



大气科学 概论

徐玉貌 刘红年 徐桂玉 编著



南京大学出版社

大气科学概论

徐玉貌 刘红年 徐桂玉 编著



南京大学出版社

内 容 简 介

本书全面、系统地描述了大气科学的概貌和基础理论。全书共分八章,包括大气概述,大气辐射学,大气温度、湿度和稳定度,大气运动,云、雾和降水物理学基础,天气和天气预报,气候变化,以及大气化学。每章后面均有小结和习题,有利于复习和巩固所学内容。

本书可作为高等院校大气科学本科各专业通用的基础教材,亦可供从事气象工作的科技人员,以及环境保护、航空航天、农林水渔、地理、生物、军事等专业师生和有关科技人员参考。

书 名 大气科学概论

编 著 者 徐玉貌 刘红年 徐桂玉

责任编辑 新 平

封面设计 朱 兰

责任校对 郭 枫

出 版 者 南京大学出版社

(南京市汉口路 22 号南京大学校内 邮编 210093)

印 刷 南京人民印刷厂

经 销 全国各地新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 14.125 插页 1 字数 356 千

2000 年 2 月第 1 版 2000 年 2 月第 1 次印刷

印 数 1—1 000

定 价 22.00 元

ISBN 7-305-03496-7/P·120

声明: (1) 版权所有, 侵权必究。

(2) 本版书若有印装质量问题, 请与经销商联系调换。

发行部订购、联系电话: 3592317、3593695、3596923

前 言

本书是南京大学大气科学系本科生主干课教材。

为了适应学科发展和教学改革的需要,本书在分析国内外同类教材优缺点的基础上,尽力吸收近年来国内外有关书籍和文献中的新内容,以便能比较系统和全面地介绍大气科学的概貌,使学生掌握大气科学的基础知识和基本理论,为后行课打下较坚实的基础,并对未来的发展趋势有一定的了解。

本书共分八章,其中第二、七、八章由刘红年完成,第六章由徐桂玉完成,徐玉貌编写了其各部分,并对全书作了统稿和审校。

本书的出版得到了南京大学出版社的大力支持。在大纲和书稿的审校过程中得到了我系钱永甫、潘守文、刘长盛、黄世鸿、蒋全荣等老师的支持和帮助。本书的图稿由金仪璐绘制。在此一并深表谢意。

由于水平有限和时间仓促,书中错误和不妥之处,诚望批评指正。

作 者

1999 年 3 月于南京大学

目 录

绪 论	(1)
第一章 大气概述	(3)
§ 1.1 地球系统	(3)
§ 1.2 地球大气的成分	(5)
§ 1.3 大气的重要性	(8)
§ 1.4 空气状态方程	(10)
§ 1.5 主要气象要素	(11)
§ 1.6 大气的垂直结构	(16)
§ 1.7 气压场	(24)
小结	(27)
习题	(28)
第二章 大气辐射学	(29)
§ 2.1 辐射概述	(29)
§ 2.2 热辐射的基本定律	(33)
§ 2.3 太阳辐射及其在大气中的衰减	(35)
§ 2.4 到达地面的太阳辐射	(41)
§ 2.5 地球辐射	(46)
§ 2.6 地面辐射差额和能量平衡	(50)
§ 2.7 地气系统能量平衡	(53)
小结	(54)
习题	(54)
第三章 大气温度、湿度和稳定度	(55)
§ 3.1 大气温度	(55)
§ 3.2 水(分)循环·相变	(59)
§ 3.3 热流量方程	(65)
§ 3.4 绝热过程和绝热温度变化	(65)
§ 3.5 热力学图解	(71)
§ 3.6 大气的静力稳定度	(76)
小结	(85)
习题	(86)
第四章 大气运动	(88)
§ 4.1 大气运动方程	(88)
§ 4.2 自由大气中的平衡运动	(96)
§ 4.3 大气边界层中的风	(103)

§ 4.4	地转偏差和垂直运动	(108)
§ 4.5	环流与涡度	(111)
§ 4.6	大气环流	(116)
	小结	(119)
	习题	(120)
第五章	云、雾和降水物理学基础	(122)
§ 5.1	云的分类、形成和特征	(122)
§ 5.2	雾的形成和分类	(134)
§ 5.3	形成云雾的微观过程	(136)
§ 5.4	降水的形成过程	(139)
§ 5.5	人工影响天气	(145)
	小结	(148)
	习题	(149)
第六章	天气和天气预报	(151)
§ 6.1	天气图	(151)
§ 6.2	温带地区天气系统	(154)
§ 6.3	热带和副热带地区天气系统	(165)
§ 6.4	中小尺度对流系统	(171)
§ 6.5	天气预报	(174)
	小结	(176)
	习题	(176)
第七章	气候变化	(177)
§ 7.1	气候概述	(177)
§ 7.2	气候变化的史实	(179)
§ 7.3	引起气候变化的自然因子	(182)
§ 7.4	人类活动对气候的影响	(185)
§ 7.5	未来气候的预测	(189)
	小结	(192)
	习题	(192)
第八章	大气化学和大气污染	(193)
§ 8.1	控制大气化学成分的关键过程	(193)
§ 8.2	大气微量成分的循环过程	(198)
§ 8.3	大气臭氧	(201)
§ 8.4	云雾降水化学	(204)
§ 8.5	大气污染	(208)
	小结	(215)
	习题	(215)
	参考文献	(216)
	附录 常用物理常数	(218)

绪 论

大气科学是研究地球大气中各种现象(包括物理和化学现象以及人类活动对它的影响等)的演变规律,以及如何利用这些规律为人类服务的一门学科。

一、研究对象和任务

大气科学是地球科学的一个组成部分,它的研究对象主要是覆盖着整个地球的大气圈。大气圈,特别是地球表面的低层大气和地球的水圈、岩石圈、生物圈,是人类赖以生存的主要环境。大气中的各种现象及其变化过程,既可以造福于人类,也可以给人类带来各种灾害,影响着人类的生产、生活和安全。随着科学技术和生产的迅速发展,大气科学在国民经济和社会生活中的作用日益显著,其研究领域已大大超出通常所称的气象学的范围。大气科学的基本内容可概括成四个方面,即:

1. 地球大气的一般特征(如大气的组成、范围、结构等);
2. 大气现象发生、发展的能量来源、性质及其转化;
3. 解释大气现象,研究其发生、发展的规律;
4. 如何利用这些现象预测、控制和改造自然(如人工影响天气、大气环境预测和控制等)。

二、研究特点

1. 研究大气科学不能仅限于大气圈

地球(环境)系统是由岩石圈、水圈(含冰雪圈)、大气圈和生物圈组成的一个综合系统。大气圈中发生的各种变化都受其他三圈的影响,同时,大气圈也影响着其它圈层的变化。因此研究大气的组成、结构,大气运动的能量来源和转换,大气中的物质循环和变化过程,大气环境以及天气、气候的分布和变化,都必须考虑大气圈与其它三圈之间的相互影响和相互作用。

2. 大自然是大气科学研究的实验基地

大气圈是地球系统的主体部分,是四圈中范围最大、与人类关系最密切的圈层,发生在这圈的现象也最为繁多,而其变化又极其迅速。影响这些大气现象的因素非常复杂,至今还很难在实验室内用人工控制的方法对它进行完整的实验和研究。因此,大气科学必须以大自然为实验室,组织从局地到全球的气象观测网,运用多种观测设备和仪器对大气现象进行长期、连续的观测,以获取资料;通过对大量资料的分析 and 研究(包括统计分析、理论研究和数值模拟等)导出新的结论;再以新的观测资料对模拟进行验证,遵循观测(实践)—理论—观测(实践)的基本法则不断地发展。

3. 国际合作是推动大气科学发展的必要途径

地球大气作为一个整体在不停地运动着和变化着,为掌握范围广、变化快、形式多样的大气运动特征,必须在全球对大气进行连续的、高频率的观测,对站网布局、观测项目、资料处理、信息传输等方面做统一规划,并将观测资料迅速集中到世界气象中心和各国的气象中心,这只能通过密切的国际合作才能实现。

三、学科分支

传统的“气象学”分支学科主要为气象学和气候学,1960'S 以来随着“气象学”研究内容的迅速扩展,人们广泛采用“大气科学”这个术语,它的分支学科主要有:大气探测、天气学、动力气象学、气候学、大气物理学、大气化学、人工影响天气、应用气象学等。

大气探测是研究探测地球大气中各种现象的方法和手段的学科。按探测范围和探测手段划分,又分为地面气象观测、高空气象观测、大气遥感、气象雷达、气象卫星等低一级的分支。

天气学是研究大气中各种天气现象发生、发展规律以及如何应用这些规律来制作天气预报的学科。研究内容主要包括天气现象、天气系统、天气分析和预报等。

动力气象是应用物理学和流体力学定律及数学方法,研究大气运动的动力和热力过程及其相互关系的学科,是大气科学的理论基础。

气候学是研究气候的特征、形成和演变以及气候与人类活动相互关系的学科。研究内容主要包括气候特征、气候分类、气候区划、气候成因、气候变化、气候与人类活动的关系、气候预报和应用气候等。

大气物理学是研究大气的物理现象、物理过程及其演变规律的学科。研究内容主要包括云和降水物理学、大气光学、大气电学、大气声学、大气辐射学、大气边界层物理学和高层大气物理学等。

大气化学是研究大气组成和大气化学过程的学科。研究内容主要包括大气的化学组成及演变、大气微量气体及其循环、大气气溶胶、大气放射性物质和降水化学等。

人工影响天气是研究如何通过影响云和降水的微物理过程来使某些大气现象、大气过程发生改变的技术和方法。如人工降水、人工防雹、人工消雾、抑制雷电等。

应用气象学是将气象方面的有关原理、方法和成果应用于生物、农业、森林、水文、建筑、航海、航空、军事、医疗、空气污染等方面,同各个专业学科相结合而形成的边缘性学科。

第一章 大气概述

包围着地球的气体外壳称为地球大气,也称为地球大气圈。现在的地球大气已经历了原始大气,次生大气和现代大气三个演化阶段。最早的原始大气形成于46亿年以前,比出现人类的时间约早两个量级。在漫长的演化过程中,大气的成分和结构已发生了很大的变化。地球大气是人类和生物赖以生存的自然环境,在大气中发生的各种物理、化学现象和过程都与人类的生存和发展有着密切的关系。为了研究发生在大气中的各种现象和过程,必须首先对大气的概况有一个基本了解。

§ 1.1 地球系统

按照传统的观点,将地球分为三个主要部分:岩石圈、水圈和大气圈,而且,大气与岩石、岩石与水、水与大气之间不断地相互作用着。由于地球生物的生存空间(即生物圈)延伸到这三个物理空间的每个部分,是地球系统不可分割的一个部分,因此由岩石圈、水圈、大气圈和生物圈共同构成一个综合体,称之为“地球系统”。随着社会和科学的发展,生物圈对岩石圈、水圈和大气圈的影响和相互作用越来越被人们所认识和重视。当人类面临一系列重大而紧迫的全球性环境变化问题的挑战时,在地球科学各学科发展的基础上,已于80年代初期诞生了一个新兴科学——地球系统科学。

一、岩石圈

46亿年前原始地球形成后,在地球的重力分异和化学分异等作用下,经过漫长的演化,从均匀混合的物质状态逐渐分化为地核、地幔和地壳等地球的内部圈层结构(图1.1)。地球内部圈层构造之间的分界面,主要依据地震波传播速度的急剧变化推测确定。各层的化学成分和物理性质都有显著区别,压力和密度随深度增加而增大。物质的放射性上部较大,深部极低。地热增温率在地壳上部较大,愈向深处愈小,接近地心几乎不变。

地核为地球的核心部分,分为内核和外核以及中间的过渡层。地核的密度、压力和温度最高,分别为 $9.7\sim 13\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $1.5\text{万}\sim 3.7\text{万}$ 大气压力和 $2860\sim 6000\text{℃}$;质量为地球总质量的31.5%;体积为整个地球的16%。地幔分为下地幔、上地幔和软流圈,地幔的体积占地球体积的83%;质量占地球质量的68.1%;密度、压力和温度介于地核和地壳之间。地壳是地球的表层部分,由各种岩石组成。该层的厚度各地不等,山区厚,平原薄,海洋区更薄,平均为33公里;而密度、压力和温度在各层中为最小,分别为 $2.6\sim$

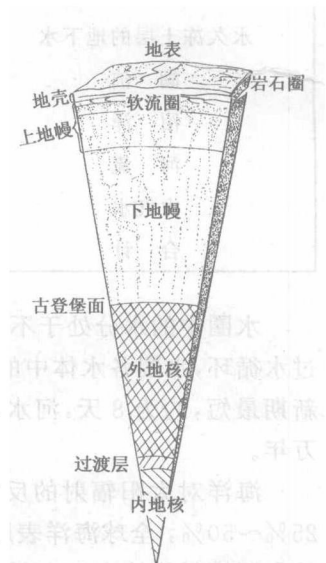


图 1.1 地球构造示意图

3. $0\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $1 \sim 30$ 大气压和 $14 \sim 300^\circ\text{C}$ 。

岩石圈是指地壳和上地幔顶部的坚硬岩石组织的地球外壳,其厚度从不足 50km 到 125km 以上,平均约为 75km。岩石圈之下为软流圈,软流圈处于接近岩石熔点温度(约 1400°C)下的软弱状态中,坚硬的岩石圈有可能在软而可塑的软流圈上产生整体移动(滑动)。由于岩石圈的厚度差异很大,陆地部分厚,海洋部分薄。薄弱岩石圈很容易产生破裂,而厚的岩石圈则趋于结合到一起,从而形成一些岩石圈板块及其运动。

岩石圈为人们提供石油、天然气、煤炭、铀矿等能源,各种金属和非金属矿藏以及地下水资源;另一方面也常给人类带来自然灾害,如地震、火山爆发、山崩、地滑(滑坡、泥石流等)、流水对地面的侵蚀、沙漠化、地面沉降等自然灾害。

岩石会受大气、水和生物等因素影响而产生机械的和化学的风化作用,使岩石破碎和形成土壤,化学成分和矿物成分发生改变。其中气候和地形条件是影响岩石风化的重要因子。岩石圈受大气过程的影响会形成覆盖层(雨水和冰雪)。

二、水圈

水圈是由海洋、河流(运河)、湖泊(水库)、沼泽、冰川、积雪、地下水和大气圈中的水等组成的地球表层水体的总称。各种水体的覆盖面积、体积及占水圈总水量的体积百分比数如表 1.1 所示。水圈中水的总体积约为 13.86 亿 km^3 ,其中海洋是水圈最重要的部分,其体积占总水圈的 96.5% 。而全球生物圈中的水仅占全球总水量的 0.0001% ,一般不作为水圈的组成部分。

表 1.1 水圈的构成

水 体	面积(km^2)	体积(km^3)	占水圈总量的体积比(%)
海 洋	361300000	1338000000	96.5
地下水	134800000	23400000	1.7
土壤水	82000000	16500	0.001
冰川和永久积雪	16227500	24064100	1.74
永久冻土层的地下水	21000000	300000	0.022
湖 泊	2058700	176400	0.013
沼 泽	2682600	11470	0.0008
河 流	148800000	2120	0.0002
大气水	510000000	12900	0.001
合 计	310000000	1385983490	100

水圈中的水分处于不停的运动状态,从海洋到空气、到陆地,再归于海洋,形成水循环。通过水循环,水圈各水体中的水互相交换,不断更新。各个水体的更新期相差很大,大气圈水的更新期最短,约为 8 天,河水约为 16 天,土壤水约为 1 年,高山冰川为 1600 年,极地冰川长达 1 万年。

海洋对太阳辐射的反射率比陆面小,因此,海洋单位面积所吸收的太阳辐射能比陆地多 $25\% \sim 50\%$,全球海洋表层的年平均温度要比全球陆面温度约高 10°C 左右。据估计,到达地表的太阳辐射能约为 80% 被海洋表面吸收,通过海水内部的运动,热量向下传输混合。若仅考虑 100m 深的表层海水,其总热量就占整个地球四圈系统总热量的 95.6% ,可见其在地球系统中

的重要性。而四圈中,大气与海洋之间的关系尤为密切,通过海—气相互作用来影响大气环流、水循环和气候变化。

三、生物圈

生物圈是地球表层有生命活动的圈层,包括植物、动物和人类,并包括有生物存在的部分岩石圈、水圈和大气圈。生物只在一定的物理环境(大气、水、土壤、阳光、温度等)下才能生存;另一方面生物也起着保护和改变地球环境的作用。生物对于大气和海洋的二氧化碳平衡,气溶胶粒子的产生,以及其它气体成分和盐类有关的化学平衡等有很重要的作用。植物可以随着温度、辐射和降水的变化而发生变化,反过来又影响地面粗糙度和反射率以及蒸发、蒸腾和地下水循环。动物群体变化会影响植物生态和气候变化。人类活动既受大气、水、生物环境的影响,又通过工农业生产和城市建设不断改变土壤、水的利用状况,从而对大气、水和生态环境产生影响,并对气候变化产生影响。

四、大气圈

包围在地球表面(包括岩石圈、水圈和生物圈)、厚度约 1000 公里的大气层称为大气圈。它不仅提供了我们呼吸的空气,而且阻挡了太阳到达地面的热量和有害辐射。大气与地表及其与宇宙空间的能量交换形成了多姿多态的天气与气候。如果地球与月球一样没有大气,不但生命不再存在,而且使地球显得如此生机勃勃的各种相互作用及其过程也将不再出现,没有天气及其对地表的侵蚀和冲刷作用,地球的表面将与 30 亿年中保持不变的月球相似。

本书的中心是大气圈,在本章的第二和第五节,将介绍大气的成分和垂直分层。

§ 1.2 地球大气的成分

地球大气与太阳系中其它星球的大气很不相同,几乎没有一个天体能像地球一样有适合于生命生存的环境。地球大气现在的组成是由 46 亿年前地球形成后逐渐变化而来的。在亚里士多德(Aristotle, 公元前 384 年~322 年,古希腊哲学家、科学家和生物学家创始人)时代,空气被当作风、火、土、水四种基本物质之一,即风。至今,有时人们仍将“空气”一词看作一种特定气体,事实上大气是由具有不同物理性质的各种气体以及悬浮其中的不等量固态和液态小颗粒组成的。

一、干洁大气

气象上通常称不含水汽和悬浮颗粒物的大气为干洁大气,简称干空气,其组成见表 1.2。在 80~90km 以下,干空气成分(除臭氧和一些污染气体外)的比例基本不变,可视为单一成分,其平均分子量为 28.966。组成干洁空气的所有成分在大气中均呈气体状态,不会发生相变。

讨论大气组成时,人们经常将所有成分按其浓度分为三类:

1. 主要成分,其浓度在百分之一以上,它们是氮(N_2)、氧(O_2)和氩(Ar);
2. 微量成分,其浓度在 1ppm~1%之间,包括二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氦(He)、氖(Ne)、氪(Kr)等干空气成分以及水汽;
3. 痕量成分,其浓度在 1ppm 以下,主要有氢(H_2)、臭氧(O_3)、氙(Xe)、一氧化二氮(N_2O)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO_2)、氨气(NH_3)、二氧化硫(SO_2)、一氧化碳(CO)等。此外,还有一些人为产生的污染气体,它们的浓度多为 ppt 量级。

表 1.2 干洁大气成分

气体成分	分子量	体 积 混 合 比	
		%	ppm(ppb)*
氮(N ₂)	28.0134	78.084	
氧(O ₂)	31.9988	20.946	
氩(Ar)	39.948	0.934	
二氧化碳(CO ₂)	44.0099	0.033	
氖(Ne)	20.183	18.2×10^{-6}	18.2
氦(He)	4.003	5.2×10^{-6}	5.2
氪(Kr)	83.80	1.1×10^{-6}	1.1
氙(Xe)	131.30	0.1×10^{-6}	0.1
氢(H ₂)	2.016	0.5×10^{-6}	0.5
甲烷(CH ₄)	16.04	$1.2 \sim 1.7 \times 10^{-6}$	1.2~1.7
一氧化二氮(N ₂ O)	44.01	0.3×10^{-6}	0.3
一氧化碳(CO)	28.01	0.1×10^{-6}	0.1
臭氧(O ₃)	47.998	$10 \sim 50 \times 10^{-9}$	(10~50)
二氧化氮(NO ₂)	46.00	$1 \sim 4.5 \times 10^{-9}$	(1~4.5)
二氧化硫(SO ₂)	64.06	$0.03 \sim 30 \times 10^{-9}$	(0.03~30)
硫化氢(H ₂ S)	34.07	$0.006 \sim 0.6 \times 10^{-9}$	(0.006~0.6)
氨(NH ₃)	17.03	$0.1 \sim 10 \times 10^{-9}$	(0.1~10)

* 以往的书籍中常用 ppm、ppb 和 ppt 等表示(某种大气成分)浓度的体积混合比,1ppm 等于一百万分之一,即 10^{-6} 。有时也可以用 ppmv 表示体积混合比,以便与质量混合比 ppmm 相区别。比 ppm 小 10^{-3} 的用 ppb 表示,一个 ppb 等于十亿分之一,即 10^{-9} ;比 ppb 小 10^{-3} 的用 ppt 表示,一个 ppt 等于一万亿分之一,即 10^{-12} 。

众所周知,氧是一切生命(人类、动物和植物)所不可缺少的,他(它)们都要进行呼吸或在氧化作用中得到热能以维持生命。氧还在有机物的燃烧、腐化及分解过程中起着重要作用;另一方面植物又通过光合作用向大气放出氧并吸收二氧化碳。

大气中的氮对氧起着冲淡作用,使氧不致太浓、氧化作用不过于激烈;对植物而言,大量的氮可以通过豆科植物的根瘤菌固定到土壤中(称为固氮),成为植物体内不可缺少的养料。

氮和氧显然是大气的主要成分,但是它们对天气现象却影响很少,而二氧化碳、臭氧、甲烷、氮氧化物(N₂O、NO₂)和硫化物(SO₂、H₂S)等的含量虽很少,却是重要的气体成分,它们的含量、分布及其变化对气候及人类生活产生较大的影响。其中二氧化碳和臭氧最为人们所关注。

(1) 二氧化碳(CO₂) 它对太阳辐射的吸收很少,但能强烈地吸收地面的长波(红外)辐射,同时又向地面和周围大气放射长波辐射,从而使地面和空气不致因放射长波辐射而失热过多。换句话说,二氧化碳起着使地面和空气增温的效应(温室效应或花房效应),因此称它为温室气体。虽然二氧化碳在大气中的含量相对稳定,但是它的含量在最近一个多世纪里都在不断升高,这归因于化石燃料(如煤炭、石油、天然气等)燃烧量的不断加大。增加的二氧化碳大约一半被海洋吸收或被植物利用,一半则滞留在大气中。人们预计,到下世纪后半期,二氧化碳的含

量将达到本世纪早期的两倍。尽管这种升高的后果很难确知,但绝大多数科学家相信,低层大气的温度会由此而升高,从而引起全球气候的变化(详见第七章)。

(2) 臭氧(O_3) 臭氧的分子由三个氧原子组成,不同于人类呼吸所需的两个原子组成的氧气。大气中臭氧含量极少,体积含量为 $10^{-7}\sim 10^{-8}$,如果将所有的臭氧都置于地表,只能形成一层厚度为 $4\mu m$ 的气层。臭氧随高度的分布是不均匀的,在 $10km$ 以下含量只有 10^{-8} , $10km$ 以上开始增加,在 $25km$ 处最大,达 10^{-5} 量级,再往上又逐渐减少,至 $50km$ 则含量极小,因此,通常称 $10\sim 50km$ 这一层为臭氧层。臭氧层的形成与大气中的氧对太阳辐射的吸收休戚相关。氧分子吸收太阳的短波辐射(紫外辐射)后被分解为两个氧原子,氧原子再与一个未分解的中性氧分子结合而成为一个臭氧分子。

大气中各层的臭氧浓度随时间而变化,这与地理纬度、季节以及天气形势有关,火山活动与太阳活动对它也有影响。南极地区春季的变化幅度最大,这时臭氧含量急剧减少,而会形成“臭氧洞”现象(详见第八章)。

臭氧对地球大气及地球生命非常重要。臭氧能大量吸收太阳紫外线,而使臭氧层增暖,影响大气温度的垂直分布,从而对大气环流和气候产生重要影响;另一方面,由于太阳的紫外辐射在高空被臭氧挡住,地面上的生物就能免受紫外线的伤害。根据研究,如果臭氧减少 1% ,将会使到达地面的紫外辐射增强 1% ,因紫外辐射而诱发的皮肤癌病人将增加 $2\%\sim 5\%$ 。

臭氧问题自70年代以来越来越引起人们的关注。近年来,人们才认识到臭氧层的臭氧含量受那些浓度只有臭氧浓度几千分之一的痕量气体的控制,而人类活动正在改变这些气体的浓度,使臭氧日益减少。对臭氧影响最大的是氟氯甲烷类化合物(Chloro-fluorocarbon,简称CFC,也称卤代烃,俗称氟里昂),它作为空调、冰箱等设备中的致冷剂,喷雾剂生产中的催化剂,塑胶制品生产中的泡沫发生剂。这些气体被携带至臭氧层后,在紫外线作用下,经一系列的光化反应,使臭氧破坏消失。

二、水汽

大气中的水汽来自江、河、湖、海及潮湿物体表面的水分蒸发和植物的蒸腾。空气的垂直运动使水汽向上输送,同时又可能使水汽发生凝结而转换成水滴,因此,大气中的水汽含量一般随高度的增加而明显减少。观测证明,在 $1.5\sim 2km$ 高度上,水汽含量已减少为地面的一半;至 $5km$ 高度处,只有地面的 $1/10$;再向上含量就更少了。显然,大气中的水汽含量还与地理纬度、海岸分布、地势高低、季节以及天气条件等密切相关。在温暖潮湿的热带地区、低纬暖水洋面上,低空水汽含量最大,其体积混合比可达 4% ,而干燥的沙漠地带和极地,水汽含量极少,仅为 $0.1\%\sim 0.002\%$ 。在同一地区,一般夏季的水汽含量多于冬季。

大气中的水汽在天气变化和地球系统的水循环中起着重要角色。水汽是云和降水的源泉。水汽是唯一能在常态中以三种相态存在的物质(固态、液态、气态)。随着大气的垂直运动,空气中的水汽会发生凝结或凝华,形成水滴或冰晶,进而产生云和降水(雨、雪、冰雹等)。当水从一种相态转变为另一种相态时,它会吸收或释放出一定的热量(潜热);水汽又能强烈地吸收和放出长波辐射。因此,它直接影响地面和空气的温度,从而也影响大气的垂直运动。通过水的相态变化,海洋、河流、江湖以及潮湿土壤等的蒸发向大气输送水汽,大气中的水汽通过凝结或凝华形成降水,又回到海洋、河流、土壤,使不同部分的水不断发生更替,形成水循环,将地球的四圈紧密地联系在一起。

三、大气颗粒物

大气颗粒物是悬浮在大气中的各种固体和液体微粒,统称为大气气溶胶粒子。它们在空气中停留的时间各不相同,极小的粒子可以滞留在空气中相当长时间,而那些比较重的颗粒能降落到地面。气溶胶粒子的来源很广,有自然的,也有人造的。自然源包括海浪破裂产生的海盐细粒,花粉及被风吹起的有机物质,火山喷射的灰尘。这些颗粒在它们的发源地(地球表面)尤其密集,随着上升气流它们也被带到高层大气,另外,一些流星体在穿过大气层时也会释放一些固体质粒到高层大气中。随着人口增加和工业、交通运输的发展,大气中的烟粒、煤粒尘大量增加。

在气象上,这些气溶胶粒子对云雾、降水、辐射传输、大气能见度,大气光学以及大气污染等有很大影响。它们可以作为大气中水汽凝结或冻结的核心,是形成云、雾和降水的重要条件;它们能吸收和散射太阳、大气和地面的辐射,改变地球的辐射平衡;它们使大气能见度和空气质量变坏;它们能造成我们熟知的诸多的大气光学现象,如日出、日落时太阳呈瑰丽的桔色与红色,当大气中存在大量较大的气溶胶粒子时,天空变成乳白色等。

§ 1.3 大气的重要性

一、大气与生存环境

1. 大气是人类赖以生存的最重要的资源

人们生活在空气里,洁净的空气对生命来说,比任何东西都重要。人需要呼吸新鲜、洁净的空气来维持生命,一个成年人每天呼吸大约有两万次,吸入的空气量约 $10\sim 15\text{m}^3$,大约是每天所需食物重量的 10 倍。生命的新陈代谢一时一刻也离不开空气,一般而言,人若 5 周不吃饭,5 天不饮水,尚能生存,然而,5 分钟不呼吸就会死亡。一切有生命的生物同样离不开大气。因此,可以说没有大气就没有生命。

2. 大气污染对地球环境的影响

地球大气既是人类赖以生存的氧的来源,又是人类活动过程中排放各种废气的稀释场所。然而,大气并非无限,大气质量的四分之三集中在距地球表面十几公里(对流层)的范围内,离地面越高,大气就越稀薄。当由于人为和自然因素改变了大气的组成(90km 以下),致使人类和生态系统出现不良反应,破坏了系统的平衡和协调,就称为大气污染。造成这种反应的物质称为污染物。随着人口的增长和国民经济的发展,排入大气中的污染物迅速增加(尤其是发展中国家),大气污染成为严重的环境问题。当前人类面临的由大气污染引起的全球性环境问题中最为突出的有四个方面。

(1) 温室效应与全球气候变暖 大气中二氧化碳、甲烷、一氧化二氮等温室气体的增加,将导致对流层(地面至十几公里高度的大气层)大气温度的升高,以二氧化碳最为突出。19 世纪中叶,二氧化碳含量为 290ppm,1985 年增加到 340ppm,1990 年增至 345ppm,90 年代以后,增长速度更大,估计到 2030 年将达到 570ppm。由于二氧化碳的增加,使近 100 年来世界平均气温升高了 0.6°C 。根据研究,若大气中二氧化碳含量由 300ppm 增加到 600ppm(即增加一倍),则全球地表平均气温会升高 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。而气候变暖将会对粮食生产、水资源、能源生产、运输、生态系统,以及社会产生影响。还会因南极冰层部分溶解而引起海平面上升。

(2) 臭氧层的破坏 臭氧层对人类来说至关重要,因为它能屏蔽有害的太阳紫外辐射。

由人类活动造成的高层大气臭氧减少将给人类带来严重威胁。近 20 年来的观察研究表明,臭氧的减少是全球性的,其中南极平流层(十几 km 至 55km 的大气层称为平流层,详见 § 1.6 节)尤为明显。1985 年发现南极上空出现臭氧层空洞,至 1997 年发展到了极点,已被云雨 7 号卫星所证实。国际臭氧趋势观察小组提供的 1978 年~1987 年高空飞行观察数据揭示,南纬 39°~60°臭氧减少 5%~10%,南纬 19°~北纬 19°减少 1.6%~2.1%,北纬 40°~64°减少 1.2%~1.4%,我国境内华南地区减少 3.1%,华东、华北地区减少 1.7%,东北地区减少 3.0%。

(3) 酸雨 酸雨是指呈酸性的降水(严格应称为酸沉降)。通常把 pH 值($\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$)低于 5.6 的降水称为酸雨,因为溶液呈中性时 $\text{pH} = 7$,而天然条件下的自然降水呈弱酸性,其 pH 值等于 5.6。pH 值降低 1,相当于酸度增加 10 倍。北美、加拿大、西欧和北欧酸雨的 pH 年平均值已达 4.0~4.5,我国长江以南酸雨已很普遍,南方酸雨已相当严重,以西南地区最为严重,pH 值最低达 3.32。

酸雨是区域尺度的环境问题,它是大气污染物(主要是二氧化硫和氮氧化物)在远距离输送过程中经过化学转化和清除过程而形成(详见第八章)。

从本世纪 60 年代开始,人们才认识到酸雨对环境的威胁,1977 年联合国会议承认酸雨是属于全球性的污染问题,并出现了国际酸雨纠纷。1979 年,在日内瓦东西方 34 个国家签定 3 项控制远距离“越界”空气污染公约,1982 年 6 月在瑞典斯德哥尔摩召开了有 33 国代表参加的酸雨问题国际会议。

酸雨能通过土壤和河流、湖泊的酸化,使生态系统受害(土壤贫瘠化、鱼类死亡等);还能腐蚀建筑材料、金属结构和油漆等;酸雨中的汞和镉等重金属通过水体和土壤进入动物和植物体内,然后再随着食物进入人体,对人类健康构成严重威胁。

(4) 城市空气污染 随着工业和交通事业的发展,工厂和汽车排放的有害气体越来越多,城市空气污染问题越来越引起人们的重视。对城市居民来说,城市空气质量影响着人们的健康。人们将城市大气比作一个巨大的化学反应堆,它制造出许多有害于人类的物质。城市空气污染的类型,除上面所述的酸雨以外,最普遍和最重要的是煤烟型和氧化型(石油型)烟雾污染。世界各大城市出现的污染事件很多,其中以伦敦煤烟型烟雾和洛杉矶光化学烟雾(氧化型)最为著名。

发生在 1952 年 12 月 5 日~8 日的伦敦烟雾事件,是在一定的天气条件下,由二氧化硫、雾和粉尘相互迭加而成。在连续 4 天内浓雾不散,黑云压城,烟尘浓度最高达 $4.46\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$,为平时的 10 倍;二氧化硫浓度最高达 1.34ppm,为平时的 6 倍。4 天中死亡 4 千人,事件发生的一周中,因支气管炎死亡的有 704 人,甚至在事件过后两个月内,还陆续有 8 千人死亡。光化学烟雾是由汽车、工厂等污染源排入大气的碳氢化合物(HC)和氮氧化物(NO_x)等一次污染物,在阳光作用下发生光化学反应,生成臭氧、醛、酮、酸、过氧乙酰硝酸脂(PAN)等二次污染物,参与光化学反应过程的一次污染物和二次污染物的混合物所形成的烟雾污染现象。自美国洛杉矶市 1943 年第一次发生光化学烟雾以来,又接连不断地发生比较严重的光化学烟雾事件,而且在美国其它城市和世界各地相继出现,成为世界性城市大气污染的新问题。

1974 年以来,我国兰州西固地区也常出现光化学烟雾,产生“雾茫茫,眼难睁,人不伤心泪长流”的情景。西固地区光化学烟雾的起因与洛杉矶等城市的光化学烟雾有所不同,洛杉矶是由汽车尾气造成,而兰州西固地区是由石油化工区的工厂废气排放所致。

二、天气与气候

地球与太阳两者的运动以及能量的相互作用,使围绕地球的大气产生变化多端的天气,从而形成各种气候类型。天气与气候是两个不同的概念,但也有不少共同之处。天气在不停的变化之中,一个小时与另一个小时,一天与另一天的天气是不同的。天气描述的是一个特定时间与一个特定地点的大气状态和大气现象。虽然天气在不停的变化之中,有时甚至变化莫测,但可以将其归纳为一个普遍状态,这就是气候。因此,气候是指在影响天气的各因子(太阳辐射、下垫面性质、大气环流和人类活动等)长期相互作用下所产生的天气综合,不仅包括某些多年经常发生的天气状况,还包括某些年份偶然出现的极端状况。也就是说,气候是在一定时段内由大量天气过程综合平均得出的,它与天气之间存在着统计联系。

人人都关心天气、谈论天气,近几年来,气候变暖和厄尔尼诺现象又成为人们的热门话题。因为天气和气候对人们是那么的重要,它既可带来阳光、温暖和雨露,造福人类;也可造成严寒酷暑,以至旱涝风雹等灾害,直接影响人类的生产和安全;气候变化还影响着人们的未来。

自然灾害从来就是人类的大敌。我国的自然灾害主要有干旱、洪涝、冰雹、低温冻害、林火、地震、山崩滑坡、泥石流、风沙害、病虫害以及人类活动诱发的自然灾害等。其中干旱、洪涝等气候灾害所造成的经济损失占首位。1949年~1988年间我国平均每年旱灾受灾面积达4~5亿亩,损失粮食200~250亿kg,受害人数达200万~300万,因旱灾造成的直接经济损失达150~200亿元。1950年~1980年我国平均每年受洪涝灾害的耕田面积达1.5亿亩,粮食损失达100亿kg,受灾人口以百万计,直接经济损失与旱灾相当。如1954年长江流域因持续暴雨而产生特大洪涝灾害,淹没农田4755万亩,1800多万人受灾,3万人死亡,直接经济损失达200多亿元。此外,我国是世界上少有的冰雹灾害严重的国家。每年有几千万亩农田受灾,直接经济损失达20余亿元。

§ 1.4 空气状态方程

由分子物理学知道,在理想气体条件下,表征气体状态的四个宏观量,即气压 p 、体积 V 、温度 T 和质量 m 之间存在一定的关系——满足状态方程。在大气的常温、常压范围内,空气可以看作理想气体,因而我们可以利用理想气体的状态方程,来推导出气象上常用的干空气和湿空气状态方程。

一、干空气状态方程

对于质量为 m ,摩尔质量为 M 的单一成分理想气体而言,其状态方程为

$$pV = \frac{m}{M} R^* T \quad (1.1)$$

式中 R^* 为普适气体常数,其值为 8.314 焦耳·摩尔 $^{-1}$ ·度 $^{-1}$ (即 $8.314\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。

(1.1)式可改写为

$$p = \rho RT \quad (1.2)$$

式中 $R = \frac{R^*}{M}$ 称为比气体常数,其值与气体成分有关, $\rho = \frac{m}{V}$ 是气体的密度。

干空气可认为是由许多理想气体组成的混合气体,对于每一种气体,都满足状态方程。因此,利用分压定律可以导出由 n 种成分组成的干空气的状态方程为

$$p_d V = \frac{m}{M_d} R^* T = m R_d T \quad (1.3)$$

式中 $M_d = 28.96 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ 是干空气的平均摩尔质量, $R_d = \frac{R^*}{M_d} = 287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 是干空气的比气体常数。(1.3)式也可写成

$$p_d = \rho_d R_d T \quad (1.4)$$

这是气象上常用的干空气状态方程。式中 $\rho_d = \frac{m}{V}$ 为干空气密度, 在标准气压(1013.25hPa)和温度(273K)下 $\rho_d = 1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

二、湿空气状态方程

实际大气总是含有水汽的。而且,一般情况下,愈接近地面,水汽含量愈多。通常将含有水汽的空气称为湿空气。因此,湿空气是干空气和水汽的混合物。

设湿空气(团)的气压为 p , 温度为 T , 体积为 V , 质量为 m 。其中干空气的分压力为 p_d 、密度为 ρ_d 、质量为 m_d ; 水汽的分压力为 e 、密度为 ρ_v , 则湿空气的密度为

$$\rho = \frac{m_d + m_v}{V} = \rho_d + \rho_v \quad (1.5)$$

利用干空气状态方程(1.4)和水汽状态方程 $e = \rho_v R_v T$, 可将上式写成

$$\rho = \frac{p - e}{R_d T} + \frac{e}{R_v T} \quad (1.6)$$

式中 $R_v = \frac{R^*}{M_v} = \frac{R^*}{18.016} = 461 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为水汽的比气体常数, 将 $R_v = \frac{M_d}{M_v} R_d = 1.608 R_d$ 代入(1.6)式可得

$$\rho = \frac{1.608(p - e) + e}{1.608 R_d T} = \frac{p}{R_d T} \left(1 - 0.378 \frac{e}{p} \right)$$

于是 $p = \rho R_d T \left(1 - 0.378 \frac{e}{p} \right)^{-1} \quad (1.7)$

因为 $e \ll p$, 将(1.7)式展开, 并略去二阶小项, 则得气象上常用的湿空气状态方程

$$p = \rho R_d T \left(1 + 0.378 \frac{e}{p} \right) = \rho R_d T_v \quad (1.8)$$

式中 $T_v = T \left(1 + 0.378 \frac{e}{p} \right) \quad (1.9)$

T_v 称为虚温。虚温反映了湿空气中的水汽效应, 它并非实际的气温, T_v 总比实际气温 T 要高。

比较(1.8)和(1.4)式可见, 湿空气状态方程与干空气状态方程在形式上完全相似, 不同的是以 T_v 替代 T 。由(1.8)、(1.9)和(1.4)式可以看到, 在气压和温度相同的情况下, 湿空气密度 ρ 比干空气密度 ρ_d 要小, 而且空气越潮湿(e 越大), 其密度 ρ 越小。

§ 1.5 主要气象要素

大气性状及其现象(天气和气候)是用基本要素——气温、气压、湿度、风、云况(云状和云量)、能见度、降水情况(降水类型和降水量)、辐射、日照以及各种天气现象等来描述的, 这些因子称为气象要素。气象要素随时间和空间而变化, 其观测记录是天气预报、气候分析以及同大气科学有关的科学研究的基础资料。本节仅介绍最常用的温、压、湿、风四个主要气象