

《红外与光电系统手册》第2卷

# 辐射的大气传输

航天工业总公司第三研究院  
八三五八所翻译出版



# 辐射的大气传输

第2卷

红外与光电系统手册

一部丛书 红外及光

由军事工程 设计

的 重要 手册

王六 编  
一九九六年  
十月

## 翻译出版序言

本书以1978年出版的“红外手册”为基础，并对它作了大量的修订、更新和补充，而且进行了重新整理和编排，于1993年再版。因此，无论在内容上和形式上都以崭新的面貌出现。

全书共分八卷四十五章。几乎涉及到目前活跃于军事、航空航天和民用光电技术的大部分学科。有些内容是由先进的军事技术派生而来，在公开发表的文献中很少有如此大量的报道。在编排上也较好地考虑了可使用性因素。每章自成一体，避免了互相间繁琐的查阅，陈述格式由简明导言、实用公式汇编、有关数据、公式和数据使用方法实例四部分组成，非常明了、实用。

本书内容广泛充实，有较丰富的数据和参考文献，反映了美国20世纪80年代后至90年代初在此学科领域内的工程研究水平，具有先进性和借鉴性，是目前红外与光电系统学科领域中最新的一本参考书和非常有用的工具书。

为及时地把这本手册推荐给我国从事红外和光电系统设计的工程技术人员，我们决定翻译出版本手册。

红外和光电系统技术属于跨学科应用工程技术，所涉及的专业知识面极广。由于参加翻译、校对和审订者的专业水平和外语水平有限，在译文中难免有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

本手册由中国科学院成都分院林祥棣院士推荐并引进，值此翻译出版之际对他表示谢忱。

孙再龙

2002年9月

# 《红外与光电系统手册》

## 翻译出版委员会

顾问：姚绍福 黄瑞松 承文 于世元

委员会主任：姜殿元 谷满仓

副主任：孙再龙 杨树谦

主编：孙再龙

责任编辑：赵雪燕 何淑珍 丰金凤 李瑾 翟远征

## 《辐射的大气传输》

翻译：赵强\*

校对：杨远洪\*\* 房建成\*\* 周付根\*\* 姜治国\*\*

\* 航天科工集团三院八三五八研究所

\*\* 北京航空航天大学

## 引 言

在上一版《红外手册》出版后的 14 年里,人们对大气现象的认识以及将大气物理学用于预测红外和电光系统性能等方面都取得了巨大进步。军用系统对光电和红外传感器的依赖日益增强也推动了此项技术的进展,而且人们也认识到大气传输条件会严重影响这类探测器的性能,此外高能激光与高功率激光的发展,以及人们在激光大气传输参数对微小不确定的极端敏感性方面的认识需求,也促进了上述进步。

一般来说,人们在研究技术细节并应用现有物理学知识解决实际问题方面已取得了现代物理学发展中从未有过的进步。在过去的 10 年中计算能力的极大提高促进了分子大气模型化的进步。1978 年版《红外手册》中提供了很多图表,可用于大气传输的工程评估,在当前版本中这些图表基本被删掉了。这是因为实际上现在光电系统的工程师都可以使用大气效应计算机模型,但是对每一位工程师来说了解模型所表示的物理学限制条件和假设很重要。人们可以从此版本中的第 1 章获得此类知识。

14 年前,人们对气溶胶吸收和散射的物理意义有了很好的理解,然而,将这些知识应用到真实的气象和环境条件所需要的数据却很有限。在这期间,人们进行了数百次的光电系统野外试验,以建立系统特性与传输变量和环境条件的关系。这类知识库大多被收集在由国家实验室控制的计算机模型中,如:LOWTRAN 和 EO-SAEL。海湾战争期间,战场指挥官们应用了这些知识,美国的红外系统在很低的能见度条件下取得的战绩清楚地证明了大气效应研究的重要性。

在过去的 14 年间,大气传输研究中最具挑战的领域是建立激光传输模型。在这期间,人们广泛研究了湍流和线性传输对激光束的影响,并且现在已经对此有了很好的了解。本书的前两章中对其大多数因素进行了讨论。在第 3 章中讨论了空气动力学因素如何对飞行的飞机表面气流层作用的激光和传感系统产生影响的。对于高能或大功率高能激光束与大气的非线性相互作用的全面讨论超出了本手册的研究范围。但第 4 章对该主题进行了较好的介绍,并且为进一步研究提供了参考文献。

致谢:感谢本书的作者,特别感谢提供前 3 章原始材料的作者,他们的努力付出已远远超出了他们所获得的报酬。非常感谢 IRIA 的工作人员在本书编写中给予的无私帮助。

Frederick G Smith  
Ann Arbor Michiqan

# 《红外与光电系统手册》总目次

## 第1卷 红外辐射

- 第1章 辐射理论
- 第2章 人工辐射源
- 第3章 自然辐射源
- 第4章 辐射测量术

## 第2卷 辐射的大气传输

- 第1章 大气透射
- 第2章 通过大气光学湍流的传输
- 第3章 空气动力学效应
- 第4章 非线性传输:热晕

## 第3卷 光电元器件

- 第1章 光学材料
- 第2章 光学设计
- 第3章 光机扫描应用、技术和器件
- 第4章 探测器
- 第5章 红外传感器的读出电路
- 第6章 低温制冷系统的热学与机械设计
- 第7章 图像显示技术以及在机载条件下的特殊问题
- 第8章 摄影胶卷
- 第9章 调制盘
- 第10章 激光器

## 第4卷 光电系统设计、分析和测试

- 第1章 光电成像系统的基础分析
- 第2章 光电成像系统性能预测
- 第3章 光学机械系统设计
- 第4章 红外成像系统的测试
- 第5章 跟踪和控制系统
- 第6章 信标预测和建模

## 第5卷 被动光电系统

- 第1章 红外行扫描系统
- 第2章 前视红外系统
- 第3章 凝视传感器系统
- 第4章 红外搜索/跟踪系统

**第 6 卷 主动光电系统**

- 第 1 章 激光雷达
- 第 2 章 激光测距仪
- 第 3 章 毫米波雷达
- 第 4 章 光纤系统

**第 7 卷 光电对抗系统**

- 第 1 章 报(预)警系统
- 第 2 章 伪装、抑制及屏障系统
- 第 3 章 主动红外对抗
- 第 4 章 消耗性诱饵
- 第 5 章 光学和传感器的保护
- 第 6 章 遮挡对抗

**第 8 卷 新系统和技术**

- 第 1 章 非常规成像系统
- 第 2 章 自适应光学
- 第 3 章 传感器与数据融合
- 第 4 章 自动目标识别系统
- 第 5 章 定向能量系统
- 第 6 章 全息学
- 第 7 章 视觉耦合系统的设计考虑



# 目 录

## 第 1 章 大气透射

1.1 引言 .....	(1)
1.1.1 符号和单位 .....	(1)
1.1.2 大气中的辐射传输 .....	(1)
1.2 地球大气层 .....	(3)
1.2.1 大气层结构 .....	(3)
1.2.2 气体成分 .....	(4)
1.2.3 粒子成分 .....	(6)
1.2.4 密度变化 .....	(6)
1.3 大气吸收和折射 .....	(7)
1.3.1 基础知识 .....	(7)
1.3.2 大气气体的吸收 .....	(26)
1.3.3 HITRAN 数据库 .....	(39)
1.3.4 谱带模式 .....	(41)
1.3.5 大气的折射率效应 .....	(53)
1.4 大气散射 .....	(56)
1.4.1 气溶胶散射 .....	(56)
1.4.2 分子(瑞利)散射 .....	(67)
1.4.3 实例应用 .....	(67)
1.4.4 在高散射介质中的传播 .....	(71)
1.4.5 散射介质内的成像 .....	(76)
1.5 有关大气传输的计算机程序 .....	(80)
1.5.1 LOWTRAN .....	(80)
1.5.2 MODTRAN .....	(81)
1.5.3 FASCODE .....	(82)
1.5.4 用于散射参数计算的算法 .....	(83)
参考文献 .....	(96)

## 第 2 章 通过大气光学湍流的传输

2.1 引言 .....	(105)
2.2 大气中的光学湍流理论 .....	(105)
2.2.1 引言 .....	(105)
2.2.2 统计学基本原理 .....	(106)
2.2.3 结构函数 .....	(109)

2.2.4	Kolmogorov 湍流理论	(111)
2.2.5	守恒被动标量	(113)
2.2.6	折射率	(114)
2.2.7	大气时间统计学	(117)
2.3	光学/红外在湍流中的传播	(118)
2.3.1	引言	(118)
2.3.2	波动方程的正式解	(118)
2.3.3	振幅和相位统计法	(120)
2.3.4	闪烁	(124)
2.3.5	成像效应	(128)
2.3.6	光束效应	(133)
2.3.7	等晕现象	(137)
2.4	大气中光学湍流的测量	(137)
2.4.1	引言	(137)
2.4.2	大气边界层	(137)
2.4.3	自由大气	(140)
2.4.4	测量问题	(141)
2.4.5	要素测量	(142)
2.5	光学湍流模型	(143)
2.5.1	引言	(143)
2.5.2	边界层湍流	(144)
2.5.3	模型光学湍流分布	(147)
2.5.4	参量模型	(149)
2.6	实例问题	(151)
2.6.1	闪烁	(151)
2.6.2	图像分辨率	(153)
2.6.3	光束漂移与光束扩展	(154)
	参考文献	(155)
<b>第3章 空气动力学效应</b>		
3.1	引言	(159)
3.2	空气动力学原理	(163)
3.2.1	边界层	(164)
3.2.2	明腔和剪切层	(165)
3.3	光学原理	(167)
3.3.1	非粘性流	(168)
3.3.2	激波	(169)
3.3.3	随机流	(171)
3.4	气动光学设计和分析实例	(179)
3.4.1	实例1——亚音速成像平台:边界层像差	(179)

3.4.2	实例 2——超音速成像平台:边界层像差 .....	(181)
3.4.3	实例 3——明型腔产生的光学衰减力 .....	(182)
3.4.4	实例 4——可见光成像器:选择最佳波长 .....	(183)
3.4.5	实例 5——孔径最优化 .....	(184)
3.4.6	实例 6——红外窗口引起的热噪声 .....	(185)
3.4.7	实例 7——超音速飞行器光学像差 .....	(186)
3.4.8	实例 8——超音速飞机流场产生的热辐射效应 .....	(188)
3.5	气动光学:前景与机会 .....	(188)
	参考文献 .....	(191)
<b>第 4 章 非线性传播:热晕</b>		
4.1	引 言 .....	(193)
4.2	历史综述 .....	(193)
4.2.1	早期:(1964 ~ 1969 年) .....	(193)
4.2.2	中期:(1969 ~ 1979 年) .....	(194)
4.2.3	后期:(1979 ~ 现在) .....	(194)
4.3	热晕基础 .....	(194)
4.3.1	基本方程 .....	(194)
4.3.2	等压加热 .....	(195)
4.3.3	非等压加热 .....	(196)
4.4	在气流/光束运动中的稳态热晕 .....	(196)
4.4.1	准直光束——均匀路程 .....	(196)
4.4.2	聚焦光束——非均匀路程 .....	(200)
4.4.3	上连接热晕 .....	(203)
4.5	结 论 .....	(207)
	参考文献 .....	(207)

# 第一章 大气透射

## 1.1 引言

在多数光电系统的运行中,大气始终是一个需要考虑的重要因素。一个光电系统由三个基本部分组成:光源、探测器和传播介质。现在由于光源和探测器的性能得到提高,限制系统总体性能的因素往往是传播介质,因此,有必要对大气和各种衰减现象的机理进行充分论述。衰减的主要作用过程是吸收、散射和湍流。本章论述吸收和散射,在第二章中论述湍流。

### 1.1.1 符号和单位

表 1.1 列出了本章中所使用的符号及其相应的含义和单位。书中试图前后统一地采用米-千克-秒单位制,但是,由于习惯的原因未必允许这样做。本章还采用了已定义的符号,然而,吸收理论和散射理论是被分别推导出来的,因此对同一个参数通常用不同的符号表示。我们试图采用在两组参考文献中最常用的符号,并且在其他情况下用最明确的方式选择符号。在符号的使用能清楚地表明其意义的情况下,有时用同一种符号表示两个不同的参数。

### 1.1.2 大气中的辐射传输

辐射经过一介质时的消光(见图 1.1)正比于初始辐射率、衰减介质的密度、路程上的热辐射,并且正比于所经过的增量距离  $dr$ ,因此:

$$dL_{\lambda}(r) = - \left[ \sum_i C_{ei}(\lambda, r) \rho_i(r) \right] L_{\lambda}(r) dr + J_{\lambda}(r) dr \quad (1.1)$$

式中  $L_{\lambda}(r)$ ——在坐标为  $(x, y, z)$  的点  $r$  处的光谱辐射率;

$J_{\lambda}(r)$ ——引起路程发射和散射的源项;

$\rho_i$ ——第  $i$  种气体或粒子的数密度 ( $\text{cm}^{-3}$ );

$C_{ei}(\lambda, s)$ ——第  $i$  种气体或粒子的光谱消光截面 ( $\text{cm}^2$ ),  $= C_{ai}(\lambda, s) + C_{si}(\lambda, s)$ ;

$C_{ai}(\lambda, s)$ ——光谱吸收截面;

$C_{si}(\lambda, s)$ ——光谱散射截面。

在此处比较适宜引入消光系数,消光系数与消光截面有关:

$$\beta_{\text{ext}} = \sum_i C_{ei}(\lambda) \rho_i = \sum_i \beta_{\text{ext}i} \quad (1.2)$$

式中,当  $\beta_{\text{sca}} r < 0.1$  (单散射极限) 时,  $\beta_{\text{ext}} = \beta_{\text{abs}} + \beta_{\text{sca}}$ , 一般都假设大气是一种均匀的平行平面层状结构, 因此  $k$  和  $\rho_i$  是唯一空间变量, 只沿垂直方向, 即  $z$  方向变化。于是, 根据公式 (1.1) 得到的辐射传输公式的解为:

$$L_{\lambda}(r) = L_{\lambda}(0) \exp[-\tau_{\text{OD}}(r)] + \int_0^r J_{\lambda}(r') \exp[\tau_{\text{OD}}(r') - \tau_{\text{OD}}(r)] dr' \quad (1.3)$$

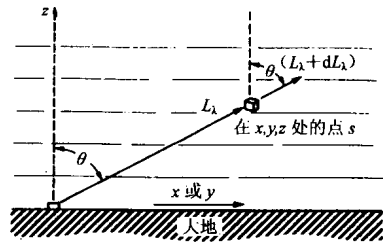


图 1.1 垂直分层介质中的辐射消光

表 1.1 符号、术语和单位

符号	含义	单位*	符号	含义	单位*
$a$	绝对湿度	$\text{gm}^{-3}$	$Q_{\text{back}}$	后向散射系数	—
$a = C_{\text{sca}}/C_{\text{ext}}$	单散射反照率	—	$Q$	分配函数	—
$a_n$ 和 $b_n$	复米氏系数	—	$R, r$	距离	m
$B_e$	转动常数	$\text{cm}^{-1}$	$rh$	相对湿度	—
$C_{\text{ext}}$	消光截面	$\text{m}^2$	$r$	粒子半径	m
$C_{\text{abs}}$	吸收截面	$\text{m}^2$	$R_v$	视距	km
$C_{\text{sca}}$	散射截面	$\text{m}^2$	$R_m$	气象视距	km
$c$	光速 ( $2.99792458 \times 10^8$ )	$\text{ms}^{-1}$	$S_1$ 和 $S_2$	无量纲复振幅	—
$C(\tau)$	自相关函数	$\text{s}^{-1}\text{cm}$	$S_i$	第 $i$ 线的线强度	$\text{cm}^{-1}\text{km}^{-1}$
$E$	能量	J	$T$	温度	K
$E_s(T)$	饱和蒸汽压	kPa	$V$	体积	$\text{m}^3$
$E_v$	光谱辐射照度	$\text{W cm}^{-2}$	$x = kr$	无量纲尺寸参数	—
$E$	强度	$\text{W m}^{-2}$	$x, y, z$	直角坐标 ( $z$ 轴向上)	m
$F$	通量密度	$\text{W m}^{-2}\text{Hz}^{-1}$	$\alpha_{\text{ext}}$	消光比(吸收比加上散射率)	—
$g$	非对称参数	—	$\alpha_{\text{abs}}$	吸收比, 吸收率	—
$g$	重力加速度	$\text{m s}^{-2}$	$\alpha_{\text{sca}}$	散射率	—
$g(\nu)$	线形函数	cm	$\alpha_e$	电子极化率	—
$h$	普朗克常数 ( $6.6260755 \times 10^{-34}$ )	J s	$\alpha_i$	第 $i$ 线半峰值处的半宽度	$\text{cm}^{-1}$
$I$	比强度	$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}$	$\beta_{\text{ext}}$	单位体积的消光系数或消光截面	$\text{km}^{-1}$
$I_s$	散射强度	$\text{Wm}^{-2}$	$\beta_{\text{abs}}$	单位体积的吸收系数或吸收截面	$\text{km}^{-1}$
$I_i$	入射强度	$\text{Wm}^{-2}$	$\beta_{\text{sca}}$	单位体积的散射系数或散射截面	$\text{km}^{-1}$
$I_v$	光谱辐射强度	$\text{Wsr}^{-1}$	$\Gamma(\rho)$	互相关函数(MCF)	—
[ $IQUV$ ]	斯托克斯矢量	—	$\delta$	消偏因子	—
$j$	$\sqrt{-1}$	—	$\epsilon_0$	自由空间的介电常数 ( $8.854188 \times 10^{-12}$ )	$\text{F m}^{-1}$
$J$	源函数	$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}$	$\epsilon_r$	相对介电常数	—
$j(\nu)$	频谱密度函数	cm	$\epsilon$	发射率, 辐射率	—
$k$	折射率虚部	—	$\zeta$	天顶角	rad
$k_B$	玻耳兹曼常数 ( $1.380658 \times 10^{-23}$ )	$\text{W sK}^{-1}$	$\theta, \phi$	极角, 方位角	rad 或 ( $^\circ$ )
$k = 2\pi/\lambda$	波数(角波数)	$\text{m}^{-1}$	$\kappa$	空间频率	$\text{m}^{-1}$
$m$	质量	kg	$\lambda$	波长	$\mu\text{m}$
$n, m = n - jk$	复折射率	—	$\mu = \cos\theta$	—	—
$M(\nu)$	光学传递函数(OTF)	—	$\mu_0$	自由空间的磁导率 ( $4\pi \times 10^{-7}$ )	$\text{H m}^{-1}$
$N$	数密度	$\text{m}^{-3}$	$\nu$	波数 ( $1/\lambda$ )	$\text{cm}^{-1}$
$n(r)$	尺度分布函数	$\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$	$\pi_n$ 和 $\tau_n$	角相关函数	—
$n$	折射率实部	—	$\pi$	圆周率 (3.14159)	—
$n$	复折射率	—	$\rho_i$	物质 $i$ 的数密度	$\text{cm}^{-3}$
$P, p$	压力	Pa	$\rho_m$	质量密度	$\text{g cm}^{-3}$
$P(\theta), P_i(\theta)$	相位函数	—	$\rho$	反射率, 反射系数	—
$p(\mu, \phi; \mu', \phi')$	相位函数——在 $4\pi\text{sr}$ 上积分为 $a$ , 单散射反照率	—	$\sigma_b$	后向散射截面	$\text{m}^2$
$Q_{\text{ext}}$	消光系数	—	$\tau, T$	透射率, 透射系数	—
$Q_{\text{abs}}$	吸收系数	—	$\tau_{\text{OD}}$	光程或光深	—
$Q_{\text{sca}}$	散射系数	—	$\omega$	角频率	$\text{rad s}^{-1}$
			$\Omega$	立体角	sr

\* “—”表示无量纲的量。

式中光深的定义为：

$$\tau_{OD}(r) = \int_0^r \beta_{ext}(r') dr' \quad (1.4)$$

源项表示探测器接收到的路程上分子和粒子的发射辐射和由分子和粒子造成的散射辐射。在高透射情况下，此信号很小可以忽略不计，这样就得到了简化的透射率定义：

$$\tau(r) = \frac{L_\lambda(r)}{L_\lambda(0)} = \exp[-\tau_{OD}(r)] \quad (1.5)$$

对于均匀路程，

$$\tau_{OD} = \beta_{ext} r \quad (1.6)$$

消光比  $\alpha_{ext}$  的定义为(当忽略边界时，反射率  $\rho$  为零)：

$$\alpha_{ext} = 1 - \tau \quad (1.7)$$

对单散射情况而言，消光比变为吸收比  $\alpha_{abs}$  与散射比  $\alpha_{sca}$  之和( $\alpha_{ext} = \alpha_{abs} + \alpha_{sca}$ )。

在这里引入消光系数与消光率(复折射率  $m = n - jk$  的虚部)之间的关系式也是有益的，当单散射近似有效时( $\beta_{sca} r < 0.1$ )：

$$k = \frac{\beta_{ext}}{4\pi\nu} \quad (1.8)$$

该方程是通过将辐射传输解与无界均匀介质中麦克斯韦方程的平面波解相比而得到的。这些定义、参数和公式是描述大气中光传播的基础。

## 1.2 地球大气层

大气以气体防护层的方式包围并保护着地球，大气层构成了从地球固态表面到近似真空的外部太阳大气层之间的过渡。大气层起到了阻止有害辐射和流星的屏蔽作用。大气动力学引起了其表面的气象变化。大气层为生命本身作为地球生物圈的一部分提供了保证。光在这种介质中的传播具有许多重要特性和价值，包括：气象遥感、红外和可见天文学、一般遥感和光电系统性能。因此，有必要在本章中介绍大气性质。

### 1.2.1 大气层结构

大气层由处于不同温度和气压的气体与悬浮粒子组成，而温度和气压则是高度和方位的函数。沿垂直高度方向，大气层有明显的结构。如图 1.2 所示，6 个主要的水平层构成了大气的层状结构。最下面的一层是对流层，该层从地面开始向上绵延到大约 11km(36,000ft 或 7miles)处。对流层内的温度一般随着高度增加而降低，温度下降速率为  $6.5\text{K km}^{-1}$ 。不过，温度下降速率也会有变化，因此产生了有趣的折射效应。海平面的气压为一个大气压，而在对流层顶部气压则变为零点几个大气压。大多数重要的大气衰减源就存在于对流层中(即通常所指的  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、云、雾、气溶胶)。在低海拔时特别是在海洋上方作为海上界面层区域时，水

汽是最主要的衰减源。另外,对流层还是气压最大或密度最大的气层,因而在对流层内分子散射也最严重。邻近对流层的是平流层,它向上延伸到50km(30miles)处。在这里可找到臭氧(O<sub>3</sub>),它保护地球表面的生命免于遭受紫外线辐射。臭氧从0.3μm及以下开始吸收紫外线,从而扩展了分子氧(在0.185μm以下开始强烈吸收)对高能光子的屏蔽作用。在平流层内,粒子能维持很长时间。平流层之上是中间层,它从50 km 开始上延至90 km 的高度。大气中大多数影响到光传播的模式都只考虑到中间层,中间层以上是电离层,电离层对无线电波的传播很重要,然而,使电离层在射频具有反射特性的等离子体谐振对光频来说太缓慢了,因此,电离层是光学透明的。另外,电离层中的分子受到光化学分解作用,所以,在此高度上化学成分发生着显著变化。电离层上延至将近300 km 处,电离层之上是热成层和外逸层,它们受到太阳辐射的影响,也是地球大气层与太阳大气层的结合部。最外层高度将近500 km(300miles)。

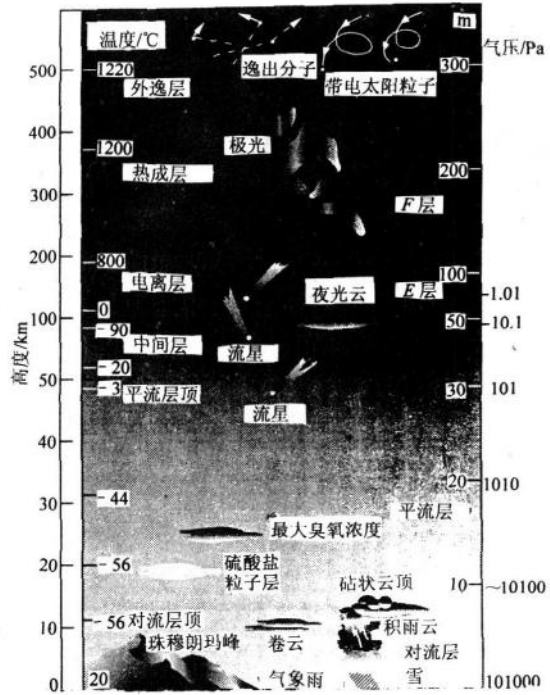


图 1.2 不同高度下的大气层结构

### 1.2.2 气体成分

表 1.2 列出了均匀混合大气气体(高度达 100 km)及其含量,这些分子的浓度随时间没有明显变化。氮和氧的含量最高。氧在 60GHz 处(2cm<sup>-1</sup>)的吸收带比较窄,这是因为它在 760nm(13,158cm<sup>-1</sup>)处有一个磁偶极子力矩。氧在紫外(Schumann-Runge 带)则具有强烈吸收。另外,这两种气体都没有偶极子吸收红外光谱,只是在非常长的对流层传播路程中才能观察到 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 中弱碰撞产生的吸收(CIA)带。但是,这些分子对瑞利散射(见第 1.4.2 节)和折射率(见第 1.3.5 节)计算来说非常重要。惰性气体对光传播的影响很小。

其他分子,如 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO,尽管其浓度非常小,但在大气中具有显著的光谱特性(见第 1.3.2 节),不过它们的重要性只是局限在这些光谱特性上。人们还观测到这些气体随着季节发生变化,变化归因于燃料的燃烧及其他反应。

表 1.2 中所列气体的相对浓度基本稳定,在地球大气中,相对浓度是高度的函数。某些最重要的碰撞传播的分子,其浓度是变化的,这些在表 1.3 中列出,其中包括 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub>。

水汽主要存在于对流层中,而且随着高度的不同和地理位置的不同,每天、每个季节都有很大变化。二氧化碳季节性变化的最大值在早春,而其最小值则在夏末秋初,并且随高度均匀混合,直到 80 km 处,这些特点在图 1.3 和图 1.4 中用图解方式作了说明<sup>[3~6]</sup>。这些重要的大气气体的易变特性对预测红外光在大气中的传输造成了困难。水汽浓度也对粒子散射产生影响。

表 1.2 干燥大气中以标准含量存在的气体(引自参考文献[2])

成分	体积百分比(%)	每百万分的比例
氮, N <sub>2</sub>	78.084 ± 0.004	—
氧, O <sub>2</sub>	20.946 ± 0.002	—
氩, Ar	0.934 ± 0.001	—
氖, Ne	0.001818	18.18 ± 0.04
氦, He	5.24 × 10 <sup>-4</sup>	5.24 ± 0.004
氪, Kr	1.14 × 10 <sup>-4</sup>	1.14 ± 0.01
氙, Xe	—	0.087 ± 0.001
氢, H <sub>2</sub>	—	0.5
甲烷, CH <sub>4</sub>	—	1.6
一氧化二氮, N <sub>2</sub> O*	—	0.5 ± 0.1

\* 表示该气体在污染空气中浓度发生变化。

表 1.3 含量变化的大气气体(引自参考文献[2])

成分	体积百分比(%)	每百万分的比例
臭氧, O <sub>3</sub>	—	0~0.3(对流层的*)
	—	1~7(20~30km)
水汽, H <sub>2</sub> O	0~2	—
二氧化碳, CO <sub>2</sub>	0.035	351 ± 4
一氧化碳, CO*	—	0.19
硝酸蒸汽, HNO <sub>3</sub>	—	(0~10) × 10 <sup>-3</sup>
氨, NH <sub>3</sub>	—	痕量
硫化氢, H <sub>2</sub> S	—	(2~20) × 10 <sup>-3</sup>
二氧化硫, SO <sub>2</sub> *	—	(0~20) × 10 <sup>-3</sup>
二氧化氮, NO <sub>2</sub>	—	痕量
一氧化氮, NO	—	痕量

\* 表示该气体在污染空气中浓度发生变化。

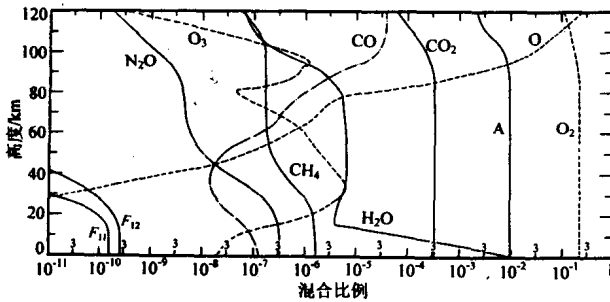


图 1.3 昼夜平时选定物质混合比例的垂直分布图[3~5]

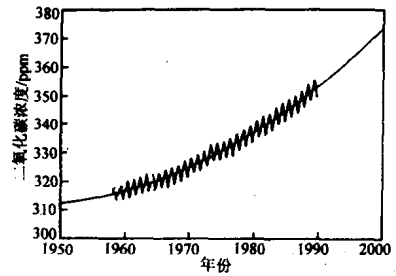


图 1.4 夏威夷 Mauna Loa 天文台观测到的 CO<sub>2</sub> 分子浓度,它是年份的函数,既表示了由 CO<sub>2</sub> 浓度 = 312.15 + 0.24(1950 年) + 0.01943(1950 年)给出的长期平均值(平滑曲线)[4],又表示了季节性变化(振荡曲线)[3,6]

这里回顾一下表示空气中 H<sub>2</sub>O 含量的不同单位对我们会有所帮助。

(1) 水汽分压  $p_{H_2O}$  通常以下列单位给出:千帕(kPa),毫巴(mbar),托(mmHg)和大气压(atm),这里,101.3 kPa = 760 Torr = 1013 mbar = 1 atm。

(2) 相对湿度  $rh$  是  $p_{H_2O}$  与饱和蒸汽压  $E_s(T)$  之比:

$$rh = \left[ \frac{p_{H_2O}}{E_s(T)} \right] \times 100\% \quad (1.9)$$

式中,  $E_s(T)$  的单位为 kPa, 利用下列公式计算, 精度为 0.1% [7]:

$$E_s(T) = 2.4096 \left( \frac{300}{T} \right)^5 10^{(10-2950.2/T)} \quad (\text{kPa}) \quad (1.10)$$



式中  $T$ ——温度,单位为 K。

表 1.4 列出了由上式得出的  $E_s(T)$  值。

(3) 绝对湿度  $a(gm^{-3})$  的定义为:

$$a = 2170 \frac{p_{H_2O}}{T} \quad (1.11)$$

式中采用了以下单位:  $p_{H_2O}(kPa)$  和  $T(K)$ 。该公式可以由理想气体定律  $P_1V = \rho_1 k_B T$  得出。

### 1.2.3 粒子成分

粒子不仅在化学成分方面有所不同,而且在大小(从大约  $0.01 \sim 10 \mu m$ )和形状(球形、椭球、棒状等)上也不同,因此对大气粒子的描述远比对大气分子的描述困难。不同类型粒子的尺度范围也不同,如表 1.5 所示,尺度分布函数规定了粒子浓度与其半径的函数关系,而高度分布函数则规定了浓度与高度的函数关系。在模型计算时一般采用简单形状,但是也需要形状分布函数。两种基本的粒子类型决定了大气中主要的散射衰减,它们是气溶胶和空中水份凝结物。

表 1.4  $H_2O$  的饱和蒸汽压(引自参考文献[2])\*

$T/K$	$E_s/kPa$	$T/K$	$E_s/kPa$
250	0.0760	300	3.535
260	0.1958	305	4.75
270	0.4701	310	6.228
280	0.991	320	10.540
290	1.919	330	17.202
295	2.64		

\* 下述多项式拟合表示标准偏差为  $\pm 0.024 kPa$  的  $E_s, \ln(E_s) = 16.323 - 3.7496 \times 10^3 T^{-1} - 2.3061 \times 10^5 T^{-2}$ 。

表 1.5 不同类型粒子的半径范围

类型	半径/ $\mu m$	浓度/ $cm^{-3}$
空气分子	$10^{-4}$	$10^{19}$
爱根核	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^4 \sim 10^2$
气溶胶	$10^{-2} \sim 1$	$10^3 \sim 10$
雾	$1 \sim 10$	$100 \sim 10$
云	$1 \sim 10$	$300 \sim 10$
雨滴	$10^2 \sim 10^4$	$10^{-2} \sim 10^{-5}$

第一类粒子的半径小于  $1 \mu m$ 。由于这些粒子非常小,所以它们都悬浮在大气中,这种混合物叫作气溶胶。气溶胶造成的散射衰减比起分子散射来大得多,称为霾。这些粒子在地表附近的浓度最大,因而霾的浓度在地表附近也最大。当观察作为天顶角函数的天空颜色时,可以很容易地验证这一点。在头顶上方天空是醒目的蓝色,这是由于分子的瑞利散射造成的,但是在靠近地平线时颜色变得稍带白色,这是因为在富含粒子的下部大气层中路程长度增加的缘故。其他例子还有烟雾、烟、细小污物粒子、宇宙尘埃、云、雾等等。由于湿度也是一个因素,所以加大了对含有水分粒子进行描述的难度。

第二类粒子称为水份凝结物,它是由呈液态或固态的富含水的粒子组成的。实例有多种类型的云、烟云、雾、雨、冻雨、雹、雪、海浪飞沫等等,这些粒子的半径一般都大于  $1 \mu m$ ,并且其维持时间比小粒子要短。

关于粒子分布函数将在第 1.4 节中详细讨论。

### 1.2.4 密度变化

随着高度的增加,密度(压力)按指数规律递减。为了解这一点,来考察一个气体柱。由高度增量  $dz$  的重力作用所产生的压力增量  $dP$  为: