



全球变化与地球系统科学系列

Series in Global Change and Earth System Science

大气辐射传输原理

Theory of Atmospheric Radiative Transfer

Manfred Wendisch Ping Yang 著
李正强 李 莉 侯伟真 许 华 译

高等教育出版社



全球变化与地球系统科学系列
Series in Global Change and Earth System Science

大气辐射传输原理

Theory of Atmospheric Radiative Transfer

Manfred Wendisch Ping Yang 著

李正强 李 莉 侯伟真 许 华 译

DAQI FUSHE CHUANSHU YUANLI

高等教育出版社·北京

图字 : 01-2013-0436 号

Theory of Atmospheric Radiative Transfer/by Manfred Wendisch and Ping Yang/ISBN 9783527408368

Copyright © 2012 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Higher Education Press Limited Company and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

图书在版编目 (CIP) 数据

大气辐射传输原理 / (美) 温迪施 (Wendisch, M.), (美) 杨平 (Yang, Ping) 著; 李正强等译. — 北京: 高等教育出版社, 2014. 6

书名原文: Theory of Atmospheric Radiative Transfer
ISBN 978-7-04-039527-3

I. ①大… II. ①温… ②杨… ③李… III. ①大气辐射—传输—研究 IV. ①P422

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 067594 号

策划编辑 关焱
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 关焱
责任校对 刘娟娟

封面设计 张楠 版式设计 王艳红
责任印制 田甜

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京宏伟双华印刷有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 19.75
字 数 380千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版 次 2014年6月第1版
印 次 2014年6月第1次印刷
定 价 59.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 39527-00

10110

内容简介

大气辐射传输是大气辐射和遥感领域的核心基础课程，本书基于作者在德国和美国多年讲授这门课程的经验及相关科研成果积累，旨在全面而简明地介绍大气辐射传输的公式，尤其是说明与大气中电磁辐射的单次散射、多次散射、吸收和发射相关的整个物理过程。

全书共分9章：第1章主要介绍大气辐射收支概况；第2章给出了本书使用的物理量纲、符号、规则和约定，并简要回顾了相关数学知识；第3章介绍电磁辐射的基本概念和基本定律；第4章主要讨论电磁辐射与单粒子的相互作用；第5章进一步介绍了体散射、吸收和消光特性，即电磁辐射与粒子群的相互作用；第6章主要讲述电磁辐射传输方程，包括动态和静态、三维和一维辐射传输方程的推导；第7章讨论了辐射传输方程的几种常见数值和近似解法；第8章主要讨论大气分子的吸收与发射；第9章讲述地球辐射的传输。

本书可作为大气辐射和遥感相关专业高年级本科生和研究生的专业基础课教学用书，也可作为大气辐射、遥感应用、地球物理、地球化学、天文学、环境科学和光谱学等领域科研人员的参考书。

译者序

德国莱比锡大学 Manfred Wendisch 教授和美国得克萨斯 A&M 大学 Ping Yang (杨平) 教授合著的 *Theory of Atmospheric Radiative Transfer* 一书是大气辐射领域的一本优秀教材, 我们很高兴将其翻译并推荐给国内相关领域的读者。电磁辐射是地球大气系统运动的驱动力, 也是大气中各类光学现象的载体。电磁辐射在大气中的传输受到气体分子、气溶胶、云、雨等的吸收和散射作用影响, 不但形成了多姿多彩的大气光学现象 (如虹、霓、晕、彩霞、蓝天等), 也决定了与人类息息相关的地球天气和气候系统。与此同时, 由于人们对环境信息需求的快速增长, 使得遥感观测的重要性日益增强, 而在大气环境中使用光学探测获取目标信息时, 大气辐射传输是其中的关键环节。例如, 对地观测需要扣除大气对地表信号的影响, 而大气遥感则需要从受到大气影响而改变的辐射信号中提取出大气成分和状态的信息。

随着气候变化和环境遥感在中国受到越来越多的关注, 许多大学和研究机构都开展了辐射传输方面的教学和科研工作, 大批学者和学生对该领域的兴趣日益增加, 但是目前对大气辐射传输原理进行详细解释的教材不多, 本书可以作为有益补充。本书的特点是推导详细、论证清晰, 从机理和数学公式的角度详细介绍了大气中吸收、散射和发射等重要过程, 较全面地讲解了该领域的基础知识。本书的另一特点是贴近应用、注重实践。原著两位作者都是该领域的国际著名专家, 具有长期的研究积累, 书中所举实例是对理论内容很好的阐释和扩展, 并且作者充分利用网络上的程序和代码资源在每章之后设计了有趣的习题, 促进读者实际动手, 可培养利用理论知识解决实际问题的能力。此外, 本书关注研究前沿, 包括了相关 k 分布法、几何光学方法、Delta-Fit 方法和蒙特卡罗方法等近年来在实践中被较多应用的方法。

本书的翻译主要由李正强、李莉、侯伟真、许华完成, 校对和排版由伽丽丽、张婉春、李雷、李保生等完成, 张莹、李东辉、吕阳、谢一淞、张玉环、李凯涛、马奕等参加了译稿审校。译文中符号保持与原书一致, 术语等尽量采用国家标准译名, 并对原书中存在歧义或有误的表述在与原著作者确认后进行了订正, 以方便读者理解。封面图片由 Philip Laven 提供。

译者水平有限, 不当甚至错误之处在所难免, 敬请读者批评指正。

李正强

2013年12月于北京

前 言

驱动地球天气和气候的能量主要来自太阳。地-气系统对太阳辐射的吸收加热了我们的星球，而太阳的加热效应则被大气和地表的热红外发射引起的制冷效应所平衡。因此，关于太阳和地球辐射在大气中传输的知识，对于理解辐射能量收支以及现在和将来的气候至关重要。除此之外，辐射传输理论还在大气遥感中扮演关键角色，而大气遥感在地球科学中的重要性也越来越高。基于这些原因，大气辐射目前是大气科学领域的核心课程之一。

本书旨在介绍并说明主导大气辐射传输的公式，尤其是给出与大气中电磁辐射的单次散射、多次散射、吸收和发射相关的整个物理过程的一个全面但简明的概览。本书中的重要公式都从基本原理开始推导，关键结果用图示说明，同时对本领域常用的一些基本数学工具也进行了简单回顾。

根据笔者的观点，现有的与大气辐射传输主题相关的论著可分为以下两类。

高级读本：这类论著详尽而且深入，但也因此超越了那些在数学和物理方面已有相当基础的大学高年级学生的水平。在大多数欧洲和美国大学，大气辐射通常作为一个学期的课程，但这类论著的内容却往往超过了一个学期所能讲授的内容。此外，许多已有大气辐射论著的某些内容相对陈旧。例如，这些论著通常都详细介绍了计算红外传输的带模式，然而随着计算效率更高、更有效的相关 k 分布法的发展，带模式在很大程度上已被淘汰。

一般的介绍性读本：这类读本一般相当基础并且提供的细节较少。换言之，这些书缺乏深度，并且由于缺乏定量的信息，它们对于大学高年级学生和研究生而言过于简略。

本书试图填补上述两种论著之间的空白，并将内容限定于适合一个学期的课程。由于本书的读者对象不只针对专家，因此所有数学推导过程都保留了中间步骤，这对于提高本书的可读性很重要，也有助于学生们掌握相关内容的细节。

推荐的读者预备知识水平是完成欧洲大学的学士学习，或具有美国教育系统中两年的大学物理和数学课程基础。尽管由于引入学士和硕士体系，欧洲和美国的教育系统已日渐趋同，但差异仍然是存在的。基于本书笔者在德国和美国的教学经验，我们希望本书将有助于在不同的国际教育体系中讲授大气辐射课程。

本书基于笔者的教学讲义,不当之处在所难免,望读者批评指正。

我们希望致谢莱比锡大学和得克萨斯 A&M 大学两个研究小组的现任和前任同事们对所从事研究项目的贡献和奉献精神。此外,对于我们而言,与学生们一起工作总是那么鼓舞人心。

Manfred Wendisch 对学术上的良师 Jost Heintzenberg 致以由衷的感谢。在过去的多年里,Manfred Wendisch 与全球多位学者在大气辐射的不同领域开展了富有成效的合作,在此一并致谢(按姓氏字母顺序排列): Howard Barker、Darrel Baumgardner、Franz Berger、Birger Bohn、Stephan Borrmann、Jean-Louis Brenguier、Phil Brown、Anthony Bucholtz、Susanne Crewell、Uwe Feister、John Foot、Jürgen Fischer、Paola Formenti、Barbara Früh、Jean-Francois Gayet、Tim Garrett、Hermann Gerber、Xingfa Gu、Andrew Heymsfield、Tadahiro Hayasaka、Jim Haywood、Andreas Herber、Wolfgang von Hoyningen-Huene、Ruprecht Jänicke、Ralph Kahn、Alex Kokhanovsky、Alexei Korolev、Barry Lefer、Zhengqiang Li、Andreas Macke、Bernhard Mayer、Teruyuki Nakajima、Klaus Pfeilsticker、Peter Pilewskie、Steven Platnick、Heinrich Quenzel、Erhard Raschke、Jens Redemann、Phil Russell、Maria von Schönemark、Rick Shetter、Clemens Simmer、Walter Strapp、Jonathan Taylor、Thomas Trautmann、Victor Venema、Matthias Wiegner 和 Warren Wiscombe。

Ping Yang 希望借此机会真诚地感谢几位科学前辈的指导,他们是: Kuo-Nan Liou、Gerald North、George Kattawar、Thomas Wilheit、Kenneth Bowman、Warren Wiscombe、Michael King、Thomas Vonder Haar、James Coakley、William L. Smith 和 Andrew Heymsfield。Ping Yang 尤其要感谢 Hal Maring、Donald Anderson、Bradley Smull、Rangasayi Halthore 和 S. Daniel Jacob 的支持和鼓励。Ping Yang 非常感谢得克萨斯 A&M 大学大气科学系的各位同事在教学和科研上富有成效的努力和合作,他们是: Sarah Brooks、Andrew Dessler、Shaima Nasiri 和 R. Lee Panetta。Ping Yang 还要感谢与下列学者开展的愉快的合作研究: Anthony Baran、Bryan Baum、Helene Chepfer、Xiquan Dong、Oleg Dubovik、Qiang Fu、Bo-Cai Gao、Thomas Greenwald、Yong Han、Andrew Heidinger、N. Christina Hsu、Yongxiang Hu、Hung-Lung (Allen) Huang、Hironobu Iwabuchi、Ralph Kahn、Jhoon Kim、Jun Li、Istvan Laszlo、Tang-Huang Lin、Quanhua Liu、Xiaodong Liu、Xu Liu、Alexander Marshak、Patrick Minnis、Michael Mishchenko、Martin Mlynczak、Steven Platnick、Peter Pilewskie、Jerome Riedi、Byung-Ju Sohn、Wenbo Sun、Si-Chee Tsay、Heli Wei、Fuzhong Weng、Dong L. Wu、Pengwang Zhai、Zhibo Zhang 和 Daniel Zhou。在本书撰写过程中,Ping Yang 的研究工作得到以下美国机构的资助: 国家科学基金会 (NSF)、

国家航空航天局 (NASA)、国家海洋和大气管理局 (NOAA) 以及联邦航空管理局 (FAA)。

如果没有莱比锡大学气象研究所 Frank Werner 的无私帮助, 本书无法完成, 他绘制了本书中大部分插图。我们非常感谢得克萨斯 A&M 大学的 Mary Gammon 女士在书稿编辑方面的出色工作。我们还要感谢得克萨斯 A&M 大学的 Shouguo Ding、Lei Bi、Yu Xie、Bingqi Yi、Chao Liu、Hyouun-Myoung Cho、Chenxi Wang、Bingqiang Sun、Xin Huang 和 Meng Gao 帮助准备图表和校正数学公式。我们感谢莱比锡大学气象研究所的 André Ehrlich、Eike Bierwirth、Heike Kalesse、Sebastian Otto、Evi Jäkel 和科罗拉多大学气象和空间物理实验室的 Sebastian Schmidt 对书稿的评论以及帮助设计习题和答案。原书封面照片由莱比锡大学气象研究所的 Stefan Bauer 提供。

最后, 我们还要特别感谢家人对我们长期以来投入本书写作的支持。Amanda Yang 参与了本书的编辑并对文稿提出了很好的建议。

Manfred Wendisch, 2011 年 12 月于莱比锡

Ping Yang, 2011 年 12 月于得克萨斯 A&M 大学

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 大气辐射简介	1
1.2 大气辐射收支概略图	3
1.3 无云大气中的太阳和地球热红外光谱	5
1.4 温室效应	7
1.5 与天基观测的关联	9
第 2 章 符号和数学知识回顾	10
2.1 物理量纲及前缀	10
2.2 一些规则和约定	12
2.3 向量代数简介	12
2.3.1 主要向量运算	12
2.3.2 使用下标记号	14
2.4 狄拉克 δ 函数	16
2.5 几何学	18
2.5.1 方向	18
2.5.2 立体角	18
2.5.3 两个方向的夹角	20
2.6 正交函数	21
2.6.1 勒让德多项式	21
2.6.2 勒让德函数	22
2.7 求积公式	24
习题	25
第 3 章 基本原理	26
3.1 电磁辐射	26
3.1.1 麦克斯韦方程组及其平面波解	26
3.1.2 波长、频率、波数、色散关系和相速度	28
3.1.3 相干、非相干和偏振	29

3.1.4	波粒二象性	30
3.1.5	大气的电磁辐射光谱	30
3.2	基本辐射量	32
3.2.1	辐射通量、辐射通量密度和辐亮度	32
3.2.2	辐射能量密度和辐亮度	34
3.2.3	辐照度、辐出度、出射度和光化辐射	35
3.2.4	上行、下行和净光化通量密度与辐亮度的关系	36
3.2.5	各向同性辐射场	38
3.2.6	反射率、吸收率和透射率	39
3.3	黑体和灰体辐射: 基本定律	39
3.3.1	普朗克定律	39
3.3.2	维恩位移定律	40
3.3.3	斯特藩 - 玻尔兹曼定律	42
3.3.4	瑞利 - 金斯近似和维恩近似	43
3.3.5	发射率和基尔霍夫定律	43
	习题	46
第 4 章	电磁辐射与单粒子的相互作用	51
4.1	概述	51
4.2	复折射指数	52
4.3	电场矢量分解	54
4.4	复振幅散射矩阵	55
4.5	斯托克斯矢量	55
4.6	偏振度	57
4.7	穆勒矩阵	58
4.8	单粒子光学特性	61
4.8.1	光学参数	61
4.8.2	光学定理	64
4.9	球形粒子的洛伦茨 - 米理论	66
4.9.1	假设和目的	66
4.9.2	效率因子	67
4.9.3	单次散射消光比	68
4.9.4	复振幅散射矩阵元素	69
4.9.5	穆勒矩阵元素	70
4.9.6	偏振	70
4.9.7	非偏振入射辐射的相函数	72
4.9.8	不对称因子	73

4.10	瑞利散射和振荡电偶极子	74
4.10.1	复振幅散射矩阵和穆勒矩阵	74
4.10.2	偏振度	76
4.10.3	非偏振入射辐射的瑞利相函数	76
4.10.4	散射截面和效率因子	78
4.10.5	消光和吸收截面及效率因子	78
4.10.6	瑞利散射作为洛伦茨-米理论的近似	79
4.10.7	大气中的瑞利散射	80
4.11	非球形粒子散射	82
4.11.1	解析法	82
4.11.2	穆勒矩阵	83
4.11.3	相函数	84
4.11.4	光学特性	86
4.12	大粒子散射的几何光学方法	88
4.12.1	在平面界面上反射和透射引起的方向改变: 斯涅耳定律	90
4.12.2	\tilde{n}^2 定律	94
4.12.3	反射和透射的非涅耳公式	95
4.12.4	平面界面透射的辐射能量变化	97
4.12.5	平面界面反射的辐射能量变化	99
4.12.6	射线追踪技术	102
4.12.7	衍射	104
4.13	虹和晕	110
	习题	113
第 5 章	体光学特性	119
5.1	粒子尺度分布	119
5.1.1	解析描述	119
5.1.2	体微物理参数	120
5.1.3	参数化	121
5.2	体散射、吸收和消光	122
	习题	126
第 6 章	辐射传输方程	127
6.1	光学厚度	128
6.2	朗伯-布格定律	128
6.2.1	微分形式和指数形式	128
6.2.2	在直射太阳辐照度中的应用	130

6.3 辐射传输方程的一般形式	131
6.3.1 光谱光子密度函数	131
6.3.2 散射介质中的辐射传输方程	133
6.3.3 光子收支方程	136
6.3.4 总辐亮度的动态和静态三维辐射传输方程	137
6.3.5 漫射辐亮度的三维静态辐射传输方程	137
6.4 水平均匀大气的一维辐射传输方程	140
6.4.1 独立变量	140
6.4.2 漫射辐亮度的—维辐射传输方程标准形式	140
6.4.3 下行漫射辐亮度	144
6.4.4 上行辐亮度	148
习题	152
第 7 章 辐射传输方程的数值和近似解法	155
7.1 勒让德展开和傅里叶展开	155
7.1.1 相函数的勒让德多项式展开	155
7.1.2 相函数截断和相似性原理	157
7.1.3 大气的角坐标系	160
7.1.4 Delta-M 和 Delta-Fit 方法	163
7.1.5 漫射辐亮度和辐照度的傅里叶展开	167
7.2 漫射辐亮度的傅里叶系数方程	168
7.2.1 非吸收大气中的净辐射通量密度	169
7.3 逐次散射法	172
7.4 累加—倍加法	175
7.4.1 基本原理	175
7.4.2 辐亮度的一般形式	177
7.4.3 通量密度计算中的应用	183
7.5 离散纵标法	186
7.6 球谐函数法	190
7.7 蒙特卡罗方法	194
7.7.1 基本原理	194
7.7.2 后向(反向)蒙特卡罗方法	197
7.8 二流近似	203
7.8.1 经典表述	203
7.8.2 基于辐射传输方程的二流近似	207
习题	210

第 8 章 大气分子的吸收与发射	212
8.1 光子与气体分子的相互作用	212
8.1.1 分子能量形式	212
8.1.2 光子的吸收与发射	213
8.1.3 量子化的能量和频率	214
8.1.4 热平衡下的能级概率	214
8.2 能级跃迁的例子	216
8.2.1 气体分子的结构	216
8.2.2 分子转动能	216
8.2.3 分子振动能	217
8.3 单原子分子谱线	218
8.3.1 分子的电子轨道能	218
8.3.2 氢原子谱线	218
8.4 分子吸收和发射谱线	222
8.4.1 分子转动光谱	223
8.4.2 分子的电子轨道能和转动能比较	224
8.4.3 双原子分子的振动光谱	226
8.4.4 分子振 - 转光谱	227
8.5 大气气体光谱举例	230
8.5.1 三种常见光谱	230
8.5.2 红外谱区的组合振 - 转跃迁	230
8.5.3 近红外到可见光区光谱	233
8.5.4 可见光到紫外光区光谱 —— 电子轨道跃迁	234
8.6 吸收和发射线型的近似	236
8.6.1 吸收谱线的洛伦兹线型 —— 碰撞增宽	236
8.6.2 热多普勒线型	236
8.6.3 沃伊特线型 —— 碰撞和多普勒效应混合增宽	237
8.7 光谱透射率和吸收率	239
8.7.1 弱线近似和强线近似	239
8.7.2 逐线法	242
8.7.3 带模式	242
8.7.4 非均匀大气路径的近似调整	244
8.7.5 k 分布法	245
8.7.6 相关 k 分布法	247
8.7.7 相关 k 分布法在卫星遥感中的应用	248
习题	250

第 9 章 地球辐射的传输	252
9.1 下行光谱辐射	253
9.1.1 下行漫射辐亮度	253
9.1.2 下行漫射辐照度	259
9.2 上行光谱辐射	263
9.2.1 上行漫射辐亮度	263
9.2.2 上行漫射辐照度	264
9.3 模拟光谱示例	265
9.3.1 下行和上行辐亮度	265
9.3.2 卷云对地球光谱辐照度的影响	266
9.4 宽带地球辐射传输	267
9.4.1 卷云对辐照度的影响	267
9.4.2 辐射致冷与辐射加热	269
习题	273
附录 A 缩写、符号和常数	275
A.1 缩写词	275
A.2 下标和上标	276
A.3 希腊字符	278
A.4 拉丁字符	280
A.5 物理常数	284
A.6 数学常数	284
参考文献	285
索引	297

第 1 章

引 言

1.1 大气辐射简介

在地球 - 大气系统中, 电磁辐射 (EM[®]) 收支对大气能量有关键影响。地球和包括太阳系在内的宇宙背景之间发生能量交换, 其主要部分是从紫外 (UV) 到远红外 (FIR) 范围的电磁辐射。与吸收、散射和发射相关的太阳和热红外 (TIR) 辐射是地球气候的首要影响因子, 它们在地球 - 大气系统中的传输对天气系统有重要影响。由于辐射在大气中的重要作用, 大气辐射学成为大气科学的重要分支。目前, 已有不少关于大气辐射传输的教材, 全面或部分地涵盖了单次散射、多次散射和吸收过程等这一学科的内容 (Bohren and Clothiaux, 2006; Bohren and Huffman, 1983; Goody and Yung, 1989; Liou, 2002; Mishchenko et al., 2006; Petty, 2006; Pomraning, 1973; Stephens, 1994; Thomas and Stamnes, 1999; Zdunkowski et al., 2007)。其中, 部分教材需要读者在数学、物理, 尤其是电动力学和光学方面有较好的基础。

电磁辐射在大气中的传输是一个包含吸收的多次散射过程, 涉及各种气体以及悬浮颗粒物 (气溶胶、水滴、冰晶等) 的吸收和散射。早期从事电磁辐射传输研究的是天体物理学家, 其中包括著名的科学家 A. S. Eddington、E. A. Milne、K. Schwarzschild、V. A. Ambarzumian 和 S. Chandrasekhar 等, 他们主要的研究兴趣是恒星和行星大气中的电磁辐射传输。Schuster (1905) 用简单的二流近似讨论了电磁辐射在有雾大气中的传输, 这被认为是第一个关于多次散射过程的研究。然而, 关于散射介质中辐射传输的研究则可最早追溯到 Lommel (1887) 以及 Chwolson (1889) 等工作 (Mishchenko, 2008)。

① 本书中缩写词以首字母大写组合表示, 详见附录 A.1。