



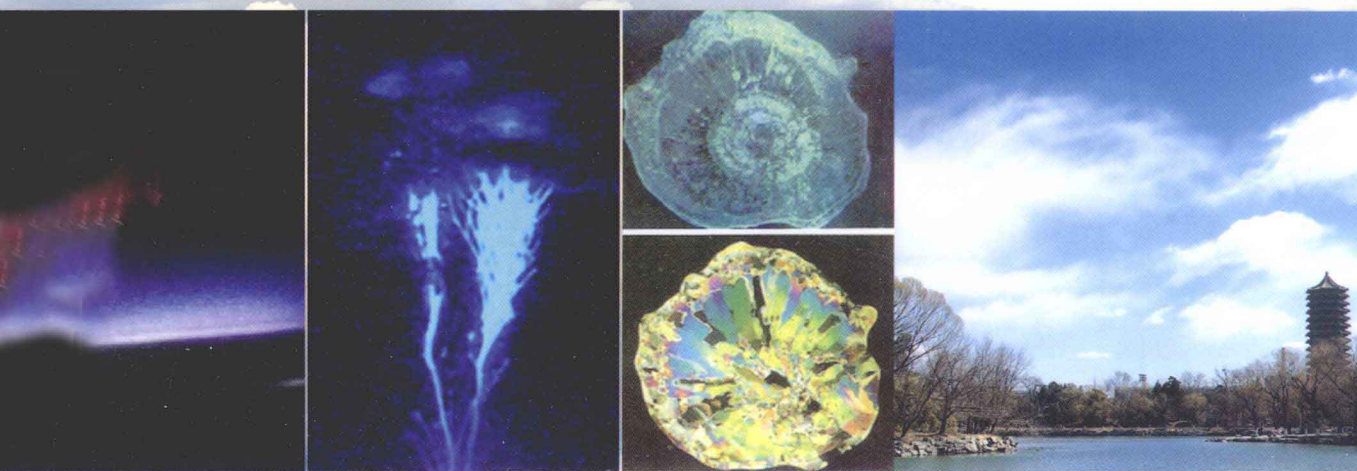
普通高等教育“九五”教育部重点教材

大气物理学

(第 2 版)

盛裴轩 毛节泰 李建国 葛正谟
张霁琛 桑建国 潘乃先 张宏升

编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“九五”教育部重点教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大气物理学

(第2版)

盛裴轩 毛节泰 李建国 葛正谟 编著
张霁琛 桑建国 潘乃先 张宏升



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

大气物理学/盛裴轩等编著. —2版. —北京: 北京大学出版社, 2013. 9
ISBN 978-7-301-23235-4

I. ①大… II. ①盛… 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(2013)第 222627 号

书 名: 大气物理学(第 2 版)

著作责任者: 盛裴轩 毛节泰 李建国 葛正谟 张霁琛 桑建国 潘乃先 张宏升 编著

责任编辑: 王树通 王 艳

标准书号: ISBN 978-7-301-23235-4/P·0086

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014

出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 35.5 印张 886 千字

2003 年 5 月第 1 版

2013 年 9 月第 2 版 2013 年 9 月第 1 次印刷(总第 10 次印刷)

印 数: 27001~30000 册

定 价: 69.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

第2版前言

本书第一版从2003年5月发行到现在,整整过去了10年.由于本书包含了大气物理学各分支学科的主要内容,不但被一些气象学科及环境学科的有关院校作为教材,也被许多气象工作者及科技人员作为业务参考的手册,受到广泛欢迎,多次重印.我们虽然多已达古稀年龄,仍十分关心我国大气科学事业的发展,能为大气物理学的教学和科研贡献一份微薄的力量,感到十分欣慰.

为满足需要,北京大学出版社建议我们推出修订版.在修订版中,除了改正原书中发现的错误及不合适的内容以外,为适应学科发展和全球极端天气频繁出现对雷电灾害防控的需要,对于大气电学内容作了比较大的更新和补充;另外,对大气边界层物理、云雾降水物理学基础和大气声学也作了部分修改;大气物理基础部分和大气光学则只有个别内容的增删.为此,我们邀请了中国科学院寒区旱区环境工程研究所的葛正谟研究员承担大气电学的编写和修改;我系张宏升教授正在从事大气环境科学方面的科研和教学,因此请他修改大气边界层物理部分;其他各章节基本上仍由原作者负责.盛裴轩对云雾降水物理学后半部分作了修改,并对全书文稿和图表作最后审定.

修订过程中,我系目前在教学和科研第一线的赵春生教授和李成才、李万彪副教授都提出了宝贵意见,给予我们极大帮助,在此表示感谢.还应特别提出的是,本书中的大气分层部分曾得到我校从事空间物理科学的肖佐教授的热情帮助,使之能从一个新的宏观的角度来了解大气的总体特征.这在第一版时因疏忽而未表达感谢,常感歉疚.我们还要对所有曾经帮助和支持过我们的同事和朋友深表感谢!

一本严谨的科技书,应该清楚地标明所引用材料和图表的来源,这是对科学和知识产权的尊重.但本书中有些因过去认识上的原因没有留下资料,有些因多次转引现已无从查找,只能在此遗憾地说明并对原作者表示感谢.

虽然我们在编写这本书第一版的过程中,是认真、细致和负责的,在重印时也更正了个别错误,但在重新修订整理时,还是遗憾地发现有一些不该有的疏忽和科学内容上的错误,辜负了读者的信任,也促使我们更认真严肃地对待本书的修改.但大气科学发展很快,本书的内容又比较丰富,涉及面广,受编著者的学识水平限制,错误、疏漏在所难免,希望使用本书的教师和读者给予批评、指正,并通报给我们.若有重印的机会,我们可以及时改正.

本书修改版出版之时,正值北京大学物理学科建立100周年纪念.自1913年设立物理学门类起,北大物理学科从萌芽发育为大树成林,已经走过一个世纪的风雨历程.在此,我们仅以此书向北大物理学科的前辈以及大气科学系的前辈致以深深的敬意,感谢他们为物理学科和大气科学发展奠定的基础.

编者
2013年9月

第1版前言

大气科学研究大气中各种现象的演变规律,这些现象包括物理的、化学的以及人类活动对大气的影响,探讨如何利用这些规律为人类社会和经济的发展服务.在漫长的历史发展过程中,大气科学形成了诸多分支学科,主要有大气物理学、大气探测、大气动力学、天气学、气候学、大气遥感、大气化学、边界层物理、数值预报及应用气象学等.大气物理学是大气科学的基础学科,涉及面很广,包括大气层的结构特征及其气象要素的三维时空分布,各种大气物理过程和现象,辐射能量的传输,大气热力过程,大气声、光、电现象的研究以及云雾降水物理等.

20世纪80年代末,北京大学大气物理与大气环境教研室曾同期出版了本科生教材《大气物理学》(王永生等)和《大气探测》(赵柏林、张霁琛等).这两本主要的专业教科书,以其严谨、丰富、先进的内容在国内部分院校和科研部门产生了广泛影响,并得到有关部门的奖励.十多年过去了,人们对赖以生存的地球大气环境及气候变化有了更多的关注,计算机技术及遥感技术等新技术日新月异的进步更是极大地促进了大气科学的发展.在此形势下,教学方法的不断改革,教材的不断更新就越来越显得迫切了.

在教育部高教司和校领导的关怀下,按照“九五”重点教材建设的精神,一批长期在大气物理学课程教学第一线、具有丰富教学实践经验的教师,在原《大气物理学》的基础上,重新编写了这本教科书.全书分为五篇,包括大气概论、大气物理基础(包括大气辐射、大气热力学、大气动力学)、大气边界层物理、云和降水物理学基础与大气电学以及大气光学、GPS气象和大气声学,共20章.其中第一篇和第六章由盛裴轩编写,第五章和第十六章~第十九章由毛节泰编写,第七章由桑建国编写,第八章~第十章由张霁琛编写,第十一章~第十五章由李建国编写,第二十章的前五节由毛节泰编写,其余部分由潘乃先编写.张霁琛还出色地完成了绝大部分插图的绘制工作.盛裴轩对各章节文稿和插图作了必要的补充和修改,并最后审定.大气科学系的同事尹宏、陈家宜、张铮、谢安、朱元竞和张宏升教授,李万彪和赵春生副教授以及环境中心的蔡旭晖副教授等对有关章节作了认真审核,提出了宝贵的修改意见.

本书是为大气科学专业本科生的大气物理学课程编写的专业课教材,也可供相关专业的本科生或研究生学习和参考.第一、第二篇介绍的是大气概况及大气物理学的基本概念和原理,属于专业基础课的范畴.应说明的是,因部分高校大气科学专业的本科生需必修一门《大气动力学》课程,该课程另有大量可供选择的专门教材,因此本书中的大气动力学部分相对比较精练,考虑到它是大气边界层物理和云动力学的基础,从全书的完整性和系统性考虑而设了这一章.后面三篇比较深入地介绍了大气物理的有关分支学科.大气边界层物理,因其与大气环境密切相关而发展很快,为使学生对这方面有基本了解,专门编写了一篇.大气光学部分在目前国内同类教科书中是比较有特色的,不但介绍了大气光学现象,还讨论了大气光学的有关基本理论,并加入了GPS气象等新的内容.大气声学中对声散射理论和声遥感作了介绍,以便有兴趣的读者作进一步研究.另外,大气概论、大气热力学和大气光学与原《大气物理学》中的相应章节是同一位作者编写的,故保留了原书的体系和大部分内容,但作了调整和修改.大气声

学的前五节也基本保留了原书的内容。

北京大学物理学院大气科学系是由原北京大学物理系和地球物理系的有关专业发展而来,其历史可追溯到院系调整前的清华大学气象系。几十年来风风雨雨,几经变革,大到一个专业的设置,小到一门课程的教材,都是几代人不断探索和长期积累的结果。因此我们几个人编写的这本书,实际上包含了前人的大量心血和劳动结晶。已故的严开伟先生在大气湍流领域,李其琛先生在大气光、声、电学方面的开创性工作永远值得我们铭记;赵柏林院士在云雾物理方面、尹宏教授在大气辐射方面的突出工作也为我们的教材奠定了基础。我们还应该感谢原《大气物理学》编写组的王永生、秦瑜、刘式达、殷宗昭等教授,他们曾经付出过的辛勤劳动为本书的诞生创造了有利条件。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。

由于大气物理学涉及的面很广,内容丰富,受编著者的学识水平限制,错误、疏漏在所难免,请读者给予批评指正。

编 者

2002年9月

目 录

第一篇 大气概论

第一章 行星大气和地球大气的演化 … (2)

1.1 行星大气 …… (2)

1.2 地球大气的演化 …… (3)

第二章 地球大气的成分及分布 …… (6)

2.1 干洁大气 …… (6)

2.1.1 干空气状态方程 …… (8)

2.1.2 碳的化合物 …… (9)

2.1.3 臭氧 …… (11)

2.1.4 硫的化合物 …… (16)

2.1.5 氮的化合物 …… (16)

2.1.6 氢、氦和气体的逃逸 …… (17)

2.2 大气中的水汽 …… (18)

2.2.1 大气湿度的表示方法 …… (19)

2.2.2 湿空气的状态方程 …… (23)

2.2.3 水汽的分布 …… (24)

2.3 大气气溶胶 …… (25)

2.3.1 气溶胶粒子的谱分布 …… (25)

2.3.2 气溶胶粒子的来源 …… (27)

2.3.3 气溶胶粒子在大气过程中的作用 …… (27)

习题 …… (28)

第三章 大气压力 …… (30)

3.1 大气静力学方程和气压-高度公式 …… (30)

3.1.1 大气静力学方程 …… (30)

3.1.2 气压-高度公式 …… (31)

3.1.3 大气标高 …… (32)

3.2 大气模式 …… (33)

3.2.1 等温大气 …… (33)

3.2.2 多元大气 …… (34)

3.2.3 均质大气 …… (35)

3.3 气压-位势高度公式 …… (35)

3.4 标准大气 …… (37)

3.5 气压的时空分布 …… (41)

3.5.1 气压系统及其随高度的变化 …… (41)

3.5.2 全球海平面气压分布特征 …… (43)

3.5.3 高空等压面图 …… (45)

3.5.4 气压随时间的变化 …… (46)

习题 …… (46)

第四章 大气的分层和结构 …… (48)

4.1 大气分层 …… (48)

4.1.1 按热力结构分层 …… (49)

4.1.2 按化学成分分层 …… (52)

4.1.3 外大气层 …… (53)

4.1.4 按电磁特性分层 …… (53)

4.2 大气质量及其垂直分布 …… (55)

4.3 大气的主要下边界面——海洋 …… (56)

4.3.1 海洋的物理特性 …… (56)

4.3.2 海流 …… (57)

习题 …… (59)

参考文献 …… (60)

第二篇 大气物理基础

第五章 地面和大气中的辐射过程 …… (62)

5.1 辐射的基本概念 …… (62)

5.1.1 电磁辐射 …… (62)

5.1.2 描述辐射场的物理量 …… (63)

5.2 辐射的物理规律 …… (66)

5.2.1 吸收率、反射率和透射率 …… (66)

5.2.2 平衡辐射的基本规律 …… (67)

5.2.3 太阳辐射和地球辐射的差别 …… (71)

5.3 地球大气与辐射的相互作用 …… (72)

5.3.1 大气对辐射吸收的物理过程 …… (72)

5.3.2	大气吸收光谱	(76)	6.3.2	假相当位温	(139)
5.3.3	大气对辐射的散射	(78)	6.3.3	焚风	(141)
5.3.4	辐射能在介质中的传输	(81)	6.4	大气热力学图解	(142)
5.4	太阳辐射在地球大气中的传输	(84)	6.4.1	温度对数压力图解的构造	(142)
5.4.1	太阳和太阳辐射	(84)	6.4.2	温度对数压力图解的应用	(144)
5.4.2	大气上界的太阳辐射能	(88)	6.4.3	斜 $T-\ln p$ 图简介	(145)
5.4.3	太阳的直接辐射	(91)	6.4.4	熵图简介	(145)
5.4.4	天空的散射辐射	(99)	6.4.5	能量图解的一般原理	(146)
5.4.5	地面对太阳辐射的反射和吸收	(100)	6.5	绝热混合过程	(147)
5.5	地球-大气系统的长波辐射	(103)	6.5.1	绝热等压混合(水平混合)	(147)
5.5.1	地面的长波辐射特性	(103)	6.5.2	不同高度空气的绝热混合(垂直混合)	(148)
5.5.2	长波辐射在大气中的传输	(104)	6.5.3	湍流混合层	(148)
5.5.3	大气顶部射出的长波辐射	(107)	6.6	等压冷却过程	(149)
5.6	地面、大气及地-气系统的辐射平衡	(109)	6.7	温湿参量	(150)
5.6.1	地-气系统的辐射平衡	(109)	6.7.1	相当温度和湿球温度	(150)
5.6.2	地球大气的温室效应	(110)	6.7.2	假湿球温度和假湿球位温	(152)
5.6.3	辐射差额沿纬度的变化	(112)	6.7.3	假相当位温和假相当温度	(153)
5.6.4	地面、大气和地-气系统的辐射差额	(112)	6.8	大气的静力稳定度	(154)
5.6.5	观测到的辐射平衡	(117)	6.8.1	静力稳定度判据	(155)
思考题		(120)	6.8.2	条件性不稳定	(157)
习题		(120)	6.8.3	关于薄层法和夹卷作用的讨论	(161)
参考文献		(122)	6.9	整层气层升降时稳定度的变化	(164)
第六章 大气热力学基础		(123)	6.9.1	未饱和情况及下沉逆温	(164)
6.1	应用于大气的热力学基本规律	(123)	6.9.2	对流性不稳定(位势不稳定)	(166)
6.1.1	预备知识	(123)	6.10	逆温层	(167)
6.1.2	热力学第一定律	(124)	思考题		(168)
6.1.3	热力学第二定律和态函数	(125)	习题		(169)
6.1.4	含液态水的饱和湿空气系统	(128)	参考文献		(169)
6.1.5	大气中的能量	(132)	第七章 大气动力学		(170)
6.2	大气中的干绝热过程	(134)	7.1	大气动力学基本方程组	(171)
6.2.1	干绝热减温率	(135)	7.1.1	旋转坐标系中的牛顿定律	(171)
6.2.2	位温	(135)	7.1.2	标准坐标系中的运动方程	(172)
6.2.3	干绝热上升时的露点变化和抬升 凝结高度	(137)	7.1.3	运动方程的张量形式	(175)
6.3	可逆的饱和绝热过程和假绝热过程	(138)	7.1.4	连续方程	(176)
6.3.1	湿绝热减温率	(138)	7.1.5	热力学方程	(176)
			7.1.6	大气动力-热力学方程组	(176)
			7.2	大气运动的尺度分析及近似	(177)
			7.2.1	大气运动的尺度分析	(177)

7.2.2	连续方程的简化	(178)
7.2.3	水平运动方程的简化及准地转近似	(180)
7.2.4	垂直运动方程的简化和准静力近似	(182)
7.2.5	空气的热力学方程和状态方程	(184)
7.2.6	包辛涅斯克方程组	(186)
7.2.7	大气动力学方程组的另外形式	(186)
7.3	大气中的准地转运动	(187)
7.3.1	气压坐标系	(188)
7.3.2	自由大气中的风场和高度场	(188)
7.4	风随高度的变化和热成风	(189)
7.5	大气中的圆周运动和梯度平衡	(191)
7.6	涡度、环流与环流定理	(193)
7.6.1	涡度与环流	(193)
7.6.2	涡旋流	(194)
7.6.3	开尔文环流定理和皮叶克尼斯环流定理	(196)
7.7	涡度方程	(199)
7.7.1	垂直涡度的标量方程	(199)
7.7.2	涡度方程的尺度分析	(200)
7.8	大气中的重力波、声波及罗斯贝波	(202)
7.8.1	波动方程与波动参数	(202)
7.8.2	表面重力波	(204)
7.8.3	不同密度的流体界面上的波动	(205)
7.8.4	重力内波	(206)
7.8.5	运动大气的重力内波	(210)
7.8.6	旋转地球上的惯性重力内波	(212)
7.8.7	大气中的声波	(214)
7.8.8	罗斯贝波	(216)
思考题		(219)
习题		(219)
参考文献		(220)

第三篇 大气边界层物理

第八章 大气湍流基础	(222)
8.1 大气湍流	(222)

8.1.1	湍流现象与雷诺实验	(222)
8.1.2	大气湍流的基本特征	(223)
8.1.3	大气湍流的产生和维持	(224)
8.1.4	泰勒假设	(225)
8.2	大气湍流的统计描述	(226)
8.2.1	雷诺平均	(226)
8.2.2	湍流宏观统计参数	(228)
8.2.3	湍流微观能谱	(229)
8.3	大气湍流控制方程	(230)
8.3.1	基本方程	(231)
8.3.2	雷诺平均方程	(231)
8.3.3	湍流动能方程	(234)
8.3.4	平均运动能量方程	(235)
8.4	大气湍流运动和稳定度判据	(236)
8.4.1	大气湍流的平稳性、均匀性和各态历经	(236)
8.4.2	湍流通量和雷诺应力	(236)
8.4.3	湍流闭合及混合长理论	(238)
8.4.4	大气湍流的稳定性判据	(239)
8.5	科尔莫戈罗夫的局地均匀各向同性湍流理论与湍流动能的串级输送	(240)
参考文献		(242)
第九章 大气边界层	(243)	
9.1	大气边界层特征	(243)
9.1.1	大气边界层的结构和分类	(243)
9.1.2	气象要素的日变化和边界层的昼夜演变	(244)
9.1.3	边界层中的风和气流	(245)
9.2	近地面层规律	(246)
9.2.1	近地面层的定义和厚度	(246)
9.2.2	近地面层莫宁-奥布霍夫相似性理论	(247)
9.2.3	近地面廓线规律的实验结果	(250)
9.2.4	空气动力学参数特征——地表粗糙长度和零值位移的计算	(251)
9.2.5	近地面层大气湍流统计量	(253)
9.2.6	近地面层大气湍流能谱的相似规律	(255)
9.2.7	近地面湍流通量与热量平衡	(258)

9.3	中性大气边界层	(261)
9.3.1	埃克曼螺线	(261)
9.3.2	埃克曼抽吸	(263)
9.3.3	中性大气边界层的厚度	(264)
9.4	不稳定边界层(对流边界层、混合层)	(265)
9.4.1	对流边界层的基本结构	(266)
9.4.2	混合层发展的预测模式	(269)
9.5	稳定边界层	(270)
9.5.1	一般特征	(271)
9.5.2	稳定大气边界层的预测模式	(272)
9.5.3	低空急流	(274)
	习题	(275)
	参考文献	(276)
第十章 非均一下垫面对边界层的影响		
10.1	内边界层	(278)
10.1.1	光滑流与粗糙流	(278)
10.1.2	动力内边界层	(279)
10.1.3	热内边界层	(282)
10.1.4	内边界层对扩散的影响	(284)
10.2	山谷风和海陆风	(284)
10.2.1	山谷风	(285)
10.2.2	海陆风	(285)
10.3	过山气流	(287)
10.3.1	中性层结条件下的过山气流	(288)
10.3.2	稳定层结条件下的过山气流	(289)
10.4	城市热岛	(291)
	参考文献	(293)

第四篇 云和降水物理学基础 与大气电学

第十一章 云雾形成的宏观条件及一般特征		(296)
11.1	云和降水的分类和生成条件	(296)
11.1.1	云和降水的分类	(296)
11.1.2	云雾生成的宏观条件	(297)
11.2	云雾降水的宏观特征	(299)

11.2.1	对流云宏观特征	(299)
11.2.2	对流风暴	(302)
11.2.3	层状云宏观特性	(304)
11.2.4	卷云的宏观特征	(304)
11.2.5	降水的宏观特征	(305)
11.3	云雾降水的微观特征	(305)
11.3.1	描述方法与尺度分布特征	(306)
11.3.2	云雾滴谱分布	(307)
11.3.3	冰雪晶微观特征	(309)
11.3.4	降水粒子的谱分布	(313)
	习题	(314)
	参考文献	(315)

第十二章 云雾降水形成的微物理过程

12.1	云粒子的均质核化	(316)
12.1.1	云滴均质核化和开尔文方程	(316)
12.1.2	核化率	(318)
12.1.3	冰相均质核化	(319)
12.2	云粒子的异质核化	(321)
12.2.1	不可溶性粒子的成核作用	(321)
12.2.2	可溶性粒子的成核作用	(323)
12.2.3	离子诱导核化	(325)
12.2.4	冰相的异质核化	(325)
12.3	大气凝结核和大气冰核	(326)
12.3.1	云凝结核	(326)
12.3.2	大气冰核	(326)
12.4	云滴的凝结增长	(327)
12.4.1	单滴的凝结增长	(328)
12.4.2	群滴的凝结增长	(331)
12.4.3	云滴的起伏凝结增长	(333)
12.5	冰晶的凝华增长	(334)
12.5.1	静稳条件下冰晶的凝华增长	(334)
12.5.2	混合云中冰晶的凝华增长	(335)
12.6	水成物粒子的降落和碰并	(336)
12.6.1	雨滴的降落、变形和破碎	(336)
12.6.2	水滴的下落末速度	(337)
12.6.3	冰雪晶下落末速度	(339)
12.6.4	粒子的碰并效率	(341)
12.7	云滴和雨滴的碰并增长	(344)

12.7.1 重力碰并增长连续模式	(345)	第十五章 大气电学	(389)
12.7.2 随机碰并增长	(347)	15.1 晴天大气电场	(389)
12.7.3 起伏重力碰并增长	(348)	15.2 大气离子与电导率	(391)
12.8 冰雪晶的碰并增长	(349)	15.2.1 大气离子的产生和复合	(391)
12.9 层状云降水的形成	(350)	15.2.2 大气离子的物理特征	(392)
12.10 积状云降水的形成	(352)	15.2.3 晴天大气电导率	(394)
12.11 冰雹的形成	(353)	15.3 晴天大气的电荷与电流	(394)
12.11.1 冰雹的结构	(353)	15.3.1 晴天大气体电荷	(394)
12.11.2 冰雹增长的微物理过程	(354)	15.3.2 晴天大气电流	(395)
12.11.3 冰雹的形成机制	(355)	15.4 云中大气电结构	(396)
习题	(358)	15.4.1 云雾降水粒子的电荷	(396)
参考文献	(358)	15.4.2 层状云大气电结构	(398)
第十三章 积云动力学及云模式简介		15.4.3 积状云大气电结构	(398)
	(360)	15.5 雷雨云的起电机制	(400)
13.1 积云动力学方程组	(360)	15.5.1 离子扩散和选择性吸附离子起电 机制	(401)
13.1.1 积云动力学基本方程组	(360)	15.5.2 碰撞感应起电机制	(403)
13.1.2 积云动力学方程组的另一种形式	(364)	15.5.3 非感应起电机制	(405)
		15.5.4 起电机制的数值模拟	(407)
13.2 云雾数值模式	(366)	15.6 雷电的监测	(407)
13.2.1 积云一维模式	(367)	15.6.1 闪电的照相观测	(408)
13.2.2 多维模式简介	(372)	15.6.2 大气静电场的测量	(408)
13.3 微物理过程的处理方法	(375)	15.6.3 闪电定位	(409)
参考文献	(377)	15.7 大气中的放电现象	(411)
第十四章 人工影响天气简介	(379)	15.7.1 尖端放电	(411)
14.1 人工影响云雾原理	(379)	15.7.2 地闪和云闪	(413)
14.1.1 人工影响云雾降水原理	(379)	15.7.3 几种罕见的闪电现象	(420)
14.1.2 人工抑制冰雹原理	(380)	15.8 闪电引起的物理效应	(422)
14.1.3 人工消雾原理	(381)	15.8.1 闪电时的电磁场变化	(422)
14.1.4 其他人工影响天气试验	(381)	15.8.2 闪电造成的地面静电场变化	(423)
14.2 人工影响天气催化剂	(382)	15.8.3 雷	(423)
14.2.1 人工冰核	(382)	15.8.4 天电	(425)
14.2.2 致冷剂	(383)	15.8.5 舒曼共振	(426)
14.2.3 吸湿性颗粒	(383)	15.8.6 闪电与气候变化	(426)
14.3 人工增雨效果检验	(384)	15.9 人工影响雷电简介	(427)
14.3.1 物理检验	(384)	15.9.1 抑制云中起电过程	(427)
14.3.2 统计检验	(384)	15.9.2 人工引发雷电	(428)
14.4 云数值模式在人工影响天气中的 应用	(385)	15.10 全球大气电学过程	(430)
参考文献	(388)	15.10.1 全球大气电学参量	(430)
		15.10.2 地-气间的电荷输送及电荷平衡	(431)

15.10.3 全球大气电过程的球形电容器模型	(431)
习题	(432)
参考文献	(433)

第五篇 大气光学、GPS 气象和大气声学

第十六章 散射的基本理论 (436)

16.1 散射	(436)
16.1.1 散射过程	(436)
16.1.2 多粒子散射	(437)
16.1.3 散射的几何图像与参数	(438)
16.1.4 散射与削弱的基本关系式	(440)
16.2 瑞利分子散射	(440)
16.3 均匀球状粒子的散射——米散射	(444)
16.3.1 球状粒子对电磁波的散射和吸收	(444)
16.3.2 米散射的特性	(445)
16.4 实际大气中的散射	(449)
16.4.1 分子大气的散射	(449)
16.4.2 气溶胶的散射	(450)
16.4.3 非球形粒子的散射	(453)
16.5 散射参量的观测	(455)
16.5.1 大气消光系数的测量	(455)
16.5.2 大气散射函数的测量	(458)
习题	(459)
参考文献	(460)

第十七章 大气层的光学现象 (461)

17.1 辐射传输方程	(461)
17.1.1 方程的建立	(461)
17.1.2 辐射传输方程的解	(462)
17.1.3 蒙特卡罗方法	(463)
17.2 天空亮度和色彩的分布	(464)
17.2.1 天空亮度的分布	(464)
17.2.2 天空散射光的偏振	(466)
17.2.3 天空的色彩	(466)
17.3 曙暮光	(467)
17.4 能见度问题	(470)

17.4.1 对比和对比感阈	(471)
17.4.2 对比度传输系数	(472)
17.4.3 气象能见距	(473)
17.4.4 从空中观测地面的能见度	(474)
17.4.5 夜间灯光能见度	(476)
17.5 云雾光学问题	(477)
17.5.1 云雾的含水量和消光系数的关系	(477)
17.5.2 云雾的散射函数和消光系数	(478)
17.5.3 华	(480)
17.5.4 虹和霓	(482)
17.5.5 晕	(484)
习题	(486)
参考文献	(486)

第十八章 光线在大气中的折射 (488)

18.1 大气的折射率	(488)
18.1.1 对流层空气的折射率	(488)
18.1.2 大气折射率的测量	(490)
18.1.3 电离层中的折射率	(490)
18.2 射线在大气中的折射	(491)
18.2.1 射线的轨迹方程——斯涅耳定律	(491)
18.2.2 射线的曲率半径	(492)
18.2.3 折射的分类	(493)
18.2.4 修正折射率及其模数	(494)
18.3 大气折射率对测量的影响	(495)
18.3.1 定位测量的误差	(495)
18.3.2 大气水平非均一对射线折射率的影响	(496)
18.4 天文折射和地文折射	(497)
18.4.1 天文折射现象	(497)
18.4.2 地文折射现象	(498)
习题	(499)
参考文献	(499)

第十九章 GPS 气象 (500)

19.1 GPS 系统	(500)
19.2 GPS 定位原理	(500)
19.3 大气对 GPS 观测的影响	(501)
19.4 地基 GPS 测量大气水汽原理	(502)

19.4.1	用双频法消除电离层影响	(502)	20.6.1	声波在湍流大气中的传播方程	(520)
19.4.2	静力延迟	(503)	20.6.2	声波在静止湍流大气中的散射	(521)
19.4.3	由湿延迟计算大气积分水汽含量	(504)	20.6.3	考虑湿度起伏的声波散射	(523)
19.5	低轨卫星星载 GPS 接收机探测大气的 温度廓线	(505)	20.7	声波在大气中的衰减	(524)
	参考文献	(507)	20.7.1	大气分子对声波的吸收衰减	(524)
第二十章	大气声学	(508)	20.7.2	声波的发散衰减	(526)
20.1	一些基本概念和定义	(509)	20.7.3	大气对声波的逾量衰减	(527)
20.2	理想气体小振幅绝热声波的波动方程	(510)	20.8	源于大自然的声波	(528)
20.3	大气的声学特性	(512)	20.8.1	天气现象产生的声波和次声波	(529)
20.3.1	大气中的声速	(512)	20.8.2	其他来源的次声波	(530)
20.3.2	声速在大气中的垂直分布	(513)	20.9	大气声遥感	(530)
20.4	研究声波传播的几何声学方法	(513)	20.9.1	大气边界层主动声遥感的原理	(530)
20.4.1	几何声学的基本方程——埃克纳 方程	(513)	20.9.2	声达遥感边界层大气	(534)
20.4.2	声线轨迹的斯涅耳定律	(515)	20.9.3	声达回波图像揭示的大气现象	(536)
20.5	实际大气中的声线	(517)	20.9.4	声的被动遥感	(541)
20.5.1	无风时的声线轨迹	(517)	习题	(542)	
20.5.2	有风时的声线轨迹	(518)	参考文献	(543)	
20.6	声波在大气中的散射	(519)	部分习题答案	(545)	
			附录	(549)	
			表 A	本书内有关的特征数	(549)
			表 B	特征数定义中使用的符号	(549)
			表 C	常用物理常数	(550)

第一篇 大气概论

从人造卫星上观测大气,它好像是地球的一层薄壳,呈美丽的浅蓝色而且透明.这薄薄的一层大气是地球生命赖以生存的保障.“薄壳”,是因为大气质量的50%集中在离地面6 km以下的低空,而且99.9%是在离地面50 km的高度内,这个厚度还不到地球半径的1%.然而,地球大气又是没有确定上界的,因为大气密度随着高度的增加而呈指数减小,逐渐过渡到星际空间.若以极光或流星辉迹出现的高度定义大气上界,高度大约在地表面以上1000~1200 km;若按现代卫星运行轨道衰减的速率推测,大气上界约在2500~3000 km的高空.

太阳系的几大行星除水星外几乎都被一层大气所包围.本篇首先简单介绍行星大气的状况,目的是为了有利于以全面的和发展的眼光探讨地球大气的现状和演化.考虑到人们对生存环境和全球气候变化的日益关注,本篇也简单地介绍了地球大气微量成分的源、汇、浓度变化及循环过程,其中重点是二氧化碳和臭氧.

大气是三维空间的,又是呈层状分布的.本篇将通过大气的垂直分层简要介绍大气温度、压力、成分和电离状况的垂直分布特征,重点是与人类关系最密切且包含3/4大气质量和主要天气现象的对流层.

第一章 行星大气和地球大气的演化

太阳系原有 9 大行星, 2006 年 8 月 24 日国际天文学联合会决定冥王星不属于太阳系行星, 自此, 太阳系就只有 8 大行星(表 1.1)。这些行星的大气化学成分、物理状态及结构都有不同的特点, 它们和各个行星在太阳系中的位置、大小以及密度等有关, 因此研究行星大气有助于深刻了解我们的地球大气, 也有助于探索地球大气的演化。

表 1.1 行星大气概况

行星	表面平均温度/K	表面压力/atm ^①	重力加速度/(m·s ⁻²)	逃逸速度/(km·s ⁻¹)	距日平均距离 ^②	主要成分	说明
水星	阳面 600~700 阴面 100		3.7	4.3	0.4		未发现大气
金星	750	90	8.8	10.3	0.7	CO ₂ 97% N ₂ 3%	被浓硫酸的厚云雾覆盖
地球	288	1	9.8	11.2	1.0	N ₂ 78% O ₂ 21%	
火星	240	0.005~0.007	3.8	5.0	1.5	CO ₂ 95% N ₂ , Ar, CO	大气稀薄
木星	134(云顶)	2(云顶)	26.2	60	5.2	H ₂ 88.6% He 11.2%	大气厚度约 1000 km
土星	78		11.3	36	9.5	H ₂ , He, NH ₃	
天王星	62		9.7	21	19.2	H ₂ , He	浓密大气
海王星	低于 46		11.4	23	30.1	H ₂ , CH ₄	浓密云层

① 1 atm=1013.25 hPa; ② 以日地距离为 1.0。

1.1 行星大气

行星大气是包裹着行星体的中性气体和电离气体的总称。按物理性质和化学组成的不同, 太阳系的 8 大行星可分成类地行星和类木行星两类, 每类各 4 颗。类地行星指水星、金星、地球和火星, 与类木行星相比, 其质量、体积都比较小, 有固体表面, 化学组成以重物质为主; 而类木行星没有固体表面, 化学组成以氢、氦、氖及甲烷等轻物质为主。另一种分类法以火星与木星之间的小行星带为界, 分成离太阳较近的内行星和远离太阳的外行星(包括冥王星)。这两种分类法比较一致。本节主要讨论类地行星的特点。

1. 水星

水星是类地行星中离太阳最近且质量最小的行星, 其质量是地球的 5.54%, 重力加速度

只有 3.7 m/s^2 。根据 1973 年“水手 10 号”行星探测器飞跃过水星时的探测,水星上几乎不存在大气,并且没有发现任何曾经被水浸蚀过的痕迹,表明它也不存在水。没有了大气和水的调节作用,水星的日夜温差高达 600 K 以上。

2. 金星

金星是地球的姐妹星,其大小、质量和密度都与地球接近,却有完全不同的大气。金星的大气是地球大气的 90 倍,浓密的大气层分布在 100 km 高度以下,它能反射掉太阳光的 $3/4$,所以金星十分明亮。大气主要成分是二氧化碳,达 97% ,低层可能达 99% ,约有 3% 的氮和少量水汽、一氧化碳等。距金星地面 $20\sim 30 \text{ km}$ 至 70 km 的高空密布着浓硫酸滴和硫酸气溶胶组成的浓云雾,呈黄色。金星大气的温度随高度下降:表面温度约达 750 K ,在 $0\sim 60 \text{ km}$ 高度内迅速降低到 300 K ; 60 km 以上下降缓慢, 68 km 以上温度接近不变,达到 200 K 左右。金星大气的运动激烈, 60 多千米高空的风速约达 100 m/s (地球表面风速大于 33 m/s 已是 12 级大风),且闪电和雷暴现象频繁。

距太阳近(仅 0.7 日地距离)可能是金星高温的重要原因,由于太阳辐射强,温度高,水和二氧化碳只能以气态存在。二氧化碳有强烈的温室效应,再加上浓密云层不能散热,使金星表面的温度越来越高,最后平衡在 750 K 左右,并且没有季节、昼夜和纬度的区别。

3. 火星

火星的质量很小,平均直径为 6747 km ,约为地球的一半,地心引力仅为地球的 38% ,因此它的大气很稀薄,日夜温差高达 100 K 。主要大气成分是二氧化碳,还有少量氮和氢。火星比地球远离太阳,单位面积上受到的太阳辐射仅为地球的 43% ,表面温度低。

火星一直是人类感兴趣的星球之一。1962 年开始,苏联发射了“火星”系列探测器,其中的“火星 3 号”登陆舱实现了软着陆。以后美国也发射了一系列太空探测器。1999 年 3 月,美国航空航天局的火星全球巡视计划在寻找火星水方面取得重大进展,通过轨道相机进行高分辨率成像探测,看到了干枯的河床和两大片曾经是海的平坦低地,从而推测火星上曾经有过大量的水。2004 年,美国的“勇气号”进一步确认,火星白色的极冠大部分是由水冰组成。2012 年 8 月 6 日,美国火星探测器“好奇号”成功登陆火星,将展开为期两年的火星探测任务。

综上所述,除水星外的几大行星都被一层大气所包围,但类地行星和类木行星的大气表现出两种不同的类型。在宇宙空间里,物质世界的化学元素丰度随元素原子量的增加而减少。因此,太阳系各行星大气在形成初期都应以轻元素如氢、氦和碳等为主,由于行星距太阳的远近不同、星球尺度的大小不同,以及公转、自转周期和轨道的差异,经过几十亿年的演化,形成了现在各不相同的行星大气。在小行星带以内距太阳近的各个内行星上,因太阳辐射强烈,星球表面的高温及太阳风的作用使原始大气很快散失,由行星内部火山喷发及其他化学过程产生的第二代大气以二氧化碳为主(地球例外);而距太阳远的各个外行星上温度极低,原始大气消散缓慢,所以行星大气仍以氢、氦和甲烷等为主。

1.2 地球大气的演化

地球大气以氮气和氧气为主,这在迄今为止所有已发现的天体大气中是唯一的。地球又是太阳系中唯一的蔚蓝色星球,空气分子的散射和辽阔的海洋使我们的行星在太空中散发着美丽的蓝色幽光。

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 20 世纪 70 年代测量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.由表 1.2 可见,它与实际的地球大气相差甚远.

表 1.2 地球及其相邻行星大气的主要化学成分(单位: hPa)(引自王明星,1991)

大气成分	金星	行星地球	火星	实际地球	实际地球/行星地球
CO ₂	90 000	300	5	0.3	1/1000
N ₂	1000	30	0.05	780	26
O ₂	0	0.3	0.1	210	700

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.由于无法得到演化过程中各个阶段的大气样本,只能依据地层的化石结构和行星大气资料,结合物理、化学、生物学原理和实验等,用模拟方法或逻辑推理方法进行研究.因问题复杂,故难度很大.关于地球大气的起源和演变有多种学说,但都有一个共识,即必须把大气看成地球组合系统中的一部分,即由气圈、水圈、岩石圈和生物圈组成的地球系统是相互联系的,物质是可以互相转化的,而且大气仅是其中很小的一部分.

地球大气的演化大体可分为原始大气、次生大气(还原大气)和现代大气(氧化大气)三个阶段.

(1) 原始大气.地球形成初期的原始大气应是以宇宙中最丰富的轻物质 H₂, He 和 CO 为主.由于太阳风(年轻恒星会喷发大量的物质流,此时正值太阳形成初期)和地球升温的作用,使原始大气逐渐向宇宙空间膨胀并逃逸散失.估计在 45 亿年前或晚些时候,地球上是没有大气的.

(2) 次生大气(45 亿~20 亿年前).地球逐渐冷却(估计地表温度为 -15~-10℃)以后,由于造山运动、火山喷发和从地幔中释放出地壳内原来吸附的气体,形成了次生大气,其主要成分是 CO₂, CH₄, NH₃ 和 H₂O 等.

火山喷发物中含有约 80% 的水汽,其次为 CO₂, 以及少量的氮、硫或硫化物(SO₂, H₂S) 等.因大气只能容纳少量水汽,大部分水汽形成云雾和降水,成为地表水——海洋和湖泊.据估计,若以过去一个世纪火山喷发的蒸气率作为地球形成初期的平均蒸气率,则现在地球上水圈的总质量是很小的,它比由火山喷发进入大气的总水汽量约小两个数量级.究其原因,可能是海洋深处水体的渗漏或水汽被紫外辐射分解破坏而消失.

在大约 30 亿年前,CO₂ 浓度是现在的 10 倍.丰富的 CO₂ 和水汽产生的温室效应,使地球表面温度逐渐升高而达到 300℃ 左右.在此高温下,大量 CO₂ 气体又通过化学反应生成了碳酸盐累积在地壳中,降低了大气中的 CO₂ 含量,也降低了大气的温度.

(3) 现代大气.现代地球大气以氮气和氧气为主.在地球上出现生物以前,地球大气中的游离态氧极少,臭氧的浓度就更小.这少量氧气是水汽被太阳紫外辐射离解(光致离解)产生的:



上式中 h 是普朗克常数, ν 是频率.光解过程生成的原子氧可在有第三者(M)存在的条件下结