

# 沙尘气溶胶粒子模型的线退偏比特性

张小林

南京信息工程大学大气物理学院中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044

**摘要** 利用离散偶极子近似法研究了旋转椭球体沙尘气溶胶粒子模型在尺度参数变化范围为 0.1~23 时(波长 0.55  $\mu\text{m}$  对应有效半径为 0.01~2  $\mu\text{m}$ )的线退偏比特性。通过分析比较不同轴半径比时线退偏比特性的差别,研究了粒子非球形性程度对单分散和多分散沙尘气溶胶粒子退偏比特性的影响。对单分散系,旋转椭球体沙尘气溶胶的线退偏比在瑞利散射区和米散射区随散射角的变化有不同的分布特征;在瑞利散射区,散射角分别为 0° 和 180° 的前后向散射方向,线退偏比较小,其值在 1% 的量级,而在散射角为 90° 附近的侧向,线退偏比有最大值,可达 100%;在米散射区,线退偏比则无明显的极值分布,但有明显的后向增强;单分散沙尘粒子明显的非球形性特征,会增加在瑞利散射区的线退偏比,但却不会明显增加米散射区的线退偏比。而对多分散系,除了出现线退偏比最大值的侧向附近(80°~100°)之外,沙尘粒子非球形性特征越明显,其线退偏比越大。

**关键词** 散射;沙尘气溶胶;线退偏比;旋转椭球体

**中图分类号** O436.2 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0829001

## Linear Depolarization Ratios Characteristics of Dust Aerosol Particles Model

Zhang Xiaolin

Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

**Abstract** Linear depolarization ratios (LDR) characteristics of spheroid dust aerosol particles are studied based on discrete dipole approximation (DDA) for size parameters from 0.1 to 23 (corresponding to effective radius from 0.01  $\mu\text{m}$  to 2  $\mu\text{m}$  at wavelength of 0.55  $\mu\text{m}$ ). The effects of the particle asphericity degree on the LDRs characteristics for both monodisperse and polydisperse dust aerosols are performed by comparing LDRs characteristics at different spheroid aspect ratios. For monodisperse particles, the LDRs of spheroid dust aerosol have different behaviors as a function of scattering angle in the Rayleigh and Mie domains. In the Rayleigh domain, the LDRs are small with a value of 1%, in the forward- and backward-scattering directions with the scattering angles of 0° and 180°. While the LDRs show maxima of 100%, at side-scattering angles of 90°. In the Mie domain, the LDRs have no obvious extremum distribution, and reveal significantly enhanced backscattering values. The degree of asphericity of monodisperse dust particles generally increases their LDRs in the Rayleigh domain but not in the Mie domain. However, for polydisperse particles, the degree of dust asphericity increases with the LDRs except in the side-scattering regions (80°~100°) where the LDRs reach maxima.

**Key words** scattering; dust aerosol; linear depolarization ratio; spheroid

**OCIS codes** 290.1310; 290.4020; 290.5825; 290.5850

## 1 引 言

大气气溶胶粒子不仅对激光大气传输等光电工程应用有重要影响<sup>[1-2]</sup>,而且对气候环境和人类健康也有深远的影响<sup>[3-4]</sup>。空气污染物 PM2.5 主要是亚微米尺度的颗粒物<sup>[5]</sup>,这些亚微米尺度气溶胶粒子的尺度不太大,不易被雨雪冲刷所清除,同时又不太小,也不易被凝结碰并过程所清除,从而悬浮在大气中的生命周期相对较长,甚至能达几周<sup>[6-7]</sup>。因此,数值模拟通常模拟亚微米尺度气溶胶粒子的光学特性,包括粒子的线退

**收稿日期:** 2016-03-01; **收到修改稿日期:** 2016-03-31

**基金项目:** 国家自然科学基金(41505127, 21406189)、江苏省自然科学基金(BK20150901)、江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB170009)、南京信息工程大学人才启动经费项目(2015r002, 2014r011)

**作者简介:** 张小林(1982—),男,博士,教授,主要从事大气气溶胶特性方面的研究。E-mail: xlnzhang@nuist.edu.cn

偏比特性。

自然光被气溶胶粒子散射后,散射光可能是偏振光;而偏振光被粒子散射后,则散射光可能是退偏振的。均匀球形粒子的线退偏比为零,因此粒子的线退偏比数值可蕴含其非球形特性。偏振雷达就是利用这一特性来进行遥感探测的,例如,CALIPSO 卫星利用线偏振激光脉冲来探测地球大气系统<sup>[8]</sup>。了解地球大气系统中气溶胶粒子对光的偏振和退偏振特性,对这些光学遥感探测器的高精度定标至关重要。目前,气溶胶粒子线退偏比通常通过实验室的测量实验获得<sup>[9]</sup>,在激光雷达研究中也有对严格后向散射方向的线退偏比的个例分析<sup>[10]</sup>。但在全散射角方向上气溶胶线退偏比特性的研究则较少,仅有 Sun 等<sup>[11]</sup>研究了烟粒子的线偏振特性,Mishchenko 等<sup>[12]</sup>模拟分析了团簇煤灰和含煤灰气溶胶的线偏振特性,而且这些研究仅针对单分散粒子体系。研究更接近实际的多分散气溶胶粒子全散射角方向线退偏比特性,显得很有必要。

旋转椭球体是最简单和典型的非球形粒子形态,它已被用来遥感反演非球形沙尘气溶胶粒子的特性<sup>[13]</sup>。本文构建旋转椭球体沙尘气溶胶粒子模型,再利用离散偶极子近似法计算单分散和多分散尺度参数为 0.1~23(波长 0.55  $\mu\text{m}$  对应有效半径为 0.01~2  $\mu\text{m}$ )时的线退偏比特性。通过比较不同旋转椭球体轴半径比时沙尘气溶胶粒子线退偏比特性的差别,研究粒子非球形程度对沙尘气溶胶线退偏比特性的影响。

## 2 计算方法

旋转椭球体沙尘气溶胶粒子模型的 3 个轴半径分别为  $a$ 、 $b$  和  $b$ ,即围绕半径为  $a$  所在的轴旋转对称,如图 1 所示。当  $a/b$  大于 1 时,为长旋转椭球体;当  $a/b$  小于 1 时,为扁旋转椭球体;而当  $a/b$  等于 1 时,为球体。离散偶极子近似法的算法是较为精确数值计算粒子尺度参数  $x = 2\pi R/\lambda \leq 25$  时光散射特性的强有力工具<sup>[14-17]</sup>。所建模的单分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子在计算时由约 58000 个偶极子构成(不同  $a/b$  时偶极子数略有差别)。利用中国科学院合肥研究院超级并行计算机平台,取向随机的气溶胶光学特性的各参量,是由 2 个人射线偏振光偏振态和 500 个目标体取向所平均计算而成。考虑到目标体取向数对非球形粒子光学特性计算精度的影响,将取向数为 500 和取向数为 13500 所计算得到的气溶胶光学特性作了对比。以轴半径比为 16 的旋转椭球体为例,2 种取向数时,沙尘粒子的消光效率因子、散射效率因子、吸收效率因子和不对称因子的相对偏差皆在 1% 以内。由于轴半径比为 16 的旋转椭球体所对应的非球形程度是研究中最大的非球形程度,而且取向数为 13500 已经代表相当数量的取向数(基本可以认为随机取向),所以,所选择的 500 取向数基本可以代表旋转椭球体沙尘粒子随机取向,具有较高的计算精度。沙尘在波长 0.55  $\mu\text{m}$  处的复折射率为  $1.53 - 8 \times 10^{-3}i$ <sup>[18]</sup>。

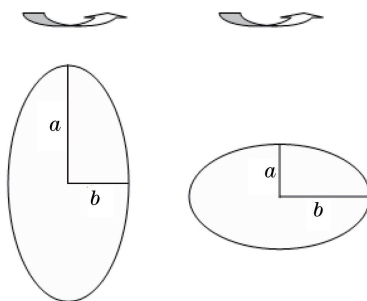


图 1 旋转椭球体粒子示意图

Fig. 1 Sketch map of spheroid particles

旋转椭球体沙尘气溶胶粒子模型归一化的散射矩阵<sup>[19]</sup>,一般表示为:

$$S(\theta) = \begin{bmatrix} a_1(\theta) & b_1(\theta) & 0 & 0 \\ b_1(\theta) & a_2(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3(\theta) & b_2(\theta) \\ 0 & 0 & -b_2(\theta) & a_4(\theta) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  为散射角。对于入射光为线偏振光,旋转椭球体沙尘气溶胶粒子模型的线退偏比<sup>[19]</sup>,通常表示为:

$$\Delta(\theta) = \frac{a_1(\theta) - a_2(\theta)}{a_1(\theta) + 2b_1(\theta) + a_2(\theta)}, \quad (2)$$

对于球形均匀粒子,由于  $a_1(\theta) \equiv a_2(\theta)$ , 线退偏比消失为 0。因此,线退偏比可能带有粒子的形状信息。

由于  $a/b$  偏离 1 越大,旋转椭球体的非球形性(形状偏离球形的程度)越强,当  $a/b$  分别为 16、8、4、2 时(长旋转椭球体情形)和 1/2、1/4、1/8 和 1/16 时(扁旋转椭球体情形),对旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比进行了数值计算和分析,并和球体进行对比,以研究非球形性对旋转椭球体沙尘气溶胶粒子线退偏比的影响。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 单分散粒子

气溶胶粒子的线退偏比,通常与粒子的尺度谱分布、形状、成份等有关。对于单分散的粒子而言,粒子的尺度大小对其线退偏比的影响主要可以分为瑞利散射区和米散射区 2 种情形来讨论。就瑞利散射区而言,以尺度参数为 0.57 为例,不同  $a/b$  比值时,随机取向旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比随散射角的分布情况,如图 2 所示。不同  $a/b$  比值时的单分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比随散射角的分布轮廓大部分相似;在前后向散射方向(散射角为  $0^\circ$  和  $180^\circ$ ),线退偏比较小,量级在 1%;而在散射角为  $90^\circ$  附近的侧向,线退偏比有最大的极值,量级在 100%,表明此时散射场的垂直和平行散射平面的分量几乎相等。线退偏比出现最大极值所对应的散射角,随  $a/b$  比值的不同而略有不同;在散射角  $90^\circ$  附近, $a/b$  比值偏离 1 越大,其值越小。此外, $a/b$  比值偏离 1 越大,线退偏比一般越大。也就是说,在瑞利散射区,非球形性(偏离球形的程度)越明显,随机取向单分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比越大。

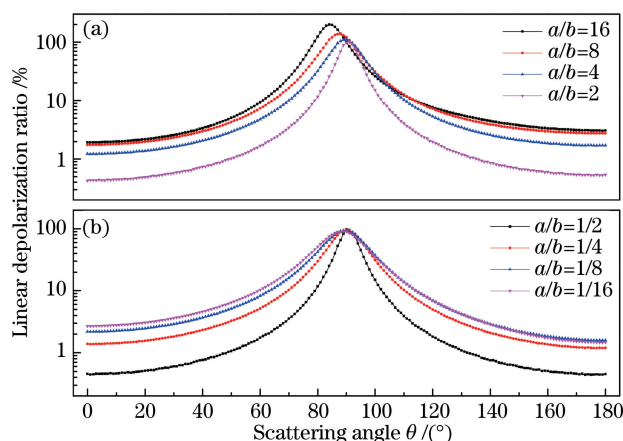


图 2 4 个轴半径比时 2 种单分散小沙尘旋转椭球体的线退偏比随散射角的变化。(a)  $a/b=16, 8, 4, 2$ ;  
(b)  $a/b=1/2, 1/4, 1/8, 1/16$

Fig. 2 Linear depolarization ratios for two monodisperse small dust spheroids at four different aspect ratios as a function of scattering angle. (a)  $a/b=16, 8, 4, 2$ ; (b)  $a/b=1/2, 1/4, 1/8, 1/16$

对于米散射区,以尺度参数为 11.4 为例,不同  $a/b$  比值时,随机取向旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比随散射角的分布情况,如图 3 所示。不同  $a/b$  比值时的旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比随散射角剧烈振荡,无明显的极值分布。在散射角为  $0^\circ$  附近的前向散射方向,旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比较小,量级在 0.1%。在散射角为  $180^\circ$  附近的后向散射方向,旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比相对较大,但长旋转椭球体和扁旋转椭球体的情形略有不同;对于长旋转椭球体( $a/b > 1$ ),其线退偏比量级超过 10%,同时, $a/b$  偏离 1 越大,线退偏比越大;对于扁旋转椭球体( $a/b < 1$ ), $a/b$  偏离 1 越大,其线退偏比越小。即,越明显的非球形特征,会导致随机取向单分散扁旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的后向线退偏比越小;而对于长旋转椭球体情形,影响却相反。

对比图 2 和图 3 可以看出,随机取向单分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比在不同散射角和不同尺度有不同的行为特征。在前向散射方向,较大粒子产生较小的线退偏比;在后向散射方向,较大粒子却

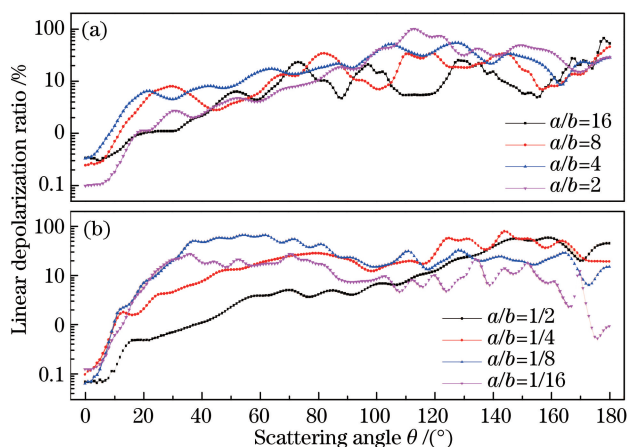


图 3 4 个轴半径比下 2 种单分散大沙尘旋转椭球体的线退偏比随散射角的变化。(a)  $a/b=16,8,4,2$ ;  
(b)  $a/b=1/2,1/4,1/8,1/16$

Fig. 3 Linear depolarization ratios for two monodisperse large dust spheroids at four different aspect ratios as a function of scattering angle. (a)  $a/b=16,8,4,2$ ; (b)  $a/b=1/2,1/4,1/8,1/16$

导致较大的线退偏比;米散射区的粒子后向线退偏比增强明显;在散射角为  $90^\circ$  附近的侧向,位于瑞利散射区较小粒子的线退偏比有极大值,而位于米散射区的较大粒子则没有。总体而言,对于随机取向单分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子,在瑞利散射区,其非球形性会增加线退偏比,但在米散射区,却不会明显增加线退偏比。

由于大多数气溶胶粒子尺度位于米散射区,而随机取向单分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比在米散射区似乎与粒子轴半径比没有关系,但在瑞利散射区却有明确的关系,因此计算了旋转椭球体沙尘粒子在散射角为  $90^\circ$  侧向和  $180^\circ$  后向的线退偏比随尺度参数的变化,其轴半径比  $a/b$  为 2 时的结果如图 4 所示。可以看出,旋转椭球体沙尘粒子的线退偏比对粒子的尺度参数有较强的依赖性。在散射角为  $90^\circ$  的侧向,旋转椭球体沙尘粒子的线退偏比,在瑞利散射区有最大值,其值大约为  $100\%$ ;而在米散射区其值在  $20\%$  上下,且随尺度参数剧烈振荡变化。在散射角为  $180^\circ$  的后向,旋转椭球体沙尘粒子的线退偏比,在瑞利散射区随尺度参数的增大而基本单调增大,而在米散射区随尺度参数振荡变化。对于轴半径比为 2 的旋转椭球体沙尘粒子而言,当尺度参数小于 1 时,其线退偏比在散射角为  $90^\circ$  侧向比  $180^\circ$  后向要大,而当尺度参数大于 3 时,其线退偏比在散射角为  $90^\circ$  侧向基本比  $180^\circ$  后向要小。

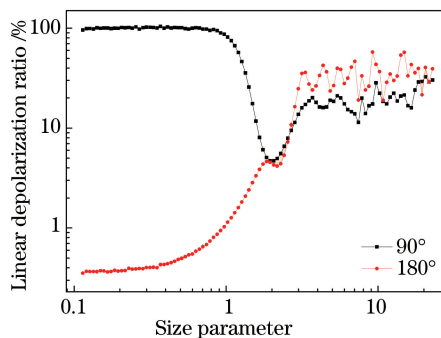


图 4 旋转椭球体沙尘粒子在散射角为  $90^\circ$  和  $180^\circ$  的线退偏比随尺度参数的变化

Fig. 4 Linear depolarization ratios for spheroids dust particles at scattering angle with  $90^\circ$  and  $180^\circ$  as a function of size parameter

### 3.2 多分散粒子系统

对于大气中的光散射问题,在实际应用中遇到的一般是大小和光学性质都不完全相同的粒子群体,这种群体一般称为多分散系。实际能够观测的各种光散射参量是粒子群体中所有粒子散射特性叠加的共同效果。多分散系内所有尺度的粒子的散射、吸收和消光截面之和就是总的散射、吸收和消光截面。单位体积内所有粒子的总散射、吸收和消光截面就是散射、吸收和消光系数。多分散系内所有粒子的散射光强之和就是

总的散射光强,而根据总光强和总散射截面即可求出多分散系散射相函数。以 1 种常见的对数正态分布为例,可以表示为:

$$n(\lg D) = \frac{dN}{d(\lg D)} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \exp\left[-\frac{(\lg D - \lg D_{\text{mod}})^2}{2(\lg \sigma)^2}\right], \quad (3)$$

式中,  $D$  为粒子的体积有效直径,而参数  $N_0$  表示模式粒子数浓度,为归一化常数。参数  $D_{\text{mod}}$  和  $\sigma$  是影响对数正态分布轮廓的 2 个参数,  $D_{\text{mod}}$  表示模式几何平均直径,而  $D_{\text{mod}}$  表示几何标准偏差。取常见的 2 个典型数值,  $D_{\text{mod}}$  取  $1 \mu\text{m}$ , 而  $\sigma$  取 2。

对不同  $a/b$  比值时,尺度参数为  $0.1 \sim 23$  的各散射相矩阵元进行积分,并对多分散体系随机取向旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比进行分别计算,其对数正态的结果如图 5 所示。可以看出,不同  $a/b$  比值时的多分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的线退偏比随散射角的分布轮廓相似;在前后向散射方向,线退偏比相对较小;而在散射角为  $90^\circ$  附近的侧向,线退偏比相对较大,并有极值。对于多分散扁旋转椭球体沙尘气溶胶,其线退偏比最大极值出现在  $90^\circ$  散射角;而对于长旋转椭球体,其线退偏比最大极值出现在  $90^\circ$  散射角附近,随  $a/b$  比值的增加向较小散射角方向略有偏移。在侧向  $90^\circ$  散射角附近,多分散体系旋转椭球体沙尘气溶胶的线退偏比由于达到最大值,不同  $a/b$  比值时,其值相当;除了  $90^\circ$  附近之外的所有散射角上,  $a/b$  比值偏离 1 越大,线退偏比越大。总体而言,对于随机取向多分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子体系,除了侧向  $90^\circ$  散射角附近 ( $80^\circ \sim 100^\circ$ ) 之外,非球形性越明显,其线退偏比越大。

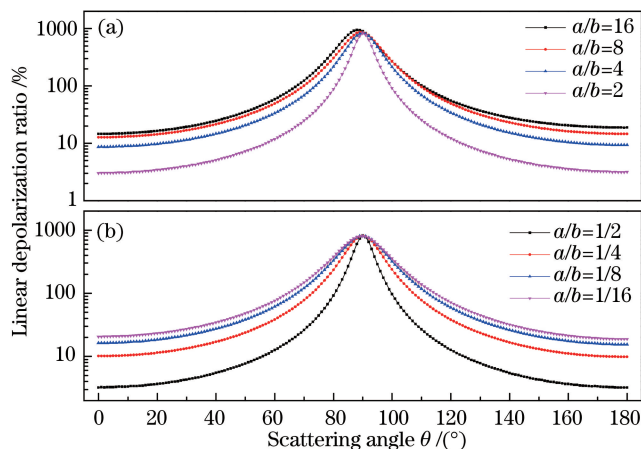


图 5 4 个轴半径比时 2 种多分散沙尘旋转椭球体的线退偏比随散射角的变化。

(a)  $a/b = 16, 8, 4, 2$ ; (b)  $a/b = 1/2, 1/4, 1/8, 1/16$

Fig. 5 Linear depolarization ratios for two polydisperse dust spheroids at four different aspect ratios as a function of scattering angle. (a)  $a/b = 16, 8, 4, 2$ ; (b)  $a/b = 1/2, 1/4, 1/8, 1/16$

## 4 结 论

利用离散偶极子近似法研究了随机取向旋转椭球体沙尘气溶胶粒子在尺度参数为  $0.1 \sim 23$  时(波长  $0.55 \mu\text{m}$  对应有有效半径为  $0.01 \sim 2 \mu\text{m}$ )的线退偏比特性。对单分散系,旋转椭球体沙尘气溶胶的线退偏比,在瑞利散射区和米散射区随散射角有不同的分布特征;在瑞利散射区的前后向散射方向(散射角为  $0^\circ$  和  $180^\circ$ ),线退偏比较小,量级在  $1\%$ ,而在散射角为  $90^\circ$  附近的侧向,线退偏比有最大的极值,量级可达  $100\%$ ;在米散射区,线退偏比则无明显的极值分布,但有明显的后向线退偏比增强;沙尘粒子越明显的非球形性,会增加在瑞利散射区的线退偏比,但却不会明显增加米散射区的线退偏比。而对多分散系,除了出现线退偏比最大值的侧向  $90^\circ$  散射角附近 ( $80^\circ \sim 100^\circ$ ) 之外,沙尘粒子非球形性越明显,其线退偏比越大。研究一种沙尘气溶胶粒子典型模型在全散射角方向上的线退偏比特性,对光学遥感探测器高精度定标等光电工程应用<sup>[20-22]</sup>具有一定的意义。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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, 王英俭. 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.
- 3 Haywood J M, Shine K P. Multi-spectral calculations of the direct radiative forcing of tropospheric sulphate and soot aerosols using a column model[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, 123 (543): 1907-1930.
- 4 Kaufman Y J, Koren I, Remer L A, *et al.* The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2005, 102 (32): 11207-11212.
- 5 Tuch T, Brand P, Wichmann H E, *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.
- 6 Krieger U K, Braun C. Light-scattering intensity fluctuations in single aerosol particles during deliquescence[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2001, 70(4-6): 545-554.
- 7 Brewer R, Belzer W. Assessment of metal concentrations in atmospheric particles from Burnaby Lake, British Columbia, Canada[J]. *Atmos Environ*. 2001, 35(30): 5223-5233.
- 8 Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(19): L19803.
- 9 Stasio di S. Experiments on depolarized optical scattering to sense in situ the onset of early agglomeration between nano-size soot particles[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2002, 73(2-5): 423-432.
- 10 Winker D M, Pelon J, Coakley Jr J A, *et al.* The CALIPSO mission: a global 3D view of aerosols and clouds[J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 2010, 91(9): 1211-1229.
- 11 Sun W, Liu Z, Videen G, *et al.* For the depolarization of linearly polarized light by smoke particles[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2013, 122: 233-237.
- 12 Mishchenko M I, Liu L, Mackowski D W. T-matrix modeling of linear depolarization by morphologically complex soot and soot-containing aerosols[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2013, 123: 135-144.
- 13 Dubovik O, Sinyuk A, Lapyonok T, *et al.* Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111(D11): D11208.
- 14 Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for scattering calculations[J]. *J Opt Soc Am*, 1994, 11(4): 1491-1499.
- 15 Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for periodic targets: theory and tests[J]. *J Opt Soc Am*, 2008, 25 (11): 2693-2703.
- 16 Flatau P J, Draine B T. Fast near-field calculations in the discrete dipole approximation for regular rectilinear grids[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1247-1252.
- 17 Draine B T, Flatau P J. User guide for the discrete dipole approximation code DDSCAT 7.2[EB/OL]. [2012-05-15]. <http://arXiv.org/abs/1202.3424>.
- 18 Fenn R W, Clough S A, Gallery W O, *et al.* Optical and infrared properties of the atmosphere[M]//Jusr A S. *Handbook of geophysics and the space environment*. Springfield: Air Force Geophysics Laboratory, 1985.
- 19 Mishchenko M I, Hovenier J W, Travis L D. Book review: light scattering by nonspherical particles: theory measurements, and applications[M]. London: Academic Press, 2000.
- 20 Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, *et al.* Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0401001.  
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0401001.
- 21 Wang Zhifei, Liu Dong, Cheng Zhongtao, *et al.* Pattern recognition model for haze identification with atmospheric backscattering lidars[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1113001.  
王治飞, 刘东, 成中涛, 等. 基于模式识别的激光雷达遥感灰霾组分识别模型[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1113001.
- 22 Liu Cong, Su Lin, Zhang Chaoyang, *et al.* Comparative analysis of vertical distribution of aerosols by using spaceborne lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0413001.  
刘聪, 苏林, 张朝阳, 等. 星载激光雷达对气溶胶垂直分布的对比分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0413001.