

## 沙尘气溶胶粒子数量浓度计算及激光传输特性

杨玉峰<sup>1</sup>, 秦建华<sup>1</sup>, 李 挺<sup>1</sup>, 姚 柳<sup>2</sup>

- (1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;
2. 西安热工研究院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 沙尘气溶胶粒子的数量浓度很难直接测量, 但又是影响激光传输特性最主要的因素之一。基于沙尘气溶胶粒子的质量浓度, 利用其粒径分布特性推导出了粒子数量浓度的计算公式。利用 Mie 理论和 Monte Carlo 方法研究了激光在沙尘条件下的传输特性, 分析了激光的传输衰减和透射率随波长和质量浓度的变化关系, 给出了能见度随粒子质量浓度的变化曲线, 并对两种方法的计算结果进行了比较。结果表明: 在选择的几个波长中, 激光在波长为 10.6  $\mu\text{m}$  时的传输衰减最小(仅为 1.06  $\mu\text{m}$  时的 58% 左右), 并且随着质量浓度的增加能见度先是迅速降低而后缓慢降低, 其变化趋势接近双曲线。该方法基于粒子的质量浓度(可直接测量)计算沙尘气溶胶的激光传输特性, 在实际应用中具有非常重要的理论意义。

**关键词:** 数量浓度; 质量浓度; 传输; Monte Carlo 方法

中图分类号: TN012 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.S106006

## Calculation for the number concentration of dust aerosol particles and characteristics of laser transmission

Yang Yufeng<sup>1</sup>, Qin Jianhua<sup>1</sup>, Li Ting<sup>1</sup>, Yao Liu<sup>2</sup>

- (1. School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Thermal Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The number concentration of dust aerosol particles is hard to be directly measured, but it is one of the most important factors affecting the laser transmission characteristics. Based on the mass concentration of dust aerosol particles, using the size distribution of particles, the formula for calculating the number concentration of particles was deduced. Under the condition of sand and dust, the transmission characteristics of laser was studied by using Mie theory and Monte Carlo method, the relationship of the transmission attenuation and transmittance with wavelength and the mass concentration were analyzed, curve of visibility along with particle mass concentration was given, and the calculation results of Mie theory and Monte Carlo method were compared. The results show that, in the choice of several wavelengths, the transmission attenuation is minimum when wavelength is 10.6  $\mu\text{m}$  (about 58% of that in the 1.06  $\mu\text{m}$ ), with the increase of mass concentration, the visibility decreased rapidly and then decreased

收稿日期: 2017-06-14; 修订日期: 2017-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(61405157, 61377080); 陕西省自然科学基金(2016JM1018)

作者简介: 杨玉峰(1980-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事目标散射特性及激光在大气中的传输特性方面的研究。

Email: yangyufeng@xaut.edu.cn

通讯作者: 秦建华(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光通信和大气传输方面的研究。Email: 1342818640@qq.com

slowly, whose trend is near hyperbolic curve. The method, basing on the mass concentration of particles (this parameter can be measured directly), can calculate the laser transmission characteristics of dust aerosol, which has very important theoretical significance in practical application.

**Key words:** number concentration; mass concentration; transmission; Monte Carlo method

## 0 引言

沙尘暴在我国乃至世界都是一种常见的灾害性天气,它对飞机正常起飞、光学天文望远镜探测、光学遥感成像、光学武器部署、无线激光通信等都有重要的影响。20 世纪的前 50 年,我国发生过 17 次沙尘暴天气;20 世纪 50 年代至今发生了超过 50 次大的沙尘暴天气,发生的周期越来越短<sup>[1]</sup>。据统计<sup>[2]</sup>,从 20 世纪 90 年代起,仅我国每年因沙尘天气造成的直接损失达 540 亿元,伤亡人数也在逐渐增加,造成危害的主要因素是大气能见度。全球陆地的大气能见度在过去数十年间呈普遍降低的趋势,以过去十年在亚洲降低幅度最大。因低能见度天气引发的交通事故和航班延误频繁发生,造成的经济损失和人员伤亡呈逐年上升趋势。除此之外,海洋中的沙尘也是影响海洋环境的重要因素,对海洋环境的激光探测,水下潜艇的无线激光通信都有重要的影响。因此,研究激光在沙尘条件下的传输特性及能见度具有重要的现实意义。

大气能见度是反映大气透明度的一个指标,当激光传输时受到气溶胶粒子散射和吸收使传输效率不断衰减,严重影响传输效率以及能见度。影响激光大气传输特性最主要的因素是气溶胶的粒子数浓度,粒子数浓度越大能见度越低。2007 年 Liu Xingang<sup>[3]</sup>等计算了不同气溶胶的散射系数和消光系数,并拟合了粒子质量浓度和大气能见度之间的关系,但给出的只是特定区域沙尘能见度的经验方法。2010 年 Yuji Zaizen<sup>[4]</sup>等研究了气溶胶的粒子数浓度和物理特性,计算了不同粒子数浓度的消光系数,发现粒子数浓度越高对应的消光系数也越大。2014 年 Atsushi Shimizu<sup>[5]</sup>等也对沙尘气溶胶粒子的消光系数与数量浓度之间的关系进行了研究,计算了不同粒子数浓度的气溶胶的消光系数。2015 年胡帅<sup>[6]</sup>等采用 Monte Carlo 方法研究了非球形气溶胶的透射率,并与标量 Monte Carlo 方法对比,矢量辐射传输方案计

算得到的光波透射率略大。许文忠<sup>[7]</sup>等对沙尘粒子尺寸分布进行了分析,并分别利用 Mie 理论和 Monte Carlo 方法分析了衰减和能见度的关系,结果表明单次散射条件下沙尘粒子的散射主要受尺寸参数影响,能见度较低时必须考虑多次散射的影响。S. Verma<sup>[8]</sup>等研究了不同气溶胶下的消光性能,发现气溶胶的消光系数不仅和季节变化有关,而且粒子数浓度越高,对消光性能贡献越大。

大气能见度虽然可以采用粒径谱分析的方法获得,但过程很复杂,因此通常采用间接法获得,这样更容易操作。1997 年董庆生<sup>[9]</sup>等为了研究沙尘的物理特性,利用平均粒径获得了沙尘粒子的数量浓度,但沙尘气溶胶中不同粒径范围的粒子数量差别很大,因此该方法计算误差较大。2011 年黄正旭<sup>[10]</sup>等利用单颗粒气溶胶质谱仪测量了气溶胶的粒子数浓度,该仪器虽然可以直接测量气溶胶的粒子数浓度,但是检测效率较低,耗时较长,粒径的检测范围也很小,并且仪器价格昂贵,稳定性差,工程实用性不强。2013 年王红霞<sup>[11]</sup>等为了研究激光在不同类型气溶胶中的传输特性,利用能见度获得了气溶胶粒子的数量浓度,但这种方法也是基于经验公式的估计,对于不同质量浓度的气溶胶无法适用。2015 年胡帅<sup>[12]</sup>等基于近红外散射数据对气溶胶大的尺度谱进行了反演;利用对数正态分布描述沙尘气溶胶的粒径分布,并分别研究了沙尘性、海盐性和可溶性气溶胶条件下的大气折射对辐射传输的影响,结果表明沙尘性和海盐性气溶胶条件下,大气折射对辐射传输的影响明显强于可溶性气溶胶的情形<sup>[13]</sup>。2016 年杨瑞科<sup>[14]</sup>等对沙尘粒子采用对数分布函数描述,并分别利用 Mie 理论和 Monte Carlo 方法研究了传输衰减和能见度之间的关系,结果表明能见度越低时,沙尘暴中粒子的多重散射越明显,两种方法计算的差别逐渐变大。2017 年杨瑞科<sup>[15]</sup>等对沙尘粒子浓度和能见度的关系进行了研究,给出了粒子数随能见度变化的关系式,得出含小粒子数目较多的气溶胶对近红外波段的散射较强。

文中基于沙尘气溶胶粒子质量浓度的实测数据和沙尘粒子的粒径分布,提出了一种计算沙尘粒子数量浓度的方法并给出了计算公式,该方法相对于实验测量更简单,相对于经验模型更具理论依据。利用 Mie 理论对单个沙尘粒子的消光特性、散射特性进行了分析,结合遗传算法计算了沙尘粒子的数量浓度,研究了多个波长激光单次散射条件下的传输衰减和多次散射条件下的传输衰减,最后给出了沙尘条件下能见度随质量浓度的变化关系。

### 1 气溶胶尺寸分布及浓度

大气中沙尘气溶胶包含很多不同大小粒径的粒子,其粒径一般都是随机分布的。大量的理论和实验研究表明,采用对数正态分布函数能够更好地描述沙尘气溶胶粒子的尺寸分布<sup>[16]</sup>,该函数表示的概率密度函数为:

$$p(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln\sigma D} \exp\left(-\frac{(\ln D - \ln d)^2}{2\ln^2\sigma}\right) \quad (1)$$

式中: $d$ 与 $\sigma$ 分别为几何平均直径和标准差。当粒子

的直径为 $D(\text{mm})$ 时,其体积为:

$$V = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3 = \frac{\pi}{6}D^3 \quad (2)$$

设沙尘的质量浓度为 $w(\text{g}/\text{m}^3)$ ,一般情况下定义沙尘的比重 $G=2.65\times 10^6\text{g}/\text{m}^3$ ,则其质量浓度可表示为:

$$w = \frac{\pi}{6}GN_0\times 10^{-9}D^3 \quad (3)$$

对于具有一定尺寸分布的沙尘粒子,可以由下式求出其质量浓度:

$$w = \frac{\pi}{6}GN_0\times 10^{-9} \int_{D_1}^{D_2} D^3 p(D) dD \quad (4)$$

由上式中粒子的质量浓度转换为粒子的数量浓度:

$$N_0 = \frac{w}{\frac{\pi}{6}G\times 10^{-9} \int_{D_1}^{D_2} D^3 p(D) dD} \quad (5)$$

文中采用参考文献[17]中所获得的沙尘粒子的质量浓度分布,如表 1 所示。

将表中数据分别代入公式(4),可以得到方程组:

表 1 沙尘气溶胶粒子粒径分布和质量浓度

Tab.1 Particle size distribution and mass concentration of dust aerosol particles

Particle size range/ $\mu\text{m}$	<0.43	~0.65	~1.1	~2.1	~3.3	~4.7	~5.8	~9.0	>9.0
Mass concentration/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	32.3	26.1	33.1	68.3	69.0	51.7	30.0	37.0	58.3

$$\begin{cases} w1 = \frac{\pi}{6}GN_0\times 10^{-9} \int_{D_1}^{D_2} D^3 p(D) dD \\ w2 = \frac{\pi}{6}GN_0\times 10^{-9} \int_{D_1}^{D_2} D^3 p(D) dD \\ w3 = \frac{\pi}{6}GN_0\times 10^{-9} \int_{D_1}^{D_2} D^3 p(D) dD \end{cases} \quad (6)$$

$f_2^2+f_3^2$ 取最小值进行优化。显然,若方程组有解,则目标函数的最小值为零。求得的目标函数的值越接近于零,对应的方程组的解越精确。这样就把非线性方程组的求解问题转化为用遗传算法求解目标函数的最小值问题。

最后,拟合得到的对数正态分布三个参数分别为: $\ln d=-8.8465$ , $\ln\sigma=0.7174$ , $N_0=2.8839\times 10^9$ ,计算得到的沙尘气溶胶粒子的粒径分布如表 2 所示。

由以上方程组,利用遗传算法对目标函数 $G=f_1^2+$

表 2 沙尘气溶胶粒子的粒径分布和浓度

Tab.2 Particle size distribution and concentration of dust aerosol particles

Particle size range/ $\mu\text{m}$	<0.43	~0.65	~1.1	~2.1	~3.3	~4.7	~5.8	~9.0	>9.0	Total
Mass concentration/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	32.3	26.1	33.1	68.3	69.0	51.7	30.0	37.0	58.3	406.6
Particle number concentration/ $\text{m}^3$	$209.0\times 10^7$	$58.0\times 10^7$	$18.4\times 10^7$	$12.5\times 10^7$	$12.6\times 10^7$	$12.5\times 10^7$	$14.6\times 10^7$	$19.8\times 10^7$	$0.3\times 10^7$	357.7
Particle number concentration percentage	58.5%	16.2%	5.1%	3.5%	3.5%	3.5%	4.1%	5.5%	0.1%	100%

采用对数正态分布拟合得到沙尘气溶胶的粒径分布曲线如图 1 所示。

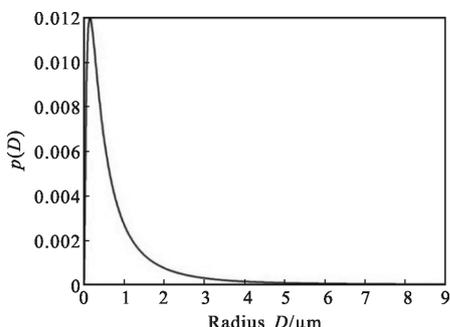


图 1 沙尘气溶胶粒子的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of dust aerosol particles

## 2 数值模拟及分析

根据 Lamber-Beer 定律<sup>[18-19]</sup>,当光强为  $I_0$  的激光通过距离为  $l$  的介质后,透射强度的表达式为:

$$I=I_0\exp\left[-\int_0^l \sigma(\lambda)dl\right] \quad (7)$$

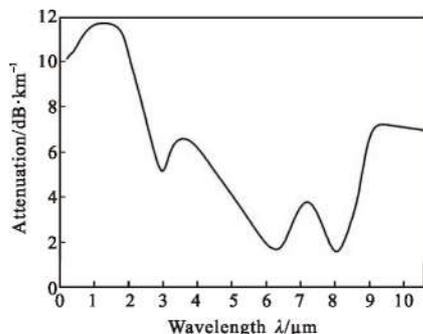
表 3 沙尘气溶胶的折射率

Tab.3 Refraction ratio of dust aerosol particles

$\lambda/\mu\text{m}$	0.200	0.250	0.400	0.633	0.860	1.060	10.600
Refraction ratio	1.53+0.07i	1.53+0.03i	1.53+0.008i	1.53+0.008i	1.53+0.008i	1.53+0.008i	1.62+0.12i

文中以浓度  $2745.8\mu\text{g}/\text{m}^3(3.0295\times 10^9/\text{m}^3)$  为例<sup>[16]</sup>,分别得到沙尘条件下的红外波段激光的传输衰减和透射率随波长变化的关系,如图 2 所示。

由图 2 可知,传输衰减随波长的变化趋势是先增大后减小再增大,当粒子质量浓度为  $2745.8\mu\text{g}/\text{m}^3$  时,  $1.6\mu\text{m}$  的激光传输衰减最大,在波长  $3.1、6.3、$



(a) 传输衰减

(a) Transmission attenuation

式中:  $\sigma(\lambda)$  为传输衰减,它表示粒子的消光能力,即对辐射的衰减能力。对于球形粒子,其计算公式如下:

$$\sigma(\lambda)=\int_{D_1}^{D_2} \frac{\pi D^2}{4} Q_p(D)dD \quad (8)$$

式中:  $D$  为沙尘粒子直径;  $D_1$  和  $D_2$  分别为粒子的下限直径和上限直径;  $Q_p$  为衰减因子;  $\sigma$  的物理意义为光每经过单位距离介质后的衰减率。

传输衰减(dB/km)为:

$$\sigma(\text{dB/km})=4.343\times\sigma(1/\text{km}) \quad (9)$$

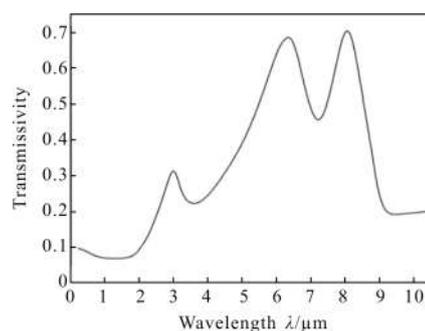
根据 Koschmieder 定律<sup>[20]</sup>,大气能见度和传输衰减关系为:

$$V=-\ln\varepsilon/\sigma \quad (10)$$

式中:  $\varepsilon$  为视觉对比阈值;  $V$  为能见度;  $\sigma$  为消光系数。

### 2.1 传输衰减随波长的变化关系

文中针对激光通信中常用的几个波长进行分析,根据参考文献[16]提供的复折射率数据,如表 3 所示。以下基于复折射率,利用 Mie 理论和 Monte Carlo 方法分别计算了沙尘气溶胶粒子的传输衰减。



(b) 透射率

(b) Transmissivity

图 2 传输衰减和透射率随波长的变化曲线

Fig.2 Variation curve of transmission attenuation and transmissivity with wavelength

$8.1\mu\text{m}$  的激光传输衰减取得极小值,并且  $6.3\mu\text{m}$  和  $8.1\mu\text{m}$  的激光传输衰减明显低于其他波段。透射率在波长  $3.1、6.3、8.1\mu\text{m}$  处取得极大值,在  $1.6、3.6、$

7.3 μm 处取得极小值,并且 6.3 μm 和 8.1 μm 的激光透射率明显大于其他波段,因此可以在这两个波长下进行激光通信。

### 2.2 传输衰减随粒子质量浓度的变化关系

图 3 利用 Mie 理论方法给出了几个常用波长的激光在沙尘气溶胶的传输衰减。由图 3 可知,传输衰减与粒子的质量浓度呈正比关系,激光在 0.2~10.6 μm 波段各波长之间的传输衰减随粒子数浓度的变化基本一致,而在 10.6 μm 的传输衰减增加较慢,当粒子质量浓度为 3 000 μg/m<sup>3</sup> 时,激光在 10.6 μm 波段的传输衰减仅为 5 dB。波长越大传输衰减越小,在已选的几个波长中,10.6 μm 时传输衰减最小,是进行无线激光通信的最佳选择。

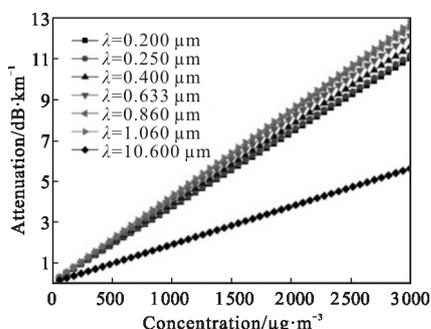


图 3 传输衰减随粒子质量浓度的变化曲线

Fig.3 Variation curve of transmission attenuation with particle mass concentration

图 4(a)和图 4(b)分别以 λ=1.06 μm 和 λ=10.6 μm 为例给出了激光的传输衰减随粒子质量浓度变化的 Monte Carlo 方法和 Mie 理论的计算结果。

由图 4 可知,两个波长具有相同的趋势,传输衰减与粒子质量浓度之间呈正比关系,利用 Monte Carlo 方法计算的结果比 Mie 理论计算的结果偏小,粒子质量浓度越大,二者偏差越大。其原因是沙尘粒子浓度越高,多次散射现象越明显,多次散射方法计算的传

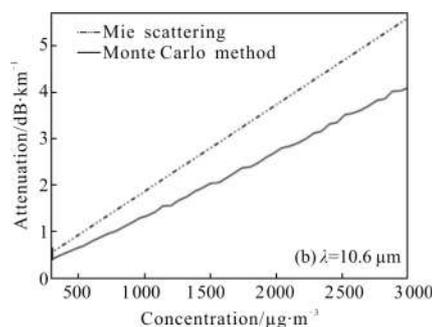
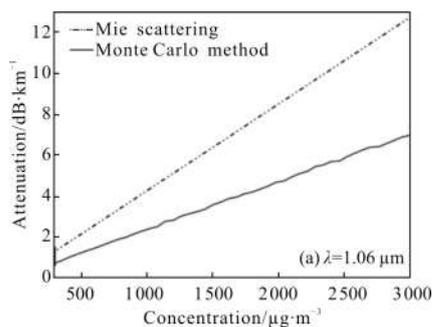


图 4 传输衰减随粒子质量浓度的变化曲线

Fig.4 Variation curve of transmission attenuation with particle mass concentration

输衰减更小。对比图 4(a)和图 4(b)可知,激光在波长为 10.6 μm 时的传输衰减仅为 1.06 μm 时的 58% 左右。因此,相比之下在沙尘条件下 10.6 μm 激光的传输性能更好。

### 2.3 透射率随粒子质量浓度变化关系

图 5(a)和图 5(b)分别为 λ=1.06 μm 和 λ=10.6 μm 时激光透射率随粒子质量浓度变化的 Monte Carlo 方法和 Mie 理论的计算结果。

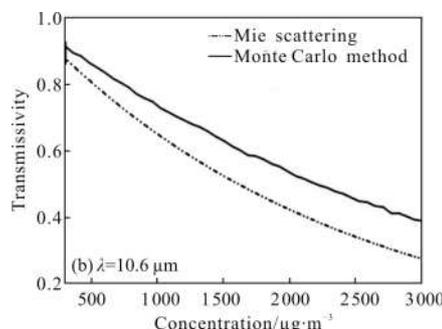
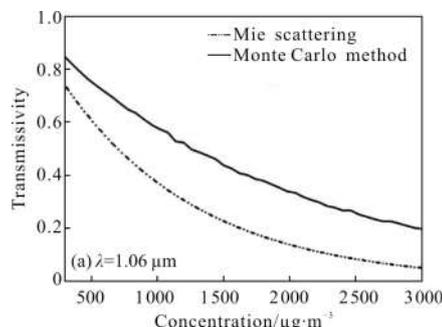


图 5 透射率随粒子质量浓度的变化曲线

Fig.5 Variation curve of transmissivity with particle mass concentration

由图 5 可知,两个波长具有相同的趋势:随着粒子质量浓度的增加透射率逐渐减小,利用 Monte Carlo 方法计算的结果比 Mie 理论计算的结果略大,

这说明多次散射方法计算的透射率更大。并且粒子的质量浓度越大,偏差就越大,表明随着粒子浓度的增大,多次散射在传输中起到的作用也越来越大。对比图 5(a)和图 5(b)可知,随着沙尘粒子浓度的增加,10.6 μm 激光的透射率比 1.06 μm 激光的透射率减慢。在 3000 μg/m<sup>3</sup> 时,利用 Monte Carlo 方法,波长 1.06 μm 时激光的透射率为 0.200 3,而在波长 10.6 μm 时对应的透射率为 0.389 6,增长了 18.93%,并且 10.6 μm 激光利用 Mie 理论和 Monte Carlo 两种方法计算的透射率差值更小。

### 2.4 能见度随粒子质量浓度变化关系

图 6 是能见度(波长选择人眼最敏感的绿光 0.55 μm)随粒子质量浓度变化的 Monte Carlo 方法和 Mie 理论的计算结果。

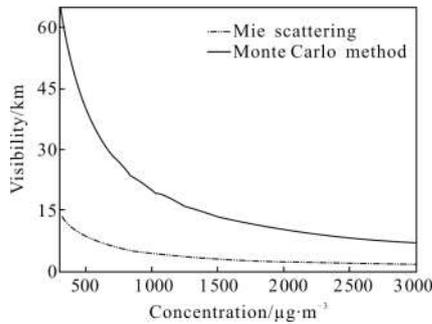


图 6 能见度随粒子质量浓度的变化曲线

Fig.6 Variation curve of visibility with particle mass concentration

由图 6 可知,两种方法计算的结果有共同趋势:随着粒子质量浓度的增大,能见度迅速下降。但因为粒子浓度越高,多次散射越明显,所以利用 Monte Carlo 方法计算的结果比利用单次散射计算的结果大,说明多次散射方法计算的传输距离更远,并且随着粒子质量浓度的增加,两者之间的差距呈减小趋势。利用 Monte Carlo 方法计算的能见度随沙尘粒子质量浓度的增加先是迅速降低而后缓慢降低,其变化趋势接近双曲线。

### 3 结论

文中基于沙尘粒子的质量浓度,利用沙尘气溶胶的粒径分布对其质量浓度进行了分析,推导出由质量浓度获得数量浓度的计算公式,根据该公式可以很方便地计算出沙尘气溶胶粒子的数量浓度。

根据沙尘的复折射率和单个沙尘粒子的消光系

数、散射截面、散射特性分析了各波长激光在沙尘条件下的传输衰减。传输衰减随粒子浓度的增加呈上升趋势,入射光为 10.6 μm 的传输衰减比入射光为 1.06 μm 的传输衰减小。随着粒子质量浓度的增加,能见度迅速下降,由于多次散射的缘故, Monte Carlo 方法计算的能见度更高,并且随着沙尘粒子质量浓度的增加先是迅速降低而后缓慢降低,其变化趋势接近双曲线。

### 参考文献:

- [1] Shi Peijun, Yan Ping, Gao Shangyu, et al. Theduststorm disaster in China and its research progress [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(3): 71-77. (in Chinese)  
史培军, 严平, 高尚玉, 等. 我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 71-77.
- [2] Ding Wei. Perspective on the present situation of land desertification [EB/OL].[2001-06-15]http://www.people.com.cn/GB/huanbao/57/20010615/489362.html.
- [3] Liu Xinguang, Gu Jianwei, Li Yunping, et al. Increase of aerosol scattering by hygroscopic growth: observation, modeling, and implications on visibility [J]. *Atmospheric Research*, 2013, S132-133: 91-101.
- [4] Zaizen Y, Naoe H, Takahashi H, et al. Number concentrations and elemental compositions of aerosol particles observed at Mt. Kiso-Komagatake in central Japan, 2010 -2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 90(2): 1-9.
- [5] Shimizu A, Sugimoto N, Matsui I, et al. Direct comparison of extinction coefficients derived from Mie-scattering lidar and number concentrations of particles, subjective weather report in Japan [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2015, 153: 77-87.
- [6] Hu Shuai, Gao Taichang, Liu Lei, et al. Simulation of radiation transfer properties of polarized light in non-spherical aerosol using Monte Carlo method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(9): 094201. (in Chinese)  
胡帅, 高太长, 刘磊, 等. 偏振光在非球形气溶胶中传输特性的 Monte Carlo 仿真[J]. 物理学报, 2015, 64(9): 094201.
- [7] Xu Wenzhong, Zhong Kai, Mei Jialin, et al. THz wave attenuation characteristics in sand and dust.[J] *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 523-527. (in Chinese)  
许文忠, 钟凯, 梅嘉林, 等. 太赫兹波在沙尘中衰减特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 523-527.
- [8] Verma S, Priyadharshini. B, Pani S K, et al. Aerosol

- extinction properties over coastal West Bengal Gangetic plain under inter-seasonal and sea breeze influenced transport processes[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 167: 224–236.
- [9] Dong Qingsheng. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1997(1): 15–25. (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(1): 15–25.
- [10] Huang Zhengxu, Li Mei, Li Lei, et al. Progress in research of single partical aerosol mass spectrometer [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2011, 17 (4): 562–566.(in Chinese)  
黄正旭, 李梅, 李磊, 等. 单颗粒气溶胶质谱仪研究进展[J]. 上海大学学报自然科学版, 2011, 17(4): 562–566.
- [11] Wang Hongxia, Zhu Youzhang, Tian Tao, et al. Characteristics of laser transmission in different types of aerosols[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 316–325. (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): 316–325.
- [12] Hu Shuai, Gao Taichang, Li Hao, et al. Regularized inversion method for retrieving aerosol size distribution based on volume scattering function data at near-infrared waveband [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 17–26. (in Chinese)  
胡帅, 高太长, 李浩, 等. 基于近红外体散射数据的气溶胶尺度谱正则化反演方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 17–26.
- [13] Hu Shuai, Gao Taichang, Li Hao, et al. Influence of atmospheric refraction on radiative transfer at visible light band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(18): 259–276. (in Chinese)  
胡帅, 高太长, 李浩, 等. 大气折射对可见光波段辐射传输特性的影响[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 259–276.
- [14] 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.
- [15] Yang Ruike, Zhu Chuanshuai, Liu Kexiang. Backscattering enhancement for infrared wave in sand and dust storm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 87–93. (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): 87–93.
- [16] 尹宏. 大气辐射学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 73–75.
- [17] Hao Li, Yang Wen, Wu Tongwen, et al. Optical prooerties and radiative forcing effect of dust aerosol [J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(6): 1477–1482. (in Chinese)  
郝丽, 杨文, 吴统文, 等. 沙尘气溶胶的光学特性及辐射强迫效应[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1477–1482.
- [18] Wang Rongrong, Wu Zhengsen, Zhang Yanyan, et al. Transmission characteristics of terahertz signal in fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2662–2667. (in Chinese)  
王蓉蓉, 吴振森, 张艳艳, 等. 太赫兹波段信号在雾中的传输特性研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2662–2667.
- [19] Cui Haixia, Yao Jianquan, Zhong Kai, et al. The study on atmosphere propagation feature of THz wave [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(S): 238–239. (in Chinese)  
崔海霞, 姚建铨, 钟凯, 等. 太赫兹波大气传输特性研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(S): 238–239.
- [20] Bendix J. Determination of fog horizontal visibility by means of NOAA –AVHRR [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quantitative Remote Sensing for Science and Applications', IEEE Xplore, 1995: 1847–1849.