



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Daqi  
Kexue Jichu

# 大气科学基础

◎ 王伟民 刘华强 王桂玲 濮江平 周祖刚 编著




气象出版社

China Meteorological Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 大气科学基础

王伟民 刘华强 王桂玲  
濮江平 周祖刚 编著

 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内容简介

本书介绍了大气科学的概貌和基础理论,共分九章,包括大气概述,地面和大气中的辐射过程,大气热力学基础,大气动力学基础,云物理学基础,大气中的光、电、声现象,中高层大气简介,大气化学,天气和气候。

本书可作为高等院校大气科学专业本科生的专业基础课教材,也可作为从事大气科学教学、科研和业务人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

大气科学基础/王伟民等编著. —北京:气象出版社,2011.6

ISBN 978-7-5029-5238-9

I. ①大… II. ①王… III. ①大气科学-高等学校-教材

IV. ①P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 120239 号

---

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李天宇 章澄昌

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:720 mm×960 mm 1/16

字 数:443 千字

版 次:2011 年 6 月第 1 版

定 价:45.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxcs@cma.gov.cn](mailto:qxcs@cma.gov.cn)

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:22

印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~5000

## 前 言

大气科学是研究发生在大气中的各种现象及其演变规律以及如何利用这些规律为人类服务的一门科学。它依据物理学、化学的基本原理,运用各种技术手段和数学工具,研究发生在大气中的物理、化学现象,大气的各种能量及其转换过程,各种天气、气候现象的发生、发展演变过程及预报方法,各种大气信息的采集和获取、传递方法和手段等。

作为专业基础课教材,本书将全面系统地介绍大气科学的基础知识和基本理论,为学生描述大气科学的概貌。本书力求概念准确,叙述简单、明晰,为学生学习后续专业课程打下坚实基础。

本书由一批长期在大气科学教学第一线、具有丰富教学经验的教师编写。全书分为9章,包括大气概述,地面和大气中的辐射过程,大气动力学基础,大气热力学基础,云物理学基础,大气中的光、电、声现象,中高层大气简介,大气化学,天气和气候。其中第1章、第2章和第8章由刘华强编写,第3章和第4章由王桂玲编写,第5章由濮江平编写,第6章由刘华强和王伟民编写,第7章由王伟民编写,第9章由周祖刚和刘华强编写。刘华强对各章节文稿和插图作了必要的补充和修改,并最后审定。

长期以来,《大气科学基础》一直是解放军理工大学气象学院多个本科专业的专业基础课,由原来的《大气物理学基础》逐渐扩展延伸而来,其中主要增加了中高层大气、大气化学、天气与气候的相关内容,因为这些内容在一些本科专业的后续课程中不再涉及。许多同志为该课程的建设付出过辛勤劳动,也为本书的完成奠定了很好的基础,大气物理教研室的

所有同事都对我们的工作表示了支持和关心,给予了切实的帮助,我们在此一并表示感谢。

在编写此书时参考了许多著作,限于篇幅,本书只列出了主要的参考文献。本书的出版得到了气象出版社李太宇编审的大力支持,谨在此表示感谢。

由于该书涉及面广,受编著者的学识水平限制,讹误或不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2011年5月

# 目 录

## 前 言

<b>第 1 章 大气概述</b> .....	( 1 )
1.1 大气的起源与组成 .....	( 1 )
1.2 大气铅直分层 .....	( 6 )
1.3 大气的状态参数 .....	( 10 )
1.4 空气的状态方程 .....	( 14 )
1.5 大气静力学方程 .....	( 17 )
1.6 气压场的时空分布 .....	( 23 )
习题 .....	( 29 )
<b>第 2 章 地面和大气中的辐射过程</b> .....	( 31 )
2.1 辐射的基本知识 .....	( 31 )
2.2 热辐射基本定律 .....	( 36 )
2.3 大气对辐射能的吸收 .....	( 39 )
2.4 大气对辐射能的散射 .....	( 43 )
2.5 太阳辐射及其在大气中的传输 .....	( 49 )
2.6 地球和大气的长波辐射 .....	( 57 )
2.7 地面、大气及地气系统的辐射平衡 .....	( 61 )
习题 .....	( 68 )
<b>第 3 章 大气动力学基础</b> .....	( 70 )
3.1 大气运动基本方程 .....	( 70 )
3.2 大气中的平衡运动 .....	( 82 )
3.3 自由大气中风随高度的变化 .....	( 90 )
3.4 大气边界层中的风 .....	( 96 )
习题 .....	( 107 )
<b>第 4 章 大气热力学基础</b> .....	( 109 )
4.1 热力学定律在大气中的应用 .....	( 109 )
4.2 可逆干绝热过程 .....	( 118 )
4.3 可逆湿绝热过程与不可逆假绝热过程 .....	( 123 )
4.4 热力学图解 .....	( 128 )
4.5 等压过程及绝热混合过程 .....	( 132 )
4.6 大气静力稳定度 .....	( 138 )
4.7 气层的不稳定能量 .....	( 143 )

4.8 气层整层升降对稳定度的影响 .....	(149)
习题 .....	(153)
<b>第5章 云物理学基础</b> .....	(155)
5.1 云的分类与形成条件 .....	(155)
5.2 主要云属的宏观和微观特征 .....	(163)
5.3 云滴的凝结增长 .....	(175)
5.4 云滴的碰并增长 .....	(183)
5.5 冷云降水冰相过程 .....	(190)
5.6 冰雹的增长 .....	(196)
5.7 自然降水过程 .....	(198)
5.8 人工影响天气基础 .....	(202)
习题 .....	(213)
<b>第6章 大气中的光、电、声现象</b> .....	(214)
6.1 大气中的光现象 .....	(214)
6.2 大气中的电现象 .....	(223)
6.3 大气中的声现象 .....	(230)
习题 .....	(235)
<b>第7章 中高层大气简介</b> .....	(236)
7.1 中高层大气结构 .....	(236)
7.2 电离层 .....	(245)
7.3 磁层 .....	(255)
7.4 中高层大气光电现象 .....	(261)
习题 .....	(272)
<b>第8章 大气化学</b> .....	(273)
8.1 大气成分浓度和停留时间的表示方法 .....	(273)
8.2 大气成分的源、汇和循环 .....	(276)
8.3 大气中的重要微量气体 .....	(280)
8.4 大气气溶胶 .....	(298)
8.5 大气污染 .....	(305)
习题 .....	(307)
<b>第9章 天气与气候</b> .....	(308)
9.1 天气现象与天气过程 .....	(308)
9.2 天气系统 .....	(309)
9.3 气候及其变化 .....	(335)
习题 .....	(343)
<b>参考文献</b> .....	(344)
<b>附录</b> .....	(345)

# 第 1 章 大气概述

包围着地球的气体外壳称为地球大气,简称大气。地球大气的组成包括各种气体及悬浮其中的液态和固态微粒。大气的总质量约为  $5.136 \times 10^{18}$  kg,仅相当于地球质量的百万分之一。地球大气对地球上的生命有着重要的作用,在大气中所发生的物理现象及物理过程都与人类活动有着密切的关系。为了研究大气中所发生的物理现象及物理过程,首先必须对大气的基本性质和特点有一概括的了解。本章将着重对大气成分、大气分层、空气的状态方程以及空气湿度的概念加以叙述。

## 1.1 大气的起源与组成

### 1.1.1 大气的起源

随着人类对太空的不断探索,目前除了对离太阳最近的水星及最远的冥王星(2006年8月国际天文学联合会已将冥王星降级为“矮行星”)大气成分不了解之外,对太阳系中其他行星的大气成分已基本清楚。从表 1.1 来看,火星和金星这两个类地行星上的现代大气以  $\text{CO}_2$  为主。如果我们认为在太阳系形成过程中各个类地行星大气的形成遵循同样的规律,根据它们在太阳系中所处的位置、质量和轨道参数,由已探知的金星和火星大气的成分,可用天体物理学理论推断出地球大气的主要成分,这种由理论推断出来的地球大气称为行星地球大气。依据这种推断,行星地球大气也应以  $\text{CO}_2$  为主,显然,它与实际的地球大气相差甚远。

表 1.1 类地行星大气简况

行星	距日平均距离 (天文单位)	平均表面 温度(K)	表面压强 (标准大气压)	主要成分(%)				
				$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{O}_2$	Ar
金星	0.72	732	90	96.4	3.4	0.135	0.0069	0.007
地球	1.0	288	1	0.03	78.08	0.1~1	20.94	0.93
火星	1.52	223	0.007	95.3	2.7	0.03	0.13	1.6



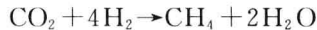
现代地球大气以氮、氧为主,这在迄今为止所有已发现的行星大气中是惟一的。估计地球形成已有 46 亿年的历史,在漫长而又曲折的演化过程中,大气的成分和结构有了很大的变化,大致可以分为以下 4 个阶段。

### (1)原始大气阶段

根据天文学中的一种假说,地球是由宇宙中的弥漫星云凝聚而成的。星云中的主要成分是氢(H)和氦(He),它们大约占 98%。星云凝聚时,气体被禁锢在地球内部,当地球进一步收缩,气体便被排挤到表面上来。但是,当时地球温度很高,气体分子的动能很大,加上太阳风(此时正值太阳形成初期)的作用,以致地球引力不足以吸引住这些气体,它们大量地向宇宙空间逃逸散失。因此有人判断,大约在 45 亿年前,地球形成的初期或晚些时候,地球上是没有大气的。

### (2)次生(还原)大气阶段

随着地球的逐渐冷却,表面形成了原始地壳,而被吸附或保藏在地球内部的一些液体和气体则通过火山活动的形式逸出地球表面。逸出的气体主要是氢气、水汽、二氧化碳以及氮、硫及其化合物。因为地壳相对是冷的,气体一到表面就很快冷却,其中大部分水汽凝结成水,形成水圈。此时的大气圈处于还原性气氛中,二氧化碳按下列方式还原为甲烷



氮气也部分还原为氨(NH<sub>3</sub>)。这个阶段的大气主要成分是 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>;次要成分是 H<sub>2</sub>O、H、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S。

### (3)大气向氧化性气氛转化阶段

这一阶段,水蒸汽继续凝结入海洋。同时大气上层中的水汽分子受到太阳紫外线的照射而发生光化学分解,分解为氢和氧。氢由于很轻,多数从地球大气向外逃逸到宇宙空间,而氧较重可留在大气中。氧是一种非常活泼的元素,当 H<sub>2</sub> 分压降到很低时,还原性气体化合物如 CH<sub>4</sub>、NH<sub>3</sub>,开始氧化成 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>。N<sub>2</sub> 惰性大,就积聚起来。所以,通过这些过程,大气中的 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 不断增加。

这一阶段,生命有机体开始出现在狭窄的水体或大海边缘。由于没有足够的氧,有机体在缺氧的条件下利用 CO<sub>2</sub> 供给能量,制造出碳水化合物与蛋白质,同时开始了光合作用。通过光合作用产生了氧气(O<sub>2</sub>)。由于所产生的 O<sub>2</sub> 继续被地面岩石或水中沉积物俘获,所以这个阶段 O<sub>2</sub> 仍然不能积聚。但此时,大气的成分已经由还原性转化为氧化性了。这个阶段的大气主要成分是 N<sub>2</sub>;次要成分是 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub>。

### (4)现代大气形成阶段

这个阶段是大气圈现今面貌的形成阶段,也是地球演化过程中生命形成阶段。

地球上的氧气主要是植物的光合作用产生的,正是生物圈的作用导致了地球大气的进一步演化。生命的形成是与平流层臭氧密切相关的。据估算,大约到了 4 亿

多年前,大气中氧的浓度达到现在浓度的十分之一。当大气中氧逐渐增加时,就导致了高层大气中臭氧层的形成,从而过滤掉太阳辐射中的紫外部分。随着臭氧层的发展,透过大气到达地面的紫外线愈来愈少,逐渐使植物移向水面,最后出现在陆地上。植物的光合作用使二氧化碳逐渐减少,氧气逐渐增多,并在这样的演变过程中逐渐达到了一种平衡。在这个过程中,与地壳矿物反应以及海水吸收也消耗了相当多的 $\text{CO}_2$ ,大气 $\text{CO}_2$ 浓度从3亿年前的 $3 \times 10^{-5}$ 体积分数下降到约 $0.28 \times 10^{-5}$ 体积分数。从火山喷发出来的氮,部分进入到地壳的硝酸盐中,由于氮的化学惰性,并且在水中不易溶解,所以大部分仍保留在大气中,因此,氮的含量在大气中就逐渐占了很大的比重。这就是现在以氮和氧为主要成分的大气环境。大气中的其他微量成分,有的是经火山喷发等排放源进入大气,有的是地球固体部分放射性物质衰变的副产品(例如氡),还有一些则是随着人类空间活动的增加及工业、交通运输业的发展使大量的污染物进入大气。

### 1.1.2 现代大气的组成

现代地球大气是多种气体及飘浮其中的固态、液态颗粒物所组成的混合物。大气成分由干洁空气、水汽及气溶胶粒子三部分组成。

#### (1) 干洁空气

通常将不包含水汽的纯净大气称为干洁空气。所谓“纯净”指不含悬浮于大气中的固态、液态颗粒物即气溶胶粒子。通常用混合比来表示大气中某种气体成分的浓度,有体积混合比和质量混合比两种。对于浓度相对较高的气体,可直接用百分数表示,对于微量气体,可采用以下混合比单位:

$$x(\text{ppm}) = \frac{\text{部分}}{\text{全部}} \times 10^6; x(\text{ppb}) = \frac{\text{部分}}{\text{全部}} \times 10^9; x(\text{ppt}) = \frac{\text{部分}}{\text{全部}} \times 10^{12}$$

ppmm、ppbm、pptm 分别表示质量混合比百万分( $10^{-6}$ )、十亿分( $10^{-9}$ )和万亿分率( $10^{-12}$ ),ppmv( $10^{-6}$ )、ppbv( $10^{-9}$ )、pptv( $10^{-12}$ )分别表示体积混合比百万分、十亿分和万亿分率。

早在18—19世纪,物理学家和化学家已经确定了大气的主要成分为 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、水汽、 $\text{CO}_2$ 以及若干稀有气体。到19世纪末和20世纪初,开始发现含量为ppmv数量级的微量气体。在20世纪后期,随着仪器技术的进步,可以测量的微量气体的浓度下限更达到pptv数量级。表1.2按照总质量的大小,以递减顺序给出了目前地球大气的组成。在讨论大气的组成时,我们经常把它的所有成分按其浓度大小分成三大类,即浓度大于 $10^{-2}$ 量级的主要成分,包括 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 和氩(Ar);浓度在1~10000ppmv之间的微量成分,包括 $\text{CO}_2$ 、水汽( $\text{H}_2\text{O}$ )、 $\text{CH}_4$ 、氦(He)、氖(Ne)、氪(Kr)等;浓度在1ppmv以下的痕量成分,主要有氢气( $\text{H}_2$ )、 $\text{O}_3$ 、氙(Xe),氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )、一氧化氮

(NO)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)、氨气(NH<sub>3</sub>)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、一氧化碳(CO)等。在有些文献中,常把痕量成分和微量成分合称为微量成分。

表 1.2 地球大气的组成(引自 Hartmann, 1994)

成分	分子量( <sup>12</sup> C=12)	干空气中的体积比	总质量/g
地球大气	28.97		$5.136 \times 10^{21}$
干空气	28.964	100.0%	$5.119 \times 10^{21}$
氮气(N <sub>2</sub> )	28.013	78.08%	$3.87 \times 10^{21}$
氧气(O <sub>2</sub> )	31.999	20.95%	$1.185 \times 10^{21}$
氩(Ar)	39.948	0.934%	$6.59 \times 10^{19}$
水汽(H <sub>2</sub> O)	18.015	可变	$1.7 \times 10^{19}$
二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	44.01	379 ppmv*	$\sim 2.76 \times 10^{18}$
氖(Ne)	20.183	18.18 ppmv	$6.48 \times 10^{16}$
氪(Kr)	83.80	1.14 ppmv	$1.69 \times 10^{16}$
甲烷(CH <sub>4</sub> )	16.043	1.774 ppmv*	$\sim 4.9 \times 10^{15}$
氦(He)	4.003	5.24 ppmv	$3.71 \times 10^{15}$
氙(Xe)	131.30	87 ppbv	$2.02 \times 10^{15}$
臭氧(O <sub>3</sub> )	47.998	可变	$\sim 3.3 \times 10^{15}$
氧化亚氮(N <sub>2</sub> O)	44.013	319 ppbv*	$\sim 2.3 \times 10^{15}$
一氧化碳(CO)	28.01	120 ppbv	$\sim 5.9 \times 10^{14}$
氢(H <sub>2</sub> )	2.016	500 ppbv	$\sim 1.8 \times 10^{14}$
氨(NH <sub>3</sub> )	17.03	100 ppbv	$\sim 3.0 \times 10^{13}$
二氧化氮(NO <sub>2</sub> )	46.00	1 ppbv	$\sim 8.1 \times 10^{12}$
二氧化硫(SO <sub>2</sub> )	64.06	200 pptv	$\sim 2.3 \times 10^{12}$
硫化氢(H <sub>2</sub> S)	34.08	200 pptv	$\sim 1.2 \times 10^{12}$
CFC-12(CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )	120.91	538 pptv*	$\sim 1.0 \times 10^{13}$
CFC-11(CCl <sub>3</sub> F)	137.37	251 pptv*	$\sim 6.8 \times 10^{12}$

\*. 数据来自 IPCC, 2007; 其他数据来自 Hartmann, 1994。

需要指出,上面的讨论仅限于大约 90 km 以下的均质层(即大气中主要成分的组成比例几乎不变),这里的大气成分基本上都是处在中性分子状态。在 90 km 以上,大气成分大多数被电离成为原子或离子状态,上面的讨论就不适用了。

需要强调的是,自工业革命以后,特别是最近几十年以来,地球大气中的微量成分已经发生并正在继续发生引人注目的变化。微量气体的这种变化有些是自然现象,有些却是人为活动造成的。这很容易理解,因为它们浓度低,一个小小的扰动就能引起它们的自然平衡状态发生明显变化,所以人类活动的影响首先从这些微量成分的浓度变化中显示出来。最突出的例子是大气中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 等温室气体的增

加,CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 浓度分别由工业革命前(1750 年)的 278 ppmv 和 715 ppbv 上升到 2005 年的 379 ppmv 和 1774 ppbv(引自 IPCC,2007)。这种变化通过大气辐射过程有可能给未来的地球气候环境造成深刻的影响。此外,还有一些大气中本来没有而纯属人为产生的污染成分,如氯氟碳化物(CFCs)、氢氟碳化物(HFCs)等,它们目前在大气中的浓度多为 10<sup>-12</sup> 量级。

### (2)水汽

从占地球大气总质量的百分比而言,水汽仅排在第四位(见表 1.2),如果与全球总水量比较,其仅占 0.001%。但水汽是大气中最重要的成分之一。首先水汽是唯一可以在常温、常压情况下发生相变的大气成分,它与云、雾、雨、雪等天气现象以及虹等大气光象密切相关。其次,从大气辐射学和气候变化的角度看,水汽是大气中最重要的温室气体。水汽在大气中的含量变化将对全球和局地天气气候产生重大影响。

大气中水汽的 85%来自海洋的蒸发,15%来自江河、湖泊的蒸发以及生物圈土壤、植物的蒸腾作用;大气中的水汽又可以通过凝结、凝华形成降水而离开大气回到生物圈和水圈,这就构成了大气中水的循环。水循环跨越了大气圈、生物圈和岩石圈,影响并改变着地球和人类的命运。降水发生在大气圈,水汽的运移是由大气运动完成的;径流发生在岩石圈表层(地表径流)和岩石圈内部(地下径流),是水循环的重要步骤;植物的蒸腾是水循环的重要方面,植被对降水的截留,改变了水循环的过程和速度。

与大气中大多数“均匀混合”的气体不同,大气中水汽的一个最重要的特点是其高度的时空可变性。大气中的水来源于江、河、湖、海及潮湿物体表面的蒸发和植物蒸腾。大气中的水汽含量与地理纬度、海岸分布、地势高低、季节及天气条件等密切相关。在大气对流层,大气中水汽的含量因纬度(地区)和季节(时间)不同,可以有 1~2 个数量级的变化。在温暖潮湿的热带地区、低纬暖洋面上,低空水汽含量最大,其体积混合比可以达到 4%,而干燥的沙漠和极地,水汽含量极少,仅为 0.1%~0.002%。同一地区,夏季的水汽含量较大。空气的垂直运动不断的向上输送水汽,同时又因凝结而转化为水滴及凝华转化为冰晶,因此大气中的水汽含量随高度的增加而明显减少。观测表明,1.5 km 高度上,水汽含量已减少为地表的一半;至 5 km 高度处,只有地表的 1/10;再向上就更少。

### (3)气溶胶

地球大气中除了气体成分之外,还含有大量的固态和液态颗粒物质即气溶胶。一般认为,大气气溶胶粒子的直径在几个纳米(nm)到几十微米(μm)之间。直径小于 1 μm 的气溶胶粒子,在大气中的浓度一般是每立方厘米几十到几千个;而直径大于 1 μm 的气溶胶粒子,一般少于每立方厘米 1 个。大气气溶胶浓度的分布受地理位置、地形、地表性质、距离污染源的远近及气象条件的限制。一般而言,大气气溶胶

的浓度城市大于农村,陆地大于海洋,高度越高浓度越小。

大气气溶胶可以来自于源排放(原生气溶胶),也可以通过“气—粒转化”过程形成(次生气溶胶)。细粒子(直径小于  $2\ \mu\text{m}$ )主要由燃烧过程产生,火山爆发和森林火灾也会大量产生,还可由大气中的微量气体通过一定的化学反应转化为气溶胶粒子(例如大气中的  $\text{SO}_2$  可以转化成硫酸盐气溶胶)。粗粒子(直径大于  $2\ \mu\text{m}$ )则来自机械过程,包括风送沙尘、植物散发的孢子和花粉、海洋飞沫以及工业活动等。

气溶胶粒子的去除过程包括在重力作用下沉降到地面,称为重力沉降;气溶胶颗粒随气流绕过地表物体因惯性作用碰并黏附于其上,称为惯性沉降(重力沉降与惯性沉降合称为干沉降);以及云滴和雨滴碰并气溶胶粒子,并随降水到达地面,称为湿沉降。气溶胶粒子在大气中的寿命一般只有几天到几周。

气溶胶粒子可以是固体颗粒,也可以是液滴或者是由固体和液体颗粒共同构成;在化学上,它们可以是均质的,也可以是非均质的(粒子的尺寸大小、形状和化学组成都可以不同)。气溶胶粒子的形状十分复杂,可以是非常简单的球形,也可以是不规则非球形。

气溶胶的主要作用有以下几点:

1)形成凝结核和冰核。特别是较大的可溶性气溶胶颗粒,可以降低液滴表面饱和水汽压,以有利于凝结的发生,形成云、雾及降水。可以说,如果大气中没有气溶粒子,成云致雨过程几乎是不可能发生的。

2)影响地气系统的辐射平衡。气溶胶粒子可以散射和吸收太阳短波辐射以及地球长波辐射,还可以作为凝结核影响云的辐射特性。

3)影响大气能见度。气溶胶粒子对可见光有衰减(散射与吸收)作用,浓度越大,能见度越低,反之,浓度越小,能见度越好。

4)在大气的许多化学过程中起作用。例如,气溶胶颗粒可以作为反应表面影响大量化学反应的速度。

## 1.2 大气铅直分层

在垂直方向上,大气的物理性质是不均匀的。不同高度范围内的大气层具有各自不同的特点。根据大气本身的物理或化学性质,可将大气在垂直方向分成若干层(见图 1.1)。通常采用的分层方法有以下几种:(1)按照大气的温度结构分层,将大气分成对流层、平流层、中间层、热层和散逸层;(2)按照大气的成分结构分层,将大气分为均质层和非均质层(专业术语定名为均质层和非均质层);(3)按照大气的压力结构分层,分为气压层和外大气层;(4)按照大气的电磁特性分层,分为中性层、电离层和磁层。

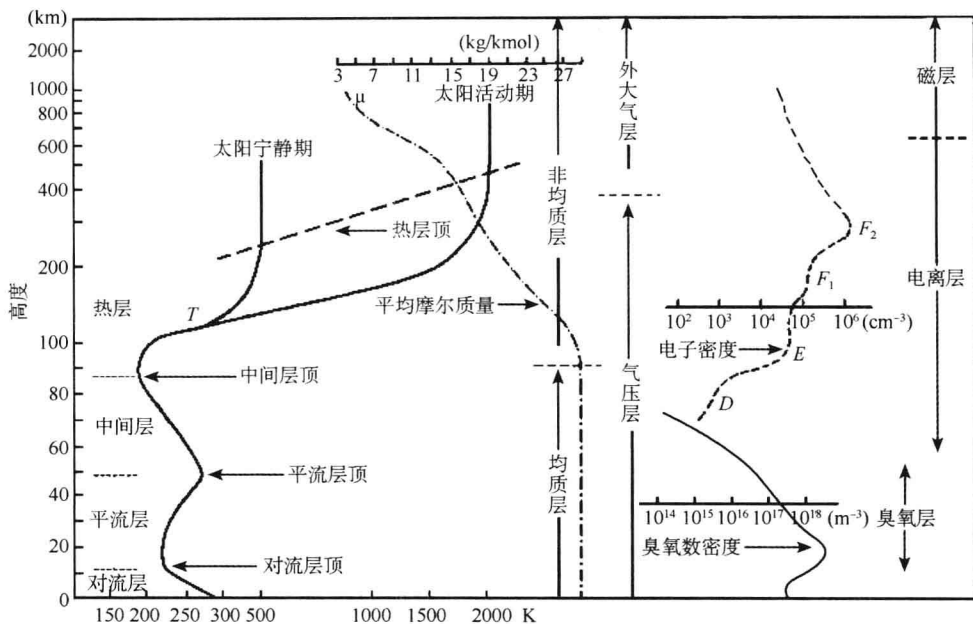


图 1.1 地球大气的垂直分布

### 1.2.1 按气温垂直分布分层

应用最广泛的是按大气的温度结构分层,即根据大气温度的垂直分布特点对大气进行分层。为了定量描述气温铅直分布特点,引入气温垂直递减率(简称气温直减率)概念,其数学表达式为:

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial Z} \quad (1.1)$$

式中负号是为了使  $\gamma$  在气温随高度增高而降低时保持正值而加的。因此,  $\gamma > 0$  表示气温随高度升高而降低;  $\gamma < 0$  表示气温随高度升高而增加,这种气层称为逆温层;  $\gamma = 0$  表示气温随高度不变,这种气层称为等温层。  $\gamma$  单位通常取  $^{\circ}\text{C}/(100 \text{ m})$ 。例如,  $\gamma = 0.65^{\circ}\text{C}/(100 \text{ m})$  表示高度增加 100 m, 温度降低  $0.65^{\circ}\text{C}$ 。

依据大气温度铅直分布的特点,1962年世界气象组织(WMO)根据中纬度气温铅直分布的平均状况,将大气分成对流层、平流层、中间层和热层四层。另外由于热层上部大气多为质子组成,常有向星际空间逃逸的现象,可另外分一层称为散逸层。每层又可细分出若干副层。

#### (1) 对流层

对流层(troposphere)位于大气的最低层。其下界为地面,上界为对流层顶

(tropopause)。对流层的厚度随纬度、季节及地表状况等因素而变化,在高纬度地区平均为 8~9 km,在中纬度地区平均为 10~12 km,在低纬度地区平均为 17~18 km。就季节而言,夏季对流层的厚度大于冬季。对流层集中了大约 75% 的大气和 90% 以上的水汽质量,是地球大气圈中最活跃的一层,大气中主要的天气现象都在此层内形成。

对流层主要有以下三个特点:

1) 气温随高度增高而降低。对流层空气直接吸收太阳辐射很少,主要吸收地面发射的红外辐射。低层大气受到地面加热,通过空气的对流和湍流运动,将热量输送到上层空气。所以在对流层中,一般情况下,温度随高度的增加而下降。平均而言,高度每上升 100 m,气温下降  $0.65^{\circ}\text{C}$ ,即  $\gamma=0.65^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 。

2) 铅直运动剧烈。对流层内大气有规则的铅直运动和无规则的铅直运动(称为湍流)都相当剧烈。强烈的铅直混合不但对温度铅直分布有影响,而且有利于大气成分如水汽、气溶胶颗粒在铅直方向的输送。

3) 气象要素水平分布不均匀。在对流层中,空气受到地表的影 响很大,所以温度、湿度等的水平分布很不均匀。不仅高、低纬度的空气性质有差别,就同一纬度上,由于地表状况不同,空气性质的差别也很大。

对流层中,从地面到地上 1~2 km 的一层称为摩擦层,又称行星边界层。在行星边界层中,通常把 50~100 m 以下的气层称为近地面层,近地面层以上到摩擦层顶称为上部摩擦层。行星边界层以上的大气层称为自由大气,在自由大气中,地球表面的摩擦作用可以忽略不计。在对流层与平流层之间,还存在一个厚度为数百米到 1~2 km 的过渡层,称为对流层顶。在对流层顶内,气温不随高度变化或变化较小。

## (2) 平流层

自对流层顶向上到 55 km 左右的气层称为平流层(stratosphere),其上界称为平流层顶(stratopause),这一层的大气约占大气质量的 20% 左右。在平流层内,温度从对流层顶至 20 km 处几乎不随高度变化,这是在 1902 年发现的;再往上温度随高度的升高增加很快,到平流层顶部气温可升到  $-3\sim 17^{\circ}\text{C}$  ( $270\sim 290\text{ K}$ )。臭氧对紫外线的强烈吸收以及分子氧与原子氧重新生成臭氧时所释放的能量是平流层温度升高的主要原因。

平流层的特点:一是由于温度随高度增加而升高,大气层结稳定,空气垂直对流运动弱,平流运动占据显著优势,平流层也因此而得名;二是空气比下层稀薄得多,水汽、尘埃的含量甚微,大气透明度好,很少出现天气现象;三是 在高约 15~35 km 的范围内,有厚约 20 km 的臭氧层。

## (3) 中间层

中间层(mesosphere)是指平流层顶到 90 km 高度左右的大气层,其上界称为中

间层顶(mesopause)。在中间层内气温随高度的升高而降低,其顶部温度可降到 $-113\sim-83^{\circ}\text{C}$ ( $160\sim 190\text{ K}$ ),是大气中最冷的部分。在大气科学中又将平流层和中间层大气合称为中层大气。该层中垂直温度梯度很大,有相当强烈的垂直混合,气压和空气密度随高度升高而降低的程度远慢于低层大气。

中间层内水汽极少,几乎没有云层出现,仅在高纬地区的黄昏前后,在 $75\sim 90\text{ km}$ 的高度处观测到一种薄而带银白色的夜光云,但出现机会很少。这种夜光云的组成还不十分清楚,有人认为是由极细微的尘埃组成。

#### (4)热层(thermosphere)

中间层顶以上为热层,这一层空气质量只占大气质量的十万分之一。热层内温度随高度的增高迅速升高,这是由于太阳辐射中波长小于 $0.17\ \mu\text{m}$ 的紫外辐射几乎全部被该层中的分子氧和原子氧吸收,吸收的能量大部分用于气层的增温,同时原子氧在波长小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的紫外线的作用下发生电离,释放出大量的热量,因此在热层内温度可达 $1000\text{ K}$ 以上。这一层的温度与太阳活动有关,当太阳活动加强时,温度随高度增加很快,这时 $500\text{ km}$ 处的温度可达到 $2000\text{ K}$ ,当太阳活动减弱时,温度随高度增加较慢, $500\text{ km}$ 处的温度只有 $500\text{ K}$ 。

热层没有明显的顶部,通常认为温度从增温转为等温时,即为热层顶。在太阳宁静时,热层顶的高度约为 $260\text{ km}$ ;当太阳活动强烈时,热层顶的高度约为 $500\text{ km}$ ,即热层顶的高度变化在 $250\sim 500\text{ km}$ 之间。

在这一层高纬度地区常出现美丽的极光现象。极光是由于太阳发射的高速带电粒子使得高层稀薄的空气分子或原子被激发后发出的光。这些带电粒子在地球磁场的作用下趋向南北两极,所以极光常在高纬地区出现。

#### (5)散逸层(exosphere)

散逸层是指热层以上的大气层,为大气圈向星际空间的过渡地带,没有确定的上界,空气极度稀薄,温度随高度变化很小。由于那里地球引力很小,空气分子运动的平均自由程很大,使一些高速运动的空气质点不断地向星际空间逃逸。

### 1.2.2 按大气化学组分垂直分布分层

按大气的成分结构,可把大气分为均质层和非均质层。

#### (1)均质层(homosphere)

在 $90\text{ km}$ 以下的大气层中,大气中主要成分的组成比例(见表1.2)几乎不随时间、空间变化,因此这层大气称为均质层。

#### (2)非均质层(heterosphere)

在 $90\text{ km}$ 以上的大气层中,由于氧分子和氮分子大量解离,使得大气的平均相对分子质量随着高度的增加而降低,所以称为非均质层。



### 1.2.3 按大气电离状态的垂直分布分层

按大气的电磁特性,可把大气分为中性层、电离层和磁层。60~500 km 高度的大气层称为电离层。在这里,由于太阳辐射的影响,大气物质开始电离。根据电离层电子的浓度及对电磁波反射的不同效果,又可划分为 D 层(高度大约在 60~90 km)、E 层(高度约 110 km)、F1 层(约 160 km 高度)、F2 层(300 km 高度),以及更高的 G 层等。D 层主要是 NO 的光解离,E 层主要是 O<sub>2</sub> 的光解离,F 层 O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 都发生光解离,离子和电子浓度都很高。中性层是指地面到 60 km 高度,这里大气各成分多处于中性,即非电离状态。500 km 以上的称为磁层。

## 1.3 大气的状态参数

描述大气状态的基本物理参数包括气温、气压、湿度和风,此外还有云、能见度、降水等,统称气象要素。本节着重讲述气温、气压和湿度三大气象要素。

### 1.3.1 气温

表示大气冷热程度的物理量,称为气温。空气的冷热程度,实质上是空气分子平均动能大小的表现。当空气获得热量时,其分子运动的平均速度增大,平均动能增加,气温升高。反之,当空气失去热量时,其分子平均速度减小,平均动能减小,气温也就降低。

为了定量地表示物体的冷热程度,必须引进衡量物体温度高低的尺子。这把尺子就是温标。常用的温标有三种:

绝对温标( $T$ ):在国际单位制中,以绝对温标(热力学温标)作为基本温标。热力学温标表示的温度称为热力学温度或绝对温度,单位为开尔文,用符号 K 表示。绝对温标以水的三相点温度为基本点,它的绝对温度为 273.16 K。

摄氏温标( $t$ ):用它表示的温度称为摄氏温度,用符号℃表示。水的沸点温度为 100℃,冰的熔点为 0℃。摄氏温标与绝对温标的关系为  $T=273.15+t$ 。

华氏温标( $F$ ):华氏温标是将水的沸点定为 212 ℉,冰的熔点定为 32 ℉,并将两点之间分为 180 等分。华氏温度与摄氏温度之间的关系为  $F=1.8t+32$ 。

气温随空间和时间有很大变化。气温的周期性变化表现为日变化和季节变化,而非周期性变化直接与大气运动有关。

### 1.3.2 气压

气压是大气压强的简称,即作用在单位面积上的大气压力。它是大气分子运动