

# 等体积不同纵横比水滴粒子的光学特性计算

蒋佳丽, 张建奇, 马向超

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 不同重力场环境中水滴粒子的形状会偏离球形, 为了研究水滴粒子非球形化程度对其光学特性的影响, 本文计算了不同方向取向, 等体积不同纵横比水滴粒子在  $3.0\sim 5.0\ \mu\text{m}$  波段的光学特性。研究发现虽然不同纵横比水滴粒子的光学特性在  $3.0\sim 5.0\ \mu\text{m}$  波段的变化趋势相似, 但具体数值仍然明显依赖于水滴粒子的空间取向和偏离球形程度。总体而言, 水滴粒子的吸收截面只在方位角  $\theta$  较小和波长较短时随其纵横比显著变化; 而散射截面、不对称因子和散射相函数则在任意方位角和波长下都对水滴粒子的纵横比有较明显的依赖。因此, 由于光学特性对水滴粒子的纵横比有较强的依赖性, 由水滴粒子所组成的水雾的辐射传输特性会强烈依赖于水滴粒子的形状。

**关键词:** 水滴粒子; 离散偶极子近似法 (discrete-dipole approximation, DDA); 光学特性; 旋转椭球体; 纵横比

中图分类号: O436.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2021)08-0743-09

## Calculation of Optical Properties of Water Droplets with Equal Volume and Different Aspect Ratios

JIANG Jiali, ZHANG Jianqi, MA Xiangchao

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

**Abstract:** To study the influence of the asphericity degree on droplet particles optical properties in different gravity fields, the optical properties of water droplet with equal volume and different aspect ratios in the wavelength between  $3.0\ \mu\text{m}$  and  $5.0\ \mu\text{m}$  were calculated. It was found that although the changing trend of the optical properties of the water droplets with wavelength is very similar, their specific values significantly depend on the spatial orientation and the asphericity degree of water droplets. In general, the absorption cross section of water droplets strongly depends on its aspect ratio only when the azimuth angle  $\theta$  is small and the wavelength is short. In contrast, the scattering cross section, asymmetry factor, and scattering phase function depend on the aspect ratio of water droplets at any azimuth angle and wavelength. Therefore, because the optical properties are strongly dependent on the aspect ratio of the droplet particles, the radiation transmission properties of fog composed of water droplets should exhibit different results in different gravitational fields.

**Key words:** water droplet, DDA method, optical property, spheroid, aspect ratio

## 0 引言

水滴是云雾的主要组成成分, 在自然界广泛存在, 它对可见光、红外和其他电磁波都具有较强的衰减作用<sup>[1]</sup>。水滴对电磁波的衰减和散射是影响微波、毫米波和红外光学等系统工作性能的重要因素。例如应用于光电对抗的水汽烟幕、激光探测设备、军用或民用航空通信等领域都需要研究广泛存在的

水滴对电磁波的衰减特性<sup>[2-5]</sup>。因此, 探索水滴的光学特性具有重要的理论和实际价值。

水滴对电磁波的衰减特性与水滴的形状、平均粒径、浓度和电磁波的波长等因素有关。长久以来人们对水滴的研究, 主要是确定水滴粒子在不同入射波长和不同浓度下的最佳消光粒径范围, 且研究都是将水滴粒子当作球形进行数值模拟计算<sup>[6-7]</sup>, 而对入射光的入射角和非球形水滴光学特性的研究则

收稿日期: 2020-10-19; 修订日期: 2020-12-16.

作者简介: 蒋佳丽 (1994-), 女, 硕士研究生, 从事材料和器件光电特性方面的研究。E-mail: jiali2716@163.com。

通信作者: 马向超 (1989-), 男, 河南汝州人, 副教授, 主要研究方向为材料和器件光电特性, E-mail: xcma@xidian.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (11704298); 博士后创新人才支持计划 (BX20180233); 博士后科学基金 (2019M653549)。

很少。实际上，由于重力场的作用，不同星球、不同高度、不同环境下，水雾的组成粒子，即水滴会产生不同的形变，且以偏离球形的椭球体为主。张学海等<sup>[8]</sup>计算了小尺度范围内椭球粒子的散射特征参量，结果表明，椭球粒子的散射特性与取向比密切相关，粒子取向比会影响散射参量的振荡频率和振幅；Lei Bi等<sup>[9]</sup>利用T矩阵方法和基于米氏理论的近似方法，在固定和随机取向条件下，计算了不同纵横比长椭球粒子的散射特性随粒子尺寸的变化情况。就偏离球形的粒子对电磁产生衰减的作用而言，不同的偏离程度，水滴粒子的光学特性也将不同；此外，由于对称性的降低，非球形粒子在不同的方向取向下，也会表现出不同的吸收和散射特性。因此，研究不同方向取向下，非球形水滴粒子的光学特性，并和等体积球形水滴粒子的结果进行对比，对实际应用具有重要的参考价值。

综上所述，由于重力作用下，实际的水滴粒子大多呈现椭球状，本文构建了等体积不同纵横比椭球水滴粒子模型，并基于离散偶极子近似方法(discrete-dipole approximation, DDA)计算了不同方向取向下等体积不同纵横比水滴粒子的吸收截面、散射截面、不对称因子和散射相函数在3.0~5.0 μm波段的值。通过比较不同纵横比的等体积水滴粒子光学特性和等体积球形水滴粒子光学特性的区别，分析了粒子方向取向和偏离球形程度对水滴粒子光学特性的影响。

## 1 水滴粒子光学特性的计算方法及模型

### 1.1 DDA 算法模型及其适用范围分析

DDA 是一种用来计算任意形状的散射体或者周期结构电磁散射特性的方法。DDA 方法的核心思想是：用有限个离散的小偶极子的阵列来近似任意形状的目标结构，阵列中的每个点通过对局域电场的响应获得偶极矩，散射体上所有点在远场辐射的总和构成散射场，对有限个偶极子构成的体系进行自洽计算就可以获得目标的 Muller 散射矩阵的元素和吸收截面、散射截面等表示光学特性的参数<sup>[10-12]</sup>。

具体来讲，假设将水滴粒子用  $N$  个离散偶极子来表示，每个偶极子的位置矢量为  $r_j(j=1, \dots, N)$ ，极化率为  $\alpha_j$ 。每个偶极子会产生电偶极矩  $P_j = \alpha_j E_j$ ，其中  $E_j$  为  $r_j$  处的电场，由入射光在空间位置  $r_j$  处的电场强度  $E_{inc}$  和其余偶极子点在此处产生的电场两部分组成<sup>[13-16]</sup>：

$$E_{inc} = E_0 \exp(ik \cdot r_j - i\omega t) \quad (1)$$

$$E_j = E_{inc,j} - \sum_{k \neq j} A_{jk} P_k \quad (2)$$

式中： $A_{jk} P_k$  是坐标  $r_k$  处的偶极矩  $P_k$  在坐标  $r_j$  处产生的电场。 $A_{jk}$  是一个  $3 \times 3$  矩阵，具体表达式如下：

$$A_{jk} = \frac{\exp(ikr_{jk})}{r_{jk}} \times \left[ k^2 (\hat{r}_{jk} \hat{r}_{jk} - I_3) + \frac{ikr_{jk} - 1}{r_{jk}^2} (3\hat{r}_{jk} \hat{r}_{jk} - I_3) \right], \quad j \neq k \quad (3)$$

式中： $k \equiv \omega/c$ ， $r_{jk} = |r_j - r_k|$ ， $\hat{r}_{jk} \equiv (r_j - r_k)/r_{jk}$ ， $I_3$  是一个  $3 \times 3$  的单位矩阵。通过定义  $A_{jk} = \alpha_j^{-1}$ ，电偶极矩  $P_j = \alpha_j E_j$  可表示为：

$$\sum_{k=1}^N A_{jk} P_k = E_{inc} \quad (4)$$

通过自洽迭代对上述方程求解得到电偶极矩  $P_j$ ，根据求得的  $P_j$  就可以计算出目标体系的吸收截面  $\sigma_{abs}$ 、散射截面  $\sigma_{sca}$ 、消光截面  $\sigma_{ext}$  以及 Stokes 散射矩阵  $S_{xx}$  中用于计算散射相函数  $P(\alpha)$  的  $S_{11}$  参数：

$$\sigma_{abs} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \left\{ \text{Im} \left[ P_j \cdot (\alpha_j^{-1})^* P_j^* \right] - \frac{2}{3} k^3 |P_j|^2 \right\} \quad (5)$$

$$\sigma_{ext} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \text{Im} (E_{inc}^* \cdot P_j) \quad (6)$$

$$\sigma_{sca} = \sigma_{ext} - \sigma_{abs} \quad (7)$$

$$S_{11} = (|S_1|^2 + |S_2|^2 + |S_3|^2 + |S_4|^2) / 2 \quad (8)$$

其中  $S_i(i=1,2,3,4)$  为幅度散射矩阵的元素<sup>[17]</sup>。在辐射传输研究中，经常会利用  $3 \times 3$  Muller 矩阵来表征入射辐射 Stokes 参数和散射辐射 Stokes 参数之间的关系，进而描述有限目标散射体的散射特性<sup>[18]</sup>。

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \frac{1}{k^2 a_{eff}^2} \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix}$$

式中： $(I_s, Q_s, U_s, V_s)^T$  为散射光 Stokes 矢量； $(I_i, Q_i, U_i, V_i)^T$  为入射光 Stokes 矢量； $k$  为波数，即  $k=2\pi/\lambda$ ； $a_{eff}$  是利用等体积的方法计算出的非球形粒子的等效半径，通过 Mueller 矩阵的第一个元素即可求出粒子的散射相函数，具体关系式为：

$$P(\alpha) = \frac{4\pi a_{eff}^2 \cdot M_{11}(\alpha)}{\sigma_{sca}} = \frac{4\pi \cdot S_{11}}{k^2 \sigma_{sca}} \quad (10)$$

式中： $\alpha$  表示入射方向和散射方向间的散射夹角。

为了直观地反映前向散射与后向散射的对称性，在研究辐射传输中的散射问题时引入了不对称因子  $g$

—factor。不对称因子是指对散射角余弦值的加权平均，取值范围为 $[-1,1]$ ，若 $0 < g\text{-factor} \leq 1$ ，则说明微粒前向散射（ $\alpha=0$ ）更加明显；若 $-1 < g\text{-factor} \leq 0$ ，则说明微粒后向散射（ $\alpha=\pi$ ）更占优势。

$$g\text{-factor} = \langle \cos \alpha \rangle \quad (11)$$

上述计算过程都是基于开源软件 DDSCAT7.3 进行的，为了保证计算的光学截面和散射相函数精度需要满足条件 $|m|kd \leq 0.5$ （ $m$  是粒子的相对折射率； $k$  是波数； $d$  是偶极子阵列的间距），即满足：

$$a_{\text{eff}} < 4.94 \frac{\lambda}{|m|} \left( \frac{N}{10^6} \right)^{1/3} \quad (12)$$

式中： $N$  为所需要的最小偶极子数。表 1 列出了计算中所设置的“shape parameters 1-3”参数值，它们能保证所有计算模型的 $|m|kd$  值均满足精度需求。其中， $\varepsilon$  是水滴粒子的纵横比， $a$ 、 $b$ 、 $c$  是水滴粒子的半轴长， $d$  是偶极子阵列的间距。

表 1 粒子模型参数

Table 1 Particle model parameters

$\varepsilon$	$2a/d$	$2b/d$	$2c/d$
1	53.460	53.460	53.460
0.9	57.350	51.615	51.615
0.8	62.035	49.628	49.628
0.7	67.810	47.467	47.467
0.6	75.150	45.090	45.090
0.5	84.864	42.431	42.431
0.4	98.475	39.390	39.390

### 1.2 单个水滴粒子光学特性计算模型

当粒子的形状是非球形时，其光学特性与相对于入射光的方向有关，同一粒子在固定的坐标系中的取向不同时，会表现出不同的光学特性；不同波长时粒子的折射率发生改变，粒子对辐射的光学特性也会随着波长变化。因此，计算在不同方向取向下水滴粒子随波长变化的光学特性是十分必要。

为了研究不同纵横比的椭球水滴粒子的光学特性在 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$  波段随方位角变化情况，我们建立等效半径为 $3.0 \mu\text{m}$ ，3 个半轴长分别记为 $a$ 、 $b$ 、 $c$ ，其中 $a \geq b = c$ ，纵横比 $\varepsilon = b/a$ ，且纵横比在 $0.4 \sim 1$  的椭球水滴粒子模型，如图 1 所示。

其中，水滴粒子相对于入射光的方向由系统坐标系 $\hat{x} - \hat{y} - \hat{z}$  和固定于水滴粒子上的目标坐标系 $\hat{a}_1 - \hat{a}_2 - \hat{a}_3$  共同决定，定义 $\theta$  为 $\hat{a}_1$  与 $\hat{x}$  的夹角， $\phi$  为 $\hat{a}_1$  绕 $\hat{x}$  轴的旋转角度，当 $\phi=0$  时， $\hat{a}_1$  将位于 $\hat{x} - \hat{y}$  平面，当 $\phi \neq 0$  时， $\hat{a}_1$  绕 $\hat{x}$  轴旋转； $\beta$  为 $\hat{a}_2$  绕 $\hat{a}_1$  轴旋转角度，当 $\beta=0$  时， $\hat{a}_2$  将位于 $\hat{x} - \hat{a}_1$  平面，当 $\beta \neq 0$  时， $\hat{a}_2$  绕 $\hat{a}_1$

轴旋转<sup>[19]</sup>。由于水滴粒子是旋转对称的椭球颗粒，设定入射光始终沿 $y$  轴正方向入射，水滴粒子的受光面不会随着 $\phi$  和 $\beta$  改变，因此只需设定方位角 $\theta$  的各种可能取值，便能确定水滴粒子相对于入射光的各种不同取向。

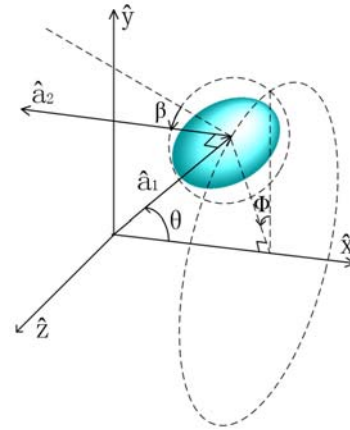


图 1 椭球水滴粒子模型

Fig.1 Ellipsoid water droplet model

为了研究不同纵横比的单个椭球水滴粒子的光学特性在不同方向取向下的变化情况，我们分别计算了当方位角 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  模型的光学特性。对于水滴粒子系而言，由于每个粒子在特定气象环境下可能没有任何优先取向，且电磁波在粒子系中的传播方向多种多样，所以有时候也需要单个椭球水滴粒子光学特性的取向均值，即设定 $\theta=[0^\circ, 90^\circ]$ ，并以 $\cos(\Delta\theta)=0.1$  为分辨率取值后进行均值计算。具体而言，我们根据下式计算每个水滴粒子的平均取向的光学截面：

$$\sigma_{\text{ext,abs,scat}} = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} d\beta \int_{-1}^1 d\cos\theta \int_0^{2\pi} d\phi \quad (13)$$

不同波长时粒子的折射率发生改变，为计算单个水滴粒子在波段 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$  的光学特性，我们通过波段上等间隔选取多个波长采样点分别计算对应的光学特性，最终得出水滴粒子在特定波段内的光学参量。波段 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$  中水滴粒子的复折射率 $m = n + ik$  随波长的变化如表 2<sup>[20]</sup> 所示。

## 2 数值结果与分析

### 2.1 等体积不同纵横比水滴粒子在不同入射角度的光学特性

建立如图 1 所示的椭球水滴粒子模型，选取椭球的纵横比 $\varepsilon = b/a$  分别为 $0.4$ 、 $0.5$ 、 $0.6$ 、 $0.7$ 、 $0.8$ 、 $0.9$  和 $1.0$ ，水滴粒子的方位角 $\theta$  分别设为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和 $90^\circ$ ，分析等体积不同纵横比水滴粒子的吸收截面、散射截面、散射相函数和不对称因子在不同

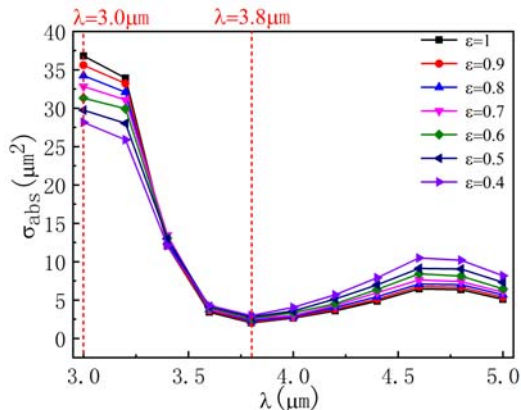
入射角下随波长的变化情况。

图 2 所示分别为等体积不同纵横比水滴粒子的吸收截面曲线,从图中可以看出,纵横比 $\varepsilon=1.0$ 的水滴粒子在不同方位角 $\theta$ 下的吸收截面都呈现出先随波长急剧减小,然后缓慢增加,最后再缓慢减小的趋势。如图 2(a)所示,在 $\theta=0^\circ$ 时不同纵横比水滴粒子吸收截面在  $3.4\sim 3.8\ \mu\text{m}$  具有几乎相同的变化规律,且此时吸收截面的值基本相等。在  $3.0\sim 3.4\ \mu\text{m}$  波长区间,水滴粒子的吸收截面随着纵横比 $\varepsilon$ 的减小而逐步减小,即水滴粒子的形状偏离球体的程度越大,其吸收截面的值越小。在  $3.8\sim 5.0\ \mu\text{m}$  波长区间则呈现相反趋势,水滴粒子的纵横比 $\varepsilon$ 越小,其吸收截面的值反而越大。从图 2(b)、(c)和(d)中可见, $\theta$ 分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 和  $90^\circ$ 时,在  $3.4\sim 3.8\ \mu\text{m}$  之间不同纵横比水滴粒子的吸收截面曲线基本重合,而在  $3.0\sim 3.2\ \mu\text{m}$  之间吸收截面随着入射角 $\theta$ 的增大而逐渐增加,且纵横比 $\varepsilon$ 越小吸收截面增加的越多。总体上,在  $3.0\sim 3.2\ \mu\text{m}$  波段中的任意一个波长处,纵横比 $\varepsilon$

表 2 水滴的复折射率

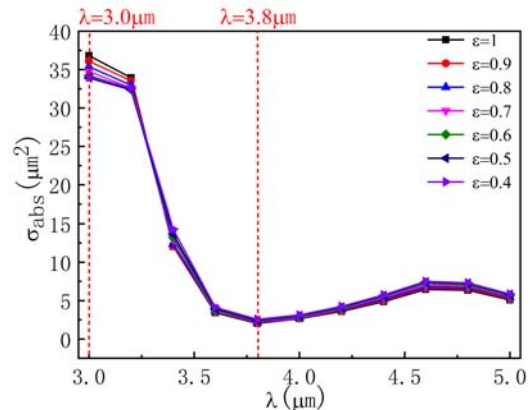
$\lambda/\mu\text{m}$	$n$	$k$
3.0	1.371	0.27200
3.2	1.478	0.09240
3.4	1.420	0.01950
3.6	1.385	0.00515
3.8	1.364	0.00340
4.0	1.351	0.00460
4.2	1.342	0.00688
4.4	1.334	0.01030
4.6	1.330	0.01470
4.8	1.330	0.01500
5.0	1.325	0.01240

注:  $n$  是复折射率的实部,  $k$  是复折射率的虚部  
Note:  $n$  is the real part of the refractive index,  $k$  is the imaginary part of the refractive index



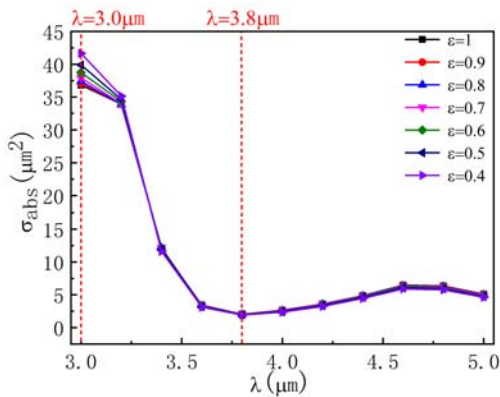
(a)  $\theta=0^\circ$ 时各种粒子的吸收截面

(a) Absorption cross section of various particles when  $\theta=0^\circ$



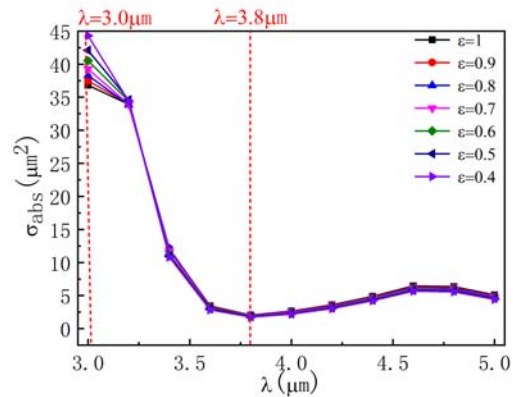
(b)  $\theta=30^\circ$ 时各种粒子的吸收截面

(b) Absorption cross section of various particles when  $\theta=30^\circ$



(c)  $\theta=60^\circ$ 时各种粒子的吸收截面

(c) Absorption cross section of various particles when  $\theta=60^\circ$



(d)  $\theta=90^\circ$ 时各种粒子的吸收截面

(d) Absorption cross section of various particles when  $\theta=90^\circ$

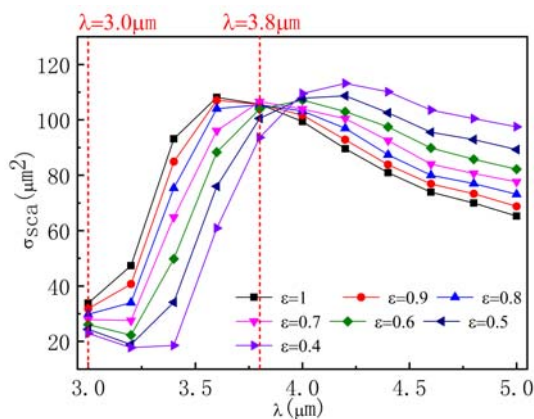
图 2 等体积不同纵横比椭圆水滴粒子的吸收截面

Fig.2 Absorption cross section of water droplets with equal volume and different aspect ratios

对水滴粒子的吸收截面都会有较显著的影响，比如  $3.0\ \mu\text{m}$  波长处，当入射角较小时，吸收截面随着纵横比  $\varepsilon$  的减小而减小；当入射角较大时，吸收截面随着纵横比  $\varepsilon$  的减小而增大。而在  $3.8\ \mu\text{m}$  波长处，纵横比对水滴粒子的吸收截面影响不显著。

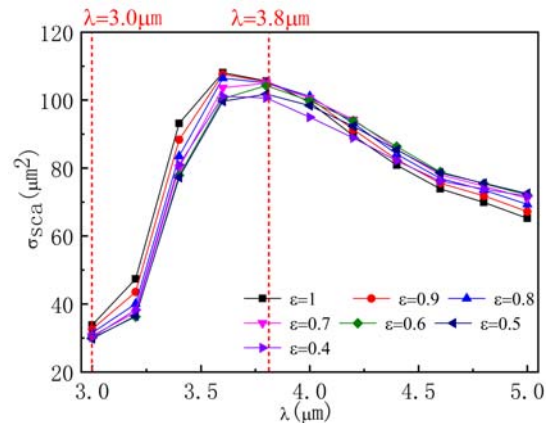
图3所示分别为等体积不同纵横比的椭球水滴粒子的散射截面曲线。从图中可以看出，不同纵横比水滴粒子散射截面都是随着波长的增加先迅速增大，然后在某一个临界波长后缓慢减小。而且，不同纵横比水滴粒子散射截面差异的大小与入射波长息息相关。如图3(a), (b)所示，在  $\theta=0^\circ$  和  $\theta=30^\circ$  时，不同纵横比水滴粒子散射截面的差距在  $3.0\ \mu\text{m}$  开始增大，而且此时水滴粒子的形状偏离球体粒子的程度越大，其散射截面值越小；当波长继续增大，散射截面的差距开始缩小，并在临界波长  $\lambda_c$  (当  $\theta=0^\circ$  时  $\lambda_c$  大约在  $3.9\ \mu\text{m}$  附近) 处散射截面值达到几乎相

等；然后，随着波长的继续增加散射截面的差距又开始增大，且水滴粒子的形状偏离球形粒子的程度越大，其散射截面值越大。总体来讲，不同纵横比水滴粒子散射截面的差距最大可达5倍左右。从图3(c), (d)中可见在  $\theta=60^\circ$  和  $\theta=90^\circ$  时，散射截面计算结果随纵横比  $\varepsilon$  的变化趋势与  $\theta=0^\circ$  和  $\theta=30^\circ$  时相反，在临界波长之前，水滴粒子的形状偏离球形粒子的程度越大，其散射截面值越大；在临界波长之后则正好相反。总体上，对于散射截面而言，在  $3.4\sim 5\ \mu\text{m}$  波长区间中，除了临界波长之外的任意一个波长处，纵横比  $\varepsilon$  对水滴粒子的散射截面都会有较显著的影响。比如  $3.0\ \mu\text{m}$  波长处，当入射角较小时，散射截面随着纵横比  $\varepsilon$  的减小而减小，当入射角较大时，散射截面随着纵横比  $\varepsilon$  的减小而增大；在  $3.8\ \mu\text{m}$  波长处，散射截面都是随着纵横比  $\varepsilon$  的减小而减小



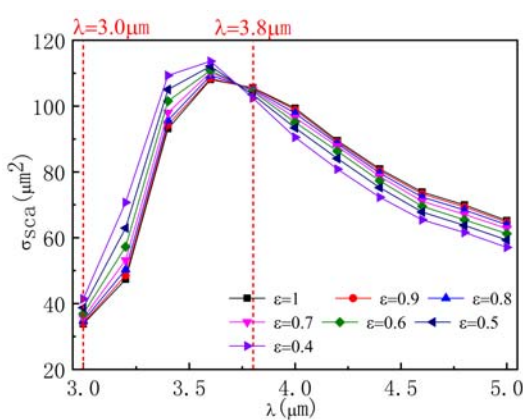
(a)  $\theta=0^\circ$  时各种粒子的散射截面

(a) Scattering cross section of various particles when  $\theta=0^\circ$



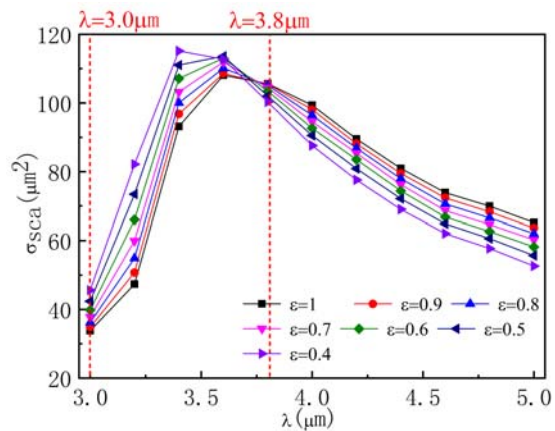
(b)  $\theta=30^\circ$  时各种粒子的散射截面

(b) Scattering cross section of various particles when  $\theta=30^\circ$



(c)  $\theta=60^\circ$  时各种粒子的散射截面

(c) Scattering cross section of various particles when  $\theta=60^\circ$



(d)  $\theta=90^\circ$  时各种粒子的散射截面

(d) Scattering cross section of various particles when  $\theta=90^\circ$

图3 等体积不同纵横比椭球水滴粒子的散射截面

Fig.3 Scattering cross section of water droplets with equal volume and different aspect ratios

图4所示分别为等体积不同纵横比的椭球水滴粒子的不对称因子曲线。从图中可以看出,不同纵横比水滴粒子的不对称因子值都在0.78~0.95之间,散射能量都集中在前向散射,且在3~5 μm波段的变化都是先急剧减小,然后在3.4 μm附近开始缓慢增加,最后再缓慢减小的趋势。从图4(a)中可见在 $\theta=0^\circ$ 时,不同纵横比的水滴粒子不对称因子的差距从3.0 μm开始增大,而且水滴粒子的形状偏离球体粒子的程度越大,其不对称因子越小,即前向散射更加明显。从图4(b)、(c)和(d)中可见,在 $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=$

$60^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 时,当波长继续增大,不同纵横比水滴粒子不对称因子的差距开始缩小,并在临界波长处不对称因子值达到几乎相等;然后,随着波长的继续增加不对称因子的差距又开始缓慢增大。总体上,对于不对称因子而言,也是在3~5 μm波长区间中,除了临界波长之外的任意一个波长处,纵横比 $\varepsilon$ 对水滴粒子的不对称因子都会有较显著的影响。比如在3.0 μm和3.4 μm波长处,不对称因子都随着纵横比 $\varepsilon$ 的减小而增大。

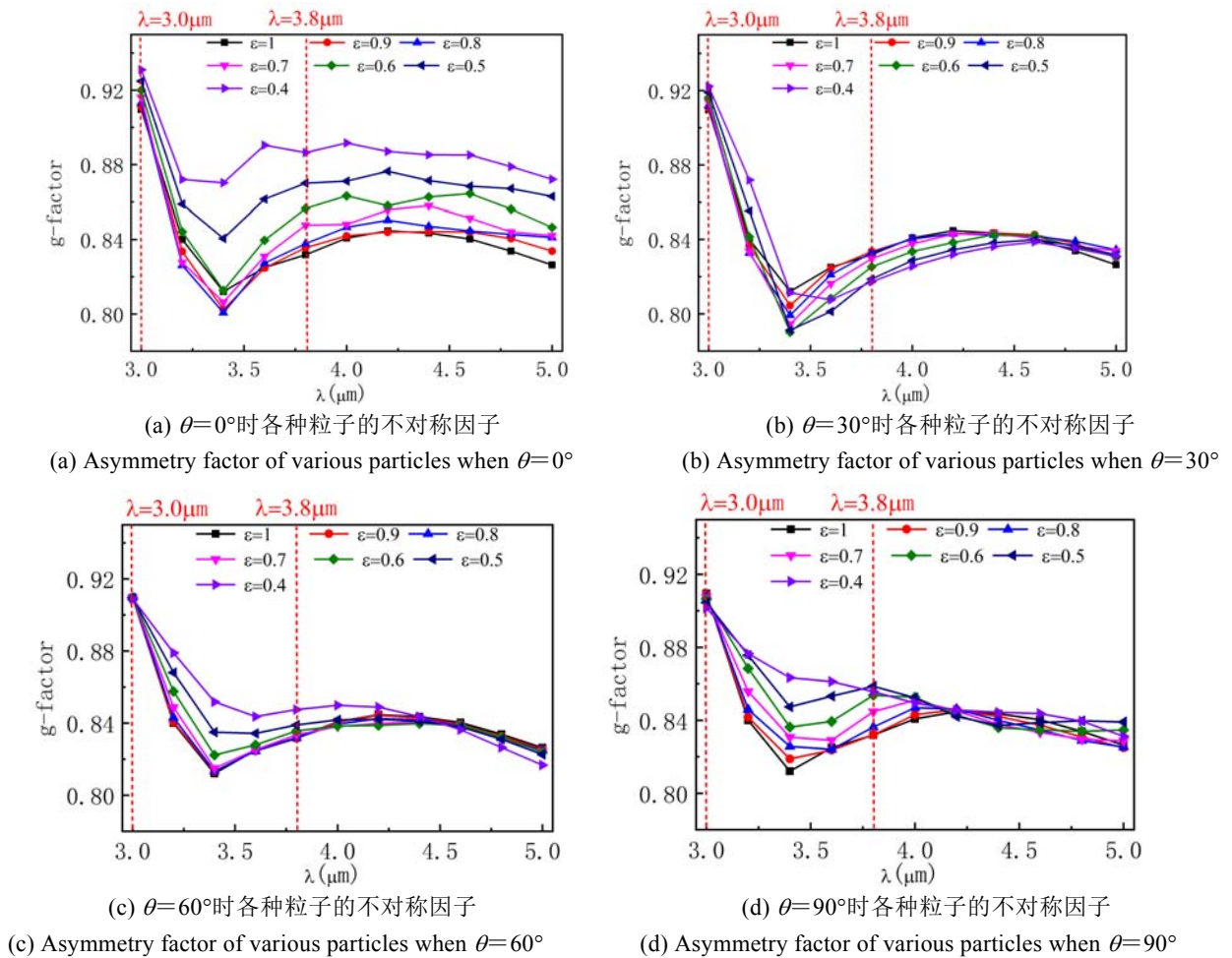


图4 等体积不同纵横比椭球水滴粒子的不对称因子

Fig.4 Asymmetry factor of water droplets with equal volume and different aspect ratios

图5计算了波长=3 μm且入射方向与y轴平行,水滴粒子的空间方位角 $\theta$ 分别为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $90^\circ$ 时,等体积不同纵横比椭球水滴粒子的散射相函数的角分布情况。由于椭球的旋转对称性,散射相函数随散射角也是旋转对称的,且从计算结果可知散射能量都集中在前向散射,大于 $90^\circ$ 时散射相函数值几乎等于零,因此图5展示了不同纵横比水滴粒子的散射相函数在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内的角分布情况。如图5(a)、(b)所示,当水滴粒子的方位角 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=30^\circ$

时,不同纵横比水滴粒子的散射相函数值随着纵横比 $\varepsilon$ 的减小而减小,即椭球水滴粒子的形状偏离球体的程度越大,其散射相函数越小。从图5(c)、(d)中可见,当水滴粒子的方位角 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 时,不同纵横比水滴粒子散射相函数的相对大小存在一个临界角度:在临界角度之前,水滴粒子的纵横比越小散射相函数越大,即水滴粒子的形状偏离球体的程度越大,其散射相函数值越大;在临界角度之后,水滴粒子的形状偏离球体的程度越大,其散射相函数越小。

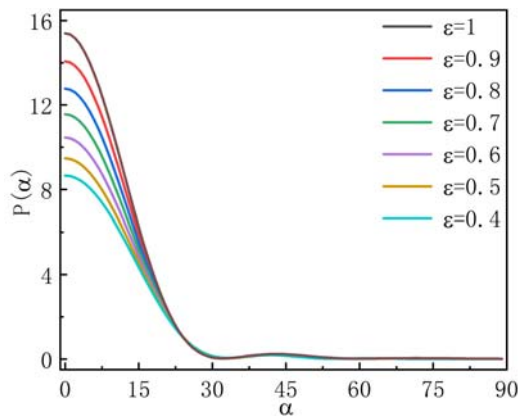
此外,我们还分别计算了波长 $\lambda=4\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 时等体积不同纵横比的椭球水滴粒子散射相函数的角分布情况,结果与波长 $\lambda=3\ \mu\text{m}$ 时类似。但是,随着入射波长的增大,临界角度逐渐趋近于 $0^\circ$ 。从以上相函数的角分布情况可知不同纵横比粒子的前向散射效应都是最明显的,且当 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=30^\circ$ 时水滴粒子的纵横比越大前向散射越显著;而当 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 时水滴粒子的纵横比越小前向散射越显著。

## 2.2 取向平均后等体积不同纵横比水滴粒子的光学特性

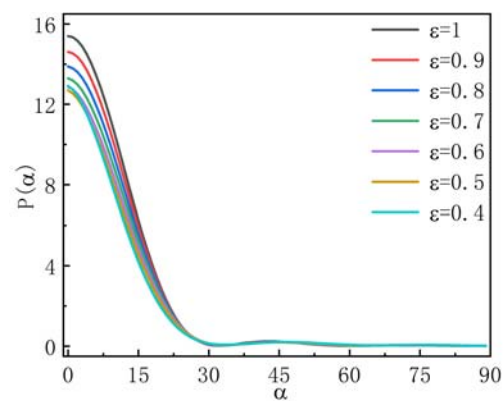
不规则粒子的光学特性与入射光的方向有很大的关系,但对于水滴粒子系而言,由于每个粒子在特定气象环境下可能没有任何优先取向,且电磁波在粒子系中的传播方向多种多样,所以有时候也需要单个椭球水滴粒子光学特性的取向均值。由于选择的是旋转对称的椭球,根据 1.2 小节分析,椭球

水滴粒子的光学特性实际上只与方位角 $\alpha([0^\circ,90^\circ])$ 有关,方位角 $\theta$ 的取值数量越多,自然更能表现粒子的随机取向,结果也更准确。为了平衡计算结果的准确性和计算时间成本,对 $\theta$ 取 10 个值,因此将对粒子的 10 个方位取向计算结果进行统计平均得到最终结果。

图 6 所示为等体积不同纵横比椭球水滴粒子的平均吸收截面和平均散射截面。从图中可以看出,不同纵横比水滴粒子方向平均后的光学特性与上一节中特定方位角 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 下的变化趋势基本一致。图 7 所示为不同纵横比椭球水滴粒子取向平均的散射相函数。从图 7(a)可以看出,入射光波长 $\lambda=3\ \mu\text{m}$ 时,不同纵横比椭球水滴粒子取向平均后的散射相函数与上一节中 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 时相函数的角分布变化趋势一致。此外,从图 7(b)、(c)可以看出,随着波长的增大,临界角度逐渐减小至 $0^\circ$ 。



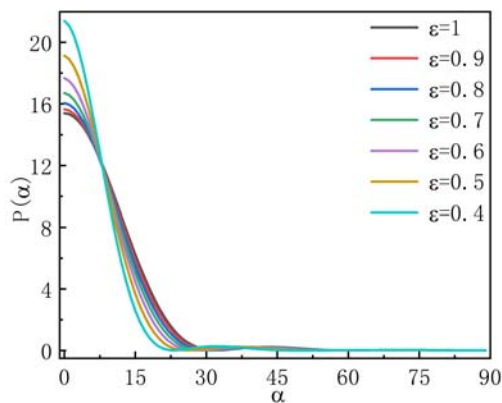
(a)  $\theta=0^\circ$ 时各种粒子的散射相函数



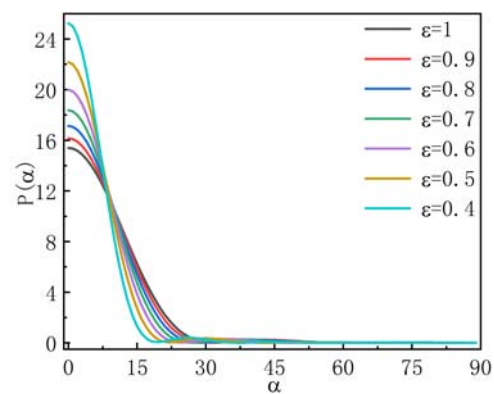
(b)  $\theta=30^\circ$ 时各种粒子的散射相函数

(a) Scattering phase function of various particles when  $\theta=0^\circ$

(b) Scattering phase function of various particles when  $\theta=30^\circ$



(c)  $\theta=60^\circ$ 时各种粒子的散射相函数

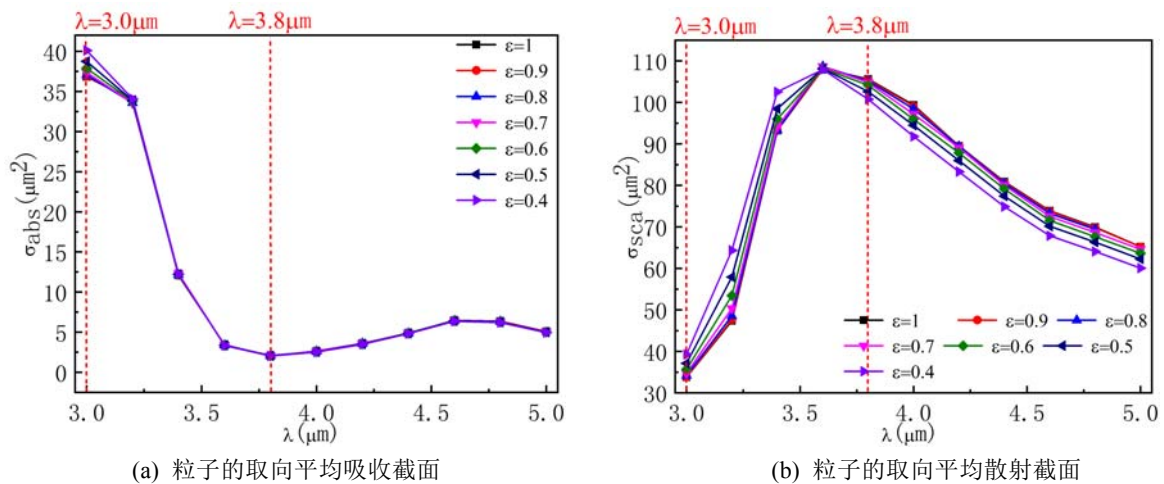


(d)  $\theta=90^\circ$ 时各种粒子的散射相函数

(c) Scattering phase function of various particles when  $\theta=60^\circ$  (d) Scattering phase function of various particles when  $\theta=90^\circ$

图 5  $\lambda=3.0\ \mu\text{m}$  时等体积不同纵横比椭球水滴粒子的散射相函数

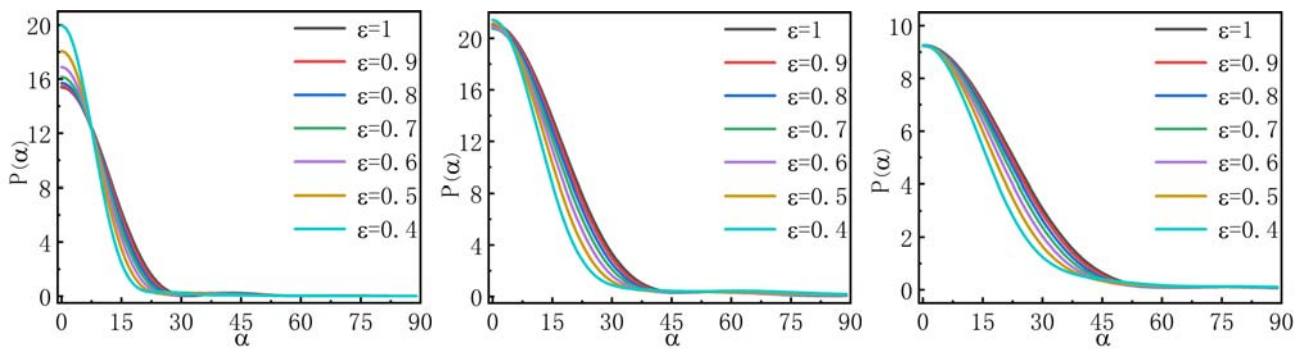
Fig.5 Scattering phase function of water droplets with equal volume and different aspect ratios when  $\lambda=3.0\ \mu\text{m}$



(a) 粒子的取向平均吸收截面 (b) 粒子的取向平均散射截面  
 (a) Oriented average absorption cross section of particles (b) Oriented average scattering cross section of particles

图6 等体积不同纵横比椭球水滴粒子取向平均后的光学特性计算结果

Fig.6 Calculation results of optical properties of water droplets with equal volume and different aspect ratios after averaging the orientation



(a)  $\lambda=3\mu\text{m}$  时粒子的平均散射相函数 (b)  $\lambda=4\mu\text{m}$  时粒子的平均散射相函数 (c)  $\lambda=5\mu\text{m}$  时粒子的平均散射相函数  
 (a) Average scattering phase function of particles when  $\lambda=3\mu\text{m}$  (b) Average scattering phase function of particles when  $\lambda=4\mu\text{m}$  (c) Average scattering phase function of particles when  $\lambda=5\mu\text{m}$

图7 等体积不同纵横比的椭球水滴粒子取向平均后的散射相函数

Fig.7 Scattering phase function of water droplets with equal volume and different aspect ratios after averaging the orientation

### 3 结语

本文利用离散偶极子近似法分别研究了不同方位角和方向取向平均下等体积不同纵横比水滴粒子在  $3\sim 5\mu\text{m}$  波段的光学特性，并与等体积球体水滴粒子光学特性进行了对比分析。结果表明水滴粒子在  $3\sim 5\mu\text{m}$  波段的吸收截面和散射截面的变化趋势虽然相同，但具体数值明显依赖于方位角  $\theta$  和其偏离球体粒子的程度。对于吸收截面，仅在方位角  $\theta$  较小时，水滴粒子的形状偏离球体越大，其吸收截面与球体的偏差越大，且吸收截面随着纵横比变化会存在一个临界波长，在临界波长前后吸收截面随着纵横比的变化趋势相反；方位角  $\theta$  较大时，水滴粒子的吸收截面可以近似等效于球体的吸收截面。对于散射截面和不对称因子，水滴粒子的形状偏离球体越大，其散射截面与球体的偏差越大；且任意方位角  $\theta$

下，散射截面随着纵横比变化均会存在一个临界波长，在该临界波长前后散射截面随着纵横比的变化趋势相反。对于散射相函数，水滴粒子在给定波长下的散射能量基本都集中前向散射；此外，散射相函数的角分布情况强烈依赖于水滴粒子的形状和入射光的相对方向。取向平均下，水滴粒子的吸收截面基本不依赖于它的形状，而散射截面则对其形状有较明显的依赖；另一方面，在波长较小时散射相函数的角分布对水滴粒子的形状也有较明显的依赖，而随着波长的增加，散射相函数的角分布基本不依赖于水滴粒子的形状。综上所述，在计算水滴粒子所组成的水雾的辐射传输特性时，由于散射特性对水滴粒子的形状有较强的依赖性，应考虑由于水雾所处重力场等环境的不同而导致的水滴粒子形状的变化。



参考文献:

- [1] 陈希庆, 张卫平, 解文彬. 人工喷雾红外遮障技术研究[J]. 红外技术, 2006, **28**(13): 606-608.  
CHEN Xiqing, ZHANG Weiping, XIE Wenbin. The research on the technique of artificial fog in camouflage infrared screen[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(10): 606-608.
- [2] 杨辉, 刘文清, 杨玉林. 便携式边界层气溶胶监测激光雷达[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(1): 64-68.  
YANG Hui, LIU Wenqing, YANG Yulin. Portable PBL aerosol monitoring lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 64-68.
- [3] 韩永, 饶瑞中, 王英俭. 基于散射法原理的能见度及气溶胶消光特性测量分析[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(4): 663-666.  
HAN Yong, RAO Ruizhong, WANG Yinjian. Measurement and analysis of atmospheric visibility and aerosol extinction characteristics based on scattering statistical[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 663-666.
- [4] 熊晓伟, 刘上乾. 红外气溶胶烟幕干扰效果的定量评估[J]. 系统工程与电子技术, 2001, **23**(2): 39-41.  
XIONG Xiaowei, LIU Shangqian. Effect evaluation on infrared aerosol screening smoke[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, **23**(2): 39-41.
- [5] 耿蕊, 陈芳芳, 吕勇. 激光大气传输透过率影响因素研究[J]. 激光杂志, 2016, **37**(12): 13-17.  
GENG Rui, CHEN Fangfang, LV Yong. Research on influencing factors of transmittance for laser transmission in atmosphere[J]. *Laser Journal*, 2016, **37**(12): 13-17.
- [6] 王玄玉, 殷耀敏, 赵远, 等. 人造水雾粒度测试及红外消光因子计算分析[J]. 中国粉体技术, 2011, **17**(3): 5-7.  
WANG Xuanyu, YIN Yaomin, ZHAO Yun, et al. Testing of granularity of artificial water fog particles and calculation for infrared extinction factors[J]. *China Powder Science and Technology*, 2011, **17**(3): 5-7.
- [7] 王希影, 齐宏, 王青青, 等. 基于MDA法计算水雾粒子红外隐身粒径[J]. 工程热物理学报, 2011, **32**(8): 1389-1392.  
WANG Xiyin, QI Hong, WANG Qinqin, et al. Numerical simulation of infrared stealth diameter of water fog particles based on the MDA method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, **32**(8): 1389-1392.
- [8] 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): 156-166.  
ZHANG Xuehai, WEI Heli, DAI Congming, et al. Influence of orientation ratio on scattering characteristics of ellipsoid aerosol particles[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(22): 156-166.
- [9] BI L, YANG P. High-frequency extinction efficiencies of spheroids: rigorous T-matrix solutions and semi-empirical approximations[J]. *Opt. Express*, 2014, **22**(9): 10270-10293.
- [10] 杜永成, 杨立, 张文勇. 动态细水雾的最佳热辐射消光粒径[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(9): 2413-2417.  
DU Yongcheng, YANG Li, ZHANG Wenyong. Optimal heat radiation extinction diameter of dynamical fine water sprays[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(9): 2413-2417.
- [11] Draine B T. The discrete -dipole approximation and its application to interstellar graphite grains[J]. *The Astrophysical Journal*, 1988, **333**: 848-872.
- [12] 黄朝军, 刘亚锋, 吴振森. 烟尘簇团粒子光学截面和散射矩阵的数值计算[J]. 物理学报, 2007, **56**(7): 4068-4074.  
HUANG Chaojun, LIU Yafeng, WU Zhensen. Numerical calculation of optical cross section and scattering matrix for soot aggregation particles [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7): 4068-4074.
- [13] Yurkin M A, Hoekstra A G. The discrete -dipole-approximation code ADDA: Capabilities and known limitations[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, **112**(13): 2234-2247.
- [14] Draine B T, Flatau P J. The discrete dipole approximation for periodic targets: I. theory and tests [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, **28**(11): 2693-703.
- [15] Draine B T, Flatau P J. Fast near field calculations in the discrete dipole approximation for regular rectilinear grids[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(2): 1247-1252.
- [16] Draine B T, Flatau P J. User guide for the discrete dipole approximation code DDSCAT 7.2 [J/OL] [2012-02-12]. <https://arxiv.org/abs/1202.3424>.
- [17] 黄朝军. 烟尘和雾霾气溶胶凝聚粒子光散射及传输特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.  
HUANG Chaojun. Study on Light Scattering and Transmission Characteristics of Soot and Haze Aerosols Aggregation Particles[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [18] Purcell E M, Pennypacker C R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains[J]. *Astrophysical Journal*, 1973, **186**: 705-714.
- [19] 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 Shengang. 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.
- [20] Hale G M, Querry M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu$ m wavelength region[J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(3): 555-563.