

随机分布黑碳-硅酸盐混合凝聚粒子的消光特性研究

类成新¹ 吴振森² 冯东太¹

(¹ 山东理工大学理学院, 山东 淄博 255049
² 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 基于分形理论, 采用蒙特卡罗方法对随机分布的混合凝聚粒子的空间结构进行了仿真模拟。利用 Bruggeman 有效介质理论得到了占有不同体积份额黑碳的内混合凝聚粒子的等效复折射率。采用离散偶极子近似方法对随机分布混合凝聚粒子在内外混合状态下的吸收、散射和消光效率因子等消光特性参量进行了数值计算, 深入探讨了混合方式、容积含量、入射波长以及基本粒子粒径和数量对混合凝聚粒子消光特性的影响规律。通过将所得数值结果与 T 矩阵方法的数值结果进行比较发现, 两种数值方法计算的结果非常相近。结果表明, 随机分布混合凝聚粒子的散射效率因子对混合方式非常敏感, 消光效率因子对混合方式较敏感, 而吸收效率因子对混合方式不敏感。随着凝聚粒子尺度参数的增大, 混合方式对散射和消光效率因子的影响逐渐显著。内外混合方式下, 随着黑碳体积比的增大随机分布混合凝聚粒子的吸收、散射和消光效率因子均近似线性增大, 并且增大的幅度随着粒子尺度参数的增大而增大。

关键词 散射; 混合凝聚粒子; Bruggeman 有效介质理论; 离散偶极子近似方法; 消光特性

中图分类号 P401; P422.3⁺1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0429001

Extinction Characteristics of Soot-Silicate Mixed Agglomerates in Random Distribution

Lei Chengxin¹ Wu Zhensen² Feng Dongtai¹

(¹ School of Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)
² School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Based on fractal theory, Monte Carlo method is used to simulate the structures of mixed agglomerates in random distribution. The equivalent complex refractive index of internal mixture of agglomerates containing different volume fractions of black carbon particles is obtained by Bruggeman effective medium theory. The extinction characteristic quantities including the absorption, scattering and extinction efficiency factor of mixed agglomerates in internal and external mixing states are calculated based on the discrete dipole approximation (DDA) method. Meanwhile, the influence of mixture patterns, volume content, solar radiative wavelength, the monomer diameters, and the number of monomers on the radiative properties of mixed agglomerates is mainly discussed. Comparison of the numerical results obtained by the DDA method with T matrix method shows that the numerical results obtained by two numerical methods are very similar. The results show that the scattering efficiency factor is substantially sensitive to mixing patterns, the extinction efficiency factor is weaker, while the absorption efficiency factor is not sensitive. The influence of mixing patterns on the scattering and extinction efficiency factor is becoming more obvious with the increase of the size of mixed agglomerates. The absorption, scattering and extinction efficiency factor of mixed agglomerates in internal and external mixing states increase monotonically with the increasing of the volume fraction of black carbon, and the increase varies with the size parameters of mixed agglomerates.

Key words scattering; mixed agglomerates; Bruggeman effective medium theory; discrete dipole approximation method; extinction characteristics

OCIS codes 290.1310; 290.2200; 290.4210; 290.5850

收稿日期: 2011-09-06; 收到修改稿日期: 2011-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(60771038, 61172031)资助课题。

作者简介: 类成新(1976—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事目标激光散射特性方面的研究。E-mail: xdpostgraduate@163.com

1 引 言

大气气溶胶粒子普遍存在于对流层中,它们通过对太阳的短波辐射和地气系统的长波辐射的散射和吸收作用来影响地气的能量平衡,从而对气候变化产生不可低估的作用^[1]。气溶胶在大气科学和环境科学领域受到日益广泛的关注,特别是气候变化研究方面,气溶胶粒子对太阳辐射的吸收和散射作用被认为是影响气候变化的十分重要的关键因子^[2,3]。研究气溶胶粒子的消光特性对大气探测、气候模式、辐射传输以及遥感等方面都具有十分重要的意义。

目前,国内外对于凝聚粒子的消光性能进行过许多研究,其中部分研究人员将凝聚粒子视为单一成分的均匀体,没有区分其混合状态^[4~7]。但是后来的研究者指出,实际的大气气溶胶并不是单一成分的,而是由不同成分组成的混合体,况且当气溶胶粒子中的各种不同成分所处的混合状态不同时,其光散射特性有明显差异^[8~10]。虽然,有些学者^[11,12]曾对内外混合气溶胶粒子的消光特性进行了详细的研究,但他们均把气溶胶粒子看作单个球形粒子来处理,而没有考虑气溶胶粒子的实际结构,将其看作球形粒子,在数值计算时可以大为简化,但计算结果与实际结果存在一定误差^[13,14]。为此,本文以黑碳和硅酸盐成分组成的混合凝聚粒子为例,分析内外两种混合方式下随机分布混合凝聚粒子的消光特性。根据分形生长理论模型对随机分布混合凝聚粒子的复杂结构采用蒙特卡罗方法进行了仿真模拟,利用 Bruggeman 有效介质理论^[15,16]给出了占有不同体积份额黑碳的内混合凝聚粒子的等效折射率,采用离散偶极子近似方法(DDA)数值计算了内外混合方式下黑碳和硅酸盐两种成分组成的随机分布混合凝聚粒子的吸收、散射和消光效率因子,深入探讨了混合方式、黑碳体积比、入射波长以及基本粒子粒径和数量对随机分布凝聚粒子消光特性的影响规律。

2 原理与方法

2.1 离散偶极子近似方法

DDA 方法是由 Purcell 等^[17]于 1973 年提出,经过 Draine 等^[18,19]的进一步改进,逐步发展成为一种原则上可应用于任意形状及尺寸的粒子的吸收、散射及消光等光学性质进行计算的数值方法。DDA 方法的基本思想是:将连续散射物体近似为有限个可极化的点阵,每个点通过对局域电场(入射场以及其他点

的辐射场)的响应获得偶极矩,散射体上所有点在远场的辐射的总和构成散射场。若 \mathbf{r}_j ($j=1,2,\dots,N$) 处的电场为 \mathbf{E}_j (入射场 $\mathbf{E}_{inc,j}$ 与其他 $N-1$ 个偶极子的散射场的总和),极化率为 $\boldsymbol{\alpha}_j$,则该点的偶极矩 \mathbf{P}_j 为

$$\mathbf{P}_j = \boldsymbol{\alpha}_j \mathbf{E}_j = \boldsymbol{\alpha}_j (\mathbf{E}_{inc,j} - \sum_{l \neq j} \mathbf{A}_{jl} \mathbf{P}_l), \quad (1)$$

系数 \mathbf{A}_{jl} 为一个 3×3 矩阵:

$$\mathbf{A}_{jl} = \frac{\exp(ikr_{jl})}{r_{jl}} \times \left[k^2 (\mathbf{r}_{jl} \mathbf{r}_{jl} - \mathbf{I}_3) + \frac{ikr_{jl} - 1}{r_{jl}^2} (3\mathbf{r}_{jl} \mathbf{r}_{jl} - \mathbf{I}_3) \right], \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为入射波长; $r_{jl} = |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_l|$, $\mathbf{r}_{jl} = (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_l)/r_{jl}$, \mathbf{I}_3 为 3×3 单位矩阵。若定义 $\mathbf{A}_{jj} \equiv \boldsymbol{\alpha}_j^{-1}$, 则偶极矩 \mathbf{P}_j 满足 $3N$ 个复线性方程组:

$$\sum_{l=1}^N \mathbf{A}_{jl} \mathbf{P}_l = \mathbf{E}_{inc,j}. \quad (3)$$

由(3)式可解出 \mathbf{P}_l , 求得 \mathbf{P}_l 后可以得到散射体的消光截面 σ_{ext} , 吸收截面 σ_{abs} , 散射截面 σ_{sca} 分别为^[18]

$$\begin{aligned} \sigma_{ext} &= \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \text{Im}(\mathbf{E}_{inc,j}^* \mathbf{P}_j), \\ \sigma_{abs} &= \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \left\{ \text{Im}[\mathbf{P}_j (\boldsymbol{\alpha}_j^{-1})^* \mathbf{P}_j^*] - \frac{2}{3} k^3 |\mathbf{P}_j|^2 \right\}, \\ \sigma_{sca} &= \sigma_{ext} - \sigma_{abs}. \end{aligned} \quad (4)$$

表征凝聚粒子消光特性的参量为消光(吸收、散射)效率因子,表达式分别为: $Q_{ext} = \sigma_{ext}/\pi a_{equiv}^2$, $Q_{abs} = \sigma_{abs}/\pi a_{equiv}^2$, $Q_{sca} = \sigma_{sca}/\pi a_{equiv}^2$, 其中 a_{equiv} 为等效半径(等体积球形粒子半径)。对于随机取向的混合凝聚粒子的消光特性参量表示为^[18]

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} Q(\beta, \theta, \phi) d\beta d(\cos \theta) d\phi, \quad (5)$$

式中 $\langle Q \rangle$ 为混合凝聚粒子各种取向的消光参量的平均值; $Q(\beta, \theta, \phi)$ 为系统坐标中某特定取向的混合凝聚粒子消光参量,其中 β, θ, ϕ 为空间方位角,符号含义参见文献[20]。

2.2 混合凝聚粒子的内外混合模型

对气溶胶粒子混合状态的研究,目前通常是分两种理想的情况,即外混合状态和内混合状态。由于混合方式的不同,使得含有相同成分的随机分布混合凝聚粒子的各消光参量也有所不同。

所谓内混合状态是指混合凝聚粒子中的每个基本粒子都是由多种气溶胶成分组成的混合体。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其光学特性^[12,21]。于是,根据 Bruggeman 有效介质理论给出混合凝聚粒子中每个基本粒子(假设混

合凝聚粒子中所有基本粒子的粒径是相同的)等效复折射率,然后采用离散偶极子近似方法研究内混合状态下混合凝聚粒子的消光特性。

所谓外混合状态是指混合凝聚粒子中每个基本粒子均含有一种成分,具有不同成分的基本粒子各自独立地随机分布于整个混合凝聚粒子中。外混合状态的气溶胶粒子用等效折射率计算将产生较大的误差^[11]。因此,本文根据每个基本粒子的尺度参数及复折射率,利用离散偶极子近似方法计算整个混合凝聚粒子的消光特性参量。外混合凝聚粒子中黑碳与硅酸盐粒子的体积比通过两种成分的基本粒子

的个数来得到。

2.3 混合凝聚粒子的结构模型

文中随机分布混合凝聚粒子的空间结构是根据团簇-团簇聚集(CCA)模型^[22],采用蒙特卡罗方法进行模拟的,具体模拟过程参见文献[20]。该模型粒子数目与分形维数之间的关系 $N = k_f (R_g/d_p)^{D_f}$, D_f 为分形维数, k_f 为前向因子,两者都是常数,文中取值分别为 $D_f = 1.8$, $k_f = 5.8$ ^[23,24]。其中部分含有不同体积份额黑碳的外混合凝聚粒子的空间结构模拟结果如图 1 所示。

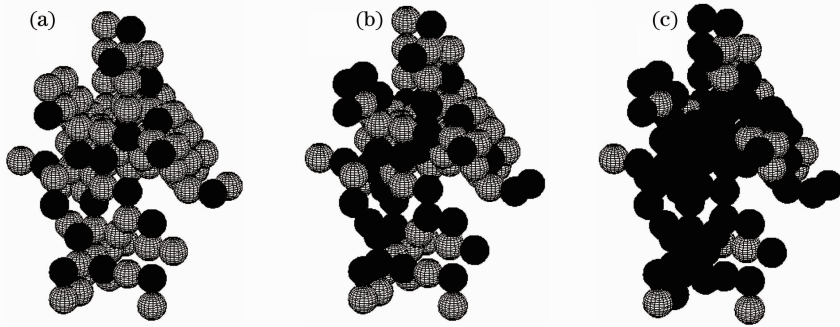


图 1 由 $N=150$ 个基本粒子组成的外混合凝聚粒子的空间结构. 黑色代表黑碳粒子,灰色代表硅酸盐粒子. 黑碳粒子体积比分别为(a) $f_v=0.2$; (b) $f_v=0.4$; (c) $f_v=0.8$

Fig. 1 External mixed agglomerates with black carbon particles in the case of $N=150$, in which the gray and black spheres denote silicate and black carbon particle. The volume ratio of black carbon particle is (a) $f_v=0.2$; (b) $f_v=0.4$; (c) $f_v=0.8$

3 结果与分析

随机分布混合凝聚粒子的消光特性是很复杂的,它不仅依赖于凝聚粒子的混合方式,还与凝聚粒子中基本粒子的粒径、数量以及各成分的体混合比有很紧密的联系。本文主要从混合方式、基本粒子的粒径和数量以及黑碳体积比等方面,探讨其对混合凝聚粒子消光特性的影响。图 2 给出了采用 DDA 和 T 矩阵方法所计算的随机分布混合凝聚粒

子在内外混合方式下的消光效率因子随黑碳体积比的变化关系。其中入射波长为 $0.55 \mu\text{m}$,对应的黑碳和硅酸盐气溶胶粒子的复折射率分别为 $1.98 + i0.2321$ ^[25] 和 $1.717549 + i0.0294$ ^[26]。凝聚粒子中基本粒子的数量 N 取 50、100、150,粒径 d_p 为 20 nm。可以发现,两种数值方法的计算结果吻合得非常好。另外,通过对其他数值结果的对比,同样发现两种数值方法的计算结果非常相近。

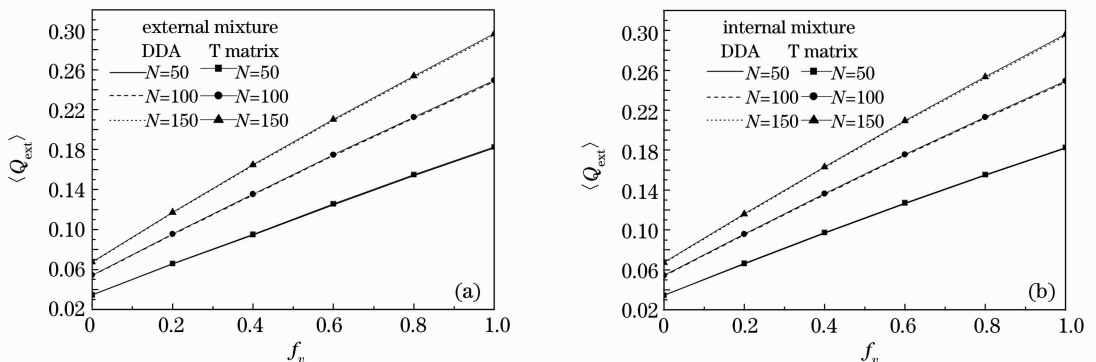


图 2 两种数值方法计算结果对比

Fig. 2 Comparison of results by two numerical methods

图 3 给出入射波长 λ 为 $0.55 \mu\text{m}$ 情况下,不同 类型随机分布混合凝聚粒子在内外混合方式下的吸 收、散射和消光效率因子 Q_{abs} 、 Q_{sca} 、 Q_{ext} 随黑碳体积 比变化规律。凝聚粒子中基本粒子的数量 N 取 50、 100、150, 粒径 d_p 分别为 20 nm [图 3(a)]和 40 nm [图 3(b)]。由图 3 可以发现,内外混合方式下相同 类型凝聚粒子的吸收效率因子的值均非常接近,这 说明混合方式对混合凝聚粒子的吸收效应影响不 大。混合方式对混合凝聚粒子的散射和消光效率因

子的影响比较明显,并且此影响随着凝聚粒子中基 本粒子的数量和粒径的增大而变得更加显著。说明 混合凝聚粒子的尺度参数越大,混合方式对其散射 和消光效应的影响愈明显。两种混合方式下,混合 凝聚粒子的吸收、散射和消光效率因子均随着黑碳 粒子体积比的增大而近似线性增加,这是由于随着 混合凝聚粒子中黑碳粒子体积比的增大,其等效复 折射率呈现近似线性增大趋势^[16]。

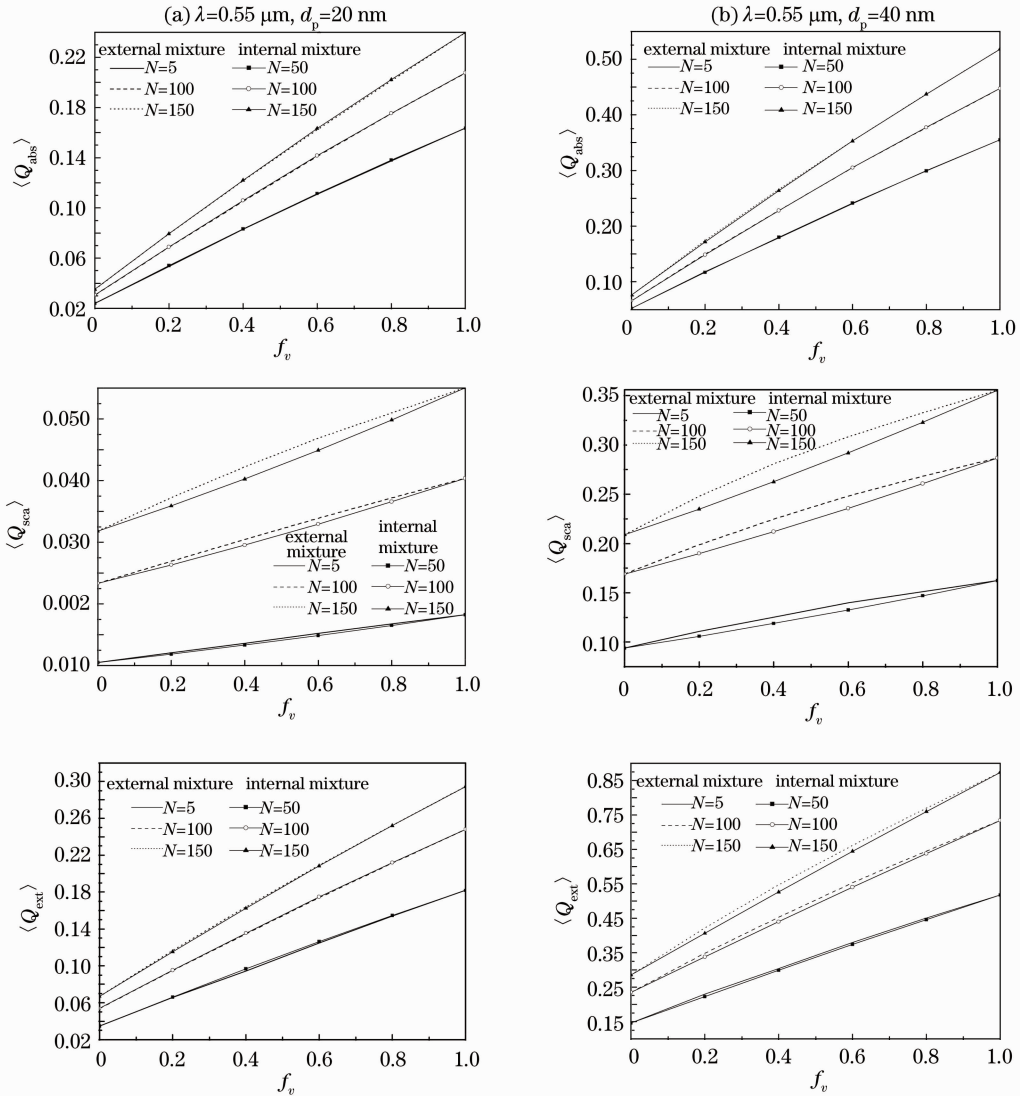


图 3 不同类型混合凝聚粒子在内外混合方式下的 Q_{abs} 、 Q_{sca} 和 Q_{ext} 随黑碳体积比变化曲线

Fig. 3 Absorption, scattering and extinction efficiency factor of randomly distributed agglomerates in internal and external mixing states versus different size parameters

图 4 给出不同入射波长情况下,随机分布混合凝 聚粒子在内外混合方式下的吸收、散射和消光效率因 子 Q_{abs} 、 Q_{sca} 、 Q_{ext} 随黑碳体积比变化规律。入射波长 为 $1.0 \mu\text{m}$ 时,对应的黑碳和硅酸盐气溶胶粒子的复

折射率分别为 $2.045 + i0.2346$ ^[25] 和 $1.714652 + i0.0303$ ^[26]。图中所示的随机分布凝聚粒子的基本 粒子的数量 N 为 150, 粒径 d_p 为 40 nm 。由图 4 知,不同入射波长下,混合方式对凝聚粒子的吸收效

率因子影响不大,但对散射效率因子的影响非常明显,对消光效率因子的影响较明显;两种混合方式下,凝聚粒子的吸收、散射、消光效率因子均随着黑碳体积比的增大而近似线性增大。同时,混合方式和黑碳体积比对混合凝聚粒子消光特性的影响程度随着入射波长的增大而减弱。其原因是随着入射波长增大,同一凝聚粒子的尺度参数相应减小,其消光

性能随之减弱。此外,从图 3 和图 4 还可以发现,在黑碳体积比为 0 和 1 情况下,内外混合方式下混合凝聚粒子的吸收、散射和消光效率因子均相等,原因是在这两种情况下凝聚粒子都是由单一成分构成的;黑碳体积比相同情况下,所有外混合凝聚粒子的散射效率因子均大于内混合凝聚粒子的散射效率因子。

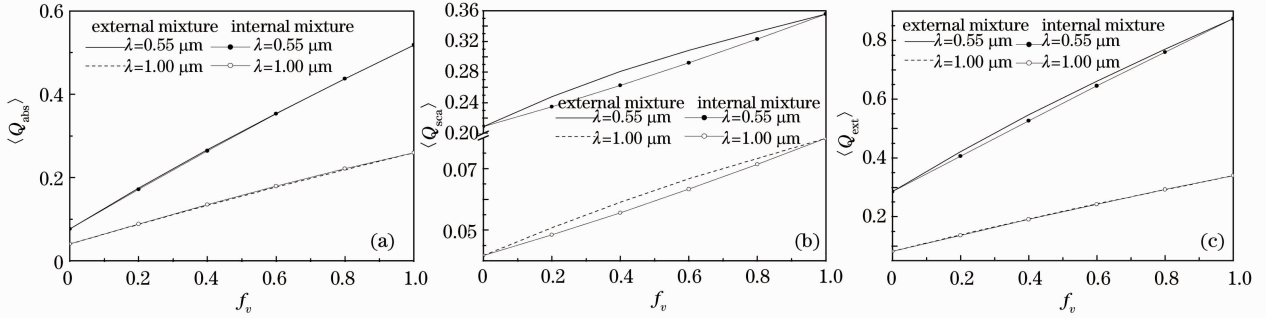


图 4 不同入射波长混合凝聚粒子在内外混合方式下的 Q_{abs} (a)、 Q_{scn} (b) 和 Q_{ext} (c) 随黑碳体积比变化曲线

Fig. 4 Absorption (a), scattering (b) and extinction (c) efficiency factor of randomly distributed agglomerates in internal and external mixing states at different wavelengths versus different size parameters

4 结 论

以黑碳和硅酸盐两种成分组成的内外混合凝聚粒子为研究对象,利用 Bruggeman 有效介质理论得到含有不同体积份额黑碳粒子的内混合凝聚粒子的等效复折射率,采用 DDA 方法对两种成分组成的随机分布混合凝聚粒子在内外混合状态下的吸收、散射和消光效率因子进行了数值计算,深入探讨了混合方式、容积含量、入射波长以及基本粒子粒径以及数量对混合凝聚粒子消光特性的影响。通过将所得数值结果与 T 矩阵方法的数值结果进行对比发现,用 DDA 方法得到的数值结果和 T 矩阵得到的结果非常相近。研究表明,随机分布混合凝聚粒子的散射效率因子对混合方式非常敏感,消光效率因子对混合方式较敏感,而吸收效率因子不敏感。随着凝聚粒子基本粒子的数量和粒径的增大以及入射波长的减小(均造成凝聚粒子尺度参数的增大),混合方式对散射和消光效率因子的影响愈加明显。随着黑碳粒子体积比的增大,内外混合方式下随机分布混合凝聚粒子的吸收、散射和消光效率因子均近似线性增加,并且增大的幅度随着凝聚粒子尺度参数的增大而增大。黑碳体积比相同情况下,所有外混合凝聚粒子的散射效率因子均大于内混合凝聚粒子的散射效率因子。

参 考 文 献

- 1 J. M. Haywood, D. L. Roberts, A. Slingo *et al.*. General circulation model calculations of the direct radiative forcing by anthropogenic sulfate and fossil-fuel soot aerosol[J]. *J. Climate*, 1997, **10**(7): 1562~1577
- 2 I. Schult, J. Feichter, W. F. Cooke. The effect of black carbon and sulfate aerosols on the global radiation budget [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D25): 30107~30117
- 3 S. Menon, J. Hansen, L. Nazarenko *et al.*. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, **297**(5590): 2250~2253
- 4 M. I. Mishchenko, L. D. Tracis, D. W. Mackowski. T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: a review[J]. *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer.*, 1996, **55**(5): 535~575
- 5 D. W. Mackowski, M. I. Mishchenko. Calculation of the T-matrix and the scattering matrix for ensembles of spheres[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(11): 2266~2278
- 6 D. W. Mackowski. Calculation of total cross sections of multiple-sphere clusters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(11): 2851~2861
- 7 Li Yi. Theoretical Study on Extinction Characters of Non-Spherical Particles and Their Smokescreen[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology Press, 2001
李毅. 非球形微粒及其形成烟幕的消光机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2001
- 8 G. Lesins, P. Chylek, U. Lohmann. A study of internal and external mixing scenarios and its effect on aerosol optical properties and direct radiative forcing[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(D10): 4094~4105
- 9 T. P. Ackerman, O. B. Toon. Absorption of visible radiation in atmosphere containing mixtures of absorbing and nonabsorbing particles[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(20): 3661~3667

- 10 M. Mallet, J. C. Roger, S. Despiou *et al.*. A study of the mixing state of black carbon in urban zone[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D04202
- 11 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
- 12 Huang Honglian, Huang Yinbo, Han Yong *et al.*. Light extinction properties of marine aerosol particles in internal mixing state[J]. *J. Atmos. & Environm. Opt.*, 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
- 13 Lei Chengxin, Liu Hanfa, Zhang Huafu. Research on laser scattering property by randomly oriented soot clustered agglomerates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 876~880
类成新, 刘汉法, 张化福. 随机取向烟尘团簇粒子激光散射特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 876~880
- 14 Lei Chengxin, Wu Zhensen. A study of radiative properties of randomly distributed soot aggregates[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(8): 5692~5699
类成新, 吴振森. 随机分布烟尘团簇粒子辐射特性研究[J]. 物理学报, 2010, **59**(8): 5692~5699
- 15 T. C. Choy. 1999 Effective Medium Theory: Principles and Applications [M]. Oxford: Oxford University Press, 10
- 16 Lei Chengxin, Feng Dongtai, Wu Zhensen. Influence of impurity on radiative properties of randomly oriented cluster agglomerates [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1055~1060
类成新, 冯东太, 吴振森. 掺杂对随机取向团簇粒子辐射特性的影响[J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 1055~1060
- 17 E. M. Purcell, C. R. Pennypacker. Scattering and absorption of light by non-spherical dielectric grains[J]. *Astrophys. J.*, 1973, **186**(12): 705~714
- 18 B. T. Draine. The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains[J]. *Astrophys. J.*, 1988, **333**(10): 848~872
- 19 B. T. Draine, P. J. Flatau. The discrete-dipole approximation for scattering calculations [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(4): 1491~1499
- 20 Lei Chengxin, Wu Zhensen. Study on the extinction properties of randomly oriented smoke screen clustered agglomerates [J]. *Chin. J. Computational Phys.*, 2010, **27**(4): 593~597
类成新, 吴振森. 随机取向烟幕凝聚粒子的消光特性研究[J]. 计算物理, 2010, **27**(4): 593~597
- 21 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
- 22 R. Jullien, R. Botet. Aggregation and Fractal Aggregates [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1987. 46~50
- 23 Lei Chengxin, Zhang Huafu, Liu Hanfa. Numerical calculation of Mueller matrices of randomly distributed soot cluster agglomerates [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(10): 7168~7175
类成新, 张化福, 刘汉法. 随机分布烟尘团簇粒子穆勒矩阵的数值计算[J]. 物理学报, 2009, **58**(10): 7168~7175
- 24 Lei Chengxin, Zhang Huafu, Liu Hanfa. 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
- 25 F. Rouleau, P. G. Martin. Shape and clustering effects on the optical properties of amorphous carbon [J]. *The Astrophys. Journal*, 1991, **377**(8): 526~540
- 26 B. T. Draine. Tabulated optical properties of graphite and silicate grains [J]. *The Astrophys. Journal supplement series*, 1985, **57**(3): 587~594

栏目编辑: 李文喆