

激光与光电子学进展

用于云粒子探测器的非球形粒子的
光散射特性模拟储晨曦¹, 周红根¹, 刘娟², 卜令兵^{2*}, 朱毅¹, 杨巨鑫³¹江苏省气象探测中心, 江苏 南京 210009;²南京信息工程大学气象灾害预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;³中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

摘要 为深入了解云粒子尺度谱和形状分布, 研究云的微物理特性, 研制了一种偏振云粒子探测器。该探测器可以同时接收粒子的前向和后向散射能量。通过前向的质量控制通道对探测区域进行控制, 根据后向散射的水平和垂直通道获得粒子的退偏比。使用几何光学近似方法, 对几种椭球和六棱柱粒子在探测器中的散射特性进行了模拟。模拟结果表明: 粒子前向散射截面与其等效半径正相关; 扁状粒子与长形粒子相比, 前向散射能力更强, 后向散射退偏比更小; 椭球粒子退偏比一般要小于六棱柱粒子。所模拟的粒子散射数据验证了所研制探测器用于云粒子探测的可行性, 并为其实现非球形粒子的尺度谱和形状探测提供了反演依据。

关键词 散射; 云粒子探测器; 光散射; 几何光学近似; 退偏比

中图分类号 P414

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0529003

Light Scattering Characteristic Simulation of Nonspherical Particles for
Cloud Particle ProbeChu Chenxi¹, Zhou Honggen¹, Liu Juan², Bu Lingbing^{2*}, Zhu Yi¹, Yang Juxin³¹Jiangsu Meteorological Observation Center, Nanjing, Jiangsu 210009, China;²Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;³Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Herein, a polarizing cloud particle probe was developed to further understand the scale spectrum and shape distribution of cloud particles and investigate the microphysical properties of clouds. The probe can receive both forward and backward scattering energies of the particles, control the detection area through the forward quality control channel, and obtain the depolarization ratio of the particles based on the horizontal and vertical channels of backward scattering. The scattering of several types of ellipsoid and hexagon particles in the probe was simulated using the geometrical optics approximation method. Simulation results show that the forward scattering cross-section of the particles is positively related to its equivalent radius. The oblate particles exhibit a stronger forward scattering ability and a smaller backward scattering depolarization ratio than the slim particles. Therefore, the ellipsoid particles show a smaller backward scattering depolarization ratio than the hexagon particles. The simulation data verify the feasibility of the probe for cloud particle

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2020-07-28; 录用日期: 2020-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(41675133)、国家重点研发计划(2018YFC1506100, 2018YFC1506102)

*E-mail: 001779@nuist.edu.cn

detection and provide an inversion basis for detecting the scale spectrum and shape distribution of nonspherical particles.

Key words scattering; cloud particle probe; light scattering; geometric optics approximation; depolarization ratio

OCIS codes 290.5820; 290.5850; 290.5855; 290.1090

1 引言

云是空气中的水蒸气液化或凝结之后悬浮在大气中的聚合物,对地球的辐射收支、天气变化以及气候变化有重要作用。而云的物理特性主要取决于其中云粒子的相态、大小和形状等,由于云本身的特质,云粒子的各项参数在不断变化,难以捉摸。机载云粒子探测器是现代云物理研究的重要手段,但是至今还未有相关仪器能够观测记录云中过冷水滴到冰晶的发展过程^[1-3]。为了解云中水滴和冰晶的演变过程,并更深入理解云物理过程,开展云中冰晶粒子的探测和研究十分必要。目前常见的云粒子探测技术有两种。一种是单粒子散射技术。该技术基于米氏散射原理,通过云粒子的散射能量来判断粒子的大小,但是对于非球形的云粒子,探测误差很大,无法判断出粒子的相态。为了改进该技术, Baumgardner 等^[4]研制了前向和后向散射双通道的探测系统,通过两个通道的比值来判断云粒子相态,但是粒子散射的震荡性导致探测结果准确性不够稳定。后来他提出一种具有偏振检测的云粒子探头,它利用散射光偏振态的变化来区分液态水滴与冰粒子,但无法给出不同形状的冰晶尺寸,且只考虑了一

种冰晶形状,代表性不足^[5]。另一种常见的方法是粒子成像技术。Lawson 等^[6-9]都曾研制过相关粒子探测器,但其探测能力都受到电荷耦合器件(CCD)的性能限制,时空分辨率低,不适用于高浓度云粒子探测。国内学者刘慧芳等^[10-12]也提出过相关粒子探测技术,但是其在机载云粒子探测领域还难以应用。

为了深入了解云粒子的散射特性,理论模拟是必不可少的。常见的方法主要有 T 矩阵、有限差分域法、分离变量法、离散偶极子近似、几何光学近似等。各种方法所适用的范围都不一样。对于可见光波段的波长而言,云粒子的尺度参数比较大,而几何光学近似方法^[13]在模拟大粒子的散射特性时表现最好,且可以模拟任意形状的非球形粒子^[14],故本研究采用几何光学近似方法来模拟云粒子的光散射特性。

本文提出一种基于光散射原理的偏振云粒子探测器,并使用几何光学近似方法模拟了几种典型非球形粒子的散射特性,为反演粒子尺度和形状提供了参考和依据。

2 偏振云粒子探测系统

图 1 是研制的偏振云粒子探测系统结构原理图,主要分为三个部分:激光发射系统、前向散射接收系

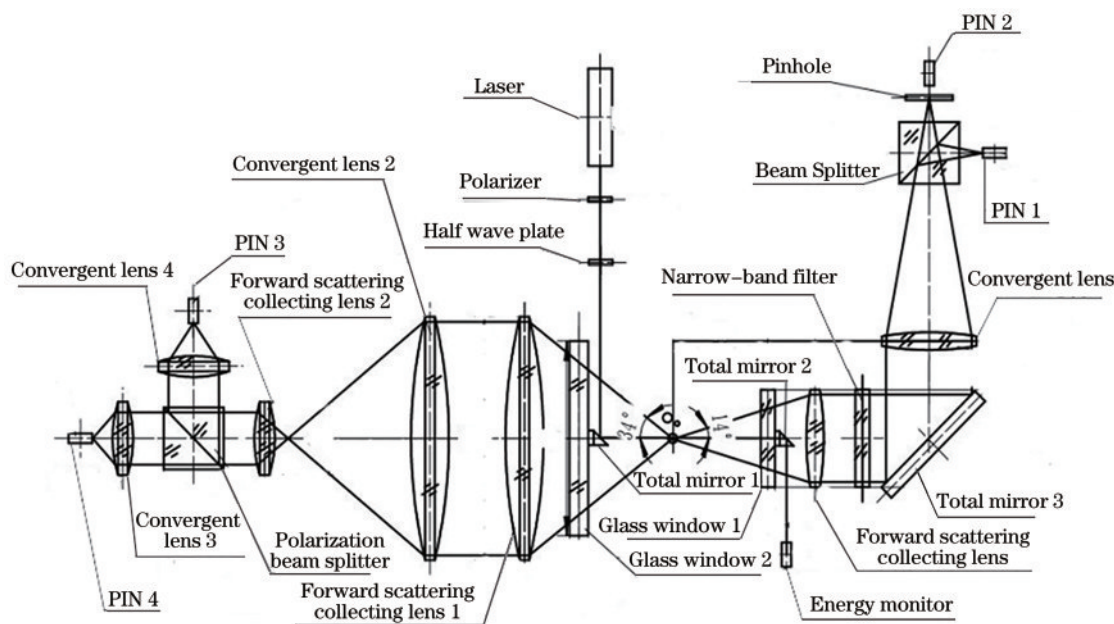


图 1 基于偏振探测云粒子探测系统(原理图)

Fig. 1 Cloud particles detection system based on polarization detection (schematic drawing)

统和后向散射接收系统。高功率单模激光器发射的激光首先通过偏振片,形成纯净的偏振光,然后通过半波片调整激光的偏振方向,形成平行偏振入射光,最后经过全反镜 1 反射至探测区域。粒子在 $4^\circ\sim 14^\circ$ 的前向散射光通过窗口玻璃和非球面镜收集后,经过消偏振分束棱镜将能量分束,最终分别到达两个光电探测器,其中一个探测器前装有小孔,以达到质量控制的目的。通过两个通道的比值来确定粒子的位置,从而控制系统的有效探测区域。 $176^\circ\sim 146^\circ$ 的后向散射光,经透镜 1 收集后由偏振分束棱镜将平行和垂直分量分开,经透镜 2 会聚后到达探测器,通过两个通道响应电压来判断粒子的退偏比。本文中退偏比被定义为水平和垂直通道分量的差值与和值的比。图 2 是最后研制完成的粒子探测器模型,较原理图有部分改进。图中右下角是光纤耦合半导体激光发射单元,可通过光纤和尾部的微透镜发射出发散角小、能量集中的激光。使用偏振分束棱镜替代半波片,方便且误差更小。左右两个密封模块分别是前向和后向散射接收部分,使用黑色隔板完全密封,最大程度地减小了背景噪声和杂散光的影响。

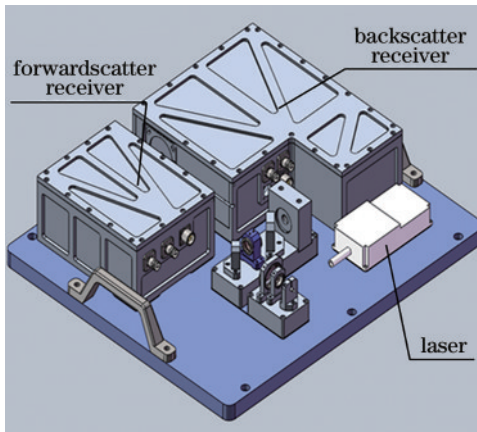


图 2 基于偏振探测云粒子探测系统(设计图)

Fig. 2 Cloud particles detection system based on polarization detection (design drawing)

小孔的衍射和粒子的散射一定程度上是相似的,利用固定在位移平台上的小孔,模拟粒子出现在各个位置的概率,以此方式进行探测系统敏感区域的测量,如图 3 所示。同样的小孔出现在不同的位置时,前向两个通道的相应电压比值会发生变化,这是因为粒子在最理想的位置出现时,散射光通过透镜系统到达小孔时的光斑最小,所有散射能量都能到达探测器。而粒子偏离理想位置时,光斑会变大,当光斑大于小孔面积时,光斑会被遮挡,而

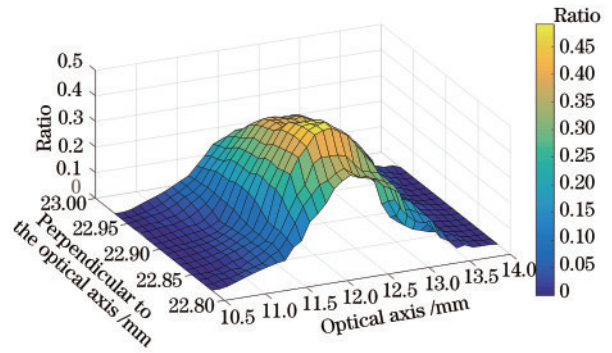


图 3 敏感区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sensitive area

另一个通道没有小孔,光斑不会被遮挡,故两个通道的相应电压比值就会发生变化。因此通过控制这个比值就能够实现空间上探测体积的控制。

3 非球形粒子散射特性模拟

在实际探测中,云粒子的形状多变,主要分为球形水滴和非球形冰晶粒子。球形粒子和非球形粒子的后向散射退偏比有较大区别,球形粒子几乎不产生退偏,在探测中可以据此直接分辨云粒子的相态^[15]。对于非球形粒子,其散射特性不仅受粒子尺度影响,形状对粒子的散射特性影响也很大。为了提高探测器的探测能力,特别是对非球形粒子形状的分辨能力,需要模拟不同形状云粒子的散射特性。如果能够得到各种形状粒子在通过探测区域时的散射特性,这样就可以根据探测器的信号来反演粒子的形状,因此对于探测器来说模拟数据至关重要。散射矩阵描述了粒子对光的散射特性,对于旋转对称的粒子, θ 为粒子散射光与入射光的夹角,即其散射角,其散射矩阵 F 可以简化为

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

其中,散射矩阵的第一个元素 $a_1(\theta)$ 就是散射相函数,且满足^[16]

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi d\theta \sin \theta a_1(\theta) = 1, \quad (2)$$

入射光偏振平行于散射平面时粒子退偏比为^[17]

$$\delta_H(\theta) = \frac{a_1(\theta) - a_2(\theta)}{a_1(\theta) + 2b_1(\theta) + a_2(\theta)}, \quad (3)$$

在散射角 θ_1 到 θ_2 内的粒子退偏比均值为

$$\bar{\delta}_H = \frac{1}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \sin \theta a_1(\theta) \delta_H(\theta). \quad (4)$$

Q_{sca} 为粒子总散射截面, θ_1 到 θ_2 内的散射截面为

$$Q_d = \frac{1}{2} Q_{sca} \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \sin \theta a_1(\theta) a_1(\theta). \quad (5)$$

使用几何光学近似方法可以模拟出各种非球形粒子的散射矩阵和散射相函数, 从而模拟出粒子在通过探测器敏感区域时到达探测器探测面源的光散射分量。在几何光学散射理论模型(见图 4)中, 散射光场包括反射光 E_0 , 折射光 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_p 和衍射光 E_{diff} , 其中 p 为弦数。通过几何光学方法模拟出各个散射场分量, 从而得到粒子的最终散射场^[12]。

椭球和六棱柱都是云粒子常见的形状, 本文主要研究这两种非球形粒子的散射特性。采用等体积球形粒子的半径作为非球形粒子的等效半径, 利用几何光学近似方法分别模拟了等效半径为 10 μm , 30 μm , 50 μm 的长椭球、扁椭球、长六棱柱和扁六棱柱形冰晶粒子的散射相函数, 如图 5 所示。对于本文所模拟的椭球粒子, 其长短轴之比均为 8;

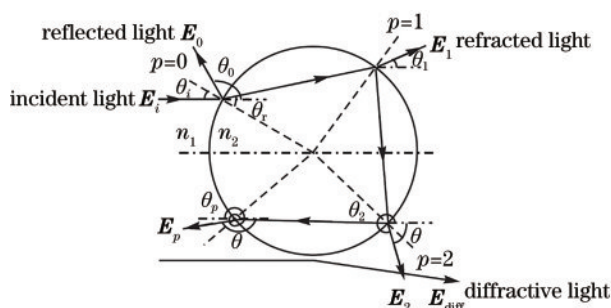


图 4 几何光学近似理论模型

Fig. 4 Theoretical model of geometrical optical approximation

对于长六棱柱粒子的底面边长与母线比为 1/16; 扁六棱柱粒子的底面边长与母线比则为 16。复折射指数使用 660 nm 波长处, 226 K 温度下冰的复折射指数 $1.7779 + 10^{-8}i$ ^[18]。从图 5 中可以看出同一形状、不同大小的非球形粒子散射相函数相差不大, 且不同大小椭球的散射相函数差距要小于六棱柱之间的差距, 这说明在这个粒子尺度参数范围内, 粒子的大小对散射相函数的影响较小。而不同形状粒子相函数之间的差别就很明显, 尤其是椭球粒

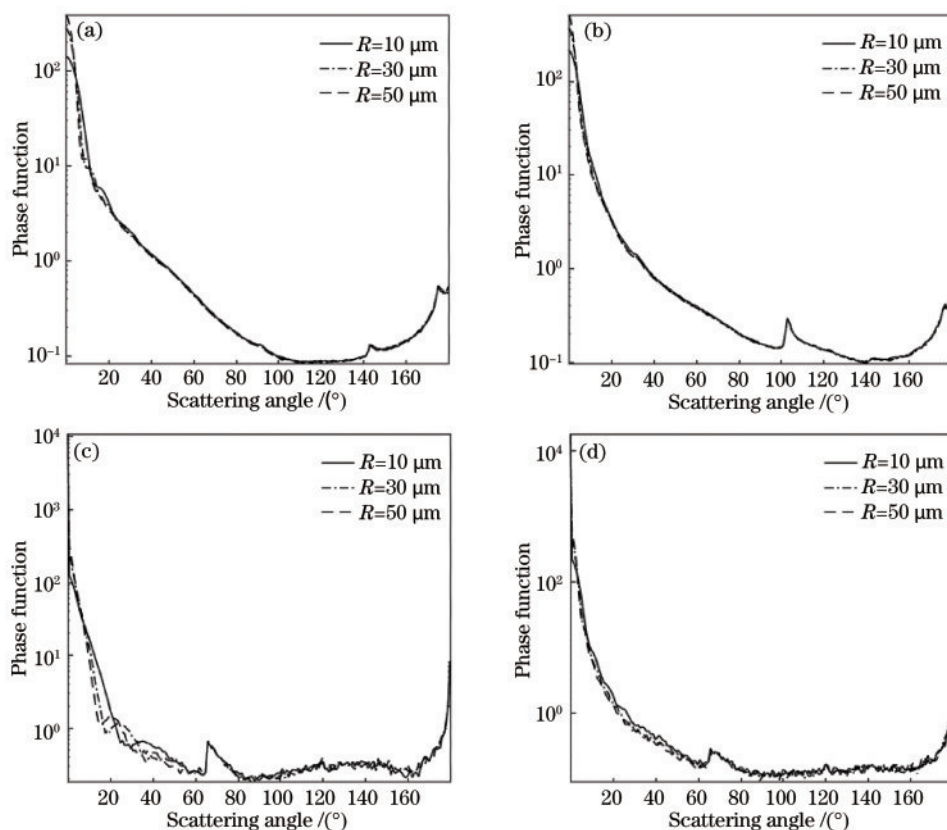


图 5 不同形状三种尺度的云粒子散射相函数。(a)长椭球; (b)扁椭球; (c)长六棱柱; (d)扁六棱柱

Fig. 5 Scattering phase functions of cloud particles with different shapes and three scales. (a) Slim ellipsoid; (b) oblate ellipsoid; (c) slim hexagon; (d) oblate hexagon

子和六棱柱粒子之间相函数形状相差较大。观察低散射角的相函数大小,可以发现六棱柱粒子的前向散射效率要大于椭球粒子,其散射能量主要集中在 0° 附近。模拟的几种粒子相函数都呈U形分布,且前向远大于后向,中间角度的散射能量较少,但是一般在中间角度会出现一个小的峰值。通过这些数据可以了解非球形粒子的散射能量分布情况,根据(4)式和(5)式,要模拟粒子通过探测区域时的探测器响应,不仅需要粒子散射相函数,还需要粒子总散射截面和各个散射角上的退偏比。

在模拟粒子总散射截面时发现,粒子的散射系数基本不变,均稳定在2附近,这是由于在660 nm波长处,大部分云粒子的尺度参数较大,散射系数变化很小,符合米氏散射的相关理论。所以粒子的总散射截面基本和粒子几何截面面积成正比,与球形粒子不同的是,非球形粒子的几何截面与粒子和入射光的取向紧密相关,并不是一成不变的。在计算时,取10000种粒子与入射光的取向,并以此来模糊粒子取向对散射

截面的影响,模拟实际探测中粒子的随机取向。

图6(a)是两种椭球粒子在探测器接收角度内散射截面和粒子等效半径的变化关系,由图可以看出长椭球粒子要比等体积扁椭球粒子的散射截面小,且随着半径变大,他们之间的差距也越大,这意味着在探测器的接收角度内,扁椭球的散射能力要比长椭球更强,相同等效半径的两种粒子通过探测器时扁椭球的信号强度更强。图6(b)是六棱柱粒子在探测器接收角度内散射截面和粒子等效半径的变化关系,相似的是,在探测器的接收角度内扁六棱柱的散射能力也比等体积的长六棱柱更强,但是两种六棱柱散射能力的差距要比两种椭球粒子差距小,且随着粒子变大,两种六棱柱之间的差距在变小。根据模拟的前向散射数据,可知散射截面与粒子大小相关关系稳定,前向散射信号主要适合于粒子尺度谱的反演,对粒子形状反演有一定的参考意义。

图7是几种非球形粒子在后向接收角度内的平均退偏比,与散射截面不同的是,粒子后向散射退

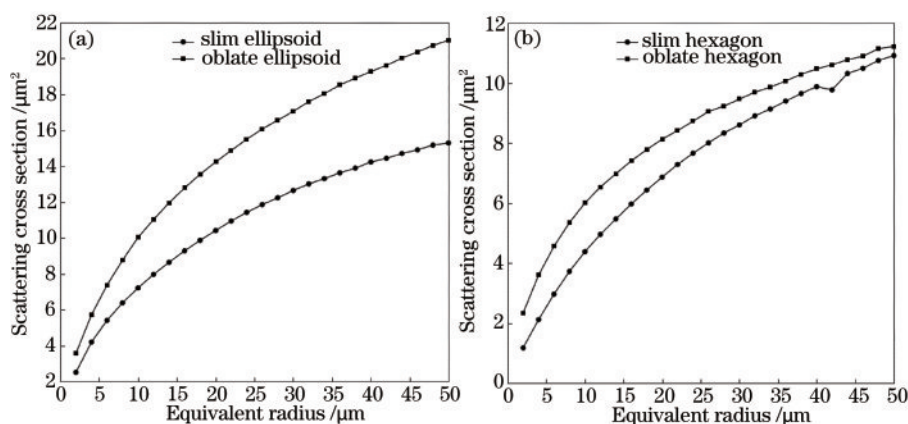


图6 椭球和六棱柱粒子在前向接收角度内的散射截面。(a)椭球粒子;(b)六棱柱粒子

Fig. 6 Scattering cross sections of ellipsoid and hexagon particles in forward receiving angle. (a) Ellipsoid particles; (b) hexagon particles

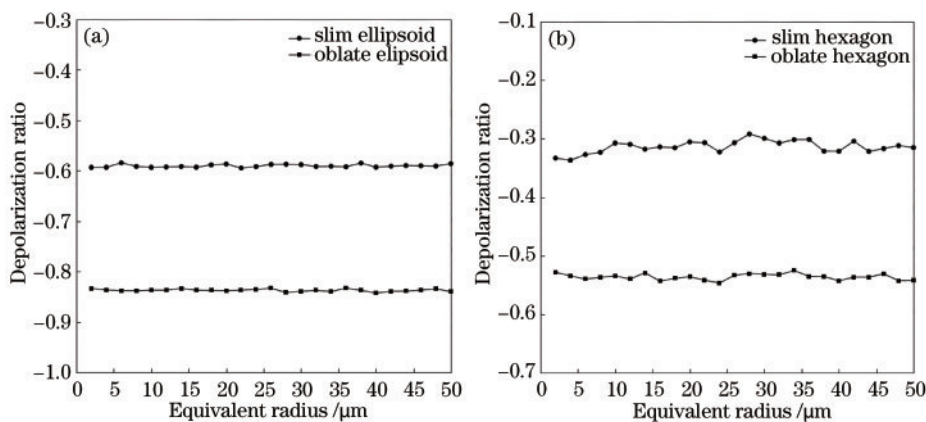


图7 椭球和六棱柱粒子在后向接收角度内的退偏比。(a)椭球粒子;(b)六棱柱粒子

Fig. 7 Depolarization ratio of ellipsoid and hexagon particles in backward receiving angle. (a) Ellipsoid particles; (b) hexagon particles

偏比对粒子的尺寸不敏感,在 2~50 μm 等效半径范围内粒子的平均退偏比上下波动不超过 7%,尤其是椭球粒子,其平均退偏比几乎没有变化,这便于探测非球形粒子的形状。根据模拟结果,可知扁状的粒子一般要比长条状的粒子的退偏比更小,这是由电磁波的偏振传播特性决定的。在模拟的粒子中,所有的椭球粒子退偏比都要小于六棱柱粒子,这意味着在一定的探测条件下,可以根据粒子的后向散射信号分辨粒子是椭球粒子还是六棱柱粒子,甚至可以进一步判别是扁状还是长条状的粒子。

4 结 论

研制的偏振云粒子探测器能够实现有效的敏感区域控制,从而实现有限区域内云粒子的探测。模拟结果表明:前向散射截面与非球形粒子的等效半径成正相关,且扁状粒子比相同大小的长形粒子的前向散射能力更强,且大部分椭球粒子散射截面大于等体积的六棱柱粒子,故对于不同大小的粒子可以通过粒子的前向散射信号强度来分辨粒子的大小;就后向散射能力而言,扁状粒子要比长形粒子的退偏比更小,椭球粒子的退偏比要比六棱柱粒子的小,故对于不同形状的粒子可以通过粒子的后向散射退偏比来分辨粒子的形状。综上可知,前向散射截面依赖于粒子大小,而后向散射退偏比更依赖于粒子的形状。模拟结果很好地为云粒子探测提供了粒子尺度谱和形状反演依据,并从理论上验证了偏振云粒子探测器探测非球形云粒子的可行性。

参 考 文 献

- [1] Guo X L, Fu D H, Hu Z X. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008—2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(2): 351-363.
郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008—2012年)[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 351-363.
- [2] Su H, Yin Y, Lu C S, et al. Development of new diffusion cloud chamber type and its observation study of ice nuclei in the Huangshan area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(2): 386-398.
苏航, 银燕, 陆春松, 等. 新型扩散云室搭建及其对黄山地区大气冰核的观测研究[J]. 大气科学, 2014, 38(2): 386-398.
- [3] Li J, Mao J T. The influence of atmospheric ice core concentration on the radiative properties of cold clouds and the changes of cold cloud albedo over the years[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(21): 2413-2421.
李娟, 毛节泰. 大气冰核浓度对冷云辐射特性的影响以及多年来冷云反照率的变化[J]. 科学通报, 2005, 50(21): 2413-2421.
- [4] Baumgardner D, Jonsson H, Dawson W, et al. The cloud, aerosol and precipitation spectrometer: a new instrument for cloud investigations [J]. Atmospheric Research, 2001, 59/60: 251-264.
- [5] Baumgardner D, Newton R, Krämer M, et al. The Cloud Particle Spectrometer with Polarization Detection (CPSPD): a next generation open-path cloud probe for distinguishing liquid cloud droplets from ice crystals[J]. Atmospheric Research, 2014, 142: 2-14.
- [6] Lawson R P, Baker B A, Schmitt C G, et al. An overview of microphysical properties of arctic clouds observed in May and July 1998 during FIRE ACE [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D14): 14989-15014.
- [7] Lawson R P, Baker B, Pilon B, et al. *In situ* observations of the microphysical properties of wave, cirrus, and anvil clouds. part II: cirrus clouds [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2006, 63(12): 3186-3203.
- [8] Fugal J P, Shaw R A, Saw E W, et al. Airborne digital holographic system for cloud particle measurements [J]. Applied Optics, 2004, 43(32): 5987-5995.
- [9] Fugal J P, Shaw R A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital inline holographic instrument [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2009, 2(1): 259-271.
- [10] Liu H F, Zhou W, Cai X S, et al. Three-dimensional particle tracking velocimetry based on light field imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111014.
刘慧芳, 周骛, 蔡小舒, 等. 基于光场成像的三维粒子追踪测速技术[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111014.
- [11] Liu Z B, Zhu Z P, He C, et al. Research on quantitative relationship between image gray value and particle diameter of micro-nano-scale tracer particle [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0811004.
刘志博, 朱志鹏, 何超, 等. 微纳级示踪粒子图像灰度与粒径量化关系研究[J]. 光学学报, 2020, 40

- (8): 0811004.
- [12] Wang W T, Zhou W, Cai X S, et al. Remote measurement method for mass concentration of fugitive-dust-emission particulate based on backward light scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1201001.
汪文涛, 周骛, 蔡小舒, 等. 基于后向光散射的无组织排放颗粒物质量浓度远程测量方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1201001.
- [13] Macke A, Mishchenko M I. Applicability of regular particle shapes in light scattering calculations for atmospheric ice particles [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(21): 4291-4296.
- [14] Xu L S, Chen H B, Ding J L, 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.
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.
- [15] Chu C X, Bu L B, Yang J X. Simulation of scattering characteristics of typical nonspherical particles for cloud particle detection system with polarization detection [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2018, 30(2): 174-181.
储晨曦, 卜令兵, 杨巨鑫. 用于偏振云粒子探测系统的典型非球形粒子散射特性模拟 [J]. *光散射学报*, 2018, 30(2): 174-181.
- [16] Mishchenko M I, Travis L D. Capabilities and limitations of a current FORTRAN implementation of the T-matrix method for randomly oriented, rotationally symmetric scatterers [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1998, 60(3): 309-324.
- [17] Schnaiter M, Büttner S, Möhler O, et al. Influence of particle size and shape on the backscattering linear depolarisation ratio of small ice crystals-cloud chamber measurements in the context of contrail and cirrus microphysics [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(21): 10465-10484.
- [18] Warren S G, Brandt R E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D14): D14220.