

激光与光电子学进展

核壳结构粒子与群粒子光学散射特性研究

毛前军*, 杨开雁

武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉 430065

摘要 为探究近红外波段下气溶胶粒子的散射特性, 基于离散偶极子近似法, 对黑碳和硫酸盐气溶胶内混合核壳结构粒子及同种气溶胶粒子的 2 种假设结构的光学散射特性进行研究。编译构建以黑碳为核、硫酸铵为壳的核壳结构粒子模型, 模拟计算特定入射方向的入射波长 (875、1020、1640、2000 nm) 下粒子的消光效率因子、散射效率因子、吸收效率因子、不对称因子及单次散射反照率随有效粒径的变化。数值计算结果表明: 在同一入射波长下, 随着有效粒径的增大, 单核核壳粒子、二核团簇粒子、三核团簇粒子的消光、散射、吸收效率因子主要呈先增后减趋势, 且 3 种粒子的散射、消光效率因子相差不超过 10%。随着核粒子数增加, 粒子结构半径增大, 效率因子峰值后移。在 4 个波长下, 多核团簇粒子的不对称因子平均比单核核壳粒子大 0.1777、0.1960、0.2900 和 0.3131, 而 2 种多核粒子的不对称因子平均仅相差 0.096。在有效粒径相同的情况下, 单核核壳粒子的单次散射反照率基本高于多核粒子, 波长越大差异越明显。该研究结果可对复杂大气环境下气溶胶粒子的光学散射特性、污染物及气候效应监测等领域的分析提供一定的参考价值。

关键词 红外波段; 气溶胶粒子; 核壳粒子; 离散偶极子近似法; 散射与吸收

中图分类号 P407.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222987

Optical Scattering Properties of Particles and Group Particles with Core-Shell Structure

Mao Qianjun*, Yang Kaiyan

School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, Hubei, China

Abstract To explore the scattering characteristics of aerosol particles in the near infrared band, the optical scattering characteristics of two hypothetical structures having mixed core-shell particles and the same aerosol particles in black carbon and sulfate aerosols are investigated by using discrete dipole approximation. A core-shell particle model with black carbon as the core and ammonium sulfate as the shell is constructed to simulate the extinction efficiency factor, scattering efficiency factor, absorption efficiency factor, asymmetry factor, and single scattering albedo of the particles at several incident wavelengths (875, 1020, 1640, and 2000 nm) in specific incident directions with varied effective particle sizes. The numerical results show that the extinction, scattering, and absorption efficiency factors of mononuclear shell particle, two-core cluster particle, and three-core cluster particle initially increase and then decrease with an increasing effective particle size at the same incident wavelength. In addition, the differences in the scattering and extinction efficiency factors of the three particles are less than 10%. With an increase in the number of nuclear particles, the radius of the particle structure increases, and the peak of the efficiency factor shifts backward. At the four different wavelengths, the asymmetry factor of the multi-nucleated cluster particles is 0.1777, 0.1960, 0.2900, and 0.3131 larger than that of the mononuclear shell particles on average, and the average difference between the asymmetry factors of the two types of multi-nucleated particles is 0.096. At the same effective particle size, the single scattering albedo of mononuclear shell particles is higher than that of multi-core particles; the larger the wavelength, the more distinct is the difference. The results are useful for further analyses of the optical scattering characteristics of complex atmospheric aerosol particles and monitoring of pollutants and climate.

Key words infrared band; aerosol particle; core-shell particle; discrete dipole approximation method; scattering and absorption

收稿日期: 2022-11-07; 修回日期: 2022-11-21; 录用日期: 2022-12-07; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(51876147)

通信作者: *maoqianjun@163.com

1 引言

气溶胶粒子的形状、复折射率等是粒子光散射特性研究中的重点^[1-2]。自然界中的气溶胶粒子以多种状态和不规则形状呈现,可以对光进行散射、吸收、反射、折射等。对形状各异的气溶胶粒子光散射特性的研究中,球形、椭球形、圆柱形等模型被广泛研究^[3]。观测研究发现,大气中除了存在单层结构粒子,还存在核壳结构粒子。很多气溶胶粒子散射特性研究将气溶胶粒子简化为球形^[4]。PM_{2.5}的重要组成部分有碳质气溶胶(Black carbon)和硫酸盐气溶胶(Ammonium sulfate),这种粒子大量存在于空气中,不仅危害人体健康,还对大气辐射、气候效应、大气环境质量、能见度等产生影响。黑碳气溶胶有较强的吸收太阳辐射的能力,对大气有增温效应,进而可以改变地球辐射平衡;硫酸盐气溶胶对太阳辐射主要起散射作用,因而对整个地-气系统起到降温的作用^[5-6]。

很多学者在粒子形状结构、粒子类型、多种粒子的混合状态以及粒子研究方法等领域进行了研究^[7]。宋跃辉等^[8]仿真得出,气溶胶粒子的消光和散射效率因子随尺度参数的增加呈减幅振荡。针对由烟雾沉降现象产生的非均匀烟雾介质环境,张肃等^[9]基于蒙特卡罗仿真程序,建立了实验测试与模拟仿真中非均匀环境参数的联系。Wang等^[10]提出了一种利用有效密度和复折射率虚部实时反演气溶胶化学成分的新算法。赵佳佳等^[11]研究了亲水性和疏水性单颗粒气溶胶的吸湿性差异引起的散射特性差异。Zou等^[12]定量分析了气溶胶化学成分和粒径分布对散射系数的影响。

在多种不同粒子的混合以及形成的团簇粒子方面,很多学者做了研究^[13-14]。Han等^[15]研究了不同气溶胶的外部、一半外部、一半内部和内部混合4种混合状态对辐射强迫的影响。徐澍等^[16]利用团簇T矩阵方法计算并研究了黑碳团簇粒子和具备核-壳结构的混合态粒子的光学特性。在核壳结构冰晶粒子的散射特性研究中,任神河等^[17]利用离散偶极近似(DDA)法计算了有效尺寸对椭球形、六角平板和六角棱柱3种簇团形模型效率因子的影响;张学海等^[18]研究了四波段条件下混合比对单分散系沙尘-硫酸盐颗粒的核壳椭球结构粒子光学特性的影响。总结发现,对近红外波段黑碳和硫酸盐的核壳结构粒子的研究相对较少。鉴于此,本文基于DDA法模拟计算了4个近红外波长下的黑碳-硫酸铵核壳结构粒子及2种多核团簇粒子的光学散射特性。

2 数学模型与粒子建模

2.1 DDA法

DDA法最早由Purcell和Pennypacker^[19]提出。Draine等^[20]基于此算法编写了一套开源软件包(DDSCAT),该软件使得DDA法成为一种较流行的

散射计算算法,DDA法被广泛用于大气气溶胶、水滴、冰晶等粒子的光散射特征的大气辐射研究中。相比于Mie理论,DDA法多用于多层球的散射计算,特别是针对非球形核壳结构粒子的散射,DDA法有一定的计算优势。其基本思想是用有限个离散且相互作用的偶极子的阵列来模拟实际的粒子,且通过任意一个点对局域电场的响应来获取偶极矩,这些点的辐射总和就构成了总的散射场^[21]。假设将散射体离散为 N 个偶极子,其中第 j 个偶极子取自 $\mathbf{r}_j(j=1, 2, \dots, N)$,极化率为 α_j , \mathbf{r}_j 处的电场是入射场 \mathbf{E}_{inc-j} 和其余 $N-1$ 个偶极子产生电场的叠加,记为 \mathbf{E}_j ,则电偶极矩 \mathbf{p}_j 的计算公式为

$$\mathbf{p}_j = \alpha_j \mathbf{E}_j = \alpha_j \left(\mathbf{E}_{inc-j} - \sum_{i=1, j \neq i}^N \mathbf{A}_{ij} \cdot \mathbf{p}_i \right), \quad (1)$$

式中: \mathbf{A}_{ij} 是 3×3 的系数矩阵。由式(1)解出参量 \mathbf{p}_j 后,可得到偶极子的电偶极矩 \mathbf{p}_j ,从而计算出消光、吸收和散射效率等散射参量。消光效率因子(Q_{ext})、吸收效率因子(Q_{abs})、散射效率因子(Q_{sca})分别为粒子消光截面、吸收截面、散射截面与粒子等体积球体几何截面的比值,分别描述了气溶胶粒子消光作用、吸收作用、和散射作用的强度,其计算公式为

$$Q_{ext} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \text{Im}(\mathbf{E}_{inc-j}^* \cdot \mathbf{p}_j) / (\pi a_{eff}^2), \quad (2)$$

$$Q_{abs} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \left\{ \text{Im}[\mathbf{p}_j \cdot (\alpha_j^{-1})^* \mathbf{p}_j^*] - \frac{2}{3} k^3 |\mathbf{p}_j|^2 \right\} / (\pi a_{eff}^2), \quad (3)$$

$$Q_{sca} = Q_{ext} - Q_{abs} = \frac{k^4}{|E_{inc-j}|^2} \int d\Omega \left| \sum_{j=1}^N [\mathbf{p}_j - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}_j)] \right|^2 \exp(-ik\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_j) / (\pi a_{eff}^2), \quad (4)$$

式中: E_0 为入射电场幅值; a_{eff} 为有效粒径; $d\Omega$ 为立体角微分量; $*$ 为取复数的共轭; $k=2\pi/\lambda$, λ 为入射波长; \mathbf{n} 为散射方向。

散射相函数是研究粒子与入射波长相互作用的重要途径之一,即将某个入射方向的入射能量散射到其他方向的概率。基于程晨等^[7]提出的散射相函数经验公式(RH-G)计算了粒子的相函数随散射角度的变化关系,其表达式为

$$p^{RHG}(\theta, g) = \frac{(1-g^2)}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}} + \frac{3(1-g)}{4}(1+\cos^2\theta) + (g-1), \quad (5)$$

式中: θ 为散射角,且 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$; g 为不对称因子。

2.2 粒子模型

有机物包裹结构和核壳状结构是颗粒物老化的重要指示性结构。在大气粒子复杂的老化过程中,会形成一定的硫酸盐包裹黑碳的核壳粒子,二次气溶胶(硫

酸盐、硝酸盐、有机物)决定着颗粒物的混合结构,这类粒子的形状近似于球形^[22]。为了解近红外波段下核壳结构黑碳-硫酸铵粒子的散射特性,依据文献[23]和[24]中的透射电镜(TEM)图建立了如图1(a)所示的单核核壳粒子,其中 a 、 b 分别表示核壳粒子的核半径、

粒子半径,BC、AS表示黑碳、硫酸铵。核壳粒子的核半径 a 为 $1\ \mu\text{m}$,粒子半径 b 为 $2\ \mu\text{m}$,壳核厚度比为2:1。图1(b)展示了单核核壳粒子、二核团簇粒子、三核团簇粒子。黑碳和硫酸铵气溶胶粒子在不同波长下的复折射率指数如表1所示^[18]。

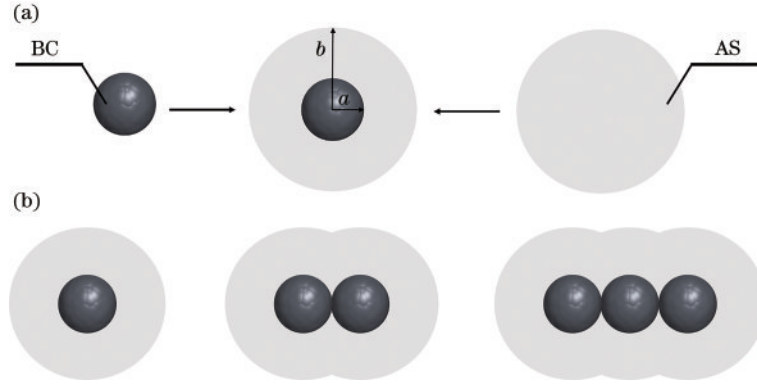


图1 粒子模型。(a)黑碳和硫酸盐气溶胶粒子混合的核-壳模型;(b)单核核壳粒子、二核团簇粒子和三核团簇粒子

Fig. 1 Particle models. (a) Core-shell models for mixing black carbon and sulfate aerosol particles; (b) mononuclear shell particle, two-core cluster particle, and three-core cluster particle

表1 硫酸铵和黑碳粒子在不同波长下的复折射率

Table 1 Complex refractive index of ammonium sulfate and black carbon particles at different wavelengths

| Wavelength /nm | Black carbon | | Ammonium sulfate | |
|----------------|--------------|-----------|------------------|-----------|
| | Real | Imaginary | Real | Imaginary |
| 875 | 1.950 | 0.66 | 1.750 | 0.43 |
| 1020 | 1.950 | 0.68 | 1.750 | 0.46 |
| 1640 | 1.950 | 0.79 | 1.776 | 0.46 |
| 2000 | 1.950 | 0.89 | 1.794 | 0.47 |

对于随机取向的空间团簇粒子,其散射穆勒(Mueller)矩阵元素的统计平均值可以由公式^[17]得出,其表达式为

$$\langle s_{ij} \rangle = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} s_{ij}(\beta, \theta, \phi) d\beta d(\cos \theta) d\phi, \quad (6)$$

式中: $\langle s_{ij} \rangle$ 为团簇粒子某穆勒矩阵元素的统计平均值;

$s_{ij}(\beta, \theta, \phi)$ 为系统中某特定取向团簇粒子穆勒矩阵的元素值; β, θ, ϕ 为空间方位角。定义入射光沿实验参考系X轴入射。

3 结果与讨论

根据图1建立的3种粒子结构模型,计算了4个波长下不同粒子的消光效率因子、吸收效率因子、散射效率因子以及单次散射反照率和不对称因子随有效粒径的变化,同时计算了3种粒子的散射相函数。

3.1 消光、吸收、散射效率因子随有效粒径变化的数值结果

如图2和图3所示,在有效粒径($0 < a_{\text{eff}} < 1$)范围内,粒子的消光、散射效率因子都呈现先增后减趋势,在 $0.6\ \mu\text{m}$ 处出现一次波动后继续减小。随着含核数量的增加,消光、散射效率因子的变化趋势基本一致。

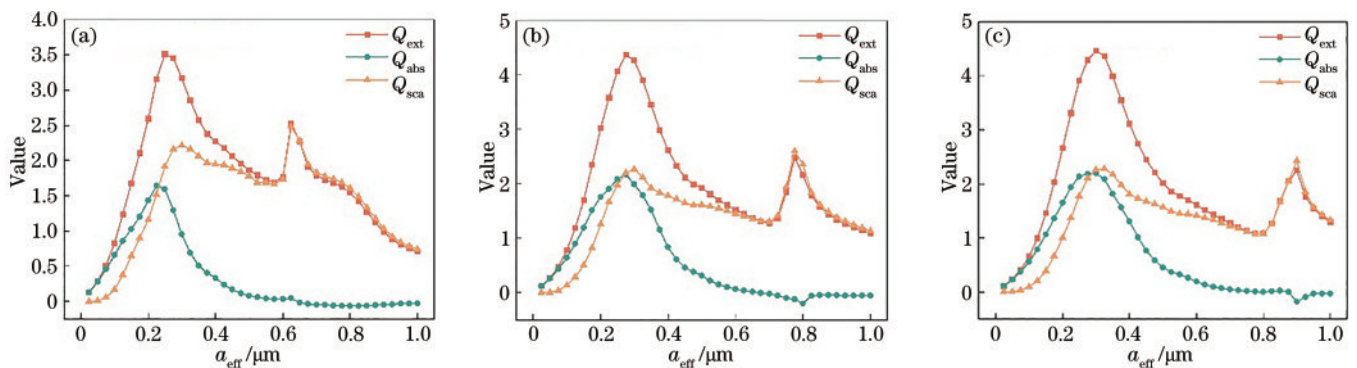


图2 不同粒子模型的消光、吸收、散射效率因子随有效粒径的变化关系($\lambda=875\ \text{nm}$)。(a)单核核壳粒子;(b)二核团簇粒子;(c)三核团簇粒子

Fig. 2 Relationship between extinction, absorption, and scattering efficiency factors of different particle models and effective particle size ($\lambda=875\ \text{nm}$). (a) Mononuclear shell particle; (b) two-core cluster particle; (c) three-core cluster particle

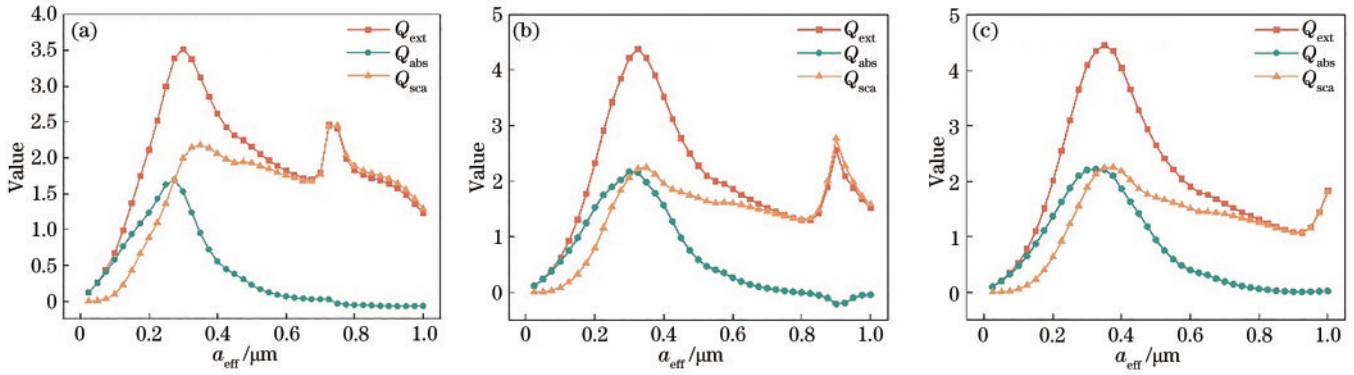


图 3 不同粒子模型的消光、吸收、散射效率因子随有效粒径的变化关系($\lambda=1020\text{ nm}$)。(a)单核核壳粒子;(b)二核团簇粒子;(c)三核团簇粒子

Fig. 3 Relationship between extinction, absorption, and scattering efficiency factors of different particle models and effective particle size ($\lambda=1020\text{ nm}$). (a) Mononuclear shell particle; (b) two-core cluster particle; (c) three-core cluster particle

入射波长为 875 nm 时,单核核壳粒子的消光、散射效率因子在有效粒径为 0.25、0.625 μm 时达到最大值 3.5134、2.4847;二核团簇粒子的消光、散射效率因子在有效粒径为 0.275、0.8 μm 时达到最大值 4.3805、3.0602;三核团簇粒子的消光、散射效率因子在有效粒径为 0.3、0.9 μm 时达到最大值 4.4641、2.4326。入射波长为 1020 nm 时,单核核壳粒子消光、散射效率因子的最大值为 3.5206、2.4500,与 875 nm 波长下的最大值相差 0.2%、1.4%;二核、三核团簇粒子的消光、散射效率因子的最大值与 875 nm 波长下的最大值相差 0.03%、9.4% 以及 0.3%、7.3%。该结果与任神河等^[17]在几种簇团核壳结构粒子的激光($\lambda=1060\text{ nm}$)散射特性研究中得到的散射规律,以及张学海等^[18]在波长为 0.87、1.02 μm 条件下对硫酸盐包裹沙尘气溶胶粒子散射系数的研究中所得的规律基本一致,这在一定程度上说明了核壳结构粒子散射特性的一般规律

性。同时,随着含核粒子数量增加,核内颗粒占总体积的比例相对减小。研究所用的粒子以黑碳为核、以硫酸盐为壳,黑碳折射率的虚部比硫酸盐折射率的虚部大,所以吸收效率因子随有效粒径增大而先增后减,并在一个值附近趋于稳定。随着入射波长的增大,消光、散射效率因子的波动变小,这是因为在此类粒子中,对光的散射主要发生在较近的核粒子前,对光的吸收主要体现在较远的核粒子处。

如图 4~5 所示,在入射波长为 1640 nm 和 2000 nm 时,单核核壳粒子中的消光、散射效率因子的最大值相差 1.2%、5.0%;二核、三核团簇粒子的消光、散射效率因子的最大值相差 0.5%、4.3% 以及 0.6%、0.5%。在更大的入射波长下,在一定有效粒径范围内,消光、散射、吸收效率因子先增后减;且随着含核粒子数量的增加,消光、散射、吸收效率因子的峰值后移。

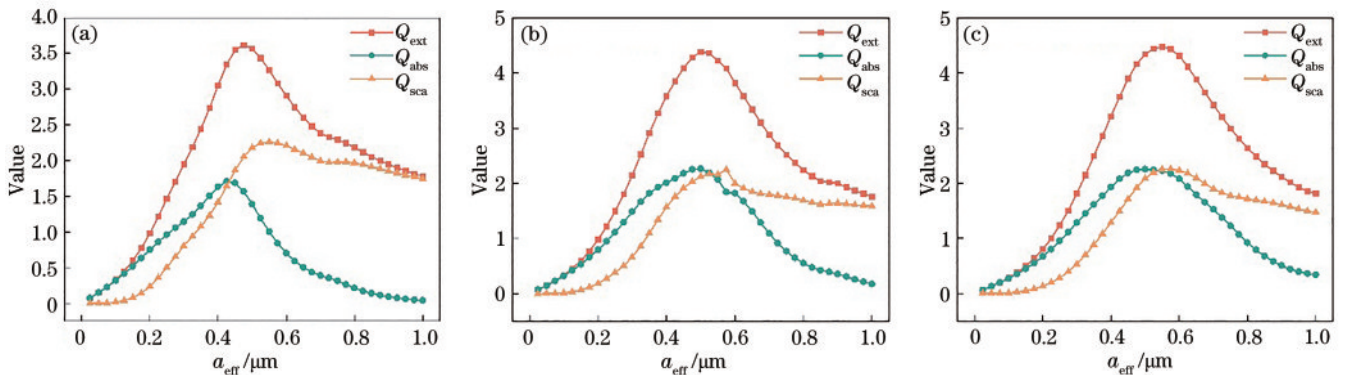


图 4 不同粒子模型的消光、吸收、散射效率因子随有效粒径的变化关系($\lambda=1640\text{ nm}$)。(a)单核核壳粒子;(b)二核团簇粒子;(c)三核团簇粒子

Fig. 4 Relationship between extinction, absorption, and scattering efficiency factors of different particle models and effective particle size ($\lambda=1640\text{ nm}$). (a) Mononuclear shell particle; (b) two-core cluster particle; (c) three-core cluster particle

3.2 不同粒子的不对称因子随有效粒径变化的数值结果

图 6 中,3 种粒子的不对称因子在 4 个波长下随有

效粒径的变化规律基本一致,都是先增后减。在较小波长下,不对称因子在 0.6 μm 后出现一定的波动,这说明随着入射波长的增大,单核核壳粒子和多核团簇粒

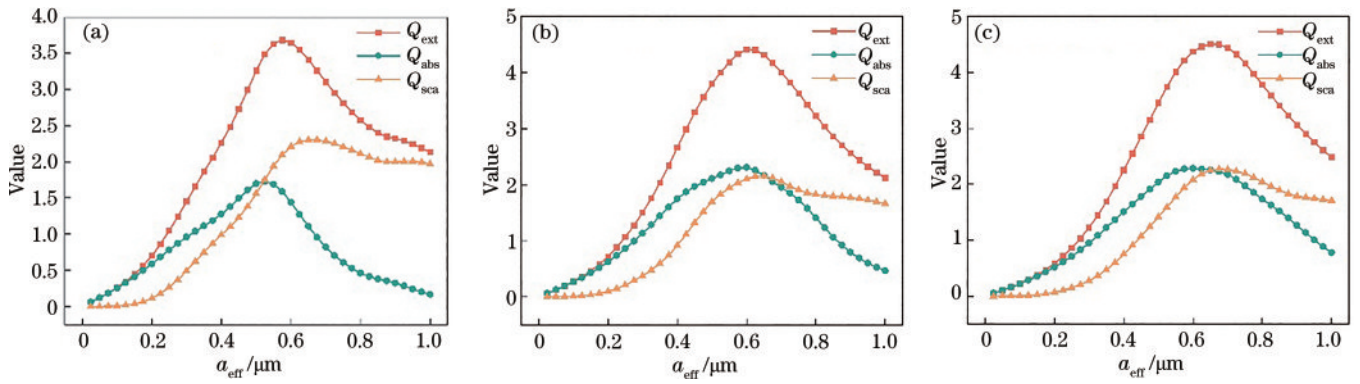


图 5 不同粒子模型的消光、吸收、散射效率因子随有效粒径的变化关系($\lambda=2000\text{ nm}$)。(a)单核核壳粒子;(b)二核团簇粒子;(c)三核团簇粒子

Fig. 5 Relationship between extinction, absorption, and scattering efficiency factors of different particle models and effective particle size ($\lambda=2000\text{ nm}$). (a) Mononuclear shell particle; (b) two-core cluster particle; (c) three-core cluster particle

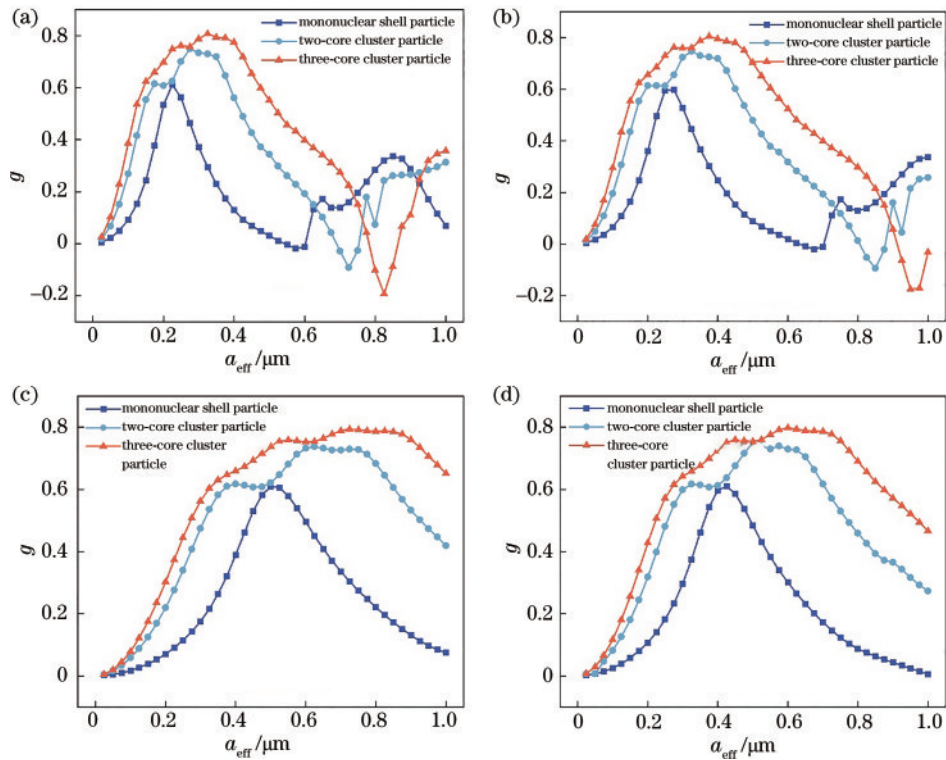


图 6 不同波长下不同粒子模型的不对称因子随有效粒径的变化。(a) $\lambda=875\text{ nm}$; (b) $\lambda=1020\text{ nm}$; (c) $\lambda=1640\text{ nm}$; (d) $\lambda=2000\text{ nm}$
Fig. 6 Variation of asymmetry factor with effective particle size of different particle models at different wavelengths. (a) $\lambda=875\text{ nm}$; (b) $\lambda=1020\text{ nm}$; (c) $\lambda=1640\text{ nm}$; (d) $\lambda=2000\text{ nm}$

子的前向散射先增强后减弱,后向散射先减弱后增强。在一定有效粒径范围内,二核团簇粒子、三核团簇粒子的不对称因子在 4 个波长下的均值依次是 0.3343、0.3413、0.4689、0.4939 及 0.4144、0.4410、0.5816、0.5848,两者与不同波长下单核核壳粒子的不对称因子平均相差 0.1378、0.1462、0.2566、0.2446 和 0.2179、0.2459、0.3695、0.3355。

3.3 单次散射反照率随有效粒径变化的数值结果

如图 7 所示,对于单次散射反照率而言,在波长相同时,无论是单核核壳粒子还是多核团簇粒子,其变化趋势基本一致,都是随有效粒径的增大呈增大趋

势。有效粒径小于 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 时,4 个波长下的 3 种粒子的单次散射反照率几乎相同。同种粒子在不同波长处的单次散射反照率差异比较显著。随着波长的增大,同种粒子的单次散射反照率减小。由此可见,在复折射率和粒子大小一定的情况下,粒子的单次散射反照率与入射波长有着紧密的关系。有学者在对黑碳-硫酸盐混合气溶胶的辐射特性分析中,通过比较内混合和外混合模型,发现内混合粒子的单次散射反照率较小,且有学者分析认为,0.85 是单次散射反照率的一个临界值^[13]。研究的粒子的单次散射反照率对波长的敏感程度不同:含核数多、波长小时,粒子

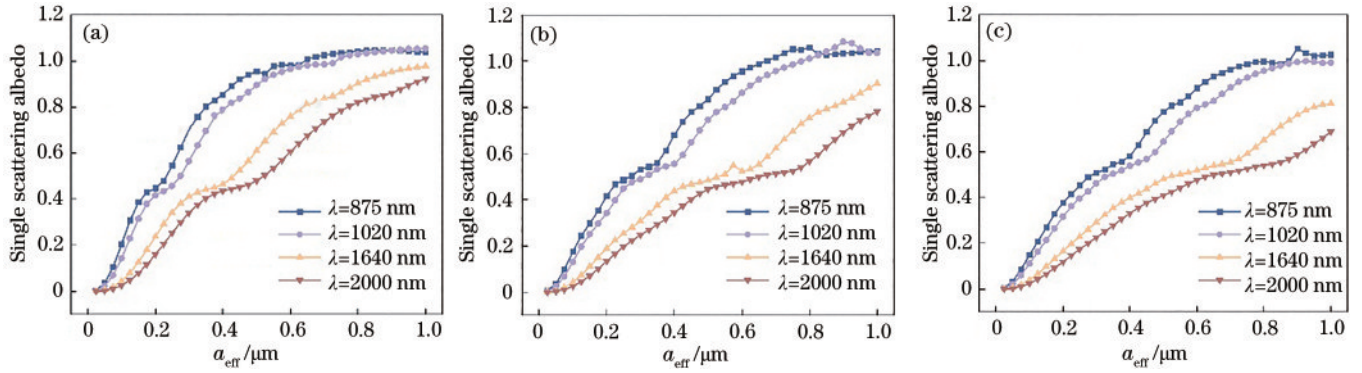


图7 不同波长下单次散射反照率随有效粒径的变化。(a)单核核壳粒子;(b)二核团簇粒子;(c)三核团簇粒子

Fig. 7 Variation of single scattering albedo with effective particle size at different wavelengths. (a) Mononuclear shell particle; (b) two-core cluster particle; (c) three-core cluster particle

的单次散射反照率在较小的有效粒径下达不到临界值,大量这样的多核粒子会对地气系统产生加热作用。

3.4 不同粒子的散射相函数随散射角的变化

基于相函数经验公式,计算了不同近红外波段下3种粒子模型的相函数与散射角的关系,如图8所示,单核核壳粒子和多核粒子的散射相函数明显不同。

种粒子的散射相函数对小波段都较为敏感。单核粒子的散射能量主要集中在前向,在较大波长情况下,80°~120°区间的相函数接近0。在1020 nm波长以后,二核团簇粒子的相函数基本重合(在10⁻¹左右),波长不再是相函数的主要影响因素。对于三核团簇粒子,其相函数随散射角的变化趋势基本相同,相函数最小值在80°左右出现。

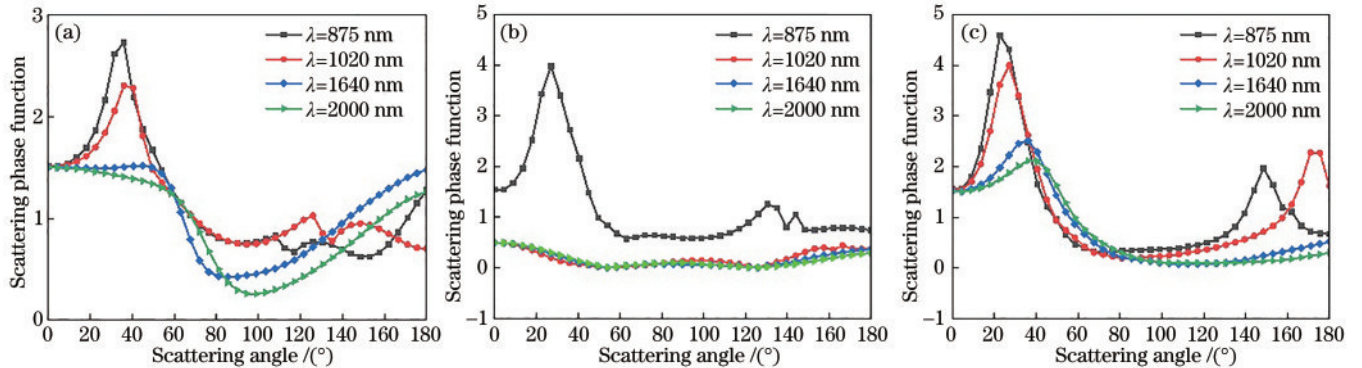


图8 散射相函数。(a)单核核壳粒子;(b)二核团簇粒子;(c)三核团簇粒子

Fig. 8 Scattering phase function. (a) Mononuclear shell particle; (b) two-core cluster particle; (c) three-core cluster particle

4 结 论

从可见光到近红外光,气溶胶的散射作用将直接影响地气系统的辐射平衡,因此对各类气溶胶粒子散射特性的研究具有十分重要的意义。利用DDA法计算了875、1020、1640、2000 nm波长处,以黑碳为核、硫酸铵为壳的核壳粒子与由同种气溶胶粒子组成的2种多核团簇粒子的光散射特性参数,主要结论如下:

1) 在同一入射波长下,消光、散射、吸收效率因子的变化趋势为先增大后减小,且3种粒子的散射、消光效率因子相差不超过10%。在875、1020 nm 2个波长下,在一定的有效粒径范围内,出现另一个小消光效率因子峰值。随着核粒子数的增多,消光效率因子的峰值后移,单核核壳粒子优先达到一个稳定值。消光、散射效率因子有一定的振荡幅值和中心值,这在一定程

度上反映了粒子的含核性。

2) 在有效粒径范围相同的情况下,三核团簇粒子的不对称因子平均分别比其他2种粒子大0.1517、0.3462,说明该种粒子的前向和后向散射强度的差异偏大。 $a_{\text{eff}} > 0.6 \mu\text{m}$ 时,不对称因子出现波动,这是由于核、壳两部分是不同类型的气溶胶粒子,且壳内黑碳单体间的相互作用会导致单体散射特性部分抵消,前向和后向散射差异有所减小。

3) 单次散射反照率变化趋势基本一致,在一定粒径范围内($a_{\text{eff}} < 0.15 \mu\text{m}$)有重合现象,这说明在该粒径范围内,含核数和波长对单次散射反照率的影响不大。

该研究结论对大气辐射传输、对地遥感、污染物监测等研究领域具有一定的参考意义。

参 考 文 献

[1] 刘毅,王明星,张仁健.中国气溶胶研究进展[J].气候

- 与环境研究, 1999, 4(4): 406-414.
- Liu Y, Wang M X, Zhang R J. The present status of aerosol research in China[J]. Climatic and Environmental Research, 1999, 4(4): 406-414.
- [2] 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.
- 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.
- [3] 阮立明, 齐宏, 王圣刚. 采用 DDA 方法分析非球形粒子辐射特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 413-418.
- Ruan L M, Qi H, Wang S G. Analysis of the radiative properties of non-spherical particles by discrete dipole approximation method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 413-418.
- [4] 冯倩, 邹斌, 赵威. 可见光波段非球形沙尘气溶胶散射和辐射特性的理论模拟[J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(1): 1-10.
- Feng Q, Zou B, Zhao W. Theoretical simulation of scattering and radiative properties of nonspherical dust aerosols at visible wavelength[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, 10(1): 1-10.
- [5] 黄虹, 万雪莹, 陈廷涛, 等. PM_{2.5}的健康危害、毒理效应与作用机制的研究[J]. 地球环境学报, 2020, 11(2): 125-142.
- Huang H, Wan X Y, Chen T T, et al. Update on the toxicological effects and mechanism of PM_{2.5}[J]. Journal of Earth Environment, 2020, 11(2): 125-142.
- [6] 李春杰, 孙陈阳. 单颗粒气溶胶研究进展[J]. 科技创新导报, 2021, 18(25): 89-92.
- Li C J, Sun C Y. Research progress of single particle aerosol[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2021, 18(25): 89-92.
- [7] 程晨, 徐青山, 朱琳. 非球形气溶胶粒子散射相函数经验公式[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(1): 1-7.
- Cheng C, Xu Q S, Zhu L. Empirical expression of phase function for non-spherical particles[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(1): 1-7.
- [8] 宋跃辉, 鲁雷雷, 李仕春, 等. 非球形气溶胶粒子光散射特性的仿真分析[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(2): 233-239.
- Song Y H, Lu L L, Li S C, et al. Analysis of light scattering properties of non-spherical aerosol particles[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(2): 233-239.
- [9] 张肃, 战俊彤, 付强, 等. 非均匀烟雾环境对偏振光传输特性的影响[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0729002.
- Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Influence of inhomogeneous smog environment on transmission characteristics of polarized light[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0729002.
- [10] Wang S, Crumeyrolle S, Zhao W X, et al. Real-time retrieval of aerosol chemical composition using effective density and the imaginary part of complex refractive index [J]. Atmospheric Environment, 2021, 245: 117959.
- [11] 赵佳佳, 顾芳, 张加宏, 等. 单颗粒气溶胶的吸湿增长模型及散射特性研究[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0501001.
- Zhao J J, Gu F, Zhang J H, et al. Hygroscopic growth model and scattering characteristics of single-particle aerosols[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0501001.
- [12] Zou J N, Wang M, Zhao S M, et al. Case study of the effects of aerosol chemical composition and hygroscopicity on the scattering coefficient in summer, Xianghe, southeast of Beijing, China[J]. Atmospheric Research, 2019, 225: 81-87.
- [13] 郝丽, 杨文, 吴统文, 等. 黑碳-硫酸盐混合气溶胶的辐射特性分析[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1238-1245.
- Hao L, Yang W, Wu T W, et al. Study on radiative property of soot-sulfate mixed aerosol[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(5): 1238-1245.
- [14] 毛前军, 王莉. 典型雾霾粒子及团簇的散射吸湿增长特性[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2429001.
- Mao Q J, Wang L. Scattering hygroscopic growth characteristics of typical haze particles and clusters[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2429001.
- [15] Han X, Zhang M G, Zhu L Y, et al. Model analysis of influences of aerosol mixing state upon its optical properties in East Asia[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30(4): 1201-1212.
- [16] 徐澍, 白连红, 范萌, 等. 黑碳团簇及具有包覆水层混合态粒子的光学特性[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0201002.
- Xu S, Bai L H, Fan M, et al. Optical properties of soot aggregates and mixture particles with water coatings[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0201002.
- [17] 任神河, 高明, 王明军, 等. 非球形簇团核壳结构粒子的激光散射特性[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(9): 20190545.
- Ren S H, Gao M, Wang M J, et al. Scattering properties of non-spherical cluster core-shell structure particle laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(9): 20190545.
- [18] 张学海, 魏合理, 段金龙, 等. 灰霾期间硫酸盐包裹沙尘气溶胶粒子的光学特性研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210052.
- Zhang X H, Wei H L, Duan J L, et al. Study on the optical properties of sulfate coated dust aerosol particles during haze episodes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20210052.
- [19] Purcell E M, Pennypacker C R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains[J]. The Astrophysical Journal Letters, 1973, 186: 705-714.
- [20] Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for scattering calculations[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(4): 1491-1499.
- [21] 保秀娟. 团聚形核壳结构冰晶粒子的光散射特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- Bao X J. Light scattering properties of agglomerated nucleated shell-structured ice crystall particles[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [22] 冯诗淇, 宋薇, 王妍, 等. 水雾包裹沙尘颗粒核壳结构的散射特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3218-3223.

- Feng S Q, Song W, Wang Y, et al. Scattering properties of core-shell structure of mist wrapped dust particles[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12): 3218-3223.
- [23] Wang Y Y, Pang Y E, Huang J, et al. Constructing shapes and mixing structures of black carbon particles with applications to optical calculations[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2021, 126(10): JD034620.
- [24] 张剑. 不同大气污染条件下气溶胶的来源及单颗粒的老化机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- Zhang J. Sources of aerosols and aging mechanisms of individual particles under various atmospheric polluted conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.