



## 沙尘暴对红外辐射的消光特性分析 (特约)

王红霞 孙红辉 张清华

### Analysis of extinction characteristics of sandstorm to infrared radiation(*Invited*)

Wang Hongxia, Sun Honghui, Zhang Qinghua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20201022>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 红外波在沙尘暴中的后向散射增强

Backscattering enhancement for infrared wave in sand and dust storm

红外与激光工程. 2017, 46(1): 104006–0104006(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0104006>

#### 水雾中1.06 $\mu\text{m}$ 激光辐射的衰减特性

Attenuation properties of 1.06  $\mu\text{m}$  laser radiation in water fog

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1006003–1006003(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1006003>

#### 利用CCD和后向散射激光雷达精确探测近地面气溶胶消光系数廓线

Precise detection of near ground aerosol extinction coefficient profile based on CCD and backscattering lidar

红外与激光工程. 2019, 48(S1): 43–49 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.S106007>

#### 海洋大气气溶胶粒子谱分布及其消光特征分析

Particle size distribution and extinction characteristic analysis of marine atmospheric aerosol

红外与激光工程. 2017, 46(12): 1211002–1211002(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1211002>

#### 固体火箭发动机喷焰复燃及其对红外辐射的影响

Afterburning and infrared radiation effects of exhaust plumes for solid rocket motors

红外与激光工程. 2018, 47(9): 904003–0904003(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0904003>

#### 高速滑翔目标点源红外辐射特征模拟及可探测性分析

Infrared radiation characteristics and detectability analysis of point source based on high-speed sliding

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1104001–1104001(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1104001>

## 沙尘暴对红外辐射的消光特性分析 (特约)

王红霞, 孙红辉, 张清华

(火箭军工程大学基础部, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 基于 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法, 分析了国内七种模态沙尘暴对 0.86~20  $\mu\text{m}$  波段红外辐射的消光和衰减特性。研究表明: 对于小尺寸的沙尘粒子, 在近、中波红外, 消光效应主要是散射作用的结果; 对于大尺寸的沙尘粒子, 红外消光是吸收和散射共同作用的结果。比较了沙尘暴单次散射和多重散射产生的衰减率差异, 多重散射的衰减率小于同一条件下的单次散射衰减率, 差异随可见度的增大而减小, 基于 Monte Carlo 方法计算的多重散射衰减率比消光系数更能全面反映沙尘暴对红外辐射强度衰减的影响。六种大颗粒模态沙尘暴比小颗粒模态沙尘暴的红外衰减强度大, 衰减率基本随着波长的增大而增大; 小颗粒模态沙尘暴的衰减率随波长的变化有明显的起伏, 在 7.9~12.5  $\mu\text{m}$  范围内有峰值, 在 13~20  $\mu\text{m}$  范围内衰减率对波长不敏感。

**关键词:** 红外辐射; 沙尘暴; 消光系数; Monte Carlo; 衰减率

**中图分类号:** TN012      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20201022

## Analysis of extinction characteristics of sandstorm to infrared radiation(*Invited*)

Wang Hongxia, Sun Honghui, Zhang Qinghua

(Basic Department, Rocket Force Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** The extinction and attenuation characteristics of seven modes of sandstorm in China for 0.86 -20  $\mu\text{m}$  band infrared radiation were analyzed based on Mie scattering theory and Monte Carlo method. The results show that for the small size dust particles, the extinction effect is mainly the result of scattering in the near and middle infrared, and for the large size dust particles, the infrared extinction is the result of absorption and scattering. The attenuation rate difference of single scattering and multiple scattering of sandstorm are compared. The attenuation rate of multiple scattering is less than that of single scattering under the same condition, and the difference decreases with the increase of visibility. The multiple scattering attenuation rate calculated based on Monte Carlo method is more comprehensive than the extinction coefficient to reflect the influence of sandstorm on infrared radiation intensity attenuation. The infrared attenuation intensity of six kinds of large particle mode sandstorm is greater than that of small particle mode sandstorm, and the attenuation rate increases with the increase of wavelength. The attenuation rate of the small particle mode duststorm fluctuates obviously with the change of wavelength, with a peak value in the range of 7.9–12.5  $\mu\text{m}$ , and is not sensitive to the wavelength in the range of 13–20  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** infrared radiation; sandstorm; extinction coefficient; Monte Carlo; attenuation rate

收稿日期:2020-03-05; 修订日期:2020-04-10

作者简介:王红霞 (1962-), 女, 教授, 博士, 主要从事光电信息传输与处理研究工作。Email:redlightw@163.com

## 0 引言

沙尘天气对电磁波信号的影响研究是人们一直关注的一个重要课题。沙尘天气一般分为浮尘、扬沙和沙尘暴,沙尘暴是指强风将地面大量尘沙卷入空中使空气特别浑浊,水平能见度低于 1 km 的天气现象。沙尘暴天气产生的空中悬浮沙粒对电磁波的吸收和散射不仅会引起信号严重的衰减,还容易导致信号相位波动、波形畸变、退偏和交叉极化现象,因此,沙尘暴天气对电磁波传播具有很大的影响。国外学者自 20 世纪 40 年代就沙尘暴的物理特性和沙尘暴对无线电传播影响开展了理论研究和实验测量的工作,不同学者根据不同条件建立了沙尘暴对电磁波的衰减模型<sup>[1-2]</sup>。我国自 20 世纪 80 年代后期也开始了沙尘媒质的电波传播研究,主要侧重于沙尘暴中微波/毫米波、陆地通信线路和卫星通信线路的衰减及交叉去极化效应研究<sup>[3-4]</sup>。近几年来,随着红外探测、遥感、通信等技术的发展,沙尘暴对红外信号影响的研究受到重视。李曙光等<sup>[5]</sup>基于 Mie 散射理论,通过数值法研究了浮尘、扬沙和沙尘暴三种沙尘天气时,沙尘单次散射引起的红外散射、吸收、及消光系数与波长的关系;吴振森等<sup>[6]</sup>利用四通量法和蒙特卡罗法研究了 1.06 μm 激光在某种模态沙尘大气中的多重散射和传输衰减特性;李学彬<sup>[7]</sup>等利用 TEOM1400 系列颗粒物质量监测仪(粒子直径小于 10 μm),根据 2004 年在北京测量的 1 次沙尘暴数据,基于 Mie 散射理论计算了沙尘粒子对可见光和红外波段的消光特性;董群锋<sup>[8]</sup>应用 Mie 理论分析了单次散射引起的单个红外波长在浮沉、扬沙和沙尘暴天气时引起的信号衰减与能见度的关系,杨瑞科<sup>[9]</sup>应用电磁波在离散随机介质中传播的多重散射理论,就几种典型红外波,分析了在两种模态沙尘暴中传播时的后向散射增强,指出含大粒子数越多的沙尘暴,后向散射增强越显著;杨玉锋<sup>[10]</sup>采用 Mie 理论,基于粒子尺寸对数正态分布模型的单次散射,分析了某种扬沙天气对 0.76~10.6 μm 红外波的衰减系数。沙尘暴对红外信号的影响与沙尘暴粒子的尺度分布有关,沙尘暴粒子尺度不同,分析得到的结果也不同。以上研究,大多针对个别的红外波长,或某一种模态的沙尘暴,或仅基于 Mie 散射理论的单次散射分析,为了更全面分析各种模态沙尘暴

对红外信号强度的影响,文中选取国内粒径尺度分布不同的七种模态沙尘暴,基于 Mie 散射理论和多重散射的 Monte Carlo 方法,针对 0.86~20 μm 波段的红外消光和衰减特性进行分析。

## 1 单相沙尘粒子散射特性

Mie 散射理论是各向同性的均匀球体对平面电磁波散射的精确解,研究沙尘粒子的散射特性时,可将沙粒视为球形粒子利用 Mie 理论进行分析计算。根据 Mie 散射理论,单个粒子对入射波的消光效率因子  $Q_c$ 、散射效率因子  $Q_s$  和吸收效率因子  $Q_a$  分别为:

$$Q_c = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [Re(a_n + b_n)] \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (2)$$

$$Q_a = Q_c - Q_s \quad (3)$$

式中:  $x = 2\pi r/\lambda$ ,  $r$  为粒子半径,  $\lambda$  为波长;  $a_n$  和  $b_n$  为 Mie 散射系数。

效率因子的计算涉及到沙粒的复折射率,复折射率是描述粒子光学特性的一个重要参数,与粒子的构成、尺寸和波长有关。复折射率由实部和虚部两部分组成,其实部表示粒子对入射光散射能力的大小,值越大反映散射能力越大;虚部表示粒子对入射光吸收能力的大小,绝对值越大反映吸收能力越大,文中采用参考文献 [11] 提供的沙尘粒子在红外波段 (0.86~20 μm) 的复折射率数值,其实部和虚部如图 1 所示。

根据 Mie 散射理论和沙粒的复折射率,分别在近红外,中波红外和长波红外选取了几个典型波长 ( $\lambda=1.06, 4.0, 10.6, 20.0 \mu\text{m}$ ), 利用 MATLAB 编程计算得到了散射、吸收和消光三个效率因子与粒径的变化关系,结果如图 2 所示。可以看出,对于 1.06 和 4.0 μm 的红外波而言,沙粒的散射作用比较显著,尤其是小粒径时 ( $D < 10.0 \mu\text{m}$ ), 吸收作用很弱,消光主要由散射所致,随着沙尘粒径的增大,波长与粒径的差值也增大,散射作用逐渐减弱,吸收作用增强,二者趋于比较接近的值。对于 10.6 μm 长波红外,粒径小于 2 μm 时,吸收和散射都较弱,粒径在 3.5~17.5 μm 之间,散射强于吸收,而后,随着沙尘粒径的增大,二者趋于比较接近的值。对于 20 μm 长波红外,粒径小于 5 μm 时,吸收和散射较弱,但吸收略大于散射,粒径在

9~25 μm 范围时, 散射效率因子出现第一峰值, 粒径大于 50 μm 之后, 散射和吸收趋于比较接近的值。散射效率因子的第一峰值随波长增大逐渐减弱。总之,

对于小尺寸的沙尘粒子, 在近、中波红外, 消光效应主要是散射作用的结果, 对于大尺寸的沙尘粒子, 红外消光是吸收和散射共同作用的结果。

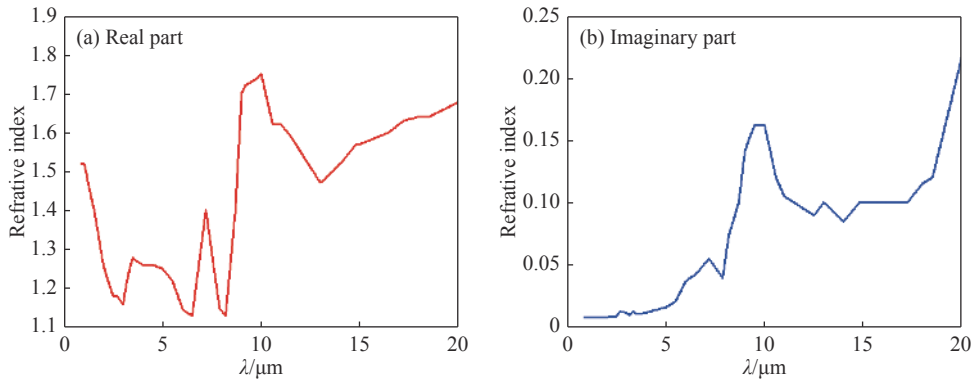


图 1 沙粒的复折射率实部和虚部

Fig.1 Real part and imaginary part of refractive index of sand

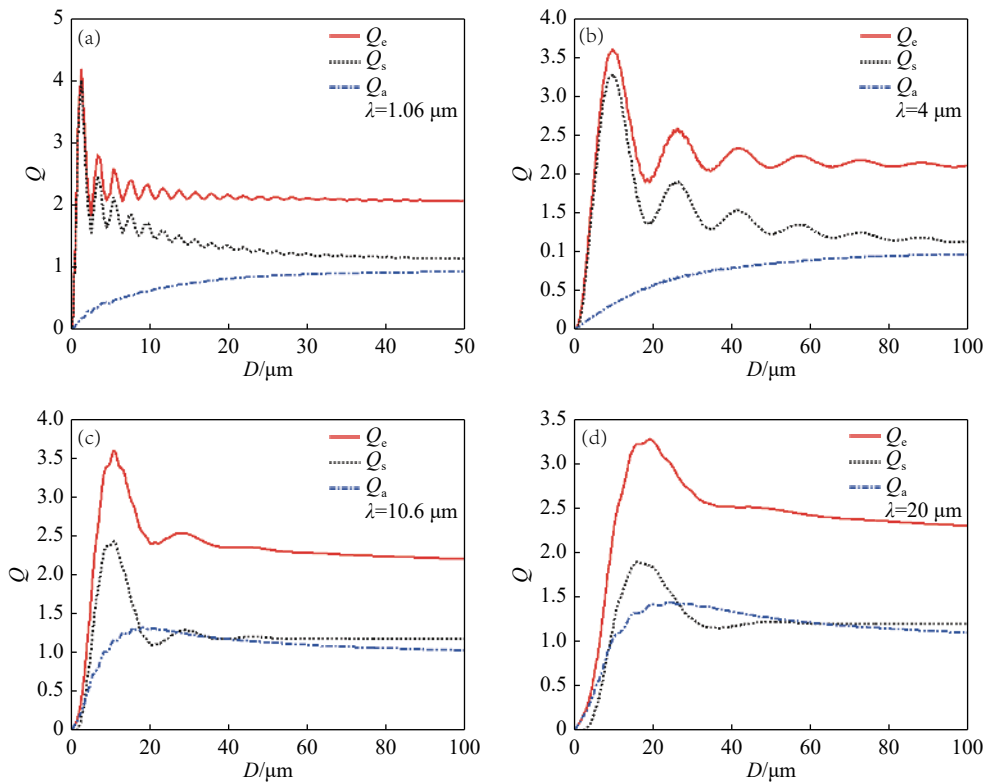


图 2 散射、吸收和消光效率因子与沙尘粒径的关系

Fig.2 Relationship among scattering, absorption and extinction efficiency factors and dust particle size

## 2 沙尘暴群粒子消光参量

每种沙尘天气同时都含有多种尺度的粒子, 沙尘暴对电磁辐射的作用影响与沙粒尺度分布密切相

关。浮尘和扬沙天气的沙尘粒子尺寸较小, 沙尘暴的沙粒尺寸较大, 其粒径一般在 0.01~300 μm 范围内, 研究表明: 可采用对数正态分布函数来描述沙尘粒子的尺度分布, 其表达式为<sup>[12]</sup>:

$$N(r) = N_0 p(r) \quad (4)$$

式中:  $N_0$  为粒子数密度;  $p(r) = N(r)/N_0$  为粒子尺度分布密度函数;  $r$  为沙粒半径。

$$p(r) = \frac{1}{2r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(2r) - m_0]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

式中:  $m_0$  和  $\sigma$  分别为  $\ln(2r)$  的均值和标准偏差。沙源地不同, 测量设备规格不同, 测得沙尘暴粒子的尺寸分布也不同, 文中选取董庆生和牛生杰分别在塔克拉玛干沙漠、贺兰山沙区等地测量的七种沙粒尺寸分布, 其相应参数的统计结果如表 1 所示<sup>[13-14]</sup>。

图 3 是根据公式 (5) 和表 1 参数绘出的七种沙尘粒子的尺寸分布函数, 图中横坐标  $D$  为沙粒直径。可以看出, 1~6 模态的沙粒尺寸比 7 模态的沙粒尺寸大许多, 其中 1 黄土沙、2 毛乌素两种模态的沙粒尺寸主要分布在 5~150  $\mu\text{m}$  范围之间, 3 腾格里、4 塔克拉

玛干和 5 甘肃三种模态的沙粒尺寸分布比较相近, 粒径主要分布在 30~210  $\mu\text{m}$  范围之间, 6 海岸模态沙粒尺寸相对最大, 粒径主要分布在 80~250  $\mu\text{m}$  范围之间; 7 贺兰山区模态沙粒尺寸较小, 粒径主要分布在 0.01~6  $\mu\text{m}$  范围之间。

表 1 沙粒尺寸分布参数

Tab.1 Sand size distribution parameters

Number	Sand source	$m_0$	$\sigma$
1	Loess	-3.08	0.491
2	Maowusu	-2.96	0.380
3	Tengger	-2.31	0.296
4	Taklimakan	-2.26	0.276
5	Gansu	-2.19	0.279
6	Coast	-1.83	0.166
7	Helan mountain	-7.48	0.995

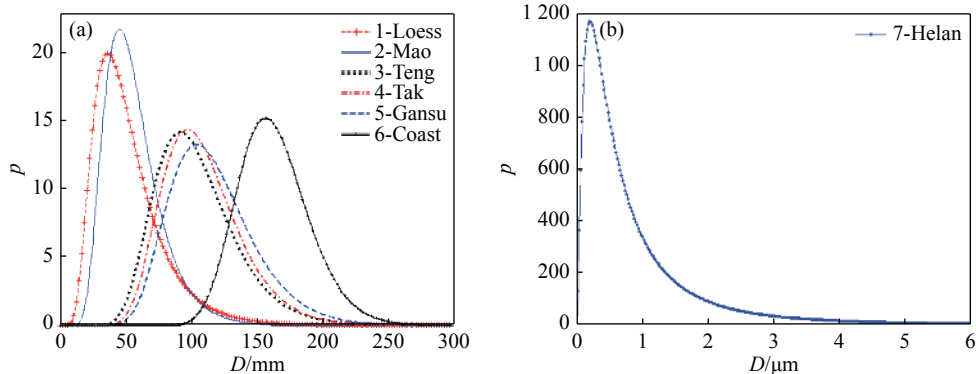


图 3 沙粒尺寸分布密度函数

Fig.3 Density function of sand size distribution

沙尘暴是具有多种尺寸分布的多相粒子群, 总的消光是所有尺寸粒子消光共同贡献的结果, 忽略多次散射对消光的影响, 总的消光系数为:

$$\mu = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_e(r) N_0 p(r) dr \quad (6)$$

式中: 粒子数密度  $N_0$  是一个很难测量的物理量, 国内外学者通常借助于光学能见度  $V_b$  来表示, 二者的关系为<sup>[15]</sup>:

$$N_0 = \frac{15}{4.343 \cdot V_b \int_0^{\infty} 2\pi r^2 p(r) dr} \quad (7)$$

除消光系数外, 单次散射反照率  $\omega$  和不对称因

子  $g$  也是描述粒子散射和消光特性的重要物理量, 对于多相粒子群,  $\omega$  和  $g$  的计算式分别为:

$$\omega = \frac{\int_0^{\infty} \pi r^2 Q_s(r) N_0 p(r) dr}{\int_0^{\infty} \pi r^2 Q_e(r) N_0 p(r) dr} \quad (8)$$

$$g = \frac{\int_0^{\infty} \pi r^2 Q_s(r) g(r) N_0 p(r) dr}{\int_0^{\infty} \pi r^2 Q_s(r) N_0 p(r) dr} \quad (9)$$

根据以上各式, 在能见度  $V_b=1$  km 时, 计算得 7 种模态沙尘暴在 0.86~20  $\mu\text{m}$  红外波段的 3 个消光参量随波长的变化情况如图 4 和图 5 所示。

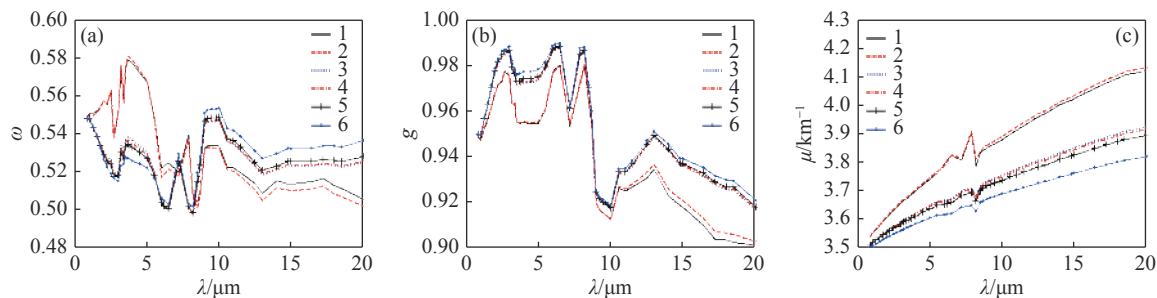


图 4 1~6 模态沙尘暴消光参量与波长的关系

Fig.4 Relationship between extinction parameters and wavelength of 1-6 mode sandstorm

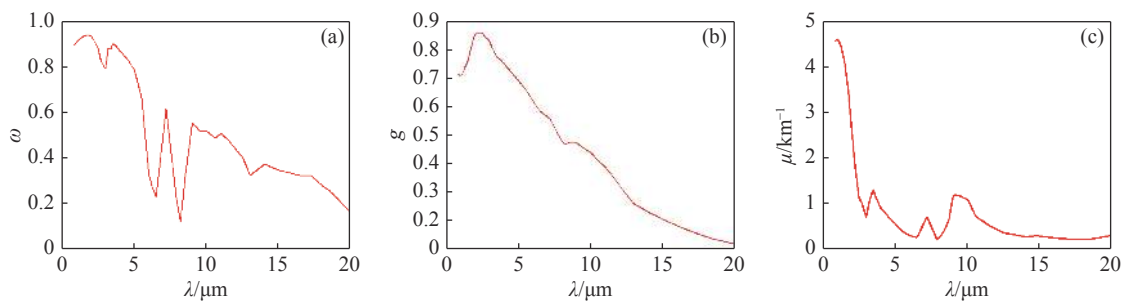


图 5 模态 7 沙尘暴消光参量与波长的关系

Fig.5 Relationship between extinction parameters and wavelength of mode 7 sandstorm

根据图 4 所示的 6 种大颗粒沙尘暴的消光特性, 可以把 6 种模态的沙尘暴分成 3 组, 第一组 1 和 2 模态由于粒径分布接近, 3 个消光参量随红外波长的变化基本一致, 第二组是 3、4 和 5 模态, 第三组是 6 模态。图 4(a) 表明第一组的两种沙尘暴其反照率在 0.86~5 μm 波段大于另两组的值, 在长波红外波段, 反照率又小于另两组的值, 但在整个 0.86~20 μm 波段, 反照率 ω 的值都在 0.5~0.6 之间, 说明散射略强于吸收。图 4(b) 表明第一组的不对称因子小于另两组, 但在整个 0.86~20 μm 波段内, 反照率 g 的值都大于 0.9, 表明沙尘暴的前向散射较强。图 4(c) 表明第一组的消光系数明显大于另外两组的值, 第三组沙尘暴的颗粒尺寸相对最大, 消光系数相对最小, 主要因为沙粒尺寸与该红外波段的波长差异最大的缘故。总之, 在 0.86~20 μm 红外波段内, 能见度相同时, 这 6 种大颗粒模态沙尘暴的消光系数除在个别波长有小的震荡外, 大体是随红外波长的增大而增大。

图 5 是小颗粒模态 7 沙尘暴消光参量随红外波长的变化情况。可以看出: 在红外波段波长小于 5 μm 时, 其反照率和不对称因子的值都比较大, 反映沙尘暴在近、中波红外前向散射比较强; 随红外波长增大,

反照率震荡减小, 不对称因子递减, 说明该沙尘暴散射随波长增大而逐渐减弱且趋于各向同性; 在红外波长小于 2 μm 时, 消光系数明显大于其他波段的值, 即该模态沙尘暴在近红外的消光能力较强, 在中、长红外波段的消光能力较弱, 且在 13~20 μm 波段范围内, 消光对波长不敏感。

### 3 沙尘暴红外衰减率

沙尘暴对红外辐射信号强度的影响最终归结为其对信号的衰减程度如何, 为此, 下面将根据前面消光参量的计算, 分析计算衰减率与红外波长、沙尘暴模态、可见度的关系。

#### 3.1 单次散射衰减

根据 Lambert-Beer 定律, 当强度为  $I_0$  的光波通过厚度为  $L$  的随机介质后, 透射光波强度  $I$  为:

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot L) \quad (10)$$

式中:  $\mu$  为消光系数。衰减率常用分贝 (dB/km) 表示, 定义如下:

$$A = \frac{10}{L} \log \frac{I}{I_0} \quad (11)$$

根据公式 (10), 可得衰减率与消光系数的关

系为:

$$A = 4.343\mu \quad (12)$$

公式 (12) 表明: 消光系数  $\mu$  的大小就决定了衰减率的大小。但这是以单次散射为前提的, 即粒子之间彼此独立地散射光波。在沙尘暴天气条件下, 大气中的沙尘粒子比较浓密, 能见度较低, 这时, 单次散射很难真实地反映沙尘暴天气的实际散射衰减情况, 因此, 就需要考虑多次散射的影响。

### 3.2 多重散射衰减

红外辐射在沙尘暴中的传输不可避免存在多重散射情况, 利用 Monte Carlo<sup>[16-17]</sup> 法计算电磁辐射在沙尘暴中多次散射现象具有独特的优点。Monte Carlo 方法的基本思想是把电磁辐射看成由很多光子组成的光子束, 电磁辐射的传输问题就转化为光子的传输问题。每一个光子在沙尘暴中的传递过程, 都可以由计算机产生随机数来确定, 通过对光子的散射方向、行进路径进行抽样, 实现对光子的跟踪, 光子权重随着在沙尘暴中的散射次数而减小, 直到光子权重小于阈值、或光子离开沙尘暴、或到达接受界面为止。通过对大量的光子进行跟踪, 最后对到达接受界面的光子权重进行统计, 就可以获得稳定的透过率及衰减率估值。

设光波沿  $z$  方向垂直射入到厚度为  $H$  的沙尘暴中, 光子在相邻两次碰撞间随机运动步长由平均自由程的累计概率分布决定, 即:

$$L = -\frac{1}{\mu} \ln \xi \quad (13)$$

式中:  $\xi$  为 (0,1) 上均匀分布的随机数;  $\mu$  为消光系数。

光子在某点与沙粒碰撞后, 新的运动方向由 Henyey 和 Greenstein 提出的 HG 散射相函数来确定, 根据 HG 散射相函数可得散射角  $\theta$  的抽样值为:

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2g} \left[ (1+g)^2 - \left( \frac{1-g^2}{1-g+2g\xi} \right)^2 \right] \right\} \quad (14)$$

式中:  $g$  为不对称因子。光子散射方位角  $\phi$  可认为在 (0,  $2\pi$ ) 内均匀分布, 其抽样值为:

$$\phi = 2\pi\xi \quad (15)$$

设  $(\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  为光子与沙粒碰撞前的方向余弦, 碰撞后光子新的方向余弦可通过坐标变换得到:

$$\begin{aligned} \mu'_x &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}} (\mu_x \mu_z \cos \phi - \mu_y \sin \phi) + \mu_x \cos \theta \\ \mu'_y &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}} (\mu_x \mu_z \cos \phi + \mu_y \sin \phi) + \mu_y \cos \theta \\ \mu'_z &= -\sin \theta \cos \phi \sqrt{1-\mu_z^2} + \mu_z \cos \theta \end{aligned} \quad (16)$$

根据加权 Monte Carlo 的思想, 光子与粒子碰撞后, 它的部分能量就会被吸收, 其权重  $W$  会减小:

$$W_i = W_{i-1} \cdot \omega \quad (17)$$

式中:  $\omega$  为单次散射反照率;  $W_{i-1}$  为第  $i$  次碰撞前的权重;  $W_i$  为碰撞后的权重, 设初始权重  $W_0=1$ 。光子在沙尘暴中行进步长  $L$  后到达下一碰撞点, 其坐标变为:

$$x' = x + \mu_x L, y' = y + \mu_y L, z' = z + \mu_z L \quad (18)$$

如果光子所在位置  $z' < 0$  或  $z' > H$ , 则表示光子从沙尘暴中逃逸出去, 上述跟踪过程结束; 如果光子的权重因子小于设定的阈值 (文中取  $10^{-6}$ ), 则表示光子被吸收, 跟踪过程也结束。如果光子既没被吸收, 也没逃逸出去, 重复以上步骤, 直至光子到达接受界面。

跟踪  $N$  个光子 (取  $N=10^6$ ), 平均透过率的估值为:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_n \quad (19)$$

式中:  $W_n$  为第  $n$  个出射光子的权重, 则得光波在沙尘暴中传播单位距离的衰减率计算式为:

$$A = -\frac{10}{H} \log T \quad (20)$$

### 3.3 衰减率计算结果

根据以上单次散射和多重散射的计算方法, 选取模态 1 和模态 7 两种不同尺度分布的沙尘暴, 以典型波长 1.06 和 10.6  $\mu\text{m}$  为例, 基于 Matlab 编程, 首先计算比较了两种散射相应的衰减率与可见度的关系, 结果如图 6 所示。可以看出, 每种模态沙尘暴相应的两种散射衰减率计算结果存在明显差异, 基于多重散射的衰减率小于同一条件下的单次散射衰减率, 差异随可见度的增大而减小; 模态 7 沙尘暴对于 1.06  $\mu\text{m}$  近红外的两种散射衰减率计算结果差异最大, 对于 10.6  $\mu\text{m}$  长波红外衰减率计算结果差异相对较小, 主要缘于模态 7 沙尘暴在近红外的反照率很高 (图 5(a)), 则多重散射现象显著, 按照单次散射计算误差大。因此, 后面的分析计算只采用 3.2 节反映多重散射的 Monte Carlo 方法。

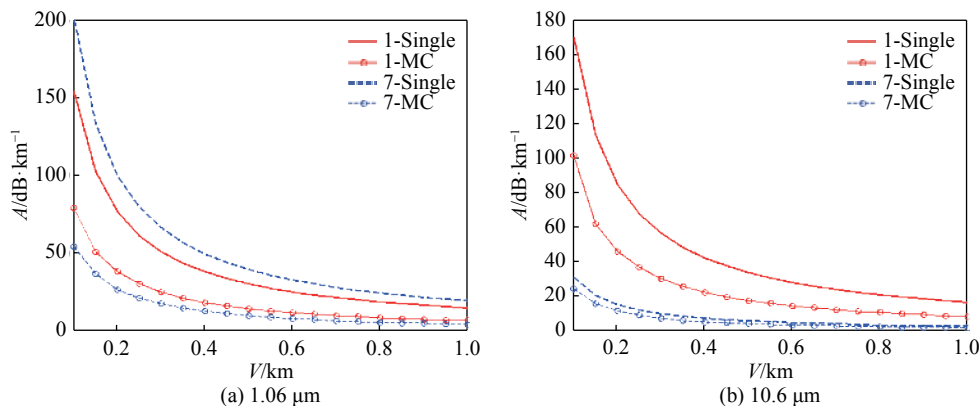


图 6 单次散射和多重散射计算结果比较

Fig.6 Comparison of calculation results based on single scattering and multiple scattering

图 7 是在可见度一定时 ( $V=1$  km), 基于多重散射的 Monte Carlo 方法计算得到的 7 种模态沙尘暴红外衰减率与波长的关系。显然, 可见度和波长相同时, 大颗粒 1~6 模态沙尘暴比第 7 种小颗粒模态沙尘暴的红外衰减强度大, 尤其是在  $12.5 \sim 20 \mu\text{m}$  范围的长波红外, 第 7 种模态沙尘暴的衰减率远小于前 6 种模

态沙尘暴的衰减率。图 7(a) 表明, 6 种大颗粒模态沙尘暴的衰减率除有小幅度震荡外, 基本呈现的是随着波长的增大而增大的趋势。波长处于  $0.86 \sim 5.8 \mu\text{m}$  范围时, 1 和 2 模态沙尘暴小于其余 4 种模态沙尘暴的衰减率; 在  $8 \sim 20 \mu\text{m}$  长波红外, 1 和 2 模态沙尘暴明显大于其余 4 种模态沙尘暴的衰减率。

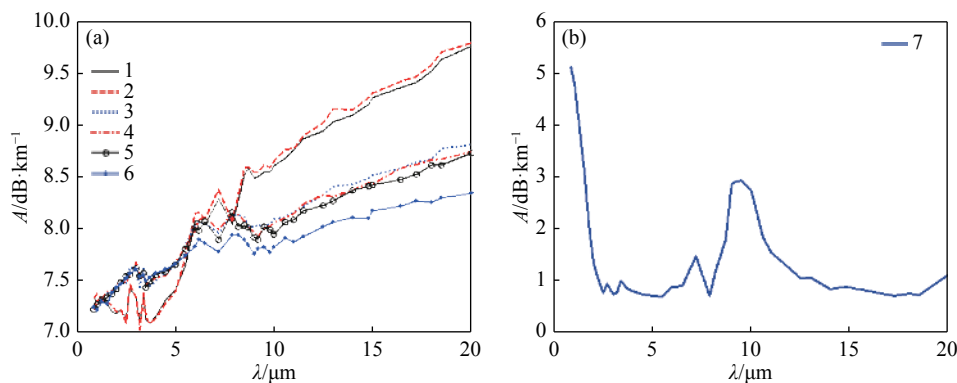


图 7 7 种模态沙尘暴衰减率与波长的关系

Fig.7 Relationship between attenuation rate and wavelength of 7 kinds of modes

从图 7(b) 可以看出, 第 7 种小颗粒模态沙尘暴的衰减率随波长变化有明显的起伏, 在  $0.86 \mu\text{m}$  近红外附近, 衰减率的值相对较大, 但随波长增大至  $2.5 \mu\text{m}$  时, 衰减率急剧下降至最小, 而后在  $2.5 \sim 6.5 \mu\text{m}$  范围内衰减率对波长不很敏感, 在  $7.9 \sim 9.0 \mu\text{m}$  范围内衰减率随波长增大又快速增大, 在  $10 \sim 12.5 \mu\text{m}$  范围内衰减率随波长增大又快速减小, 而后在  $13 \sim 20 \mu\text{m}$  范围内衰减率对波长不敏感, 变化幅度不大。

的变化情况基本趋势大致一致, 但并不完全相同, 主要原因是消光系数的计算是仅仅考虑单次散射的情况, 而图 7 各模态衰减率的计算是考虑了多重散射得到的结果, 沙尘暴中的沙粒浓度大, 造成的多重散射现象比较明显, Monte Carlo 方法计算时不仅要利用消光系数  $\mu$ , 还要涉及反照率  $\omega$  和不对称因子  $g$ , 因此, 图 7 的衰减率比消光系数更能全面反映沙尘暴对红外辐射的影响。

比较图 4(c)、图 5(c) 和图 7, 不难看出, 在可见度相同时, 同种模态沙尘暴的消光系数和衰减率随波长

图 8 是对于几个典型红外波长, 基于 Monte Carlo 方法计算得到的 7 种模态沙尘暴衰减率随可见度的



变化情况。结果表明,6种大颗粒模态的沙尘暴对1.06 μm 的近红外衰减率基本相同,对于10.6 μm 和20 μm 的长波红外而言,1~2模态的沙尘暴比其余几

种模态的沙尘暴衰减程度更强一些,各种模态沙尘暴衰减率随可见度的增大而减小。相同条件下,7模态沙尘暴的衰减率相对最小。

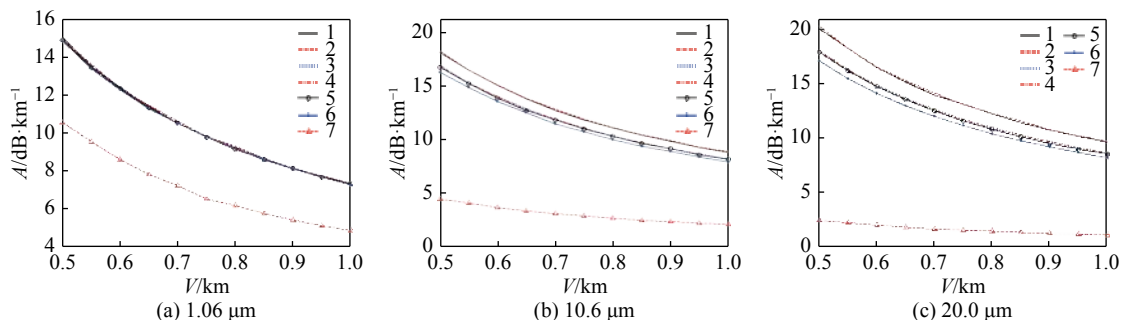


图 8 衰减率与可见度的关系

Fig.8 Relationship between attenuation rate and visibility

### 4 结 论

沙尘暴对红外信号强度的衰减影响与沙尘暴粒子的尺度分布、沙粒复折射率及波长有密切关系,沙尘暴模态和复折射率参数不同,即使对于相同的波长,计算结果也不同。文中基于国内七种不同模态的沙尘暴,分析计算了其红外消光和衰减特性。研究结果表明,对于小尺寸的沙尘粒子,在近、中波红外,消光效应主要是散射作用的结果,对于大尺寸的沙尘粒子,红外消光是吸收和散射共同作用的结果。

沙尘暴对红外辐射信号强度的影响最终归结为其对信号的衰减程度如何,在沙尘暴天气条件下,大气中的沙尘粒子比较浓密,能见度较低,这时,单次散射很难真实的反映沙尘暴天气的实际散射衰减情况,需要考虑多次散射的影响。基于多重散射的衰减率小于同一条件下的单次散射衰减率,差异随可见度的增大而减小。

大颗粒模态沙尘暴比小颗粒模态沙尘暴的红外衰减强度大,尤其是在12.5~20 μm 范围的长波红外,小颗粒模态沙尘暴的衰减率远小于大颗粒模态沙尘暴的衰减率。大颗粒模态沙尘暴的衰减率除有小幅震荡外,基本呈现的是随着波长的增大而增大的趋势,六种大颗粒模态的沙尘暴在近红外衰减率基本相同。在0.86~5.8 μm 波长范围内,1~2模态沙尘暴小于其余4种大颗粒模态沙尘暴的衰减率,在8~20 μm 长波红外,1~2模态沙尘暴明显大于其余4种大颗粒模态沙尘暴的衰减率。小颗粒模态沙尘暴的衰减率随

波长的变化有明显的起伏,在7.9~12.5 μm 范围内有峰值,在13~20 μm 范围内衰减率对波长不敏感。同种模态的沙尘暴其消光系数和衰减率随波长的变化情况不完全相同,主要原因是消光系数的定义和计算是基于单次散射, Monte Carlo 方法计算的多重散射衰减率比消光系数更能全面反映沙尘暴对红外辐射的影响。

研究结果对于红外探测、遥感和通信系统在沙漠和干旱地区的应用提供一定的参考价值。

### 参 考 文 献:

- [1] Ansari A J, Evans B G. Microwave propagation in sand and dust storms [J]. *IEE Proc F-Commun Radar & Signal Process*, 1982, 129(5): 315-322.
- [2] Gang Hong, Ping Yang, Fuzhong Weng. Microwave scattering properties of sand particles: Application to the simulation of microwave radiances over sandstorms [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2008, 109: 684-702.
- [3] Dong Qunfeng, Li Yingle, Xu Jiadong, et al. Effect of sand and dust storms on microwave propagation [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2013, 61(2): 910-916.
- [4] Zhou Wang, Zhou Dongfang, Hou Deting, et al. Calculation and simulation of sand and dust attenuation in microwave propagation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8): 1259-1262. (in Chinese)

周旺,周东方,侯德亭,等.微波传输中沙尘衰减的计算与仿真[J].*强激光与粒子束*,2005,17(8):1259-1262.

- [5] Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. The absorption and extinction of infrared radiation in lower atmosphere by sand storm [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2003, 18(1): 43–47. (in Chinese)  
李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 沙尘暴对低层大气红外辐射的吸收和衰减[J]. *电波科学学报*, 2003, 18(1): 43–47.
- [6] Wu Zhensen, You Jinguang, Yang Ruike. Study on laser attenuation character in sand and dust storms [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(9): 1075–1080. (in Chinese)  
吴振森, 由金光, 杨瑞科. 激光在沙尘暴中的衰减特性研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(9): 1075–1080.
- [7] Li Xuebin, Xu qingshan, Wei Heli. Extinction character of one sand and dust blowing [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 566–567. (in Chinese)  
李学彬, 徐青山, 魏合理. 1次沙尘暴天气的消光特性研究[J]. *激光技术*, 2008, 32(6): 566–567.
- [8] Dong Qunfeng, Li Yingle, Xu Jiadong, et al. Study on infrared attenuation characteristics of sand and dust [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(2): 4–6. (in Chinese)  
董群峰, 李应乐, 许家栋, 等. 沙尘的红外衰减特性研究[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(2): 4–6.
- [9] Yang Ruike, Zhu Chuanshuai, Liu Kexiang. Backscattering enhancement for infrared wave in sand and dust storm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0104006. (in Chinese)  
杨瑞科, 朱传帅, 刘科祥. 红外波在沙尘暴中的后向散射增强[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(1): 0104006.
- [10] Yang Yufeng, Li Ting, Li Jianxun, et al. Study on scattering characteristics of sand and dust in the infrared waveband commonly used in FSO [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0604004. (in Chinese)  
杨玉峰, 李挺, 李建勋, 等. 沙尘在FSO常用红外波段的散射特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(6): 0604004.
- [11] Shi Guangyu. Atmospheric Radiation Science[M]. Beijing: Science Press, 2007: 367–368 (in Chinese).  
石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 367–368.
- [12] Ahmed A S. Role of particle-size distributions on millimetre-wave propagation in sand/dust storms [J]. *Microwaves, Antennas and Propagation*, 1987, 134(1): 55–59.
- [13] Dong Qingsheng. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1997, 12(1): 15–21. (in Chinese)  
董庆生. 我国典型沙区中沙尘的物理特性[J]. *电波科学学报*, 1997, 12(1): 15–21.
- [14] Niu Shengjie, Sun Jimin, Chen Yue, et al. Observation and analysis of mass concentration of dust and sand aerosol in spring in Helanshan Area [J]. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(1): 82–87. (in Chinese)  
牛生杰, 孙继明, 陈跃, 等. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J]. *高原气象*, 2001, 20(1): 82–87.
- [15] Yang Ruike, Su Zhenling, Liu Kexiang. Influence of multiple scattering on attenuation of millimeter wave propagation in sand and dust storm [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(3): 530–533. (in Chinese)  
杨瑞科, 苏振玲, 刘科祥. 沙尘暴多重散射对毫米波衰减影响研究[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(3): 530–533.
- [16] Wang Hongxia, Zhu Youzhang Tian Tao, et al. The characteristics of laser transmission in different types of aerosol [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(2): 024214. (in Chinese)  
王红霞, 竹有章, 田涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024214.
- [17] Seyoung M, Dongyun K, Eunji S. Monte Carlo study of coherent diffuse photon transport in a homogeneous turbid medium: a degree-of-coherence based approach [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(3): 336–345.