

应用 T 矩阵法对大气灰霾简单非球形粒子散射特性的 计算与分析

徐 强, 王东琴, 王 旭, 吴振森

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘 要: 针对灰霾天气条件下主要污染物粒子, PM_{2.5} 主要组分, 以硫酸铵和碳质气溶胶粒子为典型粒子, 运用 T 矩阵方法研究了这两种粒子不同形态的散射特性, 包含椭球体(长短轴比 $a/b=1/2, 1/3, 2/1$), 圆柱体(直径与长度比 $D/L=1/2, 1/3, 1/1, 2/1$)及切比雪夫形(多项式 $n=2$, 形变参数 $\xi=-0.1, 0.1$), 两种粒子在不同形态下所对应的散射、消光及吸收效率因子随尺度参数的变化规律。结果表明, 硫酸铵非球形粒子在尺度参数小于 1 时, 不同形状粒子效率因子差异很小, 从尺度参数大于 1 开始, 散射、消光效率因子随尺度参数先增加后震荡减小, 粒子吸收非常弱; 而碳质气溶胶粒子在尺度参数小于 2 时, 不同形状粒子效率因子差异很小, 尺度参数大于 2 开始, 各效率因子随尺度参数先增加然后缓慢减小, 并且对光场具有较强的吸收作用。该研究结果可用于大气灰霾粒子探测分析, 发展大气环境污染防护科技。

关键词: 灰霾粒子; 散射特性; T 矩阵方法; 效率因子

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1117003

Computation and analysis on scattering characteristics of single nonspherical particles of atmospheric haze by T matrix algorithm

Xu Qiang, Wang Dongqin, Wang Xu, Wu Zhensen

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Scattering characteristics of atmospheric haze particles, main ingredients particles of PM_{2.5} were studied, ammonium sulfate and carbonaceous aerosol particles were taken as typical example. By the T matrix algorithm, the non-spherical particles of ammonium sulfate and carbonaceous aerosol particles were analyzed, including the ellipsoid particles (major to minor axis ratio, $a/b=1/2, 1/3, 2/1$), cylindrical particles (diameter to length ratio, $D/L=1/2, 1/3, 1/1, 2/1$) and chebyshev particles (polynomial $n=2$, deformation parameter $\xi=-0.1, 0.1$). Corresponding scattering, absorption and extinction efficiency factor changing with the shape and the size parameter were given. Study results show that, for ammonium sulfate particles, if size parameter was less than 1, efficiency factor tendencies of different shape particles were similar, if size parameter was greater than 1, scattering and extinction efficiency factor increased with the size parameter and then decreased with oscillation, and absorption of ammonium sulfate particles were weak. For carbonaceous aerosol particles, if size parameter was less than 2, efficiency factor

收稿日期: 2017-03-05; 修订日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(61571355)

作者简介: 徐强(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光传输、散射方面的研究。Email:qxu@xidian.edu.cn

tendencies of different shape particles were similar, if size parameter was greater than 2, efficiency factor increased with the size parameter and soon decreased slowly and smoothly, and carbonaceous aerosol particles had strong absorption of light. The analyzing results can be used for optical monitoring and detection of haze particle, improve the ability of science and technology supported environmental pollution prevention.

Key words: haze particle; scattering characteristics; T matrix algorithm; efficiency factor

0 引言

由于经济不断发展和汽车数量逐渐增加,气溶胶污染导致的能见度降低及相关联的沙尘、灰霾等天气逐渐增多。表现出次数不断增加、灰霾面积逐步扩大的现象。灰霾天气严重影响到人类身体健康、生产活动,为此这方面的探究引起政府以及科学界的高度重视。

灰霾现象是大气中一次污染物和它与其他成分发生化学反应后形成的二次污染颗粒物在大气容量一定的情况下积聚造成的^[1-2]。灰霾期间大气污染物的组分相当繁杂,涵盖了数百种粒子,含量较多的是硫酸盐、硝酸盐、元素碳和有机碳等细粒子污染物^[3-8],F.Yang 等^[8]分析了我国重点城市中 PM2.5 的各化学成分,得出硫酸盐和硝酸盐约占 7.1%~57%,有机物约占比 17.7%~53%和元素碳约在 1.3%~12.8%等,这些是构成 PM2.5 的主要化学组成成分。

粒子的光散射特性是其基本物理特性,利用光散射方法可以探测雾霾气溶胶粒子的组分、浓度等物理特性^[9-14],所以研究大气灰霾粒子对光散射非常重要,灰霾天气下大气中的污染物主要是硫酸盐、硝酸盐和有机碳和单质碳粒子的混合物,由于硫酸盐和硝酸盐的虚部较小且复折射率较相近,而碳质气溶胶粒子复折射虚部较大,所以文中选取硫酸气溶胶粒子和碳质气溶胶粒子作为散射体物质的典型粒子。论文旨在研究简单非球形粒子光散射特性,选择这两种粒子的相关折射率参数,对三种形状非球形颗粒的散射、吸收和消光效率因子随不同尺度参数的变化趋势进行理论计算和分析。

然而气溶胶粒子不仅组分复杂,而且形态多样,硫酸铵气溶胶颗粒大部分为球形,碳质气溶胶颗粒中飞灰大部分为球形,也包含非球形微粒,如椭球形、长圆柱形和切比雪夫形颗粒,对此类非球形粒子

光散射计算,相比其他计算方法, T 矩阵最突出的特点在于:它不受电磁波入射方位角和极化态的影响,只和粒子物理特征相关,像粒子形态,相对折射率,构成成分等。所以如果散射体一旦确定后,那么只计算一次对应的 T 矩阵就可以了。正因为如此,用于方位随机的粒子散射的求解相当方便。除此之外,由于是基于 Maxwell 方程计算得到的一种准确的解析解,所以它具有很高的精度,能够视为一种标准对其他方法进行相应的比较和验证^[15-20]。

1 T 矩阵法分析粒子散射特性

T 矩阵对应 Maxwell 方程的解析形式,求解的主要思路是运用矢量球谐函数展开入射场、内部场以及散射场。基于 Maxwell 方程的线性关系,同时边界条件也是线性的,因而可以采用线性相关的矩阵将散射体的入射场和散射场间的展开系数联系起来,而这个线性矩阵就是熟知的 T 矩阵,又称为散射传输矩阵。基本原理如下:由于入射电场的作用,微粒表面产生电流,再由电流激发形成散射电场,入射场 E^{inc} 和散射场 E^{scat} 都采用矢量球面波函数展开^[21]:

$$E^{inc}(r) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [a_{nm} R_g M_{nm}(kr) + b_{nm} R_g N_{nm}(kr)] \quad (1)$$

$$E^{scat}(r) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [p_{nm} M_{nm}(kr) + q_{nm} N_{nm}(kr)], |r| > r_0 \quad (2)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 为环境介质中的波数; r_0 为散射粒子的外切球半径; $M_{nm}(kr)$ 、 $N_{nm}(kr)$ 为基于第一类 Hankel 函数 $h_n^1(kr)$ 的矢量波函数; $R_g M_{nm}(kr)$ 和 $R_g N_{nm}(kr)$ 是基于球表示的源函数, Bessel 函数的正则矢量波函数,展开系数 a 、 b 、 p 、 q 由数值积分方法获得:

$$a_{nm} = 4\pi(-1)^m i^n d_n E_0^{inc} \cdot C_{nm}^*(\vartheta^{inc}) \exp(-im\varphi^{inc}) \quad (3)$$

$$b_{nm} = 4\pi(-1)^m i^{n-1} d_n E_0^{inc} \cdot B_{nm}^*(\vartheta^{inc}) \exp(-im\varphi^{inc}) \quad (4)$$

散射波系数 p_{nm} 、 q_{nm} 和入射波系数 a_{nm} 、 b_{nm} 具有

线性关系:

$$p_{nm} = \sum_{n'=1}^{n_{\max}} \sum_{m'=n'}^{n'} [T_{mm'n'}^{11} a_{m'n'} + T_{mm'n'}^{12} b_{m'n'}] \quad (5)$$

$$q_{nm} = \sum_{n'=1}^{n_{\max}} \sum_{m'=n'}^{n'} [T_{mm'n'}^{21} a_{m'n'} + T_{mm'n'}^{22} b_{m'n'}] \quad (6)$$

写为矩阵的形式为:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{11} & T^{12} \\ T^{21} & T^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:

$$T = -Q^{(1)}(Q^{(3)})^{-1} \quad (8)$$

式中: Q 的上角标(1),(3)分别对应第一类和第三类 Bessel 函数,而矩阵 $Q^{(1)}$ 表示为:

$$Q^{(1)} = \begin{bmatrix} P^{(1)} & R^{(1)} \\ S^{(1)} & U^{(1)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} P_{mm\mu\nu}^{(1)} \\ R_{mm\mu\nu}^{(1)} \\ S_{mm\mu\nu}^{(1)} \\ U_{mm\mu\nu}^{(1)} \end{bmatrix} = -ikk_s \begin{bmatrix} J_{21}^{(1)} \\ J_{11}^{(1)} \\ J_{22}^{(1)} \\ J_{12}^{(1)} \end{bmatrix} - ik^2 \begin{bmatrix} J_{12}^{(1)} \\ J_{22}^{(1)} \\ J_{11}^{(1)} \\ J_{21}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} J_{11}^{(1)} \\ J_{12}^{(1)} \\ J_{21}^{(1)} \\ J_{22}^{(1)} \end{bmatrix} = (-1)^m \int_{S'} dS' \hat{n}(r')$$

$$\begin{bmatrix} \vec{M}_{\mu\nu}^{(1)}(k_s r', \theta', \phi') \times \vec{M}_{-mm}^{(1)}(kr', \theta', \phi') \\ \vec{M}_{\mu\nu}^{(1)}(k_s r', \theta', \phi') \times \vec{N}_{-mm}^{(1)}(kr', \theta', \phi') \\ \vec{N}_{\mu\nu}^{(1)}(k_s r', \theta', \phi') \times \vec{M}_{-mm}^{(1)}(kr', \theta', \phi') \\ \vec{N}_{\mu\nu}^{(1)}(k_s r', \theta', \phi') \times \vec{N}_{-mm}^{(1)}(kr', \theta', \phi') \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: \vec{M} 和 \vec{N} 代表矢量球谐函数。矩阵:

$$Q^{(3)} = \begin{bmatrix} P^{(3)} & R^{(3)} \\ S^{(3)} & U^{(3)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} P_{mm\mu\nu}^{(3)} \\ R_{mm\mu\nu}^{(3)} \\ S_{mm\mu\nu}^{(3)} \\ U_{mm\mu\nu}^{(3)} \end{bmatrix} = -ikk_s \begin{bmatrix} J_{21}^{(3)} \\ J_{11}^{(3)} \\ J_{22}^{(3)} \\ J_{12}^{(3)} \end{bmatrix} - ik^2 \begin{bmatrix} J_{12}^{(3)} \\ J_{22}^{(3)} \\ J_{11}^{(3)} \\ J_{21}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} J_{11}^{(3)} \\ J_{12}^{(3)} \\ J_{21}^{(3)} \\ J_{22}^{(3)} \end{bmatrix} = (-1)^m \int_{S'} dS' \hat{n}(r')$$

$$\begin{bmatrix} \vec{M}_{\mu\nu}^{(1)}(k_s r', \theta', \phi') \times \vec{M}_{-mm}^{(3)}(kr', \theta', \phi') \\ \vec{M}_{\mu\nu}^{(1)}(k_s r', \theta', \phi') \times \vec{N}_{-mm}^{(3)}(kr', \theta', \phi') \\ \vec{N}_{\mu\nu}^{(1)}(k_s r', \theta', \phi') \times \vec{M}_{-mm}^{(3)}(kr', \theta', \phi') \\ \vec{N}_{\mu\nu}^{(1)}(k_s r', \theta', \phi') \times \vec{N}_{-mm}^{(3)}(kr', \theta', \phi') \end{bmatrix} \quad (14)$$

把公式(9)~(14)代入表达式(8),就可以求出对应的 T 矩阵了。只要能求出散射 T 矩阵,便很容易获得任意回旋对称的单体光学特性。

其中粒子的散射截面、消光截面的表达式如下:

$$\langle C_{\text{ext}} \rangle = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [T_{nnmm}^{11}(P) + T_{nnmm}^{22}(P)] \quad (15)$$

$$\langle C_{\text{sca}} \rangle = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^n \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 |T_{mm'n'}^{kl}(P)|^2 \quad (16)$$

式中: T_{nnmm}^{11} 、 $T_{nnmm}^{kl}(P)$ 、 $T_{nnmm}^{22}(P)$ 为 T 矩阵中的元素,且散射(消光和吸收)效率因子与散射(消光、和吸收)截面满足 $Q_{\text{sca}} = \frac{\langle C_{\text{sca}} \rangle}{\langle G \rangle}$, 其中 $\langle G \rangle$ 为单个粒子的平均投影面积。

文中主要以灰霾天气下两种主要的污染物粒子(硫酸铵和碳质气溶胶)为研究对象,运用 T 矩阵方法研究了对应组分在可见光波段 0.55 μm 波长,椭球体(长短轴比 $a/b=1/2, 1/3, 2/1$)、圆柱体(直径与长度比 $D/L=1/2, 1/3, 2/1$)及切比雪夫形(多项式 $n=2$,形变参数 $\xi=-0.1, 0.1$)形态下所对应的散射、消光及吸收效率因子随尺度参数的变化规律。

文中的等效粒径使用的是等表面积等效粒径,入射光的方向是沿旋转对称粒子的对称轴方向入射。单个粒子的平均散射截面不依赖于入射光的偏振状态,所以文中涉及的入射光的偏振情况对效率因子没有影响,入射光是非偏振的平面波。

2 不同形状的硫酸铵粒子各效率因子

图 1 所示的分别是在波长为 0.55 μm , 硫酸铵粒子复折射率 $m=1.52+10^{-7}i$ 时,对应的椭球形、圆柱

形和切比雪夫形三种不同形态下粒子的消光效率因子,图 2 是在相同波长相同复折射率下,三种不同形

态的硫酸铵粒子对应的散射效率因子,图 3 是同种条件下对应的吸收效率因子。

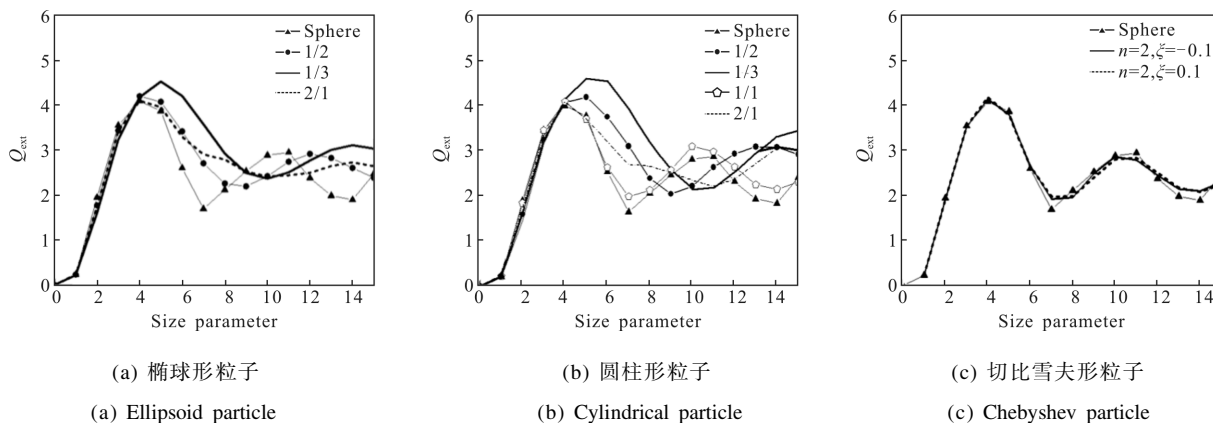


图 1 不同形状硫酸铵粒子的消光效率因子随尺度参数的变化

Fig.1 Extinction efficiency factor changes with the size parameter of ammonium sulfate particles with different shapes

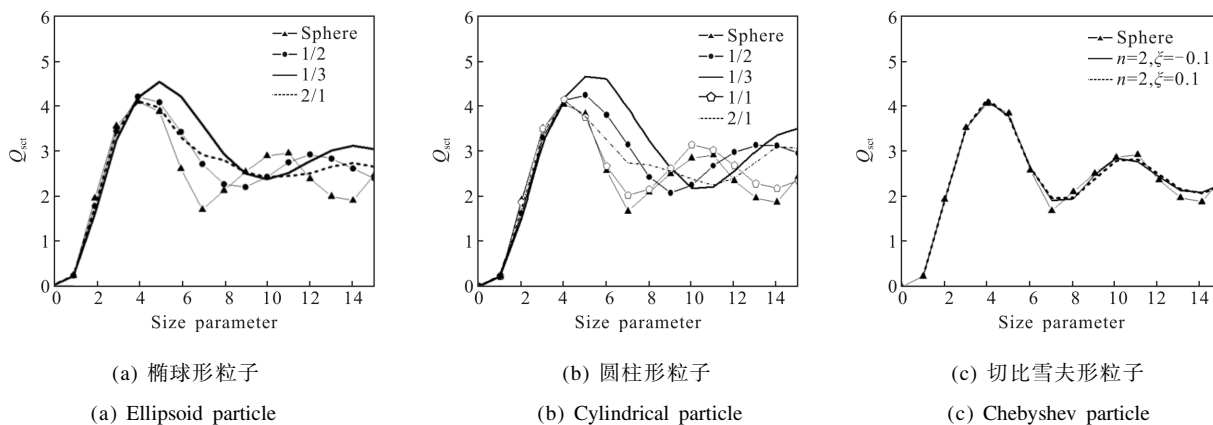


图 2 不同形状硫酸铵粒子的散射效率因子随尺度参数的变化

Fig.2 Scattering efficiency factor changes with the size parameter of ammonium sulfate particles with different shapes

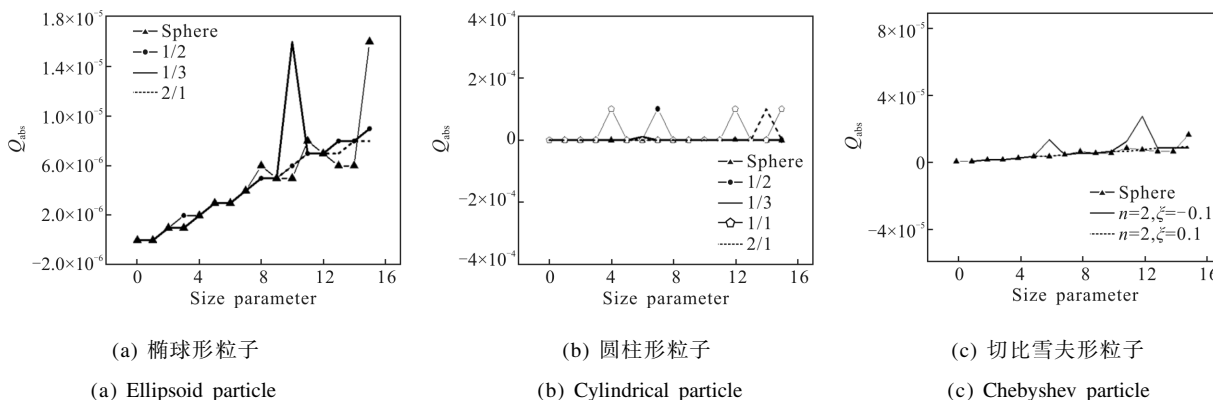


图 3 不同形状硫酸铵粒子的吸收效率因子随尺度参数的变化

Fig.3 Absorption efficiency factor changes with the size parameter of ammonium sulfate particles with different shapes

由图 1 和图 2 可以看出硫酸铵粒子在不同形状下的消光和散射效率因子变化规律非常相似,在尺度小于 1 时,不同形状粒子的各个效率因子均重合,

即在极小尺度范围内各效率因子不受形状影响,球形与非球形间几乎无差异,从尺度参数大于 1 开始,非球形颗粒物消光效率因子随尺度参数增加呈现先

增后减,最后又增大的规律,但最终均趋于常数 2。且三种形态的粒子中圆柱形硫酸铵的散射和消光的极值最大,切比雪夫粒子的极值最小,也就是说圆柱形散射和消光能力更强。对于椭球形和圆柱形来说,在尺度参数位于 4~9 间和大于 13 后,轴比最小 1/3 时对应的各个效率因子均大于其他形状下对应的值,而切比雪夫粒子与球形粒子特性最为接近。轴比为 1/1 圆柱形粒子消光及散射效率因子最接近球形粒子对应效率因子,不同形状的硫酸铵粒子的吸收效率因子都远小于散射效率因子。

由消光、散射和吸收三者间满足的代数关系式,很容易知道吸收效率的变化规律,见图 3,不同形态下硫酸铵吸收效率因子的量级都很小,因为对应复

折射率虚部非常小。此外,由于计算时取值比较稀疏导致图形呈锯齿状的波动,整体来看,除了个别点大部分都接近零,说明硫酸铵粒子的吸收效应很弱。

3 不同形状的碳质气溶胶粒子各效率因子

图 4 所示的分别是碳质气溶胶粒子在波长 $0.55 \mu\text{m}$, 复折射率 $m=1.75+0.44i$ 时对应的椭球形,圆柱形和切比雪夫形三种不同形态下的消光效率因子,图 5 是在相同波长相同复折射率下,三种不同形态的碳质气溶胶对应的散射效率因子,图 6 则是在同种条件下,三种不同形态下的碳质气溶胶粒子对应的吸收效率因子。

从效率因子随尺度参数的变化图可以看出碳质

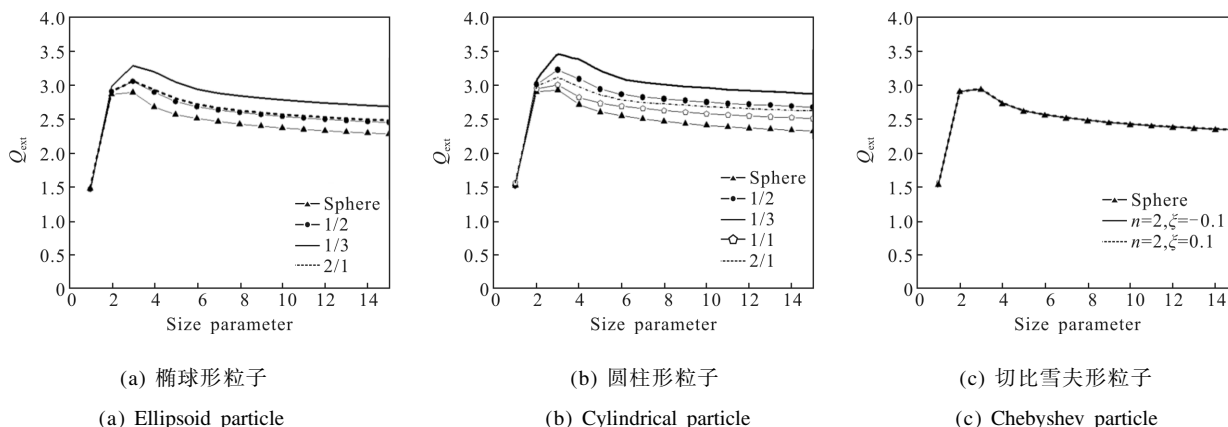


图 4 不同形状碳质气溶胶粒子的消光效率因子随尺度参数的变化

Fig.4 Extinction efficiency factor changes with the size parameter of carbonaceous aerosol particles with different shapes

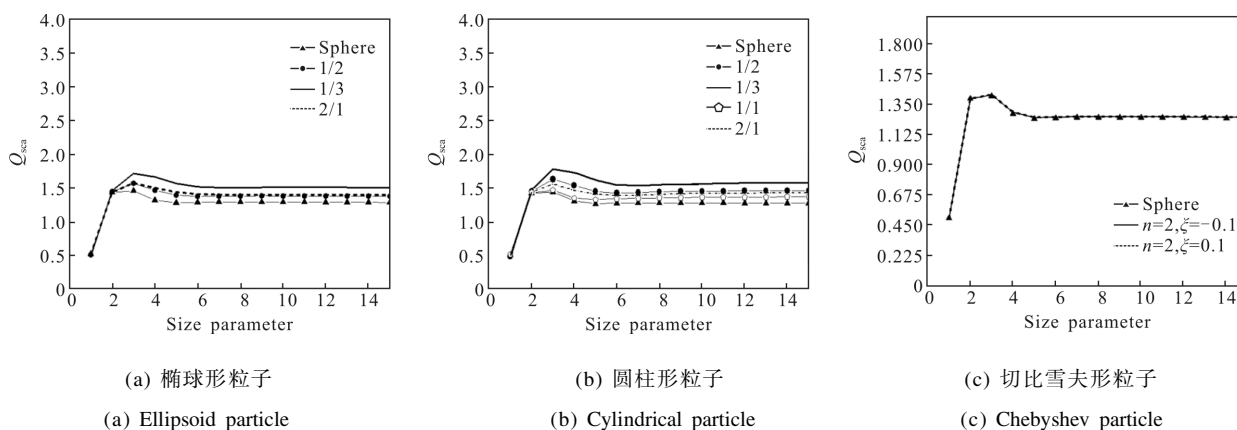


图 5 不同形状碳质气溶胶粒子的散射效率因子随尺度参数的变化

Fig.5 Scattering efficiency factor changes with the size parameter of carbonaceous aerosol particles with different shapes

气溶胶粒子和前面硫酸铵粒子的效率因子存在很大差别,整体看上去很平稳,没有出现震荡衰减的形式。如图 4、图 5 所示,碳质气溶胶颗粒对应的消光

效率因子的极大值均较硫酸铵粒子要小,但是在小尺度范围内增长迅速,到达极大值后再随着尺度参数增大而平缓的趋于恒定值 2。当尺度参量小于 2

时,各效率因子几乎完全相同,不受粒子形状的影响。对于椭球和圆柱形粒子来说,当尺度参数大于 2 以后,轴比最小 1/3 时对应的各个效率因子均比其他比值的粒子要大,球形粒子的各因子最低。在轴比 1/2 和 2/1 时,各因子相差并不大,只是轴比为 2/1 的椭球粒子所对应的各效率因子略大于轴比为 1/2 时的椭球粒子的各效率因子,但是圆柱形正好相反,比值小的对应的值反而略大,且均高于球形粒子,轴比为 1/1 圆柱形粒子各效率因子最接近球形粒子对应效率因子。切比雪夫粒子基本不受形状影响,和球

形粒子几乎完全重合。

碳质气溶胶对应的吸收效率因子如图 6 所示,和前面硫酸铵粒子不同,不再出现锯齿波动,而且不再趋于零,基本上都大于 1。直观从图看,是因为消光和散射效率因子不再接近,只是趋势相似,散射明显小于消光,所以二者差值便不再趋于 0,另一方面,笔者知道它对应的复折射率虚部相对很大,表明具有较强的吸收性能。此外,可以看到碳质气溶胶的吸收效率因子的变化曲线在小尺度内急剧增长然后又快速衰减,较散射和消光来说变化更为剧烈。

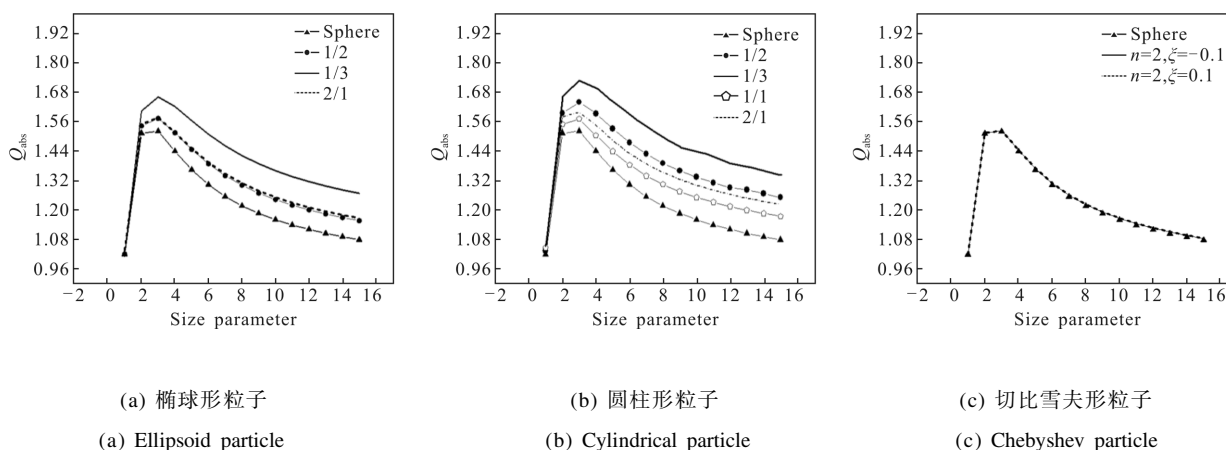


图 6 不同形状碳质气溶胶粒子的吸收效率因子随尺度参数的变化

Fig.6 Absorption efficiency factor changes with the size parameter of carbonaceous aerosol particles with different shapes

4 结束语

文中基于灰霾天气大气中含量较多的硫酸盐、元素碳和有机碳等细粒子污染物,运用 T 矩阵方法计算了可见光波段波长 $0.55 \mu\text{m}$ 光波照射硫酸铵粒子和碳质气溶胶粒子的散射特性,计算分析了不同粒子在椭球形(长短轴比为 1/2, 1/3, 2/1)、圆柱形(直径与长度比为 1/2, 1/3, 2/1)和切比雪夫形(其多项式 $n=2$, 形变参数为 -0.1 和 0.1)下的散射特性,得到不同粒子各效率因子随尺度参数的变化规律,硫酸铵非球形粒子在尺度参数小于 1 时,不同形状对效率因子影响很小,之后散射、消光效率因子随尺度参数先增加后减小,吸收效率因子接近于 0; 碳质气溶胶粒子在尺度参数小于 2 时,不同形状对效率因子影响很小,之后散射、消光和吸收效率因子随尺度参数先增加然后缓慢减小,并且对光场具有较强的吸收作用。

参考文献:

[1] He Hong, Wang Xinming, Wang Yuesi, et al. Formation mechanism and control strategies of haze in China [J]. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28 (3): 344-352. (in Chinese)
 贺泓, 王新明, 王跃思, 等. 大气灰霾成因与控制 [J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 344-352.

[2] Wu Dui. 2012 hazy weather research in China in the last decade: A review [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2): 257-269. (in Chinese)
 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.

[3] Bai Chunli. Progress and prospect on atmospheric haze research in Chinese Academy of Sciences [J]. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(3): 275-281. (in Chinese)
 白春礼. 中国科学院大气灰霾研究进展及展望 [J]. 中国科

- 学院院刊, 2014, 29(3): 275–281.
- [4] Zhou Min, Chen Changhong, Wang Hongli, et al. The variation characteristics of organic and element carbon during air pollution episodes in autumn in Shanghai, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 181–188. (in Chinese)
周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 181–188.
- [5] Liu Baoxian, Zhang Dawei, Chen Tian. Characteristics and major chemical compositions of PM_{2.5} in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12): 4053–4060. (in Chinese)
刘保献, 张大伟, 陈添. 北京市 PM_{2.5} 主要化学组分浓度水平研究与特征分析 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 4053–4060.
- [6] Long Shilei. Characteristics of major physical and chemical processes during haze day in Shanghai [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
龙时磊. 上海地区灰霾过程中的主要物理和化学问题研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [7] Wang Zhijuan, Han Lihui, Chen Xufeng, et al. Characteristics and sources of PM_{2.5} in typical atmospheric pollution episodes in Beijing [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(5): 122–126. (in Chinese)
王志娟, 韩力慧, 陈旭锋, 等. 北京典型污染过程 PM_{2.5} 的特性和来源[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 122–126.
- [8] Yang F. Characteristics of PM_{2.5} speciation in representative megacities and across China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(11): 5207–5219.
- [9] Bu Yichuan, Zhao Yongkai, Chen Zhengyan. Research on real-time aerosol particle shape identification based on scattered light detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0413003. (in Chinese)
卜一川, 赵永凯, 陈正岩. 基于光散射的实时气溶胶粒子形状识别技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0413003.
- [10] Paul A Baron, Klaus Willeke. Aerosol Measurement Principles, Techniques, and Applications [M]. Translated by Bai Zhipeng, Zhang Can. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [11] Pan Y L, Hill S C, Pinnick R G, et al. Dual excitation wavelength fluorescence spectra and elastic scattering for differentiation of single airborne pollen and fungal particles [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(8): 1555–1563.
- [12] Kiselev D, Bonacina L, Wolf J P. Individual bioaerosol particle discrimination by multi-photon excited fluorescence [J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24516–24521.
- [13] Fan Meng, Chen Liangfu, Li Pingyang. Scattering properties of non-spherical particles in the CO₂ shortwave infrared band [J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(20): 204202. (in Chinese)
范萌, 陈良富, 李苹羊. 非球形气溶胶粒子短波红外散射特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61(20): 204202.
- [14] Jurányi Z, Burtscher H, Loepfe M. Dual-wavelength light scattering for selective detection of volcanic ash particles[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2015, 8(8): 8701–8726.
- [15] Spurr R, Wang J, Zeng J, et al. Linearized T-matrix and Mie scattering computations [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2012, 113(6): 425–439.
- [16] Mi Li, Zhou Hongwei, Sun Zhiwei. The use of T-matrix method for determining coagulation rate of colloidal particles in light scattering measurement [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(13): 134704. (in Chinese)
米利, 周宏伟, 孙祉伟. 光散射聚集速率测定中 T 矩阵方法的应用[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 134704.
- [17] Somerville W R C, Auguie B, Le Ru E C. Accurate and convergent T-matrix calculations of light scattering by spheroids [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 160: 29–35
- [18] Zhang Su, Peng Jie, Zhan Juntong. Research of the influence of non-spherical ellipsoid particle parameter variation on polarization characteristic of light [J]. *Acta Phys Sin*, 2016, 65(6): 064205.
张肃, 彭杰, 战俊彤. 非球形椭球粒子参数变化对光偏振特性的影响[J]. 物理学报, 2016, 65(6): 064205.
- [19] Zhang Xuehai, Wei Heli, Dai Congming, et al. Influence of aspect ratio on the light scattering properties of spherical aerosol particles [J]. *Acta Phys Sin*, 2015, 64(22): 224205. (in Chinese)
张学海, 魏合理, 戴聪明, 等. 取向比对椭球气溶胶粒子散射特性的影响[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 224205.
- [20] Shao Shiyong, Huang Yinbo, Wei Heli, et al. Phase function of prolate spheroidal mono-disperse aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 29(1): 108–113. (in Chinese)
邵士勇, 黄印博, 魏合理, 等. 单分散长椭球形气溶胶粒子的散射相函数研究[J]. 光学学报, 2008, 29(1): 108–113.
- [21] Mischchenko M I, Travis L D, Lacis A A. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.