

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.018

非球形气溶胶粒子光散射特性的仿真分析

宋跃辉, 鲁雷雷, 李仕春, 辛文辉, 闫庆, 华灯鑫

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于 DDA 法研究了复折射率、粒子形状和尺度参数对非球形气溶胶光散射特性的影响。仿真结果表明, 气溶胶粒子的消光效率因子和散射效率因子随尺度参数增加呈减幅振荡。当复折射率实部增加时, 消光效率因子和散射效率因子的振荡周期减小, 而吸收效率因子略微增加; 当复折射率虚部增加时, 散射效率因子的振荡幅值和振荡中心值减小, 而吸收效率因子显著增加。复折射率虚部增大时, 椭球气溶胶粒子群的雷达比增大, 退偏比减小。在近瑞利散射区, 粒子形状对粒子的光散射特性影响较小, 在米散射区时, 粒子光散射特性与粒子形状密切相关。消光效率因子和散射效率因子随尺度参数变化的振荡幅值、周期和中心值一定程度上也反映了椭球形气溶胶粒子的非球形特征。

关键词: 非球形气溶胶; 离散偶极子近似; 光散射特性

中图分类号: TN958.98; P407.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)02-0233-07

Analysis of light scattering properties of non-spherical aerosol particles

SONG Yuehui, LU Leilei, LI Shichun, XIN Wenhui, YAN Qing, HUA Dengxin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The effects of complex refractive index, particle shape and size parameter on the light scattering properties of non-spherical aerosols are studied based by the discrete dipole approximation method. The simulation results show that when the size parameter increases, the extinction efficiency factor and the scattering efficiency factor oscillate with the amplitude decreasing. The oscillation period of extinction efficiency factor and the scattering efficiency factor of the ellipsoidal aerosol particles decreases with the real part of complex refractive index increasing, with the absorption efficiency factor slightly increasing. The oscillation amplitude and the central position of the scattering efficiency factor decrease with the imaginary part of complex refractive index increasing, with the absorption efficiency factor increasing significantly. When the imaginary part of complex refractive index increases, the lidar ratio of ellipsoidal aerosol particles increases and the depolarization ratio decreases. When close to Rayleigh domain, the shape has little influence on the light scattering properties of particles. In the Mie domain, the light scattering properties are closely related to the particle shape. To some extent, the oscillation amplitude, oscillation period and the central position of the extinction efficiency factor and scattering efficiency factor reflect the non-spherical feature of the ellipsoidal aerosol particles.

Key words: non-spherical aerosol; discrete dipole approximation; optical scattering properties

大气气溶胶是指由大气介质和悬浮于其中的固体或液体微粒所组成的多相体系, 对人类健康和气候环境有着非常重要的影响^[1]。开展气溶胶光散射

特性研究对大气辐射传输特性研究、数值天气预报、大气遥感数据反演等都具有重要的意义。

数值仿真是研究气溶胶光散射特性的重要手

收稿日期: 2017-01-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61405158)

作者简介: 宋跃辉, 男, 博士, 讲师, 研究方向为偏振激光雷达。E-mail: songyuehui@xaut.edu.cn

通讯作者: 华灯鑫, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为激光雷达遥感探测技术及光电检测技术。E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

段,米散射理论仅适用于球形粒子的仿真分析。然而,气溶胶粒子并不是严格意义的球形粒子,沙尘、卷云等气溶胶颗粒更是呈现较强的非球形特征。因此,采用米散射理论会引入不同程度的误差。离散偶极子近似法(DDA, Discrete Dipole Approximation)1973年被首次提出,该方法适用于任意几何形状、各向异性、非均质粒子光散射特性的数值分析,在研究各类不同形状气溶胶粒子时具有显著优势^[2-3],已被广泛应用于粒子辐射特性研究^[4-9]。显然,DDA法是研究非球形气溶胶粒子光散射特性的有力工具。

实际气溶胶粒子形状各异,目前关于其形状近似并没有统一的结论。沙尘和卷云是典型的非球形气溶胶粒子,已有研究表明,沙尘气溶胶粒子一般呈现为柱状、椭球形和板状等,冰晶粒子通常呈现为子弹花型、六棱柱状、鞘状等^[10-11]。目前在非球形气溶胶粒子光散射特性研究中,椭球形、棱柱形和圆柱形是常用模型^[12]。鉴于此,基于DDA法分析了椭球、圆柱和四棱柱形气溶胶粒子的光散射特性,研究了复折射率、粒子形状等对非球形粒子光散射特性的影响。

1 离散偶极子近似法

DDA法将实际散射粒子离散为有限个相互作用的偶极子阵列,每个偶极子通过对局域电场的响应获得偶极矩,所有偶极子在远场辐射的总和构成散射场。假设将散射体离散为 N 个偶极子,其中第 j 个偶极子的极化率为 a_j ,坐标为 \mathbf{r}_j 处的电场是入射场 $\mathbf{E}_{j,\text{inc}}$ 和其余 $(N-1)$ 个偶极子所产生电场的叠加,记为 \mathbf{E}_j ,则电偶极矩 \mathbf{p}_j 计算公式为:

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

其中 \mathbf{A}_{ij} 是 3×3 的稀疏矩阵。

在获得电偶极矩的基础上,利用DDA法即可计算散射粒子的消光效率因子 Q_{ext} 、吸收效率因子 Q_{abs} 、散射效率因子 Q_{sca} ,公式为:

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

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

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

其中, E_0 为入射电场幅值, r_{eff} 为等体积球体半径, $k=2\pi/\lambda$, \mathbf{n} 为散射方向。

消光效率因子、吸收效率因子和散射效率因子分别为粒子消光截面、吸收截面和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弱。

定义粒子消光后向效率因子比 R_Q 为:

$$R_Q = \frac{Q_{\text{ext}}}{Q_{\text{bk}}} \quad (5)$$

其中 Q_{bk} 为后向散射效率因子,是后向微分散射截面与粒子等体积球体几何截面的比值,需要根据DDA软件计算获得,描述了气溶胶粒子后向散射作用的强弱。

R_Q 的单位为立体角,描述了后向散射在气溶胶消光作用中所占的比例。 R_Q 越大,后向散射在消光作用中所占的比例就越小,反之就越大。

通常采用4阶穆勒矩阵 \mathbf{S} 描述粒子光散射特性。假设入射光的斯托克斯参量为 (I_i, Q_i, U_i, V_i) ,散射光的斯托克斯参量为 (I_s, Q_s, U_s, V_s) ,则三者存在如下关系:

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \frac{1}{k^2 r^2} \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

当入射光为水平线偏振光时,其归一化斯托克斯参量为 $(1, 1, 0, 0)'$,则该粒子在 θ 散射方向上的线退偏比 P_θ 为:

$$P_\theta = \frac{S_{11}(\theta) + S_{12}(\theta) - S_{21}(\theta) - S_{22}(\theta)}{S_{11}(\theta) + S_{12}(\theta) + S_{21}(\theta) + S_{22}(\theta)} \quad (7)$$

当 θ 为 π 时, P_π 为后向散射光的线退偏比。

消光后向效率因子比和后向散射光线退偏比随尺度参数的变化关系,一定程度上反映了气溶胶粒子群雷达比和退偏比的变化规律。因此,利用消光后向效率因子比和后向散射光线退偏比,可研究粒子复折射率和形状对雷达比和退偏比的影响。

2 仿真分析

为表征非球形粒子偏离球形的程度,定义粒子的形状比例参数 D :

$$D = a/b \quad (8)$$

如图1所示,对于椭球形粒子, $D=1$ 时,粒子为球形; $D<1$ 时,粒子为扁椭球, D 越小粒子非球形度越大; $D>1$ 时,粒子为长椭球, D 越大粒子非球形度越大。圆柱粒子的形状比例参数为高与直径之比, $D=1$ 时,圆柱粒子非球形度最小, D 趋近于0或

无穷大时,非球形度均逐渐增大。四棱柱(底边为正方形)的形状比例参数为高和底边边长之比, $D=1$ 时,非球形度最小, D 趋近于0或无穷大时,非球形度均逐渐增大。显然,受模型形状影响, D 相同的椭球形、圆柱和四棱柱形粒子的实际非球形度有一定差别。

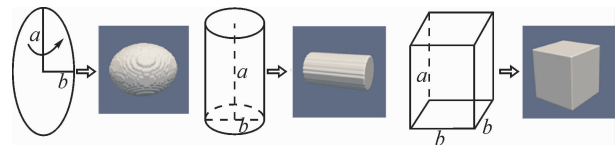


图1 非球形粒子示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-spherical particles

鉴于非球形粒子空间取向的随机性,本文采用粒子不同取向时各光学参数的平均值来表征粒子的光散射特性。假设某光学参数记为 Q ,则其平均值记为 $\langle Q \rangle$,计算公式如下:

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} Q(\beta, \theta, \Phi) d\beta d\cos\theta d\Phi \quad (9)$$

β, θ 和 Φ 如图 2 所示,其中实验坐标系 $\hat{x}-\hat{y}-\hat{z}$ 用于确定粒子的空间位置。目标坐标系 $\hat{a}_1-\hat{a}_2-\hat{a}_3$ 用于确定粒子的空间方向。 θ 为 \hat{a}_1 与 \hat{x} 之间的夹角, Φ 为 \hat{a}_1 绕 \hat{x} 旋转的角度, β 为 \hat{a}_2 绕 \hat{a}_1 旋转的角度。

仿真中选取 532 nm 线偏振平面波束为光源。根据定义,粒子尺度参数 x 计算公式如下:

$$x = 2\pi r_{\text{err}}/\lambda \quad (10)$$

考虑 DDA 法的运算速度,本文中 x 取值范围

为 1~20。

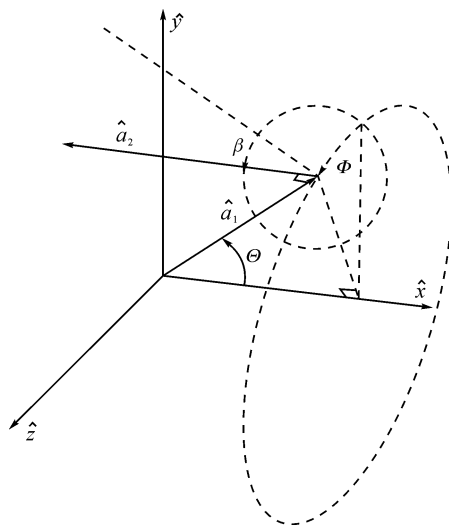


图2 非球形粒子在实验坐标系中的取向

Fig. 2 Orientation of non-spherical particle in lab frame

椭球和圆柱粒子均是旋转体,因此仿真中 β 的取值为 $0^\circ, \theta$ 和 Φ 的取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,其中 Φ 取值间隔为 $10^\circ, \cos\theta$ 取值间隔为 0.1。仿真分析四棱柱粒子光学参数均值时 β, θ 和 Φ 取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,其中 β, Φ 取值间隔为 $10^\circ, \cos\theta$ 取值间隔为 0.1。

2.1 复折射率对非球形气溶胶光散射特性的影响

复折射率是气溶胶粒子的重要物理参量,由实部和虚部构成,实部由光波在粒子中的传播速度决定,虚部反映气溶胶粒子的吸收特性。本节重点分析了 $D=3$ 的椭球形气溶胶粒子在不同复折射率时的光散射特性(见图 3、图 4)。

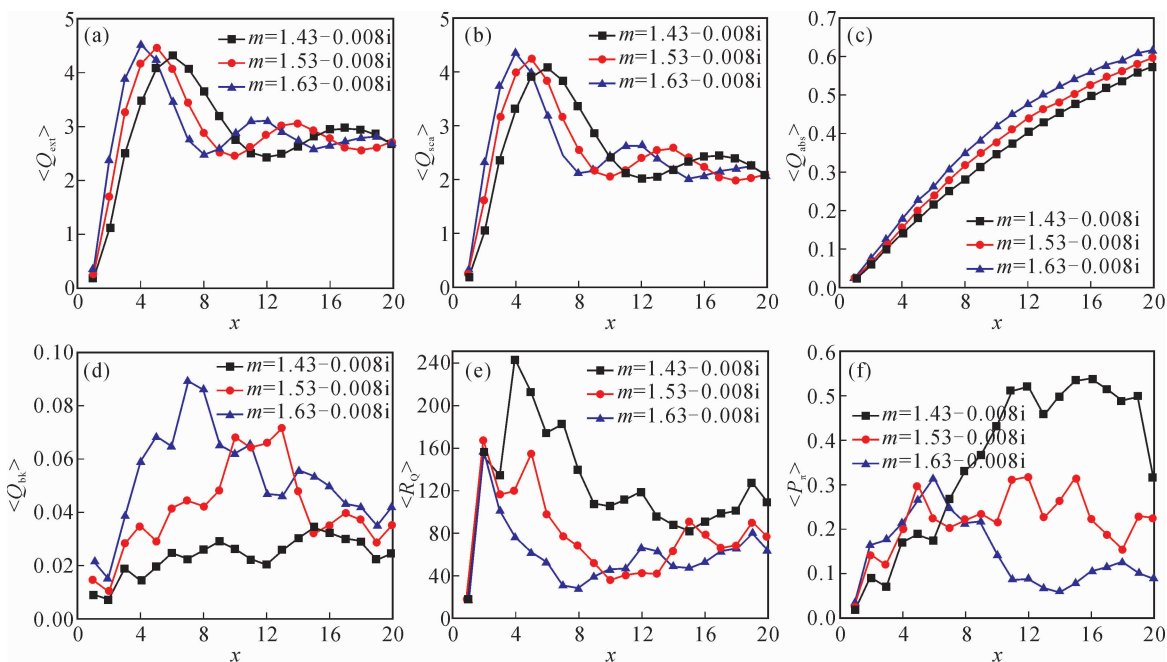
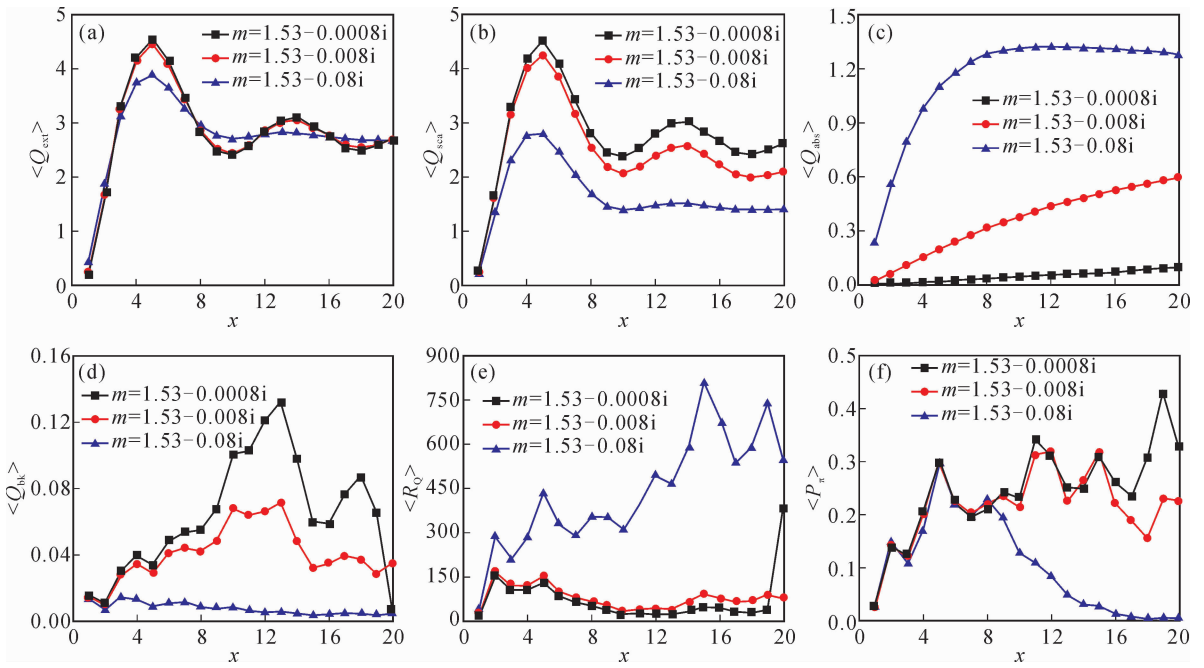


图3 $\text{Re}(m)$ 不同时椭球形气溶胶粒子的光散射特性($D=3$)

Fig. 3 Light scattering properties of ellipsoid particles with different $\text{Re}'s (m) (D=3)$

图4 $\text{Im}(m)$ 不同时椭球形气溶胶粒子的光散射特性($D=3$)Fig. 4 Light scattering properties of ellipsoid particles with different Im 's (m) ($D=3$)

2.1.1 复折射率实部 $\text{Re}(m)$ 对光散射特性的影响

由图3(a)、(b)可知, $\text{Re}(m)$ 增大时, $\langle Q_{ext} \rangle$ 和 $\langle Q_{sca} \rangle$ 的振荡周期明显减小, 而振荡幅值和中心值无明显变化。图3(c)中, 同尺度参数下 $\langle Q_{abs} \rangle$ 随 $\text{Re}(m)$ 增大而略微增大。图3(d)中 $\langle Q_{bk} \rangle$ 先振荡增大而后振荡减小, 且 $\text{Re}(m)$ 越大, $\langle Q_{bk} \rangle$ 整体振荡幅值就越大。显然, $\text{Re}(m)$ 主要影响粒子的散射特性, 对粒子吸收特性的影响较小。

图3(e)中, 除特定尺度参数区间外(x 在10~14之间), $\langle R_Q \rangle$ 随 $\text{Re}(m)$ 增加而减小。因此对于 $x < 10$ 的气溶胶粒子群, $\text{Re}(m)$ 增加会导致粒子群雷达比减小。图3(f)中, 当 $x < 7$ 时, $\langle P_\pi \rangle$ 随 $\text{Re}(m)$ 增加而略微增大。当 $x > 7$ 时, $\langle P_\pi \rangle$ 随 $\text{Re}(m)$ 增大而显著减小。因此, 对于 $x < 7$ 的小颗粒气溶胶粒子群, $\text{Re}(m)$ 增大会引起气溶胶退偏比略微增大。对于 $x \gg 7$ 的气溶胶粒子群, $\text{Re}(m)$ 增大则会引起其退偏比减小。

2.1.2 复折射率虚部 $\text{Im}(m)$ 对光散射特性的影响

由图4(a)、(b)可知, $\text{Im}(m)$ 增大时, $\langle Q_{ext} \rangle$ 和 $\langle Q_{sca} \rangle$ 的振荡幅值明显减小, $\langle Q_{ext} \rangle$ 曲线的中心值无明显变化, 而 $\langle Q_{sca} \rangle$ 曲线振荡中心值明显下降。图4(c)中, $\langle Q_{abs} \rangle$ 随 $\text{Im}(m)$ 增大而显著增大。图4(d)中, $\langle Q_{bk} \rangle$ 随 $\text{Im}(m)$ 增大而显著减小。因此 $\text{Im}(m)$ 对散射特性和吸收特性均有影响, 对吸收特性的影响尤为显著。

由图4(e)、(f)可知, $\text{Im}(m)$ 对 $\langle R_Q \rangle$ 和 $\langle P_\pi \rangle$ 的影响均较为明显。当 $\text{Im}(m)$ 增加时, $\langle R_Q \rangle$ 增加, 而 $\langle P_\pi \rangle$ 减小。因此对于 $x < 20$ 的椭球气溶胶粒子群, $\text{Im}(m)$ 增大会导致气溶胶雷达比增大, 而退偏比减小。

2.2 形状模型对非球形气溶胶光散射特性的影响

2.2.1 椭球、圆柱和四棱柱形气溶胶粒子的光散射特性

由图5(a)、(b)可知, 三种形状气溶胶粒子的 $\langle Q_{ext} \rangle$ 和 $\langle Q_{sca} \rangle$ 均随 x 呈减幅振荡。各振荡曲线的中心位置变化不明显, 而椭球形、圆柱形和四棱柱形气溶胶粒子的振荡幅值和振荡周期依次略微增加, 这表明在 D 相同的条件下, 模型差异会对 $\langle Q_{ext} \rangle$ 和 $\langle Q_{sca} \rangle$ 产生影响。图5(c)中, $\langle Q_{abs} \rangle$ 几乎不受模型的影响, 且随 x 增大而增大, 表明粒子吸收特性与粒子等效半径正相关。图5(d)中, $\langle Q_{bk} \rangle$ 振荡幅度较大。综上, 粒子形状特征主要影响粒子的散射特性, 对于粒子吸收特性的影响较小。

图5(e)中除个别尺度参数, 不同形状模型气溶胶粒子 $\langle R_Q \rangle$ 的变化趋势基本一致, 这表明圆柱、椭球和四棱柱形气溶胶粒子群的雷达比差异较小。图5(f)中, 在主要尺度参数区间内, 四棱柱、圆柱和椭球形气溶胶粒子的 $\langle P_\pi \rangle$ 依次减小, 这表明 D 相同的情况下, 四棱柱、圆柱和椭球形粒子的非球形度依次降低。

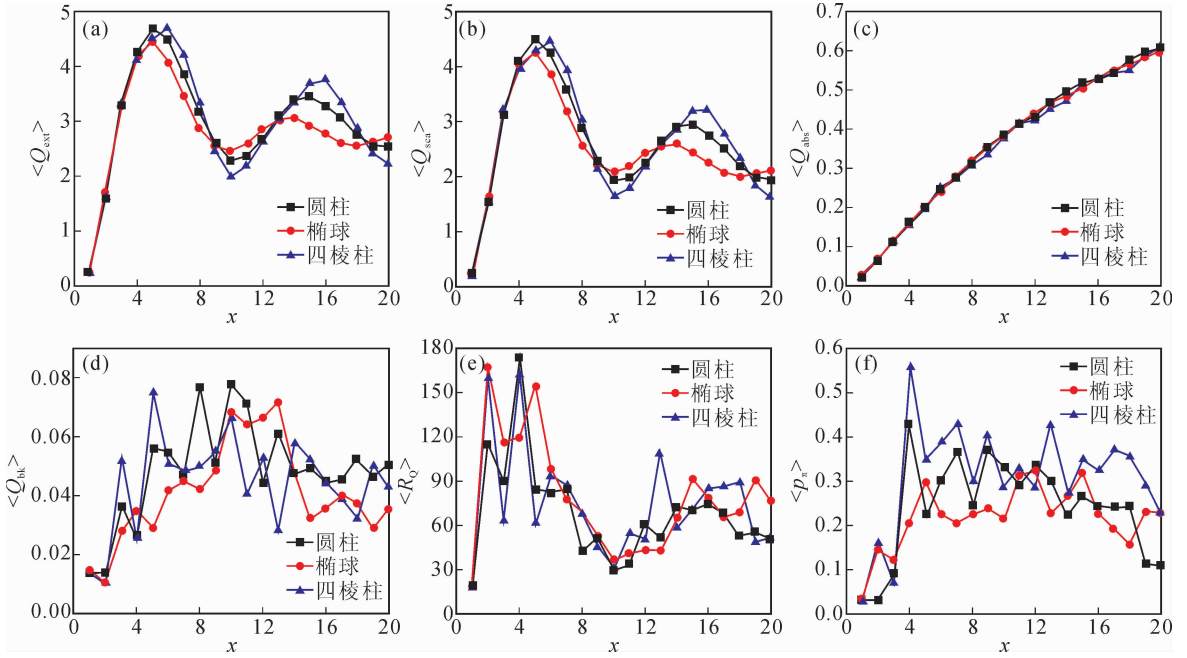


图 5 不同形状模型非球形粒子的光散射特性($D=3, m=1.53-0.008i$)

Fig. 5 Light scattering properties of non-spherical particles with different shapes ($D=3, m=1.53-0.008i$)

2.2.2 尺度参数连续变化时椭球气溶胶粒子的光散射特性

椭球是研究非球形气溶胶粒子光散射特性时的重要模型,尤其适用于沙尘气溶胶粒子光散射特性的仿真研究^[8]。由图 6(a)、(b)可知, $\langle Q_{ext} \rangle$ 和 $\langle Q_{sca} \rangle$ 均随 x 增加呈减幅振荡,而振荡幅值、振荡周期和中心值位置均随 D 增加而增加。由图 6(c)可知,椭球气溶胶粒子的 $\langle Q_{abs} \rangle$ 随 r_{eff} 增加而增加,且受 D 的

影响较小。图 6(d)中, $\langle Q_{bk} \rangle$ 随 x 增大呈无规律振荡。值得一提的是,当 $D=1$ 时, $\langle Q_{bk} \rangle$ 明显偏大。这主要是因为当 $D=1$ 时,粒子为球形颗粒,后向为其散射极值方向。同时由于其空间对称性,不同空间取向球形粒子光散射特性的平均值和单颗粒球形粒子的光散射特性一致。

由图 6(e)可知, $\langle R_Q \rangle$ 随 x 先增大后减小,且呈现振荡。

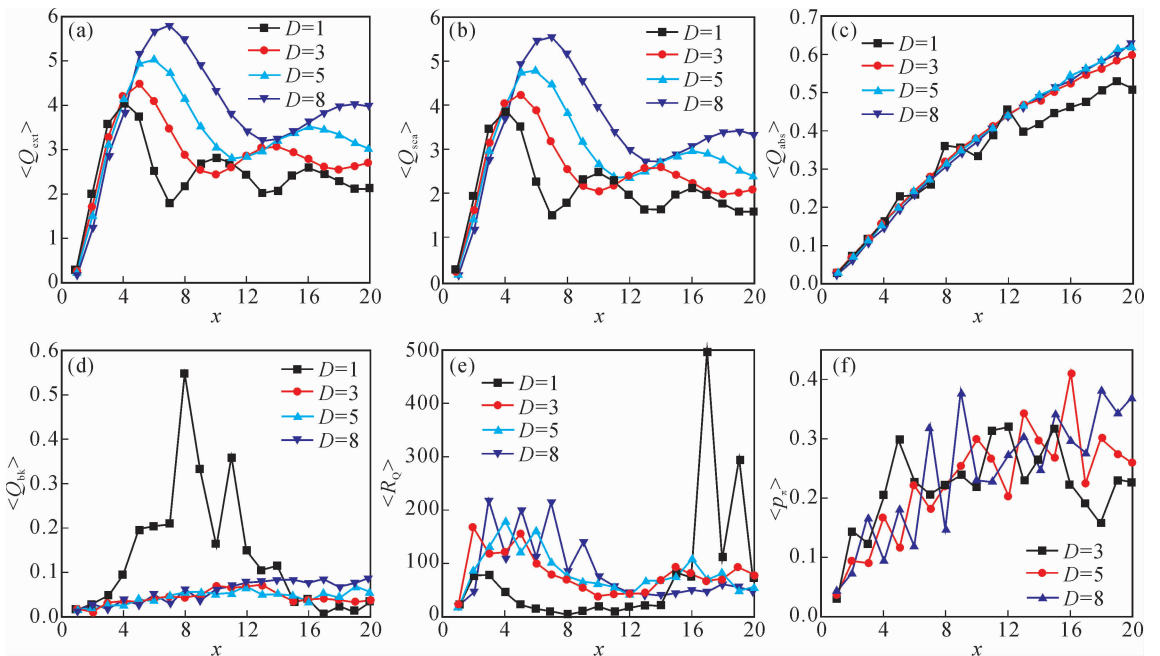


图 6 尺度连续变化时椭球形气溶胶粒子的光散射特性($m=1.53-0.008i$)

Fig. 6 Light scattering properties of ellipsoidal aerosols with different size parameters ($m=1.53-0.008i$)

由图 6(f)可知,不同形状比例参数下, $\langle P_\pi \rangle$ 均随 x 增大而振荡增大。综合图 6(e)、(f)可知, $\langle R_Q \rangle$ 和 $\langle P_\pi \rangle$ 与 D 之间无明显变化规律。

2.2.3 形状比例参数连续变化时椭球气溶胶粒子的光散射特性

由图 7(a)、(b)可知,当 $x=1$ 时, $\langle Q_{\text{ext}} \rangle$ 和 $\langle Q_{\text{sca}} \rangle$ 随 D 增加略有下降。当 x 为较大值时(6、12), $\langle Q_{\text{ext}} \rangle$ 和 $\langle Q_{\text{sca}} \rangle$ 均随 D 增加而增加。

由图 7(c)可知, $\langle Q_{\text{abs}} \rangle$ 受 D 影响较小。

图 7(d)中,当 $x=1$ 时, $\langle Q_{\text{bk}} \rangle$ 随 D 增加略微下降;当 x 取 6 或 12 时, $\langle Q_{\text{bk}} \rangle$ 在 $1 \leq D \leq 2$ 时先增大后减小,当 $D > 2$ 时, $\langle Q_{\text{bk}} \rangle$ 呈小幅振荡。

图 7(e)中, $x=1$ 时, $\langle R_Q \rangle$ 基本保持不变。当 x

取 6 或 12 时, $\langle R_Q \rangle$ 在 $1.2 \leq D \leq 2.5$ 时随 D 增大而增大,当 $D > 2.5$ 时,二者间无明显变化规律。

图 7(f)中, $x=1$ 时, $\langle P_\pi \rangle$ 随 D 增大而增大并趋于稳定值 0.04。当 x 取 6 或 12 时, $\langle P_\pi \rangle$ 在 D 较小时随 D 增大而增大,而后 $\langle P_\pi \rangle$ 随 D 呈无规律振荡。

综合 2.2 节可知,在近瑞利散射区时,粒子形状对粒子光散射特性影响较小。在米散射区时,粒子光散射特性与粒子形状密切相关。尽管 D 是表征非球形粒子偏离球形程度的参数,但仅在其值较小时与 $\langle P_\pi \rangle$ 存在一定关系。此外 D 越大,椭球气溶胶粒子 $\langle Q_{\text{ext}} \rangle$ 和 $\langle Q_{\text{sca}} \rangle$ 的振荡幅值、中心值和周期也越大,因此 $\langle Q_{\text{ext}} \rangle$ 和 $\langle Q_{\text{sca}} \rangle$ 随 x 的变化曲线一定程度上能够反映气溶胶粒子的非球形特征。

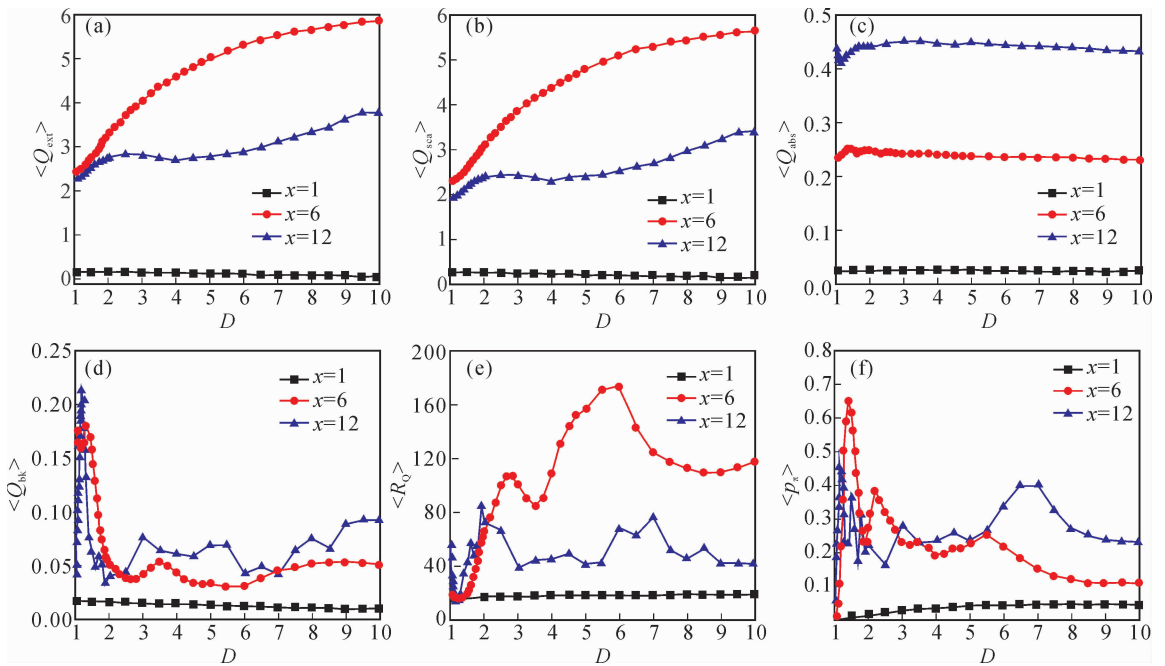


图 7 形状比例参数连续变化时等体积椭球气溶胶粒子的光散射特性($m=1.53-0.008i$)

Fig. 7 Light scattering properties of ellipsoidal aerosols of same volume but different D 's ($m=1.53-0.008i$)

3 结 语

基于 DDA 法研究了非球形气溶胶粒子的光散射特性。仿真结果表明, $\text{Re}(m)$ 增加时, 椭球形气溶胶 $\langle Q_{\text{ext}} \rangle$ 和 $\langle Q_{\text{sca}} \rangle$ 的振荡周期将减小, 而 $\langle Q_{\text{abs}} \rangle$ 略微增加; 当 $\text{Im}(m)$ 增加时, $\langle Q_{\text{sca}} \rangle$ 的振荡幅值和振荡中心值减小, 而 $\langle Q_{\text{abs}} \rangle$ 显著增加。 $\text{Im}(m)$ 增大时, 椭球气溶胶粒子群的雷达比增大, 退偏比减小。在近瑞利散射区, 粒子形状对粒子的光散射特性影响较小。在米散射区时, 粒子光散射特性与粒子形状密切相关。 $\langle Q_{\text{ext}} \rangle$ 和 $\langle Q_{\text{sca}} \rangle$ 随 x 变化的振荡幅值、中心值和周期一定程度上反映了椭球形气溶胶粒子的非球形特征。

参考文献:

- [1] 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(1): 12-16.
ZHANG Xiaoye. Aerosol over china and their climate effect [J]. Advances in Earth Sciences, 2007, 22(1): 12-16.
- [2] DRAINE B T. Discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains [J]. Astrophysical Journal, 1988, 333(333): 848-872.
- [3] 许丽生, 陈洪滨, 丁继烈, 等. 非球形粒子光散射计算研究的进展综述 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 903-912.
XU Lisheng, CHEN Hongbin, DING Jilie, et al. An overview of the advances in computational studies on light

- scattering by nonspherical particles [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(8): 903-912.
- [4] ZHANG Z Y, ZHAO Y P. Optical properties of helical Ag nanostructures calculated by discrete dipole approximation method [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(22): 221501.
- [5] PODOWITZ D I, LIU C, YANG P, et al. Comparison of the pseudo-spectral time domain method and the discrete dipole approximation for light scattering by ice spheres [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 146: 402-409.
- [6] VARTIA O S, YAOIJALA P, MARKKANEN J, et al. On the applicability of discrete dipole approximation for plasmonic particles [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 169: 23-35.
- [7] 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 Shiqi, SONG Wei, WANG Yan, et al. Scattering properties of core-shell structure of mist wrapped dust particles [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(12): 3218-3223.
- [8] 张小林. 一种沙尘气溶胶粒子模型的线退偏比特性研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0829001.
- ZHANG Xiaolin. Linear depolarization ratios by modelled dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0829001.
- [9] 吴举秀, 魏鸣, 黄磊, 等. 对非球形冰晶 94 GHz 云雷达后向散射和衰减的研究 [J]. *气象科学*, 2016, 36(1): 63-70.
- WU Xiuju, WEI Ming, HUANG Lei, et al. Back scattering and attenuation of non-spherical ice crystals with 94 GHz millimeter-wavelength [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2016, 36(1): 63-70.
- [10] KALASHNIKOVA O V, SOKOLIK I N. Modeling the radiative properties of nonspherical soil-derived mineral aerosols [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, 87(2): 137-166.
- [11] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. *大气物理学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [12] 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 Liming, QI Hong, WANG Shenggang. et al. Analysis of the radiative properties of nonspherical particles by discrete dipole approximation method [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(3): 413-418.

(责任编辑 王卫勋)