

一种非对称双成分气溶胶粒子模型的散射特性分析

张小林^{1,2} 黄印博¹ 饶瑞中¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 气溶胶单粒子的光学特性对于大气辐射过程的精确模拟至关重要。利用离散偶极子近似法, 研究了一种硫酸盐包裹黑碳的非对称双成分气溶胶粒子模型在尺度参数为 0.1~25 时的光学特性, 通过改变黑碳的位置分析了内部结构对内混合粒子光学特性的影响。黑碳位置对整个内混合体的消光、散射、后向散射效率因子、不对称因子、消光后向散射比和单次散射反照率有重要影响, 在瑞利散射区影响较小, 而在米氏散射区影响较大。黑碳位置仅对瑞利散射区的散射相函数和瑞利散射区中除了 0° 和 180° 附近之外散射角方向的影响较小。黑碳越小, 其位置对内混合体的消光、散射和后向散射效率因子的影响越小。同一尺度参数下, 黑碳离球心越近, 内混合体单次散射反照率越小, 而吸收效率因子则越大, 存在明显的透镜效应。黑碳越小, 透镜效应越明显; 内混合体尺度参数越大, 透镜效应也越明显。

关键词 大气光学; 气溶胶粒子; 光散射; 内部结构; 透镜效应

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1101001

Light Scattering Analysis of an Asymmetrical Two-Component Aerosol Particle Model

Zhang Xiaolin^{1,2} Huang Yinbo¹ Rao Ruizhong¹

(¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Orientation-averaged optical characteristics of single aerosol particles are needed for precise modeling of radiative processes in the Earth's atmosphere. Optical properties of internal-mixed urban aerosols with the sulfate coated on black carbon are studied based on discrete dipole approximation for the size parameters from 0.1 to 25. Effects of the internal topology on particulate properties are also performed by changing the position of black carbon. Significant influences are observed for the extinction, scattering, backscattering efficiency factors, asymmetry parameters, extinction-to-backscattering ratios and single scattering albedos of the internal-mixed particles. These influences are relatively small for the size parameter less than 1 while those are large for size parameter more than 1. Meanwhile only the scattering phase function in Rayleigh scattering region and linear polarization in Rayleigh scattering region except the scattering angles near 0° and 180° are almost irrespective of the black carbon position. Smaller black carbon corresponds to weaker effects of black carbon positions on the extinction, scattering and backscattering efficiency factors. Shorter distance of black carbon from the boundary of mixtures with the same size parameter is accompanied by larger single scattering albedos and lower absorption efficiency factors associated with the lensing effect. Small black carbon or large size parameter has the more evident lensing effect related to internal-mixed particles with short distance of black carbon from the center of mixtures with the same size.

Key words atmospheric optics; aerosol particle; light scattering; internal topology; lensing effect

OCIS codes 010.1110; 010.1290; 290.1310; 290.5850

收稿日期: 2013-05-20; 收到修改稿日期: 2013-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(40905009)、国家 973 计划(2013CB955802)

作者简介: 张小林(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事大气气溶胶光学特性方面的研究。E-mail: ybhuan@aiofm.ac.cn

导师简介: 饶瑞中(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光大气传输、大气光学特性等方面的研究。

E-mail: rao@aiofm.ac.cn(中国光学学会会员号: S0404207915)

1 引言

大气气溶胶粒子是指大气中悬浮的各类固体和液体微粒共同组成的多相粒子体系,它可以是自然过程形成的,也可以是人类活动产生的。大气气溶胶对地球气候^[1-2]、大气环境^[3-4]和人类健康^[5]有着深远影响。激光在大气中传输时,气溶胶粒子的吸收、散射效应将直接导致激光能量的衰减,同时吸收效应所产生的非线性热晕效应还会引起光斑畸变和光束偏移等^[6-7],从而对激光工程等在大中的应用有重要意义。

大气中存在着大量的亚微米尺度的气溶胶粒子^[8],这些粒子由于尺度相对较小,不易被雨雪的冲刷作用所清除;同时它们又不是太小,不容易被凝结碰并过程所清除,因此它们悬浮在大气中的生命周期相对较长,甚至能达几周^[9]。亚微米尺度的气溶胶是PM_{2.5}(粒子空气动力学半径不超过2.5 μm)的主要部分^[10],这也是人们一直对数值模拟亚微米尺度气溶胶粒子的物理、化学和光学特性有浓厚兴趣的原因之一。由于黑碳(BC)对地球大气的辐射强迫有潜在的重要贡献^[11],人们对其一直有着浓厚兴趣。黑碳是化石燃料和生物质不完全燃烧排放的副产品煤灰的主要成分^[12-13]。在污染的城市大气中,黑碳气溶胶被排放后大约经过12 h后会被包裹上一层水、硫酸盐和有机质^[14-15]。城市气溶胶通常会含有体积分数约10%的黑碳成份^[16],而在严重污染大气中,黑碳在PM_{2.5}中的质量分数甚至会达到20%~50%^[17]。

气溶胶粒子的光学特性主要由粒子的大小尺度、形状、组成粒子的成分及其混合态决定^[18-24]。气溶胶形状千差万别,其光散射特性也有较大差异,关于形状对气溶胶光学特性的影响已经研究了很多^[25-26]。有效介质理论将不均匀的内混合粒子近似为相同形状的统一粒子,从而方便计算不均匀混合粒子的光散射特性。根据有效介质理论,如果已知粒子的形状、组成粒子的成分及比例,则粒子的等效折射率将一定,从而确定给定尺度的粒子光散射特性。但是,有效介质理论毕竟是近似理论,许多研究曾质疑过其准确性^[27-28],因为它没有考虑粒子的实际内部拓扑结构对光散射特性的影响。在对气溶胶粒子光学特性的研究中,同样较多考虑粒子形态对光学特性的影响,而较少地研究粒子内部拓扑结构的影响。

本文构建一种包含硫酸盐和黑碳的非对称双成分的气溶胶粒子模型。利用离散偶极子近似

(DDA)法计算尺度参数为0.1~25时内混合气溶胶不同组成结构的光学特性,目的是通过改变黑碳在内混合体中的位置,研究内部结构对内混合体光学特性的影响。

2 计算方法

DDA法是将实际的散射物体近似为一系列可极化点阵,从而计算入射光与这些点阵的相互作用。DDSCAT软件包在粒子尺度参数 $2\pi r/\lambda \leq 25$ 时能得到较为精确的计算结果^[29-32],其中 r 为粒子的半径, λ 为照射粒子的入射光波长。

内混合气溶胶粒子模型是由硫酸盐和黑碳两种成分组成的球体,其中,硫酸盐包裹黑碳,黑碳为球形。假设黑碳的半径为 a ,整个内混合体半径为 b ,如图1所示。考虑到计算机的计算能力和计算结果的精度要求,整个内混合体模型设计为由17904个偶极子构成。对于实际大气传输过程,由于大量粒子的存在以及单个粒子取向随机,所以方向平均的气溶胶光学特性才是有意义的。本模型中取向平均的气溶胶光学特性的各参量,如消光效率因子,是由54个目标体取向和2个入射光偏振态平均计算得到的。硫酸盐和黑碳在波长0.55 μm处的复折射率分别为 $1.53 - i1 \times 10^{-7}$ 和 $1.75 - i0.44$ ^[33]。

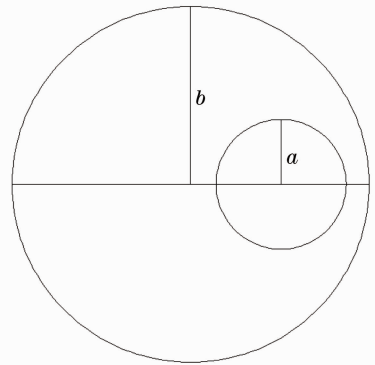


图1 双成分内混合粒子示意图

Fig. 1 Sketch map of two-component internal-mixed particle

当 a/b 分别为1/2、1/3、1/5和1/8时,对内混合体的消光、吸收、散射、后向散射效率因子、不对称因子、消光后向散射比、单次散射反照率、散射相函数和线偏振度进行了数值计算和分析,并重点分析了吸收效率因子,因为气溶胶粒子吸收系数的精确测量到目前为止依然是非常困难的。为了考察内混合体内包含的杂质成分相同但位置不同对整个内混合体光学特性的影响,当 a/b 为1/2时,对黑碳球心距

整个内混合体球心分别为 $0, b/16, b/8, 3b/16, b/4, 5b/16, 3b/8, 7b/16$ 和 $b/2$ 的各光学量进行了数值计算；当 a/b 为 $1/3$ 时，对黑碳球心距内混合体球心分别为 $0, b/15, 2b/15, b/5, 4b/15, b/3, 2b/5, 7b/15, 8b/15, 3b/5$ 和 $2b/3$ 的各光学量进行了数值计算；当 a/b 为 $1/5$ 时，对黑碳球心距内混合体球心分别为 $0, b/15, 2b/15, b/5, 4b/15, b/3, 2b/5, 7b/15, 8b/15, 3b/5, 2b/3, 11b/15$ 和 $4b/5$ 的各光学量进行了数值计算；当 a/b 为 $1/8$ 时，对黑碳球心距内混合体球心分别为 $0, b/8, b/4, 3b/8, b/2, 5b/8, 3b/4$ 和 $7b/8$ 的各光学量进行了数值计算；各情形分别与内混合体为同心球体(黑碳球心距离整个内混合体球心为 0) 时进行了光学特性的对比分析。

3 结果与讨论

3.1 DDSCAT 与双精度分层米氏散射程序的比较

由于分层同心球模型的光散射已经有了数值解，即双精度分层米氏散射程序 (DMIELAY)^[28]，

所以本文先将 DDSCAT 和 DMIELAY 对双层同心球粒子进行数值计算比较。定义消光、吸收和散射的无量纲效率因子 $Q(\lambda) \equiv C(\lambda)/\pi a_{\text{eff}}^2$ ，其中 $C(\lambda)$ 为消光、吸收或散射截面， a_{eff} 为有效半径。图 2 为 DDSCAT 计算出的半径比为 $1/5$ 的同心球内混合体模型的消光 Q_{ext} 、散射 Q_{sca} 、吸收效率因子 Q_{abs} 和不对称因子 g 与 DMIELAY 相比，所得的相应各参数的相对偏差。由图可见，尺度参数小于 7 时，消光和散射效率因子的偏差皆在 1% 以内；尺度参数在 7~20 时，消光和散射效率因子的偏差稍大，分别在 6% 和 4% 以内；尺度参数达到 25 时，消光和散射效率因子的偏差较大，分别达到 20% 和 15%；尺度参数小于 3 时，吸收效率因子的偏差在 3% 以内；尺度参数在 7~25 时，吸收效率因子的偏差随尺度参数的增大而增大，最大可达 98%；尺度参数为 0.1 时，不对称因子的偏差在 6% 以内；尺度参数在 0.3~5 时，不对称因子的偏差小于 1%。DDSCAT 和 DMIELAY 的计算偏差可能是由于其实现算法的差别所引起的。

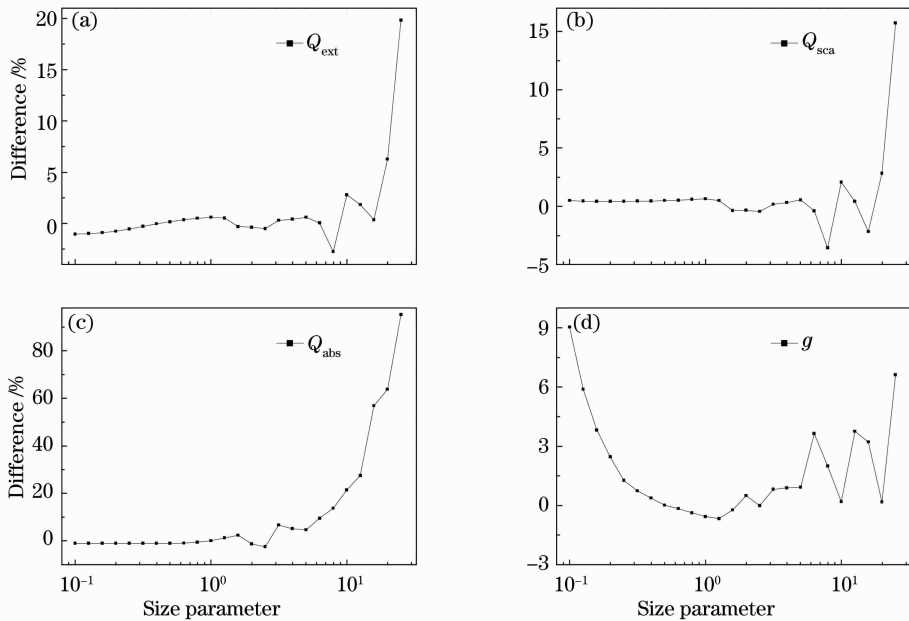


图 2 与 DMIELAY 相比，利用 DDSCAT 计算半径比为 $1/5$ 的同心球内混合体光学量的相对偏差

Fig. 2 Parameter differences of the concentric sphere calculated by DDSCAT in comparison with DMIELAY for the radius ratio of $1/5$

3.2 效率因子和不对称因子

3.2.1 吸收效率因子

图 3 为四个半径比 ($1/2, 1/3, 1/5$ 和 $1/8$) 下，同心球内混合体的吸收效率因子随尺度参数的分布。图 4 为黑碳位置不同时，内混合体的吸收效率因子与同心球情形相比的相对偏差随尺度参数的分布。由图 3 可知，同心球内混合体的吸收效率因子

随尺度参数的增加而增加；当尺度参数为 $0.1 \sim 2$ 和 $3 \sim 25$ 时，其值随尺度参数的增加而线性增加，但后者增幅较小；同一尺度参数下，黑碳越大，吸收效率因子越大。由图 4 可知，各半径比下，黑碳位置对整个内混合体吸收效率因子具有明显的影响，且变化趋势基本一致，存在明显的透镜效应。同一尺度参数下，黑碳离外界越近，内混合体吸收效率因子越

小,与同心球的情形差别越大,即黑碳离内混合体球心越近,透镜效应越明显。内混合体尺度参数越大,其吸收效率因子与同心球情形的差别基本上越大,即内混合体尺度参数越大,透镜效应也基本越明显。当 a/b 分别为 $1/2$ [图 4(a)], $1/3$ [图 4(b)], $1/5$ [图 4(c)] 和 $1/8$ [图 4(d)] 时,与同心内混合球体相比,内混合体的吸收效率因子相对偏差分别在 37% 、 66% 、 82% 、 89% 以内。可以看出,黑碳越小,透镜效应越明显。Daniel 等^[34] 在环境测量中发现有机气溶胶沉积和包裹在黑碳粒子上同样会导致吸收加强,这些吸收加强会使基于黑碳沉积滤带测量方法的仪器高估气溶胶吸收系数,从而带来测量偏差。

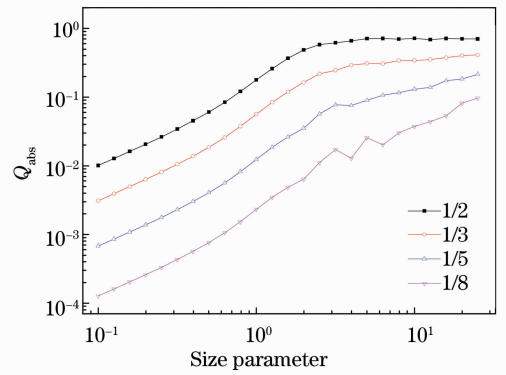


图 3 四个半径比下,同心球内混合体的吸收效率因子随尺度参数的变化

Fig. 3 Absorption efficiency factors of the concentric sphere as a function of size parameter at four different radius ratios

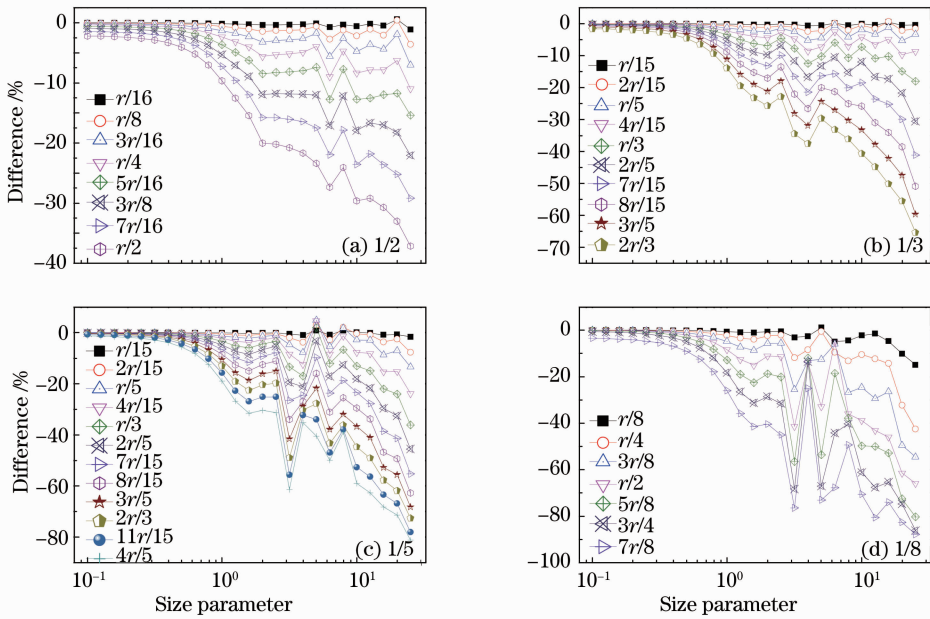


图 4 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时内混合体吸收效率因子的相对偏差

Fig. 4 Differences of absorption efficiency factors at different BC positions in comparison with the concentric sphere

3.2.2 消光和散射效率因子

消光效率因子是粒子从入射能量中移除的总能量与粒子的几何面积比,反映了气溶胶对辐射传输的衰减作用强弱。图 5 为四个半径比下,同心球内混合体的消光和散射效率因子随尺度参数的分布。图 6 和图 7 分别为黑碳位置不同时,内混合体的消光和散射效率因子与同心球情形相比的相对偏差随尺度参数的分布。由图 5 可知,各半径比下的同心球内混合体消光和散射效率因子皆在尺度参数约为 4 时达到峰值,黑碳的大小对瑞利散射区的内混合体散射效率因子几乎没有影响。

黑碳位置对整个内混合体消光效率因子的影响

(图 6)在瑞利散射区较小,而在米氏散射区相对较大,且与尺度参数有关。基本上黑碳离外界越近,内混合体消光效率因子与同心球情形的差别越大;但当黑碳特别小时(a/b 为 $1/8$ 情形),因内混合体消光效率因子受黑碳位置的影响较小,其差别与黑碳离外界远近的关系不明显。当 a/b 为 $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/5$ 和 $1/8$ 时,与同心内混合球体相比,内混合体的消光效率因子相对偏差在瑞利散射区分别在 5% 、 3% 、 2% 和 3% 以内,而米氏散射区分别在 32% 、 25% 、 13% 和 5% 以内。也就是说,内混合体中的黑碳越大,其位置对内混合体消光效率因子的影响越大。

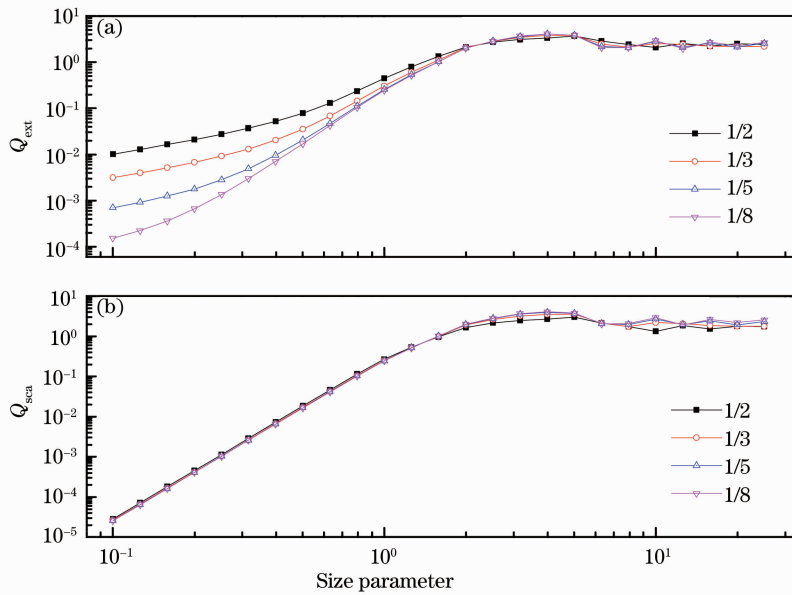


图 5 四个半径比下,同心球内混合体的(a)消光和(b)散射效率因子随尺度参数的变化

Fig. 5 (a) Extinction and (b) scattering efficiency factors of the concentric sphere as functions of size parameter

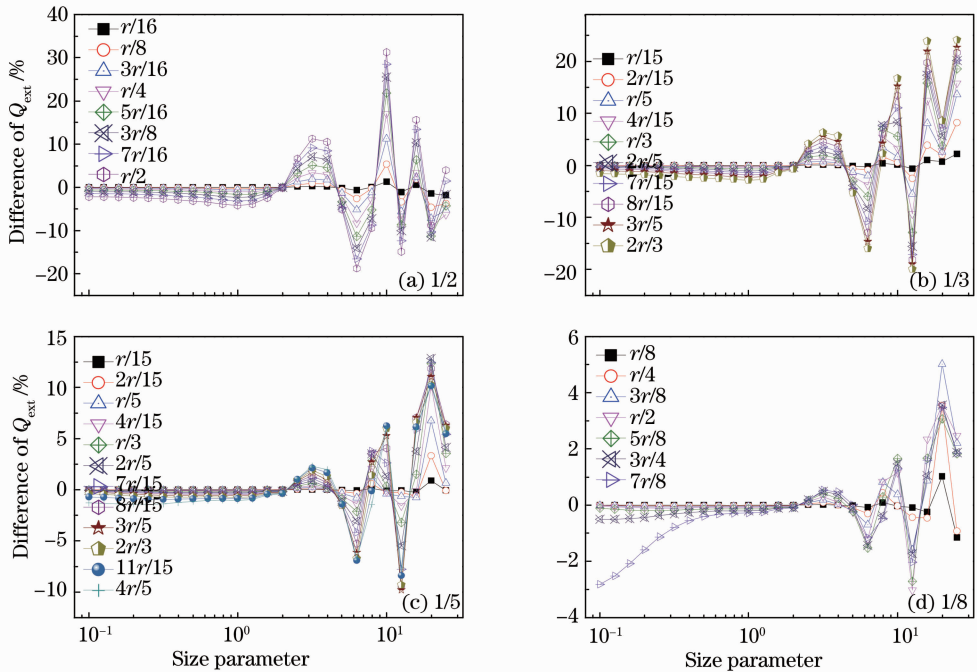


图 6 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时内混合体消光效率因子的相对偏差

Fig. 6 Differences of extinction efficiency factors at different BC positions in comparison with the concentric sphere

四个半径比下,黑碳的不同位置对内混合体散射效率因子的影响(图 7)和消光效率因子的情形类似,在瑞利散射区影响较小,而在米氏散射区较大。在瑞利散射区,与同心球情形相比内混合体的散射效率因子在四个半径比 1/2、1/3、1/5 和 1/8 下,其相对偏差皆在 1% 以内;在米氏散射区,其相对偏差分别在 64%、45%、18% 和 7% 以内。黑碳越小,其不同位置对整个内混合体散射效率因子的影响越不

明显。

3.2.3 后向散射效率因子和不对称因子

图 8 为四个半径比下,同心球内混合体的后向散射效率因子 Q_{bksca} 和不对称因子随尺度参数的分布。图 9 和图 10 分别为黑碳位置不同时,内混合体的后向散射效率因子和不对称因子与同心球情形相比的相对偏差随尺度参数的分布。可以看出,各半径比下,黑碳在不同位置时的后向散射效率因子的

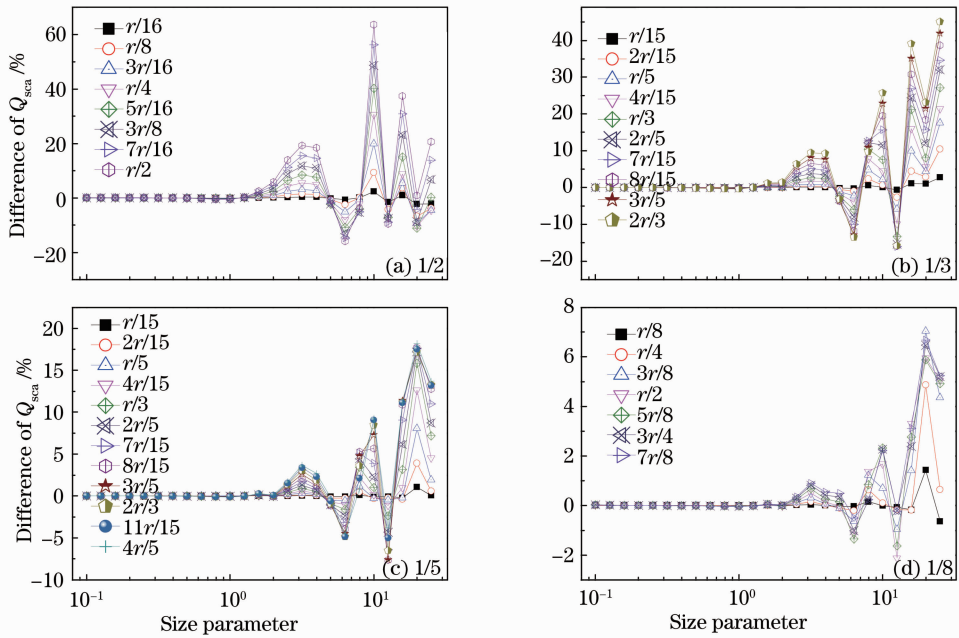


图 7 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时内混合体散射效率因子的相对偏差

Fig. 7 Differences of scattering efficiency factors at different BC positions in comparison with the concentric sphere

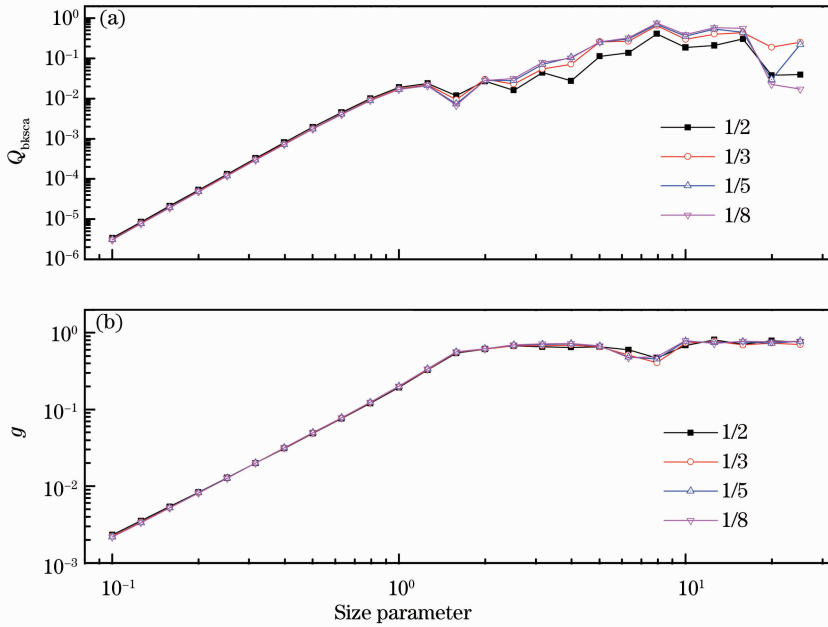


图 8 四个半径比下,同心球内混合体的(a)后向散射效率因子和(b)不对称因子随尺度参数的变化

Fig. 8 (a) Backscattering efficiency factors and (b) asymmetry parameters of the concentric sphere as functions of size parameter

峰值皆出现在尺度参数为 8 附近[图 8(a)],而不对称因子在尺度参数为 8 附近有谷值[图 8(b)],与后向散射效率因子的趋势相反,这主要是由于不对称因子代表前向散射的强度,而后向散射效率因子代表后向散射的强度。

由图 9 可知,黑碳位置对内混合体后向散射效率因子的影响在瑞利散射区较小;而在米氏散射区

较大,且与尺度参数有关,随尺度参数振荡。当 a/b 为 $1/2, 1/3, 1/5$ 和 $1/8$ 时,与同心球内混合体相比,在瑞利散射区,内混合体的后向散射效率因子相对偏差皆在 1% 以内,而米氏散射分别在 500%、103%、910%和 1540% 以内,其中尺度参数在 1~15 时的相对偏差分别在 60%、45%、47%和 10% 以内。总之,当尺度参数为 0.1~15 时,内混合体中的黑碳

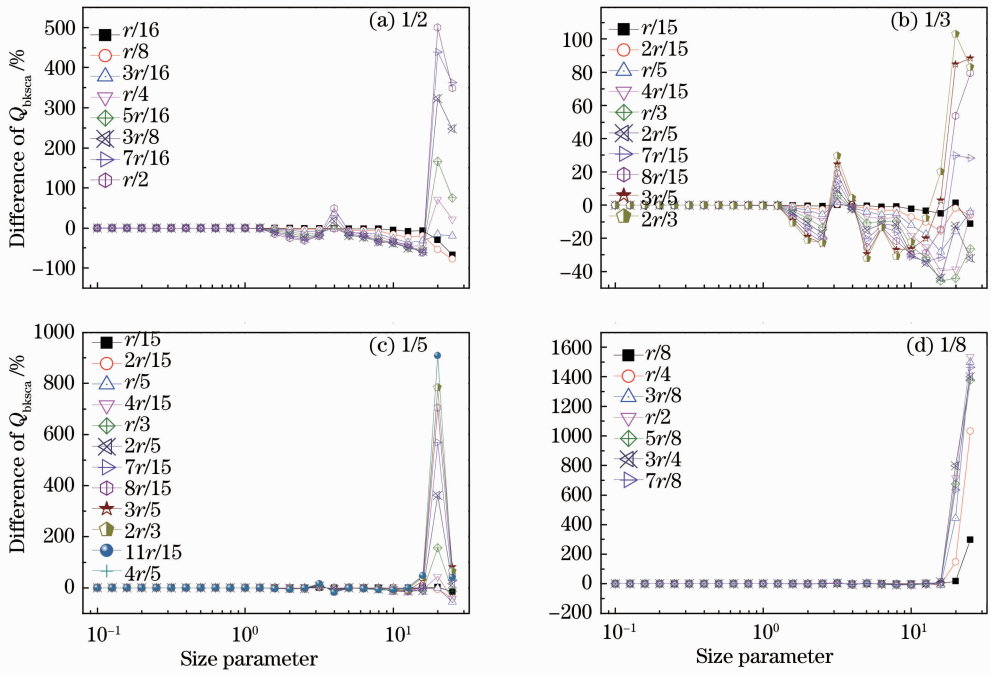


图 9 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时内混合体后向散射效率因子的相对偏差
Fig. 9 Differences of backscattering efficiency factors at different BC positions in comparison with the concentric sphere

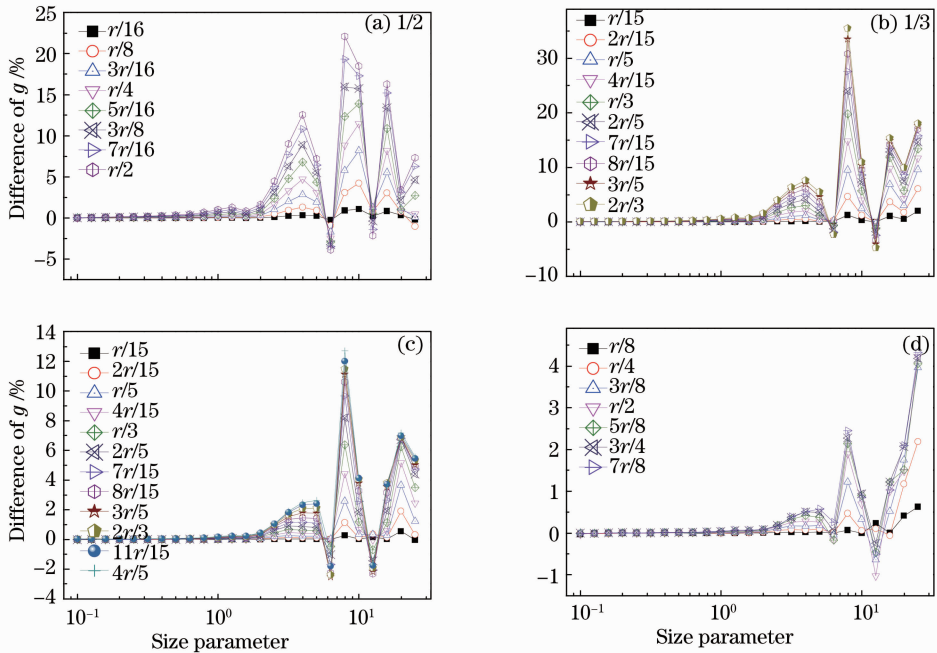


图 10 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时内混合体不对称因子的相对偏差

Fig. 10 Differences of asymmetry parameters at different BC positions in comparison with the concentric sphere

越小,黑碳位置对内混合体后向散射效率因子的影响越小。其中,尺度参数小于 1 时,其影响可以忽略;而当尺度参数为 15~25 时,黑碳位置对内混合体后向散射效率因子的影响较大。

由图 10 可知,四个半径比下,与同心球情形相比,内混合体的不对称因子相对偏差在瑞利散射区

较小,皆在 1% 以内;而在米氏散射区较大,分别在 22%、36%、13%和 5%以内。

3.2.4 消光后向散射比

消光后向散射比在雷达方程中决定后向散射系数与消光系数的参数化关系,它是激光雷达反演气溶胶光学厚度中的一个重要参数。图 11 为四个半

径比下,同心球内混合体的消光后向散射比随尺度参数的分布,图 12 为黑碳位置不同时,内混合体的消光后向散射比与同心球情形相比的相对偏差随尺度参数的分布。同心球内混合体消光后向散射比在尺度参数为 2 附近有峰值(图 11)。由图 12 可知,黑碳位置对内混合体消光后向散射比的影响在瑞利散射区较小,而在米氏散射区较大。当 a/b 为 1/2、1/3、1/5 和 1/8 时,与同心球内混合体相比,在瑞利散射区,内混合体的消光后向散射比相对偏差分别在 4%、3%、2% 和 3% 以内,而米氏散射区分别在 325%、113%、128% 和 94% 以内。

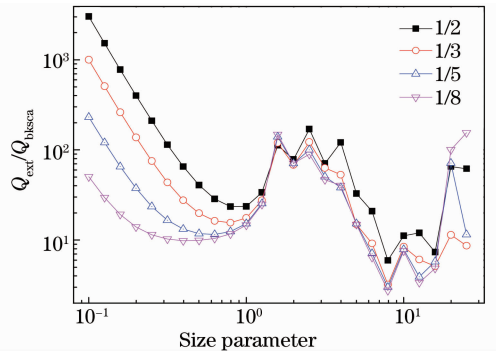


图 11 四个半径比下,同心球内混合体的消光后向散射比随尺度参数的变化

Fig. 11 Extinction-to-backscattering ratios of the concentric sphere as a function of size parameter

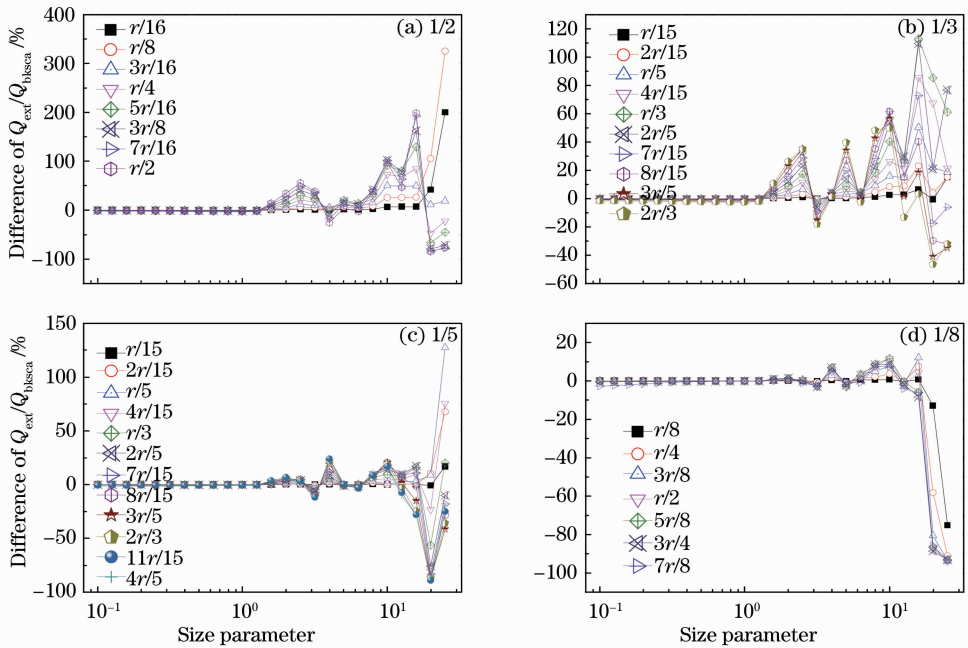


图 12 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时内混合体消光后向散射比的相对偏差

Fig. 12 Differences of extinction-to-backscattering ratios at different BC positions in comparison with the concentric sphere

3.2.5 单次散射反照率

单次散射反照率 Q_{ssa} 是气溶胶粒子散射效率因子和消光效率因子的比值,表征散射作用的大小,是决定气溶胶对全球和局地气候影响的重要参数。图 13 为四个半径比下,同心球内混合体的单次散射反照率随尺度参数的分布。图 14 为黑碳位置不同时,内混合体的单次散射反照率与同心球情形相比的相对偏差随尺度参数的分布。同心球内混合体单次散射反照率的峰值出现在尺度参数为 3 附近,在瑞利散射区单次散射反照率随尺度参数的增加而增加(图 13)。由图 14 可知,当 a/b 为 1/2、1/3、1/5 和 1/8 时,与同心球内混合体相比,在瑞利散射区,内混合体的单次散射反照率相对偏差分别在 4%、

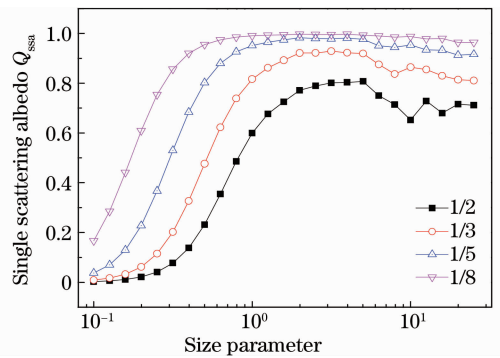


图 13 四个半径比下,同心球内混合体的单次散射反照率随尺度参数的变化

Fig. 13 Single scattering albedos of the concentric sphere as a function of size parameter

2%、2%和3%以内,而米氏散射区分别在25%、17%、8%和4%以内。内混合体中的黑碳越小,其位置对内混合体单次散射反照率的影响越小;同一

尺度参数下,黑碳离外界越近,内混合体单次散射反照率的数值越大。

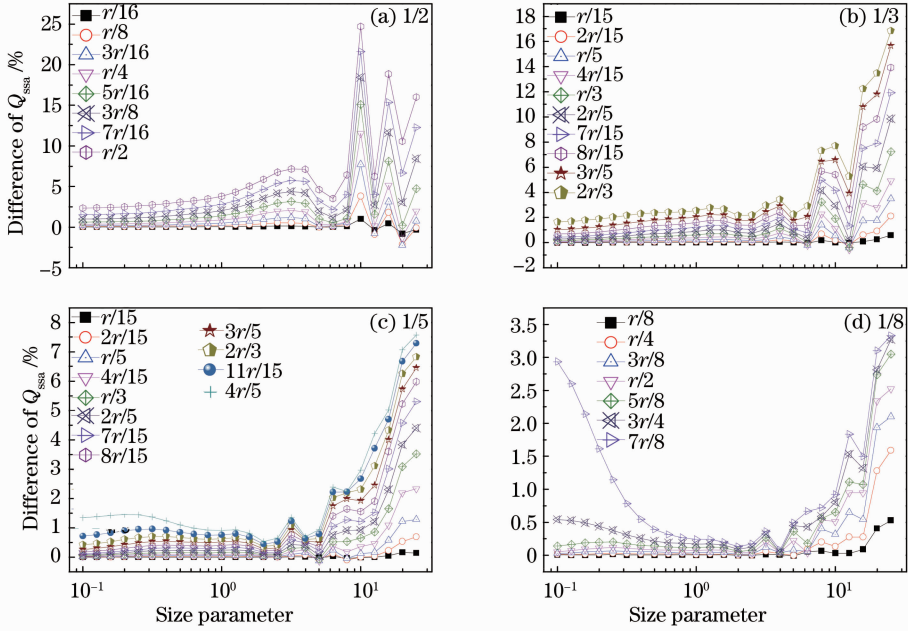


图 14 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时内混合体单次散射反照率的相对偏差

Fig. 14 Differences of single scattering albedos at different BC positions in comparison with the concentric sphere

3.3 散射相函数和线偏振度

在研究气溶胶内部拓扑结构对角散射特性的影响时,由于尺度参数数值的多样性,选择具有代表性的尺度参数为1和10的情形。散射相函数 F_{spf} 表示散射光强度随散射角 θ 的相对变化。图 15 为四个半

径比下,黑碳在不同位置,尺度参数分别为1和10时,同心球内混合气溶胶粒子的散射相函数,图 16 和图 17 为与同心球情形相比,尺度参数分别为1和10的内混合体散射相函数相对偏差随散射角的分布情况。在给定尺度参数下,黑碳在不同位置的散射

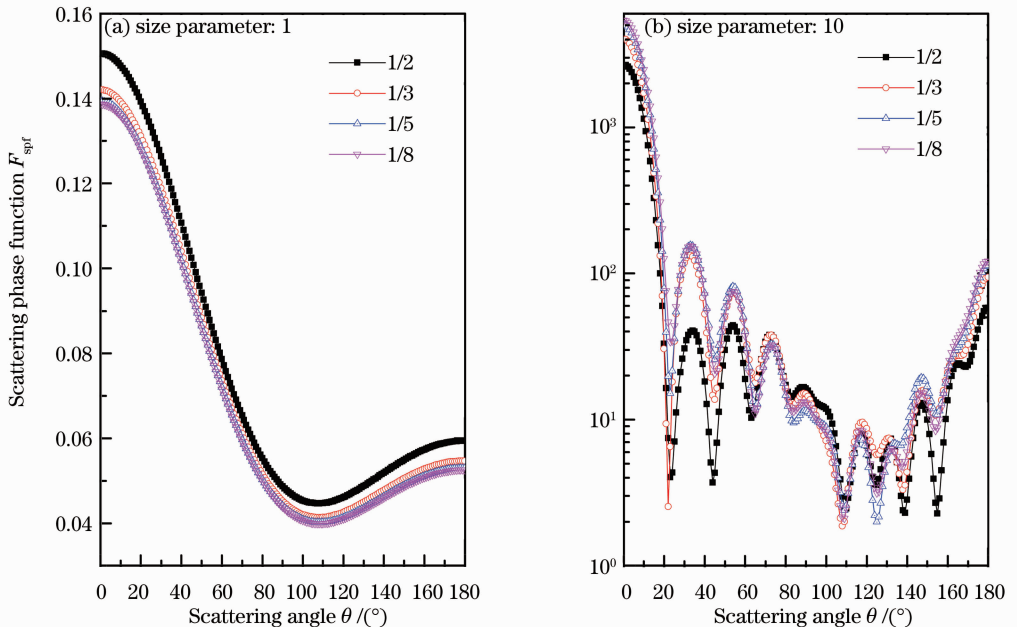


图 15 四个半径比下,尺度参数为(a)1和(b)10的同心球内混合体散射相函数

Fig. 15 Scattering phase functions of concentric sphere for size parameters of (a) 1 and (b) 10

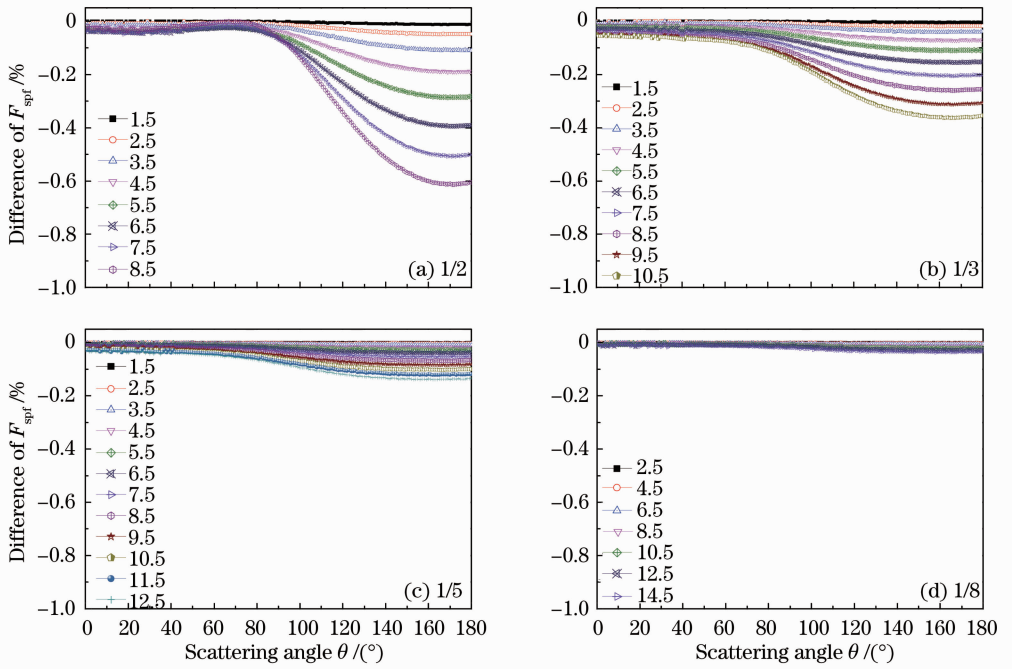


图 16 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时尺度参数为 1 的内混合体散射相函数的相对偏差
 Fig. 16 Differences of scattering phase functions at different BC positions in comparison with the concentric sphere for the size parameter of 1

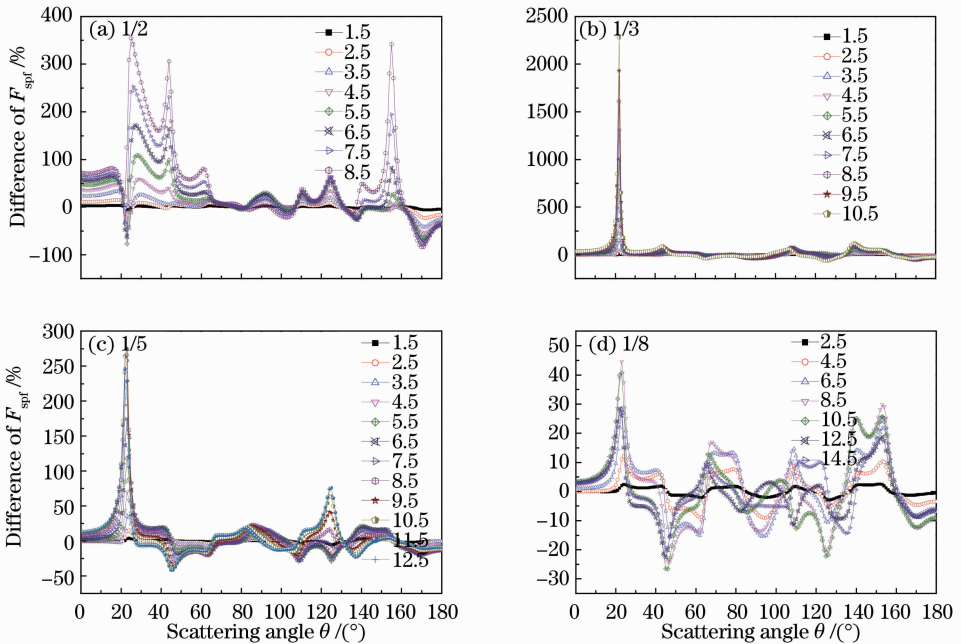


图 17 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时尺度参数为 10 的内混合体散射相函数的相对偏差
 Fig. 17 Differences of scattering phase functions at different BC positions in comparison with the concentric sphere for the size parameter of 10

相函数的轮廓相似,在米氏散射区,前向散射很强,后向散射有明显的加强效应,尺度参数大时有明显的振荡。当尺度参数为 1 时(图 16),黑碳位置的变化对散射相函数影响很小,皆在 1% 以内,且黑碳越小,影响越小。而当尺度参数为 10 时(图 17),黑碳

位置的变化对散射相函数影响较大,且各散射角上的影响程度不同;黑碳越小,影响程度基本上越小;各散射角上影响较大的主要发生在散射相函数的振荡峰位置,特别是在散射角为 20° 和 150° 的附近,其相对偏差在半径比为 1/2 和 1/3 时甚至超过了

100%。前向散射能见度仪根据一定散射角范围内大气气溶胶的光散射特性来推算散射系数,进而获取消光系数得到大气能见度,其散射角的范围通常选在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内。在此散射角范围内,较大的城市污染气溶胶粒子在含黑碳较大时,黑碳位置将对前向散射能见度仪的测量结果带来明显误差。

图 18 为四个半径比下,尺度参数分别为 1 和 10 时,同心球内混合气溶胶粒子的线偏振度 D_{lp} 。图 19 和图 20 为与同心球情形相比,尺度参数分别为 1 和 10 的内混合体线偏振度相对偏差随散射角的分布情况。在给定尺度参数下,黑碳在不同位置的线偏振度的轮廓大体相似。在瑞利散射区内,线

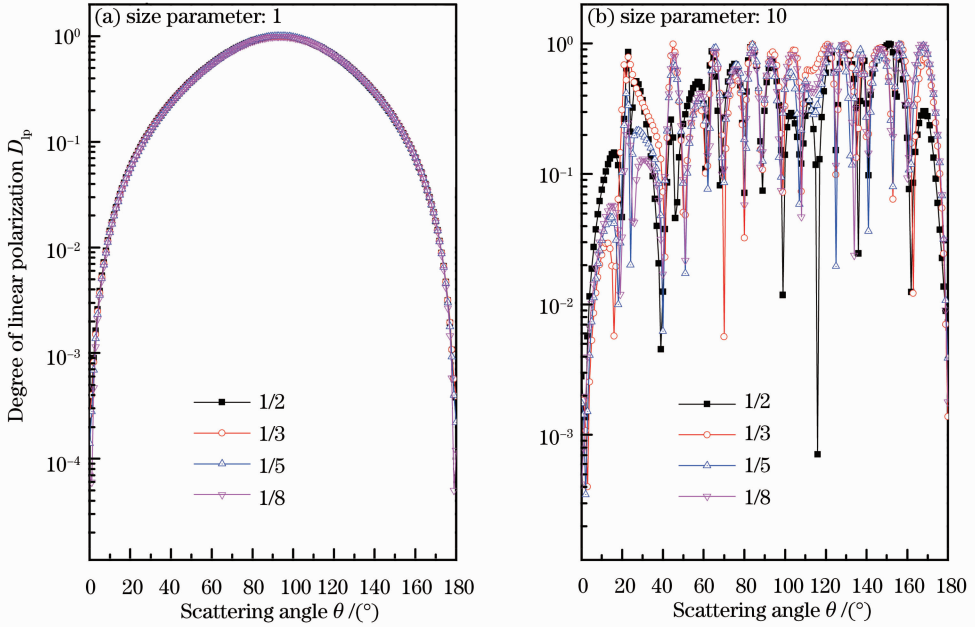


图 18 四个半径比下,尺度参数为(a)1 和(b)10 的同心球内混合体线偏振度

Fig. 18 Degrees of linear polarization of the concentric sphere for size parameters of (a) 1 and (b) 10

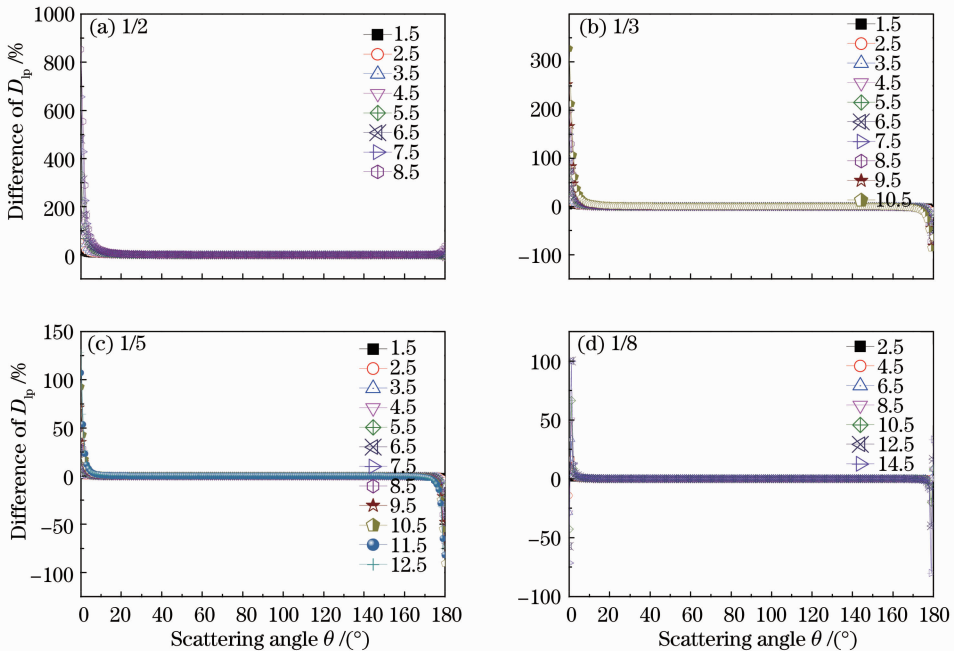


图 19 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时尺度参数为 1 的内混合体线偏振度的相对偏差

Fig. 19 Differences of degrees of linear polarization at different BC positions in comparison with the concentric sphere for the size parameter of 1

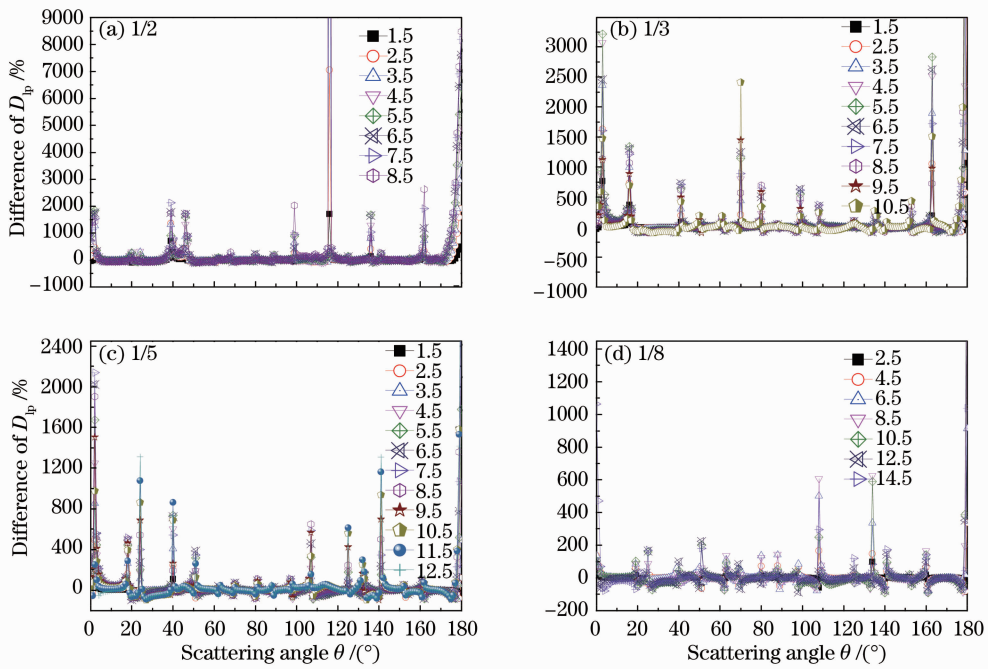


图 20 四个半径比下,与同心球情形相比,黑碳位置不同时尺度参数为 10 的内混合体线偏振度的相对偏差
Fig. 20 Differences of degrees of linear polarization at different BC positions in comparison with the concentric sphere for the size parameter of 10

偏振度在散射角为 $45^\circ \sim 135^\circ$ 的方向较大,在散射角为 90° 的正入射光方向甚至接近 1;而在米氏散射区,线偏振度随散射角的变化存在明显的多次振荡。当尺度参数为 1 时(图 19),黑碳位置的变化对线偏振度在 0° 附近的前向和 180° 附近的后向散射区影响较大,且黑碳越大,影响越大;而在其他散射角方向影响很小,皆在 1% 以内。当尺度参数为 10 时(图 20),黑碳位置的变化对线偏振度影响较大,且各散射角上的影响程度不同;黑碳越大,影响程度越大;除少数散射角上影响较小外,大多影响较大,相对偏差超过 100%。结合散射相函数可以发现,在后向散射区,较强的后向散射往往对应着较小的线偏振度。

4 结 论

利用离散偶极子近似法研究了一种双成分被硫酸盐包裹黑碳的气溶胶粒子模型在尺度参数变化范围为 $0.1 \sim 25$ 时的光学特性,通过改变黑碳的位置分析了内部拓扑结构对内混合粒子光学特性的影响。

黑碳位置对整个内混合体的消光、散射、后向散射效率因子、不对称因子、消光后向散射比和单次散射反照率有重要影响,当尺度参数小于 1 时影响较小,而尺度参数大于 1 时影响较大。黑碳越小,其位置对内混合体的消光、散射和后向散射效率因子的影响越小。同一尺度参数下,黑碳离外界越近,内混

合体单次散射反照率越大。黑碳的位置对内混合体吸收效率因子具有明显的影响,当黑碳在内混合体球心时内混合体具有最大的吸收效率因子,存在明显的透镜效应。同一尺度参数下,黑碳离内混合体球心越近,透镜效应越明显;黑碳越小,透镜效应越明显;内混合体尺度参数越大,透镜效应也越明显。黑碳位置的变化对散射相函数的影响在瑞利散射区很小,相对偏差在 1% 以内;而在米氏散射区的影响则较大,特别是在散射角为 20° 和 150° 附近,其相对偏差在黑碳较大时甚至超过了 100%;对于散射角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 范围内的前向散射能见度仪而言,较大的城市污染气溶胶粒子在含黑碳较大时,将给能见度测量结果带来明显误差。黑碳位置的变化对线偏振度在瑞利散射区的 0° 和 180° 附近,以及米氏散射区的影响较大,相对偏差大多超过 100%。

针对城市污染气溶胶的一种典型模型,通过其内部具有强吸收特性的黑碳成分的位置不同对其光学特性影响的敏感性分析,对最终准确评估城市气溶胶对全球和局地气候的影响具有一定的意义,同时对利用光散射技术的仪器和需要考虑气溶胶粒子影响的光电系统的应用和误差修正具有重要意义。在研究内部结构对内混合粒子光学特性的影响时,仅选择了单分散粒子系统以及具有代表性的尺度参数,针对更复杂的多分散粒子系统以及更宽范围的

尺度参数的情形有待进一步研究。

参 考 文 献

- J M Haywood, K P Shine. Multi-spectral calculations of the direct radiative forcing of tropospheric sulphate and soot aerosols using a column model [J]. Quarterly J the Royal Meteorological Society, 1997, 123(543): 1907—1930.
- Y J Kaufman, I Koren, L A Remer, *et al.*. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean [C]. PNAS, 2005, 102(32): 11207—11212.
- A P Waggoner, R E Weiss, N C Ahlquist, *et al.*. Optical characteristics of atmospheric aerosols [J]. Atmos Environ, 1981, 15(10-11): 1891—1909.
- H Horvath. Estimation of the average visibility in central Europe [J]. Atmos Environ, 1995, 29(2): 241—246.
- D Dockery, A Pope. Epidemiology of Acute Health Effects; Summary of Time-Series. In: Wilson R, Spengler J D. (Eds.). Particles in Our Air: Concentration and Health Effects [M]. Cambridge: Harvard University Press, 1996. 123—147.
- Rao Ruizhong. Combined effect of turbulence and thermal blooming of laser propagation in atmosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 130—134.
饶瑞中. 激光大气传输湍流与热晕综合效应[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 130—134.
- Huang Yinbo, Wang Yingjian. Effect of the measurement errors of atmospheric parameters on the laser propagation effects [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 720—724.
黄印博, 王英俊. 激光传输大气参量测量精度要求的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 720—724.
- U K Krieger, C Braun. Light-scattering intensity fluctuations in single aerosol particles during deliquescence [J]. J Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2001, 70(4-6): 545—554.
- R Brewer, W Belzer. Assessment of metal concentrations in atmospheric particles from Burnaby Lake, British Columbia, Canada [J]. Atmos Environ, 2001, 35(30): 5223—5233.
- T Tuch, P Brand, H E Wichmann, *et al.*. Variation of particle number and mass concentration in various size ranges of ambient aerosols in eastern Germany [J]. Atmos Environ, 1997, 31(24): 4193—4197.
- M I Mishchenko, B Cairns, J Chowdhary, *et al.*. Remote sensing of terrestrial tropospheric aerosols from aircraft and satellites [J]. J Phys: Conf Ser, 2005, 6(1): 73—89.
- I N Sokolik, O B Toon. Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths [J]. J Geophys Res: Atmospheres, 1999, 104(D8): 9423—9444.
- M J Gatari, J Boman. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa [J]. Atmos Environ, 2003, 37(8): 1149—1154.
- N Moteki, Y Kondo. Effects of mixing state on black carbon measurement by laser-induced incandescence [J]. Aerosol Sci Technol, 2007, 41(4): 398—417.
- M Shiraiwa, Y Kondo, N Moteki, *et al.*. Evolution of mixing state of black carbon in polluted air from Tokyo [J]. Geophys Res Lett, 2007, 34(6): L16803.
- H Horvath, M Kasaharat, P Pesava. The size distribution and composition of the atmospheric aerosol at a rural and nearby urban location [J]. J Aerosol Sci, 1996, 27(3): 417—435.
- S S Park, Y J Kim, K Fung. Characteristics of PM_{2.5} carbonaceous aerosol in the Sihwa Industrial Area, Korea [J]. Atmos Environ, 2001, 35(4): 657—665.
- R Schuh, T Wriedt. Computer programs for light scattering by particles with inclusions [J]. J Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2001, 70(4-6): 715—723.
- L Kolokolova, B A S Gustafson. Scattering by inhomogeneous particles: microwave analog experiments and comparison to effective medium theories [J]. J Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2001, 70(4-6): 611—625.
- Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by one internal-mixed model for aerosol particles [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0629001.
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 一种内混合气溶胶粒子模型光散射的等效性 [J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0629001.
- Wei Xiaodong, Zhang Hua. Analysis of optical properties of non-spherical dust aerosols [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0501002.
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): 0501002.
- Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi, *et al.*. Study on the relation of ocean atmospheric aerosol optical model parameters [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1101005.
王家成, 乔延利, 杨世值, 等. 海洋大气气溶胶光学模型参数的相关性研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101005.
- Sun Xianming, Wang Haihua, Shen Jin. Study on light backscattering by spheroid with inclusion [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0829001.
孙贤明, 王海华, 申 晋. 含核椭球粒子后向散射特性研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0829001.
- Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101002.
郝增周, 龚 芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性 [J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101002.
- Rao Ruizhong. Numerical analysis of light scattering by randomly oriented cubic particles [J]. Acta Physica Sinica, 1998, 47(11): 1790—1797.
饶瑞中. 随机取向立方粒子光散射的数值分析 [J]. 物理学报, 1998, 47(11): 1790—1797.
- Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Orientation-averaged optical properties of natural aerosol aggregates [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(10): 2441—2446.
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 随机取向团簇自然气溶胶光学特性 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2441—2446.
- N V Voshchinnikov, G Videen, T Henning. Effective medium theories for irregular fluffy structures; aggregation of small particles [J]. Appl Opt, 2007, 46(19): 4065—4072.
- G Videen, P Chylek. Scattering by a composite sphere with an absorbing inclusion and effective medium approximations [J]. Opt Commun, 1998, 158(1-6): 1—6.
- B T Draine, P J Flatau. Discrete-dipole approximation for scattering calculations [J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(4): 1491—1499.
- B T Draine, P J Flatau. Discrete dipole approximation for periodic targets. I. Theory and tests [J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(11): 2693—2703.
- P J Flatau, B T Draine. Fast near field calculations in the discrete dipole approximation for regular rectilinear grids [J]. Opt Express, 2012, 20(2): 1247—1252.
- B T Draine, P J Flatau. User Guide for the Discrete Dipole Approximation Code DDSCAT 7.3 [OL]. <http://arxiv.org/abs/1305.6497>, 2013.
- R W Fenn, S A Clough, W O Gallery, *et al.*. Optical and Infrared Properties of the Atmosphere. In: A S Jursa. (Ed.). Handbook of Geophysics and the Space Environment [M]. Hanscom AFB: Air Force Geophysics Laboratory, 1985.
- A L Daniel, D C Christopher, S C David, *et al.*. Bias in filter-based aerosol light absorption measurements due to organic aerosol loading: evidence from ambient measurements [J]. Aerosol Science and Technology, 2008, 42(12): 1033—1041.