

高等大气物理学

(上册)

周秀骥 等编著

Advanced

Atmospheric

Physics



高等教育出版社

D421

7X3

11

高等大气物理学

(上册)

周秀骥 陶善昌 姚克亚 编著



高等教育出版社

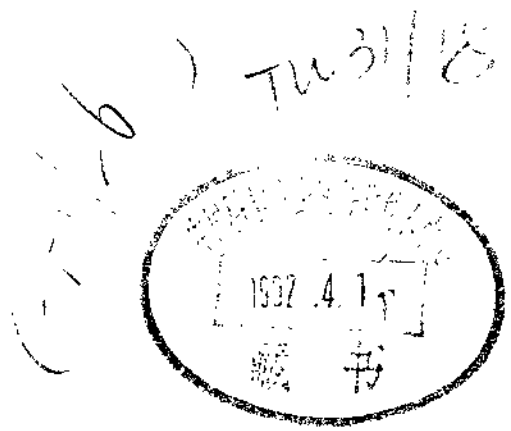
7380

P421
ZXJ
:2

高等大气物理学

(下册)

周秀骥 陶善昌 姚克亚 编著



高等教育出版社

1-7380

内 容 简 介

本书是在中国科技大学大气物理专业与研究生院多年教学实践基础上编写而成的。本书概括了现代大气物理学的主要内容，作为研究生教材，本书将帮助读者系统掌握大气物理学方面的基础理论，又能使读者了解这方面的重要成果与前沿科学问题。

本书也可作为高年级大学生的参考教材，对有关科技人员也有参考价值。

高等大气物理学

(上、下册)

周秀骥 陶善昌 姚克亚 编著

责任编辑 林雨晨

* * *

气象出版社 出版

北京西郊白石桥路46号

北京昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

* * *

开本：850×1168 1/23 印张：40.5 字数：1052千字

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数：1-1000 平装定价：12.50元（上、下册）

ISBN 7-5029-0541-3/P·0310（课）

前 言

本书是在中国科技大学大气物理专业与研究生院多年教学实践基础上编写而成的。

1961年起，顾震潮教授与作者在中国科技大学大气物理专业先后主持开设了“云雾降水物理”、“大气湍流”与“大气电学”等课程，直到1966年“文化大革命”开始，大气物理专业被迫中辍。

1978年以后，中国科技大学恢复了大气物理专业，中国科学院研究生院又招收了大气物理专业硕士研究生。这都需要编写一本新的大气物理学教材。根据近二十年来大气物理学的新发展，我们对原课程讲义作了重大修改与扩充，于1982年完成了新的“大气物理学”初稿。除作者以外，中国科学院大气物理研究所周晓平、周诗健、林海、赵高祥、吕达仁、黄润恒等同志都参加过初稿的编写和讲授。我们还专门邀请了美国著名大气物理学家L.D.Kaplan来华讲授“大气辐射与遥感”。在这以后的几年教学工作中，初稿又经过多次修改与充实。最后，由周秀骥完成了第一章到第十章、第二十五章、第二十六章和第二十九章的编写；姚克亚完成了第十一章到第十六章的编写；陶善昌完成了第十七章到第二十四章、第二十七章与第二十八章的编写。全书由周秀骥审定。

本书概括了现代大气物理学的主要内容。由于大气动力学惯常在天气动力学课程中系统讲述，本书就只介绍了大气湍流。作为研究生的基本教材，本书将帮助读者系统掌握大气物理学方面的基础理论，又使读者了解这方面的重要成果与前沿科学问题。因此，本书也可作为高年级大学生的参考教材，对科技专业人员

也有参考价值。

大气物理学是涉及面相当广泛的学科。作者的知识有限，书中可能会有不少缺点与错误，恳切希望读者提出批评，以利于本书的修改与完善。

我国杰出的大气物理学家赵九章教授与顾震潮教授离开我们已经二十年左右了，他们是中国科学技术大学大气物理专业的开创者与组织领导者。完成本书的编写与出版，也是寄托作者对老师们的深切思念。

作者

1989年6月于北京

绪 论

大气物理学主要研究地球大气现象与过程的物理机制和规律。它综合应用力学、热力学与统计物理学、电磁学、光学与量子力学等物理原理，结合地球大气的自然特点，研究大气中流体运动、光象、电象、声象、相变过程以及光辐射过程等，并由此产生了大气动力学、云雾降水物理学、大气电学、大气辐射与光学、大气声学、大气信号与遥感物理学等基本分支。而如果按大气层次的特点来划分，则大气物理学又可分为边界层大气物理学、对流层大气物理学和 中层大气物理学。因此，大气物理学是大气科学中的基础学科，又是应用物理学的一个分支。

雷鸣电闪、华晕虹霓、云雾雨雹、冰雪霜露都是人们日常所见的自然现象，从古代起就引起学者的注意与兴趣。为了解释这些现象，产生过各种唯物与唯心的理论观点。但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，则开始于十八世纪中叶。1752年，美国 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 Rayleigh 为了解释天空蓝色的现象，建立了大气分子散射理论，即 Rayleigh 散射理论。1908年，德国物理学家 G. Mie 从电磁场理论出发，进一步解决了球形粒子的散射问题，建立了大粒子散射理论。这二个理论与1859—1901年物理学家 M. Planck 和 G. Kirchhoff 开创的辐射定律与光谱量子理论一起，完全奠定了现代大气辐射与光学的理论基础。1880—1881年，英国物理学家 J. Aitken 等指出了凝结核在雾滴形成中的重要作用。C. T. R. Wilson 进行的经典的云室实验，都是云雾物理的基础和开端。总之，主要揭露大气现象物理机制是近代大气物理学起始阶段的主要特征，这个阶段差不

多延续了将近二百年左右，物理学家起了重要的理论奠基作用。

二十世纪中叶以来，具有重大实际应用问题的需要大大加速了大气物理学的发展。1938—1939年，Bergeron与Findeisen关于降水起源于冰晶的学说，1946年左右，美国物理学家I. Langmuir, V. J. Schaefer和B. Vonnegut等在实验室内关于干冰与碘化银人工冰核作用的发现，大大激励了科学家们进行人工影响云雨的勇气与信心，促使云降水物理学获得了新的重大发展。从六十年代开始，由于生产活动和人类的其它活动，向大气排放了大量气溶胶和污染物，并导致土地河流污染，造成对农作物、植物等生物圈和人类生活健康的严重影响。为了充分掌握关系到人类社会发展的大气环境演变规律，大气边界层与大气湍流的研究就成为现代大气科学的一个主流，并促进了大气物理与大气化学的有机结合。同时，气象卫星的兴起，遥感技术飞速地发展，大气辐射传输作为遥感的基础，由此推动了大气辐射的研究，并形成了大气信号与遥感物理学。

我国近代大气物理学起始于本世纪三十年代，它不仅受到我国近代气象学家创始人竺可桢的积极倡导，也受到叶企孙、吴有训、严济慈等老一辈物理学家们的热心培植。他们把大气物理学看作应用物理学的一个分支。不少物理学家都曾亲自进行过大气物理研究。例如，严济慈三十年代在大气臭氧对紫外辐射吸收以及观测实验的研究结果曾驰名中外。褚圣麟与赵邦俊合作，1937年春在我国广东地区首次测量了大气中电荷密度、导电电流与电位梯度等大气电学特性。同时，他们还积极引导一批物理学科的青年学习大气物理、地球物理与海洋物理等，从中培养出了不少我国在这些领域内的开创者。当时，赵九章在大气动力学方面做出过卓越的成就。程纯枢根据1931—1935年南京地区日射强度记录，计算过大气消光系数，分析了影响大气混浊度的因子。薛铁虎在1932—1936年期间利用欧文计尘器，定时观测南京北极阁微尘含量。1944年，郭晓岚根据当时最完善的水汽与二氧化碳

红外吸收系数资料，重新计算了北半球大气辐射图及大气冷却率，其计算精度超过了当时的国外水平。叶笃正于1942年在湄潭地区对晴天、云天及雷雨天气条件下大气电场变化进行了观测。1948年，顾震潮发表了边界层大气湍流交换及平板间湍流的研究结果。这个时期是我国近代大气物理学发展的萌芽时期，在整个气象研究中的比重还不到十分之一。

从1949年建国以来初期十年中，虽然在臭氧观测、能见度观测、闪电光谱分析以及结合西北风沙、农业气象与水库蒸发等进行了一些近地面层大气结构的研究。但是，全面发展我国近代大气物理学还是1958年以后的事。首先由于农业生产对人工降水的需要，于1958年开始，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。将近五年时间内，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。而从六十年代中期开始，由于我国核技术发展及工业建设的需要，全面带动了我国大气边界层物理与大气湍流的飞速发展。随之，我国科学卫星以及航天航空等现代化建设的开始，大气射电、电磁波传播、红外辐射、激光辐射和微波辐射等大气信号与遥感物理学工作也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发展的历史，和所有科学一样，社会发展的需求是大气物理发展的根本动力。它作为大气科学的一门基础学科，主要是通过增进对大气现象的认识以及发展和提高气象观测、天气预报、环境与气候变化预测、人工影响天气等来为社会服务的。因此，大气物理学必须密切结合大气科学中直接具有应用价值的分支，才具有前进的生命力。同时，大气物理学是应用物理学的一个分支，是物理学原理与地球大气特点的结合，也是一门实验物理学，依靠新技术提供观测手段与实验技术。因此，物理学与新技术的重大进展往往预示着大气物理学的新突

破。而充分深入地应用理论物理学成果，广泛采用新技术成果，组织综合性的野外观测试验，实验室模拟和数值模拟将是大气物理学研究的主要方法。

展望未来几十年内，人类社会将经历一场新的技术革命，空间、信息、能源、材料、生物、环境等科学技术领域将发生新的飞跃，它一方面为大气物理研究提供新的实验技术，另一方面又要求提供更为准确的从常规气象要素到许多大气物理量的定量预报，以及更为有效的影响大气过程的人工方法。预计，未来的大气物理学将沿着下列几个方面发展。

(1) 现代化建设与信息时代的到来必将极大地加速并提高人类社会活动的节奏与效率，中小尺度危害性天气信息的快速获取、传输与发布，时空范围愈来愈精确的超短期与临近预报对人类社会的效益也日益显著。而趋于成熟的空间及地面大气遥感探测与气象信息采集、传输、处理与分析等技术系统，必将引起气象观测系统的根本变革。它将为中小尺度大气现象与过程研究提供新的观测资料。大气物理学已完全有可能去综合研究中小尺度范围内大气热力动力、云降水与雷电、大气辐射与光象、大气边界层以及它们之间相互作用的物理过程，从而形成中小尺度大气物理学。

(2) 现代大气科学将深入到环境科学，地面太阳光谱辐射（尤其是紫外辐射）的变化、低层大气 CO_2 、 O_3 、离子及其它成份浓度的增加，酸雨与降水化学组成变化等都直接严重影响到人类、动物、植物、森林、土壤及生态系统。引起这些变化的原因既有自然因素，也有人类活动所造成的扰动，而人为扰动的比重在急剧增长。因此，发展大气组成与地球生态的探测技术以及建立区域性和全球性的观测网；组织大气成份变化及其有关大气物理化学因子的综合观测试验；研究大气组成的转换、大气与陆地表层及海洋之间的物理化学交换与反应，大气与地球生物圈之间的相互作用是一个相当复杂的科学问题，其中既涉及到化学过

程，而地球大气中的任何化学过程又必然是在辐射、动力输送、相变、气溶胶物理等大气物理过程的背景中进行的。预计，一门新兴的边缘学科——大气物理化学将要形成。

(3) 气候变化及其预测是关系到当代人类社会发展前景的重大科学问题。由于社会建设规模的扩大，科学技术水平的提高，人类活动对地球环境能量收支，大气组成、水份循环等扰动日益显著，它对区域性和全球性几十年时间尺度内气候变化的影响，已经与自然因子的作用相当，甚至超过。当前，“世界气候研究计划”、“全球变化计划”与“国际地圈-生物圈计划”等都已开始。在未来二十年内，一个以空间与地面相结合的地球环境探测系统即将运行，它可以提供全球、海洋、陆地、冰雪、植被、大气、生物圈以及太阳与空间环境的综合资料。包含大气圈-海洋圈-陆地圈-生物圈的综合数值模式将要形成，在分析揭露影响气候变化的各物理因子及其相互作用，建立有物理依据的气候预测等方面将取得重大进展。未来的大气物理学将在全球尺度范围内研究云与降水过程、大气成份变化、大气辐射过程、大气边界层以及这些过程的相互作用。还将研究对流层大气与中层大气耦合效应的物理机制，以揭露长期天气与气候变化的规律。

随着沿上述三个方面的深入发展、大气物理学将日益显示它在大气科学中的重要地位与作用。

71031/26) T1031/18

目 录

前言

绪论 (1)

第一篇 大气的组成与物理特性 (1)

第一章 大气的气体成份 (4)

§1.1 干洁大气 (4)

§1.2 二氧化碳 (CO₂) (6)

§1.3 臭氧 (O₃) (10)

§1.4 水汽 (H₂O) (19)

§1.5 其它大气痕量气体 (20)

第二章 大气中的粒子群 (30)

§2.1 大气气溶胶 (30)

§2.2 雾粒子 (42)

§2.3 云粒子 (43)

§2.4 降水粒子 (49)

第三章 大气的运动、能量与构造 (54)

§3.1 大气运动的基本特点 (55)

§3.2 大气能量与转换 (61)

§3.3 大气运动的构造 (69)

第四章 大气的光学特性 (81)

§4.1 大气的折射 (81)

§4.2 大气的消光 (85)

§4.3 大气的反射 (96)

§4.4 大气光象 (101)

第五章 大气的电学特性 (106)

§5.1 晴天大气的电特性 (106)

§5.2 云与降水的电结构 (119)

§5.3	大气中的放电现象	(126)
§5.4	全球大气电平衡	(133)
	参考文献	(136)
第二篇 大气湍流		(138)
第六章 湍流的发生与描述		(140)
§6.1	流体运动的稳定性	(140)
§6.2	Ландау模式与实验事实	(144)
§6.3	Logena系统的非周期运动	(154)
§6.4	湍流与混沌	(167)
§6.5	湍流的统计描述	(176)
第七章 湍流动力学		(184)
§7.1	Reynolds方程与半经验理论	(184)
§7.2	湍流能量方程	(189)
§7.3	均匀各向同性湍流	(191)
§7.4	局地均匀各向同性湍流	(199)
§7.5	湍流谱理论	(206)
§7.6	湍流介质的温度统计结构	(211)
§7.7	湍流泛函方程	(216)
第八章 大气湍流结构		(222)
§8.1	大气温度层结对湍流的影响——Richardson数	(222)
§8.2	大气边界层	(226)
§8.3	大气边界层的数值模拟	(239)
§8.4	自由大气中的湍流	(252)
§8.5	云中的湍流	(263)
第九章 大气湍流扩散		(269)
§9.1	粒子在大气湍流中的运动	(269)
§9.2	湍流扩散统计理论	(272)
§9.3	湍流扩散的Euler方法与半经验理论	(279)
§9.4	边界层大气湍流扩散	(285)
第十章 波在湍流大气中的传播		(288)
§10.1	大气折射率起伏	(288)

§10.2	波传播方程	(292)
§10.3	电磁波散射	(300)
§10.4	声波散射	(314)
§10.5	弱湍流大气中的电磁波视线传播	(319)
§10.6	强湍流大气中的电磁波视线传播	(334)
	参考文献	(345)
	第三篇 云和降水物理	(347)
	第十一章 云滴的形成与凝结增长	(349)
§11.1	水汽中液水的核化	(349)
§11.2	外来核在新相形成中的作用	(355)
§11.3	云核	(364)
§11.4	云滴的扩散增长	(370)
§11.5	积云中云滴群的凝结增长	(382)
§11.6	过饱和度随机起伏对云滴凝结增长的影响	(389)
	第十二章 冰粒子的形成与增长	(394)
§12.1	冰相粒子的核化过程	(395)
§12.2	大气冰核	(405)
§12.3	冰晶增长	(414)
	第十三章 粒子的碰并过程	(427)
§13.1	空气介质对云滴运动的阻力	(428)
§13.2	空气中粒子降落末速度	(438)
§13.3	粒子间相互作用	(448)
	第十四章 降水形成的微物理学	(476)
§14.1	水滴的碰并增长	(477)
§14.2	三相过程	(500)
§14.3	层状云中降水粒子的形成	(505)
§14.4	积状云中降水粒子的形成	(510)
§14.5	冰雹形成的微物理过程	(518)
	第十五章 雷雨云物理	(535)
§15.1	水滴起电机制	(535)
§15.2	冰晶过程的起电机制	(553)

§15.3	雷雨云电结构形成理论	(556)
§15.4	闪电形成的机制	(568)
§15.5	闪电的物理化学效应	(593)
第十六章 积云和强风暴动力学		(602)
§16.1	对流运动的动力学和热力学方程组	(602)
§16.2	影响积云发展的一些主要因子和过程	(613)
§16.3	积云数值模式	(628)
§16.4	强风暴的简单模型	(651)
参考文献		(657)
第四篇 大气辐射		(659)
第十七章 太阳辐射		(661)
§17.1	太阳光谱及其变化	(661)
§17.2	太阳常数及其变化	(667)
§17.3	大气上界的日射分布和变化	(672)
第十八章 大气的吸收和发射		(678)
§18.1	基本概念	(678)
§18.2	谱线的强度、半宽度和线型	(690)
§18.3	大气分子的吸收带	(697)
§18.4	光谱吸收的计算	(709)
§18.5	晴空大气的冷却率和加热率	(724)
第十九章 大气散射		(740)
§19.1	Stokes 参量	(740)
§19.2	球形粒子的Mie 散射理论	(750)
§19.3	非球形粒子的散射理论	(771)
§19.4	粒子群的散射	(792)
§19.5	大气气溶胶和云的体元散射和吸收	(797)
第二十章 大气辐射传输理论		(821)
§20.1	辐射传输方程	(821)
§20.2	相函数的多项式展开与方程简化	(830)
§20.3	二流 (Two-Stream) 近似和通量计算方法	(834)
§20.4	离散坐标法	(838)

§20.5	迭代法	(848)
§20.6	不变性原理	(850)
§20.7	累加法	(861)
§20.8	Monte-Carlo 方法	(865)
第二十一章 大气光象理论		(868)
§21.1	大气散射光的强度和偏振	(868)
§21.2	曙暮光的成因	(886)
§21.3	华、虹、晕的成因	(893)
§21.4	能见度	(901)
第二十二章 大气辐射和光化学		(911)
§22.1	光致电离与离子光化学	(912)
§22.2	光致离解与平流层-中层大气光化学	(922)
§22.3	光致离解与对流层光化学	(941)
第二十三章 大气辐射与气候		(952)
§23.1	热量平衡方程	(953)
§23.2	辐射平衡与气候模式	(956)
§23.3	辐射-对流平衡模式与温度廓线	(966)
§23.4	大气成分变化对气候变化的影响	(970)
§23.5	云-辐射相互作用与气候	(983)
参考文献		(989)
第五篇 大气信号与遥感物理		(994)
第二十四章 大气声波信号与遥感		(995)
§24.1	声波在大气中的传播	(995)
§24.2	声雷达探测	(1007)
§24.3	大气次声信号的探测	(1021)
参考文献		(1032)
第二十五章 大气热辐射信号与遥感		(1034)
§25.1	大气热辐射信号特性	(1034)
§25.2	大气热辐射遥感方程	(1049)
§25.3	大气热辐射遥感方程的基本特性	(1054)
§25.4	反演方法	(1060)

§25.5 探测结果	(1068)
参考文献	(1077)
第二十六章 大气光学信号与遥感	(1079)
§26.1 太阳紫外辐射与臭氧探测	(1079)
§26.2 大气气溶胶光学特性遥感	(1098)
§26.3 光闪烁效应与大气动力结构遥感	(1106)
参考文献	(1116)
第二十七章 微波气象雷达探测	(1118)
§27.1 天气多普勒雷达的相干接收与回波功率	(1119)
§27.2 天气多普勒雷达探测原理与回波信号的统计特征	(1130)
§27.3 天气多普勒雷达探测气象要素的方法	(1138)
§27.4 VHF-UHF多普勒雷达探测	(1168)
§27.5 FM-CW 雷达探测	(1182)
§27.6 偏振波雷达探测	(1187)
参考文献	(1198)
第二十八章 激光雷达大气遥感	(1200)
§28.1 光雷达方程	(1201)
§28.2 低层大气光学特性的激光雷达探测	(1202)
§28.3 大气气溶胶和烟尘的激光雷达探测	(1211)
§28.4 大气运动的激光雷达探测	(1223)
§28.5 大气气体成份的激光雷达探测	(1232)
§28.6 大气温度和压力的激光雷达探测	(1242)
参考文献	(1248)
第二十九章 大气天电信号与遥感	(1250)
§29.1 大气静电场变化与云中电荷分布	(1250)
§29.2 天电信号	(1254)
§29.3 雷电定位	(1263)
§29.4 云中闪电分布探测	(1271)
参考文献	(1276)