


张华 著

DAQI XISHOU FUSHE YANJIU


# 大气吸收辐射

## 研究

 气象出版社  
China Meteorological Press

# 大气吸收辐射研究

张 华 著

 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内 容 简 介

大气辐射对于大气遥感、气候模拟和气候变化研究都具有重要学术意义。大气辐射计算中一个最重要部分就是关于气体吸收的参数化方案。该书提出了一套高效的计算大气分子吸收的逐线积分方法和求取非均匀路径相关  $k$ -分布函数的新方法, 以及不同气体吸收带重叠的处理方法。

该书详细介绍了  $k$ -分布方法的起源、理论和数值解法, 对从事大气辐射和大气遥感及气候模拟等领域的相关人员和相关学者具有指导意义和参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

大气吸收辐射研究 / 张华著. —北京: 气象出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5029-6192-3

I. ①大… II. ①张… III. ①大气辐射—研究 IV. ①P422

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 208215 号

## 大气吸收辐射研究

张 华 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

总 编 室: 010-68407112

网 址: [http:// www.qxcbs.com](http://www.qxcbs.com)

责任编辑: 杨泽彬

封面设计: 易普锐创意

印 刷: 北京京华虎彩印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 210 千字

版 次: 2015 年 9 月第 1 版

定 价: 48.00 元

邮 政 编 码: 100081

发 行 部: 010-68409198

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

终 审: 章澄昌

责任技编: 赵相宁

印 张: 11.875

印 次: 2015 年 9 月第 1 次印刷

## 自序

大气辐射传输过程通常由三部分组成：气体吸收、大气分子雷利散射和粒子（气溶胶和云）的吸收与散射及其辐射传输过程。因此，大气辐射传输模式包括了气体吸收和粒子散射的参数化及其辐射传输方法。其中，气体吸收过程参数化中常用的方案主要有逐线积分（LBL）、 $k$ -分布和带模式三种。逐线积分模式精度最高，但需要耗费大量的计算时间，目前还不能用于天气和气候模式中。带模式计算速度快，但是精度与逐线积分和 $k$ -分布方案相比还有一定的差距。 $k$ -分布方案由于其可以兼顾精度和计算效率，因此，目前被广泛应用于大尺度模式中。几十年来，各国科学家一直都在致力于天气气候模式中辐射方案的研发工作，到目前为止，绝大多数方案都是在相关 $k$ -分布方法的基础上进行改进和发展的。

美国大气与环境研究中心（AER）研制并发展了以相关 $k$ -分布方法为基础的RRTM大气辐射模式，并不断地改进和更新他们的辐射计算模块，开发了更加适合天气气候模式应用的RRTMG方案并已经应用于CAM5/NCAR中。Chou等（1990；1992；1996；1999）多年来发展了长波和短波辐射计算模式（即Goddard辐射方案）。Freidenreich和Ramaswamy（1999）发展了用于气候模式的辐射方案（即GFDL辐射方案）。Lacis和Oinas（1991）及Fu和Liou（1992）的 $k$ -分布方法被广泛应用在很多气候模式中（如CAM3/NCAR等）。日本东京大学的辐射传输模式近年来一直在发展RSTAR模式系列用于不同的实际应用，代表工作有Nakajima等（1986）和Nakajima等（2000）。另外，在早期的天气气候模式中，英国Morcrette等（1991）的带模式曾应用于ECMWF早期的天气气候模式中，现在已经逐渐被 $k$ -分布方法所取代。中国在该方面的研究工作主要有石广玉（1981；1998）提出的 $k$ -分布方法及其在中国科学院大气物理研究所开发的全球海洋-大气-陆地气候系统模式（GOALS/LASG）中的应用（王标，1998）。利用本书发展的优化的 $k$ -分布方法，作者带领团队研制了太阳短波大气吸收辐射传输模式和高精度、高速度的辐射计算模块（Zhang *et al.*，2006a；b）和北京气候中心的大气辐射传输模式（简称

BCC-RAD) (Randles *et al.*, 2013), 并应用于国家气候中心的全球气候模式 (BCC-AGCM2.0.1) (Zhang *et al.*, 2014) 和 GRAPES 全球天气模式中 (卢鹏, 2009)。

总的说来, 在用于天气气候模式的辐射方案中, 关于气体吸收的  $k$ -分布方法已经得到广泛应用, 尽管由于  $k$ -分布本身的前提假定会带来一定的误差, 但是在目前的计算机资源下, 在所有的吸收辐射计算方案中,  $k$ -分布方法仍是用于天气气候模式中的最佳计算方法。因此, 有必要对计算大气吸收的  $k$ -分布方法及其参考模式——逐线积分方法做专门的介绍。

本书详细介绍了计算气体吸收的逐线积分方法、不同的  $k$ -分布方法和处理不同气体重叠吸收的数值方法, 是对以往出版的相关大气辐射著作的补充。全书分 7 章: 第 1 章是绪论; 第 2 章描述了大气吸收系数、透过率和冷却率的基本计算方法和公式; 第 3 章是关于逐线积分方法的研究; 第 4 章详细讨论了  $k$ -分布和相关  $k$ -分布的基本原理及计算方法; 第 5 章提出了一种新的计算  $k$ -分布和相关  $k$ -分布函数的方法; 第 6 章为吸收带重叠问题的处理方法及数值结果; 第 7 章是本书的若干结论和讨论; 附录中给出计算中所需的资料和本书的结果。

在此需要说明的是: 尽管本书主要依据作者在 1999 年完成的博士论文整理而成, 限于完成的年代, 书中所用的 HITRAN 分子光谱数据集已经陈旧, 但是, 本书所给出的计算大气气体吸收的基本理论和方法至今仍然适用。该方面作者等发表的论文 (Lu *et al.*, 2012) 详细地比较了本书所用的 HITRAN 1996 及其后来的四个新版本 HITRAN 2000、HITRAN 2004 和 HITRAN 2008 分子光谱数据集在气体光学厚度、辐射通量和加热率计算中的差别, 可作为补充材料供读者参考。

在此特别感谢石广玉院士对本书研究工作的指导和贡献, 并为本书起名。由于时间和学识水平所限, 错误难免, 敬请读者指正。此外, 本书得到国家重点基础研究发展计划项目 (合同号: 2011CB403405) 的资助, 在此一并致谢!

张 华  
2015 年 5 月于北京

## 前 言

随着社会的发展，人类越来越关注自己的生存环境。全球气候变化已成为全世界科学家研究的热点和难点。中国也不例外，已将其列为国家和许多部门的研究重点。由于人类屡遭自然的袭击，诸如洪水和干旱等，以及自 20 世纪 80 年代以来全球气候异常现象，诸如夏季持续高温和冬季温暖无雪，人们逐渐认识到人类活动本身会改变气候，引起气候异常。既改变气候的平衡状态，又引起气候极端事件的增加。人类活动之所以可能会改变气候，首先是由于人类活动已经并正在造成地球大气组成的明显变化（例如，大气  $\text{CO}_2$  的浓度已从工业革命前的近 280 ppmv<sup>①</sup> 增加到 1999 年的近 370 ppmv，2011 年已达到近 391 ppmv）。

从物理上来说，大气组成变化之所以可能会改变气候，首先是由于它们对大气辐射场的扰动。温室气体和气溶胶的气候辐射强迫问题、云-气溶胶-辐射相互作用问题已被历年政府间气候变化专门委员会（IPCC）评估报告列为亟待研究和解决的问题。为此，已建立各种气候与气象模式来研究这些问题。在这些模式中都需要一个能计算辐射通量和大气冷却率（加热率）的辐射模式。

目前，气候模式都尽可能在最大资源的超级计算机上运行。即使如此，在大气辐射传输计算中仍然必须在精度和速度之间进行某种选择。在当代较先进的气候模式中，有将近 50% 的计算时间都是用于辐射计算，而在辐射计算中最费时的是关于大气气体吸收的计算。

在大气环流模式（GCMs）中通常有几种参数化方法处理光谱区间的气体吸收，即：查表法（look-up tables）；带模式方法，包括窄带模式（NBMs）和宽带模式（WBM）；比辐射率方法和  $k$ -分布方法及若干经验和半经验方法。查表法就是用逐线积分方法将预先规定的气压和温度层上的吸收系数计算出来，然后以一个庞大的数表存储起来，待气候模式调用；带模式方法简单易行但其精度低且不能同时处理散射问题； $k$ -分布方法由于其精度远远高于带模

<sup>①</sup> ppmv:  $10^{-6}$  体积分数，即百万分之一体积。

式，计算速度又大大快于逐线积分方法，能同时处理吸收与散射问题并能在精度和计算速度之间自由选择，因而在进入 90 年代后，逐渐取代带模式方法而广泛用于气候模式中，它被认为是迄今为止最具广泛应用前景的辐射计算模式。

但在  $k$ -分布方法下，仍然有许多值得研究和改进的方面。如何建立具有坚实物理基础的参数化的实际大气辐射传输模式，以便在大气环流和气候变化的数值模式，以及中长期数值天气预报模式中更好地定量考虑大气动力学过程和辐射过程之间的相互作用，仍然是一个值得研究的问题。本研究工作试图在这方面进行一些探索性的研究。由于以往的  $k$ -分布方法在应用时需要附带一个相对庞大的数表，所以本研究工作要解决的问题之一就是利用  $k$ -分布廓线的谱吸收线特性，找出一个简单的表达式而无须附带庞大的数表，以便使新的  $k$ -分布方法在简单性上可与带模式相比拟，但在精度上又可与以往的  $k$ -分布方法相媲美，使其在气候模式中更易于应用。另外，当  $k$ -分布方法用于非均匀路径时，对实际大气作了某种假定（即相关  $k$ -分布， $ck$ -分布），能否抛弃这种假定而建立一套新的  $k$ -分布计算方法也是本书想要探索的问题之一。总之，本书试图对  $k$ -分布方法进行全面、细致而深入的研究，并期望本研究工作能对  $k$ -分布方法下一些未解决的问题画上一个至少是阶段性的圆满的句号。

# 目 录

自 序	
前 言	
摘 要	( 1 )
第 1 章 绪 论	( 4 )
1.1 大气辐射传输过程的重要性	( 4 )
1.2 大气气体吸收的基本特征	( 6 )
1.3 辐射计算的基本问题	( 10 )
1.4 带模式的局限性	( 11 )
1.5 研究进展及存在问题	( 12 )
1.6 本书研究内容	( 14 )
第 2 章 大气吸收系数、透过率和冷却（加热）率计算的基本理论与公式	… ( 16 )
2.1 大气吸收系数的计算	( 16 )
2.2 大气透过率计算的基本方法与公式	( 20 )
2.3 大气冷却率计算的方法与公式	( 21 )
2.3.1 计算大气辐射通量与冷却率的基本公式	( 21 )
2.3.2 假定子层内普朗克辐射线性变化的冷却率计算方法	… ( 24 )
第 3 章 逐线积分方法的研究	( 28 )
3.1 引 言	( 28 )
3.2 “经典的”逐线积分方法	( 29 )
3.3 谱线资料、大气廓线的选取	( 31 )



3.4	“精效”逐线积分方法的研究	(32)
3.4.1	参考标准	(32)
3.4.2	积分取样点的选取	(33)
3.4.3	线翼贡献的截断方法	(37)
3.4.4	不同取样点对吸收系数影响的误差分析	(38)
3.4.5	“精效”逐线积分方法	(40)
3.4.6	气压和温度对吸收系数的影响及其内插表示	(52)
3.5	大气中五种主要吸收气体单独的和重叠的逐线积分的冷却率结果	(55)
<b>第4章</b>	<b><math>k</math>-分布方法和相关 <math>k</math>-分布方法</b>	<b>(67)</b>
4.1	$k$ -分布思想的起源与发展过程	(67)
4.2	$k$ -分布和 $ck$ -分布的基本概念和理论	(69)
4.2.1	$k$ -分布方法	(69)
4.2.2	相关 $k$ -分布方法 (CKD)	(72)
4.3	$k$ -分布函数和 $ck$ -分布函数的各种计算方法	(77)
4.3.1	透过率函数 $\bar{T}(u)$ 已知时, 寻求 $k$ -分布函数的数值方法	(77)
4.3.2	吸收系数 $k$ 已知时, 寻求 $k$ -分布函数的数值方法	(78)
4.3.3	相关 $k$ -分布函数的计算	(78)
4.4	基于吸收系数重排的 $ck$ -分布的思想和方法	(79)
4.5	Lacis 和 Oinas (1991) 的 $k$ -分布模式	(82)
4.5.1	Malkmus 统计带模式	(82)
4.5.2	Lacis 和 Oinas (1991) 的 $k$ -分布模式	(84)
<b>第5章</b>	<b>非均匀路径相关 <math>k</math>-分布新方法的研究</b>	<b>(91)</b>
5.1	基本思想和方法	(91)
5.2	均匀路径 $k$ -分布廓线的表达	(96)
5.3	非均匀路径相关 $k$ -分布的表达	(101)
5.4	吸收系数的温度依赖关系及其处理方法	(104)
5.5	冷却率结果	(118)
5.5.1	有关冷却率计算的几个问题	(118)

5.5.2	不同 $k$ -分布方法冷却率结果的比较 .....	(121)
5.6	关于相关 $k$ -分布的几点思考 .....	(124)
5.6.1	关于非均匀路径的“真实” $k$ -分布 .....	(124)
5.6.2	不同气压下吸收系数之间的相关性研究 .....	(126)
5.6.3	临接层与非临接层对某层大气的辐射通量和冷却率的 贡献 .....	(129)
<b>第 6 章</b>	<b>重叠吸收带的研究</b> .....	(132)
6.1	引 言 .....	(132)
6.2	重叠吸收的几种处理方法 .....	(134)
<b>第 7 章</b>	<b>结语与讨论</b> .....	(141)
7.1	本研究工作的主要结论与发现 .....	(141)
7.2	关于 $k$ -分布方法在多次散射大气中的应用 .....	(144)
7.3	关于普朗克函数 .....	(145)
7.4	关于大气分子谱线资料 .....	(145)
<b>附 录</b>	.....	(147)
附表 A	1996 年版 HITRAN 分子资料集一览表 .....	(147)
附表 B	中纬度夏季大气温度和气压廓线与大气高度分层 .....	(149)
附表 C	中纬度夏季大气臭氧和水汽浓度垂直分布廓线 .....	(151)
附表 D	七种主要吸收气体在各个波段的多普勒半宽度和取样 点数 .....	(153)
附表 E	七种主要吸收气体在各个波段的吸收谱线数和总的 谱线强度 ( $\text{cm}^2/\text{mol} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) .....	(155)
附表 F	变换后的高斯积分点 $X_i$ 和权重值 $A_i$ .....	(157)
附表 G	在新的 $k$ -分布方法中, 水汽所需参数表 .....	(159)
附表 H	在新的 $k$ -分布方法中, $\text{CO}_2$ , $\text{O}_3$ , $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{CH}_4$ 所需 参数表 .....	(161)
附图 A	9 个 $k$ -分布间隔点上的吸收系数随气压的变化 .....	(163)

---

附图 B 单纯型方法的流程图 (Rao, 1979) .....	(167)
附图 C $H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$ , $N_2O$ 和 $CH_4$ 在大气长波内主要吸收带 第一次用函数拟合的函数与重排的吸收系数曲线的对数差 ...	(168)
参考文献 .....	(172)
与本书相关的发表论文目录 .....	(178)

## 摘 要

本书进行了如下几个方面的研究工作：

第一,利用  $k$ -分布廓线的展吸收线特性,从数学上找出不同气压和温度下  $k$ -分布函数的简单拟合公式,在此基础上提出一种新的求取  $k$ -分布函数的方法。研究发现,虽然乍看起来, $k$ -分布廓线与混合加宽的瓦格特线型  $\text{Voigt}(s, y)$  很相似,但实际上,不论是在线中心还是在翼部,二者都具有很大的不同。在对线中心和翼部做了特别处理(简要地说,就是假定谱线中心部分的吸收系数与气压成反变关系,而在翼部则与气压成正比)之后,用非约束单纯形方法优选  $\text{Voigt}(s, y)$  函数的线强参数  $s$  和半宽参数  $y$  (在此,这两个参数只具有形式上的意义,并非物理上的强度和宽度)对  $k$ -分布廓线的中间部分进行了拟合。结果发现,对弱吸收带而言,这种拟合可以达到相当好的精度;但对大气主要吸收气体  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_3$  的强吸收带,除在个别气压外,拟合精度无法满足要求。在对误差进行了仔细分析的基础上,幸运地发现,对数函数  $\log_a x$  可以作为辅助函数完成对  $k$ -分布廓线的最佳拟合,拟合仍然用非约束单纯形方法进行。这样,对气压和温度定常的一条大气均匀路径来说,对强吸收带最多只需要 4 个参数,即  $s, y, a$  和  $x$  就可以计算其  $k$ -分布廓线的最重要部分(中间部分)的  $k$ -分布函数;对弱吸收带,只需要两个参数  $s$  和  $y$ 。

对大气非均匀路径的处理,即相关  $k$ -分布函数的计算问题就简化为参数  $s, y, a$  和  $x$  的气压和温度依赖关系问题。温度依赖关系与气压依赖关系相比,是第二位的,但是十分复杂,本书对此进行了详细的研究。关于气压依赖关系问题,发现:①参数  $x$  随气压变化不大,可取其为常数;②参数  $s, y$  和  $a$  随气压变化虽然很大,但比较光滑,可用一个气压的二次多项式进行最小二乘拟合。至此,任意气压下的相关  $k$ -分布函数的计算问题获得基本解决。

本书详细探讨了温度对吸收系数和冷却率的影响。温度对吸收系数的影响不但起因于线强对温度的依赖,还由于谱线半宽度与温度有关,所以温度影响显示出一种极端复杂性,它不但与气压有关,而且与波长(波数)有关。从理论上提

出了6种考虑温度对吸收系数影响的方法并从数值上给出了各种方法的精度。本书提出了一种利用不同温度下的谱线线强之和对吸收系数温度依赖关系进行一级订正的方法,不但简单易行,而且精度相当好。在气候模式中,可望获得广泛应用。

**第二**,由于用逐线积分方法计算大气吸收系数,既是 $k$ -分布模式的必要条件,又是 $k$ -分布模式计算结果的参考标准,本书提出了一种全新的线翼贡献截断方式,并在此基础上研制一套精确而高效(“精效”)的计算大气分子吸收的逐线积分方法,大大地提高了计算效率;以大气主要温室气体 $\text{CO}_2$   $15\ \mu\text{m}$ 带的 $500\sim 800\ \text{cm}^{-1}$ 波段为例,从计算效率和精度上来看,在 $0\sim 100\ \text{km}$ 的123个高度的大气气体吸收系数计算上,新方法所用的CPU时间不到传统方法的 $1/38$ ;对从地面到 $100\ \text{km}$ 范围的整层大气,大气透过率的误差不超过 $0.0004$ ;对 $70\ \text{km}$ 以下的大气,大气冷却率的误差不超过 $0.004\ \text{K/d}$ ,而CPU时间却减少近一个半数量级。

**第三**,鉴于石广玉(1981)及Lacis和Oinas(1991)(简记为LO)的 $k$ -分布模式是在垂直非均匀大气中模拟非灰气体吸收、热辐射和多次散射的相关 $k$ -分布方法的两种有代表性的工作,但他们(特别是石广玉)所用的光谱资料版本较旧。为了使本书的研究结果能与LO结果在同等条件下比较,重建了LO的 $k$ -分布模式,并利用了石广玉(1981)以后的部分结果。

从几种主要大气吸收气体在长波波段的冷却率结果上看,新的 $k$ -分布方法从计算精度上可以与以往的 $k$ -分布方法相媲美,对大气主要吸收气体的几个主要的吸收波段而言,其精度甚至超过了以往的 $k$ -分布方法;从简单性上看,其表达式可与带模式相比拟,它只需要一个计算 $k$ -分布函数的解析公式和两个很小的数表,就可以计算大气吸收气体在任何气压和温度下的 $k$ -分布函数。

**第四**,在利用吸收系数重排求取相关 $k$ -分布( $ck$ -分布)的框架内,进行了不同气体吸收带重叠处理方法的研究。LO在重叠带的处理中必须假定重叠光谱完全不相关,这不符合实际大气的情况,带来的误差也较大。通过比较,证实了本研究工作所用的部分相关处理方法,对以往这方面的研究有重要改进。

**第五**,给出 $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 五种气体单独的及重叠的红外冷却率的LBL结果和用新的相关 $k$ -分布方法计算的这五种气体在大气长波范围内主要吸收带的冷却率结果,为其他简化方案和今后的研究工作提供一种可以信赖的参考标准。

最后,本书还进行了若干探索性的研究,并对今后有关的研究方向进行了讨论,包括:

**第一**,放弃以往研究中相关  $k$ -分布 ( $ck$ -分布)成立的假定,利用同时重排不同气压和温度下的吸收系数的方法,考虑大气垂直非均匀路径中实际存在的吸收系数光谱相关性,寻找一种新的计算不同气压和温度下的  $k$ -分布函数的方案。但是,这一努力,未获成功。通过研究不同气压和温度下的吸收系数的实际相关性,以及临接层和非临接层对参考层的向上、向下辐射通量和微分辐射通量的相对贡献,从物理上说明了之所以未获成功的原因,并第一次从数值上证明了相关  $k$ -分布假定在实际大气中不完全成立,但却可以获得相当好的冷却率结果的这一悖论的内在原因。

**第二**,在  $k$ -分布框架内的大气长波辐射通量的计算中,应当把普朗克函数与气体吸收系数的关系包括进去。这样,就有可能减少光谱间隔划分的数目,提高整个辐射模块的计算速度。

**第三**,从理论上简要说明了  $k$ -分布方法在多次散射大气中的应用方法。

**第四**,大气分子谱线资料对辐射计算的影响及今后的研究课题。

**关键词**:逐线积分 大气冷却率  $k$ -分布  $ck$ -分布

# 第 1 章 绪 论

**摘要:**本章叙述了辐射传输过程在决定地气系统能量平衡中的重要性、大气气体吸收的基本特征;讨论了辐射计算的基本问题和带模式的局限性;简要评述了  $k$ -分布模式的研究进展及存在问题;最后,对本书的研究内容作一简要介绍。

## 1.1 大气辐射传输过程的重要性

近年来,气候异常问题已成为全世界科学界和社会公众越来越关注的焦点和热点,已建立各种数值模式来研究和预测气候变化与气候变迁问题。由  $\text{CO}_2$  和其他温室气体及大气气溶胶浓度增加所产生的气候效应倍受关注;云-辐射-气溶胶相互作用、云与气溶胶的辐射强迫问题已被历次 IPCC(1990, 1994, 1995) 列为亟待解决的问题之一。最近,云对太阳辐射的所谓“异常吸收”更成为一个热门话题。从物理本质上来说,所有这些问题均与大气辐射场的扰动有关。显然,要想最终揭示这些问题的实质,就必须详细了解辐射过程及地球和大气的辐射平衡问题。

众所周知,地球的所有能量都来自于太阳的电磁波辐射。年平均的地球表面温度随时间没有太大的变化,这说明地球吸收的太阳辐射和射出的热辐射接近平衡。在平均日地距离处的太阳辐射通量密度,即太阳常数稍小于  $1370 \text{ W/m}^2$ , 地外每单位面积上的太阳通量密度约等于  $343 \text{ W/m}^2$ , 其中,将近 30% 被反射回太空, 20% 被大气中的各种气体、气溶胶及云吸收, 大约 50% 被地球表面吸收(图 1.1)。反射回外空的太阳辐射与入射太阳辐射的比率称为反照率,地球作为一个整体的行星反照率大约是 0.30, 因此,平均  $240 \text{ W/m}^2$  的能量直接和间接地加热地球和大气。

这种被吸收的太阳辐射能,通过动力和热力过程在地气系统中进行再分配,最终以低温行星或大气的辐射回到太空。假设在红外光谱区,地球作为黑体发

射辐射,就可以估算地表温度的一般量级。由地球的吸收率和发射率相等,得到地球的有效发射温度为 255.5 K,这低于观测到的地球表面平均温度,但与大气的平均温度近似相等,这说明到达太空的辐射大部分来自于大气而不是地表。从卫星上观测到的大气吸收光谱已经粗略地验证了这个结论。255.5 K 的黑体发射的热辐射,在波长小于  $4 \mu\text{m}$  的区域是可以忽略的,而太阳辐射在波长大于  $4 \mu\text{m}$  的长波部分只携带极少能量,所以可以很方便地分别处理太阳和长波辐射通量。首先考虑长波分量,大气的主要组分( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ )对大于  $4 \mu\text{m}$  的波段几乎是透明的,而少数多原子分子,像  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$ ,却具有强烈而复杂的吸收谱并具有足够的含量吸收相当一部分长波辐射。

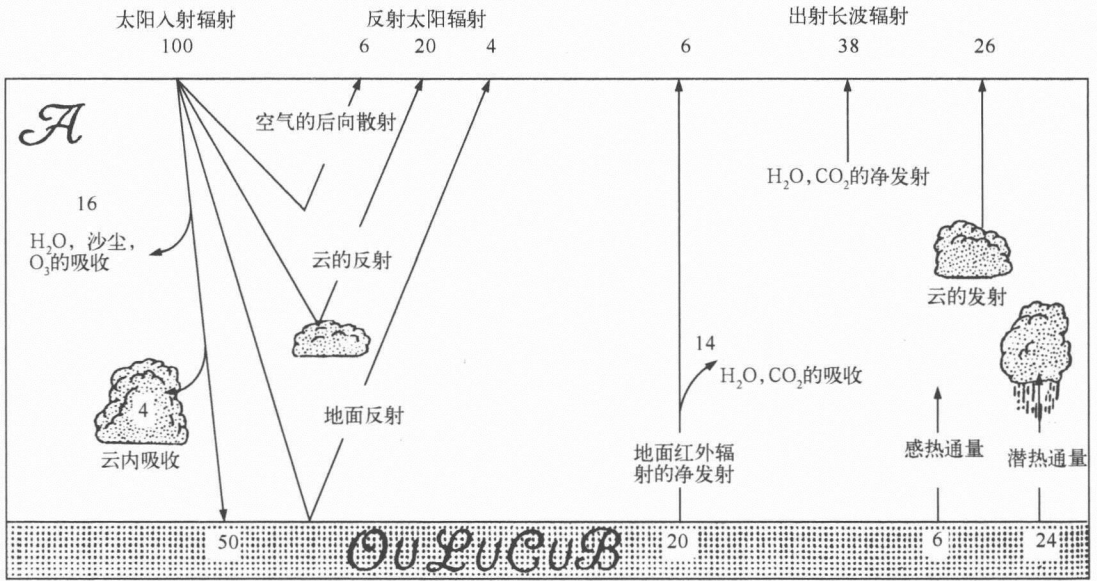


图 1.1 气候系统中全球辐射收支平衡图(引自 Peixoto Oort, 1992)

尘埃、霾,最重要的可能还是云,它们在整个光谱上强烈吸收和散射辐射。云、地表和大气的温度没有太大差别,它们遵从 Kirchhoff(基尔霍夫)定律,即:发射和吸收近似相等,由此长波辐射从大气的一层传输到下一层,使辐射传输问题复杂化。在大气上层,那里由于气压太低不服从 Kirchhoff 定律,所以问题更为复杂。



## 1.2 大气气体吸收的基本特征

辐射过程是物质和能量之间相互作用的必不可少的过程,同时也是大气中最重要的物理过程之一。地气系统的辐射收支决定了长期的全球平均气候状况,太阳辐射能和热辐射能在大气中的辐合(辐散),形成非绝热热源(冷源),造成大气水平和垂直层结的不稳定。地球气候系统基本上就是在由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。

由多原子气体分子造成的吸收是很复杂的,每一吸收带都由很多条吸收线组成,每一条吸收线的形状都会影响辐射传输。如果这些谱线资料用在整个计算中,即使一个相对简单的问题也会由于需要大量的计算时间而变得不切合实际。因此,迫切需要一些能处理这个问题的统计学方法。这些方法的发展已经使我们对均匀路径的辐射传输问题有了一个相当完整的了解。然而对沿着温度、气压和化学组成都在变化的大气非均匀路径的吸收,却存在许多新的问题不能用统计方法解决。

大气主要吸收气体对太阳辐射和地球辐射的吸收,概略性地示于图 1.2。图 1.2a 表示太阳(假定温度为 6000 K)和地球(假定温度为 255 K)的黑体辐射曲线;图 1.2b 是整层大气的吸收光谱;11 km 以上的大气吸收光谱表示在图 1.2c 中,虽然它保持了图 1.2b 的基本特征,但除了 0.3  $\mu\text{m}$  以下的波长外,吸收已大为减弱,这是由于在 11 km 以上,大气中吸收气体的含量大幅度减小所致;图 1.2d 从上到下,依次表示  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  和  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$  及  $\text{H}_2\text{O}$  从大气顶到地面的各种大气气体的吸收光谱,将它们相互叠加在一起,就构成图 1.2b。大气主要吸收气体的吸收特征是:

### (1) $\text{H}_2\text{O}$

从图 1.2 中可以看到,水汽的吸收比其他大气成分要复杂得多,它几乎跨越整个光谱区间。 $\text{H}_2\text{O}$  分子是一个不对称陀螺分子,具有很强的永电偶极矩,因而除了有很多振转带外,还有强而宽广的纯转动带,其波长范围从 15  $\mu\text{m}$  一直延伸到几厘米,在地面上波长大于 15  $\mu\text{m}$  的大气红外辐射几乎被大气中的水汽全部吸收。水汽最强和最宽的振转带是 6.3  $\mu\text{m}$ ( $\nu_2$  基频带),在 2.74  $\mu\text{m}$  和 2.66  $\mu\text{m}$  有  $\nu_1$  和  $\nu_3$  基频带,它们合在一起就是  $\text{H}_2\text{O}$  2.7  $\mu\text{m}$  带。除了上述转动带外,水汽在可见光和红外区还可以观察到很多泛频和并合频带,但在可见光区域的水汽吸收带非常弱,在近红外区的水汽吸收带对大气短波辐射的吸收十分重要。水汽在远紫外区也有许多强吸收带,分别位于:16.0~110.0 nm, 105.0~