

大气辐射学论

(第2版)

[美] K.N.LIOU 著
郭彩丽 周诗健 译
周秀骥 张文建 校



气象出版社

An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)

by K.N.Liou

Copyright © 2002, 1980, Elsevier Science (USA).

Translation Copyright © 2004, China Meteorological Press.

All rights reserved.

Elsevier Science (USA) 525 B Street, Suite 1900, San Diego, CA 92101-4495, USA
Tel+1 (619) 231 6616; Fax+1 (619) 699 6422; www.elsevier.com

原著版权 © 美国埃塞维亚科学出版集团 1980, 2002

中译本版权 © 气象出版社 2004

保留所有权利



ACADEMIC
PRESS

大气辐射导论

(第2版)

[美] K.N.LIU 著

郭彩丽 周诗健 译

周秀骥 张文建 校

气象出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大气辐射导论:第2版/(美)廖国男著;郭彩丽,周诗健译. —2版.—北京:气象出版社,2004.10

书名原文:An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)

ISBN 7-5029-3864-8

I. 大… II. ①廖…②郭…③周… III. 大气辐射 IV. P351.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 116564 号

北京市版权局著作权合同登记:图字 01-2002-6392 号

大气辐射导论(第2版)

Daqi Fushe Daolun

出版者:气象出版社

地址:北京中关村南大街46号

邮编:100081

网址:<http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcs@263.net

电话:总编室 010-68407112 发行部 010-62175925

责任编辑:陈云峰 郭彩丽

终审:章澄昌

封面设计:王伟

责任技编:都平

责任校对:韩芳

印刷者:北京智力达印刷有限公司

发行者:气象出版社

开本:787×1092 1/16

印张:39.5

字数:695千字

版次:2004年10月第一版

印次:2004年10月第一次印刷

印数:1—5000

定价:120.00元

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

审校者序

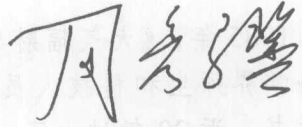
1985年,《大气辐射导论》中译本首次出版,曾受到我国大气科学界师生和科技人员的广泛欢迎,成为大家常用的教材和参考书。近20年过去了,现代天气气候学与地球环境遥感的迅速发展,有力地推动了大气辐射学的研究,取得了不少新的进展。美国工程院院士、美国加州大学洛杉矶分校廖国男教授及时综合了这些成果,殚精竭虑地对原著进行了大篇幅的充实,在原版的基础上增加了约70%的新内容,于2002年完成了《大气辐射导论》的第二版。阅读新版,将帮助读者在掌握基本理论的基础上尽快步入现代大气辐射学的前沿。

廖国男教授长期在大气辐射理论的应用方面从事教学和研究工作,为现代大气辐射学发展做出了杰出的贡献。他的专著《大气辐射导论》被译成多种文字,广泛流传。多年来,廖国男教授与我国大气科学家进行了多方面的真诚的学术交流与合作研究,积极推动了我国大气辐射学的发展。1986年,他与我密切合作,共同组织了北京国际辐射会议。他积极推动了国家自然科学基金委员会两个重大项目“黑河流域地表相互作用”和“内蒙古草原地表与大气观测试验”的启动与实施。廖国男教授热心为我国培养了多名青年科学家,不少已成为大气辐射领域的优秀人才。近年来,廖国男教授与我们合作,把他研究多年建立的大气辐射模式与我国的大气与气候数值模式相耦合,开展数值模拟实验研究。

现在,在廖国男教授的大力支持下,《大气辐射导论》第二版中译本又出版了。我相信,它将继续受到我国广大读者的欢迎。在此,我深切感谢廖国男教授多年来对我国大气科学事业

发展的关心与帮助。在中译本的出版过程中，气象出版社郭彩丽女士和周诗健先生通过他们辛勤而严谨的工作，高质量地完成了该书的翻译。我衷心地感谢他们。

书告献审



(周秀骥)

2004年10月

中国气象科学研究院

中文版序

大气辐射学的主要目的是了解和定量分析在行星大气中分子、气溶胶、云、地面与太阳及行星辐射的能量交换作用，其进展与辐射传输的理论和各种波长的辐射仪探测的发展密切相关。

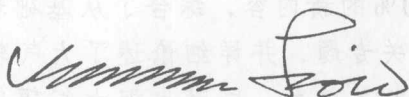
《大气辐射导论》于1980年首次出版，其后被译为多种文字，成为美国和其他许多国家大学大气辐射的教科书，并常为辐射传输和光散射领域的科学家所参考和引用。1985年，本书由中国气象出版社翻译为中文出版，在中国成为颇受欢迎的大气辐射教材和参考书。从本书首版至今20余年来，大气辐射研究已取得很大进展，特别是近年来，和大气辐射有直接关联的全球变暖和遥感成为大气科学中的重要研究和发展领域。因此，作者于2002年又完成了本书的第二版，在原版的基础上增加了约70%的新内容，综合了从基础理论到实际应用的所有大气辐射有关专题，并详细论述了大气辐射与天气和气候系统之间的密切相关关系，同时也把大气辐射与遥感这个与其他许多科研领域相关的学科系统地结合起来。

作为一名海外华人，作者一直希望为中国的大气科学发展有所贡献。从1980年后，作者就开始与中国大气科学家广泛合作和深入交流。作者曾于1986年代表美国气象学会和国际辐射学会，与当时担任中国国家气象局气象科学研究院院长的周秀骥院士共同发起召开了北京国际辐射会议，探讨了青藏高原独特的辐射和热量平衡特征及其对天气和气候过程的重要影响以及其他重要的辐射和遥感研究项目。最近几年，云和气溶胶辐射传输在气候模拟中的参数化成为很重要的研究课题，尤其是

气溶胶与中国北方沙尘暴对区域气候和云的形成影响，更是中国及全球大气研究的重点项目。气溶胶的探测及其直接的气候效应，其根基就是太阳光的散射及吸收。

本书特别适合于学习大气科学的大学生和研究生，以及从事大气辐射、气候和卫星探测工作的科研人员。对于行星探测、电磁波散射和传播、光学，以及地球物理等学科的研究工作者也有相当的参考价值。希望本书第二版中文译本的出版，能对中国大气科学和气候研究的发展起到推进作用，并与这方面的科研工作者相互勉励，百尺竿头，更进一步。

最后，作者特别感谢中国气象科学研究院名誉院长、中国科学院院士周秀骥先生，以及中国气象局监测网络司司长张文建博士对此书在中国的出版所给予的大力支持和赞助。中国气象出版社的郭彩丽女士、周诗健先生对本书作了严谨的翻译，并提出了不少宝贵意见；周秀骥院士及张文建博士对全书的翻译作了仔细的审校；同事古瑜博士在整个过程中给予了很多帮助。作者在此表示衷心的感谢。



(Kuo-Nan Liou, 廖国男)

2004年10月

美国加州大学洛杉矶校区

原 版 序

《大气辐射导论》(第二版)的准备工作始于1997年9月,那时我刚转到加州大学洛杉矶校区(UCLA)工作。我必须执教一些与大气辐射和遥感有关的课程,需要最新的教学资料。而且,自本书第一版出版以来的20年间,由于对全球气候的研究,大气辐射领域方面产生了丰富的成果,尤其和温室气体造成的全球变暖、气溶胶和云对气候和气候变化的作用,以及为了支持和完善天气和气候模拟而对全球遥感观测资料的需求密切相连。同时,也是出于对大气辐射领域的一种责任感,我决定要完成一本反映该领域当前状况及最新进展的著作。

第二版在原版基础上进行了大量的修改,着重于基础理论研究、对物理过程的认识,以及利用辐射传输理论和来自地基、空基和天基的辐射仪观测资料,对太阳和地球辐射与行星大气中分子、气溶胶和云粒子之间相互作用的定量分析等方面。

第二版包含70%左右的新内容。不过,我还是尽可能遵循第一版中建立的章节结构,在此基础上进行大量内容的修订和补充。新内容包括但不限于以下专题:红外辐射传输的相关 k 分布方法、冰晶和非球形气溶胶的光散射,以及一系列平面平行大气假定中所没有包括的辐射传输领域的最新论题。这些内容分别在第4、第5和第6章中阐述。

遥感本身是一门重要的学科,并与其他许多领域有密切的联系。不过,在第7章里,本书重点讨论如何将辐射传输基本理论用于遥感方法中来推知大气和地表面参数。

认识地球气候及气候变化必须从全面了解地气系统的辐射过程开始。在第8章中,我从热量平衡考虑出发,用简化的一维及全球气候模式,阐述了辐射在气候中的重要作用。

我很感谢Jennifer Kibbe, Melissa Licker和Yoshihide Takano在我准备手稿的过程中,帮助我打字、编辑以及进行计算机绘图等,给予我诸多帮助。如果没有他们的倾力协助,我不可能在自己与学术出版社(Academic Press)设定的时间里完成第二版,尤其是我还有其他的学术工

作，包括作为系主任的职责。我还有幸和一群聪慧而有才干的研究生一起工作，他们辅助并加强了我在研究方面的力量，做出了本书中展示的许多结果。

许多同事对本书的各个章节提出了中肯而有益的意见和建议。这里我要特别感谢 Ute Böttger, Thomas Charlock, Annmarie Eldering, Frank Evans, Qiang Fu, Nori Fukuta, Michael Mishchenko, Steve S. C. Ou, Irina Sokolik, Ping Yang 和 Charles Zender。他们中有些人在教授大气辐射课程中使用第 1 到第 4 章的初稿。

我很感谢 Richard Goody (他在大气辐射这一学科写过两本著作) 和 Wilfried Brutsaert (同一时间，他正在完成一本关于流体动力学方面的著作) 持续不断地鼓励我在学术和研究工作中追求卓越。最后，感谢国际地球物理丛书的编辑 James Holton 和学术出版社物理科学高级编辑 Frank Cynar 对本书出版所给予的鼓励和支持。在第二版的准备过程中，我的研究计划受益于国家科学基金会、国家航空航天管理局 (NASA)、能源部和空军科学研究办公室的持续资助和支持。

廖国男

目 录

审校者序	周秀骥
中文版序	廖国男
原版序	廖国男
1 用于大气的辐射基本知识	1
1.1 概念、定义和单位	1
1.1.1 电磁波频谱	1
1.1.2 立体角	3
1.1.3 基本辐射量	4
1.1.4 散射和吸收的概念	6
1.2 黑体辐射定律	9
1.2.1 普朗克(Planck)定律	10
1.2.2 斯蒂芬-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)定律	12
1.2.3 维恩(Wien)位移定律	12
1.2.4 基尔霍夫(Kirchhoff)定律	13
1.3 吸收线的形成和谱线形状	14
1.3.1 谱线形成	14
1.3.1.1 玻尔(Bohr)模型	14
1.3.1.2 振动跃迁和转动跃迁	16
1.3.2 谱线增宽	21
1.3.2.1 压致增宽	21
1.3.2.2 多普勒增宽	23
1.3.2.3 沃伊特(Voigt)廓线	24
1.3.3 热力学平衡的崩溃	25
1.4 辐射传输引论	27
1.4.1 辐射传输方程	27
1.4.2 比尔-布格-朗伯(Beer-Bouguer-Lambert)定律	28
1.4.3 施瓦氏(Schwarzschild,施瓦兹希尔德)方程和它的解	29
1.4.4 平面平行大气的辐射传输方程	31
1.4.5 三维不均匀介质中的辐射传输方程	33

习题	34
推荐读物	37
2 大气顶的太阳辐射	38
2.1 作为能源的太阳	38
2.1.1 太阳结构	40
2.1.2 太阳表面的活动:太阳黑子	42
2.2 地球绕太阳的轨道和太阳日射	45
2.2.1 绕日轨道的几何形状	45
2.2.2 太阳常数的定义	51
2.2.3 日射的分布	52
2.3 太阳光谱和太阳常数的测定	55
2.3.1 太阳光谱	55
2.3.2 太阳常数的测定:地基法	60
2.3.3 太阳常数的卫星测量	63
习题	65
推荐读物	67
3 太阳辐射在大气中的吸收和散射	68
3.1 地球大气的成分和结构	68
3.1.1 热力结构	68
3.1.2 化学成分	70
3.2 大气吸收	73
3.2.1 紫外吸收	76
3.2.1.1 氮分子的吸收	76
3.2.1.2 氧分子的吸收	76
3.2.1.3 臭氧的吸收	78
3.2.1.4 其他微量气体的吸收	78
3.2.1.5 太阳辐射的吸收	78
3.2.2 光化学过程和臭氧层的形成	82
3.2.3 在可见光区和近红外区的吸收	86
3.2.3.1 分子氧和臭氧	86
3.2.3.2 水汽	86
3.2.3.3 二氧化碳	87
3.2.3.4 其他微量气体	87

3.2.3.5	直接太阳辐射通量在大气中的传输	89
3.3	大气散射	91
3.3.1	瑞利(Rayleigh)散射	91
3.3.1.1	理论推导	91
3.3.1.2	相函数、散射截面和极化率	93
3.3.1.3	蓝色天空及天空偏振	97
3.3.2	粒子的光散射:近似处理方法	99
3.3.2.1	洛伦茨-米散射	100
3.3.2.2	几何光学	102
3.3.2.3	反常衍射理论	104
3.4	行星大气中的多次散射和吸收	106
3.4.1	辐射传输基础	106
3.4.2	辐射传输的近似处理方法	108
3.4.2.1	单散射近似	108
3.4.2.2	漫射近似	109
3.5	大气的太阳加热率	110
	习题	114
	推荐读物	118
4	大气中的热红外辐射传输	120
4.1	热红外光谱和温室效应	120
4.2	大气中的吸收和发射	122
4.2.1	热红外辐射的吸收	122
4.2.1.1	水汽	122
4.2.1.2	二氧化碳	123
4.2.1.3	臭氧	124
4.2.1.4	甲烷	125
4.2.1.5	一氧化二氮	125
4.2.1.6	氯氟碳化物	125
4.2.2	热红外辐射传输的基础	126
4.2.3	逐线积分	129
4.3	红外辐射传输的相关 k 分布法	131
4.3.1	基本知识	131
4.3.2	对非均质大气的应用	133
4.3.3	数值程序和相关结果	137

4.3.4	谱线重叠的考虑	139
4.4	带模式	141
4.4.1	单谱线	142
4.4.2	规则带模式	143
4.4.3	统计带模式	145
4.4.4	对非均质大气的应用	149
4.5	通量计算的宽带方法	152
4.5.1	宽带发射率	152
4.5.2	牛顿冷却近似	155
4.6	有云大气中的红外辐射传输	158
4.6.1	基础知识	158
4.6.2	云和地面间的红外辐射交换	160
4.6.3	二流近似和四流近似	161
4.7	大气红外冷却率	165
	习题	170
	推荐读物	173
5	大气中粒子的光散射	174
5.1	大气粒子的形态学	174
5.2	球形粒子光散射的洛伦茨-米理论	181
5.2.1	电磁波方程及其解	181
5.2.2	形式散射解	187
5.2.3	远场解和消光参数	191
5.2.4	球形粒子的散射相矩阵	197
5.3	几何光学	201
5.3.1	衍射	202
5.3.2	几何反射和折射	205
5.3.3	几何光学、洛伦茨-米理论及其代表性结果	215
5.4	冰晶的光散射——一种统一理论	221
5.4.1	冰晶的几何光学	221
5.4.1.1	常规方法	221
5.4.1.2	改进的几何光学方法	223
5.4.1.3	几何光学中的吸收效应	225
5.4.1.4	光线追迹的蒙特卡罗方法	228
5.4.2	有限差分域方法简介	230

5.4.3	非球形冰粒子的散射相矩阵	230
5.4.4	冰晶光散射统一理论的表述	235
5.4.4.1	统一理论的本质	235
5.4.4.2	理论结果与测量结果的比较以及 一些代表性计算结果	237
5.5	非球形气溶胶的光散射	243
5.5.1	有限差分时域方法	243
5.5.2	T 矩阵方法	252
5.5.3	非球形气溶胶光散射测量中应注意的问题	256
	习题	259
	推荐读物	262
6	行星大气的辐射传输原理	264
6.1	引言	264
6.1.1	辐射传输的研究简史	264
6.1.2	平面平行条件下的基本方程组	265
6.2	辐射传输的离散纵标法	268
6.2.1	各向同性散射的通解	269
6.2.2	对半无限各向同性散射大气的漫反射定律	272
6.2.3	各向异性散射的通解	274
6.2.4	在非均质大气中的应用	278
6.3	不变性原理	281
6.3.1	各种散射参数的定义	281
6.3.2	对半无限大气的不变性原理	284
6.3.3	对有限大气的不变性原理	288
6.3.4	X 函数和 Y 函数	293
6.3.5	考虑表面反射	295
6.4	辐射传输的累加法	298
6.4.1	物理参数的定义	299
6.4.2	累加方程	301
6.4.3	累加法与不变性原理的等价性	304
6.4.4	内[辐射]场向非均质大气的推广	306
6.4.5	累加法和离散纵标法之间的相似性	308
6.5	辐射传输的近似处理方法	311
6.5.1	逐次散射近似	311
6.5.2	二流近似和爱丁顿近似	313

6.5.3	δ 函数调整和相似性原理	320
6.5.4	四流近似	323
6.6	考虑偏振的辐射传输	327
6.6.1	光束的表示法	327
6.6.2	数字表达式	332
6.7	辐射传输的最新课题	335
6.7.1	水平取向的冰粒子	335
6.7.2	三维非均质云	339
6.7.2.1	蒙特卡罗方法	343
6.7.2.2	逐次散射方法	344
6.7.2.3	δ 四项(漫射)近似	347
6.7.3	球形大气	350
	习题	354
	推荐读物	357
7	辐射传输原理对遥感探测的应用	359
7.1	引言	359
7.2	利用透射的太阳光进行遥感	361
7.2.1	气溶胶光学厚度和尺度分布的确定	362
7.2.1.1	直接线性反演	366
7.2.1.2	约束线性反演	368
7.2.2	确定臭氧总量	369
7.2.3	临边消光技术	370
7.3	应用反射的太阳光进行遥感	372
7.3.1	卫星-太阳几何学和理论基础	372
7.3.2	臭氧的卫星遥感	377
7.3.3	气溶胶的卫星遥感	378
7.3.4	陆地表面的卫星遥感	379
7.3.5	云的光学厚度和粒子尺度	381
7.3.5.1	双向反射比	382
7.3.5.2	偏振	388
7.3.5.3	反射线谱	391
7.4	利用发射的红外辐射进行遥感	394
7.4.1	理论基础	394
7.4.2	地球表面温度的确定	396

7.4.3	温度廓线的遥感	398
7.4.3.1	非线性迭代法	402
7.4.3.2	最小方差法:混合反演	403
7.4.3.3	云的去除	406
7.4.4	水汽和痕量气体廓线的遥感	409
7.4.4.1	由 $6.3 \mu\text{m}$ 振转带遥感水汽	409
7.4.4.2	临边扫描技术	410
7.4.5	云的红外遥感	413
7.4.5.1	对云顶气压和发射率的二氧化碳切片技术	413
7.4.5.2	云盖的发射辐射	415
7.4.5.3	卷云光学厚度和温度的反演	418
7.4.5.4	红外光谱中的信息含量	419
7.4.6	红外冷却率和地表通量的遥感	420
7.5	利用发射的微波辐射进行遥感	425
7.5.1	微波波谱和微波辐射传输	425
7.5.2	由微波发射辐射确定降雨率和水汽	429
7.5.3	微波探测器的温度反演	433
7.6	利用激光和微波能量进行遥感	437
7.6.1	后向散射方程:理论基础	438
7.6.2	激光雷达的差分吸收方法和退偏方法	441
7.6.2.1	差分吸收方法	441
7.6.2.2	退偏原理	442
7.6.3	用于研究云的毫米波雷达	445
	习题	447
	推荐读物	453
8	辐射与气候	454
8.1	引言	454
8.2	天气系统的辐射收支	455
8.2.1	观测的意义	455
8.2.1.1	基于辐射平衡的黑、白传感器	457
8.2.1.2	扫描辐射仪和角模式	459
8.2.2	从太空观测的辐射收支	460
8.2.3	根据 ERB 资料推求云的辐射强迫	461
8.2.4	大气的辐射加热率和冷却率	465

8.2.5	地表辐射收支	470
8.3	辐射和对流大气	472
8.3.1	辐射平衡	472
8.3.1.1	全球模式	472
8.3.1.2	垂直模式	473
8.3.2	辐射和对流平衡	476
8.3.2.1	地气系统的能量收支	476
8.3.2.2	对流调整	478
8.4	一维气候模式中的辐射	481
8.4.1	二氧化碳温室效应	481
8.4.2	臭氧和其他温室气体	484
8.4.2.1	臭氧	484
8.4.2.2	甲烷	485
8.4.2.3	一氧化二氮	486
8.4.2.4	卤烃	487
8.4.3	辐射反馈的考虑	488
8.4.4	气溶胶和辐射	489
8.4.5	云的辐射强迫	492
8.4.5.1	云的位置和云量	493
8.4.5.2	云的微物理学	493
8.4.5.3	气溶胶(或云)和降水	496
8.5	能量平衡气候模式中的辐射	497
8.5.1	大气和地表面的能量收支	498
8.5.1.1	大气和海洋	498
8.5.1.2	地表能量收支	501
8.5.2	能量平衡气候模式中的辐射强迫	503
8.5.2.1	线性增温法	504
8.5.2.2	扩散法	507
8.5.3	太阳日射扰动	509
8.6	全球气候模式中的辐射	511
8.6.1	大气环流模拟引言	511
8.6.2	全球气候模式中云的辐射强迫	516
8.6.2.1	内辐射强迫	516
8.6.2.2	温室增暖与云量反馈	517
8.6.2.3	温室增暖和云的液态水和冰水含量反馈	520