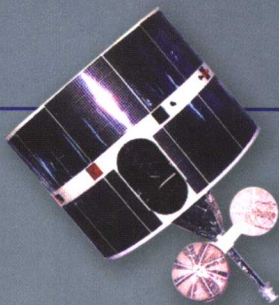




◆ 现代大气科学丛书 ◆



大气物理与大气探测学

邱金桓 陈洪滨 编著

气象出版社

现代大气科学丛书

大气物理与大气探测学

邱金桓 陈洪滨 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书分八章:第一章介绍大气物理学和大气探测学发展历史及其研究对象——大气圈的基本特性;第二至第七章分别论述大气边界层与大气湍流、云(雾)和降水物理、大气声光电现象、大气辐射、大气遥感和气象要素的常规探测与仪器六大学科分支的基础知识、20世纪主要的研究成果(特别是最新研究成果)以及前沿的科学问题;最后一章对大气物理学和大气探测学的未来发展方向和若干重大的前沿研究课题作些预测。

本书适合于相当大学文化程度的读者使用,对攻读大气科学的大学生与研究生以及从事大气科学与相关学科的科技工作者有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

大气物理与大气探测学/邱金桓 陈洪滨编著.

—北京:气象出版社,2005.10

ISBN 7-5029-4015-4

I. 大… II. 邱… III. ①大气物理学②大气探测 IV. ①P401②P412.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第109531号

Daqi Wuli yu Daqi Tancexue

大气物理与大气探测学

邱金桓 陈洪滨 编著

气象出版社出版

(北京海淀区中关村南大街46号 邮编:100081)

总编室:010-68407112 发行部:010-62175925

网址:<http://cmp.cma.gov.cn> E-mail: qxcbps@263.net

责任编辑:李太宇 章澄昌 终审:周诗健

封面设计:张建永

*

北京市北中印刷厂

气象出版社发行

*

开本:787×1092 1/16 印张:12.00 字数:307千字

2005年10月第一版 2006年1月第二次印刷

印数:1001~4000 定价:33.00元

ISBN 7-5029-4015-4/P·1439

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社
发行部联系调换

《现代大气科学丛书》 编辑委员会

主 编 黄荣辉
副主编 李崇银 王绍武 黄美元
编 委 (以姓氏笔画为序)
王明星 刘式适 孙淑清
朱瑞兆 邱金桓 陈洪滨
郑循华 徐华英 高守亭
编 辑 耿淑兰

作者简介

邱金桓, 1943年11月出生, 福建仙游县人。中国科学院大气物理研究所研究员, 博士生导师。大气物理研究所学术委员会委员与学位委员会委员。《大气科学》副主编和《大气科学进展》(英文版)编委。1968年毕业于北京大学地球物理系。1982年获中国科学院硕士学位。2000年3月在日本获博士学位。1982年硕士研究生毕业后工作于中国科学院大气物理研究所。1988年8月至1990年7月, 由德国Max-Planck协会赞助应邀去慕尼黑大学从事激光大气遥感研究。主要从事大气遥感和大气辐射传输研究, 作为第一受奖人获得国家科技进步三等奖一项、民航局科学技术进步一等奖一项、中国科学院科技进步二等奖两项。在国内外学术刊物和国际学术会议上发表论文110多篇。1998年被中华人民共和国人事部授予国家级有突出贡献的中青年专家。

陈洪滨, 1960年4月生, 江苏丹徒人。1982年1月毕业于南京气象学院大气物理系, 1982年2月至1984年8月在成都气象学院大气探测系任助教, 1985年6月至1991年1月被国家教委公派去法国留学, 分别在Clermond Ferrant II大学和Lille科技一大获深入学习(DEA)和博士学位(Ph. D), 1991年1月至1993年6月在Lille科技一大大气光学实验室(LOA)任客座研究员。1993年7月回国, 一直在中国科学院大气物理研究所从事主被动微波大气遥感、地基平流层微量成分光学遥感及大气物理方面的研究, 在国内外学术刊物上发表论文40余篇。现为中国科学院大气物理研究所副所长, 研究员, 博士生导师, 多个学术期刊编委会委员, 国际辐射委员会(IRC)委员。

序

大气科学是研究地球大气圈及其与陆面、海洋、冰雪、生态系统、人类活动相互作用的动力、物理、化学过程及其机理。由于人类的生产和生活活动离不开大气,因此,这门科学不仅在自然科学中具有重要的科学地位,而且在国家的经济规划、防灾减灾、环境保护和国防建设中都具有重要的应用价值。

随着人类生产活动的发展和科学技术水平的提高,特别是电子计算机和气象卫星及太空遥感探测大气技术的提高,大气科学得到了迅速的发展,它已形成了诸多分支学科,如大气探测学、天气学、气候学、动力气象学、大气环境学、大气物理学、大气化学等分支学科。为了回顾近百年来大气科学的发展成就以及展望 21 世纪初大气科学的发展、创新与突破,我们编写了这套《现代大气科学丛书》。它包括《大气科学概论》、《大气物理与大气探测学》、《大气化学概论》、《大气环境学》、《动力气象学导论》、《现代天气学概论》、《现代气候学概论》、《应用气候学概论》共八卷。本书是其中的一卷。

在编写这套丛书时,内容力求简明扼要、通俗易懂,每部书的内容结构力求全面、系统。各卷还包括了对各分支学科的发展历程、研究方法和对今后的展望,以使读者对现代大气科学各分支学科有一个全面的了解。

由于我们学识有限,加之本套丛书涉及的内容较为广泛,书中难免有不妥之处,希望读者给予指正。

本套丛书得到了中国科学院大气物理研究所的大力支持和资助,在此表示衷心的感谢。

此外,《中国现代科学全书》编辑工作委员会对本套丛书的组稿和书稿的排版做了不少工作,在此给予说明。王磊和刘春燕两同志对于本套丛书书稿做了许多工作,鲍名博士在此套丛书出版的联系方面付出许多精力,也在此表示感谢。

《现代大气科学丛书》编辑委员会

主编 黄荣辉*

2005 年 5 月 18 日

* 黄荣辉,中国科学院院士

前 言

大气物理学和大气探测学是大气科学的两个基础性的学科分支，其研究对象主要是围绕整个地球的大气圈。由于大气物理与大气探测研究之间的密切依赖关系，本书把它们融为一体，力求全面地概括大气物理学和大气探测学的主要内容。本书适合于相当大学文化程度的读者使用，旨在使读者系统掌握大气物理学和大气探测学的基础知识，了解这一学科的发展历史、重要的研究成果、前沿的科学问题与未来的发展方向，对从事大气科学与邻近学科的科技工作者有一定的参考价值。

本书共有八章：序论；大气边界层与大气湍流；云（雾）和降水物理；大气声、光、电现象；大气辐射传输；大气遥感；气象要素的常规探测与仪器；21世纪大气物理与大气探测研究预测。其中第一、四、六和八章由邱金桓编写；第二、三、五和七章由陈洪滨编写。编写后二人互相审阅、修改与补充。

本书在编写过程中得到我们的同事和学生张敬斌、刘广员、陈英、董艺珍、杨理权、杨景梅、潘继东等同志的宝贵帮助。张敬斌和刘广员还分别编写了第四章的第二节和第六章的第四节。王普才研究员、乔劲松和雷恒池阅读了部分章节，提出了许多宝贵的修改增删意见。此外，我们的家人对于我们的写作工作给予了充分的理解与支持。作者谨向他们表示衷心的感谢！

本书的读者对象比较广，我们力求通俗易懂地论述大气物理学和大气探测学的基础知识和介绍主要研究成果（特别是最新研究成果）。本书涉及大气科学的众多研究领域。由于我们的学识水平和研究领域的局限，本书难免偏颇，可能存在一些错误、遗漏和缺点，恳请读者批评和指正。

作 者

2005年5月

目 录

序

前言

第一章 序论	(1)
第一节 大气物理与大气探测学的研究内容与特点	(1)
第二节 大气物理与大气探测学的发展史	(2)
第三节 大气组成与垂直分层	(6)
第二章 大气边界层与大气湍流	(15)
第一节 大气边界层特征	(15)
第二节 大气边界层的研究对象和方法	(17)
第三节 湍流特征与理论	(18)
第四节 大气湍流扩散	(24)
第五节 大气边界层与湍流研究的新进展	(28)
第三章 云(雾)和降水物理	(34)
第一节 云和雾的分类与生成条件	(34)
第二节 云和降水的宏观与微观特征	(38)
第三节 人工降水、防雹和消雾	(44)
第四章 大气声、光、电现象	(48)
第一节 大气声现象	(48)
第二节 大气中的光现象	(53)
第三节 大气能见度	(59)
第四节 大气中的雷电现象	(66)
第五章 大气辐射传输	(76)
第一节 太阳辐射	(76)
第二节 地气系统的长波辐射	(77)
第三节 大气辐射传输的基本物理过程	(78)
第四节 微量气体的温室效应	(85)

· 2 · 大气物理与大气探测学 ◇

第五节	云和气溶胶的辐射强迫与气候效应	(89)
第六节	大气辐射学的主要研究进展及一些问题	(93)
第六章	大气遥感	(96)
第一节	大气遥感研究的对象和特点	(96)
第二节	大气遥感的反演理论与方法	(98)
第三节	声雷达遥感	(101)
第四节	大气微波遥感	(102)
第五节	大气红外遥感	(111)
第六节	被动式的大气光学遥感	(117)
第七节	激光大气遥感	(123)
第八节	卫星大气遥感	(135)
第七章	气象要素的常规探测与仪器	(141)
第一节	温度、湿度、气压测量与仪器	(141)
第二节	风的测量与仪器	(145)
第三节	辐射的测量与仪器	(147)
第四节	气象雷达探测	(154)
第八章	21 世纪大气物理与大气探测研究预测	(164)
第一节	21 世纪大气物理与大气探测研究特点	(164)
第二节	地球观测系统与全球大气探测系统	(165)
第三节	若干重大的前沿研究课题	(168)
参考文献	(175)

第一章 序 论

大气物理学和大气探测学是大气科学的两个基础性的学科分支,其研究对象主要是环绕整个地球的大气圈。由于大气物理与大气探测研究之间的密切依赖关系,本书把它们融为一体。本章作为本书的序论,主要论述大气物理与大气探测学的主要研究内容与特点(第一节)及其发展历史(第二节);大气成分组成和垂直分层特征(第三节)。

第一节 大气物理与大气探测学的研究内容与特点

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以及人工影响天气的云雾和降水物理学,研究大气中声、光、电现象的大气声学、大气光学和大气电学,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,研究大气边界层中物理现象和过程的大气边界层物理学,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,如大气的电场特征、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参数特性等等。

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,结合地球大气的自身特点,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。

大气探测学是大气科学的另一基础性的学科分支,主要研究大气状态和过程的信息探测技术、观测方法和信息处理技术。探测的对象包括地面和高空的大气状态和过程参数。地面常规气象观测的主要内容是器测温、湿、压、风等气象要素和目测(或器测)各种天气现象。这些天气现象包括能见度、云量、云况和云高、沙尘暴等。用各种飞行器携带的仪器探测高空气象要素和状态参数是高空气象观测的主要课题。随着科学技术的进步,无线电、微波、红外、激光、计算机和卫星等技术的引进,大大地提高了大气探测的自动化水平和效率,已使人们能在短时间获得大范围空间内的三维气象信息,大大促进了气象业务和研究工作的开展。现在已经形成了世界范围的常规气象观测网,进行日常气象观测,主要为日常天气预报、监视灾害性天气、积累气候资料服务。除了常规气象观测网外,现在还有臭氧监测网,大气本底观测站等国际性的大气探测网。随着大气遥感等新大气探测技术的不断发展与应用,定量化的信息处理与反演方法变得越来越重要,成为大气探测研究的一个重要内容。

大气探测在大气科学的发展中占有重要的地位。大气现象和过程千变万化,影响因素极其复杂,整个地球大气好像是一个巨大的实验场,组成从局地到全球的探测网,准确、及时、完整

地获取气象资料,进行分析是大气科学发展的主要途径与方法。大气科学研究中许多重大的理论突破和新发现都建立在大气探测提供的观测资料的基础上。不断发展大气探测新技术,以满足大气科学发展和人类社会发展不断提出的新要求,是现代大气探测的重要使命和前沿研究方向。

虽然大气探测学和大气物理学具有不同的研究对象、目的和方法,但在大气科学长期发展的历程中,这两个学科的联系非常密切。人类对大气的认识是从眼睛观测获得的关于天气现象的感性知识开始的,大气探测不仅为大气物理研究提供各种实验探测手段,而且其观测结果为大气物理研究提出各种新问题,是大气物理新发现的源泉和理论依据。另一方面,大气物理学的研究问题和成果又为大气探测技术的发展提供设计要求、原理依据和基础。此外,有些研究内容,如大气遥感,从这一研究所涉及的辐射和传输物理机制以及信息提取方法,它可归于大气物理学研究内容,而从研究目的和探测技术的角度,它又可归于大气探测学。因此,在关于大气物理和大气探测的两种著作中,通常都有大气遥感部分。也正是由于大气物理学和大气探测学的密切联系,本书把它们融为一体。

大气物理和大气探测学作为大气科学的基础学科,通过对大气特征参数的系统、连续的探测和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、航空气象保证、人工影响天气的水平,为人类社会的进步和发展服务。大气科学的许多重大突破和发现都是在大量的气象观测事实的基础上获得的。例如,正是基于高空气象观测资料,气象学家罗斯贝在 20 世纪 30 年代提出著名的大气长波理论。此外,气象学家也越来越认识到正确处理大气中的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,大气物理和大气探测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。

第二节 大气物理与大气探测学的发展史

本节首先介绍大气物理与大气探测学的发展史,接着回顾我国近代关于大气物理与大气探测的研究进展。

一、大气探测学的发展史

在大气科学的发展过程中,大气探测起到了十分重要的作用。下面按大气科学的不同发展时期,叙述大气探测的发展过程和贡献。

从古代到 16 世纪中期,是大气科学的萌芽时期,这时人类对天气的了解还停留在感性认识阶段,那时的探测手段仅是人的眼睛和少数定性的探测仪器。由于人类的生产和生活与自然界中的大气现象有着密切的联系,因此人们早就开始了对天气现象与物候的目测。早在 3000

多年前,我国殷墟甲骨文中就有不少关于天气现象的记载,如雨、雪、雹、雾、虹、雷电等,这些原始阶段的大气探测结果,都靠单纯的目测。在这些观测的基础上,我国古代人民还归纳出了一些民间的天气和气候谚语,我国的廿四节气就是这种观测的成果之一。

由目测发展到一些简单的原始器测早在公元前二世纪就开始了,那时我国就根据木炭重量的变化和琴弦的伸缩来测量大气湿度。我国汉朝时发明了鸟形风向器。到明永乐末年,我国有了世界上最早应用的雨量器。16世纪以前,我国在大气探测方面是走在世界前面的。

近代的大气探测始于16世纪末。它的一个重要标志是从原始、零星的目测和定性器测逐步发展到全球范围的、系统、连续和定量的大气探测。这一发展过程可分为三个阶段,即地面气象要素探测系统发展阶段,高空气象要素探测系统发展阶段和大气遥感时代。这三个发展阶段对整个大气科学的发展有极其重要的意义,因此本书称之为大气探测史上的三次革命。

(一)地面气象要素探测系统的建立与发展

16世纪末至19世纪末,大气探测技术在物理学的基础上得到了迅速发展,一系列大气探测仪器先后发明出来并投入实际应用。1593年意大利人伽利略发明了世界上第一个温度表,它属气体温度表一类。在这一发明的基础上,1665年波义耳研制成功了酒精温度表。1643年,伽利略的学生托里拆利,发明了水银气压表。正是对真实大气压的定量探测使人们开始认识到了天气状况与气压变化之间的密切关系,即气压的下降往往预示着坏天气的到来,而气压的升高意味着天气变晴的趋势。

温度表和气压表的发明具有重要的意义,它使定量测量气象要素成为可能。再以后,风速表、毛发湿度表也相继问世。1783年,瑞士的德索修尔发明了毛发湿度表。至18世纪末,人类已相继发明了一系列测量大气温、压、湿、风四大气象要素的仪器,从而能够定量地测量这些重要的气象要素,人类也开始有了连续的气象仪器观测记录。

在大气探测技术迅速发展的同时,从18世纪20年代开始,英、俄等国相继建立了气象观测台站。随后人们发现,各种天气现象在广大的区域内有一定的规律性的联系,加上当时航海事业的发展又迫切需要及时收集大范围的气象资料,以作出更准确的天气预报,这就提出了建立跨国气象台站网的要求。第一个跨国台站网于20世纪初在欧洲应运而生,随后,世界上许多国家都建立了气象观测台站网,形成了地面气象要素世界观测网。世界地面气象台站网的出现,积累了大量的气象资料,这才使得20世纪初,以皮叶克尼斯父子(Bjerknes. V和Bjerknes. J)为代表的挪威学派,有可能先后提出锋面理论和气旋波理论。这些宝贵的历史观测资料也为现在的环境与气候变化研究提供了极为重要的科学依据和基础。因此,把世界地面气象要素探测系统的建立称为大气探测史上的第一次革命,它包含两个主要的成就,一是温、湿、压、风等地面气象要素探测仪器的发明与应用,二是世界地面气象台站探测网的建立,它对大气科学的过去、现在和将来都有重要的意义。

(二)高空气象要素探测系统的建立与发展

20世纪是大气科学作为一门独立的学科飞速发展的时期。大气探测也同时取得了很快的发展,从地面常规气象观测站网的建立开始,一直发展到现今的全球综合观测系统。在这一时期中,大气探测的发展对大气科学的促进作用十分明显,大气探测本身逐步发展成为一门基础坚实、技术先进、探测手段众多的学科。高空气象要素探测系统的发展与建立是这一时期大气探测发展的另一次革命。

大气中各种天气现象和过程非常复杂,不仅依赖于地面的大气要素,而且和高空的许多大气参数密切相关。没有高空气象要素的观测资料,天气预报是不可想象的。20世纪初开创的高空气象探测技术正是为了满足大气科学发展这一需要而应运而生。当时工业革命和科学技术的迅速发展和成果为大气探测技术的这一发展创造了条件。

到20世纪20年代末,随着无线电技术的发展,法国、苏联、德国、芬兰等国都开始研制无线电探空仪,大力发展高空气象要素探测技术,探测地面至20~30 km高度的气象参数,大气探测进入第二个发展阶段。40年代中期,气象火箭的探测把探测高度进一步提高到100 km。

随着高空气象探测系统的建立,20世纪30年代开展了高空气象观测业务,并积累了大量高空气象资料。正是基于这些资料,美国气象学家罗斯贝提出了大气长波理论,开创了三维空间的天气分析。对云雾进行的一系列高山和飞机观测,又使瑞典科学家贝吉隆有可能提出著名的冰水转化的冷云降水理论,并成为以后人工降水的重要理论基础。大气科学发展史中这几个重大事例充分反映了大气探测的重要性。

(三)大气遥感时代

大气探测的第三阶段,即第三次革命,是大气遥感时代。早期的大气遥感活动可以追溯到20世纪初。早在1902年Langley开始应用光度计探测太阳的直射光强,来遥感大气透明度和大气光学厚度。这一经典的遥感方法,现称为Langley方法或长法,一直沿用到现在,是遥感大气柱气溶胶光学特性的一个可靠而又经济的常用方法。第二次世界大战期间,一些国家还研制成功了早期气象探测雷达,用于探测云和降雨等。但是,大气遥感作为一门系统的新兴学科和大气探测新时代的开始,还是20世纪60年代以后的事情。1960年4月美国发射的第一颗气象卫星泰罗斯-1号,是开始大气遥感新时代的一个象征性标志。依据不同的工作平台,大气遥感分为地基大气遥感、机载大气遥感和空间(含卫星)大气遥感。大气遥感,特别是空间大气遥感,不仅从根本上扩大大气探测至全球范围,而且大大提高了对大气参数和过程探测的连续性与时空分辨率。空间大气遥感的基本目的是探测全球空间的气象要素和大气过程。

自20世纪60年代大气遥感兴起之后,大气遥感的新技术、新原理和新方法层出不穷,应用领域不断拓宽,一系列气象卫星、大气探测卫星的相继发射,大气探测取得了前所未有的、日新月异的大发展,开创了从宇宙空间观测全球大气的时代。现正朝着建立以常规探测为基础、以气象卫星为骨干的全球综合观测系统的方向迈进。全球综合观测系统包括:卫星、火箭、雷达、飞机、船舶、定高气球、海洋浮标和地面常规观测网等。

二、大气物理学发展史

在自然界中,为什么会出现雷鸣电闪、狂风暴雨、云雾冰雹、冰雪霜露等千变万化的自然现象,从古代起就引起人们的注意与兴趣。但在18世纪以前,由于当时科学发展水平的限制,人们还不能对这些复杂的自然现象给予科学的解释。大气物理学真正作为一门近代科学,应用物理学原理去阐明自然大气现象的本质,则开始于18世纪中叶,并可分为两个发展阶段。第一个阶段从18世纪中叶至20世纪初,是近代大气物理学的起始阶段。在这个阶段,物理学家对大气科学的发展起了重要的理论奠基作用。到了18世纪中叶,近代物理学和近代数学都取得了迅速发展,一些物理学家开始应用物理学理论和成果来解释大气中的自然现象。1752年,美国富兰克林(B. Franklin)第一次用风筝探明雷击的本质就是电。1871年,英国物理学家瑞利

(Rayleigh)建立了大气分子散射理论,科学地解释了天空蓝色的现象。1908年,德国物理学家米(G. Mie)应用电动力学的理论和方法,建立了球形大粒子的电磁散射理论。这二个理论与物理学家普朗克和基尔霍夫开创的辐射定律与光谱量子理论一起,奠定了现代大气辐射学、大气光学和大气遥感研究的理论基础。1880~1881年间,英国物理学家爱根(J. Aitken)等指出了凝结核在雾滴形成中的重要作用,开始了近代云雾物理的研究。

第二个阶段是从20世纪30年代至现在,是大气物理学的迅速发展的阶段。大气科学中一些重大实际应用问题的需要大大加速了这个发展过程。

在20世纪30年代,基于在高山和飞机上对云雾进行的大量观测资料,瑞典科学家贝吉隆等人提出了著名的冰水转化的冷云降水理论,奠定了人工降水的理论基础;在40年代,美国物理学家兰格缪尔(Langmuir)等人关于干冰与碘化银的人工冰核作用的实验室发现,促使云和降水物理以及人工影响云雨的研究获得了新的重要发展。

从1950年代开始,大气辐射传输问题日益引起大气物理学家的重视。1960年钱德拉塞哈(S. Chandrasekhar)建立了大气辐射传输的基本方程。

1960年代以来,由于人类的生产和生活活动等,大气中人为排放的气溶胶粒子和微量污染气体大量增加,并导致土地、河流污染等,对生物圈和人类造成严重影响。为了充分掌握关系到人类社会发展的大气环境演变规律,大气边界层与太气湍流的研究就成为现代大气科学的一个主流之一,并促进了大气物理与大气化学的有机结合。

1960年代以来,随着计算机技术和卫星技术的迅速发展与日益广泛的应用,大气物理学研究另一迅速发展的领域是大气辐射与大气遥感研究。同时,气象卫星的兴起,遥感技术的飞速发展以及气候变化研究的需要,大大推动了大气辐射和大气遥感原理与反演理论的研究,并形成了大气信号与遥感物理学。

三、我国近代大气物理与大气探测研究

在古代,我们的祖先就发明了一些简单的大气探测仪器,那时我国在大气探测方面是走在世界前面的,风向计和雨量器等的应用都比欧洲各国早得多。但由于长期的封建统治,18世纪以后的相当长一段时间内,我国的大气探测研究明显地落后于迅速发展的世界步伐。20世纪的前50年,我国开始了现代气象观测网的建设,但由于战乱频繁,现代大气探测事业的发展还比较缓慢,气象台站稀少,基本上没有我国自主的大气探测技术,各种现代气象探测仪器都依靠进口。

1949年新中国成立后,我国的气象事业获得了迅速发展,气象台站已由1949年的72个发展到1988年的2609个,气象站网的密度达到国际中上等的水平,台站的绝大多数气象观测仪器已能自己制造。特别是1980年代以来,我国开始发展自动化的气象台站观测网,大力发展卫星遥感大气气象要素业务应用,大力在一级台站配备新一代的天气雷达等现代化的气象观测仪器,逐步迈向世界气象观测的先进行列,为我国的气象预报服务,为大气科学的发展作出日益重要的贡献。

我国近代大气物理学起始于20世纪30年代。从那时至1949年,是我国近代大气物理学研究的始创时期,在我国近代气象学家创始人竺可桢的积极倡导,在叶企孙、吴有训、严济慈等老一辈物理学家们的热心培植下,我国大气物理研究开始萌芽,并不断发展,赵九章、顾震潮、

叶笃正等我国大气科学领域的开创者们为这一研究都做出了重要贡献。在这一时期,大气物理研究在整个气象研究中所占比重还较小,研究领域也较窄。

我国大气物理研究的迅速和全面的发展还是 1949 年(特别是 1958 年)以后的事。在新中国成立的初期,我国的大气物理研究主要集中在臭氧观测、能见度观测、闪电光谱、近地面层大气结构等方面。1958 年以后,由于农业生产对人工降水的需要,全国开展了大规模人工影响天气的试验,加速了我国云雾降水物理的创建,在几年时间内,全国范围内初步形成一支科研队伍,全面开展了云降水宏观与微观结构的高山与飞机观测、云降水动力学、云降水微物理学以及雷雨云物理研究,并取得了重要的成果。60 年代开始,由于我国核技术发展与工业建设的需要,带动了我国大气边界层物理与大气湍流的飞速发展;由于我国卫星以及航空技术与应用的飞速发展的需要,也由于气候变化研究和大气遥感发展的要求,大气辐射、大气中辐射传输规律及其辐射气候效应、大气遥感原理及信息提取技术等研究逐渐成为主要的研究方向,并取得了一系列重要的研究成果,迅速跟上了当代大气物理学前进的步伐。

综观国内外大气物理与大气探测发展的历史,和所有学科一样,科学发展和社会发展的需求是大气探测和大气物理发展的根本动力。

第三节 大气组成与垂直分层

一、大气

覆盖地球的大气圈,作为地球的一层气体屏障,从地面一直延伸到上千公里的高空。大气圈,连同水圈、岩石圈和生物圈是人类赖以生存的主要环境。

大气与我们的关系真是太密切了!正是有了大气,地球上的人类和各种生物才能呼吸到空气中的氧气而生存下来,才能免受星际空间射线和太阳紫外辐射的伤害;才能看到或听到千姿百态的大气声、光、电现象;才有常见的风、云、雷、电、雨、雪、冰雹等千变万化的天气现象和过程。

现代大气是在地球生命的形成和进化过程中逐渐形成的,其发展延续了四五十亿年。第一代大气是由宇宙空间中原始的氢气云团演变而来的。在这个云团中,轻的氢原子多数由于所受引力很小而逃逸了,余下的大部份物质是先前恒星爆炸中混进原始氢云里的物质,其中固态物质通过碰撞合并逐渐进化为原始地球,而气态物质如氢、氦、氖等就组成了第一代大气。在随后的不断冷却过程中,逐渐形成了薄弱的固体地壳,而其内部仍是高温熔岩,并因物质分解而生成大量气体。这些气体和细小微粒借助火山爆发而喷射到大气中,构成了第二代大气,其主要成份是氮、二氧化碳、甲烷、氦和水汽。第二代大气中没有氧气和臭氧,太阳紫外辐射绝大部分直射到地面,把水汽分解成氢和氧,从此地球大气才有了对生命的存在与进化极为重要的氧分子。这种分解过程极为迟缓,起初大气中氧含量十分微少,但却活跃地参与了地球生命起源的前期演化。地质学家研究表明,在 3 亿至 2 亿年以前,植物生命的原始形态已发展到开始通过光合反应释放极少量的氧,并认为早期的生命形式是在液态水环境中发展的,这个环境位于水面以下一定的深度,既可避开致命的太阳紫外线,又能接受光合作用所需的可见光辐射。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,并逐渐发展到能够吸收大部分太阳紫

外辐射,促使植物的生存环境向水面扩展,光合作用也由于吸收更多的可见光而大大加强,结果产生了更多的氧。在以后的生命进化过程中,绿色植物通过光合作用,在把水和二氧化碳转化为有机物的同时,大量地产生氧气,成为地球大气中氧的主要来源,从而形成了现代大气。

现代大气是以氮、氧、氩为主的多成分混合气体,分子数密度随高度衰减,在标准状况下近地表的干燥空气,每升重 1.293g。大气总质量约 5.3×10^{18} kg,约占地球总质量的百万分之一。大气总质量的 99.9%集中在 48 km 以下。大气不仅随地球而转动,而且相对于地壳,又有复杂的运动。由于太阳光照和地球表面性质等自然条件的不同以及人类活动的不同影响,大气的成分、物理性质和运动状态都存在着地区性的差异,但铅直方向的变化远比水平方向的变化大。

地球大气经历了一系列复杂的演化过程,才形成了现在这种特定的大气组成、层次结构和物理属性。下面,分别介绍地球大气的组成和垂直分层。

二、大气组成成分

地球大气是由多种气体以及飘浮在其中的固态、液态等颗粒物质组成的。气体成分有氮、氧、氩、二氧化碳、水汽、臭氧、氢、氦、氖、氫、氙等。颗粒物质有尘埃、烟粒、盐粒、水滴、雾、云滴、冰晶、花粉等各种有机物粒子等。

大气中任何高度上各种气体成分的混合比例取决于分子扩散和湍流混合两个物理过程。在 110 km 以上,分子扩散是主要的,使得重力场中空气粒子数密度随高度递减。粒子的质量越大,重力作用越显著,粒子数密度随高度递减也越快,使得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小,也因此称 110 km 以上的大气为非均质层。在 85 km 以下的大气层内,湍流混合成为主导的物理过程,气体混合均匀,大气组成与高度基本无关,因此,这一层称为均质层。从 85 km 至 110 m,是从以湍流混合为主到以分子扩散为主的过渡地带。对不含水汽的干空气,其平均分子量在均质层内约为 28.96,而在非均质层内随高度的增加而减小。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。

地球大气层是会“漏气”的,但漏出去的主要是最轻的分子。由于地球引力场的作用,地球上的物体只有当它向上运动的初速度超过“逃逸速度”,即 11.2 km/s 时才能飞向宇宙空间,不再返回地球。由于氧和氮分子相对比较重,故只有很少一部分能达到逃逸速度。氧和氮从最初形成到现在并没有从大气圈跑掉多少。氢和氦容易到达逃逸速度,因此,今天地球大气中,它们的含量极低。

气象上,把不包含水汽与气溶胶等粒子的大气称为干洁大气,简称干空气。大气中还悬浮着大量固体和液体粒子。通常将半径小于十几微米的固态微粒叫做大气气溶胶,其他的粒子主要是雾滴、云滴、冰晶、雨滴以及冰雹、霰和雪花等固态降水粒子。

下面主要论述干空气的组成以及水汽和气溶胶粒子的特性。云雾和降水粒子的特性将在第三章中予以论述。

(一)干洁大气的组成

表 1.3.1 给出干空气的主要组成成分以及它们的分子式、体积百分比和分子量。如表所示,干空气的成分可分为两类。一类是常定成分,主要有氮、氧、氩、氖、氦、氫与氙,其中以氮、

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 以下的变化是很小的。另一类是可变成分,如二氧化碳、一氧化碳、甲烷、氧化氮物、臭氧、二氧化硫、氨与碘等,其含量随地点与时间都有显著变化。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有直接的伤害。因此,对这些成分的变化趋势下面还要讨论。

表 1.3.1 干洁大气的基本成分(取自周秀骥等,1991)

	气体	分子式	体积百分比含量	分子量
常 定 成 份	氮	N ₂	78.0840	28.0134
	氧	O ₂	20.9476	31.9988
	氩	Ar	0.934	39.948
	氖	Ne	0.001818	20.183
	氦	He	0.000524	4.0026
	氪	Kr	0.000114	83.8
	氙	Xe	0.87×10 ⁻⁷	131.3
可 变 成 份	二氧化碳	CO ₂	0.0322	44.00995
	一氧化碳	CO	0.19×10 ⁻⁴	28.01055
	甲烷	CH ₄	1.5×10 ⁻⁴	16.04303
	臭氧	O ₃	0.04×10 ⁻⁴	47.9982
	二氧化硫	SO ₂	1.2×10 ⁻⁷	64.0628
	一氧化二氮	N ₂ O	0.27×10 ⁻⁴	44.0128
	二氧化氮	NO ₂	1×10 ⁻⁷	46.0055
	氢	H ₂	0.5×10 ⁻⁴	2.01594
	碘	I ₂	5×10 ⁻⁷	253.8088
	氨	NH ₃	4×10 ⁻⁷	17.03061

大气中氮约占大气总体积的 78%。氮的来源很多,腐烂的植物、树叶和动物都会排放出氮。地球通过不同方式,如火山爆发等把大量的氮排入空气。闪电过程也能产生氮化合物。

地球大气中的氧气是人类赖以生存的物质基础。大气中的氧主要有两种来源:水的离解和植物的光合作用。水的离解要吸收紫外辐射,光合作用要吸收可见光辐射。地球大气中的大部分氧是由光合作用产生的。离解反应作为大气中的氧的来源还是一个有争议的问题,反应速率存在着明显的不确定性,它取决于与之竞争同一紫外辐射的其他光化学反应,而且氧的生成率还依赖于反应中产生的氢向空间的逃逸率。

大气微量气体中,有一类称为“温室气体”。这类气体,如二氧化碳、甲烷等,对地球发射的长波辐射具有强烈或重要的吸收,而对太阳辐射高度透明,因而对地表有保温作用,称为“温室效应”。还有一类称为“污染气体”,对地球的生态环境有不同程度的危害。大气中主要污染物,目前已引起人们注意的不下百十种,对人体威胁最大的是煤粉尘、二氧化硫、一氧化碳、碳氢化