

# 可见光在不同类型气溶胶中的传输特性

孙琦云\*, 徐军, 高畅, 王婷

火箭军工程大学理学院, 陕西 西安 710025

**摘要** 为了解不同类型气溶胶的消光特性及粒子多次散射效应对可见光传输性能的影响,选取 400, 488, 550, 694 nm 波长和海洋型、沙尘型、水溶性、烟尘 4 种常见气溶胶,基于 Mie 散射理论和建立的稳态蒙特卡罗计算模型,研究了可见光的大气传输衰减特性。结果表明,单个粒子散射强度随入射波长的增大而减小;海洋型、水溶性、烟尘粒子的消光效率因子随波长的增大而减小,沙尘型粒子则相反;海洋型、沙尘型、水溶性粒子的消光以散射为主,烟尘粒子则以吸收为主。利用稳态蒙特卡罗方法模拟多次散射效应,结果表明,光波在海洋型气溶胶中透过率最大,在沙尘型、水溶性和烟尘气溶胶中依次减小;随着能见度的增大,透过率逐渐增大。当能见度达到一定程度时,多次散射过程中的吸收作用可以忽略不计。该结论有助于在特定类型气溶胶光学厚成像路径中,构建更加准确的图像退化模型。

**关键词** 大气光学; 传输特性; 稳态蒙特卡罗模拟; 气溶胶; 消光特性; 多次散射

**中图分类号** O436      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.110103

## Transmission Characteristics of Visible Light in Different Types of Aerosols

Sun Qiyun\*, Xu Jun, Gao Yang, Wang Ting

College of Science, PLA Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

**Abstract** In order to explore the extinction characteristics of different types of aerosols and effect of multiple scattering on the transmission performance of visible light, four wavelengths of 400, 488, 550, 694 nm and four common aerosols of oceanic, dust-like, water-soluble and soot are selected. Based on the Mie scattering theory and the steady-state Monte Carlo model, the transmission attenuation characteristics of visible light in atmosphere are studied. The results show that the scattering intensity of single particle decreases with the increase of incident wavelength. The extinction efficiency factors of oceanic, water-soluble and soot particles decrease with the increase of wavelength, whereas dust-like particles have opposite effect. The extinction characteristics of oceanic, dust-like and water-soluble particles are dominated by scattering, while soot particles are dominated by absorption. The results of simulation of multiple scattering by steady-state Monte Carlo method show that the transmission rates of light wave in oceanic aerosols, dust-like aerosols, water-soluble aerosols and soot aerosols decrease in turn. The transmission rate increases gradually with the increase of visibility. The absorption effect can be neglected in multiple scattering processes when the visibility reaches a certain degree. This conclusion is helpful to construct a more accurate image degradation model in a imaging path of specific aerosol optical thick.

**Key words** atmospheric optics; transmission characteristics; steady-state Monte Carlo simulation; aerosol; extinction characteristics; multiple scattering

**OCIS codes** 010.1110; 010.1290; 010.1300; 010.1320

## 1 引言

受气溶胶粒子作用,可见光在大气传输过程中

会产生不同程度的能量衰减,进而导致户外成像设备采集的图像降质退化,甚至造成图像失真<sup>[1-2]</sup>,因此,研究可见光条件下不同气溶胶粒子的消光特性

收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-05-09; 录用日期: 2018-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(61701505)

\* E-mail: chavensan@163.com

具有重要意义。近年来,国内外科研工作者通过实验模拟、仪器测量、数值模型计算<sup>[3-6]</sup>对大气气溶胶消光特性进行了研究,但这些研究仍存在仪器运作成本高,操作复杂,测量结果存在较大不确定性,模拟结果与实际值存在较大偏差,地域依赖性强等问题,实际应用较困难。

目前根据能见度计算消光系数的方案中应用较广泛的是 Koschmieder 经验公式<sup>[7]</sup>,但该公式未考虑粒子多次散射<sup>[8-9]</sup>造成的影响。蒙特卡罗模拟<sup>[10-12]</sup>以概率模型为基础,用随机数和概率统计研究光在随机分布介质中的传输问题,模拟光子的数量越多,越能准确地描述粒子的多次散射现象。为进一步研究不同类型气溶胶消光特性的差异以及粒子的多次散射效应,选取 400,488,550,694 nm 4 个波长和海洋型、沙尘型、水溶性和烟尘 4 种常见气溶胶,利用 Mie 散射理论对气溶胶粒子的消光特性进行了计算;接着利用建立的稳态蒙特卡罗计算模型,通过构造局部仓模拟气溶胶粒子对光子的吸收和散

射作用,根据模拟结果比较了不同类型气溶胶对可见光传输特性的影响。

## 2 单个气溶胶粒子消光特性

### 2.1 气溶胶粒子类型及分布

气溶胶的光学性质与粒子的组分、形状、尺度分布等参数有关。根据 1983 年国际气象与大气物理学会(IAMAP)提出的无云大气气溶胶-标准辐射大气模型<sup>[13]</sup>,选取海洋型、沙尘型、水溶性、烟尘 4 种常见的气溶胶粒子作为研究对象。根据定义,粒子尺度参数为

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: $r$  为粒子半径; $\lambda$  为入射波长。 $\alpha$  为无量纲量。

不同类型气溶胶粒子尺度参数如图 1 所示。计算结果表明 4 种粒子尺度参数  $\alpha$  介于 0.1~50 之间,符合 Mie 散射的应用条件<sup>[14]</sup>。

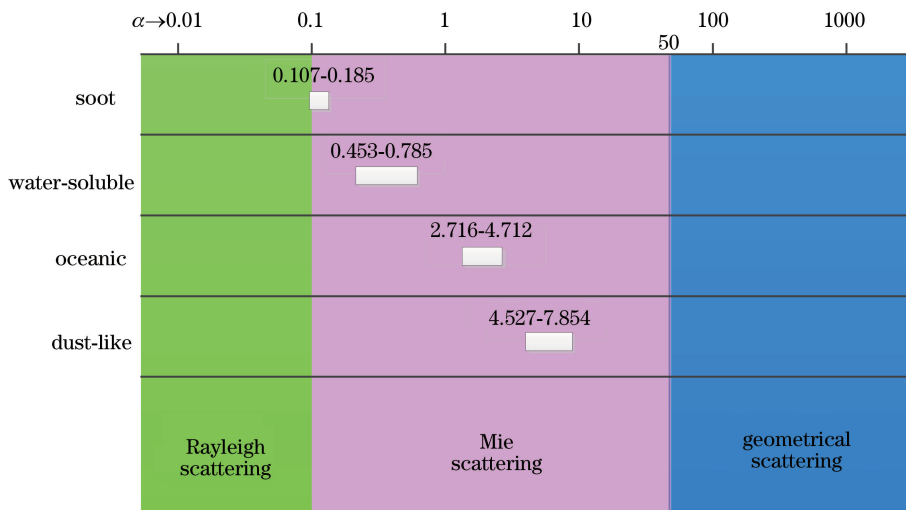


图 1 不同类型气溶胶粒子尺度参数

Fig. 1 Size parameters of different types of aerosol particles

目前,描述气溶胶粒子尺度谱分布时,较普遍使用且适用性较广的模型是对数正态分布函数,用该函数表示的粒子尺度谱分布的概率密度函数<sup>[15]</sup>为

$$n(r) = \frac{N}{r\sqrt{2\pi\ln\sigma\ln 10}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg r - \lg r_m}{\ln\sigma}\right)^2\right], \quad (2)$$

式中: $n(r)$  为  $r$  处单位半径间隔内的相对粒子数; $N$  为分子数密度; $r_m$  为粒子平均半径; $\sigma$  为标准差。表 1 给出了 4 种气溶胶尺度谱分布参数<sup>[15]</sup>。

表 1 4 种气溶胶尺度谱分布参数

Table 1 Parameters of four aerosol sizes spectrum distribution

Parameter	Size spectrum distribution			
	Oceanic	Dust-like	Soot	Water-soluble
$r_m/\mu\text{m}$	0.30	0.50	0.0118	0.05
$\sigma$	2.51	2.99	2.00	2.99

计算气溶胶的散射消光参量时还涉及到复折射率,4 种气溶胶的复折射率如表 2 所示<sup>[16]</sup>。

表 2 4 种气溶胶的复折射率

Table 2 Complex refractive indexes of four aerosols

Wavelength /nm	Complex refractive index			
	Oceanic	Dust-like	Soot	Water-soluble
400	$1.385 - 9.9 \times 10^{-9}i$	$1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$	$1.75 - 4.6 \times 10^{-1}i$	$1.53 - 5.0 \times 10^{-3}i$
488	$1.382 - 6.4 \times 10^{-9}i$	$1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$	$1.75 - 4.5 \times 10^{-1}i$	$1.53 - 5.0 \times 10^{-3}i$
550	$1.381 - 4.3 \times 10^{-9}i$	$1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$	$1.75 - 4.4 \times 10^{-1}i$	$1.53 - 6.0 \times 10^{-3}i$
694	$1.376 - 5.0 \times 10^{-8}i$	$1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$	$1.75 - 4.3 \times 10^{-1}i$	$1.53 - 7.0 \times 10^{-3}i$

## 2.2 单个粒子消光特性

单个粒子消光特性计算是可见光在气溶胶中传输衰减性质研究的基础<sup>[17-20]</sup>, 根据 Mie 散射理论和

表 1 和表 2 提供的参数, 对单个粒子散射强度、消光效率因子进行仿真计算, 得到不同粒子在不同波长条件下的散射强度随散射角度变化情况, 如图 2 所示。

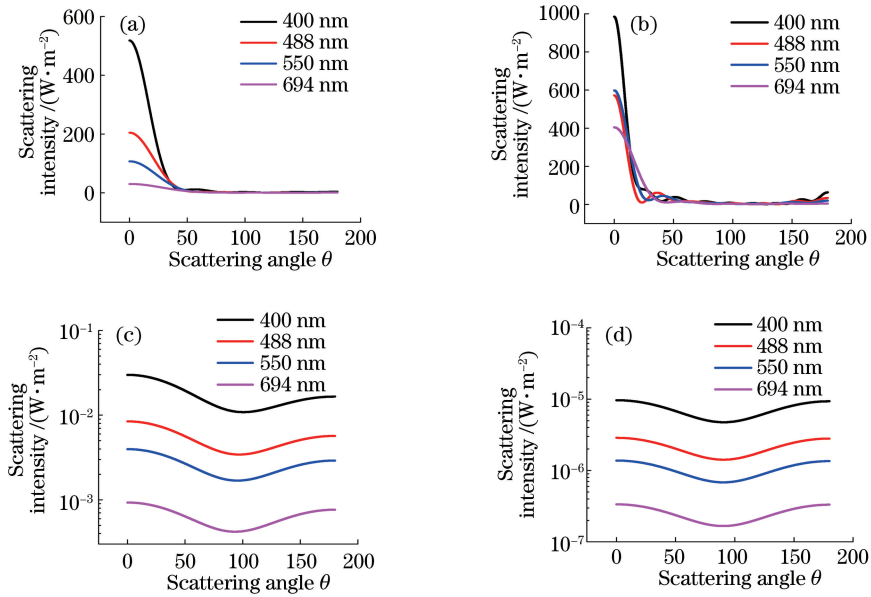


图 2 不同粒子在不同波长条件下的散射强度随散射角度变化情况。(a)海洋型;(b)沙尘型;(c)水溶性;(d)烟尘

Fig. 2 Scattering intensity of different particles at different wavelengths varying with scattering angle.

(a) Oceanic; (b) dust-like; (c) water-soluble; (d) soot

由图 2 可以看出, 单个粒子散射强度随入射波长的增大而减小, 但其随散射角度的变化趋势不受影响。根据粒径大小进行对比, 海洋型粒子和沙尘型粒子粒径较大, 表现出强烈的前向散射特性, 而烟尘粒子和水溶性粒子粒径较小, 其散射强度不具有

明显的非对称性。

图 3 为效率因子随入射波长的变化情况。由图 3(a)可以看出, 海洋型、水溶性、烟尘气溶胶粒子的消光效率因子随波长的增大而减小, 而沙尘型粒子的消光效率因子随波长增大而增大。由图 3(b)

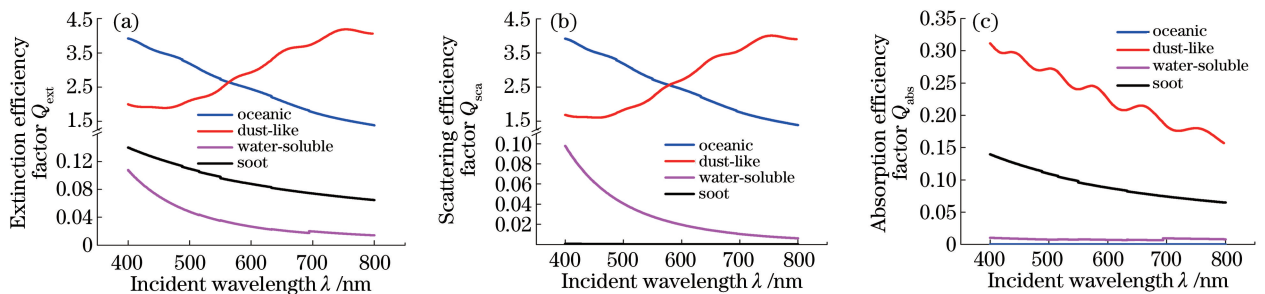


图 3 效率因子随入射波长的变化情况。(a)消光效率因子;(b)散射效率因子;(c)吸收效率因子

Fig. 3 Variation of efficiency factor with respect to incident wavelength. (a) Extinction efficiency factor;

(b) scattering efficiency factor; (c) absorption efficiency factor

(c)可以看出,海洋型、水溶性粒子以散射为主,且其散射效率因子随波长增大而减小,几乎不存在吸收;沙尘型粒子以散射为主,且其散射效率因子随波长增大而增大,吸收效率因子随波长增大而减小;烟尘粒子以吸收为主,且其吸收效率因子随波长增大而减小,几乎不存在散射。

图4为效率因子随粒子尺度参数变化情况。由图4(a)可以看出,随着粒子尺度参数的增大,海洋

型、沙尘型、水溶性粒子的消光效率因子先增大再减小,在振荡后趋于稳定值2.0。而烟尘粒子消光效率因子先增大再减小而后趋于稳定值,并未出现明显的振荡。由图4(b)可以看出,粒子散射效率因子的变化与消光效率因子相似。由图4(c)可以看出,随着粒子尺度参数的增大,沙尘型和水溶性粒子吸收效率因子逐渐增大,烟尘粒子吸收效率因子先增大再逐渐减小。

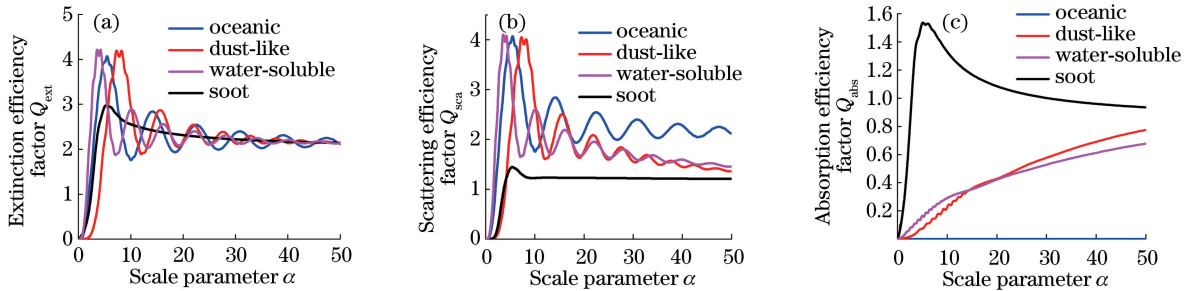


图4 效率因子随粒子尺度参数变化情况。(a)消光效率因子;(b)散射效率因子;(c)吸收效率因子

Fig. 4 Variation of efficiency factor with respect to particle size parameter. (a) Extinction efficiency factor; (b) scattering efficiency factor; (c) absorption efficiency factor

### 3 蒙特卡罗方法模拟多次散射衰减

#### 3.1 基本思想

在光学厚度较大的情况下(如雾霾、浓雾等),由于气溶胶粒子的多次散射,被散射出去的光可能重新进入相同或邻近像素的视场,此时的透过率一般大于单次散射透过率<sup>[21-22]</sup>。因此需要对粒子的多次散射消光特性进行研究。稳态蒙特卡罗模拟多次散射效应的基本思想是光子从单位功率的各向同性点光源发射,在均匀无限、各向异性介质中传输而被吸收或散射。光子的初始“质量”为1,接收面为球面。介质对光子的散射和吸收作用可以根据光子运动的概率分为不同的阶段。光子每次运动方向由Henyey-Greenstein散射函数确定。由于介质的吸收作用,在不同位置光子将其“质量”的一部分沉积在该位置处的局部仓中。在 $n$ 个光子传播之后,阵列中的每个仓都累积了一定的光子权重 $A_i$ 。将各仓光子权重除以光子总数和该特定仓的体积 $V_i$ 可得到吸收光子的浓度 $C_i$ 为

$$C_i = \frac{A_i}{nV_i}. \quad (3)$$

相对注量率为 $F_i = C_i/\mu_a$ ,其中 $\mu_a$ 为吸收系数。根据定义,相对注量率是当前位置所经过的光子数量,即粒子多次散射透过率。

每发射一个新的光子,光子计数器递增。光子

状态为“ALIVE”。每个“光子”在原点 $(0,0,0)$ 的位置 $(x,y,z)$ 处发射。光子的初始轨迹由轨迹向量 $(u_x, u_y, u_z)$ 描述,轨迹向量将轨迹投影到 $x,y,z$ 坐标上。在球坐标中,轨迹由偏离 $z$ 轴的偏转角 $\theta$ 和围绕 $z$ 轴的方位角 $\psi$ 描述。对于各向同性点源,通过在一1和1之间(对应于相对于 $z$ 轴的 $180^\circ \sim 0^\circ$ )选择余弦 $\theta$ 的值来随机设置初始值,最初的 $\psi$ 值随机设置在 $0 \sim 2\pi$ 之间。使用 $\cos \theta, \sin \theta$ 和 $\psi$ 值将轨迹向量投影到 $x,y,z$ 轴上以产生 $u_x, u_y, u_z$ 。对指数概率密度函数采样,可确定光子运动步长,同时允许每个光子反复跳到一个新的位置。这一过程中,光子由于吸收作用“质量”减轻,由于散射作用而旋转到一个新的轨迹。最后,检查光子质量是否已达到阈值。如果光子质量小于设定值 $m_0$ ,那么光子存活是被随机决定的。此时产生一个随机数,如果该随机数小于设定值,则光子终止,否则当前的光子质量增加 $1/m_0$ ,光子继续传播。这种方法使10个光子中的9个被终止,被终止的9个光子的质量会被增加到那个幸存的光子上,以便保存总的光子能量。通过设置`photon_status`为DEAD使光子终止,然后发射下一个光子。

#### 3.2 透过率与粒子类型、能见度的关系

气溶胶粒子组分、尺度谱分布模型参数不同,对光子的吸收和散射能力也不同。当入射波长为550 nm、能见度为1 km时,透过率与粒子类型的关系如图5所示。



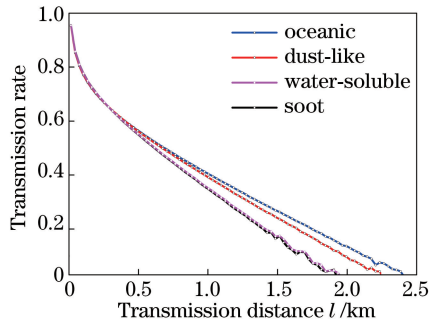


图5 透过率与粒子类型的关系

Fig. 5 Relationship between transmission rate and particle types

由图5可见,粒子透过率随传播距离的增大而下降,下降速度与粒子类型有关,表明4种气溶胶粒子对光子的散射能力不同,其中烟尘粒子和水溶性粒子最强,沙尘型粒子次之,海洋型粒子最弱。由此可以得出结论,在其他条件相同时,光波在海洋型气溶胶中透过率最大,传播距离最远,在沙尘型气溶胶、水溶性气溶胶和烟尘气溶胶中,传播距离依次减小。

当入射波长为550 nm、气溶胶类型为海洋型气溶胶时,在不同能见度条件下多次散射透过率与能见度的关系如图6所示。

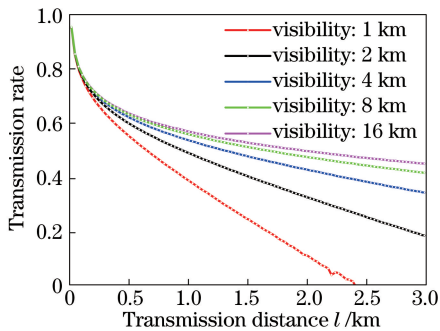


图6 透过率与能见度的关系

Fig. 6 Relationship between transmission rate and visibility

由图6可知,粒子透过率随传播距离的增大而下降,下降速度与能见度有关。不同能见度对光波透过率的影响程度不同,能见度越低,光子能量衰减越快,表明光波传输透过率越低。随着能见度的增大,透过率逐渐增大,但能量衰减速度逐渐趋于0,表明当能见度达到一定程度时,粒子的多次散射过程中吸收作用可以忽略不计。

## 4 结 论

可见光在大气传输过程中由于受到气溶胶的消光作用而产生能量衰减。气溶胶的消光能力不仅与

粒子性质、入射波长密切相关,而且还受多次散射效应的影响。对单个粒子消光特性的研究表明,粒子散射强度随可见光入射波长的增大而减小,海洋型、水溶性、烟尘粒子的消光能力随波长的增大而减小,沙尘型粒子消光能力随波长增大而增大;海洋型、沙尘型、水溶性粒子的消光特性以散射为主,而烟尘粒子则以吸收为主。稳态蒙特卡罗模拟多次散射结果表明,光波在海洋型气溶胶中透过率大于沙尘型、水溶性和烟尘气溶胶;随着能见度的增大,透过率逐渐增大,当能见度达到一定程度时,粒子的多次散射过程中吸收作用可忽略不计。

对常见类型的气溶胶消光特性进行仿真研究,明确了粒子多次散射对可见光大气传输性能的影响,克服了仪器测量操作复杂、地域依赖性强等问题。研究结论为在光学厚成像路径中构建特定图像质量退化模型提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] Rao R Z. Modern atmospheric optics and its applications [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2006, 1(4): 2-13.  
饶瑞中. 现代大气光学及其应用[J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(4): 2-13.
- [2] Liu J, Chen C H. A study on remote-sensing inversion of atmospheric aerosol particle size distributions of Lanzhou city in winter [J]. Plateau Meteorol, 2004, 23(1): 103-109.  
刘吉, 陈长和. 兰州城区冬季大气气溶胶粒子谱的反演研究[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 103-109.
- [3] Mao J T, Zhang J H, Wang M H. Summary comment on research of atmospheric aerosol in china [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 625-634.  
毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
- [4] Han Y, Wang T J, Rao R Z, *et al.* Progress in the study of physic-optics characteristics of atmospheric aerosols [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 7396-7407.  
韩永, 王体健, 饶瑞中, 等. 大气气溶胶物理光学特性研究进展[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 7396-7407.
- [5] Gong C W, Li X B, Li J Y, *et al.* New method of aerosol extinction coefficient measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101001.  
宫纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数

- 测量新方法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101001.
- [6] Erlick C, Frederick J E. Effects of aerosols on the wavelength dependence of atmospheric transmission in the ultraviolet and visible: 2. continental and urban aerosols in clear skies [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103 (D18): 23275-23285.
- [7] Koschmieder H. Theorie der horizontalen Sichtweite [M]. Munich: Keim & Nemnich, 1924: 33-53.
- [8] Antoine D, Morel A. Relative importance of multiple scattering by air molecules and aerosols in forming the atmospheric path radiance in the visible and near-infrared parts of the spectrum [J]. Applied Optics, 1998, 37(12): 2245-2259.
- [9] Kuzmin V L, Meglinski I V. Coherent multiple scattering effects and Monte Carlo method [J]. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 2004, 79(3): 109-112.
- [10] Wang J G, Wang G Y, Xu Z Z. Monte Carlo simulations for time characteristics of light propagation in scattering medium [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(2): 155-157.  
王建岗, 王桂英, 徐至展. 散射介质中光传输行为为时间特性的蒙特卡罗模拟研究 [J]. 光学学报, 2001, 21(2): 155-157.
- [11] Cheng W, Li J S, Yu N, *et al.* Monte Carlo simulation of infrared radiation through smoke screen [J]. Infrared Technology, 2010, 32(11): 672-675, 680.  
程文, 李俊山, 余宁, 等. 红外辐射在烟幕中的蒙特卡罗模拟 [J]. 红外技术, 2010, 32(11): 672-675, 680.
- [12] Grabner M, Kvicera V. Simulation of multiple scattering effect in atmospheric hydrometeors by Monte Carlo method [C] // European Conference on Antennas and Propagation, April 8-12, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE, 2013: 2522-2525.
- [13] Wang H X, Zhu Y Z, Tian T, *et al.* Characteristics of laser transmission in different types of aerosols [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 024214.  
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.
- [14] Wallace J M, Hobbs P V. Atmospheric science: an introductory survey [M]. Netherland: Elsevier, 1977.
- [15] Bohren C F, Clothiaux E E, Johnson N D. Fundamentals of atmospheric radiation [J]. American Journal of Physics, 2007, 75(75): 671-672.
- [16] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. Netherland: Elsevier, 2002.
- [17] Song X Y, Cao N W, Yang S P. Influence factors on atmospheric aerosol optical property inversion in nanjing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040101.  
宋秀瑜, 曹念文, 杨思鹏. 探究影响南京地区大气气溶胶光学特性反演的因素 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040101.
- [18] Ma J H, Zhang H, Zheng Y F, *et al.* The optical depth global distribution of dust aerosol and its possible reason analysis [J]. Climatic and Environmental Research, 2007, 12(2): 156-164.  
马井会, 张华, 郑有飞, 等. 沙尘气溶胶光学厚度的全球分布及分析 [J]. 气候与环境研究, 2007, 12(2): 156-164.
- [19] Ma X M, Zhang H, Shan H H, *et al.* Statistical distribution of aerosol backscattering coefficient profiles in near-ground at west suburb of Hefei in 2014 [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0705001.  
麻晓敏, 张辉, 单会会, 等. 合肥西郊 2014 年近地面气溶胶后向散射系数廓线统计分布 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0705001.
- [20] Lei C X, Zhang H F, Liu H F. Study of extinction characteristics of solar radiation by soot aerosols [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3373-3377.  
类成新, 张化福, 刘汉法. 煤烟气溶胶粒子对太阳辐射的消光特性研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3373-3377.
- [21] Otsuki S. Multiple scattering in turbid media containing chiral components: a Monte Carlo simulation [J]. Optics Communications, 2017, 382: 157-161.
- [22] Zhang X L. Linear depolarization ratios characteristics of dust aerosol particles model [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0829001.  
张小林. 沙尘气溶胶粒子模型的线退偏比特性 [J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0829001.