




“十三五”江苏省高等学校重点教材 (编号: 2016-2-117)

DAQI
WULIXUE

大气物理学

银燕 刁一伟 刘超 陆春松 于兴娜 陈倩 编著


 气象出版社
China Meteorological Press

“十三五”江苏省高等学校重点教材(编号:2016-2-117)

大气物理学

银 燕 刁一伟 刘 超 编著
陆春松 于兴娜 陈 倩



 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 简 介

《大气物理学》在传统大气物理理论和基本自然现象讨论基础上,吸收国内外经典教材和最新研究成果,对重点内容提出深入浅出、理论完整的编写框架。全书共分5章,从大气物理学的研究内容、近期发展、大气基础知识开始,重点介绍如何应用热力学原理研究大气热力学过程、水的热力学属性、大气中主要热力学过程、热力学图解应用、大气静力稳定度分析等以及辐射的基本概念、大气吸收和大气散射、辐射传输方程和地球—大气辐射过程等。针对大气科学领域内普遍关注的云降水物理过程和大气气溶胶机理,着重介绍了云雾形成的宏—微观特征和机制,云粒子的核化理论,水滴冰晶的增长机理,典型降水理论,气溶胶的化学组成及来源估计,气溶胶的观测与测量,对流层气溶胶的气候学特征等。

本书以大专院校和科研院所大气科学、大气物理学、大气环境、应用气象学、气候学、海洋科学等专业学生为主要对象,也可以作为气象、海洋、环境、电力等业务部门,以及大气科学类相关从业者的教学和研究参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大气物理学/银燕等编著. —北京:气象出版社,

2018.10

ISBN 978-7-5029-6853-3

I. ①大… II. ①银… III. ①大气物理学—高等学校—教材 IV. ①P401

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第249652号

大气物理学

银 燕 刁一伟 刘 超 陆春松 于兴娜 陈 倩 编著

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

邮政编码:100081

电 话:010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址:<http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑:黄红丽

终 审:吴晓鹏

责任校对:王丽梅

责任技编:赵相宁

封面设计:博雅思企划

印 刷:三河市君旺印务有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:13

字 数:262千字

版 次:2018年10月第1版

印 次:2018年10月第1次印刷

定 价:45.00元

前 言

大气物理学主要研究地球大气参数、大气现象和过程的物理性质及其变化规律。研究内容非常广泛,有很多子分支,如研究大气辐射特性和辐射传输过程的大气辐射学,研究云雾降水形成过程的云雾降水物理学,研究大气中各种热力过程的大气热力学,研究中层(或高层)大气中各种物理现象和过程的中层(或高层)大气物理学,研究大气遥感原理、信息反演技术和应用的大气遥感学等等。大气物理学所研究的大气参数主要是它们的物理特性,如大气的电场特性、云和气溶胶的谱分布、折射率和粒子数密度、大气透过率、气体分子和气溶胶等各种粒子的辐射特性等。大气物理学广泛应用近代电磁学、力学、热力学与统计物理学、光学与量子力学的理论、方法和研究成果,结合地球大气自身特点,理论与实践相结合,研究大气中流体运动、声光电现象、物质相变过程、大气辐射及其气候效应、大气湍流等。实际上,大气物理学可视为应用物理学的一个分支。

大气物理学作为大气科学的基础学科,通过对大气现象物理本质的揭示与深入认识,不断提高天气预报、环境与气候变化预测、航空与航天气象保障、人工影响天气等技术水平,为人类社会的进步和发展服务。模式中的辐射模式就是一个典型的应用例子。辐射问题涉及整个地气系统的能量收支,但在早期的天气预报和气候预测模式中对辐射的处理是很粗糙的。大气物理学家和气象学家都认识到了这个问题的重要性和紧迫性,于是大气物理学家发展了适用于气候模式的各种辐射传输模式,并与气象学家一道为在气候模式中应用这些成果而不断努力。这个过程也极大地推动了大气物理学关于大气辐射传输的研究。因此,大气物理学必须密切结合大气科学发展中提出的重要问题和前沿研究方向,才具有前进的生命力。

本教材是按照“十三五”江苏省高等学校重点教材建设精神,在原《大气物理学》讲义的基础上,并参阅国内外相关教材编写的。第一章由银燕编写;第二章由刁一伟编写;第三章由刘超编写;第四章由陆春松和陈倩编写;第五章由于兴娜编写。银燕对全书进行了统稿和审定。刁一伟等对有关章节作了认真审核,提出了宝贵的修改意见。大气物理学院的况祥、何川、刘淑贤、张昕等同学也对本书提出了一些建设性修改意见。

本书是为大气科学类专业本科生的大气物理学课程编写的专业课教材,也可供相关专业的学生和研究人员参考。本书不求大而全,但求少而精,力求把所讨论的问题讲透彻,主要集中在大气热力学、大气辐射、云降水物理及与雾霾关系密切的大气气溶胶。

本书的编著得到“十三五”江苏省高等学校重点教材项目、江苏高校品牌专业建设工程资助项目、江苏高校优势学科建设工程资助项目的支持。本书的立项到出版,气象出版社黄红丽副编审给予热情帮助。

编者学识水平所限,错误、疏漏在所难免,请读者予以批评指正。

作者

2018年3月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究内容及近期发展	(1)
1.2 大气的基础知识	(2)
1.2.1 大气的化学构成	(2)
1.2.2 气体状态方程及虚温	(7)
1.2.3 大气中的水汽	(10)
1.2.4 大气湿度的表示方法	(11)
1.2.5 大气的垂直分层	(16)
1.3 大气静力学	(18)
1.3.1 流体静力学平衡与流体静力学方程	(18)
1.3.2 大气质量及其垂直分布	(19)
1.3.3 位势和位势高度	(20)
1.3.4 标高和压高公式	(22)
1.3.5 等压面的厚度和高度	(23)
思考题与习题	(24)
参考文献	(25)
第 2 章 大气热力学基础	(26)
2.1 热力学系统	(26)
2.1.1 系统	(26)
2.1.2 状态	(27)
2.1.3 过程	(29)
2.1.4 气块模型	(30)
2.2 热力学第一定律	(31)
2.2.1 热力学第一定律的普遍表达式	(31)
2.2.2 比热	(32)
2.2.3 焓	(33)
2.3 热力学第二定律	(34)
2.3.1 第二定律的数学表达式	(34)

2.3.2	自由能与吉布斯函数	(37)
2.3.3	麦克斯韦关系	(37)
2.4	水的热力学属性	(39)
2.4.1	水的相态平衡	(39)
2.4.2	相变潜热	(40)
2.4.3	克劳修斯-克拉贝龙方程	(40)
2.5	大气中的能量	(42)
2.5.1	大气能量的基本形式	(42)
2.5.2	大气能量的组合形式	(43)
2.6	等压过程	(44)
2.6.1	等压冷却过程	(44)
2.6.2	等压冷却凝结过程	(45)
2.6.3	等压绝热过程	(47)
2.7	干绝热过程	(51)
2.7.1	泊松方程	(51)
2.7.2	干绝热减温率	(52)
2.7.3	露点减温率	(52)
2.7.4	位温	(53)
2.7.5	位温、熵及热量收支	(54)
2.7.6	位温的垂直变化	(55)
2.7.7	抬升凝结高度	(55)
2.8	湿绝热过程	(57)
2.8.1	可逆湿绝热过程	(57)
2.8.2	假绝热过程	(59)
2.8.3	湿绝热减温率	(59)
2.8.4	相当位温	(61)
2.8.5	假湿球位温和假湿球温度	(62)
2.8.6	假相当位温和假相当温度	(63)
2.8.7	焚风	(65)
2.9	混合过程	(66)
2.9.1	等压绝热混合	(66)
2.9.2	垂直混合	(69)
2.10	大气热力学图	(70)
2.10.1	热力学图类型	(71)

2.10.2	热力学图解的应用	(75)
2.11	大气静力稳定度	(77)
2.11.1	大气静力稳定度概念	(77)
2.11.2	大气静力稳定度的判据	(77)
2.11.3	气层的不稳定能量与条件性不稳定	(81)
2.12	薄层法	(87)
2.13	夹卷过程对气层静力稳定度的影响	(90)
2.14	气层整层升降对静力稳定度的影响	(91)
2.14.1	未饱和气层及下沉逆温	(91)
2.14.2	气层升降过程中达到饱和状态	(93)
	思考题与习题	(94)
	参考文献	(96)
第3章	大气辐射学	(97)
3.1	辐射基本概念	(97)
3.1.1	电磁波谱	(97)
3.1.2	辐射基本度量	(99)
3.2	黑体辐射基本定理	(101)
3.2.1	吸收率、反射率和透过率	(101)
3.2.2	黑体	(101)
3.2.3	普朗克定律	(102)
3.2.4	维恩位移定律	(104)
3.2.5	斯蒂芬-玻尔兹曼定律	(105)
3.2.6	发射率和基尔霍夫定律	(105)
3.3	地球-大气系统的辐射平衡	(106)
3.3.1	无大气系统	(106)
3.3.2	单层大气系统	(107)
3.3.3	真实地球能量收支	(109)
3.4	辐射传输基础	(110)
3.4.1	辐射传输方程	(110)
3.4.2	比尔定律	(111)
3.4.3	施瓦氏方程	(112)
3.4.4	含散射的辐射传输	(113)
3.5	气体的吸收	(113)
3.5.1	吸收光谱	(113)

3.5.2	谱线增宽	(115)
3.5.3	地球大气吸收带	(116)
3.6	粒子的散射与吸收	(118)
3.6.1	散射的物理量	(118)
3.6.2	体散射特性	(120)
3.6.3	散射的计算方法	(121)
	思考题与习题	(122)
	参考文献	(123)
第4章	云雾降水物理基础	(124)
4.1	云雾形成机制和宏观特征	(124)
4.1.1	云和降水的分类	(124)
4.1.2	云雾的形成机制	(124)
4.2	云降水微观特征	(128)
4.2.1	云中水凝物粒子的相态分布和微观特征	(128)
4.2.2	云滴尺度分布特征	(131)
4.2.3	雨滴形状及尺度分布特征	(132)
4.2.4	冰晶和雪花的形状及尺度分布特征	(134)
4.2.5	霰和雹的形状、结构与尺度分布特征	(136)
4.3	云粒子的核化理论	(137)
4.3.1	云滴的同质核化	(137)
4.3.2	云滴的异质核化	(138)
4.4	水滴与冰晶的扩散增长	(142)
4.4.1	单个云滴的扩散增长	(142)
4.4.2	群滴的凝结增长	(144)
4.4.3	单个雪晶的扩散增长	(145)
4.4.4	冰水共存时冰晶的凝华生长——冰晶效应	(148)
4.5	液相云降水形成理论	(148)
4.5.1	连续碰并增长	(148)
4.5.2	随机碰并增长	(151)
4.6	冰相云降水理论	(152)
4.6.1	冷云中降水的形成	(152)
4.6.2	冰雹的形成	(153)
	思考题与习题	(154)
	参考文献	(156)

第 5 章 大气气溶胶	(158)
5.1 大气气溶胶的基本特征	(158)
5.1.1 气溶胶粒子的尺度	(158)
5.1.2 气溶胶粒子的浓度	(162)
5.1.3 气溶胶的粒径谱分布	(163)
5.1.4 气溶胶的源、汇及寿命	(171)
5.1.5 气溶胶的混合状态	(173)
5.2 气溶胶的化学组成及来源估计	(174)
5.2.1 气溶胶的化学组成	(174)
5.2.2 气溶胶的来源判别	(180)
5.3 气溶胶的观测与测量	(184)
5.3.1 气溶胶采样器	(184)
5.3.2 气溶胶物理性质的观测仪器概述	(186)
5.3.3 气溶胶化学组分分析技术	(192)
5.3.4 气溶胶化学特性的实时分析	(194)
5.4 对流层气溶胶的气候学特征	(195)
5.4.1 气溶胶粒子的质量浓度	(195)
5.4.2 气溶胶粒子的数浓度	(196)
思考题与习题	(197)
参考文献	(197)

第1章 绪论

1.1 研究内容及近期发展

大气物理学是研究地球大气参数、大气现象、过程及其演变规律的大气科学的分支学科。它的研究内容主要包括大气中辐射能量传输、大气热力过程、云雾降水物理、大气声、光、电现象、大气边界层物理以及中高层大气物理等。它既是大气科学的基础理论部分,也是物理学在大气研究中的应用。它利用流体力学方程、化学模式、辐射平衡和热量传输过程等知识描述和理解大气及相关系统的物理过程,如利用散射、波传输、云物理、力学等理论描述大气中的物理过程。

大气物理学与大气科学的其他分支有紧密的联系,如大气物理过程受到天气背景的制约,同时,大气物理研究和探测的结果,又广泛用于天气分析和预报。大气物理学通过对大气现象物理本质的揭示与深入认识,不断提高天气预报、环境与气候变化预测、航空与航天气象保障、人工影响天气等的技术水平,为人类社会的进步和发展服务。气象学家也越来越认识到正确处理大气中的各种物理过程对数值天气预报和气候变化预测的重要性。实际上,近年来大气物理学的研究成果越来越深入地应用到这些预报或预测模式中,这些模式中的辐射模式就是一个典型的应用例子。辐射问题涉及整个地气系统的能量收支,但在早期的天气预报和气候预测模式中对辐射的处理是很粗糙的。大气物理学家和气象学家都认识到了这个问题的重要性和紧迫性,于是大气物理学家发展了适用于气候模式的各种辐射传输模式,并与气象学家一道为在气候模式中应用这些成果而不断努力。这个过程也极大地推动了大气物理学关于大气辐射传输的研究。因此,大气物理学必须密切结合大气科学发展中提出的重要问题和前沿研究方向,才具有前进的生命力。

随着人类在大气中活动范围的迅速扩展,又不断向大气物理学提出新的要求,大气物理学研究领域不断深入和扩大,如为了改进大气中的电波通信、光波通信、提高导弹制导水平,就需要了解它们所赖以传播的大气介质及相互作用,因此就要研究大气的声、光、电和无线电气象;又如,大气中二氧化碳含量逐年增加,影响着大气辐射过程和气候变化规律,这些又影响农业生产,特别是粮食生产。粮食问题导致对气候变化的关注,进而促进了对大气辐射问题的研究;工业化和城市化带来的严重空气

污染现象,促进了对大气边界层与大气成分相互作用的研究;工农业用水逐年增加,就必须充分利用大气中丰富的水分,这就要开发大气中的水资源;此外,为避免或减轻天气灾害,又推动着人工影响天气试验研究的广泛开展,从而促进了云和降水物理学的研究。同时,科学技术的许多新成就也推动大气物理学向前发展,如 20 世纪 60 年代以来,遥感技术发展迅速,辐射传输是遥感的基础,由此推动着大气辐射学的研究;人造卫星、电子计算机的发展,新技术(如激光、雷达、微波)的应用,给大气物理研究提供了新的强有力的探测工具,获得了更多的探测资料,从而大大加速大气物理学发展的进程。所以,如何进一步认识大气的精细结构和时间演变,有效地利用和科学地保护大气,将是大气物理学期长期发展的方向。

本章介绍大气的基础知识,并系统讨论大气静力学。

1.2 大气的基础知识

地球大气或大气圈是包裹在地球周围的一层气体,从地面一直延伸到上千千米的高空,但其质量的 99.9%集中在离地面 50 km 以下的高度内,而且 50%是集中在距离地面 6 km 以下的低空。大气圈与水圈、岩石圈和生物圈一起组成了人类赖以生存的主要自然环境。

1.2.1 大气的化学构成

现代大气是在地球形成和演化过程中逐渐形成的。地球大约形成于 45.6 亿年前,由冷星云物质不断演化而来,通过太阳星云的吸积作用及其与太阳系中其他物质的碰撞聚并形成。在地球形成阶段(约 45.6 亿~43 亿年前),最初的大气成分以氢(H_2)和氦(He)为主,同时包含 Ar、Ne、Kr 和 Xe 等惰性气体,在初始强烈的太阳风作用和地球引力较小的情况下,原始大气很快逃逸消失,并进入次生大气演化阶段。

地球形成以后,地球的大气是次生的。约 43 亿~40 亿年前,大量小星体不断撞击(包括形成月球的那次大撞击),使地球温度升高,并处于岩熔状态,地球早期表面的高温使得大量的水分呈气态并停留在大气中,还包含岩石在高温下的挥发物;随着地表温度的降低,水汽逐渐凝结并沉降到地面,形成了最初的海洋。此阶段的地球大气主要成分为 N_2 、 CO_2 、 CH_4 和 H_2O ,以及一些痕量气体 H_2 、He、Ar、Ne、Kr、CO 和 NH_3 等,但仍然没有氧气(O_2);可见除了氧气外,现今大气的绝大多数成分均来自于地球内部。40 亿~38 亿年前,随着海洋形成后、火山喷发活动减缓和地壳的造山运动,大气中 CO_2 含量逐渐降低, N_2 和 CH_4 继续累积。38 亿~25 亿年前,水的光解作用与海洋中单细胞蓝细菌的光合作用,是大气中氧气起源的两个途径;光合作用可能从距今 34.6 亿年前就开始了,生成的氧被海水中的铁离子等迅速化合沉积下来,大气中氧气的含量最多只有现

在的 $10^{-13} \sim 10^{-6}$ 水平,直到距今 25 亿年前仍为缺氧的还原性大气(Lyons et al., 2014)。

约 25 亿~3.5 亿年前,大气从还原型阶段向氧化型大气转化,逐渐形成现代大气。地球历史上有 2 次明显的大气氧增加过程。大约在 24 亿~21 亿年前,地球发生了第一次快速增氧事件(GOE-1),氧气浓度急剧上升,随后保持在一个稳定水平。研究发现在 24 亿年前穿透地球大气层并抵达地表的太阳紫外线有一个突然的下降,这预示着臭氧层的出现,同样也反映了该时期内氧气浓度的激增,这一事件被称为“大氧化事件”。在这次事件中,氧气由一个极低的水平($10^{-5} \sim 10^{-3}$)急剧增至 1%。距今 6 亿年前后,地球发生第二次大氧化事件(NOE-2),大气中的氧含量从现今大气含氧水平(PAL)的 1% 增加到 60% PAL 以上。约 4.5 亿~3.5 亿年前,随着陆地植物的出现与进化,永久性地增加了有机碳埋藏, CO_2 和 CH_4 再次减少,并把大气氧含量推到现今的浓度(21%),这个氧化事件建立了一个新的动态稳定状态,即现代大气。

现代大气由多种气体成分以及悬浮其中的固态或液态颗粒物(称为大气气溶胶粒子)构成。其中,气体成分有 N_2 、 O_2 、Ar、 CO_2 、 H_2O 、 O_3 、 H_2 、He、Ne、Kr、Xe 等,颗粒物有尘埃、烟粒、盐粒、水滴、冰晶、有机粒子(花粉)等。生命的出现和生物圈的形成在现代大气的形成和演变中起了重要作用。

一般把不含有水汽和大气气溶胶粒子的大气称为干洁大气或干空气,而把包含有水汽的空气称为湿空气。大气中任何高度上各种气体成分的混合比例主要决定于分子扩散和湍流混合两个物理过程。在 110 km 以上,以分子扩散为主,使得重力场中空气分子数密度随高度递减。分子的质量越大,重力作用越显著,分子数密度随高度递减也越快,使得较轻的气体在较高的高度上占有较大的比例,并由此造成干空气分子量随高度减少,也因此称 110 km 以上的大气为非均和层。在 85 km 以下的大气内,湍流混合成为主导的物理过程,气体混合均匀,大气构成基本与高度无关,可视为“单一成分”,平均分子量为 $28.966 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$,因此,这一层称为均和层。从 85 km 到 110 km,是从以湍流混合为主到以分子扩散为主的过渡带。在 90 km 以上,大气的主要成分仍然是氮和氧,但由于太阳紫外辐射的照射,氮和氧已有不同程度的离解。在 100 km 以上,氧分子几乎已全部离解为氧原子。到 250 km 以上,氮也基本离解了。到 1000 km 以上,空气稀薄到接近真空。

下面主要论述干空气的组成和气溶胶粒子的特性,水汽的特性在下一节介绍。云雾和降水的特性及形成和演变机制在第四章予以论述。

(1) 干洁大气的组成

表 1.1 给出了干空气的主要组成成分及其分子量和体积百分比浓度。如表所示,干空气的成分可分为两类。一类是定常成分,主要有氮、氧、氩、氖、氦、氙和氙,其中又以氮、氧、氩为主,约占大气总体积的 99.96%。这类成分在大气中的含量随时间与地点的变化很小,其体积比在 90 km 以下的变化也很小。另一类是可变成分,

如二氧化碳、一氧化碳、甲烷、氮氧化物、臭氧、二氧化硫、氨、碘等,其含量随时间和地点都有显著变化。可变成分在干洁大气中所占比例不到大气总体积的 0.1%,但它们中的一部分对地气系统辐射收支、气候变化等的影响非常重要,还有一部分对人类健康和其他动植物有直接伤害。因此,对这些成分的变化趋势下面还要进一步讨论。

表 1.1 干洁大气基本成分所占比例,其中黑体字成分为温室气体 (Wallace and Hobbs, 2006)

定常成分			可变成分		
气体名称	分子量	体积百分比浓度	气体名称	分子量	体积百分比浓度
氮气(N ₂)	28.01	78.0840	二氧化碳(CO₂)	44.01	0.038
氧气(O ₂)	32.00	20.976	甲烷(CH₄)	16.04	1.75×10⁻⁴
氩气(Ar)	39.95	0.934	氢气(H ₂)	2.02	0.5×10 ⁻⁴
氖气(Ne)	20.18	0.001818	一氧化二氮(N₂O)	44.01	0.27×10⁻⁴
氦气(He)	4.00	0.000524	一氧化碳(CO)	28.01	0.19×10 ⁻⁴
氪气(Kr)	83.80	0.000114	臭氧(O ₃)	48.00	0~0.1×10 ⁻⁴
氙气(Xe)	131.3	0.87×10 ⁻⁷	碘(I ₂)	253.81	5.0×10 ⁻⁷
			氨气(NH ₃)	17.03	4.0×10 ⁻⁷
			二氧化硫(SO ₂)	64.06	1.2×10 ⁻⁷
			二氧化氮(NO ₂)	46.01	1.0×10 ⁻⁷

大气中的氮约占大气总体积的 78%。氮的来源很多,腐烂的动植物都会排放氮,地球通过不同方式如火山爆发,也可向大气中排放大量含氮物质。

大气中的氧气是人类和其他动物赖以生存的物质基础。大气中的 O₂ 主要有两种来源:植物光合作用和水的离解。光合作用要吸收可见光辐射,而水的离解要吸收紫外辐射。地球大气中的氧气主要是通过光合作用产生的。

在可变气体成分中,有一类称为“温室气体”,如 CO₂、CH₄、N₂O 等。这类气体对地球发射的长波辐射具有较强的吸收作用,而对太阳的短波辐射吸收较少,因而对地表有保温作用,与全球气候变化关系密切。还有一类称为“污染气体”,如 SO₂、CO、碳氢化合物、NH₃ 等,对地球的生态环境有不同程度的伤害。

大气中的 CO₂ 含量主要受植物的光合作用、动植物的呼吸作用、含碳物质的燃烧以及海水对它的吸收等影响。在高度 90 km 以下的大气中,二氧化碳的平均体积混合比约为 0.03%;在 90 km 以上,含量则大为减少。在人口密集的工业地区,CO₂ 的含量较高,可达空气体积的 0.05% 以上;在人烟稀少的背景地区,含量则较低。工业的发展,特别是化石燃料的燃烧、森林覆盖面积的减少等都对大气中 CO₂ 的增加有重要贡献。根据冰芯取样分析,工业革命以来的 250 多年中,CO₂ 含量增加显著,从 1750 年的大约 0.028% (280 ppmv) 增加到 2005 年的 0.038% (380 ppmv) (IPCC, 2013)。由于二氧化碳在地球发射的电磁波能谱峰值波段有丰富的吸收带,能强烈地

吸收地面辐射并发射长波辐射,是大气中最重要的温室气体。大气中 CO_2 含量的增加及其对气候变化的影响已引起全球范围内的广泛重视。

大气 O_3 主要分布在 10~50 km 的中层大气内,其峰值在 15~25 km 附近。这一层通常称之为臭氧层,主要是由于氧分子吸收太阳紫外辐射分解为氧原子,然后氧原子与没有被分解的氧分子结合形成臭氧分子。这层臭氧能强烈地吸收太阳紫外辐射,在氧分子分解的过程中释放热量,对大气有加热作用,导致平流层内温度随高度的递增趋势,并保护地面的生物免受紫外辐射的伤害。自 1985 年发现南极臭氧洞以来,臭氧变化问题已引起人们的高度关注,保护平流层臭氧已成为人类的共同使命。相对来说,对流层的臭氧含量占整层大气含量的 10%,但其温室效应不可忽视。

甲烷(CH_4)是大气中另一种重要的温室气体。根据冰芯中气体取样分析,在 200 多年前,大气中 CH_4 的平均含量只有 0.7×10^{-6} ,而到 1980 年已增加到 1.56×10^{-6} ,约为前者的 2 倍。 CH_4 在大气的生命期约为 7 年,主要来源于稻田、天然气、工业废水和污染以及沼气。许多观测研究表明,近代大气中的 CH_4 含量呈明显增长的趋势,年增长率约为 0.75%,北半球的含量高于南半球,且随纬度的变化在北半球更明显。

二氧化硫是一种无色的、具有令人窒息气味的气体,主要来源于人类活动,如工业、家庭生活中的矿物燃料燃烧等,因此,在工业污染严重的地区,二氧化硫含量较高。全世界每年向大气排放的二氧化硫约为 1.46×10^{11} kg,是一种危害相当大的污染物,是空气污染的主要指标之一。二氧化硫有很强的腐蚀作用,大气中的二氧化硫经氧化后变成三氧化硫,其毒性比二氧化硫大 7 倍。三氧化硫与大气中的水汽可生成硫酸。在酸雨的形成、影响大气能见度和地气系统的能量收支等方面,二氧化硫都扮演着非常重要的角色。

大气中的氮氧化物——一氧化氮和二氧化氮也是重要的人为污染物。其中一氧化氮是一种无色无味的气体,而二氧化氮是一种红褐色的、有特殊气味的气体。两者都有毒性,但二氧化氮的毒性是一氧化氮的 5 倍。主要产生于燃烧时空气中的氮和氧的反应。与硝酸制造和应用相关的工业、机动车辆和飞机排出的废气中含有大量氮氧化物。全世界每年排入大气的二氧化氮约 0.53×10^{11} kg。一氧化氮在大气中可氧化为二氧化氮。当氮氧化物与碳氢化合物共存时,经太阳紫外线的照射,会发生光化学反应,产生含有多种强氧化剂的次生污染物,称为光化学烟雾。当光化学烟雾在空气中的浓度达到百万分之几时,便会对眼睛、鼻子、气管和肺部产生刺激,浓度更高时可致命。

(2) 大气气溶胶

大气气溶胶是悬浮在气体中的固体和(或)液体微粒与气体载体组成的多相体系。大气的许多现象和过程都和它密切相关,如大气能见度、云雾形成、臭氧光化学

反应、辐射传输等。它在环境与气候变化研究、空间对地遥感的大气订正等都具有重要意义。

大气中的气溶胶粒子是由自然过程和人为活动两部分所造成的。自然过程形成的气溶胶包括火山和宇宙尘埃、海水飞沫、花粉与种子、沙尘粒子、岩石风化等；人为气溶胶是由人类生产、生活和社会活动等直接排放到大气中的各种微粒，或者排放的污染气体(或称气溶胶前体物)在大气中经过一系列物理化学过程转化(气-粒转化)形成的。

Whitby(1978)把气溶胶分为爱根核模态($0.001 \sim 0.1 \mu\text{m}$)、积聚模态($0.1 \sim 1 \mu\text{m}$)和粗模态($>1 \mu\text{m}$)。从物理过程来看，爱根核模态来自气-粒转化过程，积聚模态来自碰并和异质凝结，而粗模态则主要由机械过程产生。那些对水汽凝结成为云雾粒子起凝结核作用的气溶胶粒子称为云凝结核(CCN)，它们通常是小于 $1 \mu\text{m}$ 的粒子，将在第四章更详细讨论。

气溶胶的主要物理特性参数包括粒子数浓度、谱分布、形状和折射率等。辐射传输中常用的气溶胶消光系数、散射相函数和单次散射反照率等光学参数均可由上述的气溶胶物理参数通过米(Mie)散射理论(将在第三章详细讨论)计算求得。在不同地区，粒子的数浓度有很大差别。城市地区的数浓度比极地或背景值可高 4 个量级。图 1.1 给出了气溶胶粒子浓度随高度的典型分布。如图所示，对流层内气溶胶粒子浓度一般随高度按指数减少，到对流层顶处为最小，这一特点归于重力沉降作用。在平流层中，粒子数浓度通常出现新的峰值，峰值高度约 20 km，粒子尺度集中在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 之间。这一平流层气溶胶层也称为荣格(Junge)层，比较稳定。在火山喷发后，大量的火山灰粒子和可以转化为气溶胶粒子的气体随强烈的上升气流进入平流层，平流层粒子浓度可以增加两个数量级以上。

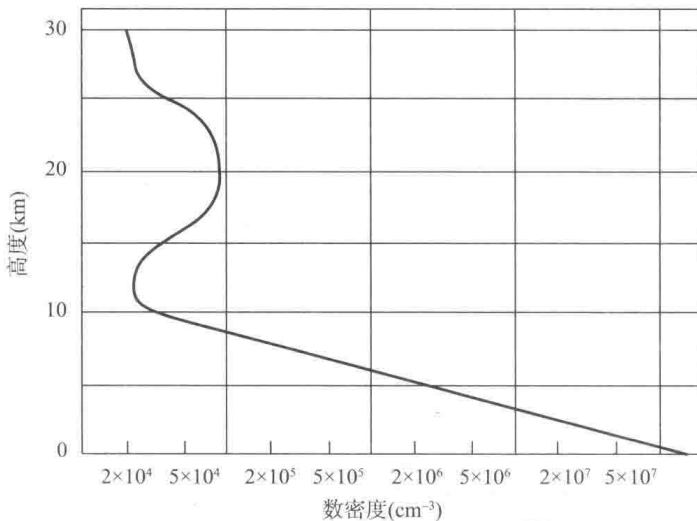


图 1.1 平均气溶胶粒子浓度随高度分布

比较典型的气溶胶粒子谱分布有荣格(Junge)分布、对数正态分布和伽马(Gamma)分布。

气溶胶的折射率是描述气溶胶粒子光学性质的一个重要物理量,它是一个复数,含实部和虚部。实部主要描述粒子的光散射特性,而虚部则主要描述粒子对辐射的吸收性质,因此,对研究气溶胶的辐射气候效应特别重要。气溶胶折射率决定于其化学组成。在红外波段,气溶胶折射率随波长的变化很大,但在可见光波段,折射率随波长的变化较小。干气溶胶的实部一般在 1.5~1.6 之间变化,虚部在 0.0001~0.1 之间变化。随着大气湿度的增加,其实部和虚部值一般变小。

大气气溶胶粒子的化学组成变化很大,主要有七类:即硫酸盐、硝酸盐、黑碳、有机碳、沙尘、海盐和铵盐。其中硫酸盐、硝酸盐、黑碳、有机碳和铵盐主要来自于人类生产和生活,且硫酸盐、硝酸盐、铵盐主要由污染气体经气-粒转化而形成。海洋性粒子则主要由氯化钠、氯化钾、硫酸铵等吸湿性物质组成。背景状态下的平流层气溶胶粒子主要是硫酸和硫酸铵等。

1.2.2 气体状态方程及虚温

实验室研究表明,任何物质的压力、体积和温度可以在广泛的条件下由状态方程联系起来,并且所有的气体都近似遵循相同的状态方程,称之为理想气体状态方程。一般来说,可以把大气中的各种气体,包括个别气体或它们的混合物,都可认为是严格服从理想气体状态方程的。

假设有 x 分子的气体 A 和 x 分子的气体 B,其气压都是 p ,那么,对于 x 分子的每一种气体有:

$$pV_A = R_A T$$

$$pV_B = R_B T$$

根据阿佛伽德罗(Avagadro)假设,即在相同的温度和压力下含有相同分子数的气体所占有的体积相同,可得到

$$V_A = V_B$$

由此可推得

$$R_A = R_B$$

因此,对于相同分子数的任何气体,常数 R 都是相同的。由于 1 摩尔(mol)的任何气体都含有相同数量的分子(阿佛伽德罗常数),因此,1 摩尔任何气体,常数 R 是相同的,称之为“普适气体常数(the universal gas constant)”,并记为 R^* ,

$$R^* = 8.3145 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

一个分子的任何气体的气体常数也是一个普适常数,称之为波尔兹曼(Boltzmann)常数 k ,并有