(405)
5.	太阳高度角公式和可照时公式	(412)
6.	太阳周年视运动	(413)
7.	时间	(417)

第一章 大气概况

包围在地球外部的一层气体，总称为大气圈，简称大气。人们常说大气海洋，就是形容其范围之广阔。实际上，它比海洋大得多，以致地球表面无处不在大气笼罩之下；大气之厚，比地球任何高山都高得多，以致和宇宙星际气体相联，无边无界。人类活动的环境仅限于大气圈的底层，天气活动多在35公里以下的大气中。在人造地球卫星从高空有利位置拍摄的连续照片上，稠密洁白的云团由赤道地区不断向中纬度地区输送，似滔滔江水，源源不断，高纬地区的云团似滚滚涡旋作螺旋转动。说明地球不仅被大气包围，而且大气在永不停息地流动着。

1.1 大气的起源与气体成分

众所周知，地球是太阳系的一个行星，它的母体是太阳，但地球大气和太阳大气相差甚远。例如太阳大气中的大量惰性气体（氦、氖、氩、氪、氙）在地球大气中却微乎其微。为了解释这种矛盾，有两种假设：

一种认为地球形成时根本无气体参与，所以地球形成时就没有大气；另一种认为地球形成时有类似太阳大气的气体

存在，但不久又丧失了，有一段时间地球上无大气。因此，人们估计，今天存在于地球表面的大气是火山活动将地球内部的挥发性物质带出地壳后变成的。尽管火山喷出的物质中约有85%的水汽，10%的二氧化碳及百分之几的氮和硫或硫化物(二氧化硫和硫化氢)混合组成，不像现在地球大气中有76%的氮和23%的氧，但它们是从火山喷出的“原材料”中演化出来的。

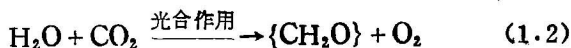
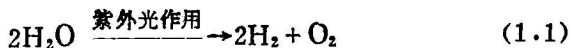
1.1.1 大气的起源

既然现存地表的大气是由地球内部排出的挥发性物质变化而成的，那末它不是与地球隔绝的独立实体，而是地球综合系统的一部分。这个综合系统，是由岩石圈的沉积部分(地壳)、水圈(地表及地表以上水物质的总体)、生物圈(一切有生命的动植物)和大气圈(地表以上的大气层)共同组成的。这个综合系统中，挥发性物质的总质量约为地球质量的0.025%。大气质量与综合系统中的其他部分质量相比是很小的，例如它只有水圈质量的1/300。

当火山爆发时，大量水汽被排出地表，而在当时地表以上空间的温度下，在其周围空间只能容纳很少的一部分水汽，大量的水汽成云致雨降回地面而形成水圈。其中海洋占水圈总质量的97%，冰占2.4%，淡水(地下)占0.6%，淡水(湖、河等)占0.02%，存留空间的水汽仅为水圈总质量的0.001%。这说明伴随火山爆发，地壳之上有水圈，其上空间已有水汽存在。

火山爆发喷出的水汽和二氧化碳可作为大气中的氧和地表生物圈的“原材料”。首先，水吸收太阳紫外辐射可离解出氧。其次，水和二氧化碳在太阳可见光辐射的光合作用下，

也可生成氧。其化学反应式为：



光合作用产生的氧和生物过程密切相关。(1.2)中产生的 $\{\text{CH}_2\text{O}\}$ 单体是植物生命中形成细胞的糖类(碳水化合物)分子的基本成分,同时在地球大气中氧也很丰富。一般认为 $\times 10^9$ 年以前,单细胞中存在抗体,在初期演化阶段,要求一个无氧环境。从地质学知道,在 $3\sim 2 \times 10^9$ 年以前,植物生命的原始形态已开始通过光合作用释放出极少量的氧,并认为这类早期生命形式是在液水环境中发展的,因为那里可以避开致命的太阳紫外辐射,但又要紧接液面,以便能接受到太阳可见光照射,较充分地进行光合作用。在(1.2)作用下使得大气中氧逐渐增加,从而导致高层大气中臭氧(O_3)层的形成,透过大气到达地面的太阳紫外辐射随之减少,海水下的植物生命逐渐露出水面,更充分接受到可见光,则更有利于(1.2)的进行。即愈来愈多的氧—愈来愈少的紫外辐射—愈来愈多的可见光辐射—愈来愈丰富的植物生命—产生更多的氧,通过此周而复始的增益放大过程,生命逐渐向海面推进,直至最后(约4亿年前)推进到陆面上的演化发展,造成地面的生物圈和大气中的氧和臭氧。

火山爆发时喷出的氮,通过离子交换作用和土壤微生物的固氮作用,其中有一小部分(约20%)进入到地壳的硝酸盐中,又由于氮具有化学惰性,它在水中的溶解度又低(约为 CO_2 的 $1/70$),所以火山喷发出来的氮,大部分仍保留在大气中。但水和二氧化碳却由于氧碳的平衡过程几乎能全部从大

气中移走，因此地球大气中的主要气体成分就是氮了。

以上观点说明地球大气起源于地球火山爆发喷射出来的水汽、二氧化碳、氮及少量的硫或硫化物的演化。

1.1.2 地球大气的保持

地球大气产生之后为什么能保持而不逃掉呢？由于地球重力场的作用，从地面上抛任何物体，其上升速度皆要逐渐减慢，到达某一点时可减为零，然后落回地面。从物理学知道，如果向上途中重力保持不变，则物体可能到达高度与其初始上升速度的平方成正比。但地球重力场中，重力是随高度减小的（重力减小与物体离地心距离的平方成比例）。据计算，如果以1.6千米每秒的速度向上发射一物体，若不计空气阻力，它可上升到128千米的高度。如将其初速度加大一倍，其上升所达高度并不是128千米的4倍，而要大得多，因为重力随高度逐渐减小了。众所周知，如果以11.2千米每秒的初速度从海平面向上发射一个物体，它将永远不会返回地球。例如以11.2千米每秒以上的速度发射的“月球1号”和“先锋4号”永远不会返回地面。因此称11.2千米每秒的速度为地球上的“逃逸速度”。在海平面以上气体的原子和分子都在空中飞来飞去，就像一颗颗微小的飞弹一样。它们的速度相差很大，一般采用统计学的方法可算出某一特定条件下分子的平均速度。每一种分子都存在一个确定的逃逸速度 V_0 ，在此速度下，分子运动的动能等于它脱离地球重力场所需提供的位能。任何一种分子的最可几速度是：

$$V_0 = \sqrt{\frac{2KT}{Mm_H}} \quad (1.3)$$

式中 K 为玻耳兹曼常数 (1.38×10^{-23} 焦耳·度 $^{-1}$)， T 是

绝对温度， M 是某分子的分子量， m_H 为氢原子的质量(1.67×10^{-27} 千克)。显然，各种分子的平均动能是均分的，即轻分子比重分子平均速度大。现已算出，氧分子在室温下的均方根速度是0.5千米每秒，氢分子(它的重量仅为氧分子的 $1/16$)的均方根速度是氧的4倍。

分子运动论认为，分子的半数速度比均方根速度大，比均方根速度大一倍以上的只有2%，在 10^4 个分子中只有一个分子其速度大于 $3V_0$ ，速度分布的例子见表1.1。在地球大气

表 1.1 速度 V 大于均方根速度 V_0 数倍的气体分子比率

V/V_0	比率	V/V_0	比率
1	0.5	6	10^{-20}
2	0.02	10	10^{-30}
3	10^{-4}	15	10^{-50}
4	10^{-6}		

中，“散逸区”底部的温度约600K，将此值代入(1.3)式，可计算出氢原子($M=1$)的均方根速度为3千米·秒⁻¹，因此从表1.1可知，大气中的氧分子和氢分子中，运动速度能超过11.2千米·秒⁻¹(逃逸速度)的所占百分比极其微小。即使有微小的气体分子或原子超过了逃逸速度是否就能逃离地球呢？否！在低层大气中，那些运动速度极高的分子在与速度较慢的近邻碰撞以后，运动速度就会减慢。只有在高层大气中，那些运动速度极快的分子才有可能逃离。因为高层受到的太阳辐射较强，会把分子中的很大部分激发到极高的能级并使其获得很大的速度；同时，那里空气稀薄，分子碰撞的机会很少，则高速粒子逃离地球的机会就很大，它一旦向上飞去，就

会进入密度越来越小的区域，碰撞的机会也就越来越少，最后将离地球而去。这足以说明，地球大气也会漏气，但漏出的主要是最轻分子。氧和氮的分子相当重，能达到逃逸速度的机会很少，氢和氦则易于逃离，其他较重的气体就在地球上保持下来了。

1.1.3 大气成分

大气是多种气体组成的，其中主要是氮和氧。除了气体成分外，还有少量固体、液体杂质。在低层大气中的气体成分可分为两部分，一部分是“可变气体成分”，另一部分为“不可变气体成分”。所谓“不可变”是指各种气体成分之间能维持固定的比例不变而言，也就是说，它是不随时间、空间而变化的气体，它以氮、氧为主；“可变气体成分”以水汽、二氧化碳和臭氧为主，其中变化最大的是水汽。虽然大气中，“可变气体”成分含量很少，但它在天气变化的舞台上，却扮演了极其重要的角色，它对辐射传输有较大的影响。它们的含量及其变化，在相当大程度上，影响着大气的温度分布和变化，因而影响着其他大气物理过程。所以对于“不可变气体成分”和“可变气体成分”的研究，都是很重要的。

习惯上把不包含水汽和液、固体杂质的大气，称为干洁大气。它的主要成分是氮、氧、氩和二氧化碳等，此外还有少量的氢、氦、氪、氙和臭氧等稀有气体。由于大气有铅直运动、水平运动、湍流运动和分子扩散，使得不同地区、不同高度之间的空气进行交换和混合，因而从地面开始，直到90千米高度，干洁空气成分的比例基本上是不变的，可视为“单一成分”，其平均分子量为28.966。90千米以下干洁大气成分、分子量和临界温度等如表1.2。

表 1.2 90千米以下干洁大气成分

气体成分	分子量	含量 (占总分子数 的比值)	密度 (标准情况下的) (绝对值(g/m ³))	临界温度 (°C)和临 界压力 (大气压)
氮(N ₂)	28.016	0.7808(按质量 计占75.51%)	1250	-147.2 (33.5)
氧(O ₂)	32.000	0.2095(按质量 计占23.14%)	1429	-118.9 (49.7)
氩(Ar)	39.944	0.0093(按质量 计占1.28%)	1786	-122.0 (48.7)
二氧化碳 (CO ₂)	44.010	0.0003(按质量 计占0.05%)	1977	31.0 (73.0)
氖(Ne)	20.183	18×10^{-6}	900	-228.0 (26.0)
氦(He)	4.003	5×10^{-6}	178	-258.0 (2.3)
氪(Kr)	83.700	1×10^{-6}	3736	-63.0 (54.0)
氢(H ₂)	2.016	0.5×10^{-6}	90	-239.0 (12.8)
氙(Xe)	131.300	0.08×10^{-6}	5891	16.6 (58.2)
臭氧(O ₃)	48.000	$0 \sim 12 \times 10^{-6}$	2140	-5.0 (92.3)
干洁空气	28.966	1.0000	1293	-140.7 (37.2)

由表1.2可见,大气中大多数气体临界温度都低于自然情况下大气中可能出现的最低温度,个别气体(如CO₂, Xe)的临界温度虽然较高,但相对临界压力大大超过其实际分压力。因此,干洁大气所有成分总是呈气体状态。据实际探测和分析证明,氮和氧占整个大气容积的99%以上,如果加上氩气就占99.9%以上,其余气体加起来不到0.1%。如果将前面四

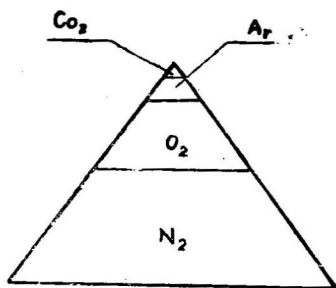


图 1.1 大气成分的比例

种气体成分置于同样压力和温度下，并把它们各自所占的容积百分比用三角形面积来表示(图1.1)，则由图可见， CO_2 仅占三角形顶端的一角，余下的其他气体在图上已无法表示了，可见其余气体的含量是

极其微少的。至于90千米以上大气成分，虽然仍以氮和氧为主，但从80千米开始，由于太阳紫外线的照射，氧和氮已有不同程度的离解，在100千米以上氧分子已几乎全部解离为氧原子，到250千米以上，氮也基本上解离为氮原子了。

为什么大气成分随高度是变化的呢？因为在没有明显源和汇的情况下，大气中任意高度上各种气体成分的比率是由两种物理过程共同作用决定的。一种是分子扩散，另一种为湍流混合。分子扩散效应使得较轻气体向上扩散得快，较重的气体向上扩散得慢，造成混合气体的平均分子量随高度减小。实际上，每一种气体成分是按它单独存在时那样分布的，每种气体的密度随高度呈指数递减，

$$\rho(z) = \rho(0)\exp(-z/H)$$

H 为标高，各种气体的 H 不同。各成分的标高与分子量成反比，即较轻气体成分的密度随高度递减率比较重的气体要慢得多，故最轻的气体(氢和氦)位于最高的高度上。

湍流混合是宏观运动造成的混合，它与分子扩散不同，它不是按分子量随高度区分开来，而是在混合为主的高度范

围内均匀混合。大气的组成与高度无关。

在低层大气中,平均自由程很短,分子扩散引起的轻重分子扩散分离所需的时间要比湍流混合使轻重分子均匀混合所需的时间大几个数量级。直至90千米附近,这两种作用大小才相差不多。到90千米以上,则以分子扩散为主了。从湍流混合为主到分子扩散为主的过渡地带,称为湍流层顶。一般称90千米以下为均匀层;90千米以上为非均匀层。人造卫星探测资料得到的大气主要成分随高度的分布(见图1.2),和上述讨论较一致。

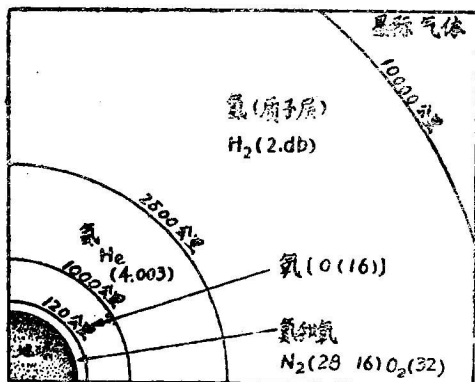


图 1.2 大气主要成分随高度的分布

对于人类活动及天气变化影响最大的大气成分是氧、氮和一些“可变气体成分”。现分别介绍于下:

1. 氧气: 氧是人类呼吸、维持生命必不可少的。在工业上也有其广泛的用途。氧的用途,早为人们熟知,不详细介绍了。

2. 氮气: 氮是大气中含量最多的成分, 是合成氨的基

本原料。大量的氮可通过豆科植物的根瘤菌的作用，将大气中氮固定到土壤中，成为植物生长必需的氮化合物。据统计，一亩大豆，通过根瘤菌作用，可以从空气中获得20公斤左右氮素，相当于硫酸氨100公斤左右。这个数量是相当可观的。空中闪电能把大气中氧和氮结合成一氧化氮，然后被雨水吸收并在土壤中成为硝酸盐。氮肥是植物需要的肥料三要素之一。大气中的氮也可以冲淡氧，使光合作用和水解作用产生的氧不致过浓，缓解氧化作用。

3. 二氧化碳：二氧化碳很少，仅占整个大气体积的万分之三，多集中在20千米以下，在20千米以上显著减少。它主要来源于有机物的燃烧、腐化和动物的呼吸，因而在人烟稠密的工业区，二氧化碳含量较高，可占空气容积的万分之五以上，在农村则含量大为减少。另外，二氧化碳含量还随时间而变化，这主要决定于植物在阳光、天气和其他条件下分解二氧化碳的强度。一般是夜间多，白天少；冬季多，夏季少；城市多，乡村少；阴天多，晴天少。大气中二氧化碳虽少，但它的作用可不小。我们周围的绿色植物在其生命过程中，需要吸收大量的二氧化碳，合成糖类和其他物质。二氧化碳对太阳辐射吸收很少，但能强烈地吸收地面辐射，同时它又向周围空气和地面放射长波辐射，因此，在使地面和大气保持一定温度这个方面， CO_2 也起一定作用。近年来，二氧化碳在逐年增加中，对气候变化也产生一定的影响。

4. 臭氧：90千米以上的大气能强烈吸收波长短于0.1微米的太阳辐射，以促使主要大气成分产生电离。 N_2 和 O_2 发生光电离之后形成电离层(E层、F层)。氧分子在作用量子 $h\nu$ 激发下变为氧原子(见1.4式)，原子氧很活泼，它很快和氧分