




中国科学院研究生教学丛书



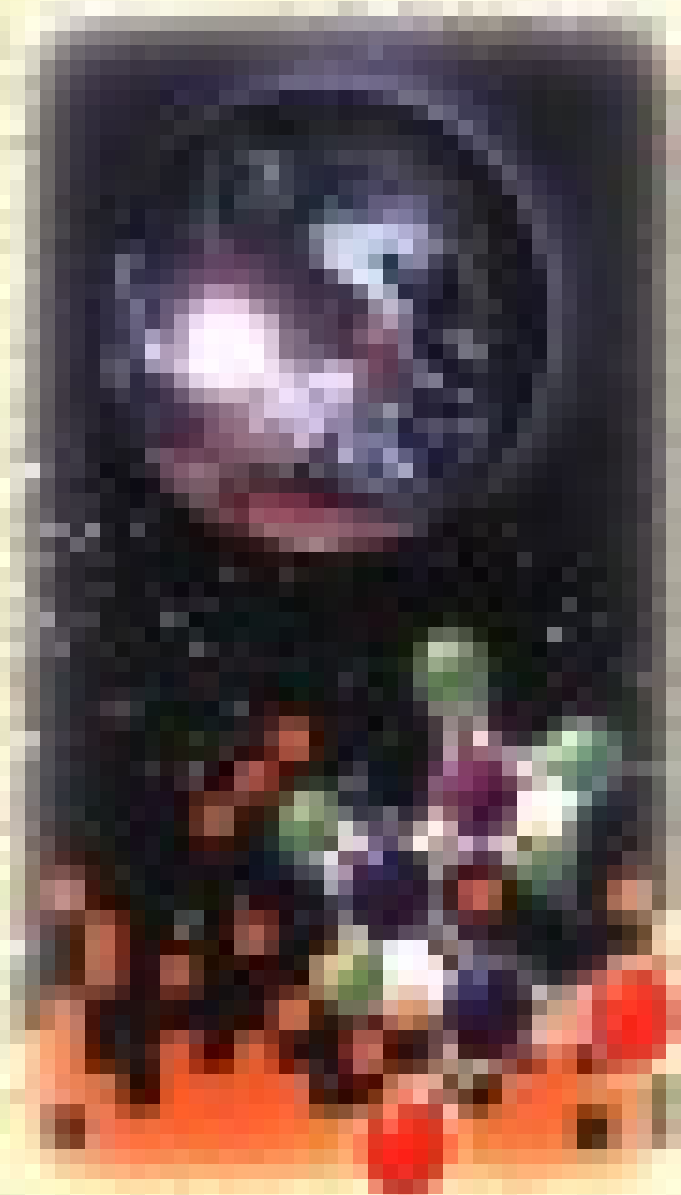
# 大气辐射学

石广玉 编著

 科学出版社  
www.sciencep.com



中国气象出版社



# 大气辐射学

张人庆 编

中国气象出版社

中国科学院研究生教学丛书

# 大气辐射学

石广玉 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书根据作者近年来在中国科学院(原中国科学院中国科学技术大学)研究生院讲授《大气辐射学》的讲义,改编、扩充而成。全书共分6章,书末有若干附录。书中全面、系统地描述了太阳辐射和热辐射在大气中传输的物理过程和基本规律以及地气系统的辐射收支等大气辐射学的基本内容,侧重于物理概念的阐述和基本计算方法的介绍;还详细介绍了大气辐射学的最新研究成果,特别是辐射气候学的最新进展。

本书可供研究生(包括硕士生和博士生)以及从事大气遥感、大气辐射和当代气候变化研究的科技人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

大气辐射学/石广玉编著. —北京:科学出版社,2007

(中国科学院研究生教学丛书)

ISBN 978-7-03-018997-4

I. 大… II. 石… III. 大气辐射-研究生-教材 IV. P351.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第072666号

责任编辑:谢洪源等/责任校对:朱光光

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年5月第一次印刷 印张:26

印数:1—2 500 字数:596 000

定价:89.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

## 《中国科学院研究生教学丛书》总编委会

主任:白春礼

副主任:何 岩 师昌绪 杨 乐 汪尔康 沈允钢

黄荣辉 叶朝辉

委员:朱清时 叶大年 王 水 施蕴渝 余翔林

冯克勤 冯玉琳 高 文 洪友士 王东进

龚 立 吕晓澎 林 鹏

## 《中国科学院研究生教学丛书》地学学科编委会

主 编:黄荣辉

副主编:叶大年

编 委:章 申 秦大河 石耀霖 丁仲礼 蔡运龙

## 《中国科学院研究生教学丛书》序

在 21 世纪曙光初露,中国科技、教育面临重大改革和蓬勃发展之际,《中国科学院研究生教学丛书》——这套凝聚了中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血的研究生教材面世了。相信这套丛书的出版,会在一定程度上缓解研究生教材不足的困难,对提高研究生教育质量起着积极的推动作用。

21 世纪将是科学技术日新月异,迅猛发展的新世纪,科学技术将成为经济发展的最重要的资源和不竭的动力,成为经济和社会发展的首要推动力量。世界各国之间综合国力的竞争,实质上是科技实力的竞争。而一个国家科技实力的决定因素是它所拥有的科技人才的数量和质量。我国要想在 21 世纪顺利地实施“科教兴国”和“可持续发展”战略,实现小平同志规划的第三步战略目标——把我国建设成中等发达国家,关键在于培养造就一支数量宏大、素质优良、结构合理、有能力参与国际竞争与合作的科技大军。这是摆在我国高等教育面前的一项十分繁重而光荣的战略任务。

中国科学院作为我国自然科学与高新技术的综合研究与发展中心,在建院之初就明确了出成果出人才并举的办院宗旨,长期坚持走科研与教育相结合的道路,发挥了高级科技专家多,科研条件好,科研水平高的优势,结合科研工作,积极培养研究生;在出成果的同时,为国家培养了数以万计的研究生。当前,中国科学院正在按照江泽民同志关于中国科学院要努力建设好“三个基地”的指示,在建设具有国际先进水平的科学研究基地和促进高新技术产业发展基地的同时,加强研究生教育,努力建设好高级人才培养基地,在肩负起发展我国科学技术及促进高新技术产业发展重任的同时,为国家源源不断地培养输送大批高级科技人才。

质量是研究生教育的生命,全面提高研究生培养质量是当前我国研究生教育的首要任务。研究生教材建设是提高研究生培养质量的一项重要的基础性工作。由于各种原因,目前我国研究生教材的建设滞后于研究生教育的发展。为了改变这种情况,中国科学院组织了一批在科学前沿工作,同时又具有相当教学经验的科学家撰写研究生教材,并以专项资金资助优秀的研究生教材的出版。希望通过数年努力,出版一套面向 21 世纪科技发展、体现中国科学院特色的高水平的研究生教学丛书。本丛书内容力求具有科学性、系统性和基础性,同时也兼顾前沿性,使阅读者不仅能获得相关学科的比较系统的科

学基础知识,也能被引导进入当代科学研究的前沿。这套研究生教学丛书,不仅适合于在校研究生学习使用,也可以作为高校教师和专业研究人员工作和学习的参考书。

“桃李不言,下自成蹊。”我相信,通过中国科学院一批科学家的辛勤耕耘,《中国科学院研究生教学丛书》将成为我国研究生教育园地的一丛鲜花,也将似润物春雨,滋养莘莘学子的心田,把他们引向科学的殿堂,不仅为科学院,也为全国研究生教育的发展作出重要贡献。

饶百祥

# 序

大气辐射学主要研究太阳光辐射及红外热辐射在地球-大气系统中传输和能量转换的规律和机制。早在 19 世纪末和 20 世纪初, L. Rayleigh 和 G. Mie 就建立了分子散射理论与球形粒子散射理论, M. Planck 和 G. Kirchhoff 创建了光谱电子理论和热辐射定律, 为大气辐射学奠定了坚实的物理基础, 使大气辐射学很早就成为气象科学中一门比较成熟的学科。气候变化、大气遥感与大气环境化学是当代三大前沿科学热点, 它们的共同理论基础又是大气辐射学。因此, 大气辐射学在现代大气科学和环境科学中都占有十分重要的地位。

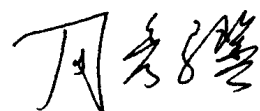
《大气辐射学》作者在大气辐射学领域内坚持不懈地辛勤耕耘了 30 余载, 又在中国科学院研究生院为培养研究生讲授大气辐射学有近 10 年之久, 长期的研究和教学实践积累了不少有创见性的研究结果和心得。该书正是在这样扎实的基础上撰写而成, 它不仅十分清晰简明地向读者介绍了必要的大气辐射学基础知识, 更综合了大气辐射学的前沿科学知识以及作者的主要研究成果, 从而在国内外众多的《大气辐射学》教材和著作中显现出该书的特色。

该书共分 6 章。读完全书, 读者不仅能够获得大气辐射学的基本理论知识(第 2 章与第 3 章), 而且还可以系统地掌握大气辐射与气候变化的前沿基础知识和研究方法。该书的第 1 章“大气组成及其变化”, 虽然与传统的大气辐射学并无必要的联系而且基本上属于大气化学的研究范畴, 但是, 政府间气候变化专门委员会最近发表的第四次科学评估报告(IPCC AR4 2007), 已经相当确定地认为造成近百年来全球变暖的主要原因是大气组成变化所引起的辐射-气候效应。因此, 为了研究当代气候变化必然涉及大气组成的变化, 在第 1 章中把大气辐射学与气候变化及大气环境化学结合在一起论述, 也构成了该书的特色之一。该书第 2 章除了对传统的大气分子光谱进行了必要的描述之外, 还特别介绍了最新的大气分子谱线参数汇编 HITRAN 2004, 并涉及到水汽连续吸收的 CKD 与 MK\_CKD 模式等最新话题。第 3 章虽然篇幅不长, 但实际上已经概括了单色辐射传输的基本理论与方法。该书的第 4 章介绍了作者所创建的新的大气气体光谱吸收带的  $k$  分布以及相关  $k$  分布函数的方法。这是一个精确计算光谱带吸收系数的有效方法, 在此基础上建立的大气辐射模式已被广泛应用于国内外不少气候数值模式。

气候变化的辐射强迫、全球增温(温变)潜能等都是近 10 多年政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出并不断完善的新概念, 该书第 6 章对此作了相当完整的论述, 并介绍了可用的计算方法。除了介绍大气辐射模式在大气环流模式中的应用外, 该书第 5 章还突出介绍了箱室、一维和二维简单气候模式, 以及这些模式在气候变化中的应用。特别是介绍了作者建立的箱室海洋-大气耦合模式和改进的辐射-对流模式, 以及利用这些模式来研究气候变化过程的结果, 这些内容对读者均富有启迪。



我衷心祝愿该书的出版,相信读者能够在该书的引领下尽快进入大气辐射学与气候变化研究的前沿。

Handwritten signature in black ink, consisting of three characters: 周秀骥.

(周秀骥)

2007年2月28日

# 前 言

本书根据作者近 10 几年来在中国科学院(原中国科学院中国科学技术大学)研究生院讲授《大气辐射学》的讲义,改编、扩充而成。内容不但包括大气分子光谱和辐射传输等大气辐射学的基本知识和大气辐射学的最新发展动向,而且包括了作者及其同事们多年来在这一领域的重要研究成果。

本书前半部分的第 2 章、第 3 章和第 4 章的部分内容,是任何一本作为教科书的《大气辐射学》都应当包含的内容。为了学科的完整性,本书也将包括这些内容。但是,本书将既照顾到学科的完整性和系统性,又避免学院式的繁琐推导、考证。与此同时,本书将致力于介绍最新的研究成果和发展动向。例如,超、亚洛伦兹线型以及最新的 2004 年版 HITRAN 分子吸收线参数汇编以及非球形散射等。而对那些在一般的大气辐射学、大气物理学,甚或是气象学教材中可以找到的内容,例如大气光象(虹、晕)等,则略去,或仅在必要时提及。

读者将会发现,大气辐射学在当代地球气候变化研究中占有极其重要的地位。但是,谈到辐射-气候问题,就必然涉及大气的组成;而当代的气候变化,更是与人类活动引起的大气组成的变化密不可分。为此,本书设置了第 1 章来描述地球大气组成及其变化,并着墨甚多,尽管它基本上属于大气化学的范畴。本书后半部分的第 4 章,是在一般的大气辐射学书中没有的或未作系统阐述的内容,特别是第 4 章的  $k$  分布和相关  $k$  分布辐射模式(有时也统称为  $k$  分布模式)。目前看来, $k$  分布模式可能是一种最有前途的、并有可能取代其他方法的大气辐射计算方法。世界著名学者、美国马里兰大学教授、ICRCCM(气候模式中辐射方案的国际比较)后期主持人艾凌桑(Ellingson)在评价  $k$  分布方法时说:“ $k$  分布方法比之解析带模式的优点是它使用实际的  $k$  分布,对均匀路径进行精确的频率积分,透过率函数的表达式允许辐射模式扩展到包括多次散射”(Ellingson et al., 1991)。这是作者多年来致力于研究的一个领域,本书将在世界上第一次以教科书的形式对这一方法进行系统的阐述。第 5 章和第 6 章,是前几章的基本理论的深化,并将大气辐射学与当代气候和环境研究联系起来,提供了从物理学的角度对全球气候环境变化成因的透视。在第 6 章气候变化的辐射强迫的内容中,本书不但想从理论上系统地阐述这个问题,而且介绍了当前这一领域的最新研究成果和发展动向。大部分材料来自最新的期刊论文、权威报告(例如,历次的政府间气候变化专门委员会,即 IPCC 1990、1995、1996、2001 以及 2007 报告的部分内容)以及我们自己的研究结果。对目前国际上几个最新的研究动向,诸如太阳与气候问题、对流层和平流层气溶胶的气候效应、云的太阳辐射吸收与气候强迫以及大气气体和气溶胶的全球增温潜能(GWP)等,本书也进行了讨论。

书末的附录将为读者进一步了解大气辐射并给读者的实际辐射计算带来诸多方便。附录 1 给出了与辐射有关的物理常数;附录 2 是大气气体含量的单位与换算;附录 3 是对世界上目前最新的大气分子光谱资料(2004 年版 HITRAN Database)所做的比较详细的介绍;附录 4 和附录 5 分别是大气气溶胶的折射指数及水和冰的复折射指数;附录 6 是地外太阳分光光谱辐射通量密度以及到达地面的太阳辐射通量的简化计算方法;最后,附录

7 对目前世界上若干大气环流模式(GCMs)中的辐射方案简介,将有助于读者了解大气辐射学基本理论和计算方法的应用以及不同的气候模式所模拟的气候状况之所以不同的可能原因。

存在若干问题留待本书再版时讨论。例如,第一,由于一般的《大气辐射学》教材将讨论的重点放在热力学问题上,因此不涉及或极少涉及化学问题。但从本来的意义上讲,一方面,大气中的太阳短波辐射场将直接影响大气的解离成分,而与大气辐射场密切相关的大气温度分布则通过化学反应的温度依存性影响大气的化学活性成分;另一方面,由于大气化学组成的变化又引起辐射场的变化,因此,大气辐射学应当将大气(光)化学包括在内。我们最近的研究发现,平流层气溶胶的多次散射可以使某些高度上的大气臭氧减少4%~5%,这充分说明了辐射-化学相互作用的重要性。第二,大气遥感,特别是气溶胶和云的遥感,是目前大气辐射学应用的最活跃的领域之一;第三,非局地热力学平衡(NLTE)条件下的辐射传输;第四,辐射熵问题,等等。

在本书出版之际,编著者谨向以下贡献者表示诚挚的谢意。

田中正之博士、教授,不但是使编著者进入大气辐射学研究领域的引路人,而且无私地提供了他在日本东北大学多年讲授《大气辐射学》的手稿,使本书作者得以随意引用;

温天雪博士,更新了第1章的若干图表,并增添了部分内容;

赵剑琦博士,对第2章进行了统稿,并特别撰写了非球形粒子的光散射相关内容;

王宏博士,收集、整理了大气气溶胶辐射特性的资料,并补充了第2章和第6章的有关内容;

丁守国博士,收集、整理了云的辐射特性的资料,并补充了第2章的有关内容;

王标博士,对第3章进行了统稿,特别是撰写了辐射传输方程的求解方法;

张华博士,提供了第4章的大量素材及若干有益的建议;

刘玉芝博士,补充、修改了第5章有关部分内容;

徐娜硕博连读生,对第2章水汽连续吸收、第5章辐射对流模式及第6章部分内容等进行了补充、修改;

申彦波博士,对第5章的统稿以及第6章人为热释放部分的起草;

秦世广博士生,对第6章的整理和补充;

檀赛春博士生,起草了附录1、附录6,并对其他章节作了修改;

程光光博士生,收集、整理了目前世界上主要大气环流模式(GCMs)中的辐射模式,起草了附录7;

陈林博士生,对包括图表在内的全书的编辑和整理。

作者衷心感谢阅读过本书初稿并提出修改、补充意见、绘制部分图表的张立盛、张鹏、陈彬、戴铁、李翠娜以及历届在中国科学院研究生院听课的硕士生和博士生。

科学出版社的谢洪源副编审为本书的问世进行了卓有成效的工作;为了开展与大气辐射有关的研究工作,作者多次得到国家自然科学基金委员会、中国科学院资源环境局以及国家科学技术部的基金资助;中国科学院人事教育局为本书的出版给予了相当部分的经费支持,在此一并表示诚挚的谢意。

最后,特别的谢意给予为本书撰写序言的周秀骥教授以及多年来对本书出版给予巨大鼓励和支持的黄荣辉教授、龚知本教授和王明星教授等。

由于时间和学识水平所限,纰误难免,敬请读者指正。

# 目 录

《中国科学院研究生教学丛书》序

序

前言

绪论	1
第 1 章 地球大气组成及其变化	4
1.1 大气的热结构	4
1.2 大气压力随高度的变化	6
1.3 大气组成及其变化	7
1.3.1 地球大气的演化	7
1.3.2 现今地球大气的组成	9
1.3.3 大气组成的变化	10
第 2 章 大气辐射过程与辐射性质	70
2.1 热辐射	70
2.1.1 热力学平衡与局地热力学平衡	72
2.1.2 热辐射的基本定律	73
2.2 气体分子能级跃迁与光谱特性	77
2.2.1 大气分子吸收光谱的形成-能级与跃迁	77
2.2.2 振动-转动带的结构	81
2.2.3 谱线强度、半宽度和线型	83
2.3 大气分子吸收光谱	90
2.3.1 大气主要分子的红外吸收光谱	90
2.3.2 分子光谱资料汇编	111
2.4 大气中粒子的光散射与吸收	119
2.4.1 球形粒子光散射的 Mie 理论及其算法	120
2.4.2 非球形粒子的光散射	123
2.4.3 分子大气的 Rayleigh 散射	129
2.4.4 气溶胶和云的光学特性及其参数化	130
第 3 章 单色辐射传输问题的解	142
3.1 辐射传输方程	142
3.1.1 定义	142
3.1.2 辐射传输方程的一般形式	146
3.2 对于特殊问题的解析解	148
3.2.1 无散射大气的形式解	148

3.2.2	各向同性散射的奇异本征函数方法	149
3.3	数值解法	150
3.3.1	离散坐标法	150
3.3.2	球谐函数法	154
3.3.3	倍加-累加法	154
3.3.4	逐次散射法	156
3.3.5	Monte Carlo 方法	157
3.4	近似数值解法	158
3.4.1	二流近似	158
3.4.2	单次散射近似	160
3.5	三维辐射传输数值方法简介	160
3.5.1	辐射场的离散化	161
3.5.2	球谐函数离散坐标法	163
<b>第4章</b>	<b>辐射传输中的光谱积分</b>	<b>165</b>
4.1	辐射计算的若干问题	165
4.1.1	透过率与吸收率	165
4.1.2	非均匀路径的透过率	169
4.2	逐线积分模式	172
4.2.1	引言	172
4.2.2	积分样点的选取	173
4.2.3	半宽度、谱线位置和线强的近似处理	174
4.2.4	线翼贡献的截断	174
4.3	带模式	175
4.3.1	引言	175
4.3.2	不同线强分布的带模式平均吸收	177
4.3.3	洛伦兹线型的带模式表达式	179
4.3.4	CG 近似在随机带模式中的应用	181
4.4	吸收系数分布( $k$ 分布)模式	183
4.4.1	$k$ 分布模式	183
4.4.2	相关 $k$ 分布模式	190
4.4.3	吸收系数的温度依赖关系及其处理方法	197
4.4.4	重叠吸收带	198
4.4.5	光子路径长度分布与整带 $k$ 分布函数	200
4.5	参数化与经验和半经验方法	201
4.5.1	地球大气太阳辐射吸收的参数化	202
4.5.2	热辐射传输	210
<b>第5章</b>	<b>地气系统辐射平衡扰动的简单模式表达</b>	<b>217</b>
5.1	地气系统的辐射平衡	217

5.2	能量平衡模式	218
5.2.1	引言	218
5.2.2	零维能量平衡模式	219
5.2.3	一维能量平衡模式	222
5.2.4	二维能量平衡模式	232
5.2.5	箱室-扩散大气-海洋能量平衡模式	236
5.3	辐射-对流模式	239
5.3.1	模式基本假定	240
5.3.2	基本方程	241
5.3.3	方程的求解	242
5.3.4	反馈过程	243
5.3.5	模式流程	245
5.3.6	若干结果	246
<b>第6章</b>	<b>气候变化的辐射强迫</b>	<b>249</b>
6.1	引言	249
6.1.1	辐射强迫的基本概念	250
6.1.2	主要的辐射强迫因子及其大小	254
6.2	大气温室气体的辐射强迫	258
6.3	大气气溶胶的辐射强迫	261
6.3.1	引言	261
6.3.2	对流层气溶胶的辐射-气候效应	265
6.3.3	火山气溶胶	271
6.4	太阳变化的辐射强迫	286
6.4.1	引言	286
6.4.2	太阳变化的观测	288
6.4.3	太阳总辐射通量密度的重建	291
6.4.4	太阳变化与地球气候	292
6.5	云的辐射强迫	302
6.5.1	云辐射强迫的概念及云对太阳辐射的“异常”吸收	302
6.5.2	云辐射强迫的计算方法	304
6.5.3	云-辐射气候效应的数值模拟	310
6.6	全球增温潜能	319
6.6.1	全球增温潜能(GWP)的科学定义	319
6.6.2	GWP的应用	320
6.6.3	GWP的计算方法	320
6.6.4	全球温变潜能(GTP)及其计算方法	323
6.7	人为热释放	324
	<b>主要参考文献</b>	<b>328</b>

附录 1	与辐射有关的物理常数 .....	351
附录 2	单位与换算 .....	352
附录 3	HITRAN2004 分子光谱资料汇编简介 .....	358
附录 4	大气气溶胶折射指数 .....	367
附录 5	水和冰的复折射指数 .....	371
附录 6	地外太阳分光光谱辐射通量密度以及到达地面的太阳辐射通量的简化计算方法 .....	389
附录 7	目前世界上若干大气环流模式中的辐射方案简介 .....	393

# 绪 论

大气辐射学是大气物理学中的一个古老的、但近年来又获得蓬勃发展的学科。一方面,最近几十年来,大气遥感探测(卫星与地面)研究,特别是以人类活动对未来全球气候环境的冲击为代表的现代气候和环境研究的发展,提出了进一步发展大气辐射学的需要;而近代大气分子光谱学的发展和大型、超大型电子计算机的出现则为大气辐射学的蓬勃发展提供了可能。例如,Rothman 等人综合了当代有关大气分子光谱的理论和实验研究成果,编辑发行了用于高分辨透过率计算的大气分子资料集,或称分子吸收谱线资料汇编(HITRAN DataBase),在其 2004 年的最新版本中,共收集了  $0 \sim 23\ 000\text{cm}^{-1}$  ( $\infty \sim 0.43\mu\text{m}$ ) 范围的 39 种大气气体的 1 789 569 条谱线(详见第 2 章及附录 3)。随着分子光谱学的进一步发展,预计将继续会有新的更完善的谱线资料问世。另一方面,现代每秒成百上千甚至万亿次的大型、超大型电子计算机的出现以及 PC 机的超大型化,使得原来很难甚至无法进行的辐射传输计算,可以轻而易举地实行。这些都为大气辐射学的蓬勃发展提供了条件。

辐射过程是大气中最重要的物理过程之一。一方面,地气系统的辐射收支决定了长期的全球平均气候状况;另一方面,太阳辐射能和热辐射能在大气中的辐散、辐合,形成非绝热冷、热源,造成大气水平和垂直层结的不稳定。有许多学者认为,地球气候环境系统是由大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和行星圈(宇宙空间圈)所谓“五圈”构成的。但实际上,水圈和冰雪圈只是水的不同存在状态,而行星圈则是影响其他“四圈”的外部因子。从能量和热力学的角度来看,在几十万年到百万年以内的时间尺度上,决定地球气候环境的,是来自行星圈的太阳辐射能以及这一能量通过动力过程在大气圈和水圈的再分配。很难设想,没有太阳辐射及热辐射过程的地球环境会是怎样一种状态。运动就是一切,没有运动就没有一切,但运动来自于不稳定。造成地球气候环境不稳定的根本原因是辐射过程,从这种意义上来说,地球气候环境系统就是在辐射过程造成的这种不稳定与动力过程使系统趋于稳定的相互作用中演化的。

本书的内容与重点是研究地球大气中辐射传输的物理过程和基本规律以及地球大气系统(简称地气系统)的辐射能收支,特别是与全球(气候)变化有关的辐射问题。其研究课题是:入射太阳辐射能转换为散射辐射和热辐射以及在地球大气中产生的热力学效应(Goody and Yung, 1989),重点是由大气动力和辐射过程引起的地气系统所吸收的太阳能的再分配以及最终作为低温的行星或地球(含大气)辐射而返回外空所形成的地气系统的辐射平衡。

大气辐射模式在大气遥感和温室气体气候效应等当代气候模式研究中占有重要地位。辐射计算所面临的基本问题是大气气体的吸收与云和气溶胶粒子的吸收和散射同时存在于大气中,遇到的最大困难是逐线积分(LBL)方法由于耗费太多的计算机时间无法用于气候研究,而通常的带模式方法不能处理多次散射问题。特别是对于温室气候效应研究最关键的长波辐射计算,必须同时处理频率积分、大气非均匀路径、天顶角角度积分



以及不同气体吸收带重叠等问题。本书将对这些问题提供较好的答案。

近年来,人类活动可能引起的地球气候变化成为一个众所关注的问题。虽然,人类活动对地球气候的影响并不完全直接通过大气辐射过程,但是从根本上来说,如果离开了对大气辐射过程及其影响因子的研究,则无法触及地球气候变化的本质。这是因为,人类活动所造成的大气成分的变化(例如温室气体和对流层气溶胶的增加)以及自然原因(例如火山喷发和太阳变化)对气候系统的扰动,首先是对大气辐射场的扰动。发生在气候系统中的各种重要的反馈过程,例如雪冰反照率-地面温度反馈、云-辐射相互作用、水汽反馈以及化学-气候反馈等,无一不与辐射过程有关。在这种意义上,甚至可以说:脱离开大气辐射学的研究,就谈不上当代气候变化的研究。

中国古代哲学提倡“天人合一”,这是最早的也是最朴素的“系统科学”的概念。近代西方自然科学则以分离和机械唯物论为特点。所幸的是,近年来人们不但注意到自然科学的“系统性”,而且注意到人与自然的协调。本书是论述大气辐射学的,当然无法讨论后一个问题,但在研究地球大气中辐射传输的物理过程和基本规律以及地气系统的辐射能收支的同时,注意到辐射过程在地球气候环境系统中所处的地位以及它与其他过程的相互作用是有益的。一个简单的例子是,大气化学组成-辐射过程-动力过程之间的相互作用,参见图 0.1。可以从大气的化学组成开始看一下它们之间是如何相互作用的。大气中的许多气体,例如  $H_2O$ 、 $CO_2$  和  $O_3$  以及气溶胶(被称之为辐射活性成分),通过对太阳辐射和热辐射的吸收与散射,决定着辐射过程;辐射的辐合和辐散,即加热和冷却,将直接影响大气的温度结构。辐射过程,主要是太阳辐射,可以通过光解离直接影响大气的光化成分;另一方面,它也可以通过影响大气的温度结构进而影响大气的化学组成,因为大量大气化学反应的速度是与温度有关的。大气的化学组成,除了受局地化学和光化学过程的影响外,还受动力输送过程的影响。大气温度结构与动力过程的相互作用是显而易见的:大气的垂直运动是由于大气温度层结的不同而产生的;大气水平运动的根本原因也在于大气温度分布的不均匀。而动力过程除了物质的输送外,必然伴随着能量(热量)的输送,所以它不但影响大气的化学组成,还影响大气的温度结构。当然,由于学科的划分,本书将基本上不讨论动力过程。

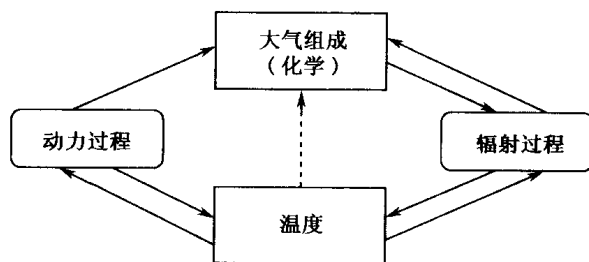


图 0.1 大气辐射、动力与化学过程之间的耦合

图 0.2 描述了大气辐射学的学科体系。大气辐射学的物理基础是分子光谱学及电磁波学。从数学上来处理电磁波(不管是太阳辐射,还是红外线热辐射,实际上都是电磁波谱的一部分)的传播,就是辐射传输学。最早的辐射传输研究多半是在天文学领域展开的,将它应用到地球大气中来,逐渐形成了大气辐射学。

如前所述,目前大气辐射学除了在全球气候(变化)研究中,占有极其重要的地位之