

红外窗区范围内的大气光学特性

王 庚 辰

(中国科学院大气物理研究所)

摘要——本文简述大气中各组分在红外窗区范围内的光谱特性；在综合国内外研究的基础上，讨论了红外窗区范围内电磁辐射在实际大气传播过程中的衰减机制及各衰减因子的相对贡献；给出了不同大气状况下，红外窗区范围内辐射大气衰减的某些实测和理论计算结果。最后指出目前受到广泛重视的几个问题。

一、前 言

红外与激光技术的发展及其在军事、国民经济等部门的广泛应用，使得大气红外光谱特性的研究工作受到了普遍的重视，这一研究工作不仅是大气物理学的重要内容，而且其研究结果对于地球物理，天体物理，地质勘探，气象，海洋，军事目标的侦察等都是非常重要的。

大气的红外光学特性是一个相当复杂的问题^[1,2]，地球大气系统一方面接收来自太阳的强红外辐射，另一方面却向系统之外放出辐射，这些辐射在地-气系统内部经受着复杂的传输过程，它涉及到介质的散射，吸收和发射等复杂的物理过程，而这些过程又不仅与辐射本身的特性有关，同时还取决于多变的大气条件，例如：压力，温度，湿度，吸收气体的浓度，大气中各类粒子的浓度，谱分布，形状，属性等。

目前，对于红外窗区范围内的大气光学特性的研究尤其受人重视，这一方面是由于地-气系统的能量交换主要在红外窗区进行，另一方面，绝大多数红外遥感系统都是在红外窗区范围内工作的^[3,4,5]，即在红外窗区可以实现对于地球环境，包括地物和大气中各自然界面的航空或航天遥感。本文的目的在于分析大气中各组分在红外窗区范围内的光谱特性，讨论红外窗区内辐射的传输机制，并给出近些年来我们在红外窗区大气光学特性研究中获得的某些结果，以及一些国外研究者的相应典型结果。

二、大气气体成份及其分子光谱特征

实际大气是由气体，大气污染杂质以及云雾降水中的各种大小水滴和冰晶粒子所组成的混合物，整个大气的光学特性显然是由这些组分的含量，分布及其光学性质所决定的。表

本文 1982 年 9 月 15 日收到。

1 给出了各大气组分及其体积混合比^[1,6]。大气中的主要气体成分 N₂, O₂, CO₂ 等以及一些惰性气体的混合比在八十公里高度以下基本可视为常数, 随地区、高度和时间的变化可忽略不计(不过 CO₂ 的含量在低空由于人类活动有缓慢增长的趋势), 而其它一些微量气体, 其中一些对大气的红外光学特性有着重要影响, 其含量在某些情况下却有着明显的时空变化。O₃ 主要集中在 10~40 km 的高空, H₂O 集中在 10 km 以下的对流层内。

表 1 大气成份表

成 份	体 积 混 合 比	成 份	体 积 混 合 比
N ₂	7.8084×10^{-1}	H ₂ S	$(1.6 \sim 16) \times 10^{-9}$
O ₂	2.0946×10^{-1}	HCHO	$\leq 10^{-7}$
H ₂ O	$0 \sim 2 \times 10^{-2}$ (对流层) $0 \sim 5 \times 10^{-6}$ (平流层)	HCl	$(1 \sim 2.6) \times 10^{-9}$
CO ₂	$(3.14 \sim 3.30) \times 10^{-4}$	NO ₃ , OH HO ₂ , CH ₃ O	5×10^{-11}
CH ₄	$(1.0 \sim 1.4) \times 10^{-6}$		
O ₃	$(0 \sim 7) \times 10^{-8}$ (夏) $(0 \sim 2) \times 10^{-8}$ (冬)	Ar	9.34×10^{-3}
H ₂	5×10^{-8}	Ne	1.818×10^{-5}
CO	$(0.5 \sim 2.5) \times 10^{-7}$	He	5.24×10^{-6}
N ₂ O	$(2.7 \sim 3.5) \times 10^{-7}$	Kr	1.14×10^{-6}
NO	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	Xe	8.7×10^{-8}
NO ₂	$10^{-9} \times 10^{-6}$	I ₂	$\leq 10^{-8}$
HNO ₃	2.8×10^{-9}	水 滴 冰 晶 尘 埃 等	
NH ₃	$\leq 10^{-6}$		
SO ₂	$(0.5 \sim 0.72) \times 10^{-9}$		

大气中的主要成份 N₂ 和 O₂ 都是同核双原子分子, 它们没有永久电偶极矩, 因而不存在振-转谱带 (O₂ 仅在 0.76 μm 和 1.27 μm 处有一些很弱的电子谱带), 但 O₂ 具有永久磁偶极矩, 所以具有转动和微波结构。另外一些大气气体, 如 H₂O, CO₂, O₃, CO, N₂O, CH₄ 等以及它们的同位素都具有永久的电偶极矩, 因而它们都具有宽广的振——转和纯转动结构。显然, 要研究大气红外窗区的光学特性都必须了解这些气体的光谱特征, 而首先在于对这些气体的红外光谱的某些基本概念和基本参数的了解, 例如: 吸收分子的类型, 吸收线的强度, 位置和形状以及不同气体分子之间的相互作用等, 单线吸收, 带吸收, 吸收函数, 吸收系数随吸收物质浓度的变化, 各种气体(包括吸收气体和非吸收气体)之间的相互作用对吸收谱线结构的影响等等。

表 2 给出了大气中主要吸收气体分子的某些光谱性质。图 1 是 1~15 μm 范围内大气中主要吸收气体吸收带位置示意图。由表 2 和图 1 可见, 大气分子的吸收几乎布满了整个红外区, 当然强度相差很大。但是应当指出, 对于某些遥感探测而言(如资源卫星、气象卫星等), 因为携带目标信息的电磁波要通过整层大气, 所以即使一些由较弱吸收产生的光学效应也往往是不可忽略的。

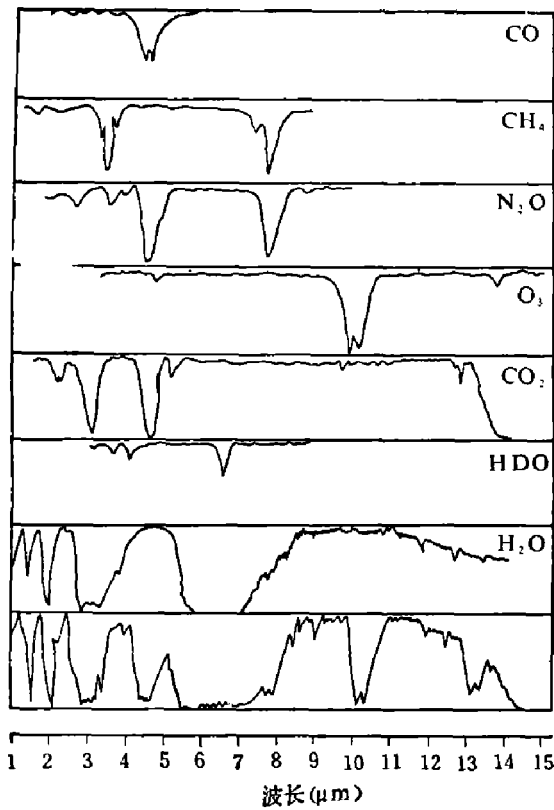


图1 大气中主要吸收气体吸收带位置示意图

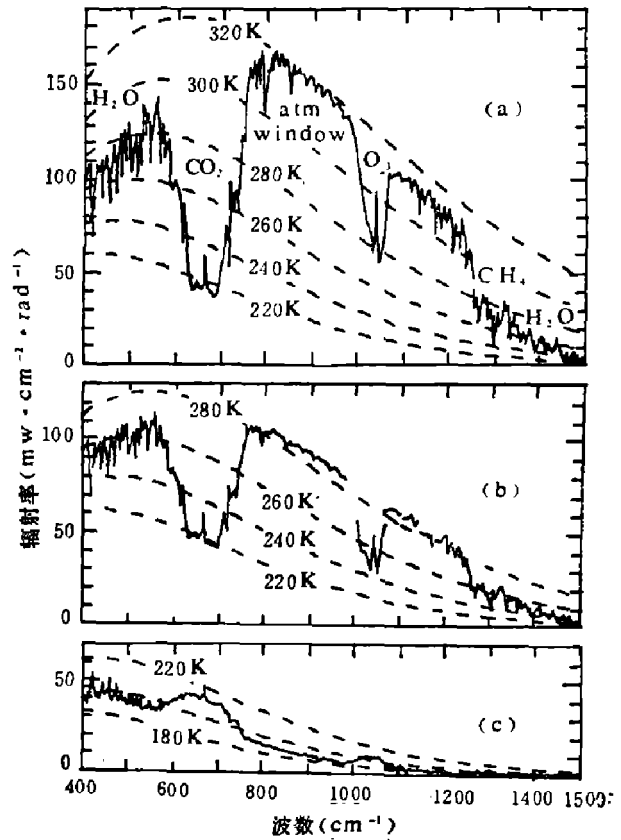


图2 地-气系统的辐射光谱
(图中虚线表示不同温值)

(a) 在撒哈拉上空 (b) 在地中海上空
(c) 在南极地区上空

表2 大气中几种主要吸收气体分子的某些光谱性质

分子种类	分子类型	强吸收位置 (μm)	弱吸收位置 (μm)
CO ₂	线性	2.7 4.3 15.0	1.4, 1.6, 2.0, 4.8, 5.2 9.4, 10.4
H ₂ O	非对称陀螺	1.87, 2.7, 6.3, 720	0.8, 0.94, 1.1, 1.33, 3.2
O ₃	非对称陀螺	9.65	2.7, 3.28, 3.57, 4.75, 5.75, 9.1, 14.1
N ₂ O	线性	4.5	2.13, 2.3, 2.9, 3.57, 3.9, 4.05, 4.5, 7.8, 8.6, 15.0, 17.1
CH ₄	对称陀螺	7.66	3.3, 3.8, 6.5
CO	线性	4.7	2.35
O ₂	线性		0.76, 1.067, 1.268
N ₂	线性		4.3
HDO		3.7	

图2是安装在雨云-4卫星上的扫描干涉仪经过地球不同地区上空时所得到的地-气辐射光谱^[7]。图1和图2都清楚地表明了大气中CO₂, H₂O和O₃等气体吸收带的位置和相对强度,概括地反映了大气本身在红外区的光学性质。

三、红外窗区的划分及窗区范围内的辐射传输机制

所谓大气窗区一般是指大气光谱中一些比较透明的波区范围，这些窗区通常是根据大气中主要吸收气体的吸收带的位置和吸收带本身的有限宽度来划分的。在实际应用中，一般选取的红外大气窗区为： $1\sim 1.1\mu\text{m}$ ， $1.2\sim 1.3\mu\text{m}$ ， $1.5\sim 1.8\mu\text{m}$ ， $2.0\sim 2.4\mu\text{m}$ ， $3.4\sim 4.1\mu\text{m}$ ， $4.5\sim 5.0\mu\text{m}$ ， $8\sim 13\mu\text{m}$ ， $16\sim 24\mu\text{m}$ 。另外在远红外区，如 $345\mu\text{m}$ ， $450\mu\text{m}$ ， $625\mu\text{m}$ 和 $714\mu\text{m}$ 等波长附近也有一些窗区存在。在上述大气窗区中，最常使用的是 $2.0\sim 2.4\mu\text{m}$ ， $3.4\sim 4.1\mu\text{m}$ 和 $8\sim 13\mu\text{m}$ 三个窗区。

为了研究红外窗区范围内的大气光学特性，已经做了大量的理论和实验工作^[8-15]。但应当指出，和吸收带区相比，对大气窗区范围内的光学特性研究得并不充分，其主要原因是红外辐射在窗区和吸收带区的传输机制不同。在吸收带区，大气的光学特性主要由气体分子的选择性吸收来决定，而在窗区，这种选择性吸收只占很次要的地位，影响大气光学特性的主要物理因素是：

1) 悬浮在大气中的各种气溶胶粒子(包括各种尘埃，雾霾，冰晶以及各种污染粒子)的散射和吸收；

2) 窗区两侧某些气体吸收带的线远翼的连续吸收；

3) 大气中水汽缔合分子的连续吸收；

4) 大气中某些气体分子的弱选择性吸收；

5) 某些气体压力诱导带的连续吸收。

当然，上述各因素在不同窗区的相对贡献是不一样的。现仅就这些因素在 $2.0\sim 2.4\mu\text{m}$ ， $3.4\sim 4.1\mu\text{m}$ 和 $8\sim 13\mu\text{m}$ 三个应用最广泛的窗区内的相对贡献做一分析。

$2.0\sim 2.4\mu\text{m}$ ，这个窗区的短波端是水汽的 Ω 带(其中心位于 $1.87\mu\text{m}$ 处)，长波端是 H_2O 和 CO_2 在 $2.7\mu\text{m}$ 附近的强吸收带。在这一窗区有选择吸收贡献的气体有： H_2O ， CO_2 及其同位素， CH_4 和 N_2O ，但这些吸收都很弱，并且集中在这个窗区中的 $2.00\sim 2.12\mu\text{m}$ 和 $2.28\sim 2.40\mu\text{m}$ 范围内，而在 $2.12\sim 2.28\mu\text{m}$ 间基本上可认为没有大气气体的选择吸收。就整个窗区而言，气体的选择性吸收对辐射衰减的贡献一般不超过 20%，而决定窗区光学性质的主要因素是气溶胶，对整层大气而言，这一窗区内的辐射透过率视大气状况不同，一般变化于 68% 至 81% 之间。

$3.4\sim 4.1\mu\text{m}$ ，这个窗区的左右两端分别是位于 $2.7\mu\text{m}$ 附近的 H_2O ， CO_2 的联合吸收带和中心位于 $4.3\mu\text{m}$ 的 CO_2 吸收带。对这一窗区光学性质有影响的气体有： CO_2 ， H_2O ， CH_4 ， N_2O 和 HDO 。这是一个比较透明的窗区，其中在 $3.60\sim 3.85\mu\text{m}$ 谱区内可认为基本上没有选择性吸收。气溶胶粒子对这一窗区光学性质的影响和对 $2.0\sim 2.4\mu\text{m}$ 窗区相比明显减少，尤其是在比较洁净的大气条件下，气溶胶粒子对辐射总衰减的贡献一般小于 50%。气体的选择吸收以及氮气的压力诱导带的连续吸收对这一窗区辐射总衰减的贡献一般为 50% 左右。但在这个窗区的长波端，仅氮气连续吸收的贡献就可达 40%。对标准大气而言，这一窗区内整层大气辐射透过率一般为 70%~80%。这个窗区大气光学特性中的一个重要问题是对水汽的连续吸收还缺乏足够的研究^[16]。

$8\sim 13\mu\text{m}$ ，这一窗区位于 H_2O $6.3\mu\text{m}$ 和 CO_2 $15\mu\text{m}$ 强吸收带之间，影响其光学性质的

主要因素是：气溶胶粒子的散射和吸收， H_2O ， CO_2 和 O_3 的线吸收以及水汽及其缔合分子的连续吸收。各类分子的线吸收对这一窗区辐射衰减的贡献一般不大于 30%。水汽在这一窗区没有透明的谱区，只是在 $8.5\text{--}12\ \mu\text{m}$ 之间比较透明，而对于其它气体而言， $11.0\text{--}12.0\ \mu\text{m}$ 谱区则几乎是完全透明的。对于气溶胶而言，这个窗区中最透明的谱区为 $9\text{--}11\ \mu\text{m}$ 。这一窗区内的辐射透过率要比前两个窗区差些，对于整层大气而言，在标准状况下，其变化范围为 65—70%。但是，应当指出，对这个窗区的大气光学性质研究得还远远不够，双水分子的连续吸收以及某些气溶胶粒子的选择性吸收增加了对这一窗区光学特性研究的复杂性^[17, 18]。

四、红外窗区大气光学性质的主要研究结果

对红外窗区范围内大气光学性质进行研究的主要方法有：理论计算，实验室模拟研究和现场实际测量。其主要研究结果包括寻求红外窗区范围内辐射衰减的机制和取得描述红外窗区光学性质的某些具体资料。

如上所述，红外窗区的光学特性主要取决于有关大气组分对辐射的连续衰减效应。但是，对这种连续衰减的机制长期以来却有着不同的解释。现仅以 $8\text{--}13\ \mu\text{m}$ 大气窗区为例子以说明。早期的工作普遍认为这个窗区内的辐射连续衰减是由水汽分子振-转带和纯转动带的翼部所致^[19]。之后，一些研究结果表明^[20, 21]，这一窗区内的辐射衰减不能单单用水汽的连续吸收来解释，大气中的气溶胶粒子对这种连续衰减有着重要的贡献。1970年，Bignell 首次提出^[22]，这一窗区内的辐射连续衰减除了具有一个外加宽作用的分量之外，还有一个和水汽压成正比的分量，后者则被认为是由大气中的双水分子所引起。这一提法似乎可以解释实验中得到的高“负温度效应”（即 $8\text{--}13\ \mu\text{m}$ 范围内水汽的连续吸收系数随温度升高而下降）这一事实。但是，一些研究结果仍然表明^[23-25]，大气中的悬浮物，包括一些微小的水滴在内，对这一窗区内辐射连续衰减的贡献是不能视做第二位的，尤其是在水汽含量较大或较混浊的大气中，这些悬浮物将成为这一窗区内辐射连续衰减的主要因素。大量研究结果表明，红外窗区范围内辐射连续衰减机制仍然是一个具有很大不确定性的问题。我们认为，在这方面，未来研究中应当着重解决的问题是：1) 确定双水分子在实际大气中的浓度及其稳定性，确定双水分子各吸收带的中心位置和强度，以便估计双水分子对各红外窗区内辐射连续衰减的贡献；2) 确定大气中各类悬浮物对辐射连续衰减的贡献，某些悬浮物在红外区的选择性吸收应当予以重视；3) 进一步开展吸收线远翼线型特征的实验研究；连续可调谐红外激光的出现为这一工作提供了良好的手段。

在讨论这一研究课题中所获得的具体资料时，应当指出，不同研究方法所固有的近似性或某些不确定性显然会直接影响到所得资料的精度或准确性；同时，由于对影响窗区大气光学性质的诸因素研究得还不够，所以在比较和使用这些资料时应当予以注意。

1) 理论计算。描述大气红外辐射及其传输特性的理论已经建立，这种理论概括起来可由一个积分微分方程来表示^[13]。显然，红外窗区中的大气光学特性原则上可以用这种方程来描述并用数值方法求解。但实际上，描述实际大气中红外辐射特性的方程是相当复杂的，加之实际应用中往往需要计算给定波区中的辐射特性，所以求解传输方程一般归结为解下列类型的积分：

$$\tau_{\Delta\nu} = \int_{\Delta\nu} e^{-q(\nu)} d\lambda_0$$

这里 $\tau_{\Delta\nu}$ 是波区 $\Delta\nu$ 范围内的平均透过率, $q(\nu)$ 是通过大气的光学路程。从数学角度讲, 用现代计算机原则上可以得到方程的数值解, 但需要精确知道在波区 $\Delta\nu$ 中有贡献的所有大气分子的谱线参数以及大气分子(包括同类分子和不同分子)各谱线间的相互作用效应。实际上, 考虑到 $q(\nu)$ 不仅和辐射本身特性有关, 而且它是大气状态, 大气组分及其含量等因子的复杂函数, 尤其是考虑到 $q(\nu)$ 是 ν 的很强很迅速变化的函数, 这样即使对一个不大的波区范围 $\Delta\nu$ 求解时, $q(\nu)$ 也往往会有相当多个变量, 而且这些变量通常不受函数关系的支配, 可见这种计算需要花费大量的时间和财力, 加之, 一些大气组分光谱参数确定中的某些不确定性, 因此, 尽管很多人致力于计算方法的改进工作, 但这种理论计算方法在解决红外窗区光学特性问题中至今未得到实际应用。

2) 参数化经验公式。大气的光学特性依赖于包括各类辐射特性和大气本身条件在内的一系列因子, 因此一般很难用简单的参数化解析式来表示, 但是, 从大气光谱学的基本理论出发, 根据大量室内外实验资料, 可以得到某一指定波区范围内的吸收函数随主要因子变化的规律性, 从而建立各种形式的参数化表达式却是切实可行的。目前已建立的这种表达式种类繁多, 例如在红外窗区, 水汽的连续吸收系数 $k_{\text{H}_2\text{O}}$ 可表示为^[26]

$$k_{\text{H}_2\text{O}} = C_s [p_{\text{H}_2\text{O}} + C_N / C_s (p - p_{\text{H}_2\text{O}})] w, \quad [\text{km}^{-1}] \quad (1)$$

式中 C_s 和 C_N 是表征水汽自加宽和外加宽的系数 [$\text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$], w 是水汽含量 [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$], p 和 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别表示总压和水汽分压 [atm]. 当然, 对于不同窗区, 式中的常数也不同。

根据对 $10.6 \mu\text{m}$ CO_2 激光的实验室测量, McCoy 等人^[27]得到了如下经验公式:

$$k_{\text{H}_2\text{O}} = 4.32 \times 10^{-6} p_{\text{H}_2\text{O}} (p + 193 p_{\text{H}_2\text{O}}), \quad [\text{km}^{-1}] \quad (2)$$

式中 p 和 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 的单位都是 mm Hg 。

Elder 等^[28]则直接用式

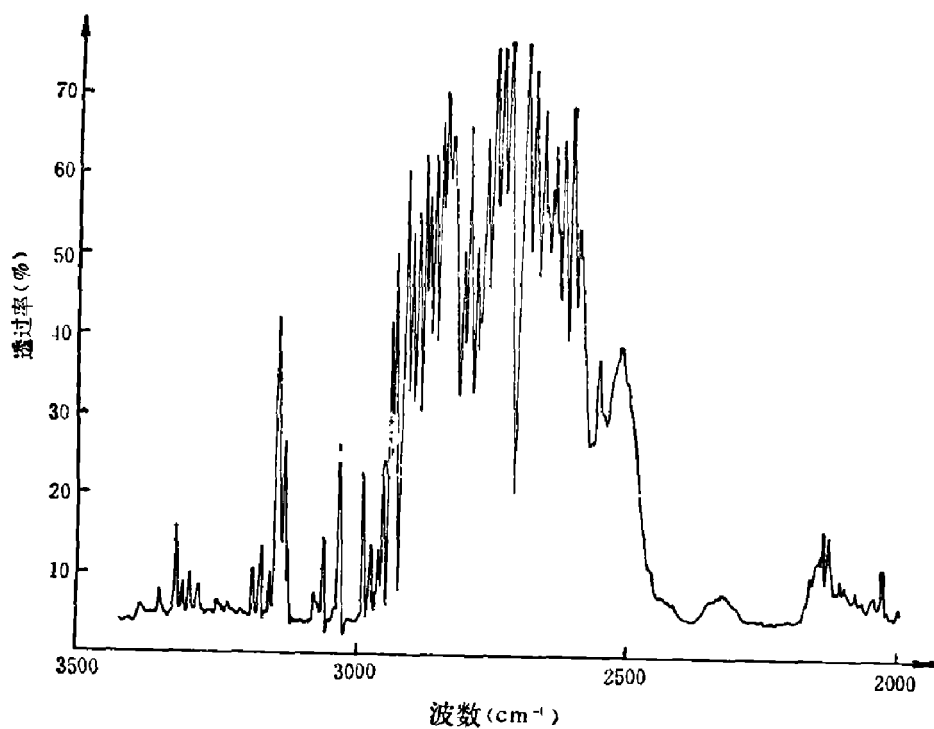
$$T = t - B \log w \quad (3)$$

来获得各红外窗区内的透过率值 T , 式中 t 和 B 均为经验参数。

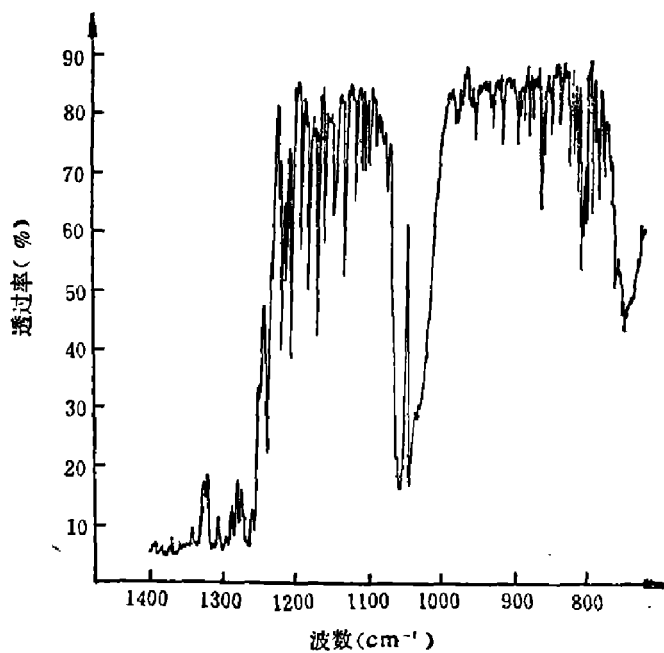
3) 测量结果。对窗区范围内的大气光学特性进行现场实际测量是一种最直接的研究方法。长期以来, 用这种方法得到了大量的结果, 但是, 这些结果比较零散, 而且由于测量条件、精度、仪器分辨率以及资料处理方法的差异, 对这些结果的相互比较也有一定的困难。表 3 给出了一些研究者在水平路径上某些窗区内大气透过率的实测结果^[28]。

以太阳做光源, 利用相应的光谱仪器可以得到各红外窗区内整层大气在非均匀路径上的光学特性。图 3 是在地面上得到的 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 窗区的太阳光谱图(分辨率约为 5cm^{-1}), 可以清楚地看到这两个窗区范围内大气透过率随波长的变化情况。表 4 是这类观测得到的某些结果实例^[25]。表中 $k_{\text{H}_2\text{O}}$ 表示整层大气柱内单位水汽含量的衰减系数, γ 是单位大气质量的所有其它因子的衰减系数。图 4 给出了 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 范围内 $k_{\text{H}_2\text{O}}$ 值随波长的变化^[25, 29]。可以看到, 不同研究者所得到的结果之间有一定的差别, 尤其是在这一窗区的长波端。我们认为, 引起这种差别的主要原因是由于对水汽连续衰减机制缺乏了解而对观测资料采用了不合理的处理方法, 同时与观测方法以及样品确定精度也有一定的关系。

利用激光光源进行室内外测量可以得到有益的结果。表 5 给出了某些窗区波长的大气



(a)



(b)

图3 3~5 μm 和 8~13 μm 窗区范围内的太阳光谱
(a) 3~5 μm (b) 8~13 μm

衰减系数 $k^{[9, 30-33]}$, 其中计算值是在中纬度夏季大气模式和“晴朗”气溶胶模式情况下得到的。

4) AFLRL 程序。根据模拟实验和野外实测结果以及分子光谱线参数资料, AFLRL 编制了适用于 0.69 μm 以上所有波长的高分辨率和适用于 0.25 μm 至 28 μm 谱区范围的低分辨率透过率计算程序^[9, 26]。这些程序经过不断充实, 目前已能够根据给定的大气参数计算地球大气中任何两点之间的透过率值。根据这一程序, 我们计算得到了可见光和红外

表3 某些红外窗区内大气透过率实测值^[28]

研究人员	水汽含量 (降水毫米)	大 气 透 过 率						
		0.7~0.92 μm	0.92~1.1 μm	1.1~1.4 μm	1.4~1.9 μm	1.9~2.7 μm	2.7~4.3 μm	4.3~5.9 μm
Fowle	0.08				89.9	83.5	77.1	77.5
Howard	0.09 0.19 0.28				93.0 92.0 88.0	87.0 82.0 78.4	87.5 82.2 81.5	69.7 66.2 61.2
Fowle	0.82				79.6	68.9	69.0	52.4
Hettner	1.50		98.5	88.6	77.0	68.5	76.2	—
MaCN	3.05 3.90				— 75.0	63.5 65.4	67.5 65.3	—
Fischer	5.0		96.6	91.6	83.3	71.1		
Strong	11.0	91.0	90.0	79.0	68.0	57.0		
Gebbie	17.0		82.6	68.0	63.4	55.8	55.6	25.0
Fischer	20.0		88.8	78.4	63.2	54.8		
Fowle	20.0	86.0	89.0	62.0				
Strong	24.0 36.0	85.0 82.0	89.0 83.0	58.0 67.0	61.0	55.0		
Fischer	50		77.5	70.0	55.5	46.4		
Strong	75 75	79.0 75.0	73.0 75.0	58.0 59.0	47.0 59.0	54.0 54.0		
Fischer	200		62.8	60.1	49.4	40.6		

表4 红外窗区某些波长的大气衰减^[25]

大 气 物 理 研 究 所			Кондратьев		
λ (μm)	$k_{\text{H}_2\text{O}}$ ($\text{g}^{-1}\cdot\text{cm}^2$)	γ (单位大气质量 ⁻¹)	λ (μm)	$k_{\text{H}_2\text{O}}$ ($\text{g}^{-1}\cdot\text{cm}^2$)	γ (单位大气质量 ⁻¹)
8.32	0.111	0.169	3.58	0.070	0.174
8.63	0.127	0.157	3.70	0.062	0.106
8.91	0.075	0.184	8.15	0.147	0.116
9.12	0.079	0.196	8.30	0.118	0.135
10.12	0.109	0.190	8.53	0.098	0.105
10.42	0.101	0.192	8.76	0.098	0.130
11.10	0.100	0.204	8.86	0.092	0.092
11.40	0.133	0.191	9.10	0.088	0.040
11.80	0.149	0.200	10.18	0.086	0.070
12.00	0.168	0.190	10.40	0.085	0.070
12.20	0.191	0.179	10.62	0.090	0.062
12.60	0.213	0.182	10.92	0.110	0.040
13.00	0.201	0.199	11.11	0.115	0.030
14.00	0.283	0.168	11.51	0.148	0.030
			11.98	0.150	0.036
			12.18	0.156	0.090
			12.72	0.206	0.108
			12.95	0.219	
			13.05	0.224	

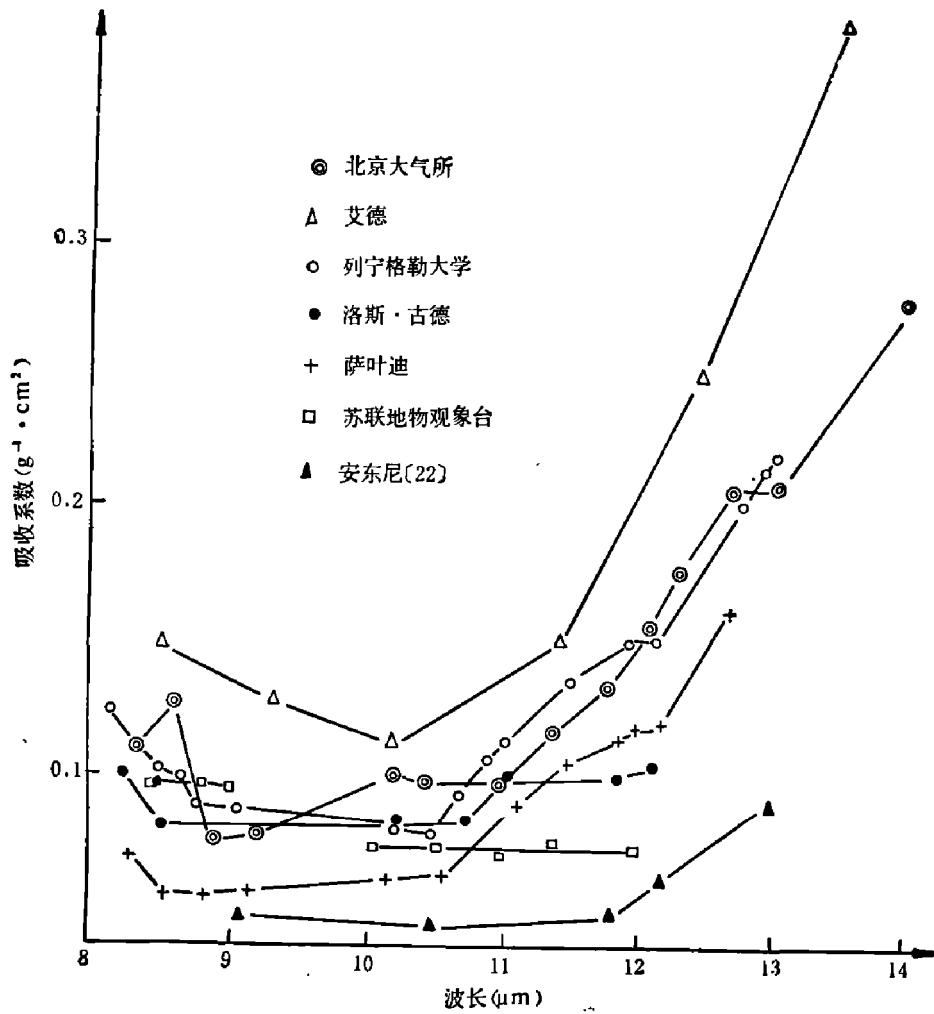


图4 8~14 μm 水汽连续吸收系数随波长的变化

表5 某些窗区激光波长的大气衰减系数 K

波 (μm) 长	计 算 值 K (km^{-1})	测 量 值 K (km^{-1})	主要衰减因子
0.86	10.74×10^{-2}		粒子散射, 吸收
1.06	8.85×10^{-2}	8.29×10^{-2}	同上
1.536	6.47×10^{-2}		同上
3.39	1.86	1.27	CH_4 吸收
3.508	2.76×10^{-2}		粒子散射, 吸收
3.80	5.07×10^{-2}		H_2O 吸收, 粒子散射
5.068	2.97×10^{-1}		H_2O 吸收
5.317	3.50×10^{-1}	8.00×10^{-1}	同上
10.6	3.68×10^{-1}	3.34×10^{-1}	H_2O 吸收
27.9	30		同上
387	20.3		同上

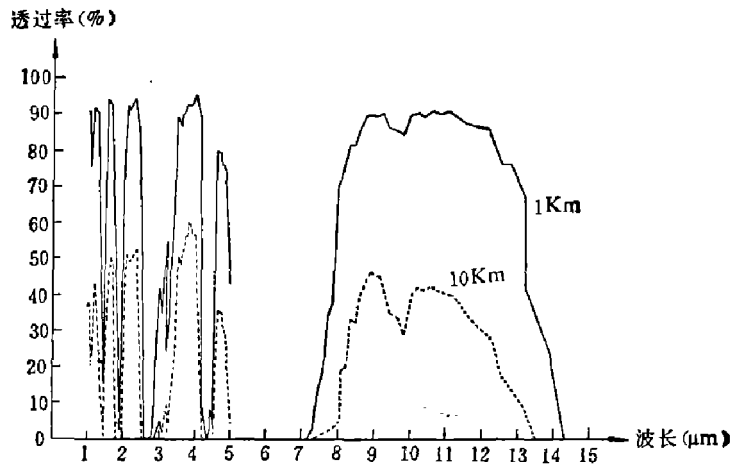


图5 标准大气海平面水平透过率(水平能见度 23 公里)

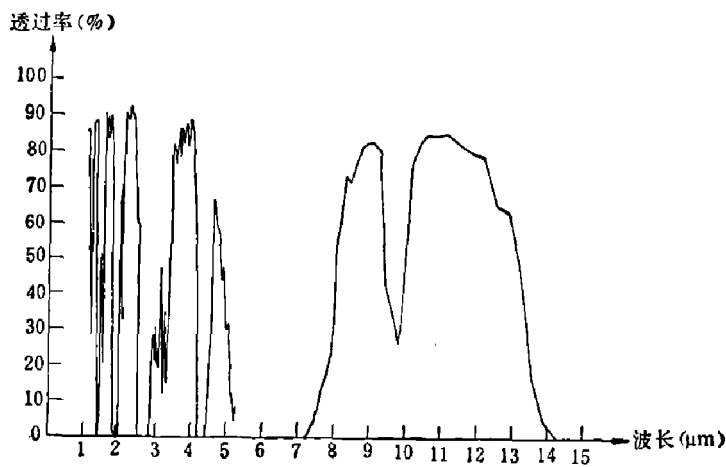


图6 标准大气整层大气垂直透过率(水平能见度 23 公里)

辐射在大气中的透过率，其中包括六个大气模式和两个气溶胶模式，资料的分辨率为 20 cm^{-1} 。图5和图6分别给出了标准大气状况下水平和垂直路径上 $1 \sim 15 \mu\text{m}$ 范围内的大气透过率。可以清楚地看到各红外窗区范围内的大气光学特征。

五、特殊大气条件下的大气光学特性

红外技术在大气环境中的广泛应用使得有必要对一些特殊大气条件下红外窗区内的光学性质做出定量估计，这将直接关系到某些工程系统的可用性。这里所说的特殊大气条件主要是指云、雾、降水和雪等自然现象，这些现象无疑会影响到红外窗区的光学特性^[34-40]。当然，由于这些现象中水滴特征尺寸的差异，因此对不同窗区所产生的效应也不尽相同。表6给出了某些云、雾、降水中水滴的平均尺寸、含水量以及在红外区的相应参数 ρ 的数值。显然， ρ 值的变化会导致散射图的很大差异。在假定水滴为球形的情况下，可以从理论上近似计算得到它们对不同波长辐射的衰减系数或吸收系数。图7给出了对于 $3.5 \mu\text{m}$ ， $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.63 \mu\text{m}$ 的计算结果^[36]。研究结果表明，雾和雨对红外波区光学特性的影响有很大差别。在可见光区，辐射的衰减主要由散射所致，并且主要是小水滴的贡献，在这一波区，雨要比雾引起的衰减小得多。在近红外区，辐射的衰减绝大部分仍由散射引起，半径小

表 6 某些云、雾、降水的特征参数

类别	水滴半径 a (μm)	含水量 (g/m^3)	$\rho = 2\pi a/\lambda$		
			$\lambda = 1 \mu\text{m}$	$\lambda = 4 \mu\text{m}$	$\lambda = 12 \mu\text{m}$
层云	6.8	8	42.73	10.68	3.56
高积云	7.1	5	44.61	11.15	3.72
雨层云	9.7	34	60.95	15.24	5.08
雾	5	6×10^{-3}	31.42	7.86	2.62
浓雾	50	57×10^{-3}	314.16	78.54	26.18
毛毛雨	100	93×10^{-3}	628.32	157.08	52.36
中雨	500	0.28	3141.59	785.40	261.80
大雨	750	0.83	4712.39	1178.10	392.70

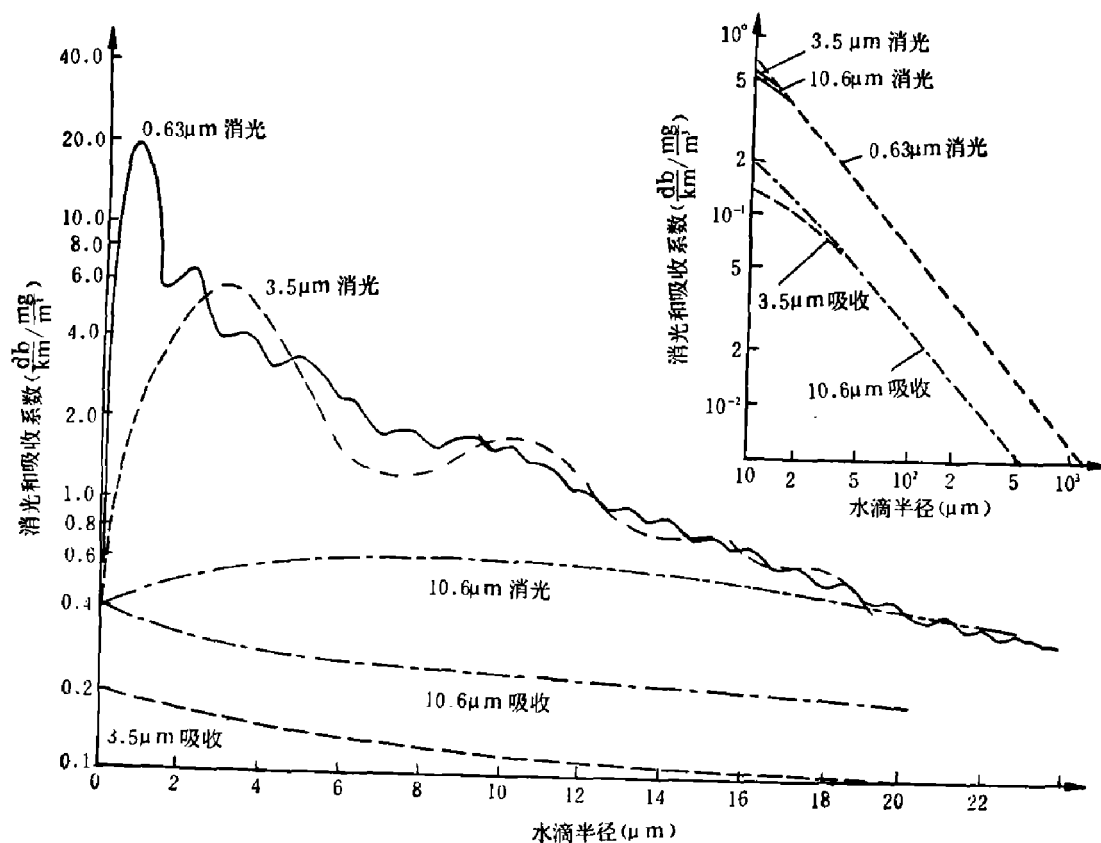


图 7 不同大小水滴的消光系数和吸收系数

于 $1 \mu\text{m}$ 的霾和轻雾在这一波区引起的衰减比在可见光区小得多，而一般的雾(其水滴半径大于 $5 \mu\text{m}$)在这两个波区引起的衰减大致相同。在中红外区，一般雾引起的辐射衰减要比在近红外区和可见光区小，且相当一部分来自吸收的贡献，更小的水滴对这一波区辐射的衰减要比在其它两波区小得多。

红外辐射透雪和透云的问题研究得还很不够。一般来讲，在同样含水量情况下，雪对红外辐射的衰减比雨大而比雾小，且随波长变化较小。但由于缺乏有关雪的折射率等资料，因此对其衰减资料的定量估计也较困难。云本身是一个比较复杂的问题，不同类型的云，其

红外透射性能显然也不会一样。表 7 给出了几种主要云类对某些窗区波段衰减的计算结果^[34]。可以看到, 云对红外光束的衰减是严重的, 透明度最好的是晴天积云, 但它对 $10.6 \mu\text{m}$ 辐射的衰减也高达 50 db/km 。对于一般低层云来讲, Sanders 得到的结果是^[40]: $0.63 \mu\text{m}$, $1.15 \mu\text{m}$ 和 $3.39 \mu\text{m}$ 的衰减变化范围为 $500 \sim 85 \text{ db/km}$; $10.6 \mu\text{m}$ 的衰减约为 $0.63 \mu\text{m}$ 的一半; 而 $337 \mu\text{m}$ 处的衰减约为 $20 \pm 10 \text{ db/km}$ 。应当指出, 各类云厚度的变化, 其内部结构的不均匀性等使得云在红外区的光学特性变得尤为复杂, 因此, 上述结果只能给出一些定性的概念。

表 7 不同云类对某些窗区波段的衰减

云 类	衰 减 系 数 (m^{-1})		
	$1.06 \mu\text{m}$	$4.0 \mu\text{m}$	$10.6 \mu\text{m}$
雨 层 云	1.32×10^{-1}	1.47×10^{-1}	1.36×10^{-1}
高 层 云	1.12×10^{-1}	1.30×10^{-1}	8.39×10^{-2}
层 云 II	1.03×10^{-1}	1.14×10^{-1}	1.04×10^{-1}
浓 积 云	7.17×10^{-2}	8.10×10^{-2}	6.76×10^{-2}
层 积 云	6.97×10^{-2}	9.01×10^{-2}	4.28×10^{-2}
层 云 I	4.44×10^{-2}	4.82×10^{-2}	5.09×10^{-2}
积 雨 云	4.71×10^{-2}	5.96×10^{-2}	2.48×10^{-2}
晴 天 积 云	2.19×10^{-2}	2.76×10^{-2}	1.17×10^{-2}

六、结 束 语

根据已进行的理论和实验工作, 考虑到实际应用的需要, 我们认为, 在红外窗区范围内大气光学特性的研究中, 下述几个方面的工作正在受到广泛的重视。

1) 正确解释在红外窗区中水汽连续衰减的机制, 尤其是要进一步讨论水汽缔合分子在实际大气中的可能含量, 对红外各窗区连续衰减的相对贡献及其温度效应。

2) 确切估计大气气溶胶粒子在各红外窗区的光学特性, 这里主要是粒子浓度和粒子谱及其变化(尤其是在高湿度情况下的变化)所引起的光学特性的变化以及某些粒子在红外窗区范围内的选择性吸收贡献。

3) 大气光学特性的高分辨率研究是目前理论和实验研究工作的方向之一, 这不仅是要研究大气本身细微结构的需要, 而且也是大气红外光谱学本身发展及某些工程实际应用的需要。可调谐激光器(尤其是半导体二极管激光器等)的出现为这种研究提供了可利用的光源。

4) 远红外大气窗区光学特性的研究。远红外激光的发展和應用需要详细了解大气远红外窗区的位置, 结构及其光学特性。和中红外、微波谱区相比, 远红外辐射的某些特点(例如能成象, 透雾性能好等)已经引起了有关研究和应用部门的关注。

5) 云, 雾, 雨, 雪情况下的大气红外光学特性是一个相当复杂的问题, 到目前为止, 对其研究还很不充分, 这主要是因为缺乏描述这些现象的物理和光学特性的参数。目前其计

算结果的精度也比对大气气体分子光学特性的相应计算精度差得多。但是由于某些光学工程的需要,它仍然是有关部门的重要研究课题。

参 考 文 献

- [1] Goody, R. M. *Atmospheric Radiation*, vol. 1, Theoretical Basis, London: Oxford University Press, 1964.
- [2] Kondratyev, K. Ya., *Radiation in the Atmosphere*, New York and London: Academic Press, 1969.
- [3] 国家遥感中心编, 遥感文选, 科学出版社, 1981.
- [4] 吕斯华, 遥感物理基础, 商务印书社, 1981.
- [5] 王庚辰, 任丽新, 遥感文选, 科学出版社, 1981, 300~307.
- [6] Kelley, P. L. et al., *O. Q. E.*, **8**(1976), 2: 117~144.
- [7] Hanel, R. A. et al., *J. Geoph. Res.*, **11**(1972), 2629~2641.
- [8] Burch, D. E., et al., **AD-709894**, 1970.
- [9] Mc Clatchey, R. A., et al., **AD-753075**, 1972.
- [10] Mc Clatchey, R. A., **AFGL-TR-74-0003**, 1974.
- [11] Roberts, R. E. et al., *Appl. Opt.* **15**(1976), 9: 2085~2090.
- [12] 王庚辰, 王明星, 吕位秀, 红外物理与技术, **10** (1981), 5: 7~12.
- [13] LaRocca, A. J., et al., *Atmospheric Transmittance and Radiance: Methods of Calculation*, **ADA-017459**, 1975.
- [14] Tomasi, C., *Q. J. R. M. S.*, **105** (1979), 446.
- [15] Дьянов-Клюков, В. И., Иванов В. М., Ф. А. О., **17**(1981), 6. 587.
- [16] Barton, I. J., *Q. J. R. M. S.* **107**(1981), 454.
- [17] 王明星, 大气科学, **3** (1979), 1: 21~31.
- [18] 王庚辰, 大气科学, **6** (1982), 3: 333~337.
- [19] Elsasser, W. M. *Heat Transfer by Infrared Radiation in the Atmosphere*, Harvard, 1942.
- [20] Gebie, H. A., et al., *Proc. of the Roy. Soc.*, **206** (1951), 87.
- [21] Кондратьев, К. Я., Ф. А. О. **1** (1965), 4.
- [22] Bignell, K. J., *Q. J. R. M. S.*, **96** (1970), 390.
- [23] Tomasi, C., et al. *J. of the Atmosph. Sci.*, **31** (1974), 1.
- [24] Vittori., O., et al. *J. of the Atmosph. Sci.*, **31** (1974), 1.
- [25] 一室 103 组, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第 5 号, 1981, 450~455.
- [26] Selby, J. E. A., **AFGL-TR-76-0258**, 1976.
- [27] McCoy, J. H., et al. *Appl. Opt.* **8** (1969), 7: 1471.
- [28] Elder, T. et al. *J. Franklin Institute*, **225** (1953), 189.
- [29] 王明星, 朱文琴, 大气科学, **5** (1981), 4: 450.
- [30] Pressley, R. J., et al. *Handbook of Lasers*, Cleveland, Ohio Chemical Rubber Co. 1971.
- [31] Spencer, D. J. et al., *Appl. Opt.* **13** (1974), 12: 2855.
- [32] McClatchey, R. A., **AD-729447**. 1971.
- [33] 孔琴心等, 大气科学, **7** (1983), 1: 102.
- [34] Arnulf, A. et al.. *J. Opt Soc. Amer.*, **47** (1957), 6: 491.
- [35] Kurnick, S. W. et al. *J. Opt. Soc. Amer.*, **50** (1960), 578.
- [36] Chu, T. S. et al., *The Bell System Technical J.*, **47** (1968), 5: 723.
- [37] Wilson, R. M. et al., *Nature*, **211** (1966), 1080.
- [38] Бязрян, В. П. и другие, *Радиотехника и Электроника*, **16** (1971), 10: 1765.
- [39] Carrier, L. W. et al., *Appl. Opt.*, **6** (1967), 7: 1209.
- [40] Sanders, R., *Atmospheric Environment*, **3** (1969), 2.

OPTICAL PROPERTIES OF THE ATMOSPHERE IN THE INFRARED WINDOW REGIONS

WANG GENGCHEN

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The spectral characteristics of the atmospheric composition in the infrared window regions are briefly described. Based on the results of home and overseas studies, the attenuation mechanism of electromagnetic radiation over range of the infrared atmospheric windows in the natural atmosphere and the relative contribution of the various attenuation factors to the total attenuation effect are discussed. Some measured and calculated results of radiation attenuation within the infrared atmospheric window regions are given under different atmospheric conditions. Some important subjects are pointed out in the end.