



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

——含典型案例的入门教程

Atmospheric Radiation

A Primer with Illustrative Solutions

Jim Coakley Ping Yang 著

刘超 银燕 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

——含典型案例的入门教程

Atmospheric Radiation

A Primer with Illustrative Solutions

Jim Coakley Ping Yang 著

刘超 银燕 译

高等教育出版社·北京

图字 : 01-2016-0213 号

Atmospheric Radiation: A Primer with Illustrative Solutions/by James A. Coakley Jr. and Ping Yang

Copyright ©2014 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.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and iUegal.

图书在版编目 (CIP) 数据

大气辐射 : 含典型案例的入门教程 / (美) 吉姆·科克利 (Jim Coakley), (美) 杨平 (Ping Yang) 著; 刘超, 银燕译.

— 北京 : 高等教育出版社, 2017. 10

(全球变化与地球系统科学系列)

书名原文 : Atmospheric Radiation

ISBN 978-7-04-048501-1

I. ①大… II. ①吉… ②杨… ③刘… ④银… III. ①大气辐射—教材 IV. ①P422

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 224350 号

策划编辑 关 焱
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 殷 鸽
责任校对 窦丽娜

封面设计 张 楠
责任印制 耿 轩

版式设计 王艳红

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 北京七色印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 15
字 数 270 千字
插 页 1
购书热线 010-58581118

咨询电话 010-810-0598
网 址 <http://www.hep.com.cn>
<http://www.hepmall.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.com>
版 次 2017年10月第1版
印 次 2017年10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 48501-00

译者序

大气辐射是气候变化和大气遥感领域的重要研究内容。作为地球-大气系统的重要能量形式,辐射能量的收支及分布直接决定着天气和气候的变化。同时,电磁辐射作为主要的遥感载体,涉及大气探测的方方面面,气象雷达、卫星、激光雷达的定量遥感已经成为气象观测领域发展的必要部分,而其基础就是辐射和物质的相互作用。国内外已出版过多本关于大气辐射及辐射传输的经典著作,但是由于辐射概念的抽象性以及辐射传输理论中涉及大量数学公式推导等,这些书籍大多仅适用于研究生或科研人员。

美国俄勒冈州立大学 Jim Coakley 教授和得克萨斯 A&M 大学 Ping Yang 教授合著的 *Atmospheric Radiation* 是作者多年本科授课经验和科研成果积累的结晶,主要介绍了辐射在行星大气中的传输、地气能量收支和辐射在气候敏感度及气候变化中的作用等内容。作者通过详细的公式推导、生动的物理模型、透彻的分析推理和简洁的典型示例,旨在为大气科学相关专业的本科生提供一本对数理基础要求相对较低、内容适中的大气辐射教程,也为初学者提供一本入门读物。

本书的翻译工作主要由刘超教授和银燕教授完成,李季、袁亮、姚彬、金诚、王健捷、曾晨、滕诗文等研究生协助完成了译稿校对和排版工作,原著作者 Ping Yang 教授也多次对译稿提出宝贵意见。高等教育出版社的关焱编辑为本书的编辑出版提供了热情的帮助。在此,我们一并致谢。

本书得到了江苏高校优势学科建设工程和国家自然科学基金项目(项目号:41571348)的联合资助。

由于译者水平有限,时间仓促,译文不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

刘超 银燕

2017年2月于南京信息工程大学

前 言

本书作为一本关于大气辐射的入门教程,主要介绍行星大气中的辐射传输,并特别关注地球大气、地球能量收支和辐射在气候敏感度及气候变化中的作用。本书内容适于大气科学专业低年级研究生及物理学高年级本科生参考,要求读者掌握大学物理、微积分及线性微分方程求解方法等基础知识。

本书的主要目的是为学生提供一些相对简单且以物理概念为基础的方法,用于计算地表和大气层顶的辐亮度、辐射通量以及大气中的辐射加热率。为了达到这一目的,本书参考了 Rodgers 和 Walshaw 的 *A Treatment of Infrared Radiative Transfer in the Atmosphere*^[1], 以及 Lacis 和 Hansen 的 *A Treatment of the Transfer of Solar Radiation*^[2] 两部经典著作。虽然目前有很多更先进的方法被用于解决这些问题,但本书介绍的一些经典方法已经包含了问题所涉及的最基本的物理过程。“现代”和“经典”方法的区别在于处理散射、吸收和发射的细节,以及数值求解辐射传输方程的精度。

本书展示的内容意在帮助学生熟悉一些相对简单的技术方法,并以此增强他们对散射、吸收和发射效应的理解。其次,希望帮助学生认识地球气候对看似微乎其微的辐射收支扰动的敏感性。第三个目的是锻炼学生的分析能力。书中大部分问题通过解析方法处理,通过简明的叙述而避免使用大型计算机程序。重点是培养学生的理解能力,以及对问题进行分析操作的能力,而不是依赖计算机做练习。

在每章的最后,都提出一些有趣且有指导性的习题,可以帮助学生更加深入地理解本章及前面章节的内容。这些习题中有的相当简单,但是对学生理解相关知识很有帮助;有的习题则对学生具有一定的挑战性。习题通常按照从易到难的顺序排列。有些习题需要使用简单的数值计算,利用数据表或通用的交互式计算机分析软件程序来

解答。这些涉及数值计算的练习可帮助学生建立关于各种物理过程中数量级的概念。

本书以在美国俄勒冈州立大学(Oregon State University)讲授 20 多年的大气辐射课程的“课堂笔记”为基础发展而来。在过去的这些年里,我们逐渐调整该笔记以适应学生的要求和 10 周为一个教学周期的时间限制。本书并不是作为参考书使用的,因为已经存在大量优秀的关于大气辐射的参考书^[3-8]。但是普遍认为,使用这些参考书来进行入门性大气辐射课程的教学难度很大。授课者只能选择介绍书中的部分内容,在学生看来这些主题更像书中不同部分的随机组合。由于授课时间的限制,书中的很多部分无法在授课中涉及。除此之外,对学生来说一些参考书阅读起来也会有一定难度,有些甚至需要读者具有远远高出大气科学专业低年级研究生或物理学专业高年级本科生应该具备的数理知识和能力。公平地说,大气辐射对于首次接触者往往具有特殊的挑战性。初学者常常会为天顶角、相对方位角、立体角、辐亮度和辐照度等大量抽象概念而感到困惑。本书的主旨是帮助大气辐射的初学者扫除这些与辐射传输相关的疑惑,使读者更好地理解课程中涉及辐射传输的复杂的几何关系、陌生的参数、难懂的术语和单位等问题。

与此同时,本书还可以扩展到辐射对光化学反应、大气光学以及遥感等应用问题。另外,本书仅限于平面-平行辐射传输。我们回避了云中液态水或冰晶的空间变化对遥感的影响,也回避了云或云周边显现的三维辐射效应。即使不涉及这些内容,在一个季度短短 10 周为一个学期的教学周期中包含现有的基本知识已感到时间紧张,更别说大气辐射的潜在应用和三维辐射传输效应等问题了。

本书也包含一些专题性质内容的介绍,如辐射计(第 2.3 节)、光散射基本原理(第 3.3 节)、分子光谱的描述(第 5.2 节和第 5.3 节),其中每一个主题都有很多对应的专著。这些章节涉及的内容只是为那些对相关内容了解较少的学生提供一些背景知识。在导论课程中,授课者可以快速介绍这些内容,甚至可以把它们留给学生自己阅读。其他在书中标记为“选读”的附加内容(第 4.12 节—第 4.17 节),甚至可能完全不需要在课程中提及。这些章节简要地介绍了一些更加精确地求解辐射传输方程的方法和求解辐射传输问题的数值算法,为计划进一步学习大气辐射的学生提供了一些入门介绍,这些额外内容也可

以在学期较长的课程中讲述。

我 (Jim Coakley) 非常感谢本书共同作者 Ping Yang 教授提出的建议, 将原来的课堂笔记编写为一本入门教科书。我更感谢他接受我的邀请, 成为本书的合著者。Ping Yang 教授对本书的贡献极大地扩展和提升了本书的内容。他使书中的内容更加易懂, 更加准确, 也更加完整。如果没有 Ping Yang 教授的参与, 以及 Wiley 出版社编辑 Ulrike Fuchs 女士和 Ulrike Werner 女士的帮助, 本书也不会诞生。我同样感谢过去多年在俄勒冈州立大学选修过大气辐射课程的学生们。他们在上课过程中遇到的困扰, 让我明白用更好的方法呈现这些内容的必要性。一些选修过该课程的学生可能会发现, 本书很多章节来自课堂笔记。有些人甚至会意识到: 书中额外的知识解释、额外的推导步骤、清晰的示意图、增加的例题以及极少的错误, 都可能是他们对本书的贡献。我甚至认为, 本书对以前选修过该课程的学生会更加有用, 但是, 我还是希望本书能使大气辐射的初学者受益。同时, 我很感激那些在我从事大气科学教学和科研生涯中遇到的众多出色的同事。他们在我学习、成长为一名研究者和教师的道路上发挥了极其宝贵的作用。他们中的一些人肯定也会发现自己对本书各章节所做的贡献。

我非常感谢来自俄勒冈州立大学、美国国家科学基金会 (NSF)、美国国家航空航天局 (NASA)、美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 以及美国海军研究局 (ONR) 的多年资助。这些经费让我及同我工作、学习的学生和博士后开展了大量基于卫星观测了解云与气溶胶特性以及气溶胶-云相互作用的研究工作。我要特别感谢让我参与美国斯克里普斯海洋研究所 (Scripps Institution of Oceanography) 的美国国家科学基金会云-化学-气候中心 (C^4), 以及多年来参与 NASA 地球辐射收支实验及云-地球辐射能量系统项目。如果没有这些研究经验, 这本书也不可能完成。我特别感谢海洋-大气科学学院 (现为地球-海洋-大气科学学院) 对我撰写本书的支持, 以及允许我退休后继续使用这些大气辐射课程讲稿。同时, 我感谢得克萨斯 A&M 大学大气科学系支持我在本书的撰写过程中对大学城的访问。Ping Yang 教授和大气科学系的教职工使这些旅行充满快乐, 成为我值得记忆的美好体验。

我感谢我的妻子和家人容忍我在过去三年半将讲稿整理成书过程中的忙碌。

Jim Coakley

2013 年 8 月于俄勒冈州科瓦利斯

对于 Wiley 出版社的“大气物理系列”丛书,我最初的计划是编写一本适合地球科学各专业高年级本科生的关于大气辐射的入门教科书。来自德国不来梅大学(University of Bremer)的 Alexander Kokhanovsky 博士担任该系列图书的编辑后,进一步鼓励我完成这一目标。我向 James(Jim)Coakley 教授征求关于编写这样一本教科书的建议。作为回复,James Coakley 教授将他在美国俄勒冈州立大学 20 多年来讲授大气辐射课程中所总结的讲稿同我分享。他的讲稿的独特风格使我印象深刻,特别是在不使用复杂数学方法的情况下将物理概念解释清楚的能力,这在辐射传输教材中是极其特别的。我知道 James Coakley 教授正在考虑于近几年退休,而我不想看到他杰出的讲稿被浪费。所以,我建议 James Coakley 教授将他的讲稿编写为教程。令我高兴的是,他接受了我的建议,并邀请我以合著者的身份帮助他完成本书。我很高兴有这样的机会可以和 James Coakley 教授合作。首先,与他合作是一件特别愉快的事,他也很乐意接受我的意见以及我在本书中增加的内容。其次,通过与他合作,我学会了如何在尽量少使用数学公式的情况下高效地讲授大气辐射的技巧。

在我看来,本书有三点独到之处。首先,书中用一些简单易懂的模型解释了大气辐射中的重要概念。例如,通过一个简单的灰窗模型解释温室效应和相关的气候对辐射传输的敏感性。其次,采用简单的示意图来定义和解释物理量。第三,本书涵盖的内容对还没有广泛接触过数理训练的读者是完全适用的。

我十分感谢得克萨斯 A&M 大学几位研究人员和研究生对本书的贡献,这里特别感谢 Lei Bi, Shouguo Ding, Chao Liu, Chenxi Wang 以及 Bingqi Yi, 感谢他们准备了书中的部分示意图,包括书中的图 1.7、图 1.8、图 1.9、图 1.11、图 1.12、图 3.4、图 3.5、图 4.3、图 4.9、图 5.3、图 5.4、图 5.5、图 5.12 和图 7.6。

我还要感谢我在得克萨斯 A&M 大学的良师益友, Gerald North 教授, George Kattawar 教授和 Kenneth Bowman 教授,感谢他们对我工作的支持。过去的多年中,我向很多人学习了关于大气辐射理论和应用的知识,其中包括 Kuo-Nan Liou 教授, Warren Wiscombe 博士, George Kattawar 教授, Michael King 博士, Thomas Wilheit 教授, Thomas Vonder Haar 教授以及 William L. Smith 教授。同时,我在学术上的进步也广泛受益于一些科研合作者,其中包括(按照字母顺序排列) Anthony Baran, Bryan Baum, Andrew Dessler, Oleg Dubovik, Qiang Fu, Andrew

Heidinger, Andrew Heymsfield, Yongxiang Hu, N. Christina Hsu, Hironobu Iwabuchi, Ralph Kahn, Xu Liu, Istvan Laszlo, Patrick Minnis, Michael Mishchenko, Shaima Nasiri, R. Lee Panetta, Steven Platnick, Jerome Riedi, Si-Chee Tsay, Manfred Wendisch 和 Fuzhong Weng。

在完成本书期间,我的研究得到了美国国家科学基金会(NSF)、美国国家航空航天局(NASA)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)以及美国联邦航空管理局(FAA)等机构的支持。我想借此机会感谢NASA的Hal Maring博士、Lucia Tsaoussi博士,NSF的Bradley Smull博士、Chungu Lu博士和A. Gannet Hallar博士,以及FAA的Rangasayi Halthore博士和S. Daniel Jacob博士对我的支持和鼓励。

James Coakley教授已经在前言中提到,我们衷心地感谢Wiley出版社的编辑Ulrike Fuchs女士和Ulrike Werner女士,感谢她们的帮助和对我们的耐心。

最后,也是最重要的,感谢我的家人,感谢她们对我过去几年全神贯注于这本书和研究工作的支持。

Ping Yang

2013年8月于得克萨斯大学城

参考文献

- [1] Rodgers, C.D., and C.D. Walshaw, 1966: The computation of infra-red cooling rate in planetary atmospheres. *Q. J. R. Meteorolog. Soc.*, **92**, 67-92.
- [2] Lacis, A.A., and J.E. Hansen, 1974: A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 118-133.
- [3] Goody, R.M., and Y.L. Yung, 1989: *Atmospheric Radiation Theoretical Basis*. Oxford University Press, New York.
- [4] Thomas, G.E., and K. Stamnes, 1999: *Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean*. Cambridge University Press, New York.
- [5] Liou, K.N., 2002: *Introduction to Atmospheric Radiation*. 2nd edn. Academic Press, New York.
- [6] Bohren, C.F., and E.E. Clothiaux, 2006: *Fundamentals of Atmospheric Radiation*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- [7] Wendisch, M., and P. Yang, 2012: *Theory of Atmospheric Radiative Transfer—A Comprehensive Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- [8] Mishchenko, M.I., Travis, L.D., and A.A. Lacis, 2006: *Multiple Scattering of Light by Particles—Radiative Transfer and Coherent Backscattering*. Cambridge University Press, New York.

目 录

前言	i
参考文献	v
第 1 章 地球能量收支和气候变化	1
1.1 引言	1
1.2 大气的辐射加热	2
1.3 全球能量收支	3
1.4 灰窗近似和温室效应	5
1.5 气候敏感度和气候反馈	8
1.6 辐射时间常数	12
1.7 地球大气成分	13
1.8 辐射与地球平均温度廓线	18
1.9 辐射加热的空间分布与环流	29
1.10 小结和展望	32
习题	33
参考文献	35
第 2 章 辐射和辐射源	37
2.1 光的电磁波属性	37
2.2 振荡偶极子的辐射、辐亮度和辐射通量密度	38
2.3 辐射计	42
2.4 黑体辐射:光的量子属性	45
2.5 入射太阳辐射	53
习题	56
参考文献	58
第 3 章 地球大气中的辐射传输	59
3.1 消光截面	59
3.2 散射截面和散射相函数	63
3.3 光散射基本原理	64

3.4 辐射传输方程	70
3.5 太阳和地球辐射的辐射传输方程	73
习题	74
参考文献	75
第4章 辐射传输方程的解	76
4.1 引言	76
4.2 辐射传输方程的形式解	77
4.3 热辐射的解	79
4.4 红外辐射通量密度与加热率	85
4.5 散射和吸收的形式解	92
4.6 单次散射近似	94
4.7 辐射传输方程的傅里叶分解	101
4.8 勒让德级数表征和爱丁顿近似	103
4.9 在爱丁顿近似中增加大气层	112
4.10 在爱丁顿近似中加入反照率非零的表面	114
4.11 红外辐射中的云	115
4.12 直接辐射和漫射辐射的分离(选读)	116
4.13 在爱丁顿近似和二流近似中分离漫射辐射和直接辐射 (选读)	117
4.14 δ -爱丁顿近似(选读)	120
4.15 离散纵标法和 DISORT(选读)	127
4.16 累加-倍加法(选读)	128
4.17 蒙特卡罗模拟(选读)	130
习题	132
参考文献	135
第5章 大气分子吸收	138
5.1 光谱平均透过率	138
5.2 分子吸收谱	141
5.3 转振带内吸收线的位置和强度	143
5.4 吸收线的线形	147
5.5 多普勒增宽和沃伊特线形	150
5.6 单条弱吸收线的平均吸收率	151
5.7 单条压强增宽强吸收线的平均吸收率	152
5.8 非均匀路径大气的吸收	155
5.9 无重叠吸收线的带平均透过率	158

5.10 含重叠吸收线平均透过率的近似计算	159
5.11 指数和拟合法及相关 k 分布法	166
5.12 分子重叠吸收带的处理	170
习题	170
参考文献	172
第 6 章 地球大气和地表对太阳辐射的吸收	174
6.1 引言	174
6.2 O_3 对紫外线和可见光的吸收	175
6.3 水汽对太阳辐射的吸收	180
习题	186
参考文献	189
第 7 章 发射辐射的简化计算	191
7.1 引言	191
7.2 CO_2 在 $15\ \mu m$ 吸收带的发射	191
7.3 CO_2 加倍对发射辐射通量密度的影响	197
7.4 CO_2 浓度加倍引起平流层发射辐射和温度的变化	200
7.5 后续工作	203
习题	203
参考文献	205
附录 A 物理学及地理学常数	206
附录 B 微分方程的求解	208
B.1 简单积分	208
B.2 积分因子	209
B.3 二阶微分方程	210
附录 C 普朗克函数的积分	212
附录 D CO_2 红外吸收带吸收线参数的随机模型汇总	214
参考文献	218
附录 E O_3 在紫外到可见光波段的吸收截面	219
参考文献	220
索引	221

第 1 章

地球能量收支和气候变化

1.1 引 言

地球大气、陆地及海洋对太阳辐射的散射和吸收以及对红外辐射的吸收和发射决定着地球的气候。在地球大气相关研究中,“太阳辐射”这一术语通常是指由太阳发射、照射到地球的“光”。这些辐射大多处于 $0.2\sim 5\ \mu\text{m}$ 的波长区间。本书中,对“太阳光”、“太阳辐射”以及“短波辐射”这些术语会不加区分地使用。可以被人类眼睛感知的辐射,即可见光,占据了 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 的波长区间,属于入射太阳辐射的一部分。类似于对太阳辐射的表述,“出射辐射”、“地球辐射”、“热辐射”、“红外辐射”和“长波辐射”在本书中都指由地球表面及其大气发射的热辐射。这一部分辐射主要占据波长为 $4\sim 100\ \mu\text{m}$ 的波段。

太阳辐射加热着地球。全年平均情况下,地球吸收太阳辐射的速率基本可以平衡其向太空发射热辐射的速率。这一平衡决定了地球的全球平均温度。照射到地球的太阳辐射大部分透过大气到达地表,到达地表的太阳辐射大部分会被地面吸收。全年平均情况下,地表通过其吸收辐射能量和发射辐射能量的平衡来保持全球平均温度。地表能量的损失大多源自其发射的红外辐射。使大部分太阳光透过,大气会吸收地表发射的大部分红外辐射。而大气通过吸收辐射、水汽凝结、凝华和降水过程的潜热释放、地表能量的湍流输送、云及温室气体(吸收红外辐射的气体)的辐射等多个过程的平衡,维持其平均温度的垂直分布结构。

本章首先介绍全球全年平均吸收的太阳辐射和向太空发射的红外辐射的平衡。通过建立一个简单的地球辐射平衡模型得到一个低于冰点的全球平均温

度,甚至在地球吸收比现在多得多的太阳光的条件下,这一平衡温度也很低。当加入大气,它在模型中只允许太阳光通过,并通过吸收阻碍地表发射红外辐射。这个简单的模型就可以用来模拟地球的温室气体效应,从而得到一个温暖、适宜居住的地球表面温度。该模型可以提供一种对地球大气辐射响应时间的估算方法,并得到大约为一个月的响应时间。这个长达一个月的响应时间也解释了地球大气缺乏对太阳辐射昼夜变化的响应,以及对于地球绕日轨道运行造成的季节交替变化的有限响应。该模型同样可以用来估算由于入射太阳辐射或大气成分(例如,由于化石燃料燃烧导致 CO_2 含量的增加)变化导致的地球平均温度的变化。这些变化部分是由于大气和地表的反馈导致的,这些反馈因为地球温度的变化会进一步改变其对太阳辐射的吸收和其发射的热辐射。同时,本章还将讨论一些更加实际的地球大气模式,这些模式中使用的气体柱浓度更加接近全球平均值。该模式描述了如何通过强迫大气达到辐射平衡而引起大气和地表之间的湍流热量交换。辐射及其与地表的交换相结合可以大致解释全球平均温度的垂直结构。除此之外,本章还将给出对导致地表和大气加热或冷却的各种因素的真实估计,以及云和主要辐射活性气体在大气中扮演的角色。本章最后解释入射太阳辐射随纬度分布不同导致的大气及海洋的复杂环流。由大气环流及与之相伴随的降水和蒸发模式所产生的风场对海洋环流贡献巨大。大气中的风和洋流将能量从热带输送到高纬度地区。这种能量传输对两地区间温度的差异起到了调节作用。

1.2 大气的辐射加热

热力学第一定律指出,能量是守恒的。根据这一定律,一个体积微元内大气内能的变化(用 dU 表示)等于其吸收的热量(用 dQ 表示)减去空气对外做的功 dW ,即

$$dU = dQ - dW \quad (1.1)$$

空气可以近似为理想气体。对于理想气体,其内能与绝对温度呈正比。所以,内能的增加可由 $dU = mC_v dT$ 给出,式中, m 表示空气质量, C_v 表示空气的定容比热。当然,大气是可以自由膨胀或被压缩的,并不会被局限于某一体积内。当压强恒定时,空气温度升高,其体积会膨胀。空气对外做功为 PdV , 式中, P 表示空气的压强, dV 表示其体积的增量。结合理想气体状态方程 $PV = mRT$ 和能量守恒定律,就可以得到:

$$mC_p dT = dQ + \frac{mRT}{P} dP \quad (1.2)$$

式中, $C_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 表示气体的定压比热, 并且 $C_p = C_v + R$, $R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 表示干空气的气体常数。本书忽略因为水汽对热容和气体常数影响而引起的温度的微小变化。在极短的时间增量 dt 内,

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{mRT}{P} \frac{dP}{dt} \quad (1.3)$$

式中, dT/dt 通常被称为加热率, 单位是 K d^{-1} , dQ/dt 表示对空气施加或移除能量的速率(单位是 J s^{-1} 或 W), dP/dt 表示气压变化的速率。气压的变化导致气体运动, 而空气通过改变其温度和运动来对加热做出响应。大气中大部分辐射加热会引起热力学状态的改变, 例如, 地球绕太阳旋转造成太阳加热的变化, 从而导致高纬度地区温度的变化。但也有一些辐射加热与动力响应几乎平衡。例如, 大气向下运动(或称下沉运动)的速率大约可与对流层副热带高压系统中的辐射降温率相当。全球全年平均情况下, 不存在空气的净运动, 即 $dP/dt = 0$ 。因而,

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} \quad (1.4)$$

1.3 全球能量收支

全年平均而言, 地球系统可以大致维持在一个辐射平衡的状态。在这种条件下, 全年平均的全球平均温度不随时间变化。在辐射平衡状态下, 地球吸收太阳辐射的速率等于其向外发射红外辐射的速率。

太阳常数是指太阳和地球处于日地平均距离(一天文单位, AU)时, 能够到达地球大气层“顶”的辐射能量, 通常用单位面积下的功率定义, 单位为 W m^{-2} , 本书用 Q_0 表示。当然, 实际大气层并没有“顶”, 这里的大气层“顶”仅代表一个假设的、包括了地球和大部分大气的球面。这个球面内的大气会吸收或反射大部分进入地球的太阳辐射, 同时吸收和向外发射大部分红外辐射。我们定义地球表面以上 30 km 对应的球面为大气层顶, 该球内包含了 99% 的地球大气。

利用卫星观测已经得到一些高精度的太阳常数结果($\sim 0.1\%$)。测量值大约介于 1360 W m^{-2} 和 1370 W m^{-2} 之间。最近观测结果 $1361 \text{ W m}^{-2[1]}$ 被认为是最精确的值。除此之外, 太阳常数其实并不是一个常数, 它会随太阳黑子 11 年的周期变化。其峰值到峰值之间的变化大约是其平均值的 0.2%。为了方便, 本书统一使用 $Q_0 = 1360 \text{ W m}^{-2}$ 。同时, 因为太阳和地球间的距离远大于地球和太

阳的半径,所以通常认为照射到地球表面的太阳辐射是准直的,太阳辐射是沿日地中心连线方向平行入射的(如图 1.1 所示)。

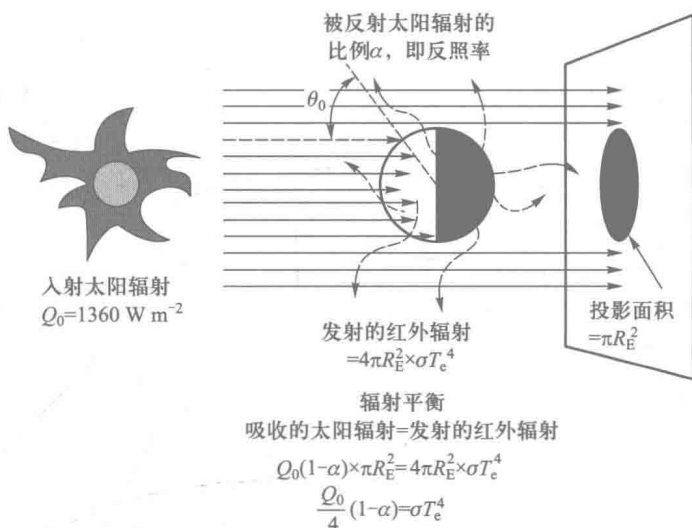


图 1.1 地球的辐射平衡。来自太阳的光线到达地球时可近似为平行线。对位于太空远处的观测者,地球会投影出一个等半径的圆形阴影。地球会反射一部分被其阻挡的太阳辐射,而吸收其余部分。在辐射平衡状态下,被吸收的太阳辐射与地球向外发射的红外辐射会达到一个平衡状态。由于地球自转足够快,所以可以认为其辐射平衡温度 T_c 在地球的白昼半球及夜晚半球是一样的。太阳辐射的入射方向和地球表面被照射位置的法向方向之间的夹角被称为太阳天顶角,通常用 θ_0 表示。

如果地球能够吸收照射到其表面的全部太阳辐射能量,地球的吸收速率就可以表示为 $Q_0 \pi R_E^2$, 式中 $R_E = 6371 \text{ km}$, 为地球半径。如图 1.1 所示,圆形的面积 πR_E^2 是远处观测时,太阳辐射向太空传播过程中被地球阻挡区域的面积。但是地球并不会吸收所有入射的太阳辐射能量,它会反射一部分能量。被反射能量占总入射能量的比例被称为反照率,通常用 α 表示。卫星观测得到的地球反照率接近 $0.3^{[2]}$ 。因此,地球吸收太阳辐射的比例就是 $1-\alpha$ 。最后,地球可以近似为一个球体,任何时刻只有一半的表面被太阳辐射所照射。对于被太阳照射的半球而言,单位面积的平均入射辐射能量为 $Q_0/2 = 680 \text{ W m}^{-2}$ 。比例因子“ $1/2$ ”代表阻挡太阳辐射的圆形面积与具有同样半径的半球面积的比值。这一系数同样表示地球被照射一侧太阳天顶角余弦的全球平均值。天顶方向表示垂直于地面向上的方向。如图 1.1 所示,地球表面的太阳天顶角就是地球表面向上法线方向和太阳辐射入射方向间的夹角。太阳天顶角的余弦值表示地球表面相对于太阳辐射入射方向的倾斜值。由于这个倾角的存在,照射到大气顶倾斜表面的太阳辐射会分布在更大的区域内。单位面积接收到的入射辐射功率就减少为太

阳常数与天顶角余弦值的乘积。对于地球被太阳照射的一侧,有一个“有效”的平均太阳天顶角,该角对应的余弦值等于地球被照射半球太阳天顶角余弦的平均值,所以这个有效天顶角应该是 60° 。本章稍后将讨论到,地球绕其中心轴高速自转,所以平均来看,其吸收的太阳辐射会分布在白天半球和夜间半球。全球平均的入射太阳辐射功率就应该是 $Q_0/4 = 340 \text{ W m}^{-2}$ 。这里,因子“1/4”可以认为是考虑给定半径的圆面积与具有同样半径的球面的表面积的比例。通过计算地球表面被太阳辐射照射的白天半球太阳天顶角余弦的平均值,并将该平均值除以 2,就可以得到高速自转地球的昼夜平均入射太阳辐射。

假设地球向外发射辐射的速率与相同温度黑体发射的速率相同,其辐射速率就可以通过斯特藩-玻尔兹曼定律得到。假设地球各处的温度相同,从而得到其向外发射辐射能量的速率为 σT_e^4 ,式中, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$,为斯特藩-玻尔兹曼常数, T_e 表示地球的辐射平衡温度或有效辐射温度。图 1.1 中,我们用短划线箭头象征性地表示地球向外发射辐射能量。在满足辐射平衡的条件下,地球吸收能量的速率等于其向外发射辐射的速率,即

$$\frac{Q_0}{4}(1 - \alpha) = \sigma T_e^4 \quad (1.5)$$

从而可以得到地球辐射平衡温度为

$$T_e = \left[\frac{Q_0(1 - \alpha)}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{1360 \text{ W m}^{-2} \times (1 - 0.3)}{4 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}} \right]^{\frac{1}{4}} = 255 \text{ K} \quad (1.6)$$

此平衡温度约等于地表上 5 km 高度大气的温度。假设地球没有大气,且表面全部被海洋覆盖,地球表面的反照率就会是海洋的反照率,约为 $\alpha = 0.06$ 。那么,地球辐射平衡温度将会是

$$T_e = \left[\frac{1360 \text{ W m}^{-2} \times (1 - 0.06)}{4 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}} \right]^{\frac{1}{4}} = 274 \text{ K} \quad (1.7)$$

此时,地球温度接近于冰点。

1.4 灰窗近似和温室效应

基于“灰窗”假设的地球辐射平衡模型是考虑温室效应的最简单的模式。地球大气的温室效应表示的是地球辐射平衡温度和地表温度之间的差异。本书使用 288 K 代表全球年平均地表温度,该值也接近地球现在的实际温度。温暖的地表是由于大部分入射的太阳辐射会透过地球大气到达地表加热导致的。透