


张华 编著

BCC_RAD DAQI FUSHE CHUANSHU MOSHI

BCC_RAD 大气辐射

传输模式

 气象出版社
China Meteorological Press



BCC_RAD DAQI FUSHE CHUANSHU MOSHI

ISBN 978-7-5029-6337-8




定价：54.00元



BCC _ RAD

大气辐射传输模式

张 华 编著

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书以相关 k -分布方法为基础, 首先研制了 5 种用于不同需要的谱带划分方案和新的 k -分布间隔点选取方法; 并把优化的气体吸收重叠带处理方法用于 BCC_RAD。在此基础上研制了与气体吸收谱带相匹配的硫酸盐和硝酸盐、黑碳和有机碳、沙尘、海盐气溶胶的光学参数化方案, 黑碳气溶胶与其他气溶胶内混合的光学参数化方案, 研制了包含 6 种冰晶形状的新的冰云光学参数化方案和非球形状沙尘气溶胶的光学参数化方案。对于大气辐射传输方法, 该书介绍了作者新近发展的计算方法, 这些都是 BCC_RAD 的特色。

本书对从事大气辐射、气候模拟和相关气候变化研究的人员和学者具有很高的实用价值。

图书在版编目(CIP)数据

BCC_RAD 大气辐射传输模式 / 张华编著. —北京:
气象出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-5029-6337-8

I. ①B… II. ①张… III. ①大气辐射—传输—研究
IV. ①P422. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 079589 号

BCC_RAD 大气辐射传输模式

BCC_RAD Daqi Fushe Chuanshu Moshi

张 华 编著

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮 政 编 码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68409198(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑: 杨泽彬

终 审: 邵俊年

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 易普锐创意

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 13.5

字 数: 350 千字

版 次: 2016 年 5 月第 1 版

印 次: 2016 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 54.00 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。

序

大气辐射传输过程，一方面通过地表和大气顶的辐射通量影响地气系统的辐射能量收支平衡，另一方面通过辐射加热率影响大气的垂直和水平运动，是气候系统物理过程的重要组成部分之一。作为描述气候模式中最为关键的物理过程之一，辐射计算方案将在很大程度上影响气候模拟的精度。因此，一个物理过程清晰、计算精度高和计算时间少的大气辐射传输模式对气候模拟和气候变化研究尤为重要。

《BCC_RAD 大气辐射传输模式》一书作者在大气辐射学领域辛勤耕耘了 20 余载，多年指导研究生的丰富研究成果为撰写该书奠定了扎实的基础。该书不仅十分清晰地向读者介绍了大气辐射传输必要的基础知识，更综合了作者对大气辐射前沿问题的最新研究成果，从而在众多的大气辐射学教材和著作中彰显了自己的特色。

该书致力于帮助读者系统地掌握北京气候中心大气辐射传输模式（简称 BCC_RAD）的全部计算过程，在了解大气辐射学基本理论知识的同时，对辐射传输模式的各个组成部分有深入和细致的认识。全书共分 8 章。第 2 章通过采用 5 种不同的 k -分布间隔点数，发展了 5 种不同目的精度和速度需求的辐射计算方案，给出了可应用于天气气候模式中辐射方案的多种选择。第 3 章和第 4 章在讲述气溶胶和云光学特征基本物理量和计算方法的基础上，具体阐述了 BCC_RAD 的不同种类气溶胶和云的光学参数化方案的整个制作流程，并详细给出了他们的光学性质参数表。第 5 章除了介绍传统的辐射传输方法中的二流算法外，还介绍了新发展的四流算法和作者发展的新的二流四流混合算法。

在本书的最后 3 个章节，将 BCC_RAD 与其他辐射传输模式进行了比较（第 6 章），并介绍了 BCC_RAD 在研究温室气体辐射强迫中的应用（第 7 章）和在 BCC-AGCM 全球气候模式中的应用（第 8 章），全面地展示了 BCC_RAD 在全球气候模式中的应用成果。

本书适用于研究大气辐射相关问题的研究生，为其提供气体重叠吸收处理的解决方案、关于气溶胶和云的光学性质的详细计算方法、大气辐射传输的最新算法及辐射模式应用的最新成果。另外，对于从事卫星遥感和气候模式研究的科研人员，该书也具有很好的参考价值。希望该书的出版，能对大气辐射学和气候研究的发展起到推动作用，并

能对相关领域的科研工作者有所帮助。

我衷心祝贺该书的出版，相信读者能够在该书的指导下，深入了解大气辐射领域的最新发展动态及大气辐射在气候模拟和气候变化研究中的最新应用成果。



(中国科学院院士)

2016年2月19日

前 言

本书是国家气候中心张华研究员及其指导的研究生团队，近年来在大气辐射领域最新研究成果的集成。内容包括了气体吸收、气溶胶光学、云的光学和辐射传输算法等组成大气辐射传输模式的各个部分。基于上述研究成果研发了北京气候中心大气辐射传输模式（简称 BCC_RAD）。书中同时介绍了利用 BCC_RAD 进行全球增温潜能研究，并进一步将 BCC_RAD 应用于北京气候中心全球气候模式（BCC_AGCM2.0）的系列成果。

气体吸收是辐射计算首先需要考虑的问题，也是作者构建 BCC_RAD 辐射方案的基础。快速的相关 k -分布方法是以精确的逐线积分（Line-by-Line，简称 LBL）方法为基础建立的，而 LBL 方法需要气体吸收的光谱数据集，所以，在第 2 章中首先对目前最常用的气体吸收光谱数据库 HITRAN（High resolution TRANsmission）进行了介绍，并比较了不同版本 HITRAN 数据资料对大气辐射计算的影响。然后，重点介绍了 BCC_RAD 气体吸收方案中的谱带划分方法、进行光谱积分的 k -分布间隔点的选取方法和对不同气体重叠吸收处理的新方法。

气溶胶是影响辐射传输的重要大气介质。由于人为气溶胶既是大气污染物、也是重要的辐射强迫因子，近年来对气溶胶的环境和气候效应的研究成为国际国内的热点。本书作者多年来一直致力于研究气溶胶光学的前沿科学问题，在经典气溶胶散射理论基础上，也探索了气溶胶光学领域的一些崭新研究方向，如非球形沙尘气溶胶的光学参数化方案和内混合气溶胶的光学参数化方案。这些研究成果目前都已经包括在 BCC_RAD 中。本书第 3 章详细介绍了气溶胶光的理论基础、计算方法和相应的 BCC_RAD 参数化方案。

在云的光学方面，国际上几乎都采用谱带平均的云的光学特性，而本书作者研究表明云的光学特性和气体光谱吸收有一定的相关性，在谱带内部是有很大变化的，准确考虑这种变化将大大减少有云大气辐射传输的计算误差。这种考虑了云的光学性质和气体吸收谱的相关性的方法就是本书介绍的水云的 k -分布方法，本书第 4 章对这一方法进行了详细的介绍。此外，利用不同形状冰晶粒子的光谱数据集来求取 BCC_RAD 冰云光

学性质参数化方案是 BCC_RAD 的另一个特色。作者利用全球可以获得的冰晶粒子谱分布数据、不同形状冰晶粒子几何和光学性质（主要包括尺度参数、消光系数、单次散射反照率和非对称因子）的高光谱数据，通过计算获取了按照 BCC_RAD 谱带划分的冰云光学参数化方案。第 4 章第 2 部分对冰云光学参数化过程所用的数据、方法和结果进行了详细的介绍。

第 5 章介绍了本书所采用的辐射传输算法，包括两种二流辐射传输算法（矩阵法和爱丁顿算法）和本书作者开发的四流累加辐射传输算法（分别为四流离散纵标累加算法和四流球函数展开累加算法）以及二流四流混合算法。五种辐射传输算法均可在 BCC_RAD 中任意选用。在本书的最后三个章节，分别给出了 BCC_RAD 与其他辐射传输模式结果的比较（第 6 章）；介绍了利用 BCC_RAD 研究温室气体全球增温潜能的方法和结果（第 7 章）；重点评估了 BCC_RAD 在 BCC_AGCM 全球气候模式中的应用效果（第 8 章）。

本书由张华任主编。第 1 章和第 2 章由张华主笔；第 3 章的 3.1、3.2 节由卫晓东主笔，3.3 节由周晨主笔；第 4 章的 4.1 节由卢鹏、王志立主笔，4.2 节由陈琪主笔；第 5 章的 5.1、5.2、5.4 节由卢鹏主笔，5.3 节由张峰主笔；第 6 章由卢鹏主笔；第 7 章由吴金秀主笔；第 8 章由荆现文主笔。周喜讯为本书做了大量细致和繁琐的整理、修改及其他辅助工作。在此谨向为本书做出贡献的所有成员表示诚挚的感谢。

在完成本书研究工作中，中国科学院大气物理研究所石广玉院士，东京大学中岛映至教授，美国华盛顿大学大气科学系的付强教授，加拿大气候模拟与分析中心的李江南博士都曾给予了非常重要的帮助。在此谨向他们表示诚挚的感谢。

本书中很多新的研究成果分别是在国家自然科学基金项目“新的水云和冰云辐射参数方案的研究及其在气候模式中的应用（合同号：41375080）”“云的垂直结构的卫星观测和模拟研究（合同号：41075056）”“消耗臭氧物质替代品的辐射强迫、增温潜能与气候效应研究（合同号：40775006）”，以及科技部公益性行业专项项目“新一代云-辐射-气溶胶物理过程模块的研制与应用（GYHY201406023）”和中国科学院战略性先导科技专项课题“碳卫星综合遥感反演系统（XDA05040201）”的资助下完成的。本书的研究和出版得到了国家重点基础研究发展计划项目课题“全球气溶胶的气候效应及对亚洲季风的影响（合同号：2011CB403405）”的资助，在此，一并致谢。

由于时间仓促，科学认识水平有限，书中难免有误，敬请读者指正。

目 录

序
前 言

第 1 章 绪 论	(1)
参考文献	(40)
第 2 章 BCC _ RAD 的气体吸收 k -分布方法	(3)
2.1 不同版本 HITRAN 光谱数据对辐射模式的影响	(3)
2.1.1 HITRAN 主要吸收气体谱线参数统计	(4)
2.1.2 HITRAN 光谱数据对光学厚度、辐射通量和冷却率的影响	(6)
2.1.3 HITRAN 光谱资料对辐射模式不确定性的研究	(8)
2.2 不同气体重叠吸收方法	(11)
2.2.1 在 ck -D 方法下处理重叠吸收透过率的方法	(12)
2.2.2 计算方法	(17)
2.2.3 模式验证	(18)
2.3 谱带划分方法	(27)
2.4 k -分布间隔点选取方法	(33)
参考文献	(40)
第 3 章 气溶胶光学	(44)
3.1 球形气溶胶	(44)
3.1.1 理论基础和计算方法	(45)
3.1.2 基本光学特性的分析与研究	(48)
3.1.3 BCC _ RAD 辐射传输方案的气溶胶参数表	(55)
3.2 非球形沙尘气溶胶	(60)
3.2.1 理论基础和计算方法	(61)
3.2.2 基本光学特性的分析与研究	(67)
3.2.3 BCC _ RAD 辐射传输方案的非球形沙尘气溶胶参数表	(77)
3.3 混合气溶胶	(78)
3.3.1 内混合气溶胶的概念	(78)
3.3.2 原理和方法	(79)

3.3.3 结果分析	(81)
参考文献	(90)
第 4 章 云的光学	(96)
4.1 BCC_RAD 水云光学性质	(96)
4.1.1 谱带平均水云光学性质	(96)
4.1.2 k -分布水云光学性质	(98)
4.1.3 污染云的光学性质	(110)
4.2 冰云光学	(113)
4.2.1 引言	(113)
4.2.2 基础物理量介绍	(113)
4.2.3 平均体积光学性质计算	(114)
4.2.4 带平均光学性质计算	(116)
4.2.5 BCC_RAD 辐射传输模式冰云光学性质参数表	(117)
参考文献	(118)
第 5 章 辐射传输方法	(120)
5.1 总的方法介绍	(120)
5.2 二流算法	(121)
5.2.1 矩阵算子算法	(121)
5.2.2 Eddington 近似	(124)
5.3 四流算法	(125)
5.3.1 四流离散纵坐标累加法	(125)
5.3.2 四流球谐函数展开累加法	(127)
5.3.3 结果比较和讨论	(129)
5.4 二流四流混合算法	(131)
参考文献	(139)
第 6 章 BCC_RAD 与不同辐射传输模式的比较	(142)
6.1 BCC_RAD 辐射模式参与 CIRC 辐射模式比较计划的长波辐射结果	(142)
6.2 BCC_RAD 辐射模式与其他辐射模式的比较	(147)
6.2.1 瑞利散射(不考虑气溶胶和云)	(147)
6.2.2 气溶胶大气	(148)
6.2.3 大气辐射强迫	(149)
参考文献	(150)
第 7 章 利用 BCC_RAD 研究 HFCs 的辐射强迫与全球增温潜能	(152)
7.1 引言	(152)
7.2 谱吸收资料和模式介绍	(154)
7.3 HFCs 的辐射强迫	(157)
7.4 HFCs 的全球增温潜能 GWP 与全球温变潜能 GTP	(161)

参考文献	(164)
第 8 章 BCC_RAD 在 BCC_AGCM 全球气候模式中的应用	(166)
8.1 二流四流混合算法在气候模式中的应用	(166)
8.1.1 引言	(166)
8.1.2 晴空辐射通量	(167)
8.1.3 有云大气辐射通量	(168)
8.1.4 短波加热率	(168)
8.1.5 云辐射强迫	(170)
8.2 长波区间太阳辐射对气候模式的影响	(170)
8.2.1 试验设计	(171)
8.2.2 结果分析	(171)
8.3 McICA 方案结合 BCC_RAD 在 BCC_AGCM 中的应用评估	(177)
参考文献	(184)
附 表	(188)
附表 1 RAD_BCC 辐射模式硫酸盐气溶胶参数表	(188)
附表 2 RAD_BCC 辐射模式球形沙尘气溶胶参数表	(190)
附表 3 RAD_BCC 辐射模式非球形沙尘气溶胶参数表	(194)
附表 4 可见光波段内黑碳-硫酸盐 Core-shell 混合气溶胶的光学性质	(198)
附表 5 可见光波段内黑碳-有机碳 Core-shell 混合粒子的光学性质	(200)
附表 6 冰云消光系数参数表	(202)
附表 7 冰云吸收系数参数表	(203)
附表 8 冰云不对称因子参数表	(204)
附表 9 冰云前向峰因子参数表	(205)

第1章 绪论

目前,气候模拟和气候预测成为世界各国科学家研究的焦点和难点问题。而辐射过程作为气候模拟中最为关键控制因子之一,将在很大程度上影响气候模拟的结果。长波辐射在影响天气、气候和气候对外部辐射强迫的敏感性上,起着关键的作用;太阳辐射是地球气候最终的能量源,在短波辐射加热率计算中的一个小的误差就可能引起模式模拟气候中很大的误差。随着模式空间和时间分辨率的增加和物理过程的改进,气候模拟中对一个高精度、高速度的辐射模块的需求显得越来越迫切。

模拟温室气体的吸收可以利用很多方法,其中逐线积分方法是最精确的方法,但由于计算时间长,计算成本高,所以不能直接应用在气候模式中。进入 20 世纪 90 年代以后,相关 k -分布方法作为对逐线积分方法的高精度和低成本近似,已被广泛用于气候模拟研究中。但是,即使利用相关 k -分布方法进行辐射计算,也要在精度和速度之间做出选择。北京气候中心大气辐射传输模式(简称:BCC_RAD)采用相关 k -分布方法来处理气体吸收,通过采用 5 种不同的 k -分布间隔点数,发展了 5 种不同目的精度和速度需求的辐射计算方案,给出了可应用于天气气候模式中辐射方案的多种选择,其中长波方案中包括了水汽、二氧化碳、臭氧、氧化亚氮、甲烷 5 种主要温室气体和 4 种主要的卤碳化合物(CFCs),短波方案中还考虑了氧气的吸收,水汽、二氧化碳、臭氧和氧气的连续吸收。具体在本书第 2 章给予介绍。

在大气中存在很多重叠吸收带,也就是各种不同的气体在同一个波长区间产生吸收,在相关 k -分布方法中,如何处理重叠吸收带会影响辐射传输计算的精度和速度。本书第 2 章还讨论了谱带划分和每一谱带中 k -分布间隔点的选取方法及其对大气辐射通量和冷却(加热)率计算的影响,并给出可用于气候模式辐射计算方案的最佳选择,然后基于完全不相关、完全相关和部分相关方法提出了一种优化的获取重叠吸收带 k -分布参数的方法。同时,提出了两种新的部分相关方法和它们的计算公式。

BCC_RAD 总共由 3 部分组成:上述气体重叠吸收处理方案、气溶胶和云的光学性质计算和辐射传输方法。

大气气溶胶是由多种气体和悬浮于其中的固体粒子或气体粒子所组成,主要包括以人类活动产生为主的硫酸盐、硝酸盐、黑碳和有机碳等气溶胶,以及以自然产生为主的沙尘和海盐等气溶胶。在全球气候变化和低碳经济的时代背景下,大气气溶胶相关内容的研究是当今全球气候变化与环境变化所关注的焦点内容。大气气溶胶光学是辐射模式的重要组成部分,气溶胶的光学性质以参数表的形式放入辐射传输方程中,在此基础上对方程求解可以计算出大气中的气溶胶粒子对地气系统中辐射传输通量的影响,进而可以确定气溶胶的直接辐射强迫。所以,气溶胶光学是利用辐射传输方程计算气溶胶辐射强迫的基础。

目前在辐射传输模式及遥感应用中气溶胶粒子的形状都假设为球形,这是为了方便采用

经典的 Mie 散射理论来计算气溶胶的光学性质。实际大气当中的很多液态气溶胶粒子,在表面液体张力的作用下,形状接近球形,因此,采用球形近似计算气溶胶的光学性质可以取得比较精确的计算结果。但实验室及观测数据表明:沙尘粒子的形状在很大程度上都是不规则的,许多研究用不同方法从不同角度证实了非球形沙尘粒子的散射与球形沙尘粒子的散射具有很大差别。本书第 3 章分别针对球形气溶胶和非球形气溶胶介绍了气溶胶光学的理论研究和数值算法,并根据 BCC_RAD 辐射传输方案,分别计算了包括沙尘、碳类、硫酸盐、硝酸盐及海盐等主要气溶胶的光学参数化方案,为 BCC_RAD 提供这几种气溶胶光学特性的输入参数。

许多观测研究表明,大气中大部分气溶胶粒子是由多种成分混合形成的,并且这些颗粒中有很大一部分是以内混合形式存在的。内混合粒子的形态各异,不同的混合形态对粒子的光学性质的影响均不相同。本书第 3 章也针对三种不同的内混合模型(Core-Shell 模型、Maxwell-Garnett 模型和 Bruggeman 模型)及典型外混合模型,以黑碳-硫酸盐混合粒子为例,讨论了内混合气溶胶在不同体积混合比和不同相对湿度下的光学特性。

云的光学也是辐射模式的重要组成部分。云能反射太阳短波辐射,并能吸收地气系统的长波辐射,再以自身温度放出长波辐射,从而影响气候系统的辐射收支。前人研究的气体吸收与云光学性质之间的相互作用都是在谱带模式的框架下研究水汽吸收和云吸收的相互关系。而 Fomin 和 Correa(2005)的研究表明,水汽和云也存在重叠吸收的问题,当水汽吸收强烈的时候,有可能会削弱水云的吸收。目前的相关 k -分布方法中,仅将 k -分布重排法用于气体吸收的计算上,而在计算云光学性质时仍采用谱带平均的云光学性质,因此,目前的相关 k -分布方法在处理气体吸收和水云光学性质时,存在不匹配的现象。本书第 4 章除了介绍谱带平均的水云光学性质外,还介绍了一种与相关 k -分布结构相匹配的水云光学性质参数化方案,从而更准确地进行有云大气的辐射计算。与水云相比,冰云的短波光学厚度通常远远小于水云,但冰云对长波辐射的吸收能力相对强于其对短波辐射的反射能力,这使得冰云对气候系统的影响与水云差异较大。本书在第 4 章介绍了一种新的冰云光学性质参数化方案,并给出了 BCC_RAD 使用的冰云光学性质参数表。

辐射传输方程的求解是大气辐射模式的重要组成部分。有些方法直接对辐射传输方程进行离散化处理(离散纵坐标法和球谐函数展开法),有些基于直观的物理过程进行考虑(倍加累加法、逐次散射法和蒙特卡洛求解法)。目前大多数气候模式仍然采用二流辐射传输方法,该方法的优点是计算速度快。随着高性能计算机的发展,四流辐射方案逐渐被应用于气候模式之中。研究表明,采用四流算法可以获得较小的计算误差。本书第 5 章先后对辐射传输方法中的二流算法和四流算法进行了介绍,最后介绍了作者发展的新的二流四流混合算法。

在本书的最后三个章节,对 BCC_RAD 与其他辐射传输模式进行了比较(第 6 章),并介绍了 BCC_RAD 在研究温室气体辐射强迫中的应用(第 7 章)和在 BCC_AGCM 全球气候模式中的应用(第 8 章)。

参考文献

- Fomin B, Correa M P. 2005. A k -distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere; 2. FKDM, fast k -distribution model for the shortwave[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **110**(D2). doi:10.1029/2004JD005163.

第 2 章 BCC_RAD 的气体吸收 k -分布方法

摘要:如果仅用一种方案来处理大气吸收重叠吸收带,就无法得到最优精度。尤其当气体吸收光谱之间的相关性变强时,利用传统的透过率相乘法来计算重叠气体的透过率误差很大。因此,基于完全不相关、完全相关和部分相关方法,本章提出了一种优化的获取气体重叠吸收带 k -分布参数的方法。同时,提出了两种新的部分相关方法和它们的计算公式。与此同时,由于谱带划分是进行辐射计算的基础,基于各种需要的谱带结构会直接影响大气辐射计算的精度和速度。本章给出了 5 种针对不同需要的谱带划分方案,并对它们的大气辐射通量和冷却率进行了详细的比较。 k -分布间隔点的选取是相关 k -分布方法计算的基础,如何选取 k -分布间隔点是目前辐射计算中没有解决的问题之一。本章通过数值计算指出:在其他条件相同的情况下,谱带划分和 k -分布间隔点的选取是影响大气辐射计算精度的两个较为重要的因子。如果计算机能力允许,增加谱带和 k -分布间隔点的个数是提高大气辐射计算精度的有效手段。本章研究结果表明, k -分布间隔点的增加对辐射计算精度的影响具有饱和度,因此,提出了 k -分布间隔点选取的优化原则和方法,并在此基础上,给出了可应用于天气气候模式的多种大气辐射计算方案。

2.1 不同版本 HITRAN 光谱数据对辐射模式的影响

BCC_RAD 中气体吸收计算采用的光谱数据来自 HITRAN 光谱数据。HITRAN(High resolution TRANsmission)分子光谱数据集被广泛应用于大气遥感、大气辐射等领域,是目前世界公认的高精度光谱数据库之一(Rothman,2010)。HITRAN 分子光谱数据集的主要版本有 HITRAN1986、HITRAN1992、HITRAN1996、HITRAN2000、HITRAN2004、HITRAN2008、HITRAN2012(Rothman *et al.*,1987,1998,2003,2005,2009,2013),目前发布的最新版本是 HITRAN2012。HITRAN 光谱数据集主要包括逐线光谱参数、红外吸收截面参数、紫外逐线光谱参数、紫外吸收截面参数和气溶胶光学参数。其中逐线光谱参数包括了 47 种气体,BCC_RAD 采用了其中的水汽、二氧化碳、臭氧、氧化亚氮、一氧化碳、甲烷、氧气 7 种气体的逐线光谱参数(Zhang *et al.*,2013;张华等,2013)。对于一些大分子量气体,例如全氟碳化物(PFCs)、氢氟碳化物(HFCs)和六氟化硫等与大气臭氧层破坏和温室气体密切相关的气体,目前的光谱实验水平尚不足以获取逐线光谱参数,因此以吸收截面的形式给出,BCC_RAD 中也使用了上述吸收截面数据(Zhang *et al.*,2011;张华等,2011)。

逐线积分辐射模式首先利用分子光谱数据计算气体吸收系数,然后通过气体吸收系数结

合大气廓线中的气体浓度信息得到气体吸收的光学厚度,最后进行辐射传输计算。因此,分子光谱数据的精确程度直接决定了逐线积分大气辐射模式的精度。

相关 k -分布辐射模式与逐线积分辐射模式相比,计算速度快,并且能根据精度需求,灵活的调整相关 k -分布间隔的数目,如果需要高精度,只需增加 k -分布间隔的个数,如需要节约计算时间,则可以减少 k -分布间隔的数目。正因为以上优点,相关 k -分布辐射模式被广泛地应用于数值天气预报和气候模式。相关 k -分布模式需要预先计算出不同温度、气压下每个 k -分布间隔点上的吸收系数,而在计算不同温度、气压下每个 k -分布间隔点上的吸收系数时,需要使用逐线积分模式计算的气体吸收系数,因此,相关 k -分布辐射模式的精度,也在很大程度上取决于分子光谱参数的精度。

不少研究者针对不同版本 HITRAN 分子光谱数据集对辐射传输的影响做了大量工作。Pinnock 和 Shine(1998)比较了利用 HITRAN1986、HITRAN1992 和 HITRAN1996 计算的长波辐亮度、冷却率和辐射强迫的区别,并且评估了谱线强度和谱线加宽的不确定性对长波辐射的影响。Fomin 等(2004)评估了 HITRAN1992、HITRAN1996 和 HITRAN2002 对辐射通量的影响。Feng 等(2007)以及 Feng 和 Zhao(2009)评估了不同 HITRAN 版本光谱数据对遥感的影响。Kratz (2008)研究了 HITRAN1982、HITRAN1986、HITRAN1992、HITRAN1996、HITRAN2000、HITRAN2004 对大气辐射计算造成的差异。Fomin 和 Falaleeva (2009)将 HITRAN2008 与之前版本的 HITRAN 光谱数据作了一个简略的比较。

2.1.1 HITRAN 主要吸收气体谱线参数统计

表 2.1 统计了 4 个 HITRAN 版本 (HITRAN1996、HITRAN2000、HITRAN2004 和 HITRAN2008)5 种温室气体(水汽、二氧化碳、臭氧、氧化亚氮和甲烷)在长波区间($0 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$)的谱线参数。从中可以看出 HITRAN2008 的二氧化碳谱线数目是前几个版本的 4 倍以上,但是,总线强和线强加权的半宽改变却很小。

表 2.1 $0 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ 谱线统计

HITRAN database	N	$\sum S (\text{cm}^2 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\sum S_{\alpha} / \sum S (\text{cm}^{-1})$
H ₂ O			
2008	18429	6.388E-17	7.6826E-2
2004	18429	6.341E-17	7.8819E-2
2000	16422	6.358E-17	7.5242E-2
1996	15571	6.347E-17	7.5568E-2
CO ₂			
2008	161272	1.098E-16	7.3577E-2
2004	40095	1.098E-16	7.3577E-2
2000	38843	1.098E-16	7.3577E-2
1996	38843	1.098E-16	7.3577E-2
O ₃			
2008	357375	1.762E-17	7.6412E-2

续表

HITRAN database	N	$\sum S$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\sum S_{\alpha} / \sum S$ (cm^{-1})
2004	295292	1.761E-17	7.6399E-2
2000	258958	1.819E-17	7.2288E-2
1996	258958	1.819E-17	7.2288E-2
CH ₄			
2008	153792	8.374E-18	5.832E-2
2004	129684	8.354E-18	5.858E-2
2000	37392	8.440E-18	5.916E-2
1996	37392	8.440E-18	5.916E-2
N ₂ O			
2008	32307	6.967E-17	7.704E-2
2004	32299	6.967E-17	7.704E-2
2000	20828	6.974E-17	7.656E-2
1996	20827	6.974E-17	7.656E-2

表中, N 为谱线数目, $\sum S$ 为谱线强度和, $\sum S_{\alpha} / \sum S$ 为谱线强度加权半宽。

表 2.2 统计了不同谱线强度下二氧化碳的谱线数目、谱线强度和以及谱线强度加权的空气加宽半宽度。由于 HITRAN1996 和 HITRAN2000 采用同样的二氧化碳光谱数据, 因此, 表 2.2 中仅给出了 HITRAN1996、HITRAN2004 和 HITRAN2008 的统计结果。从 HITRAN1996 和 HITRAN2004 的统计结果可以发现, 谱线强度大于 $1\text{E}-26(\text{cm}^2 \cdot \text{mol}^{-1})$ 的谱线数目占总谱线数目的比重分别约为 79% 和 75%; 而在 HITRAN2008 中, 该比重仅为 6%。这意味着 HITRAN2008 二氧化碳光谱数据中增加了大量谱线强度较小光谱谱线(简称弱线)。同样发现在 HITRAN1996 和 HITRAN2004 中, 谱线强度大于 $1\text{E}-22(\text{cm}^2 \cdot \text{mol}^{-1})$ 的谱线数目分别为 1978 条和 1959 条, 而在 HITRAN2008 中, 该数目为 505, 这表明 HITRAN2008 中谱线强度比较大的光谱谱线(简称强线), 与之前版本 HITRAN 光谱数据集相比, 有了大幅减少。因此, 推断有可能是随着实验室光谱学的发展, 更多的弱线被测得, 同时, 以往测得的某些强线也被更精确的测量拆分为若干弱线。

表 2.2 二氧化碳 $0 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ 区间谱线按照谱线强度的参数统计表

CO ₂	N	$\sum S$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\sum S_{\alpha} / \sum S$ (cm^{-1})
2008			
>0	161272	1.098E-16	7.3577E-2
>1e-26	8983	6.2215E-18	7.3980E-2
>1e-22	505	6.1921E-18	7.3985E-2
>1e-18	0	0	0
2004			
>0	40095	1.098E-16	7.3577E-2

续表

CO ₂	N	$\sum S$ (cm ² · mol ⁻¹ · cm ⁻¹)	$\sum S_{\lambda} / \sum S$ (cm ⁻¹)
>1e-26	30071	1.0849E-16	7.3697E-2
>1e-22	1959	1.0839E-16	7.3669E-2
>1e-18	34	8.3164E-17	7.3940E-2
1996			
>0	38843	1.098E-16	7.3577E-2
>1e-26	30708	1.098E-16	7.3577E-2
>1e-22	1978	1.097E-16	7.3579E-2
>1e-18	34	8.316E-17	7.3940E-2

表中, N 为谱线数目, $\sum S$ 为谱线强度和, $\sum S_{\lambda} / \sum S$ 为谱线强度加权半宽。

2.1.2 HITRAN 光谱数据对光学厚度、辐射通量和冷却率的影响

选取 6 种标准大气廓线[热带大气(TRO)、中纬度夏季大气(MLS)、中纬度冬季大气(MLW)、亚寒带夏季大气(SAS)、亚寒带冬季大气(SAW)和美国标准大气(USS)](McClatchey *et al.*, 1972)用于大气辐射计算。ZS2000 逐线积分模式的光谱分辨率取为 0.1 cm⁻¹, 单条谱线的截断取为 5 cm⁻¹。大气分为 100 层, 每层 1 km。由于 70 km 以上的辐射计算需要考虑非局地热力平衡, 因此, 仅选取 70 km 以下的计算结果分析。

光学厚度的公式如下:

$$\tau_{\nu}(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} k_{\nu} \rho(z) dz \quad (2.1)$$

式中, τ_{ν} 是波数 ν 处的光学厚度, z_1 和 z_2 表示光程的两端, k_{ν} 表示吸收系数, $\rho(z)$ 表示高度 z 处的气体密度。

图 2.1 给出了中纬度夏季大气廓线条件下计算的 5 种温室气体的整层大气的总光学厚度。图中显示的光谱分辨率为 5 cm⁻¹。从图 2.1 可以看出, HITRAN2008 和 HITRAN2004 相对差别最大的区间在 490~600 cm⁻¹, 最大相对差别为 497.5 cm⁻¹ 处的 17.99%; HITRAN2008 和 HITRAN2000 相对差别最大的区间在 2500~2820 cm⁻¹。最大相对差别可以达到 -99%, 也就是说在该区间内利用 HITRAN2000 计算的光学厚度要远远小于利用 HITRAN2008 计算的光学厚度。HITRAN2008 和 HITRAN1996 相对差别最大的区间在 2390~2430 cm⁻¹ 以及 780~920 cm⁻¹, 最大相对差别为 2412.5 cm⁻¹ 的 44.23%。由 Rothman 等(2003)可知 HITRAN2000 与 HITRAN1996 相比, 5 种气体中仅有水汽进行了更新。从图 2.1 中可以发现, 在 2500~2820 cm⁻¹ 区间, HITRAN1996 与 HITRAN2008 的相对差别要小于 HITRAN2000 和 HITRAN2008 的相对误差; 而在 780~920 cm⁻¹ 区间, HITRAN1996 与 HITRAN2008 的相对差别要大于 HITRAN2000 和 HITRAN2008 的相对误差。这表明在 2500~2820 cm⁻¹ 区间, HITRAN1996 的水汽光谱数据有可能要优于 HITRAN2000; 反之在 780~920 cm⁻¹ 区间, HITRAN2000 的水汽光谱数据有可能要优于 HITRAN1996。

表 2.3 给出了 HITRAN2008 计算的 6 种大气廓线的大气顶向上辐射通量和地表向下辐