



科爱传播
KE'AI COMMUNICATIONS

中文版

大气科学

(第二版)

Atmospheric Science

Second Edition

〔美〕约翰·M.华莱士 彼得·V.霍布斯 著
何金海 王振会 银燕 朱彬 等 译
丁一汇 校



科学出版社

www.sciencep.com



原版引进

Atmospheric Science

Second Edition

大 气 科 学

(第二版)

[美] 约翰·M. 华莱士 彼得·V. 霍布斯 著

何金海 王振会 银燕 朱彬 等 译

丁一汇 校

科 学 出 版 社

北 京

图字：01-2008-0363 号

This is an translated version of

Atmospheric Science, Second Edition

John M. Wallace, Peter V. Hobbs

Copyright © 2006 Elsevier Inc.

ISBN: 0-12-732951-X

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

AUTHORIZED EDITION FOR SALE IN P. R. CHINA ONLY

本版本只限于在中华人民共和国境内销售

图书在版编目(CIP)数据

大气科学/(美)华莱士(Wallace, J. M.), (美)霍布斯(Hobbs, P. V.)著;何金海等译. —2版. —北京:科学出版社, 2008
ISBN 978-7-03-022595-5

I. 大… II. ①华…②霍…③何… III. 大气科学 IV. P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 112542 号

责任编辑:邹凯 霍志国 刘芸芸/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 9 月第一次印刷 印张:31 3/4 插页:28

印数:1—2 500 字数:750 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序 言

大气科学是一门新兴的、迅速发展的应用性学科。从广义的观点看，它研究各种行星（如地球、金星、火星）大气的结构和演变及其中发生的各种大气现象。从狭义的观点看，它主要研究地球大气。从这个意义讲，大气科学可看作地球科学的一个重要分支。由 Wallace 和 Hobbs 教授编著的这本《大气科学》主要阐述地球大气的特征、结构、演变过程与预报等基本问题。它作为大学教学的一个入门教材十分适用于地球科学各相关分支学科的学生使用，对于大气科学专业的学生和其他人员也有重要参考价值，因为它简练而通俗地阐述了大气科学各部分的基本问题和主要成果。任何一个学生，如果能认真地学完这本书，都会从中获取很大的收益。

两位编者，Wallace 和 Hobbs 教授，一位是国际著名的气候学家，另一位是国际著名的云雾物理学家，他们合作写作的这本大气科学教材具有很高的科学水平和影响。第一版出版于 30 年前（当时就受到许多学校的欢迎和重视（国内有中译本））。2006 年出版的第二版在第一版基础上做了大幅度的修改和增补。对于近 30 年来在大气科学领域中出现的许多新进展和新成果在本书中都有阐述，其中包括大气化学、地球系统、气候与气候变化、大气边界层等。对于大气动力学、辐射传输、强风暴以及温室效应和全球变暖等章节也做了重要修订，增加了新的内容，从而使本书涵盖了大气科学的大量最新成果和现代的科学原理和概念。这对于一个开始学习和接受大气科学基础知识的学生尤其重要，有了这些新知识，可以更快地过渡到相关的研究领域中去。除了内容新这一个重要特点外，该书对于各部分理论问题的阐述做了精心选择，选取的内容大多是基础性的和必需具备的。在阐述方式上深入浅出，通俗易懂，即便对于非大气科学专业的学生也容易理解。此外该书还包括大量的思考题和计算题，并且有些直接置于所述的重要概念和理论之后，这对于加深理解基础知识是十分重要的。一本好的教科书应该包括这些部分。同时该书还附有大量注脚和知识性框栏。它们非常精炼而准确地总结了在相关问题关键科学家的贡献和简历、气象学的发展史以及关键科学概念或问题的深入解释。这些对于吸引和增加学生的学习兴趣有很大的作用。这种写法在近代出版的其他教科书中也日渐明显。总之，崭新的内容、精心的选材、深入浅出和生动的阐述、大量的针对性习题以及许多科学家小传和总结性的知识性框栏，共同构成了这本教科书最重要的特点。我相信本书中文版的出版一定会受到广大读者的欢迎。

本书的中文译文由南京信息工程大学的教师完成。他们都是相关领域的教授和专家，因而译文的质量是高的。他们本着认真负责的态度对译文做了多次修改。尽管如此，由于该书的内容新颖，涉及面广，有个别错误或不当之处在所难免，这也是任何一部译著都难免发生的。何金海教授作为主要译者，做了大量组织和协调工作，保证了本书能顺利和及时出版，感谢他的重要贡献！最后，我认为还要感谢科学出版社对此书出版的重视和为此付出的劳动，尤其是邹凯和霍志国编辑。

丁-记

2008 年 8 月于中国气象局

.....

就在彼德·霍布斯（云物理学家）去世前几个月的一天——2005年7月25日，我们还组织了一次聚会，庆祝他所发起的（编书）项目终于完成了（尽管书稿还不够成熟）。

在第一版的献辞中，彼得选择使用了 PERCY BYSSHE SHELLEY（帕西·雪莱）的诗“云”，作为对生命、死亡与再生的形象暗喻，我在第二版中选择同一首诗，不过这次是为了纪念彼得。

——约翰·华莱士

In Memory of Peter V. Hobbs (1936–2005)

I am the daughter of Earth and Water,
And the nursling of the Sky;
I pass through the pores of the ocean and shores;
I change, but I cannot die.
For after the rain when with never a stain
The pavilion of Heaven is bare,
And the winds and sunbeams with their convex gleams
Build up the blue dome of air,
I silently laugh at my own cenotaph,
And out of the caverns of rain,
Like a child from the womb, like a ghost from the tomb,
I arise and unbuild it again.

(The Cloud by PERCY BYSSHE SHELLEY)

纪念彼德·霍布斯（1936—2005）

盛芝义 译

我是大地和水的娇女，
也是苍穹的天使；
我穿越海洋和大地的每一处孔隙；
我善变化，时有时无，但不冥逝。

雨后天宇湛蓝，晴空万里，
阳光用高超手法，
把这碧蓝的苍穹修建，
我自诩我有丰功在焉。

我令大雨滂沱，
而我却像婴儿堕地，又似鬼魂夜巡，
悄然溜出雨幕，
我故伎重演，再次徜徉天际。

译者简介：

盛芝义，南京信息工程大学（原南京气象学院）英语教授，气象界著名翻译专家，长期从事科技英语翻译实践，曾主持翻译了国家科学技术委员会的《中国气候蓝皮书》、《中国气候十年纲要》等，并出版了《科技英语 900 句》一书。多年从事研究生英语教学，出版多部大气科学学科专业英语读物，翻译大气科学学科专业英语文献两千万言以上。

译者前言

随着人们对全球气候变化普遍关注的日益加强,以及大气科学学科的深入发展,一本能够紧跟大气科学发展步伐、将气候和大气科学作为主要研究领域的著作已成为现实需要。世界顶级大气科学家彼得·霍布斯和约翰·华莱士的大作“*Atmospheric Science: an introductory survey*”第二版的问世正是适应了这种需要。该书的第一版出版于1977年,1979年王鹏飞先生等翻译此书,书名为《大气科学概论》。此书在当时大气科学类专业本科生和研究生教学中都起到了很大的作用。

在作为大气科学引导性教材的第一版出版30多年之后,作者对其进行了新的补充。气候与大气化学在大气学科中占了更为重要的位置,一些传统主题的新变化和新发展在该书得以补充描述,如恶劣天气的预报和地球辐射平衡、星载传感器为全面观测地球大气服务等。第二版中作者对有些章节进行了调整、删减和扩展,并对大气科学新发展进行了选择性介绍。加框文字(书中简称为框栏)和彩色插图的使用更使本书图文并茂。在保留第一版的大量练习和附加作业的基础上,本书在每章末尾都增加了新的练习。本书提供的网站支持也能够为广大学生、老师和读者提供更为开阔的视野。第一版分为9个章节,主要内容几乎一半是物理气象学,一半是动力气象学。而第二版则增加了大气化学、大气边界层、地球系统与气候动力学的章节,大气动力学、辐射传输、大气电学、对流性风暴以及热带气旋等内容也得以扩展。无论是第一版还是第二版,在撰写编排上,作者都周到地考虑了学生和教师的实际情况,在使用方面亦都提出了具体的建议。

在科学发展日新月异的今天,基于相似的出发点,我们组织了一个《大气科学》的科研和翻译团队,联合了南京信息工程大学等单位大气科学方面的专家和老师们以及语言文化学院的老师,共同致力于将这本书翻译成中文,将大气科学学科发展的新变化译介绍给中国的学生和教师。

《大气科学》(第二版)的翻译得到了南京信息工程大学建设与改革工程项目(现代大气科学导论精品课程)和中国气象局行业专项(NO.20080043)的联合资助。本书的翻译由我和王振会、银燕等几位教授主持,其中第1章和第2章由刘芸芸和我负责翻译,第7章和第10章由梁萍与我合作翻译,第8章由陈桦与我合作完成。第3章和第6章由银燕教授与王振会教授合作完成,第5章由朱彬教授与王体健教授负责完成,第4章与第9章由许建明和王振会教授合作翻译。另外,译者前言部分和所引用的雪莱的诗由王玉括、盛芝义教授等完成。语言文化学院的孟庆粉老师负责协助全书的英文翻译把关和文字润色校对工作。

本书的翻译从2006年就开始了,从成稿到反复修改、字斟句酌,中间凝聚着各位译者的辛勤劳动和汗水,文字和插图的使用更是考虑到中文读者的需要和实际情况。

在《大气科学》(第二版)汉译本出版之时,感谢各位参加翻译和认真仔细校对的专家和老师们,感谢第一版汉译本的译者们为第二版的翻译树立了榜样,同时也要感谢

科学出版社的大力支持和合作。感谢陈宝德教授、张耀存教授和孙丞虎博士对本书相关章节进行了仔细校对。在翻译的过程中，韦晋、任珂、祁莉等给予了很大帮助，刘芸芸为本书的翻译做了很多联络工作，王玉括教授亦对本书的前期翻译做了许多指导性工作，在此一并致谢。最后，我们要感谢帮助本书最后完成翻译以及在翻译过程中予以帮助的所有人。

最后，在本书即将付印之际，我们特别荣幸能邀请到著名大气科学专家丁一汇院士为本书作序，对于他的褒奖和鼓励我们深感振奋和不安，谨表示衷心的感谢！

由于译者水平所限，时间仓促，译文不妥之处在所难免，切盼有关专家和读者不吝赐教，不胜感激。

何金海

2008年8月

于南京信息工程大学

附：翻译小组名单（按姓氏笔画为序）

王玉括	王体健	王振会	刘芸芸
许建明	朱 彬	陈 桦	何金海
孟庆粉	梁 萍	盛芝义	银 燕

第二版前言

从本书第一版发行到现在,已经 30 年过去了,大气科学已经发展成为一个重要的研究领域,并且有深远的科学与社会影响。30 年前,人们认为气候与大气化学这样的主题,还不足以重要到要在书中设立专门的章节,而它们现在已经成为大气学科的重要分科。更为传统的主题——如天气预报、强暴风雨形成原理和地球辐射平衡——其科学基础地位更为坚实。30 年前,星载传感器还处于初期发展阶段,而目前正为全面观测地球大气服务。那些见证这些成就,并且对此有所贡献的人——哪怕只是略有贡献,已经是非常幸运了。

自从我们一段接一段地起草本书,描述这些激动人心的新发展时,我们就开始担心,一本轻得可以放进学生背包里的书是否能够涵盖整个大气科学领域的内容。实际上,本书第二版确实比第一版包含了更多材料,但是由于采用这种双栏格式,并有辅助网站,所以本书并不比第一版重多少。在决定哪些最新发展应该包括进来、哪些东西需要省略时,我们选择了那些能够对学生的整个职业生涯都有好处、对专家亦很重要的基本原理,而避开那些即便很有趣却并非必要的细节。

第二版包括论述大气化学、大气边界层、地球系统与气候动力学的章节。第一版中题为“云与风暴”、“全球能量平衡”及“大气环流”的章节被去掉,但是其中所包含的内容已经移至其他章节,同时扩展了大气动力学、辐射传输、大气电学、对流性风暴及热带气旋等内容。我们使用 $T\text{-}\ln p$ 图作为标示大气探测的首要形式,从而现代化地处理了大气热力学的内容。第二版中还包含了许多插图,而且大部分是彩色的。

第一版中很受读者欢迎的一点,是包含了许多定量的练习,其答案全部置于每章的文本中,而且每章末尾还另外附有给学生的作业。第二版中不仅保留了这些特点,而且还在每章的末尾加了许多新的练习,并附有几乎一整套答案——不过这只对教师提供。第二版还使用了加框文字(简称框栏),作为在正文之外拓展话题或论证概念的工具。例说,第 3 章对气体定律的定性统计力学的阐释以及对热力学第一定律的介绍就是通过一系列文本实现的。

学术出版社提供了两个网站支持本书。第一个网站的信息与资源面对所有读者,这些资源包括可以打印的 $T\text{-}\ln p$ 图空白图、大部分练习的答案、我们书中没有足够空间涵盖的一些配有答案的附加练习、勘误表、关于全球天气观察与数据同化的附录,以及练习中可能用到的气候数据。第二个网站只对教师开放,包括一个教师指南、大部分练习的答案、本书中出现的绝大部分图表的电子版,以及可能对教师讲课有用的一套补充图表的电子版。

如果把这本书用作更加宽泛的概论教材,那么教师需要对材料有所选择,例如,一些侧重描述性的章节中的内容应当省略不用,对侧重定量研究的第 3, 4, 5, 7 章中比较高级的材料也应进行筛选。本书中筛选出的部分章节可作为多种不同课程的教材,例说,第 3~6 章可以用于大气物理与大气化学课程;第 1, 3, 7, 8 章可以用于侧重天气

学的课程；而第 1~2 章，以及第 3, 4, 9, 10 章的部分内容可以用于地球科学课程中的气候学。我们将衷心感谢读者对教师指南的指正与建议。

约翰·华莱士

彼得·霍布斯

西雅图，2005 年 1 月

鸣 谢

1972年,我受彼得·霍布斯之邀,与他合作撰写一部大气科学引论性教材。我们俩商量好由他牵头,草拟热力学与云物理章节,而我主要负责草拟辐射传输、天气学与动力气象的章节。在接下来的几年中,我们一直在努力协调他对精确与逻辑的强烈追求和我更加注重直觉与基于视觉的写作风格。我们之间热烈的协商过程检验并最终巩固了我们之间的友谊,其成果就是共同完成了这本教材,我们俩单独做的话谁都不可能做得这么好。

3年前,有一次在雨中散步时,彼得提醒我说,如果我想扩充期待已久的第二版,那么我们需要很快动手做,因为他想过几年就退休。我表示同意后,他立刻开始撰写他自己的章节,包括关于大气化学的这一全新章节,而且在2003年底完成了草稿。不久以后,他就被诊断犯了胰腺癌。

尽管有病,彼得还是继续修改自己的章节,并对我负责的章节提出很有帮助的反馈意见。即便后来他已经不能再就书的内容跟我进行热烈的讨论,他仍继续挥着那根让我丢脸的红钢笔,指出我的章节中的语法错误与论述不一致的地方。就在他去世前几个月的一天——2005年7月25日,我们还组织了一次聚会,庆祝(尽管书稿还不够成熟)他所发起的项目终于完成了。

在第一版的献辞中,彼得选择使用了雪莱的诗“云”,作为对生命、死亡与再生的形象暗喻,我在第二版中选择同一首诗,不过这次是为了纪念彼得。

彼得的“云与气溶胶研究小组”的几位成员在本书准备出版的过程中发挥了很大作用。德布拉·沃尔夫处理并做了许多插图,朱迪思·奥帕基争取了大多数的引用许可,亚瑟·兰诺提供了几幅云图,而且他与马克·斯托嘎提供了很有价值的科学建议。

我和彼得要感谢很多人,他们对这一版的设计、内容与撰写慷慨相助。第9章(大气边界层)由英属哥伦比亚大学的罗兰·斯塔爾主笔,我们华盛顿大学大气科学系的3位同事担任其他各章不同部分的顾问,傅强(Qiang Fu)对第4章(辐射传输)的设计方案提出了建议,并提供了所需的材料;林恩·麦克默迪选择了8.1节(温带气旋)中的个案研究,并给我们提出了针对此节的内容方面的建议。罗伯特·霍扎就8.3节(对流风暴)的内容与设计方案以及8.4节的热带气旋给我们提供了建议。斯蒂芬·沃伦、克利福德·马斯、莱特·耶格、安德鲁·赖斯、马西娅·贝克、大卫·卡特林、乔尔·桑顿与格雷格·哈基姆等几位同事阅读了各章的草稿,提出了很有价值的反馈意见。其他提供有价值的反馈意见并就草稿的某些部分提供技术建议的同事还有:爱德华·萨拉奇科、伊戈尔·卡门克维奇、理查德·甘蒙、乔伦·罗素、康韦·列维、诺伯特·昂特斯泰乃、肯尼思·比尔德、威廉·科顿、赫尔曼·格伯、陈淑仪(Shuyi Chen)、霍华德·布卢斯坦、罗伯特·伍德、阿德里安·西蒙斯、迈克尔·金、大卫·汤普森、朱迪思·利恩、艾伦·罗伯克、彼德·林奇、帕奎塔·朱伊德马、科迪·柯克帕特里克及J.R. 贝茨。同时,我要感谢那些研究生,他们志愿帮忙找出草稿中的错

误、矛盾以及令人费解的段落。受海洋—陆地—大气研究中心（COLA）资助的研究科学家珍妮弗·亚当斯，利用该中心开发的绘图软件（GrADS），制作了 8.1 节中的大部分图表。图表中的一些设计是由大卫·埃勒特、德布拉·沃尔夫、坎达斯·古德门森、凯·迪尤尔和迈克尔·麦考利提供的，贝丝·塔利准备了许多图表。史蒂文·卡瓦略与罗伯特·尼古拉斯提供了表格与数值。书中出现的大部分云与其他大气现象的照片都是别人免费慷慨提供的。我十分感谢傅强与彼德·林奇，他们慷慨地抽出自己的时间帮助改正方程式中出现的错误，也要感谢詹姆斯·布思、乔·卡索拉、约安娜·迪玛、钱姆·加芬克尔、大卫·里德米勒、可韦·伦纳特、雷·尤娅玛、贾斯廷·维特斯廷和雷迪·亚特维利帮助改正多重引用中出现的错误。

最后，我要感谢彼得的妻子西尔维娅和我的妻子苏珊，感谢她们的宽容，使我们在许多周末与夜晚全身心地投入这本书的编写。

第一版前言

本书是应大学里通常开设的几门大气科学引论性课程的需要编写的，包括大三与大四以及研究生低年级的概论性课程，本科阶段的物理气象课程以及天气学实验等。这些课程引导学生了解气象科学赖以立足的基本物理原理，对高级课程中详细论述的各种各样的气象现象予以基本的描述与阐释。在设计此书时，我们假定这门课的学生已经接触了大学一年级微积分与物理学和高中化学。

本书的主要内容几乎一半是物理气象学，一半是动力气象学。在物理气象学领域，我们介绍了大气流体静力学与热力学，云物理学与辐射传输的基本原理（分别是第2，4，6章）。此外，我们还覆盖了大气化学、气溶胶物理学、大气电学、高层大气物理学以及物理气候学中的一些主题。动力气象学包括对大尺度大气运动的描述以及对大气环流的基本阐释（分别是第3，8，9章）。在讨论云和风暴的第5章中，我们试图整合物理气象学与动力气象学。在编排章节方面，我们有意把关于天气学的材料放在本书的开始部分（第3章），使其成为日常气象图表讨论的引言，这些讨论是许多介绍性概论课程不可缺少的一部分。

本书共分为9个章节，大部分基础理论内容放在偶数的章节（第2，4，6，8章）中，第1，3章几乎全是描述性的，而第5，7，9章主要是阐释性的。奇数章节中的大部分内容都简单易懂，可以通过阅读作业完成，对研究生更是如此。但是，我们也认识到，即便大量内容当作阅读作业，对本科生来说，这么厚的一本书几乎不可能一个学期上完。为了使这本书更加能够辅助这类课程的教学，我们有意把理论性章节如此排列，某些很难的部分可以省略不用，也不怎么影响其延续性。这些部分已经用脚注标明。其他章节的描述性及阐释性内容可由教师自行选择是否使用。

本书包括150个计算问题、208个定性问题——使用基本物理的原则解决气象科学中的问题。此外，48个计算问题的答案穿插在正文中。为了把重点放在物理原理的正确使用上，我们有意设计了一些只要一点点数学能力就能解决的问题。解决这些定量问题所需要的普适常数和其他数据在第16~18页。

注意，每章结尾处的许多定量问题需要学生进行创新性思考。我们发现这些问题有益于激发课堂讨论，帮助学生准备考试。

我们在全书统一使用SI单位——此单位在气象科学界获得越来越广泛的认可。

第15~16页有单位与符号目录。

本书包括一些传记性脚注，用来概括那些对气象科学的发展做出重要贡献的科学家的生平与著作，尽管很简洁，但是我们希望能让让学生意识到气象历史的悠久及其在物理科学中的牢固基础。作为取舍政策，我们只对那些已经去世或退休的人做这种注释。

我们要感谢华盛顿大学，感谢支持我们教学、研究以及有助于此书完成的其他学术活动的美国科学基金会。在本书的撰写过程中，我们中的一员（J. M. W.）有幸作为交换学者访问苏联，在苏联科学院西伯利亚分院计算机中心工作了6个月，并在高级研

究项目的资助下，在美国大气科学国家中心工作了一年。这两个机构的职员与来访者均对本书的科学内容做出了重要贡献。同时我们也要感谢科学界的其他人提供的帮助与指导。

我们特别感谢我们系里的其他同事所给予的一贯的道义支持、建设性批评以及富有启发的意见。最后，我们要感谢对于本书的撰写和最后完成给予帮助的所有人。

目 录

序言

译者前言

第二版前言

鸣谢

第一版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究内容及近期的主要进展	1
1.2 相关概念及术语	3
1.3 大气的基础知识	6
1.3.1 光学特性	6
1.3.2 大气质量	7
1.3.3 大气化学成分	8
1.3.4 大气的垂直结构	9
1.3.5 风场	13
1.3.6 降水	20
1.4 第 2 章简介	22
习题	23
第 2 章 地球系统	25
2.1 地球系统的成员	25
2.1.1 海洋	25
2.1.2 冰雪圈	32
2.1.3 陆地生物圈	36
2.1.4 地壳和地幔	38
2.1.5 地球系统中各部分对气候的作用	39
2.2 水循环	40
2.3 碳循环	42
2.3.1 大气中的碳	44
2.3.2 生物圈中的碳	44
2.3.3 海洋中的碳	46
2.3.4 地壳中的碳	47
2.4 地球系统中的氧	48
2.4.1 氧的来源	48
2.5 气候和地球系统的历史	51
2.5.1 地球系统的形成和演变	51

2.5.2 1 亿年前	54
2.5.3 100 万年前	55
2.5.4 2 万年前	58
2.6 地球: 适合生物生存的星球	59
习题	61
第3章 大气热力学	65
3.1 气体定律	65
3.1.1 虚温	68
3.2 流体静力学方程	69
3.2.1 重力位势	71
3.2.2 标高和测高方程	72
3.2.3 等压面的厚度和高度	73
3.2.4 海平面气压换算	74
3.3 热力学第一定律	75
3.3.1 焦耳定律	76
3.3.2 比热	78
3.3.3 焓	79
3.4 绝热过程	80
3.4.1 气块的概念	80
3.4.2 干绝热温度递减率	80
3.4.3 位温	81
3.4.4 热力学图	82
3.5 空气中的水汽	83
3.5.1 湿度参数	84
3.5.2 潜热	88
3.5.3 饱和绝热和假绝热过程	89
3.5.4 饱和绝热递减率	89
3.5.5 相当位温和湿球位温	90
3.5.6 诺曼德定律	91
3.5.7 先上升后下沉的净效果	91
3.6 静力稳定度	93
3.6.1 未饱和空气	93
3.6.2 饱和空气	96
3.6.3 条件性不稳定和对流性不稳定	97
3.7 热力学第二定律及熵	98
3.7.1 卡诺循环	99
3.7.2 熵	101
3.7.3 克劳修斯-克拉珀龙方程	103
3.7.4 热力学第二定律的一般化论述	106
习题	108
第4章 辐射传输	120
4.1 辐射波谱	120

4.2 辐射定量描述	121
4.3 黑体辐射	124
4.3.1 普朗克函数	124
4.3.2 维恩位移定律	125
4.3.3 斯蒂芬-玻耳兹曼定律	125
4.3.4 实际物体的辐射特征	127
4.3.5 基尔霍夫定律	128
4.3.6 温室效应	128
4.4 散射、吸收和发射的物理意义	129
4.4.1 气体分子和粒子的散射作用	130
4.4.2 粒子吸收作用	133
4.4.3 气体分子的吸收和发射	134
4.5 行星大气中的辐射传输	137
4.5.1 比尔定律	137
4.5.2 大气层的反射和吸收	141
4.5.3 红外辐射的吸收和发射	142
4.5.4 辐射加热率的垂直廓线	145
4.5.5 卫星被动遥感	147
4.6 大气顶部的辐射平衡	151
习题	152
第5章 大气化学	159
5.1 对流层大气的组成	159
5.2 微量气体的源、输送和汇	163
5.2.1 源	163
5.2.2 输送	166
5.2.3 汇	169
5.3 对流层中的一些重要的微(痕)量气体	169
5.3.1 氢氧自由基	169
5.3.2 部分活性氮化合物	171
5.3.3 有机化合物	172
5.3.4 一氧化碳	172
5.3.5 臭氧	172
5.3.6 氢化合物	176
5.3.7 含硫气体	176
5.4 对流层气溶胶	177
5.4.1 源	178
5.4.2 化学组成	181
5.4.3 输送	182
5.4.4 汇	182
5.4.5 浓度和尺度分布	183
5.4.6 停留时间	185
5.5 空气污染	185