

# 不同气溶胶环境中相干激光雷达回波特性

董晓<sup>1</sup>, 胡以华<sup>1,2</sup>, 徐世龙<sup>1</sup>, 刘豪<sup>2</sup>

<sup>1</sup>解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽省电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>2</sup>中国科学院上海技术物理研究所中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083

**摘要** 基于 Mie 散射理论, 给出了利用半解析蒙特卡罗法模拟气溶胶粒子对水平线偏振激光后向散射的主要过程; 基于气溶胶和云的光学特性库, 选择了 4 种典型环境、5 种典型气溶胶组分和 3 种湿度条件, 分别计算了 1.5  $\mu\text{m}$  和 2.0  $\mu\text{m}$  波段处后向散射回波的退偏度、偏振度和回波光子数, 得到了后向散射光的偏振特性随各组粒径的变化规律以及各气溶胶环境的后向散射激光回波特性, 并分析了不同环境下达到相同探测性能时所需的激光功率比, 为远距离高精度相干激光雷达系统的设计和分析提供了参考。

**关键词** 大气光学; 相干激光雷达; 气溶胶; 后向散射; 蒙特卡罗方法

中图分类号 TN958.95

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0101001

## Echoing Characteristics of Coherent Lidar in Different Aerosol Environments

Dong Xiao<sup>1</sup>, Hu Yihua<sup>1,2</sup>, Xu Shilong<sup>1</sup>, Liu Hao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Electronic Restriction Technology of Anhui, State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

**Abstract** Based on Mie scattering theory, the main process of semi-analytic Monte Carlo simulation is illustrated to research the backscattering properties of aerosol particles to linearly polarized laser in horizontal direction. Four typical environments, five typical aerosol components and three humidity conditions are chosen from optical property libraries of aerosols and clouds. The depolarization ratio, polarization ratio and returned photon number are calculated at 1.5  $\mu\text{m}$  and 2.0  $\mu\text{m}$ , respectively. The variation laws of polarization properties of backscattered laser are acquired with changing of particle sizes of different kinds of aerosol components. Besides, the echoing characteristics of backscattered laser are obtained in four typical aerosol environments. At last, the laser power ratio needed in different environments to achieve the same detection performance is analyzed, which is of reference value to the design and analysis of the coherent lidar systems for the long range and high accuracy observation.

**Key words** atmospheric optics; coherent lidar; aerosol; backscattering; Monte Carlo method

**OCIS codes** 010.3640; 010.1350; 010.1310

## 1 引 言

在大气探测领域, 激光雷达凭借高时空分辨率、高精度等优势得到了广泛应用, 特别是基于大气后向散射的激光雷达的发展, 极大地拓展了激光雷达的应用领域。一方面, 利用大气介质散射光的偏振特性可实现云和气溶胶的种类识别和分布特征分

析, 如广泛使用的 CALIPSO 卫星<sup>[1]</sup>、激光雷达观测网站 EARLINET、AD-Net 等<sup>[2]</sup>; 另一方面, 基于大气粒子后向散射光的强度和频移, 对温室气体<sup>[3]</sup>和大气风场<sup>[4]</sup>进行具有一定时空分辨能力的高精度监测。为提高探测信噪比和时间分辨率, 相干激光雷达的研究日益活跃, 如相干测风激光雷达<sup>[5-6]</sup>和差分吸收相干激光雷达(CDIAL)<sup>[7]</sup>, 在环境监测和气候

收稿日期: 2017-05-09; 收到修改稿日期: 2017-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(61271353)、安徽省自然科学基金(1308085QF123)

作者简介: 董晓(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事相干激光雷达技术方面的研究。E-mail: skl\_dongxiao@163.com

导师简介: 胡以华(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光电技术方面的研究。E-mail: skl\_hyh@163.com

研究等方面发挥了重要作用。大气粒子散射光的偏振性质(如偏振态和偏振角)变化将影响信号光与本振光的偏振匹配度和相干效率<sup>[8]</sup>。此外,气溶胶环境消光特性的差别导致其后向散射回波功率不同。在设计相干激光雷达系统和分析其性能时,应综合考虑气溶胶环境后向散射光的偏振和功率特性。

气溶胶粒子对激光的散射主要是 Mie 散射,基于 Mie 散射理论进行蒙特卡罗数值仿真。Ramella-Roman 等<sup>[9]</sup>总结分析了 3 种 Mie 散射蒙特卡罗仿真方法,给出了详细的仿真流程,并验证了仿真的正确性;孙贤明等<sup>[10]</sup>仿真分析了水云对偏振激光的去极化特性,证实了水云粒子的多次散射退偏振作用;吴浩等<sup>[11]</sup>分析了大气灰霾气溶胶粒子的偏振特性,证实了利用偏振辐射特性能实现灰霾气溶胶的监测;郝增周等<sup>[12]</sup>分析了沙尘粒子在不同湿度条件下的后向散射偏振特性,研究了特定规律分布的气溶胶粒子在不同湿度及波长范围内的变化情况;钟辰等<sup>[13]</sup>使用时域有限差分法计算了单分散非球形粒子的散射相函数,但后向散射与 Mie 散射理论的计算结果差异较大。

可见,当前的研究主要针对单一种类气溶胶粒子的散射特性,对于环境中多组分、多分散气溶胶的后向散射研究有待深化,特别是针对不同气溶胶环境下相干激光雷达的回波特性缺乏综合的理论研究。本文基于 Mie 散射理论分析了相干激光雷达在不同气溶胶环境中的回波特性,该研究对于阐明激光雷达回波特性、合理设计相干激光雷达系统、分析现有相干激光雷达在不同工作环境下的性能具有理论指导意义。

## 2 基本原理

### 2.1 大气粒子后向散射光偏振性质蒙特卡罗仿真

传统研究中常用的 Henyey-Greenstein 函数虽能很好地体现 Mie 散射前向峰值的主要特征,但不能正确模拟后向散射,并且在偏振激光散射模型中,光子 Mie 散射与散射角和方位角都有关联,因此在蒙特卡罗仿真中散射角应基于散射角和方位角的累积概率分布函数(CDF)并通过“拒绝法”选取<sup>[14]</sup>,入射偏振光的相函数可表示为

$$\rho(\alpha, \beta) = m_{11}(\alpha) + m_{12}(\alpha)[Q_0 \cos(2\beta) + U_0 \sin(2\beta)]/I_0, \quad (1)$$

式中  $\rho(\alpha, \beta)$  为单次散射相函数,  $\alpha$  为散射角,  $\beta$  为散射前后子午面构成的方位角<sup>[9]</sup>,  $m_{11}(\alpha)$ 、 $m_{12}(\alpha)$  分别是 Mueller 矩阵中的元素。  $Q_0$ 、 $U_0$ 、 $I_0$  为入射光

的 Stokes 矩阵  $S_0 = [I_0 \quad Q_0 \quad U_0 \quad V_0]$  的元素。散射角  $\alpha$  的取值范围为  $[0, \pi]$ ,  $m_{11}(\alpha)$  满足归一化表达式,即

$$2\pi \int_0^\pi m_{11}(\alpha) \sin \alpha d\alpha = 1. \quad (2)$$

散射角的 CDF 可表示为

$$P(0 \leq \theta \leq \alpha) = 2\pi \int_0^\alpha m_{11}(\theta) \sin \theta d\theta = \xi_1, \quad (3)$$

式中  $\theta$  为累加角度,  $\xi_1$  为  $(0, 1)$  内均匀分布的随机数。一旦散射角  $\alpha$  确定下来,方位角  $\beta$  可根据条件概率分布函数抽样得到<sup>[14]</sup>,即

$$\rho(\epsilon) = 1 + m_{12}(\alpha)[Q_0 \cos(2\epsilon) + U_0 \sin(2\epsilon)]/[m_{11}(\alpha)I_0], \quad (4)$$

式中  $\epsilon$  为任意角度。因此,方位角的 CDF 可表示为

$$P(0 \leq \epsilon \leq \beta) = \int_0^\beta \rho(\epsilon) d\epsilon / \int_0^{2\pi} \rho(\epsilon) d\epsilon = \frac{1}{2\pi} \{ \beta + m_{12}(\alpha) \{ Q_0 \sin(2\beta) + U_0 [1 - \cos(2\beta)] \} / [2m_{11}(\alpha)I_0] \} = \xi_2, \quad (5)$$

式中  $\xi_2$  为  $(0, 1)$  内均匀分布的随机数。

散射仿真过程如图 1(a) 所示,相干脉冲激光雷达工作的一般过程如图 1(b) 所示,发射激光脉冲能量为  $E_0$ ,通过距离选通,分别得到空间距离为  $R_1$  和  $R_2$  附近处于选通时间  $\Delta t$  内的激光回波,其能量分别为  $E_1$ 、 $E_2$ ,再对这些激光回波进行相干探测,  $P$  为激光的瞬时功率。在差分吸收激光雷达中,基于  $R_1$  和  $R_2$  处差分波长各自回波强度的差异,能得到  $\Delta R = R_1 - R_2$  内待测气体的浓度。在仿真过程中,使用子午面法进行蒙特卡罗模拟,统计每次散射光的 Stokes 矢量,每次散射过程后都必须对参考平面进行调整,散射过程的初始参考面为  $XOZ$  面,光子传播方向为  $(0, 0, 1)$ 。经过粒子散射,大部分光子进行前向传输,少部分光子发生后向散射,又由于大气气溶胶粒子间距远大于粒子尺寸,散射过程为非相干散射,实际气溶胶粒子的散射特性为各尺度粒子散射效果的叠加,可认为达到接收面的总散射强度是每个粒子的散射强度之和。

气溶胶粒子散射的 Mueller 矩阵可表示为<sup>[9]</sup>

$$\mathbf{M}(\alpha) = \begin{bmatrix} m_{11}(\alpha) & m_{12}(\alpha) & 0 & 0 \\ m_{12}(\alpha) & m_{11}(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33}(\alpha) & m_{34}(\alpha) \\ 0 & 0 & -m_{34}(\alpha) & m_{33}(\alpha) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

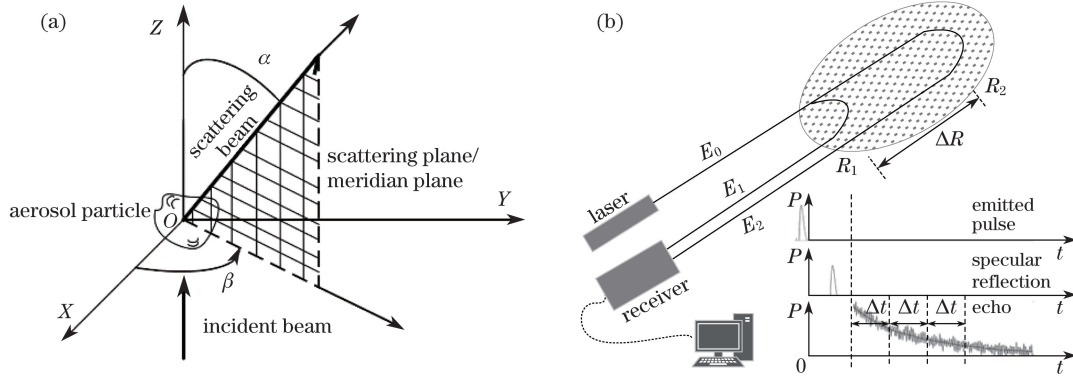


图 1 气溶胶粒子散射示意图。(a) 散射仿真过程;(b) 相干脉冲激光雷达的工作过程  
Fig. 1 Diagram of scattering of aerosol particles. (a) Simulation process of scattering;  
(b) working process of coherent pulsed lidar

式中  $m_{ij}(\alpha)$  为矩阵元素,  $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, 4$ 。矩阵各元素的计算式为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} m_{11}(\alpha) = \frac{1}{2}(|S_1|^2 + |S_2|^2) \\ m_{12}(\alpha) = \frac{1}{2}(|S_2|^2 - |S_1|^2) \\ m_{33}(\alpha) = \frac{1}{2}(S_1 S_2^* + S_1^* S_2) \\ m_{34}(\alpha) = \frac{i}{2}(S_2^* S_1 - S_2 S_1^*) \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $S_1, S_2$  为散射方向平行和垂直两个正交分量的复振幅, \* 代表共轭。

用蒙特卡罗方法仿真粒子散射的流程比较成熟,主要包括光子发射、步长选择、散射方向和散射 Stokes 矩阵计算及终止条件判断<sup>[9-10]</sup>。在本文仿真中,终止条件包括光子后向散射到探测器或光子的权重阈值低于  $10^{-8}$ 。以文献[9]中的计算流程对不同种类、不同湿度条件下的粒子后向散射进行蒙特卡罗仿真,同时统计回波光的功率和偏振信息,一个完整散射后的 Stokes 矢量可表示为<sup>[10]</sup>

$$\mathbf{S}_r = \mathbf{R}(\chi)\mathbf{R}(-\gamma)\mathbf{M}(\alpha)\mathbf{R}(\beta)\mathbf{S}_{in}\Delta\Omega\exp(-\sigma_{ext}L), \quad (8)$$

式中  $\mathbf{S}_{in}$  为初始 Stokes 矢量; $\mathbf{R}(\beta)$  为将  $\mathbf{S}_{in}$  由参考面旋转到散射面的旋转矩阵; $\mathbf{R}(-\gamma)$  为将散射 Stokes 矢量从散射面旋转至新子午面的旋转矩阵; $\mathbf{R}(\chi)$  为将散射 Stokes 矢量旋转到接收器所在平面的旋转矩阵; $\Delta\Omega$  为碰撞点到接收器的立体角; $L$  为光子在气溶胶中的总传输距离; $\sigma_{ext}$  为气溶胶的消光系数,与粒子种类和浓度有关。

## 2.2 不同环境下气溶胶粒子特性

当前,得益于光纤激光器和晶体材料的发展,用于大气成分探测的 CDIAL 和相干测风激光雷达的

工作波长集中在  $1.5 \mu\text{m}$  和  $2.0 \mu\text{m}$  波段,这 2 个波段不仅能产生高功率、高相干性激光,还处于大气窗口,有助于实现大范围、高时空分辨、非合作的大气探测,因此这里主要研究这 2 个波段在不同气溶胶环境中后向散射回波的特性。

在 Mie 散射理论中,气溶胶粒子参数主要包括尺度谱  $N(r)$  和复折射率  $m = n_r + jn_i$ ,  $n_r$  和  $n_i$  分别为复折射率的实部和虚部。研究表明<sup>[15]</sup>,对数正态分布能较好地描述一种模态的气溶胶粒子尺度分布,并且对数正态分布(包括它们的叠加)基本上可以描述整个气溶胶尺度谱分布,气溶胶尺度谱  $N(r)$  满足

$$\frac{dN(r)}{dr} = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \ln 10 \cdot \lg \sigma} \frac{1}{r} \times \exp\left[-\frac{(\lg r - \lg r_{modN})^2}{2(\lg \sigma)^2}\right], \quad (9)$$

式中  $r_{modN}$  为平均模态半径, $\sigma$  为几何标准差, $N$  为粒子数密度。

气溶胶粒子吸收水分后,其粒径和复折射率均出现变化,这将改变气溶胶粒子对偏振激光的后向散射特性<sup>[15-16]</sup>。湿度影响气溶胶散射的问题可简化为球形粒子的散射问题,用相对湿度表示大气湿度的大小。当大气湿度较大时,湿气溶胶粒径可表示为<sup>[12]</sup>

$$r_h = (1 - H_r)^{-(1/d)} r_0, \quad (10)$$

式中  $r_0$  为干气溶胶的粒径, $H_r$  为相对湿度, $d$  为与气溶胶种类有关的常数。

在复折射率随湿度变化方面,Hänel<sup>[17]</sup>经大量理论和实验研究,得到了表征等效均匀球形粒子复折射率分布的经验公式为

$$n = n_w + (n_0 - n_w)(r_h/r_0)^{-3}, \quad (11)$$

式中  $n_0$ 、 $n_w$  分别表示干气溶胶粒子和水的折射率。

气溶胶环境是多组分粒子的混合体,各组分有不同的分布谱和复折射率,气溶胶和云的光学特性(OPAC)库包含了 61 个波长处 10 种典型气溶胶组分的光学参数和 10 种环境中各分组的平均含量<sup>[15]</sup>。

表 1 典型气溶胶环境组分

Table 1 Environment components of typical aerosols

| Aerosol type | $N_i / \text{cm}^{-3}$ | Component 1 | $R_1 / \%$ | Component 2 | $R_2 / \%$ | Component 3       | $R_3 / \%$            |
|--------------|------------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------------|-----------------------|
| Continental  | 15300                  | WASO        | 45.75      | SOOT        | 54.25      | Insoluble         | $0.26 \times 10^{-2}$ |
| Urban        | 15800                  | WASO        | 17.72      | SOOT        | 82.28      | Insoluble         | $0.94 \times 10^{-3}$ |
| Maritime     | 1520                   | WASO        | 98.68      | SSAM        | 1.32       | Sea salt (coarse) | $0.21 \times 10^{-3}$ |
| Desert       | 2300                   | WASO        | 86.96      | MINM        | 11.72      | MIAM              | 1.32                  |

上述 4 个典型环境中非水溶性粒子和粗模海盐粒子的含量均低于 0.01%,其对气溶胶环境散射的影响可以忽略。主要考虑水溶性气溶胶、积聚模海盐气溶胶、细沙尘气溶胶、积聚模沙尘气溶胶和黑炭气溶胶 5 种气溶胶的散射,其对应 OPAC 库中的数据文件

表 2 典型气溶胶组分分布参数

Table 2 Distribution parameters of typical aerosol components

| Particle type | $r_{\text{mod}N} / \mu\text{m}$ | $\sigma / \mu\text{m}$ | $n_{r1}$ | $n_{i1}$               | $n_{r2}$ | $n_{i2}$               |
|---------------|---------------------------------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|
| WASO          | 0.021                           | 2.24                   | 1.333    | $1.595 \times 10^{-3}$ | 1.313    | $1.532 \times 10^{-3}$ |
| SSAM          | 0.210                           | 2.03                   | 1.322    | $2.034 \times 10^{-4}$ | 1.307    | $1.099 \times 10^{-3}$ |
| MIAM/MINM     | 0.400/0.070                     | 2.00/1.95              | 1.530    | $5.700 \times 10^{-3}$ | 1.530    | $7.600 \times 10^{-3}$ |
| SOOT          | 0.012                           | 2.00                   | 1.770    | 0.460                  | 1.800    | 0.490                  |

### 3 计算过程及结果分析

假设 OPAC 库中的 SOOT 和 MIAM 的粒径不受湿度影响<sup>[15]</sup>,并且 WASO 和 SSAM 等吸湿后,粒径变大,但  $\sigma$  不变。在干气溶胶组分折射率方面,OPAC 库和高分辨率大气光谱数据库(HITRAN2008)<sup>[18]</sup> 有很好的 consistency,结合(10)、(11)式以及 OPAC 库中不同湿度下气溶胶的折射率值,计算得到:对于 WASO,  $d=4.75$ ;对于海盐气溶胶,  $d=3.94$ 。

由于气溶胶粒子的后向散射系数很小,发射光子数较少时,回波光子很少,这将使仿真结果受随机误差的影响较大,因此需进行大量光子多组模拟,从而耗费大量时间。为降低计算复杂度,结合表 2 参数,仅计算累积分布中占 99.9%的粒子,其余总含量低于 0.1%的粒子对仿真的影响很小,忽略不计。规定 WASO、MINM、SOOT 3 种小粒径组分的截止粒径是  $0.8 \mu\text{m}$ ;SSAM 和 MIAM 两种大粒径组分的截止粒径是  $4.5 \mu\text{m}$ 。

激光初始 Stokes 矢量  $\mathbf{S}_0 = [1 \ 1 \ 0 \ 0]$ ;对于

考虑到相干激光雷达的应用场合,选取 4 种环境,分别是一般大陆气溶胶、城市气溶胶、沙漠气溶胶和洁净海洋气溶胶,如表 1 所示,  $N_i$  为各典型环境中气溶胶粒子数密度,  $R_k (k=1,2,3)$  是环境中各组分粒子数的混合比。

分别为 WASO、SSAM、MINM、MIAM 和 SOOT。选取相干激光雷达常用的  $1.5 \mu\text{m}$  和  $2.0 \mu\text{m}$  波段附近各分组的复折射率,如表 2 所示。波长变化较小时,可认为复折射率不变。下标  $r, i$  分别代表实部和虚部,下标 1、2 分别代表  $1.5 \mu\text{m}$  和  $2.0 \mu\text{m}$ 。

小粒径组分和大粒径组分,粒径步长分别取  $0.01 \mu\text{m}$  和  $0.05 \mu\text{m}$ ;仿真中光学厚度取 1,发射光子数  $N_0 = 2 \times 10^5$ ,相干激光雷达接收视场角为 1 mrad,采样空间分辨率为 15 m,在距离门的选通时间  $\Delta t$  内的回波能被有效探测。为保证有足够多的回波光子,需要动态确定各组分粒子数浓度  $N_p$ 。由于发生非相干散射,不同组分、不同粒径处回波的整体 Stokes 矢量  $\mathbf{S}_{r,j}$  是各回波光子的非相干叠加,可表示为

$$\mathbf{S}_{r,j} = \sum_{i=0}^{N_{r,j,i}} \mathbf{S}_{r,j,i}, \quad (12)$$

式中  $\mathbf{S}_{r,j,i}$  和  $N_{r,j,i}$  分别是各组分、各粒径处各回波光子的 Stokes 矢量和回波光子数,  $j$  代表前述 5 种气溶胶,  $\mathbf{S}_{r,j} = [I_{r,j} \ Q_{r,j} \ U_{r,j} \ V_{r,j}]$ 。对于水平线偏光,退偏比可定义为

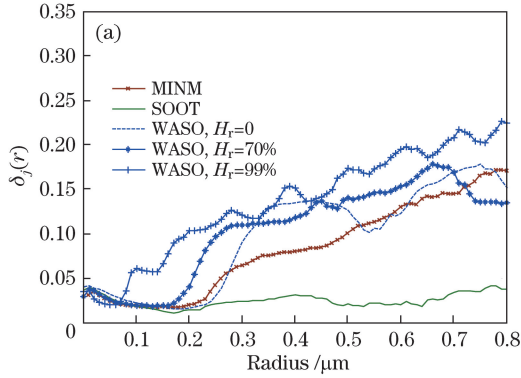
$$\delta_j(r) = \frac{I_{r,j} - Q_{r,j}}{I_{r,j} + Q_{r,j}}. \quad (13)$$

激光雷达回波一般是部分偏振光,可以等效为偏振光和自然光的叠加,其中仅有部分偏振光能实

现有有效相干探测,回波光的偏振度可表示为

$$P_j = \sqrt{Q_{r,j}^2 + U_{r,j}^2 + V_{r,j}^2} / I_{r,j}。 \quad (14)$$

1.5  $\mu\text{m}$  波段处 5 种气溶胶组分后向散射光的偏振特性如图 2、3 所示,图中分别按照细粒模( $r < 0.8 \mu\text{m}$ )和粗粒模( $r < 4.5 \mu\text{m}$ )给出了偏振性质随粒



径分布的变化情况。对于吸湿性组分,分别计算了相对湿度  $H$  为 0、70% 和 99% 3 种湿度条件下的退偏比  $\delta_j(r)$  和偏振度  $P_j(r)$ 。图中各曲线是对上述 5 种组分在 10 组独立重复模拟实验中取均值并进行 5 点平滑后的结果。

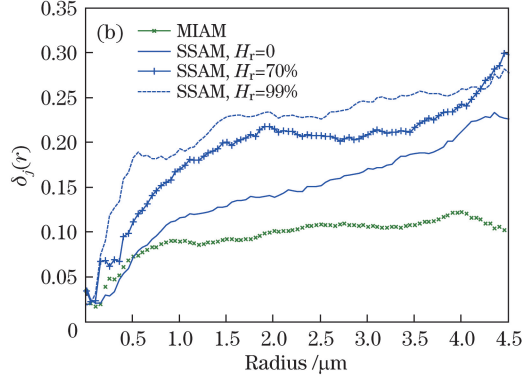


图 2 1.5  $\mu\text{m}$  波段处不同气溶胶组分的退偏比

Fig. 2 Depolarization ratios of different aerosol components at 1.5  $\mu\text{m}$

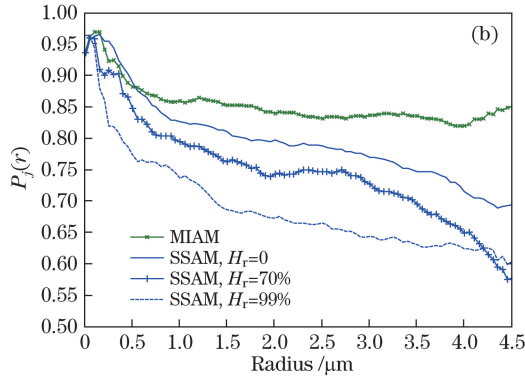
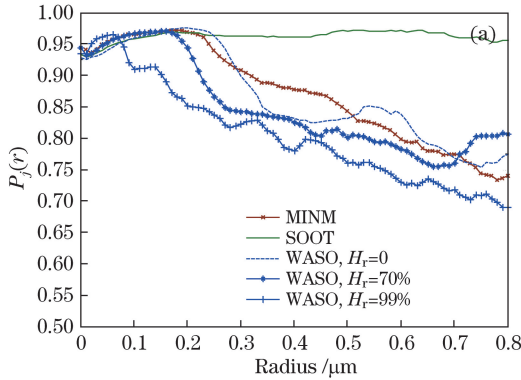


图 3 1.5  $\mu\text{m}$  波段处不同气溶胶组分的偏振度

Fig. 3 Polarization ratios of different aerosol components at 1.5  $\mu\text{m}$

由计算结果可得:随着粒径的增加,后向散射光的退偏度振荡增强,偏振度逐渐降低,其中 SOOT 后向散射光的保偏能力最强;对于同种组分,随着湿度的增大,后向散射光偏振度呈现单调下降的趋势,海盐气溶胶的变化比 WASO 强烈;散射粒子的半径大于  $0.2 \mu\text{m}$  时,后向散射光的偏振度出现振荡,这与气溶胶粒子条件下发生后向散射过程的数目  $N_{\text{back}}$  有关,气溶胶散射粒径越大,前向散射相函数值越大,基于偏振光散射相函数选出后向散射角的概率降低,这就导致  $N_{\text{back}}$  减小,但后向散射过程中回波光权重值比小粒径时大,由于仿真光子数目有限,计算过程受噪声影响大,按(13)、(14)式计算时误差增大。

在相同计算条件下,2.0  $\mu\text{m}$  波段的 5 种气溶胶组分后向散射光的偏振特性如图 4、5 所示。

由图 4、5 可知,2.0  $\mu\text{m}$  波段处的后向散射特性

与 1.5  $\mu\text{m}$  波段处类似,总体趋势有较好的一致性,仅在具体数值和局部粒径变化趋势上有所不同,并且 2.0  $\mu\text{m}$  波段处的后向散射光偏振度总体上优于 1.5  $\mu\text{m}$  波段。在分析气溶胶组分总的后向散射特性时,需对各粒径处回波按照(9)式所示的分布规律进行加权求和,该过程可表示为

$$\mathbf{S}_j = \sum_{r=r_{1,j}}^{r_{2,j}} \mathbf{S}_{r,j} n(r) \Delta r / M_j, \quad (15)$$

式中  $r_{1,j}$  和  $r_{2,j}$  分别为各组分的计算粒径,  $\Delta r$  为取样间隔,  $M_j$  为各气溶胶组分总的粒子数。

各组分的偏振特性依据(13)、(14)式进行计算。基于表 2 所示的各组分粒径分布规律,对计算得到的上述每种粒径进行 10 组独立重复实验,对散射结果取均值,得到 5 种典型组分的后向散射回波特性如表 3 所示。表中下标 1、2 分别表示 1.5  $\mu\text{m}$  波段和 2.0  $\mu\text{m}$  波段;下标 rms 表示多组回波的退偏度

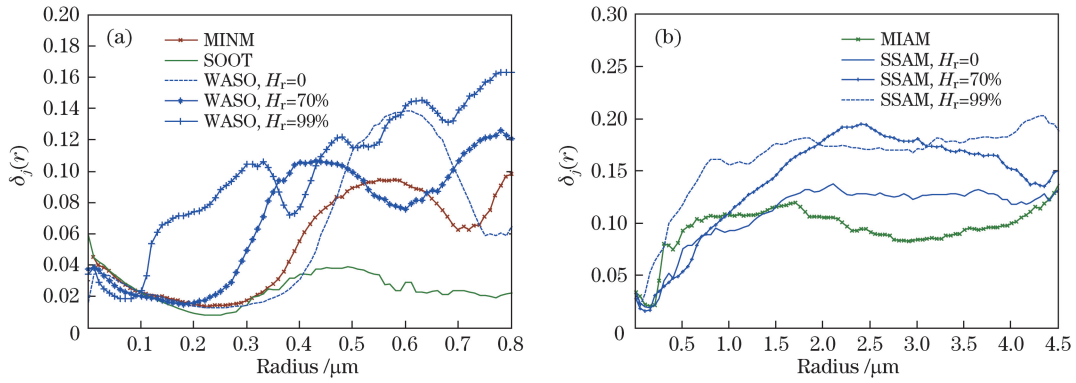


图 4 2.0 μm 波段处不同气溶胶组分的退偏比

Fig. 4 Depolarization ratios of different aerosol components at 2.0 μm

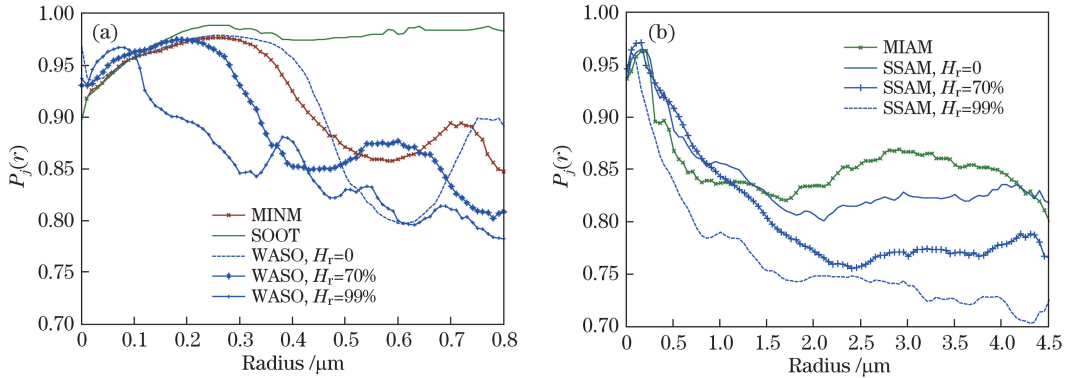


图 5 2.0 μm 波段处不同气溶胶组分的偏振度

Fig. 5 Polarization ratios of different aerosol components at 2.0 μm

表 3 不同气溶胶组分的后向散射回波特性

Table 3 Backscattering echoing characteristics of different aerosol components

| Type              | $\delta_1$ | $\delta_{rms1}$ | $P_1$ | $P_{rms1}$ | $N_1$ | $\delta_2$ | $\delta_{rms2}$ | $P_2$ | $P_{rms2}$ | $N_2$ |
|-------------------|------------|-----------------|-------|------------|-------|------------|-----------------|-------|------------|-------|
| SOOT              | 0.039      | 0.064           | 0.942 | 0.034      | 0.44  | 0.045      | 0.051           | 0.937 | 0.026      | 0.36  |
| MINM              | 0.024      | 0.073           | 0.955 | 0.008      | 75.08 | 0.028      | 0.084           | 0.948 | 0.007      | 62.01 |
| MIAM              | 0.109      | 0.066           | 0.804 | 0.004      | 37.74 | 0.086      | 0.067           | 0.854 | 0.003      | 46.65 |
| WASO <sub>1</sub> | 0.038      | 0.127           | 0.932 | 0.017      | 12.65 | 0.032      | 0.087           | 0.940 | 0.004      | 10.99 |
| WASO <sub>2</sub> | 0.034      | 0.095           | 0.937 | 0.011      | 22.98 | 0.031      | 0.087           | 0.942 | 0.004      | 20.47 |
| WASO <sub>3</sub> | 0.030      | 0.112           | 0.946 | 0.015      | 72.24 | 0.030      | 0.087           | 0.945 | 0.004      | 57.55 |
| SSAM <sub>1</sub> | 0.057      | 0.113           | 0.940 | 0.026      | 68.48 | 0.041      | 0.133           | 0.933 | 0.017      | 72.26 |
| SSAM <sub>2</sub> | 0.064      | 0.084           | 0.910 | 0.019      | 52.30 | 0.050      | 0.121           | 0.917 | 0.024      | 67.42 |
| SSAM <sub>3</sub> | 0.097      | 0.105           | 0.859 | 0.023      | 21.14 | 0.065      | 0.143           | 0.905 | 0.019      | 29.43 |

和偏振度的相对均方根值;  $N_l$  ( $l=1, 2$ ) 表示考虑衰减后的回波光子数; SSAM<sub>m</sub>、WASO<sub>n</sub> ( $m=1, 2, 3$  且  $n=1, 2, 3$ ) 分别表示气溶胶在  $H_r$  为 0、70% 和 99% 时的回波特性。

由表 3 可知, 在 10 次计算中, 不同组分的退偏度起伏较大, 相对波动约为 10%, 而偏振度比较稳定, 这主要是由 Stokes 矢量相加时的随机性导致的。当回波光子数足够多时, 随机出现的奇异值所

占比例会大大降低, 退偏度起伏将会得到改善。当湿度改变时, WASO 和 SSAM 有两种不同的变化趋势, WASO 散射光的偏振度随湿度的增大略有增大, 最大波动为 1.6%, 而 SSAM 散射光的偏振度逐渐降低, 最大波动为 9.0%。2.0 μm 波段的偏振度随湿度变化的相对波动低于 1.5 μm 波段。在后向散射光子数方面, 气溶胶粒径和复折射率均随湿度的增大而发生变化, WASO 的后向散射能力逐渐增

强,而 SSAM 的散射能力逐渐减弱。在  $1.5 \mu\text{m}$  波段,湿度由 0 变为 70% 时,WASO 回波光子数增量为 81.7%,SSAM 回波光子数减少 30.9%;湿度由 70% 增大到 90% 时,WASO 回波光子数增加了 3.14 倍,SSAM 回波光子数减少约 59.6%。对于 SOOT,由于其复折射率虚部很大,有强烈的吸收,在发射光子数相同时,回波光子数远低于其他 4 种组分。

不同环境的气溶胶组分和组分含量均有差异,从 OPAC 库选取的 4 种气溶胶环境是各自环境的平均情况,反映一般性质,对应晴空无云环境。计算

表 4 不同气溶胶环境的后向散射回波特性

Table 4 Backscattering echoing characteristics of different aerosol environments

| Parameter         | Continent (average) |                   | Maritime (clean)  |                   | Urban             |                   | Desert            |                   |
|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                   | $1.5 \mu\text{m}$   | $2.0 \mu\text{m}$ | $1.5 \mu\text{m}$ | $2.0 \mu\text{m}$ | $1.5 \mu\text{m}$ | $2.0 \mu\text{m}$ | $1.5 \mu\text{m}$ | $2.0 \mu\text{m}$ |
| $\delta$          | 0.034               | 0.031             | 0.039             | 0.035             | 0.034             | 0.032             | 0.056             | 0.049             |
| $P$               | 0.937               | 0.942             | 0.932             | 0.935             | 0.937             | 0.941             | 0.898             | 0.908             |
| $N_r$ /arb. units | 108.29              | 96.24             | 23.37             | 21.09             | 46.15             | 40.80             | 38.44             | 36.44             |

由表 4 可知,4 种气溶胶环境均存在退偏振现象,其中沙漠气溶胶的退偏度最大,约为 5%,CALIPSO 卫星测量的塔克拉玛干沙漠与柴达木盆地的退偏度廓线值范围为  $0.20 \sim 0.35$ 、戈壁区的退偏度廓线值范围为  $0.16 \sim 0.28$ <sup>[19]</sup>,观测值与仿真结果的差异与 OPAC 库中气溶胶组分的尺度谱分布、沙漠环境中各组分的混合比、探测波长以及沙尘气溶胶的球形等效有关。一般大陆气溶胶和城市气溶胶中 SOOT 的回波光子数远大于 WASO,因此 WASO 的偏振特性主导了这两种环境的偏振特性,但 WASO 含量的差异使回波光子数发生改变。海洋气溶胶的散射粒子数密度较小,因此该环境下计算得到的  $N_r$  小于其他 3 种环境。

气溶胶后向散射特性与粒子的尺度谱分布、复折射率和形状等密切相关,实际气溶胶粒子可能有多种组分,并且形状不规则,即使粒子的复折射率和等效尺度谱在数值上一致,其散射特性仍存在较大差异<sup>[20]</sup>。对于沙尘气溶胶粒子,非球形仿真结果与真实值的差异较小,但当前尚无研究表明应以何种形状参数的非球形粒子表征 OPAC 库定义的一般情况下的沙尘气溶胶。对非球形粒子退偏度的仿真以离散偶极近似(DDA)和  $\mathbf{T}$  矩阵方法居多,主要集中在旋转椭球形、圆柱形和切比雪夫形粒子,粒子形状参数对后向散射结果的影响很大,并且即使针对相同的粒子形状参数,在相似的仿真参数下(粒径分布、波长等)计算的结果也有较大差异,在某些非球形参数下,利用 DDA 和  $\mathbf{T}$  矩阵计算多分

每种环境的相干激光雷达回波特性时,需对各组分按照含量(表 1)进行加权求和,每种气溶胶环境中激光回波总的 Stokes 矢量为

$$\mathbf{E}_q = \sum_{j=1}^5 \mathbf{S}_j C_q(j), \quad (16)$$

式中  $q=1,2,3,4$  分别对应选取的 4 种气溶胶环境, $C_q(j)$  为不同环境中各气溶胶组分相对于洁净海洋气溶胶粒子总数的比例。 $\mathbf{E}_q$  中的第一个元素即为加权回波光子总数  $N_r(q)$ 。当  $H_r=70\%$  时,4 种气溶胶环境回波的  $\delta$ 、 $P$  和  $N_r$  如表 4 所示。

散沙尘气溶胶后向散射时也能得到与 MIAM 类似的结果<sup>[20-21]</sup>。

从相干探测的角度得出激光回波特性的 3 个因素对探测结果的影响程度是不同的,主要表现在以下方面:

1) 在退偏振度方面,即使回波的偏振方向和偏振态都发生变化,通过偏振分集接收<sup>[8]</sup>,将信号光和本振光各分为偏振正交的两路光,使偏振方向平行的分量相干,再对两路相干信号进行处理,以准确得到幅值和频率信息,从而可在总体上提高相干探测的偏振匹配度和信噪比。

2) 在偏振度方面,4 种环境的偏振性质相对稳定,偏振度的最大差异位于  $1.5 \mu\text{m}$  波段,为 4.3%;偏振度的下降说明激光由线偏振光退化成了部分偏振光,降低了后向散射光中能被有效相干探测的光子比例,并且回波光中的非相干部分将增大系统的低频噪声,而外差探测能有效避开低频噪声的影响。使用偏振分集接收时,有效相干回波光子数可定义为

$$N_{\text{eff},v} = N_r(v) P_v, \quad v=1,2,3,4, \quad (17)$$

式中  $P_v$  代表 4 种气溶胶环境的偏振度。

3) 在加权回波光子总数方面,气溶胶粒子浓度  $N_i$ (表 1)对后向散射回波光子数的影响较大。对于同类气溶胶粒子, $N_i$  越大,其散射能力越强,发生后向散射的过程也将越多,由于粒子数密度和组分的差异,不同环境的回波光子数在  $1.5 \mu\text{m}$  波段最大相差 4.6 倍。

为达到相同的信噪比和时间分辨率,4种环境对激光雷达发射功率的需求不同。 $H_r=70\%$ 时,由(17)式可得,一般大陆气溶胶、洁净海洋气溶胶、城市型气溶胶、沙漠型气溶胶在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段所需的功率比为 $0.215:1:0.504:0.631$ ,在 $2.0\ \mu\text{m}$ 波段所需的功率比为 $0.218:1:0.514:0.596$ 。在 $2.0\ \mu\text{m}$ 波段所需的发射功率较大,对于城市气溶胶,所需功率比 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段时大约 $12.6\%$ 。

## 4 结 论

基于Mie散射理论,利用子午面蒙特卡罗法数值分析了5种典型气溶胶组分在3种湿度条件下的回波特性。各组分后向散射光的偏振度随粒径的增大逐渐降低的趋势具有一致性;湿度增大时,WASO和SSAM的粒径和复折射率均发生变化,回波光的偏振度逐渐降低,SSAM的变化幅度较大,且湿度越大,WASO散射光子数越少,SSAM散射越强;4种环境的退偏度相对稳定,在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段的最大偏差约为 $4.3\%$ ;回波光子数差异很大,这与散射粒子浓度和种类有关,散射回波功率是制约相干探测的主要因素,4种环境中,一般大陆气溶胶的回波最强, $2.0\ \mu\text{m}$ 波段处所需功率比 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段处的平均值大 $11.92\%$ ( $H_r=70\%$ )。具体到实际环境中,可以预先测量激光雷达应用环境中粒径的分布谱,再利用各组分的散射结果来分析待测环境的回波特性,也可结合不同环境中所需的激光雷达功率比,合理确定相干激光雷达的发射激光功率,或预先分析现有激光雷达在不同气溶胶环境中的性能。

## 参 考 文 献

- [1] Winker D M, Pelon J, Coakley J A J, *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.
- [2] Bo G Y, Liu D, Wang B X, *et al.* Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1014002.  
伯广宇, 刘东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1014002.
- [3] Wagner G A, Plusquellic D F. Ground-based, integrated path differential absorption LIDAR measurement of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{H}_2\text{O}$  near  $1.6\ \mu\text{m}$ [J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6292-6310.
- [4] Brinkmeyer E, Waterholter T. Continuous wave synthetic low-coherence wind sensing lidar: Motionless measurement system with subsequent numerical range scanning[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1872-1897.
- [5] Kavaya M J, Beyon J Y, Koch G J, *et al.* The Doppler aerosol wind (DAWN) airborne, wind-profiling coherent-detection lidar system: Overview and preliminary flight results[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2014, 31(4): 826-842.
- [6] Abari C F, Chu X, Hardesty R M, *et al.* A reconfigurable all-fiber polarization-diversity coherent Doppler lidar: Principles and numerical simulations[J]. Applied Optics, 2015, 54(30): 8999-9009.
- [7] Ishii S, Iwai H, Mizutani K, *et al.*  $2\text{-}\mu\text{m}$  coherent lidar for  $\text{CO}_2$  and wind measurements[C]. Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XIV, 2013: 887206.
- [8] Dong X, Hu Y H, Zhao N X, *et al.* Research on polarization diversity technology in coherent differential absorption lidar[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(3): 541-547.  
董骁, 胡以华, 赵楠翔, 等. 差分吸收相干激光雷达中偏振分集技术研究[J]. 光电子•激光, 2015, 26(3): 541-547.
- [9] Ramella-Roman J C, Prahel S A, Jacques S L. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: Part II[J]. Optics Express, 2005, 13(25): 10392-10405.
- [10] Sun X M, Xiao S, Wan L, *et al.* Monte Carlo simulation of polarization lidar multiple scattering depolarization by water cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1113005.  
孙贤明, 肖赛, 万隆, 等. 蒙特卡罗方法模拟水云对偏振激光雷达的多次散射去极化[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1113005.
- [11] Wu H, Wei Y N, Gong M Y, *et al.* Research on haze aerosol particles polarization characteristics[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, 10(5): 408-416.  
吴浩, 魏轶男, 宫明艳, 等. 灰霾型气溶胶粒子偏振特性研究[J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(5): 408-416.
- [12] Hao Z Z, Gong F, Pan D L, *et al.* Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101002.  
郝增周, 龚芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101002.
- [13] Zhong C, Gao J, Wu L H, *et al.* Research on scattering properties of non-spherical aerosols and cirrus particles based on the finite difference time



- domain method[J]. The Journal of Light Scattering, 2014, 26(4): 331-339.
- 钟辰, 高隽, 吴良海, 等. 基于时域有限差分法的非球型气溶胶和卷云粒子散射特性研究[J]. 光散射学报, 2014, 26(4): 331-339.
- [14] Wang X D, Wang L H V. Propagation of polarized light in birefringent turbid media: A Monte Carlo study[J]. Journal of Biomedical Optics, 2002, 7(3): 279-290.
- [15] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(5): 831-844.
- [16] Cai J, Gao J, Fan Z G, *et al.* The polarization characteristic research of aerosol particles under the humidity influence[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(5): 639-644.
- 蔡嘉, 高隽, 范之国, 等. 湿度影响下的气溶胶粒子的偏振特性[J]. 发光学报, 2013, 34(5): 639-644.
- [17] Hänel G. The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air[J]. Advances in Geophysics, 1976, 19: 73-188.
- [18] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, *et al.* The HITRAN2008 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2009, 110(9/10): 533-572.
- [19] Xu C P, Ge J M, Huang J P, *et al.* Observations of dust aerosol over China based on CALIPSO spaceborne lidar[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(5): 1353-1362.
- 徐成鹏, 葛颀铭, 黄建平, 等. 基于 CALIPSO 星载激光雷达的中国矿物气溶胶观测[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1353-1362.
- [20] Zhang X L. Linear depolarization ratios characteristics of dust aerosol particles model[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0829001.
- 张小林. 沙尘气溶胶粒子模型的线退偏比特性[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0829001.
- [21] Hu S, Gao T C, Liu L, *et al.* Simulation of radiation transfer properties of polarized light in non-spherical aerosol using Monte Carlo method[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(9): 094201.
- 胡帅, 高太长, 刘磊, 等. 偏振光在非球形气溶胶中传输特性的蒙特卡罗仿真[J]. 物理学报, 2015, 64(9): 094201.