

文章编号: 0253 2239(2010) 08-2175-05

# 紫外到可见波段外混合气溶胶的传输特性

白 璐<sup>1</sup> 汤双庆<sup>1</sup> 吴振森<sup>1</sup> 谢品华<sup>2</sup> 汪世美<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup> 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安, 710071  
<sup>2</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 基于随机介质中波的辐射传输理论,采用蒙特卡罗法,数值模拟了满足对数正态分布的水溶性气溶胶和烟尘气溶胶组成的多分散系外混合城市气溶胶的消光系数。与文献数据进行了对比,验证了采用离散组分抽样的蒙特卡罗模拟方法的正确性。分析了外混合气溶胶中透射率和反射率随入射波波长、入射角余弦及光学厚度的变化关系。比较了不同混合比下外混合气溶胶的传输特性。数值计算结果表明,波长的减小将导致外混合气溶胶的透射率降低反射率升高。同时,外混合气溶胶总体表现出的传输特性与组分间存在十分敏感的关系。

**关键词** 大气光学;传输特性;蒙特卡罗法;外混合气溶胶;散射

中图分类号 O436.2 文献标识码 A doi: 10.3788/ACS20103008.2175

## Transmission Characteristic of External Mixture of Aerosol from Ultraviolet to Visible Light Band

Bai Lu<sup>1</sup> Tang Shuangqing<sup>1</sup> Wu Zhensen<sup>1</sup> Xie Pinhua<sup>2</sup> Wang Shimei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China  
<sup>2</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** Based on wave radiation transmission theory in random medium and Monte Carlo method, the transmission characteristic of external mixture of aerosol which is composed of water soluble and soot with lognormal distribution is studied. The dependence of extinction coefficients of urban aerosol on incident wavelength is numerically simulated, which is compared with reference data. The accuracy of the discrete sampling Monte Carlo simulation method is proved. The effect of incident wavelength, the cosine of incident angle, and optical thickness on the transmittance and reflectivity of laser in mixture aerosol is analyzed. Comparison is given between the external mixtures of aerosol with different mixing ratio. The numerical results show that the decrease of wavelength will lead to reduce transmission characteristic of external mixture aerosols and increase reflectivity. And the total transmission characteristic of external mixture aerosol is sensitive to its composition.

**Key words** atmospheric optics; transmission characteristic; Monte Carlo method; external mixture of aerosol; scattering

## 1 引 言

激光在大气气溶胶中的传输特性对研究紫外光通信、可见光制导、空间目标多光谱识别以及复杂气候条件下光信号检测等问题具有十分重要的意义<sup>[1,2]</sup>。气溶胶的分布、浓度和种类等因素将极大地影响激光在大气中传输的散射和吸收等光学特性<sup>[3,4]</sup>。气溶胶按不同的标准可分为多种类型。

实际的气溶胶多由不同种类组分混合而成。同时人工气溶胶如战场烟幕、遮蔽烟尘等,常按恰当比例组合成混合烟幕用以提高其消光性能<sup>[7]</sup>。然而目前研究气溶胶粒子系统的影响时,多为方便起见,假定其为单一成分的均匀体,不区分其混合状态<sup>[8]</sup>。气溶胶的混合状态可分为外混合和内混合两种。内混合状态的气溶胶一般可以找到适合的等效折射率计算

收稿日期: 2009-09-01; 收到修改稿日期: 2009-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(60971065, 60771038)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题。

作者简介: 白璐(1973-),女,博士,副教授,主要从事复杂粒子的光电散射、随机介质中的波传播与散射等方面的研究。E-mail: blu@xidian.edu.cn

其光学特性<sup>[9,10]</sup>, 但外混合状态的气溶胶用等效折射率计算将产生较大的误差<sup>[11]</sup>。蒙特卡罗方法作为处理光子输运问题的常用方法, 被广泛应用在多种随机介质的传输问题中<sup>[12-16]</sup>。本文利用该方法在传统的模拟随机分布均匀半径大小、单一组分粒子薄层光子传输散射问题的基础上<sup>[14]</sup>, 进一步考虑了外混合气溶胶粒子的粒径分布及多种组份的混合抽样。该模型的建立对深入研究气溶胶的传输特性十分重要, 对人工混合气溶胶的遮蔽性能等相关问题的研究也具有重要的理论指导意义。

## 2 基本理论

### 2.1 外混合状态

外混合状态是指每个气溶胶粒子只含有一种成分, 具有不同成分的气溶胶粒子各自独立地存在于整个气溶胶中。对于外混合气溶胶, 根据每种气溶胶的尺寸分布函数和折射率计算消光系数可以表示为<sup>[5]</sup>

$$\beta_i^{\text{xt}} = \sum_i C_i \beta_i^{\text{ext}} \setminus \sum_i C_i, \quad (1)$$

式中  $C_i$  为第  $i$  个组分的个数混合比例,  $\beta_i^{\text{xt}}$  为第  $i$  个组分的多分散系消光系数

$$\beta_i^{\text{xt}} = \pi \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 Q^{\text{ext}} n(r) dr, \quad (2)$$

式中  $r$  为粒子半径,  $Q^{\text{ext}}$  为单个粒子的消光系数,  $n(r)$  为尺寸分布函数,  $r_{\min}$  与  $r_{\max}$  分别为粒径分布中粒子半径的最小和最大值。

### 2.2 蒙特卡罗光子传输问题模拟

粒子在离散随机介质中传输问题可用玻耳兹曼方程等价反射密度型积分方程表示为<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} \chi(\mathbf{r}, E, \Omega) = & S(\mathbf{r}, E, \Omega) + \\ & \iiint \chi(\mathbf{r}', E', \Omega') T(\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r} | E', \Omega') \times \\ & C(E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega | \mathbf{r}) dV' dE' d\Omega', \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\chi(\mathbf{r}, E, \Omega)$  为  $\mathbf{r}$  点处, 能量为  $E$ ,  $\Omega$  方向的发射密度; 它由两项组成, 第一项  $S(\mathbf{r}, E, \Omega)$  为源发射出的粒子密度; 第二项是由碰撞发射出的密度。其中第二项中的核函数  $T(\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r} | E', \Omega')$  为迁移核, 表示在固定的能量和方向下, 粒子空间位置的转换;  $C(E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega | \mathbf{r})$  为碰撞核, 它表示在固定位置下, 粒子碰撞后能量和方向的转换。令

$$\begin{aligned} S_x(\mathbf{r}, E, \Omega) = & S(\mathbf{r}, E, \Omega), \\ K_x(\mathbf{r}', E', \Omega' \rightarrow \mathbf{r}, E, \Omega) = & T(\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r} | E', \Omega') \times \\ & C(E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega | \mathbf{r}), \end{aligned} \quad (4)$$

则(3)式可以改写成

$$\chi(\mathbf{r}, E, \Omega) = S_x(\mathbf{r}, E, \Omega) + \iiint \chi(\mathbf{r}', E', \Omega') \times K_x(\mathbf{r}', E', \Omega' \rightarrow \mathbf{r}, E, \Omega) dV' dE' d\Omega', \quad (5)$$

引进缩写符号  $s = (\mathbf{r}, E, \Omega)$ , 则(5)式可以表示为

$$\chi(s) = S_x(s) + \int \chi(s') K_x(s' \rightarrow s) ds, \quad (6)$$

(6)式有诺伊曼级数解

$$\chi(s) = \sum_{m=0}^{\infty} X_m(s), \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} X_m(s) = & \int X_{m-1}(s_{m-1}) K_x(s_{m-1} \rightarrow s) ds_{m-1} = \\ & \int \dots \int S(s_0) K_x(s_0 \rightarrow s_1) \dots K_x(s_{m-1} \rightarrow s) ds_{m-1} \dots ds_1 ds_0, \end{aligned} \quad (8)$$

(7)式中  $X_m(s)$  具有明显的物理意义。 $X_m(s)$  为由源出发的粒子, 经  $m$  次空间输运和碰撞后, 在  $P$  点产生的发射密度。因此每作用一次积分算子  $\int K_x(s_{l-1} \rightarrow s_l) ds_{l-1}$ , 就相当于粒子经历一次空间输运和碰撞。

若将(8)式改写为概率模型, 不难看出积分算子  $\int K_x(s_{l-1} \rightarrow s_l) ds_{l-1}$  对应于条件概率  $P(s_l | s_{l-1})$ , 即光子在相空间点  $s_{l-1}$  状态下从该点输运到相空间点  $s_l$  的概率。利用统计估计法可得条件概率

$$\begin{aligned} P(s_{l+1} | s_l) = & \exp[-c_a | (z_{l+1} - z_l) / \cos a_l] \cdot \\ & \eta(h - z_l) \eta(z_l), \end{aligned} \quad (9)$$

式中指数部分表示光子从第  $l$  次散射的相空间点  $s_l$  到达相空间点  $s_{l+1}$  不被吸收的概率,  $c_a$  为单个粒子的吸收截面与数密度的乘积。类似地积分算子  $\int K_x(s_m \rightarrow s) ds_m$  对应的转移概率为

$$P(s | s_m) = \exp[-c_l (h - z_m) / \cos a_m] \eta(\cos a_m), \quad (10)$$

式中指数部分表示光子从第  $m$  次散射直接穿透界面不被吸收的概率, (9)式和(10)式中角度  $a_i$  为光子第  $i$  次散射方向与  $z$  轴的夹角,  $c_l$  为单个粒子消光截面与数密度的乘积。引入权函数

$$W_{m+1} = W_m \exp[-c_l (z_{m+1} - z_m) / \cos a_m], \quad (11)$$

显然

$$P_0 = W_0 \exp[-c_l (h - z_m) / \cos a_0], \quad (12)$$

为未经散射直接透射的概率,  $W_0 = 1$  为光子的初始权重,  $a_0$  为入射光方向与  $z$  轴夹角。于是估计函数

$$\begin{aligned} P_t = & \sum_{m=0}^{\infty} P_m = \sum_{m=0}^{\infty} W_m \exp[-c_l (h - z_m) / \cos a_m] \cdot \\ & \eta(\cos a_m) \cdot \prod_{l=1}^m \eta(h - z_l) \eta(z_l) \end{aligned} \quad (13)$$

为光子透射率的无偏估计。同理

$$P_r = \sum_{m=1}^{\infty} P_m = \sum_{m=1}^{\infty} W_m \exp[-c_t(0 - z_m)/\cos a_m] \cdot \prod_{l=1}^m \eta(h - z_l) \eta(z_l) \quad (14)$$

为反射率的无偏估计。

如果外混合气溶胶中各种组分粒子的个数混合比例为  $c_1: c_2 \dots: c_n$ , 按比例抽样粒子的种类, 再按照粒子的粒径分布函数, 抽样出该次散射与光子发生碰撞的粒子半径大小, 计算该种粒子的散射截面、消光系数及吸收系数, 不对称因子及单次反照率。碰撞后更新消光系数

$$\beta^{ext} = \pi \sum r^2 Q^{ext} n(r) \Delta r. \quad (15)$$

共跟踪  $N$  个光子, 则透射率  $T$  和反射率  $R$  为

$$T = \frac{1}{N} \sum P_t, \quad R = \frac{1}{N} \sum P_r. \quad (16)$$

以城市气溶胶为例, 表 1 中给出了其组成成分以及混合比例<sup>[5]</sup>。

表 1 城市气溶胶的组成成分

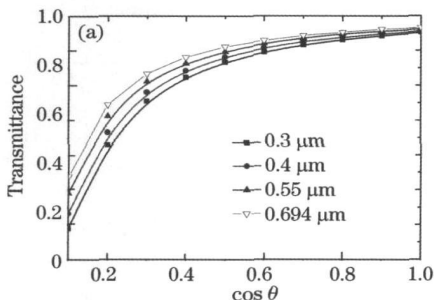
Table 1 Components of urban aerosol

Aerosol class	Mixing ratio	Size distribution parameter	
		Mode radius / $\mu\text{m}$	Standard deviation / $\mu\text{m}$
Water soluble	0.5945	0.0285	0.35
Dustlike	$1.67 \times 10^{-7}$	0.471	0.400
Soot	0.4055	0.0118	0.301

由于尘状物个数混合比例太小, 所以下计算中取水溶性气溶胶和烟尘的混合。它们的尺寸分布函数为<sup>[5]</sup>

$$n(r) = \frac{1}{r\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\{-[\lg(r/r_m)]^2/2\sigma^2\}, \quad (17)$$

式中  $r_m$  为众数半径,  $\sigma$  为标准方差。



### 3 计算结果及分析

图 1 计算了采用本文中的蒙特卡罗抽样方法计算的外混合气溶胶的消光系数随波长的变化情况。图 1 中计算所取各参数如表 1 所示。入射角  $\theta$  定义为入射方向与  $z$  轴之间的夹角, 图中取入射角余弦为  $\cos \theta = 1.0$ , 光学厚度  $\tau = 0.1$ 。根据众数半径的大小, 图 1 的计算中选取的粒径范围分别为水溶性气溶胶  $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ , 烟尘气溶胶  $0.01 \sim 0.105 \mu\text{m}$ 。图中数据见文献[5], 通过对比可以看出采用本文中改进的蒙特卡罗方法计算得到的多分散系外混合气溶胶的米氏消光系数与文献结果吻合得较好, 说明了上述方法的正确性。

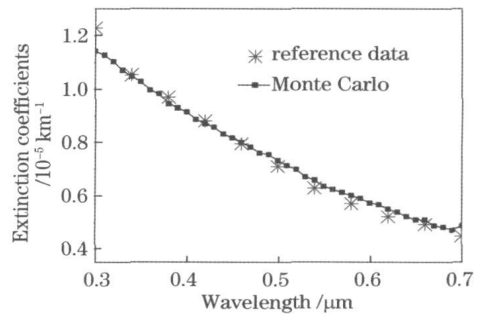


图 1 谱消光系数的文献数据与理论计算结果的对比

Fig. 1 Contrast of spectral extinction coefficients of reference data with those of the Monte Carlo method used in this paper

图 2 计算了城市气溶胶在不同波长下透射率和反射率随入射角余弦的变化。图 2 计算中所选用的参数为: 外混合气溶胶中水溶性气溶胶及烟尘的折射率在波长为 300, 400, 550 和 694 nm 时分别为  $(1.53 + 8 \times 10^{-3}i)$ ,  $(1.53 + 5 \times 10^{-3}i)$ ,  $(1.53 + 6 \times 10^{-3}i)$ ,  $(1.53 + 7 \times 10^{-3}i)$  及  $(1.74 + 0.47i)$ ,  $(1.75 + 0.46i)$ ,  $(1.75 + 0.44i)$ ,  $(1.75 + 0.43i)$ <sup>[5]</sup>。其中外混合气溶胶的个数混合比如表 1 所示。由图 2 可以看

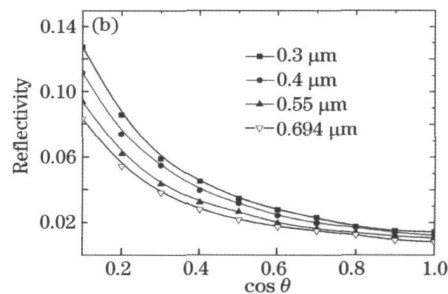


图 2 透射率和反射率随入射角余弦的变化

Fig. 2 Variation of the transmittance and reflectivity with different cos theta

出,对相同的入射角,透射率随入射波波长的增大而增大,反射率则随波长的增大而减小,说明城市气溶胶对紫外光的消光性能优于可见光波段。在相同波长下,透射率随入射角余弦的增大而增大,反射率结果与此相反。这一结果符合基本的物理规律,当入射角余弦  $\cos \theta$  增大时,入射光的方向更加趋向于垂直入射,使得光子通过随机介质的光程变短,碰撞到的粒子数目变少,反射率相应的减小,因此透射率随之增大。

图3 计算了城市气溶胶在不同波长下透射率随光学厚度的变化。图3 计算中取入射角余弦为垂直入射情况。其他参数选取如图2 中所示。从图3 可以看出,随着光学厚度的增加,城市气溶胶的透射率显著下降,尤其是对紫外波段,当气溶胶的光学厚度为1.1 时,其透射率的理论模拟值仅为0.3098,说明紫外波段的激光在城市混合气溶胶中的穿透能力较差。

图4 计算了相同混合比不同波长下城市气溶胶透射率随光学厚度的变化情况。入射波长分别取为300, 400, 550 和 694 nm, 垂直入射。图中的城市气溶胶个数混合比如表1 所示,水溶性气溶胶和烟尘

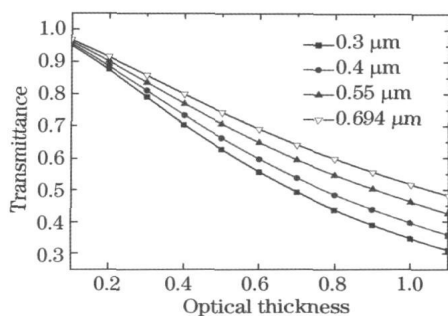


图3 透射率随光学厚度的变化

Fig. 3 Variation of the transmittance with the optical thickness

气溶胶分别指气溶胶单独由该成份组成的情况。由图4 可以看出,外混合城市气溶胶的传输特性在水溶性气溶胶和烟尘气溶胶之间,说明混合气溶胶的特性是其组成成分共同作用的结果。并且在相同的体积混合比情况下,虽然从组分的分布比率上来说水溶性气溶胶与烟尘气溶胶的个数混合比差异并非十分显著,但随着波长由紫外向可见光的增加,混合后气溶胶的长波段传输特性更加趋近于水溶性气溶胶。

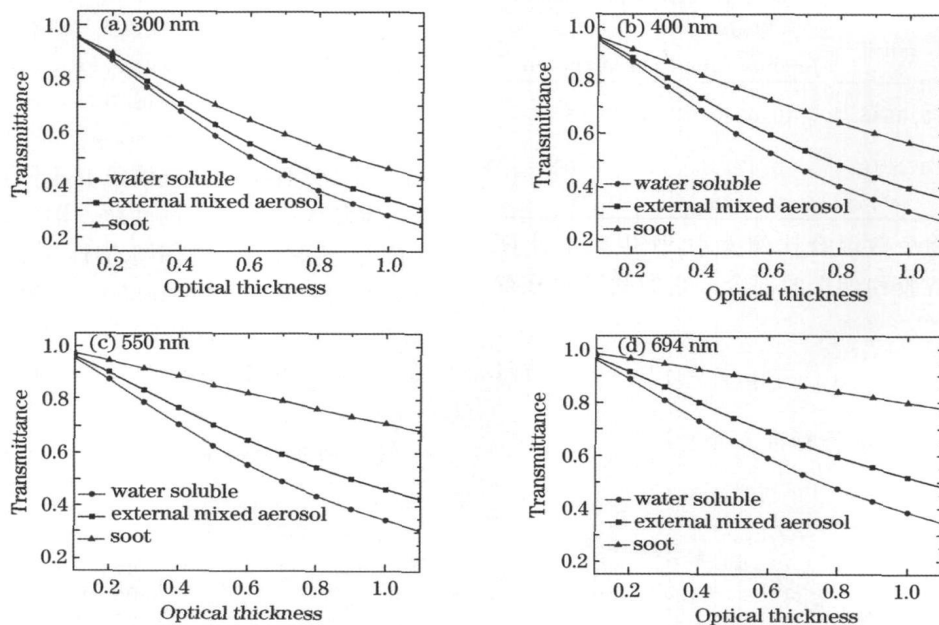


图4 不同组分在不同波长下透射率随光学厚度的变化

Fig. 4 Variation of the transmittance with the optical thickness in different components

图5 计算了不同混合比下的透射率随光学厚度的变化情况。入射波波长取为 694 nm, 垂直入射。图5 中的比例关系是指水溶性气溶胶与烟尘气溶胶的混合百分比。其中前一项为水溶性气溶胶的体积分数,后一项为烟尘气溶胶的体积分数。从图5 可

以看出,在相同的入射条件、光学厚度条件下,气溶胶中组分的混合百分比将对气溶胶的传输透射率特性产生显著的影响。即使混合比中仅变化10%的组分,对体系的透射率特性也将有明显的影

态, 将其假定为均匀单一组分, 将对气溶胶体系传输特性的计算结果产生较大误差。

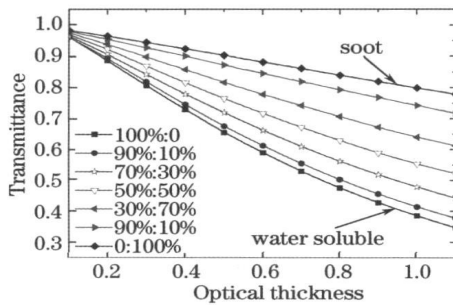


图5 不同混合比例下的透射率随光学厚度的变化

Fig.5 Variation of the transmittance with different competent proportions

## 4 结 论

在传统的蒙特卡罗法研究传输问题的基础上, 进一步考虑了粒径分布和组成成分的随机抽样问题。研究了不同入射条件、光学厚度及混合比情况下外混合城市气溶胶体系的传输特性, 计算了外混合状态下城市气溶胶粒子的消光系数并与文献数据进行了比较。数值计算结果表明, 城市气溶胶对紫外波段的遮蔽性能要优于可见波段; 入射波波长短则其在外混合气溶胶中的透射率越低, 穿透能力越差。同时组成气溶胶的成份变化对其体系的透射率影响显著。这一更趋近于实际情况的外混合气溶胶蒙特卡罗模拟方法的建立, 对深入研究多种混合状态大气气溶胶的传输特性以及人工合成混合烟雾的多波段遮蔽性能分析等诸多问题的研究具有重要的理论参考价值及实际意义。

## 参 考 文 献

- Liu Ye, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Study on the transport model based on atmosphere scattering theory in ultraviolet communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 62~ 67
- 刘 晔, 徐智勇, 汪井源. 紫外光通信中基于大气散射理论的传输模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 62~ 67
- Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1166~ 1172
- 梁 波, 朱 海, 陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1166~ 1172
- Han Daowen, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1567~ 1573
- 韩道文, 刘文清, 刘建国 等. 气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1567~ 1573
- Zhao Qiang, Yang Shizhi, Qiao Yanli *et al.*. Analysis of the optical characteristic of littoral aerosol influenced by typhoon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2046~ 2050
- 赵 强, 杨世植, 乔延利 等. 台风对沿海地区气溶胶光学特性的影响分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2046~ 2050
- C. Levoni, M. Cervino, R. Guzzi *et al.*. Atmospheric aerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different components and classes [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30): 8031~ 8041
- M. Kuzmanoski, M. A. Box, B. Schmid *et al.*. Case study of modeled aerosol optical properties during the SAFARI 2000 campaign [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5263~ 5275
- Wang Xuanyu, Pan Gongpei. Extinction coefficient of red phosphorus smoke combined with nanometer alumina to 10.6  $\mu\text{m}$  laser emission[J]. *Chinese J. Energetic Materials*, 2007, **15**(6): 612~ 615
- 王玄玉, 潘功配. 红磷与纳米氧化铝组合烟幕对 10.6  $\mu\text{m}$  激光的消光系数研究[J]. *含能材料*, 2007, **15**(6): 612~ 615
- Yan Fengqi, Hu Huanling, Zhou Jun. Measurements of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 855~ 859
- 阎逢旗, 胡陵陵, 周 军. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射率虚部的测量[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 855~ 859
- Huang Honglian, Huang Yinbo, Han Yong *et al.*. Light extinction properties of marine aerosol particles in internal mixing state [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(3): 179~ 183
- 黄红莲, 黄印博, 韩 永 等. 内混合海洋型气溶胶粒子消光特性的分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(3): 179~ 183
- Huang Honglian, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by strong absorbing aerosol particles in internal mixing state [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7): 1066~ 1070
- 黄红莲, 黄印博, 饶瑞中. 内混合强吸收气溶胶粒子光散射的等效性[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(7): 1066~ 1070
- Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by external mixture of atmospheric aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8): 1099~ 1108
- 饶瑞中. 外混合气溶胶粒子光散射的等效性[J]. *光学学报*, 1996, **16**(8): 1099~ 1108
- Pei Lucheng, Zhang Xiaozhe. The Monte Carlo and its Application in the Issue of Particle Transportation [M]. Beijing: Science Press, 1980. 213~ 233
- 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特-卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 213~ 233
- Wang Lihong, S. L. Jacques, Zheng Liqiong. Monte Carlo modeling of light transport in multilayered tissues [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, **47**(2): 131~ 146
- Wang Yiping, Wu Zhensen. Application of the Monte Carlo method to light scattering from randomly distributed particles in thin layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1987, **7**(5): 458~ 462
- 王一平, 吴振森. 用蒙特-卡罗方法计算光通过薄层随机分布粒子的散射[J]. *光学学报*, 1987, **7**(5): 458~ 462
- Wang Jiangang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte Carlo simulation of photon migration path in turbid media [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(7): 530~ 532
- Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Theoretical analysis and numerical calculation of transmitted light intensity of light scattering from nanoparticle random Scatterers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 951~ 956
- 叶云霞, 范滇元. 光通过纳米颗粒随机散射体透射光强的计算及分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 951~ 956