

红外辐射在雨中的衰减

魏合理 刘庆红 宋正方 胡 明 韩守春
(中国科学院安徽光机所,安徽,合肥,230031)

摘要 利用红外光谱辐射计在大气窗口区对连续性降水的红外辐射衰减进行了测量,结果表明雨对光的衰减与降雨强度密切相关,根据测量结果得到了红外辐射在雨中衰减的定量关系式,并利用 Marshall-Palmer雨滴尺度谱分布,计算了红外辐射在雨中的衰减,考虑雨的前向散射修正后,计算结果与测量结果符合得较好.

关键词 消光系数,降雨强度,红外辐射.

引言

红外辐射在大气中的衰减早已被人们关注,对于晴空天气已能利用气象参数比较好地预计红外辐射的大气衰减特性^[1],但对于特殊天气条件下(如云、雨、雾)的红外辐射传输特性了解得还很不够,而一些红外工程迫切需要这方面的定量数据.

降水是自然界中非常普遍的现象,它对红外辐射能产生严重的衰减,从而给一些红外工程的应用带来严重的影响.文献 [2, 3]的作者测量了几种激光波长(10.6 μ m CO₂激光、3.5 μ m He-Xe激光和 0.6328 μ m He-Ne激光)在雨中的衰减,但对于非相干光在雨中的衰减及其随波长的变化关系的测量还未见报导.本文用 1000 $^{\circ}$ C黑体作为光源,用红外光谱辐射计作为接收系统,在 3~5 μ m和 8~12 μ m这两个大气窗口区测量了连续性降水的光谱衰减,并利用 Marshall-Palmer雨滴尺度谱分布,计算了上述大气窗口区在雨中的衰减,考虑雨的前向散射修正后,计算结果与测量结果相当一致.

1 实验装置

1.1 红外大气衰减测量系统

我们利用 MKIII-12550型红外光谱辐射计,配置了适当的外围仪器,使之能测量大气的衰减.图 1为红外大气衰减测量系统示意图.

发射系统主要由光源、准直镜和调制发射系统组成,光源为 1000 $^{\circ}$ C标准黑体辐射源,以提供全波段的辐射能,其出口孔径为 25.4mm,离轴抛物面准直镜口径为 254mm,焦距为 900mm,光栏孔径为 0.1mm.

接收系统为一台 MKIII-12550型红外光谱辐射计,光学系统为 H108mm 卡塞格林系统,视场为 0.5 $^{\circ}$,工作波段为 2.5~14.0 μ m,分光元件为环形渐变滤光片(CVF),光谱分辨率为波长的 2.5%,探测器由碲化铟(InSb)和碲镉汞(HgCdTe)组成的夹心探测器.

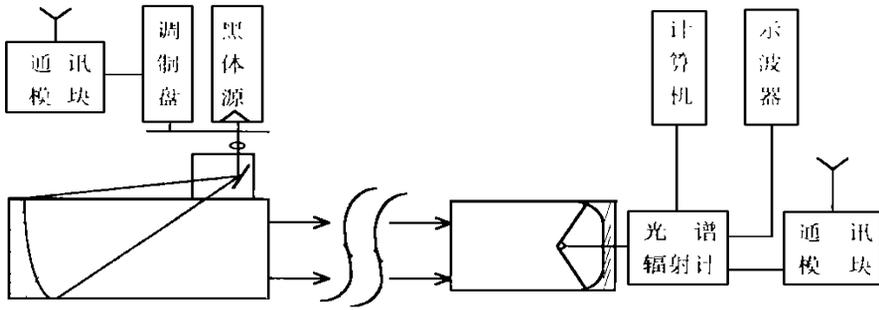


图 1 红外大气衰减测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared atmospheric extinction measurement system

黑体辐射被斩波器调制后通过光栏孔由准直系统形成平行光,经过大气传输和雨滴衰减后到达辐射计光学头,被辐射计接收,经光电转换形成电压信号.另外调制信号通过一通讯模块发射,在接收端接收送入辐射计作为同步采样信号,采用发射端调制方式避免了背景辐射的干扰.

对雨衰减的测量取降雨时接收到的光谱信号与雨停止时信号之比.测量是在地面 500m 水平距离上进行的.由于水汽和 CO_2 吸收带的影响,在某些非大气窗口区(如 $6.3\mu\text{m}$ 、 $2.7\mu\text{m}$ 等)潮湿情况下 500m 水平距离上透过率几乎为 0,故测量只在较透明的大气窗口区进行.

1.2 雨量监测系统

采用每隔 0.1mm 雨量记录一个脉冲的翻斗式摇测雨量计,用计算机监测每个脉冲的时间间隔以得到瞬时降雨强度,雨量计距光路的垂直距离约为 20m.

2 测量结果

1996 年夏季在合肥地区梅雨季节里进行测量,在一个多月的观测中,雨量计记录的降雨强度大多数未超过 3.0mm/h ,在这样小的毛毛雨中,有可能夹杂着雾,而雾的衰减比雨大很多,故小毛毛雨是不宜用来定量研究雨的衰减,测量数据在降雨强度小于 2.5mm/h 时舍去.

2.1 雨滴消光系数与降雨强度的关系

图 2 是 1996 年 7 月 16 日上午一次连续性大雨中测量的 $3.8\mu\text{m}$ 波长上消光系数 e 和雨量计记录的降雨强度 J 随时间的变化.在这次大雨中雨量计记录的最大瞬时降雨强度达 60.16mm/h ,由图 2 可见消光系数与降雨强度有很好的相关性,其它波长上的消光系数与降雨强度的相关特性同 $3.8\mu\text{m}$ 波长的结果类似,都与降雨强度呈较好的正相关.这说明用降雨强度可以较好地表征雨对红外波段光的衰减.对消光系数 $e(\text{km}^{-1})$ 和降雨强度 $J(\text{mm/h})$ 作最小二乘拟合,令:

$$e = aJ^b, \quad (1)$$

式(1)中 a, b 为拟合参数,几个波长及 $3\sim 9\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$ 大气窗口的拟合结果见表 1.

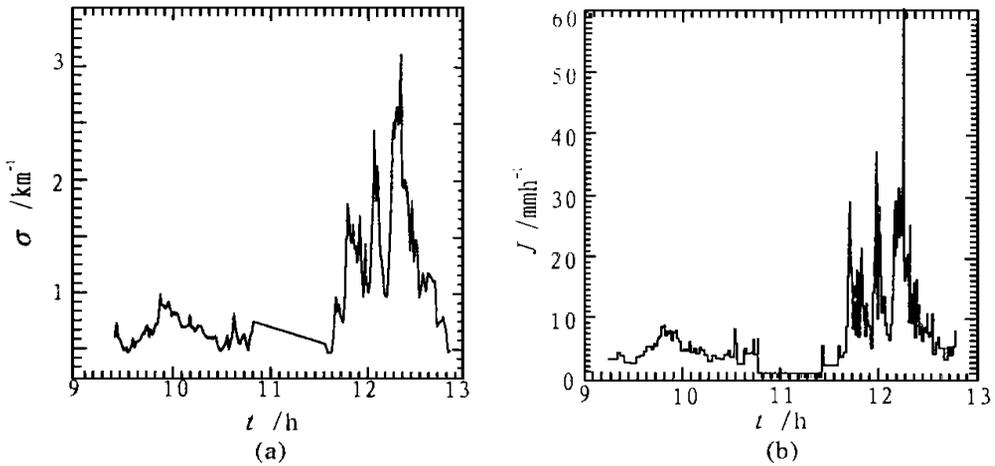


图 2 消光系数和降雨强度随时间的变化

(a) 消光系数随时间的变化 (b) 降雨强度随时间的变化

Fig. 2 Extinction coefficient σ and precipitation rate J vs. time in a heavy rain(a) extinction coefficient σ vs. time (b) precipitation rate J vs. time

表 1 消光系数与降雨强度的拟合结果

Table 1 The results of least-square fit of extinction coefficient and precipitation rate

波长 λ (μ)m	a	b	相关系数	均方根偏差 (km^{-1})
3.2	0.509	0.459	0.860	0.185
3.5	0.346	0.555	0.935	0.178
3.8	0.327	0.579	0.938	0.180
10.6	0.375	0.573	0.876	0.215
3~ 5(平均)	0.336	0.577	0.937	0.182
8~ 12(平均)	0.444	0.525	0.877	0.196

表 1 中 3.2 μ m 和 3.8 μ m 波长因处在大气窗口,几乎不受水汽吸收的影响,且探测信号的信噪比较高,故拟合的相关系数较高,均方根偏差较小. 3.5 μ m 处在水汽的弱吸收带上,在降雨过程中以气态方式存在的水汽含量可能会有一定的变化,从而导致该波段除了雨滴的消光外还受水汽吸收的影响; 10.6 μ m 波长上因光源在 8~ 12 μ m 波段辐射能较弱,而使得探测信号的信噪比不太高,故这两个波长处拟合出来的相关系数较低. 对于宽波段平均衰减, 3~ 5 μ m 大气窗口的平均衰减与 3.8 μ m 和 3.5 μ m 非常接近, 8~ 12 μ m 大气窗口的平均衰减比 10.6 μ m 略高.

文献 [6] 中例举了不同作者用 10.6 μ m CO_2 激光测量的结果,本文在该波长上的测量结果也介于其间,这说明雨对红外辐射的衰减对于相干和非相干光源没有什么区别.

影响测量精度的主要因素有: 降雨强度的测量和消光系数的测量在时间上不能完全同步; 用光程中一点的雨量代表整个 500m 光程中的平均雨量会带来一定的误差; 某些吸收气体(如水汽, CO_2 等)含量的变化会在某些波长上产生影响; 8~ 12 μ m 波段信噪比较低.

2.2 雨的衰减随波长的变化

相对光波波长来说,雨滴是大粒子,根据下面的计算,雨的衰减应与波长无关.然而,由于雨滴引起的光波前向散射随波长有所变化;作为气体分子存在的水汽含量随降雨强度会有不同程度的变化,而水汽的吸收随波长有剧烈的变化,故雨的衰减在不同的波长上是有所不同的,图 3 是 7 月 16 日 12:38 测量的雨的光谱透过率,测量时的降雨强度约为 10mm/h,由图 3 可见:

(1) 长波段(8~12 μm)的衰减略大于短波段(3~5 μm),这与雾等小的气溶胶粒子衰减随波长的变化关系相反.

(2) 在较透明的大气窗口区(如 3.4~4.2 μm 和 8~12 μm),雨的衰减随波长变化不大.

(3) 受水汽 3.2 μm 弱吸收带的影响,3.2 μm 波段在雨中的衰减明显大于大气窗口区,4.4~5.2 μm 波段由于受水汽 6.3 μm 强吸收带远翼的影响,其衰减也比窗区有所增大,这说明雨的衰减不仅表现为雨滴的散射和吸收,同时由于降水引起水汽含量增加,通过水汽的吸收在其吸收波段上加剧了降雨的衰减.

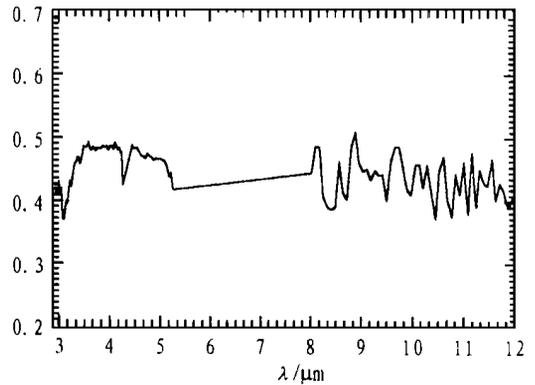


图 3 雨的衰减随波长的变化

Fig. 3 Extinction by rain vs wavelength

3 雨滴衰减的计算

3.1 计算方法

波长为 λ 强度为 I_0 的光辐射通过距离为 L 的介质后,其强度为 I ,根据 Bouguer 定律^[4]可写成:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left[-\int_0^L e(\lambda) dl\right], \quad (2)$$

式(2)中 e 为消光系数,包括散射和吸收两个部分,对于球形粒子的消光可由下式计算:

$$e(\lambda) = \int_{r_1}^{r_2} c r^2 (Q_s + Q_a) n(r) dr, \quad (3)$$

式(3)中 $n(r)$ 为粒子尺度谱分布, r 为粒子半径, Q_s 和 Q_a 为散射和吸收效率因子,它是粒子折射率(包括实部 n 和虚部 n_i)和尺度参数 $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$ 的函数,可由 Mie 散射理论精确地计算.

Van de Hulst^[5]发展了一个容易计算而又有足够精度的近似计算公式:

$$Q_e(x, n) = 2 - 4 \exp(-T \tan U) \frac{\cos U}{T} \sin(T - U) + 4 \cos^2(U/T) [\cos(2U) - \cos(T - 2U) \exp(-T \tan U)], \quad (4)$$

$$Q_a(x, n) = 1 + \frac{\exp(-4\pi n_i)}{2\pi n_i} + \frac{\exp(-4\pi n_i) - 1}{8x^2 n_i^2}; \quad (5)$$

其中, $Q(x, n) = Q(x, n) + Q_e(x, n)$ 为消光效率因子, 当 x 较大时, 其值近似为 $2, x = \frac{2Cr}{\lambda}, T = 2x(nr - 1), U = \tan^{-1} \frac{ni}{nr - 1}$, 对雨滴谱, 一般认为 Marshall-Palmer 指数分布能比较好地描述雨滴的平均尺度分布^[6]:

$$\frac{dN(D)}{dD} = n(D) = a \exp(-bJ^{0.21}D), \quad (6)$$

J 为降雨强度 (mm/h), D 为雨滴的直径 (mm), 参数的典型值为 $a = 8000 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}, b = 4.1$, 把式 (4) 和 (6) 代入式 (3) 中, 雨滴相对于红外波长可认为是大粒子, 这时可取 $Q_e(x, n) \approx 2$, 积分式 (3), 考虑所有粒子积分区间取 $r_1 = 0, r_2 = \infty$, 可得:

$$e(\lambda) = 0.365J^{0.63}, \quad (7)$$

式 (7) 表明衰减与波长无关, 只是降雨强度的函数. 文献 [1] 即是采用此方法计算雨的衰减的.

3.2 前向散射修正

严格地说, 方程 2 描述的 Bougre 定理只适用于探测器视场为 0° 的理想情况, 因为在 Bougre 定理中, 散射能量只是作为损失项而衰减了. 而实际应用中, 散射进入仪器视场角内的能量又被探测器接收, 从而测得的视衰减系数 e' 比 Bougre 定律所定义的衰减系数 e 要小, 定义修正系数 R_c 为

$$R_c = \frac{Q'(x, n, \theta)}{Q(x, n)}, \quad (8)$$

式 (8) 中, $Q'(x, n, \theta)$ 为除了进入探测器视场角 θ 以外的散射效率因子. 对于大粒子 ($r > \lambda$) 和小的视场角 ($\theta < 1.5^\circ$), 修正系数 R_c 可用下式表示^[7]:

$$R_c = R_c(x\theta) = 0.5 [1 + J_0^2(x\theta) + J_1^2(x\theta)], \quad (9)$$

式 (9), J_0 和 J_1 为第一类零阶和一阶 Bessel 函数. 把式 (9) 代入式 (3) 中, 并令 $Q_e(x, n) \approx 2$, 则得考虑前向散射修正后的消光系数为

$$e(\lambda, \theta) = \int_{r_1}^{r_2} Cr^2 \{ 2R_c(x\theta) + [1 - R_c(x\theta)] Q(x, n) \} n(r) dr. \quad (10)$$

根据式 (7) 和 (10) 计算出不包括和包括雨滴前向散射修正的消光系数 e 和 e' , 以及根据测量结果拟合出的消光系数 e_m 示于图 4 中. 图 4 中点划线 e 为不考虑前向散射修正, 即式 (7) 的计算结果, 实线 e_m 是根据测量拟合出来的结果, 虚线 e' 是根据式 (10) 考虑前向散射修正后的计算结果. 计算中仪器视场 θ 为 0.5° , 水的折射率分别取为^[2]:

$$(a) \lambda = 3.2 \text{ m}, n = 1.44, ni = 0.02; \quad (b) \lambda = 3.8 \text{ m}, n = 1.40, ni = 0.01;$$

从图 4 中可以看出, 根据不考虑前向散射的式 (7) 计算的衰减比测量的消光系数要偏大, 而且随着降雨强度增大而增大, 这说明在雨中, 特别是大雨中, 前向散射起着非常重要的作用. 考虑前向散射修正以后, 3.8 m 波长上衰减的计算结果与测量结果符合得相当好, 证明利用式 (10) 可以比较好地计算雨在大气窗口区的衰减. 10.6 m 波长与 3.8 m 波长类似, 测量

值与计算值也很吻合. 而 $3.2\ \mu\text{m}$ 在降雨强度不太大时水汽吸收起着可观的作用, 致使测量值比计算值 (计算时没有考虑水汽吸收的变化) 偏大, 随着降雨强度的增大, 水汽吸收的影响相对减小.

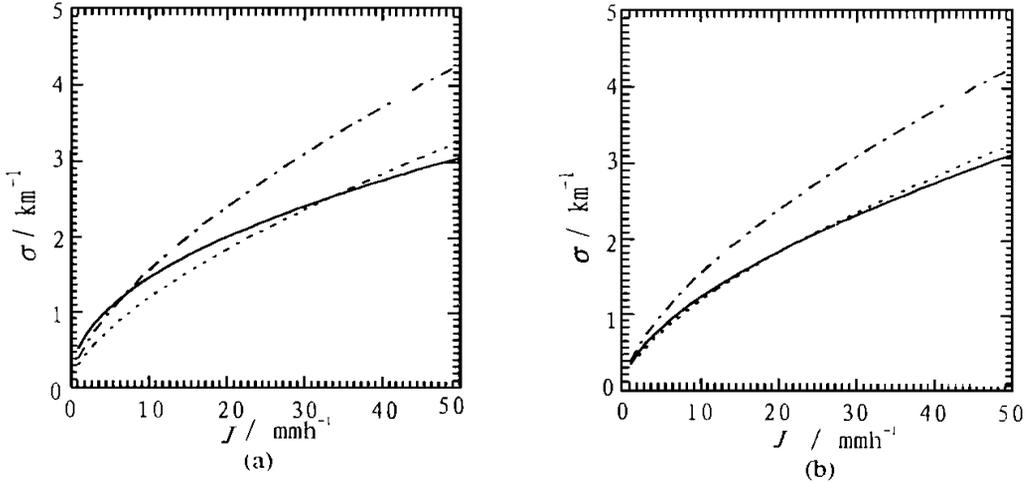


图 4 雨的消光系数测量 (实线) 与计算 (虚线) 的比较

(a) $\lambda = 3.2\ \mu\text{m}$ (b) $\lambda = 3.8\ \mu\text{m}$

Fig. 4 Comparison between the extinction coefficient by means of measurement (solid line) and calculation (dashed line)

4 结论

(1) 通过实际测量表明, 用降雨强度可以较好地表征降雨对红外辐射的衰减.

(2) 雨滴的前向散射在雨滴消光中起着非常重要的作用, 它随着降雨强度的增大而增大, 从而有效地减少了雨的衰减, 在计算雨滴的衰减时必须进行前向散射修正.

(3) 在大气窗口区, 雨对红外辐射的衰减可以用式 (1) 的关系来定量地表征, 其中系数 a 、 b 随波长略有变化, 雨的衰减随波长的变化关系与雾等小粒子相反, 它随波长增大略有增大.

(4) 降雨时, 尽管大气相对湿度已接近 100%, 但水汽含量随降雨强度仍然有一定的变化, 从而使水汽吸收波段上的衰减随路径中的水汽含量的变化而变化. 故在水汽吸收波段上, 除了考虑雨滴的衰减外, 尚须计及水汽含量变化的影响.

致谢 凌惠琴、马成胜两同志协助测量了雨量, 在此谨表谢意.

REFERENCES

- 1 Kneizys F X, et al. *User's Guide to Lowtran 7*, AFGL-TR088-0177, Bedford MA, 1988
- 2 Chu T S, Hogg D C. *Bell Systems Tech J.*, 1968, 47 723
- 3 Chimelis V. *Appl. Opt.*, 1982; 21(18): 3367
- 4 SONG Zheng-Fang. *Fundamentals of Applied Atmospheric Optics*, Beijing: Meteorological Press (宋正芳, 1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net)

- 方.应用大气光学基础.北京:气象出版社), 1990, 12
- 5 Van de Hulst H C. *Light Scattering by Small Particles*, New York: John Wiley & Sons, 1957; 179
- 6 SONG Zheng-Fang. *Fundamentals of Applied Atmospheric Optics*, Beijing: Meteorological Press(宋正方.应用大气光学基础.北京:气象出版社), 1990, 19
- 7 Deepak A, Vaughan O H. *Appl. Opt.*, 1978; **17**(3): 374

EXTINCTION OF INFRARED RADIATION BY RAIN

WEI He-Li LIU Qing-Hong SONG Zheng-Fang HU Ming HAN Shou-Huan
(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Extinction of infrared radiation through continuous rain was measured with an infrared spectral radiometer at the wavelengths of atmospheric windows. Experimental results show that the extinction by rain is closely correlated with the precipitation rate. The quantitative relationship between extinction and precipitation rate was obtained from the experimental results. Extinction by rain was also calculated using the Marshall-Palmer particle size spectral distribution, and the calculated extinction coefficient coincides with the measurement results quite well when the forward scattering correction is considered.

Key words extinction coefficient, precipitation rate, infrared radiation