



# 随机取向沙尘气溶胶激光雷达线退偏比特性研究

## 摘要

利用离散偶极子近似法,数值计算分析了随机取向旋转椭球体沙尘气溶胶粒子在尺度参数为 0.1~23 时(波长 0.55  $\mu\text{m}$  对应有效半径为 0.01~2  $\mu\text{m}$ )的激光雷达线退偏比特性,通过比较其不同旋转椭球体轴半径比下的差别,研究了粒子非球形程度对单分散和分散沙尘气溶胶激光雷达线退偏比特性的影响.单分散旋转椭球体沙尘气溶胶的激光雷达线退偏比对粒子的轴半径比和尺度参数有很强的依赖性;对于长旋转椭球体,沙尘激光雷达线退偏比较小值出现在瑞利散射区,而较大的值出现在米散射区;对于扁旋转椭球体,在米散射区较大沙尘粒子也可以产生较小的激光雷达线退偏比,例如,轴半径比为 1/16,尺度参数为 3 时的沙尘激光雷达线退偏比仅为 0.1%.就随机取向旋转椭球体沙尘粒子而言,对于单分散系,仅当尺度参数小于 0.5 时,非球形特征越明显,其激光雷达线退偏比越大;而对多分散系,非球形特征越明显,其激光雷达线退偏比越大.

## 关键词

光散射;激光雷达线退偏比;沙尘气溶胶;旋转椭球体

中图分类号 P427

文献标志码 A

收稿日期 2017-06-05

资助项目 南京信息工程大学大学生创新训练计划;南京信息工程大学本科生优秀毕业论文(设计)支持计划

## 作者简介

毛毛,女,博士,主要研究方向为大气物理与大气环境. mmao@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京,210044

2 南京信息工程大学 大气物理学院,南京,210044

## 0 引言

大气中的气溶胶颗粒对气候、环境及人体健康等有着深远影响<sup>[1-4]</sup>.沙尘气溶胶是一种重要的自然和人为源气溶胶,是地球上最丰富的气溶胶成分,特别是在干旱和半干旱地区<sup>[5-6]</sup>.沙尘粒子的形状可能有多种多样,而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的特性<sup>[7]</sup>.偏振激光雷达是遥感探测沙尘气溶胶特性的强有力手段,而激光雷达线退偏比则是描述沙尘气溶胶粒子微物理特性的重要参数<sup>[8]</sup>.

数值模拟是研究气溶胶粒子特性的重要手段之一,针对激光雷达线退偏比的数值研究已经开展了不少工作.Mishchenko 等<sup>[9]</sup>模拟计算了飞机尾迹中不同形状的冰晶粒子的激光雷达线退偏比特性.Sun 等<sup>[10]</sup>研究了烟粒子的线退偏比特性,表明小的随机取向非球形粒子随尺度参数变化有一些共同偏振特性.Mishchenko 等<sup>[11]</sup>模拟分析了团簇含碳气溶胶的线退偏比特性,结果显示非零的线退偏比来自粒子小单体之间的电磁相互作用,而黑碳的强吸收特性会抑制这些相互作用.了解气溶胶对光的偏振和退偏振特性,对地球大气系统中光学遥感探测器的高精度定标至关重要.虽然气溶胶线退偏比特性在全散射角上的特性研究已经开展了不少工作,但是与尺度分布有关沙尘气溶胶粒子激光雷达线退偏比特性的研究仍显不足.

本文构建了旋转椭球体沙尘气溶胶粒子模型,利用离散偶极子近似(DDA)法,数值模拟计算其单分散和多分散尺度参数为 0.1~23 时(波长 0.55  $\mu\text{m}$  对应有效半径为 0.01~2  $\mu\text{m}$ )的激光雷达线退偏比特性.通过比较不同旋转椭球体轴半径比沙尘气溶胶粒子激光雷达线退偏比特性的差别,研究了粒子非球形程度对旋转椭球体沙尘气溶胶激光雷达线退偏比特性的影响.

## 1 计算方法

本文使用目前比较流行的离散偶极子近似法,此数值方法是将实际的气溶胶粒子近似为一系列可极化偶极子点阵,再计算入射光与这些点阵的相互作用,从而获得粒子的光散射特性<sup>[12-15]</sup>.旋转椭球体沙尘气溶胶粒子模型的 3 个轴半径分别表示为  $a$ 、 $b$  和  $b$ .当  $a/b > 1$  时,为长旋转椭球体; $a/b = 1$  时,为球体;当  $a/b < 1$  时,为扁旋转椭球体.考虑到足够多的偶极子能更好地近似气溶胶粒子形状,但较大的

偶极子数量同时会给数值计算带来更多挑战,本文旋转椭球体沙尘气溶胶粒子模型由约 58 000 个偶极子构成(不同  $a/b$  时偶极子数略有细微差别).随机取向的沙尘气溶胶光学特性的各参量,是由 500 个目标体取向和 2 个入射线偏振光偏振态平均计算而成.沙尘在波长  $0.55 \mu\text{m}$  处的复折射率为  $1.513 \times 10^{-4} - 2.61 \times 10^{-4}i$ <sup>[16]</sup>.

旋转椭球体沙尘气溶胶粒子模型的归一化的散射矩阵<sup>[17]</sup>,一般如式(1)所示,其中  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  为散射角.

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

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  $\Delta(\theta)$ <sup>[17]</sup>,通常如式(2)所示.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.

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

在后向  $180^\circ$  散射角方向,  $b_1(180^\circ) = 0$ ,此时的线退偏比  $\Delta(180^\circ)$  即为激光雷达线退偏比  $\delta_L$ <sup>[17]</sup>,如式(3)所示:

$$\delta_L = \Delta(180^\circ) = \frac{a_1(180^\circ) - a_2(180^\circ)}{a_1(180^\circ) + a_2(180^\circ)}. \quad (3)$$

当  $a/b$  分别为 16, 8, 4, 2(长旋转椭球体)和  $1/2, 1/4, 1/8, 1/16$ (扁旋转椭球体)时,分别对旋转

椭球体沙尘气溶胶粒子的激光雷达线退偏比进行数值计算,并和均匀球体进行对比,分析和研究非球形程度对沙尘气溶胶粒子激光雷达线退偏比的影响.

## 2 结果与讨论

### 2.1 单分散粒子

考虑到旋转椭球体粒子的光学特性,已经可以由 T-matrix 方法精确计算得到.因此首先对随机取向单分散沙尘气溶胶粒子的光学特性(消光效率因子、散射效率因子、吸收效率因子和不对称因子),分别使用 T-matrix 和 DDA 法进行粒子模拟和计算,其结果如图 1 所示(以轴半径比  $a/b$  为 2 的情形为例).可以看出,两种算法在瑞利散射区的计算结果的差别很小,但在米散射区会有一些差别,最大甚至可达 30%.这主要是由于 T-matrix 法是针对旋转椭球体沙尘粒子的严格数值解,而 DDA 法是用偶极子的堆积来近似粒子形状,即使偶极子的数量足够多,也和旋转椭球体有细微差别,正是这些细微的粒子形状差别引起了其光学特性的差别.而实际沙尘粒子不可能是严格的规则粒子,因此 DDA 法所代表的粒子形状可能更能代表实际大气情形.

图 2 是不同轴半径比  $a/b$  下,随机取向单分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的激光雷达线退偏比随尺度参数的变化情况.可以看出,单分散旋转椭球体沙尘气溶胶的激光雷达线退偏比对粒子的轴半径比和尺度参数有很强的依赖性:在瑞利散射区内,激光雷达线退偏比随尺度参数单调变化,而在米散射区内,激光雷达线退偏比随尺度参数剧烈振荡变化.

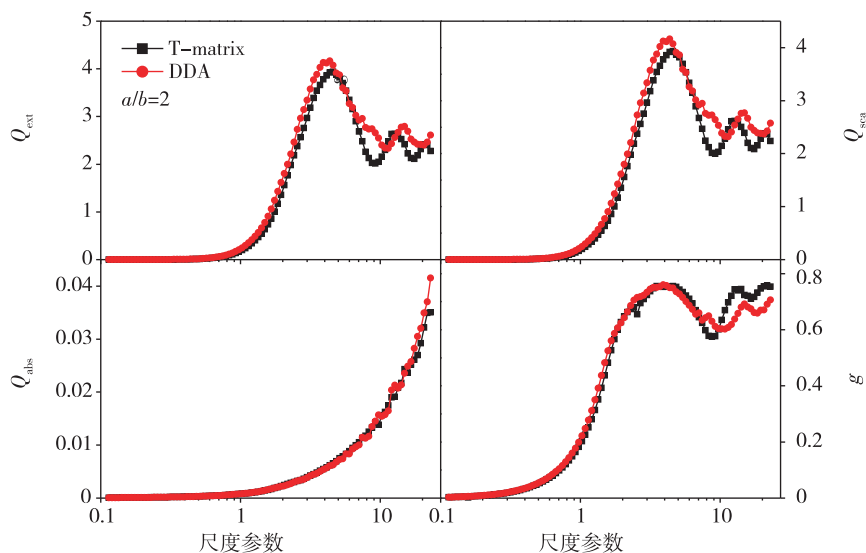


图 1 T-matrix 和 DDA 分别计算的单分散沙尘旋转椭球体光学特性随尺度参数的变化

Fig. 1 Optical properties of monodisperse dust spheroids calculated by T-matrix and DDA as a function of size parameter

对于长旋转椭球体(图 2a),在瑞利散射区的较小粒子产生较小的激光雷达线退偏比,其值量级在 1%;较大的激光雷达线退偏比出现在米散射区;当尺度参数小于 0.9 时, $a/b$  值偏离 1 越大(长旋转椭球体越长),单分散沙尘粒子激光雷达线退偏比越大.对于扁旋转椭球体(图 2b),在米散射区较大粒子也可以产生较小的激光雷达线退偏比,例如, $a/b$  为 1/16 的扁沙尘粒子在尺度参数为 3 时产生的激光雷达线退偏比仅为 0.1%;当尺度参数小于 0.5 时, $a/b$  值偏离 1 越大(扁旋转椭球体越扁),单分散沙尘粒子激光雷达线退偏比越大.

总体而言,在所选的尺度范围内,仅当尺度参数小于 0.5 时,随机取向单分散旋转椭球体沙尘粒子的非球形特征越明显,产生的激光雷达线退偏比越大.

## 2.2 多分散粒子系统

对于实际大气问题,往往是大小和光学性质都不完全相同的多分散气溶胶粒子系.以一种常见的对数正态分布为例,如式(4)所示:

$$n(\lg D) = \frac{dN}{d\lg D} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \exp \left[ -\frac{(\lg D - \lg D_{\text{mod}})^2}{2(\lg \sigma)^2} \right], \quad (4)$$

其中, $D$  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.对数正态分布曲线主

要受其参数  $D_{\text{mod}}$  和  $\sigma$  影响, $D_{\text{mod}}$  表示模式几何平均直径,而  $\sigma$  表示几何标准偏差.取常见的典型数值<sup>[18]</sup>, $D_{\text{mod}}$  分别取 1、0.5 和 0.1 ( $\mu\text{m}$ ), $\sigma$  分别取 2 和 1.1,对尺度参数为 0.1~23 的各散射相矩阵元进行积分,并对激光雷达线退偏比进行计算分析.

图 3 为不同轴半径比  $a/b$  随机取向多分散旋转椭球体沙尘气溶胶粒子激光雷达线退偏比的结果.可以看出,不同参数对数正态分布对旋转椭球体沙尘气溶胶粒子激光雷达线退偏比结果影响较大,其值最大可达 20%,最小仅有 0.01%;不同谱分布仅影响了沙尘气溶胶激光雷达线退偏比的积分数值大小,并没有影响其随轴半径比  $a/b$  的变化趋势;轴半径比  $a/b$  数值偏离 1 越大(长旋转椭球体越长,扁旋转椭球体越扁),多分散沙尘粒子激光雷达线退偏比越大.总之,在所选的尺度和谱分布范围内,随机取向多分散旋转椭球体沙尘粒子的非球形特征越明显,产生的激光雷达线退偏比越大.

## 3 结论

本文利用 DDA 法对旋转椭球体沙尘气溶胶粒子在尺度参数为 0.1~23 时(波长 0.55  $\mu\text{m}$  对应有效半径为 0.01~2  $\mu\text{m}$ )的激光雷达线退偏比特性进行了数值计算研究.结果表明,对单分散系,旋转椭球体沙尘气溶胶的激光雷达线退偏比对粒子的轴半

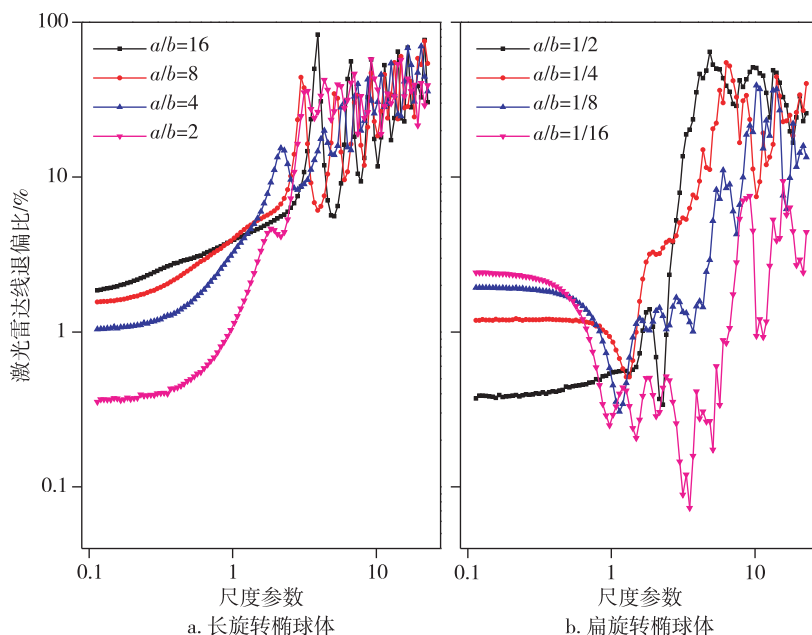


图 2 4 个轴半径比下,2 种单分散沙尘旋转椭球体的激光雷达线退偏比随尺度参数的变化

Fig. 2 Lidar linear depolarization ratios for two monodisperse small dust spheroids at four different aspect ratios as a function of size parameter

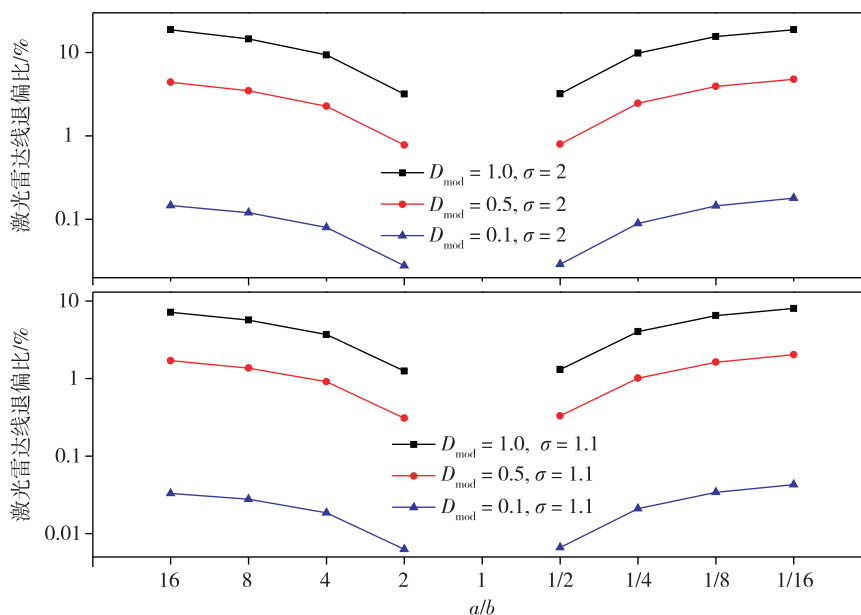


图3 不同轴半径比下,多分散沙尘旋转椭球体的激光雷达线退偏比

Fig. 3 Lidar linear depolarization ratios for lognormal polydisperse dust spheroids at different aspect ratios

径比和尺度参数有很强的依赖性.对于长旋转椭球体,较小的激光雷达线退偏比出现在瑞利散射区,较大的激光雷达线退偏比出现在米散射区;对于扁旋转椭球体,在米散射区较大粒子也可以产生较小的激光雷达线退偏比,例如, $a/b$  为  $1/16$ ,尺度参数为 3 时的激光雷达线退偏比仅为  $0.1\%$ ,仅当尺度参数小于  $0.5$  时,随机取向单分散旋转椭球体沙尘粒子的非球形特征越明显,产生的激光雷达线退偏比越大.而对多分散系,随机取向多分散旋转椭球体沙尘粒子的非球形特征越明显,产生的激光雷达线退偏比越大.

本文在数值计算旋转椭球体沙尘气溶胶粒子的激光雷达线退偏比时,仅选择了具有代表性的尺度参数和尺度谱分布,针对更宽范围的尺度参数以及其他气溶胶粒子尺度谱分布情况下激光雷达线退偏比特性有待进一步的分析研究.

### 参考文献

#### References

[ 1 ] 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]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102 (32): 11207-11212

[ 2 ] 王兴, 马嫣, 郑军, 等. 大气中痕量有机胺测量方法的研究进展[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2015, 7(1): 31-39

WANG Xing, MA Yan, ZHENG Jun, et al. Advances in

the measurement techniques of atmospheric amines[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2015, 7(1): 31-39

[ 3 ] 张小林, 黄印博, 饶瑞中. 有效介质理论对致密内混合粒子光散射适用性[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1477-1483

ZHANG Xiaolin, HUANG Yinbo, RAO Ruizhong. Validity of effective medium theory in light scattering of compact internal-mixed particles[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1477-1483

[ 4 ] Pope C A, Burnett R T, Thun M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. J Am Med Assoc, 2002, 287(9): 1132-1141

[ 5 ] Textor C, Schulz M, Guibert S, et al. Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2006, 5(5): 8331-8420

[ 6 ] Zender C S, Miller R L, Tegen I. Quantifying mineral dust mass budgets: terminology, constraints, and current estimates [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2004, 85(48): 509-512

[ 7 ] 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]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111, DOI: 10.1029/2005JD006619

[ 8 ] Winker D M, Pelon J, Coakley J A Jr, et al. The CALIPSO Mission: a global 3D view of aerosols and clouds[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(9): 1211-1229

[ 9 ] Mishchenko M I, Sassen K. Depolarization of lidar returns by small ice crystals: an application to contrails[J]. Geo-

- physical Research Letters, 1998, 25(3):309-312
- [10] Sun W B, Liu Z Y, Videen G, et al. For the depolarization of linearly polarized light by smoke particles [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2013, 122(2):233-237
- [11] Mishchenko M I, Liu L, Mackowski D W. T-matrix modeling of linear depolarization by morphologically complex soot and soot-containing aerosols [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2013, 123(4):135-144
- [12] Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for scattering calculations [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(4):1491-1499
- [13] Draine B T, Flatau P J. Discrete dipole approximation for periodic targets: I. theory and tests [J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science & Vision, 2008, 25(11):2693-2703
- [14] 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
- [15] Draine B T, Flatau P J. User guide for the discrete dipole approximation code DDSCAT 7.2 [J]. arXiv e-print, arXiv:0809.0337
- [16] Fenn R W, Clough S A, Gallery W O, et al. Optical and infrared properties of the atmosphere [M] // Jursa A S. Handbook of geophysics and the space environment. Air Force Geophysics Laboratory, United States Air Force, 1985
- [17] Mishchenko M I, Hovenier J W, Travis L D. Light scattering by nonspherical particles: theory measurements, and applications [M]. New York: Academic Press, 2000
- [18] Veihelmann B, Nousiainen T, Kahnert M, et al. Light scattering by small feldspar particles simulated using the Gaussian random sphere geometry [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2006, 100(1):393-405

## Investigation on orientation-averaged lidar linear depolarization ratios of dust aerosols

MAO Mao<sup>1,2</sup> SUN Haofei<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Orientation-averaged lidar linear depolarization ratios (LLDR) of spheroid dust aerosols are carried out based on discrete dipole approximation (DDA) for size parameters from 0.1 to 23 (corresponding to effective radius from 0.01 to 2  $\mu\text{m}$  at wavelength of 550 nm). The effects of the asphericity degree on the LLDRs for both monodisperse and polydisperse dust aerosols are performed by comparing LLDRs at different spheroid aspect ratios. For monodisperse spheroid, the dust LLDRs show strong dependences on aspect ratio and size parameter. For prolate spheroid dust particles, small LLDR values are found in the Rayleigh domain as opposed to large values in the Mie domain. Nevertheless, for oblate spheroid, large LLDR dust particles in the Mie domain can produce small LLDR values. For example, the dust LLDR has a value of about 0.1% at spheroid aspect ratio of 1/16 when the size parameter reaches 3. For monodisperse dust particles, the aspherical degree increases their LLDRs only at size parameters smaller than 0.5. However, for polydisperse aerosols, the degree of dust asphericity enhances their LLDRs.

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