

沙尘在 FSO 常用红外波段的散射特性研究

杨玉峰¹, 李 挺¹, 李建勋¹, 王昭雷²

- (1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;
2. 国家电网河北省电力公司检修分公司, 河北 石家庄 050070)

摘 要: 研究红外波段沙尘的散射特性对自由空间光通信(FSO)具有重要的理论意义。针对 FSO 常用的几个红外波长, 采用 Mie 理论对激光在不同沙尘粒径下的散射特性进行了分析; 基于粒子尺寸的对数正态分布模型, 计算了沙尘条件下红外波段(0.76~10.6 μm)激光的传输衰减率。结果表明: 在沙尘条件下, 7.4~8.0 μm 这一波段附近的传输衰减最小, 并且明显低于其他波段。因此, 可以选用 7.4~8.0 μm 这一波段的激光进行沙尘条件下的激光通信, 其传输性能会明显优于其他波段。最后, 以波长 1.064 μm 为例, 分析了“能见度”随粒子浓度的变化关系, 并与蒙特卡罗方法的计算结果进行了比较。

关键词: 散射特性; 传输衰减; 沙尘气溶胶; 对数正态分布

中图分类号: TN012 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0604004

Study on scattering characteristics of sand and dust in the infrared waveband commonly used in FSO

Yang Yufeng¹, Li Ting¹, Li Jianxun¹, Wang Zhaolei²

- (1. School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Maintenance Branch, State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050070, China)

Abstract: Research on scattering characteristics of sand and dust in the infrared waveband has important theoretical significance for Free Space Optical (FSO) communication. According to some infrared wavelength commonly used in FSO, its scattering characteristics in different particle sizes of sand and dust were analyzed by Mie theory; based on log-normal distribution model of particle size, the attenuation coefficient of laser in waveband 0.76–10.6 μm were calculated under the condition of sand and dust. The results show that: the transmission attenuation near waveband 7.4–8.0 μm are minimum under the condition of sand and dust, and it's significantly lower than that in other wavebands. Therefore, the laser in waveband 7.4–8.0 μm should be chosen to be used in FSO under the condition of sand and dust, for that its transmission performance will be obviously better than that in other wavebands. At last, take wavelength 1.064 μm as an example, the "visibility" with the change of particle concentration was analyzed, and the result was compared with that by Monte Carlo method.

Key words: scattering characteristic; transmission attenuation; dust aerosol; log-normal distribution

收稿日期: 2016-10-10; 修订日期: 2016-11-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61405157); 陕西省自然科学基金(2015JM6270); 陕西省工业科技攻关项目(2016GY-086); 西安市产学研协同创新项目(CXY1509)

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

Email: yangyufeng@xaut.edu.cn

通信作者: 李挺(1993-), 男, 硕士生, 主要从事光通信和大气散射方面的研究。Email: 731529430@qq.com

0 引言

大气气溶胶作为影响 FSO 信道的主要因素,近年来已经成为国内外研究的一个热点方向。沙尘作为一种大气气溶胶,是影响 FSO 质量最重要的因素之一,因此研究激光在沙尘条件下的传输和散射特性对提高 FSO 的质量具有重要意义。

2010 年 Michael J. Wolff^[1]等人研究了紫外光在沙尘气溶胶中散射特性,并计算了沙尘气溶胶粒子的单次反照率和极化率。对沙尘条件下近场紫外光通信具有一定的指导意义。2012 年 V. Sreekanth^[2]等提出了一种柱形沙尘气溶胶粒子散射特性的计算方法,并计算了柱形沙尘气溶胶粒子的光学厚度(AOD)和气溶胶指数(AI)。该模型的提出对研究柱形气溶胶粒子的散射特性具有重要意义。同年, Timo Nousiainen^[3]等采用 T-Matrix 方法研究了高斯随机球、片状物、火山灰和球体聚合物等不规则体的散射特性,计算了它们的散射强度和极化度。这对于研究不规则物体的散射特性具有重要意义,使得计算结果与实际情况更加吻合。

目前,国内对于沙尘气溶胶的光学特性的研究还相对较少。2004 年李曙光^[4]等研究了沙尘暴天气对大气能见度的影响,计算了可见光波段在沙尘气溶胶中的消光特性和散射特性。然而可见光在沙尘中的传输衰减较大,在进行远距离激光通信时对通信系统的影响较大。2010 年郝丽^[5]等分析了从远红外到紫外光波段沙尘气溶胶的光学参数随波长的变化特征。但是该文没有将其结果应用于针对 FSO 的研究,缺乏对 FSO 所关注的主要参数的分析。2015 年许文忠^[6]等研究了太赫兹波在沙尘大气中的衰减特性,并分别采用 Mie 理论和 Monte Carlo 方法计算了单次散射和多次散射下传输衰减和能见度的关系。然而大气中的水雾粒子对太赫兹波有明显的吸收作用,因此在大气环境下进行通信时一般不采用太赫兹波,而采用大气传输特性较好的红外波段和其他波段。文中针对 0.76~10.6 μm 的红外波段进行了研究,分析了沙尘气溶胶的单粒子散射特性并计算了该波段在沙尘条件下的衰减系数和“能见度”。

1 原理与方法

卫晓东^[7]等指出,在可见光区和长波区,沙尘形状对沙尘气溶胶消光效率因子、单次散射反照率以及不对称因子的影响明显偏小。因此,在红外波段可以忽略非球形粒子对实验结果造成的误差,从而将沙尘粒子当做球形粒子进行分析。对此,可以采用 Mie 理论对沙尘气溶胶粒子的散射特性进行分析。

根据 Mie 理论,衰减因子 Q_e , 散射因子 Q_s , 吸收因子 Q_a 定义如下^[8-9]:

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

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

$$Q_e = Q_a + Q_s \quad (3)$$

式中: a_n, b_n 为 Mie 散射系数,其表达式为:

$$a_n = \frac{\psi_n(\alpha)\psi_n'(m\alpha) - m\psi_n'(\alpha)\psi_n(m\alpha)}{\xi_n(\alpha)\psi_n'(m\alpha) - m\xi_n'(\alpha)\psi_n(m\alpha)} \quad (4)$$

$$b_n = \frac{m\psi_n(\alpha)\psi_n'(m\alpha) - \psi_n'(\alpha)\psi_n(m\alpha)}{m\xi_n(\alpha)\psi_n'(m\alpha) - \xi_n'(\alpha)\psi_n(m\alpha)} \quad (5)$$

式中: $\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$ 为散射颗粒的尺寸参数; r 为散射颗粒的半径; λ 为入射光波长; m 是散射颗粒与周围介质的相对折射率,对于非吸收性颗粒 m 为实数,对于导体或吸收性颗粒, m 为复数,其虚部是颗粒对光吸收的量化。

由散射系数 a_n 和 b_n 的公式(4)、(5)可知求解的目标在于推导出 $\psi_n(\alpha)$ 、 $\xi_n(\alpha)$ 、 $\psi_n'(z)$ 、 $\xi_n'(z)$ 的递推公式,其表达式如下:

$$\psi_n(z) = \frac{2n-1}{z} \psi_{n-1}(z) - \psi_{n-2}(z) \quad (6)$$

$$\psi_n'(z) = -\frac{n}{z} \psi_n(z) + \psi_{n-1}(z) \quad (7)$$

$$\xi_n(z) = \frac{2n-1}{z} \xi_{n-1}(z) - \xi_{n-2}(z) \quad (8)$$

$$\xi_n'(z) = -\frac{n}{z} \xi_n(z) + \xi_{n-1}(z) \quad (9)$$

公式(6)、(7)中散射角函数 $\pi_n(\cos\theta)$ 和 $\tau_n(\cos\theta)$ 满足如下递推关系:

$$\pi_n = \frac{2n-1}{n-1} \pi_{n-1} \cos\theta - \frac{n}{n-1} \pi_{n-2} \quad (10)$$

$$\pi_n' = (2n-1)\pi_{n-1} + \pi'_{n-2} \quad (11)$$

$$\tau_n = \pi_n \cos\theta - \pi_n' \sin^2\theta \quad (12)$$

在编程计算的过程中,需要对迭代次数 N 设置合适的值,使得计算结果既满足一定的计算精度,又不会占用过多的内存资源。文中采用 Wiscombe^[10]提出的经验公式进行编程求解,其表达式如下:

$$N = \begin{cases} x+4x^{1/3}+1 & (0.02 \leq x \leq 8) \\ x+4.5x^{1/3}+1 & (8 < x < 4\ 200) \\ x+4x^{1/3}+2 & (4\ 200 \leq x \leq 20\ 000) \end{cases} \quad (13)$$

2 沙尘气溶胶的复折射指数

复折射指数是表征粒子光学参量的一个基本参数,由实部和虚部两部分组成。实部表征粒子对光的散射能力,其绝对值越大相应的散射能力也越大;虚部表征粒子对光的吸收能力,其绝对值越大相应的吸收能力也越大^[11]。文中采用最新的 HITRAN2012 数据库^[12]所提供的沙尘气溶胶粒子的复折射率,对红外波段(0.76~10.6 μm)的光学特性进行分析,该波段的折射率实部和虚部如图 1 所示。

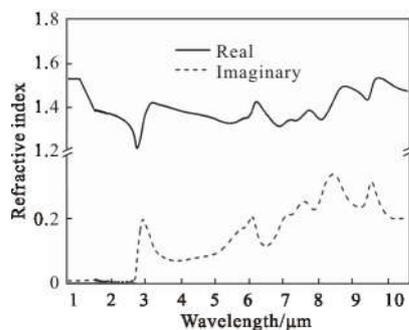


图 1 沙尘粒子的复折射率

Fig.1 Complex refractive index of dust particles

3 沙尘气溶胶的粒径分布

大气中的沙尘气溶胶包含了各种不同尺寸大小的粒子,其半径通常是随机分布的,为方便研究通常采用一些随机分布函数来表示。大量实验和数据表明,对数正态分布函数能够较好地拟合沙尘气溶胶的粒径分布^[7,13]。

采用对数正态分布来表示沙尘气溶胶的粒径分布,其表达式如下:

$$n(r) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\lg r - \lg r_0)^2}{\sigma^2}\right] \quad (14)$$

式中: N 为气溶胶的浓度(个/ m^3); r 为粒子半径; r_0 为众数半径; σ 为几何标准差。

文中采用参考文献[5]中扬尘天气下沙尘气溶胶粒子浓度的粒径分布,如表 1 所示。

表 1 沙尘气溶胶粒子浓度的粒径分布

Tab.1 Particle distribution of particle concentration of dust aerosol

Item	Value								
Particle size/ μm	<0.43	~0.65	~1.1	~2.1	~3.3	~4.7	~5.8	~9.0	>9.0
Quality concentration/ $\mu g \cdot m^{-3}$	67.3	68.1	83.1	192.5	151.3	169	105.5	185	178
Particle amount concentration/ $10^6/m^3$	609.6	392.1	190.5	80.3	11.8	3.39	0.732	0.617	0.17
Particle amount concentration percent	47.3	30.4	14.8	6.23	0.914	0.263	0.057	0.048	0.013

采用对数正态分布拟合后得到沙尘气溶胶的粒径分布曲线如图 2 所示。

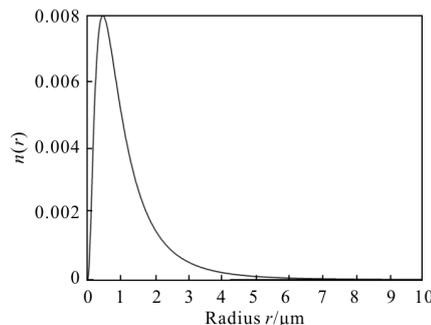


图 2 沙尘气溶胶粒径分布

Fig.2 Size distribution of dust aerosol

4 仿真与计算

4.1 沙尘粒子的散射、衰减、吸收因子

基于上述分析,采用 MATLAB 编程可以得到不同尺寸的沙尘粒子对不同波长入射光的衰减因子、散射因子、吸收因子随粒径变化的曲线。文中针对激光通信常用的几个红外波长进行分析,取 $\lambda=1.06$ 、2.3、3.8、10.6 μm,根据 HITRAN 数据库提供的数

据, 分别取其复折射率 m 为 $1.53+0.008i$ 、 $1.345+0.004i$ 、 $1.39+0.071i$ 、 $1.47+0.2i$, 得到对应波长的散射特性曲线如图 3 所示。

由图 3(a)可知, 当沙尘粒子尺寸小于入射波长时, 其衰减因子随粒径的增大而增强; 当沙尘粒子的粒径大于入射波长时, 随着粒径的增大衰减因子波动幅度越来越小并逐渐趋于稳定。对比图 3(a)中的四个入射波长的衰减因子曲线可以看出, 随着波长的增大, 衰减因子曲线的波峰右移, 峰值减小, 并且震荡频率变低。由四条曲线的波峰位置可以看出, 当沙尘粒径和入射光波长基本相当时, 其衰减因子较大。因此, 与入射光波长尺寸相当的粒子对入射光具有较强的衰减。这与袁江涛^[14]等人对水雾消光系数

的研究中所得结论基本一致。

由图 3(b)可知, 沙尘粒子的散射特性与其衰减特性具有非常相似的特征。其不同之处在于, 当粒径足够大时沙尘粒子的散射因子随粒子的增大逐渐减小, 这说明当粒子尺寸大于入射光波长时, 随着粒子尺寸的增大散射效应会逐渐减弱。这与张小林^[15]等人对黑炭粒子消光系数的研究中当尺寸参数大于 1 时所得结果基本一致。

由图 3(c)可知, 随着沙尘粒径的增大吸收因子逐渐增大, 这说明大粒子对入射光的吸收作用较强。当粒径超过 $3 \mu\text{m}$ 时, 沙尘粒子对 $3.8 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 的入射光的吸收因子大于 1, 这说明粒径大于 $3 \mu\text{m}$ 的沙尘粒子能够完全吸收 $3.8 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 的入射光。对于消光、散射和吸收因子中出现的大于 1 的情况, 可以用光的反射、折射和衍射的原理来解释^[5]。

4.2 沙尘天气下的传输衰减和能见度计算

根据布格-朗伯定律^[16-17], 当光强为 I_0 的光束通过厚度为 L 的介质后, 其光强衰减为:

$$I = I_0 \exp\left[-\int_0^L \sigma(\lambda) dL\right] \quad (15)$$

式中: $\sigma(\lambda)$ 为传输衰减, 计算公式如下:

$$\sigma(\lambda) = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e n(r) dr \quad (16)$$

式中: r 为沙尘粒子的半径; r_1 和 r_2 分别为粒子的下限半径和上限半径; Q_e 为衰减因子; $n(r)$ 为沙尘粒子的粒径分布, 可由公式(14)得到。 σ 的物理意义为: 光每经过单位距离的介质后的衰减率。

由于传输衰减常用 dB/km 来表示, 其转换公式如下:

$$\sigma(\text{dB/km}) = 4.341 \times \sigma(1/\text{km}) \quad (17)$$

根据 Koschmieder 定律, 大气能见度和传输衰减关系式如下:

$$V = -\ln \varepsilon / \sigma \quad (18)$$

式中: ε 为视觉对比阈值, 一般计算时取 0.02。

公式(18)是对可见光的大气能见度的描述, 文中沿用其定义对红外光的“能见度”进行描述。

根据参考文献[5]中的数据, 取沙尘气溶胶浓度为 $1199.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($1.2892 \times 10^9/\text{m}^3$)。采用 MATLAB 编程可以得到沙尘条件下红外波段 ($0.76 \sim 10.6 \mu\text{m}$) 激光的传输衰减随入射光波长的变化关系, 如图 4 所示。

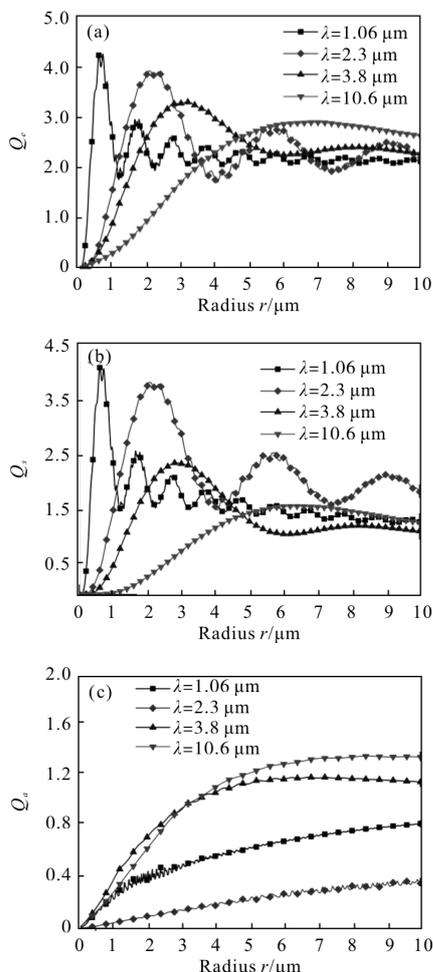


图 3 沙尘粒子的(a)衰减因子 Q_e , (b)散射因子 Q_s , (c)吸收因子 Q_a 随粒径的变化

Fig.3 Change of (a) extinction efficiency factors, (b) scattering efficiency factors, (c) absorption efficiency factors of dust aerosol with particle size

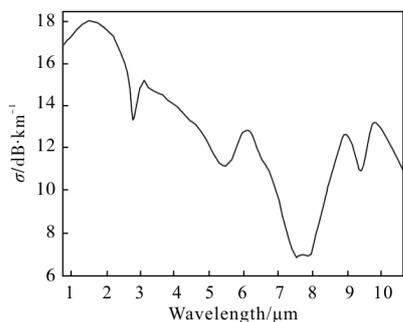


图 4 传输衰减 σ 随波长的变化曲线

Fig.4 Change of attenuation coefficient σ with wavelength

由图 4 可知,在 0.76~10.6 μm 的红外波段,沙尘气溶胶对入射光的传输衰减总体上随着波长的增大是先减后增的。传输衰减在波长为 2.6、5.4、7.4~8.0、9.3 μm 处分别取得极小值。在 7.4~8.0 μm 波段附近,传输衰减率取得最小值,并且明显低于其他波段。当沙尘气溶胶浓度为 1 199.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,7.4~8.0 μm 波段红外光的传输衰减仅为 7 dB/km,而 1.5 μm 的红外光的传输衰减可达 18 dB/km。由此可见,7.4~8.0 μm 波段红外光的传输衰减明显低于其他波段,因此在沙尘条件下选用 7.4~8.0 μm 这一波段的激光能够以较低的传输衰减进行通信。

为了计算沙尘天气下的“能见度”,还需要考虑多次散射。针对多次散射问题,文中采用蒙特卡罗算法进行计算^[10],而单次散射采用 Mie 理论方法进行计算。下面以波长为 1.064 μm 的入射光为例,计算了能见度随沙尘粒子个数浓度的变化关系,如图 5 所示。

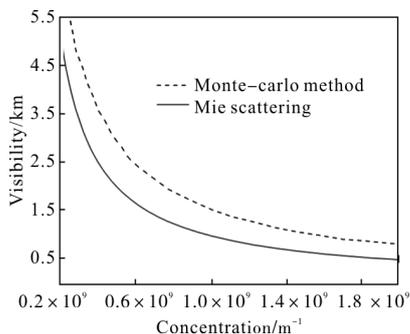


图 5 能见度随粒子个数浓度的变化

Fig.5 Change of visibility with concentration of particles

由图 5 可知,多次散射贡献了更大的传输距离,可以看出,考虑多次散射时的能见度比考虑单次散射时的能见度要高 500 m 左右,并且随着浓度的增大差距有逐渐减小的趋势。但是,这两种方法的求解

结果有着相同的趋势:随着沙尘粒子浓度的升高,能见度都有逐渐降低的趋势。

5 结论

根据 Mie 散射理论,结合 HITRAN2012 数据库给出的沙尘粒子的复折射率,计算并分析了 1.06、2.3、3.8、10.6 μm 等激光通信用波长在单个球形沙尘粒子下的散射特性。同时,对沙尘粒径采用对数正态分布模型,计算了 0.76~10.6 μm 的红外波段入射光在沙尘条件下的传输衰减和能见度。

计算结果表明,随着沙尘粒径的增大,衰减系数先迅速增大,然后逐渐减小,最终趋近于一个固定值 2;散射系数的变化趋势同衰减系数的变化趋势非常相似,不同之处在于它最终趋近于 1。这说明大粒子从入射光中移去的光量是它所拦截的光量的两倍,散射出去的光量约等于它所拦截的光量。在相同粒径情况下,随着波长的增大,衰减系数曲线的波峰右移,峰值减小,并且震荡频率变低。

取沙尘气溶胶浓度为 1 199.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,通过计算可知,在 0.76~10.6 μm 的红外波段,随波长的增大传输衰减总体上先是增大后减小的。在 7.4~8.0 μm 这一波段附近,传输衰减取得最小值 7 dB/km,并且明显低于其他波段。因此这一波段是沙尘条件下一个大气窗口。

参考文献:

- [1] Michael J Wolff, R Todd Clancy, Jay D Goguen. Ultraviolet dust aerosol properties as observed by MARCI[J]. *Icarus*, 2010, 208: 143-155.
- [2] Ghouse Basha, Phanikumar D V, K Niranjana Kumar. Investigation of aerosol optical, physical, and radiative characteristics of a severe dust storm observed over UAE[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 404-417.
- [3] Timo Nousiainen, Evgenij Zubko, Hannakaisa Lindqvist, et al. Comparison of scattering by different nonspherical, wavelength-scale particles [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2012, 113: 2391-2405.
- [4] Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian, et al. Theoretical calculation about influence of sand storm on atmospheric visibility[J]. *Applied Laser*, 2004, 23(2): 87-90. (in Chinese) 李曙光, 刘晓东, 侯蓝田, 等. 沙尘暴对大气能见度影响的数

- 值模拟与分析[J]. 应用激光, 2004, 23(2): 87-90.
- [5] Hao Li, Yang Wen, Wu Tongwen, et al. Optical properties and radiative 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.
- [6] 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.
- [7] Wei Xiaodong, Zhang Hua. Analysis of optical properties of nonspherical dust aerosols [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 1-8. (in Chinese)
卫晓东, 张华. 非球形沙尘气溶胶光学特性的分析 [J]. 光学学报, 2011, 31(5): 1-8
- [8] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. New York: John Wiley, 1983.
- [9] Tegen I, Lacis A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils [J]. *Nature*, 1996, 380(6573): 419-422.
- [10] Wiscombe W J. Improved Mie scattering algorithms [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(9): 1505-1509.
- [11] Tian Lei, Zhang Wu, Shi Jinsen, et al. A preliminary study on scattering property of dust aerosol in Hexi Corridor [J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(4): 1050-1057. (in Chinese)
田磊, 张武, 史晋森, 等. 河西春季沙尘气溶胶粒子散射特性的初步研究[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 1050-1057.
- [12] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 130: 4-50.
- [13] Wang Qichao, Wang Jiachun, Zhao Dapeng, et al. Research on transmission capacity of THz for smoke[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3696-3700. (in Chinese)
王启超, 汪家春, 赵大鹏, 等. 太赫兹波对烟幕的透射能力研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3696-3700.
- [14] Yuan Jiangtao, Yang Li, Xie Jun, et al. Study on extinction properties of water fog particles in multi-spectrum based on Mie theory [J]. *Optical Technique*, 2007, 32(3): 459-461. (in Chinese)
袁江涛, 杨立, 谢骏, 等. 基于 Mie 理论的水雾粒子多光谱消光特性研究[J]. 光学技术, 2007, 32(3): 459-461.
- [15] Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Validity of effective medium theory in light scattering of compact internal-mixed particles[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1477-1483. (in Chinese)
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 有效介质理论对致密内混合粒子光散射适用性[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1477-1483.
- [16] 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): 237-240. (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): 237-240.
- [17] Wang Rongrong, Wu Zhensen, 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.
- [18] 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.