

# 基于雾滴谱分布的雾场散射特征分析

魏海亮<sup>1</sup> 邵利民<sup>2</sup> 李天伟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>海军大连舰艇学院研究生管理大队, 辽宁 大连 116018

<sup>2</sup>海军大连舰艇学院军事海洋系, 辽宁 大连 116018

<sup>3</sup>海军大连舰艇学院航海系, 辽宁 大连 116018

**摘要** 不同地区的平流雾和辐射雾具有差异化的雾滴谱分布, 导致雾场对光辐射具有不同的衰减特性。Mie 散射适用于描述雾场气溶胶微粒的散射与衰减, 光传播遵循动态的粒子数守恒过程。采用雾滴谱分布函数修正气溶胶微粒的相位矩阵, 分析了红外光在雾场气溶胶微粒团簇中的散射光偏振性。结果表明, 决定雾场气溶胶微粒退偏特性的因素主要包括雾滴谱分布、雾滴折射率、吸收系数以及入射波长等。在前向散射区域内, 退偏性能能见度的增加而减弱, 在大部分后向散射区域内, 表现出相反的趋势。

**关键词** 大气光学; 大气散射; 多重散射; 雾滴谱; 偏振性

中图分类号 O436.2 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.120101

## Fog Field Scattering Analysis with Drop Size Distribution

Wei Hailiang<sup>1</sup> Shao Limin<sup>2</sup> Li Tianwei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Graduate Management, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China

<sup>2</sup>Department of Military Oceanography, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China

<sup>3</sup>Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China

**Abstract** There exist various of fog drop size distributions in advection fog and radiation fog, which result in the different attenuation performances as light propagates in fog field. Mie theory can describe the scattering and attenuation of aerosol particles in fog field, while light propagation follows the principle of dynamic particles conservation. In this paper, fog drop size distribution is applied to modify the scattering phase matrix of aerosol particles, and the scattered light's polarization can be solved when infrared light penetrates into aerosol particle clusters. The results show that aerosol particles' depolarization mainly depends on fog drop size distribution, fog drop refractive index, absorption coefficient and incident wavelength. In the forward-scattering area, depolarization decreases as visibility increases, while the opposite trend occurs in most backward-scattering area.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric scattering; multiple scattering; fog drop size distribution; polarization

**OCIS codes** 010.1310; 290.1310; 290.4210; 290.5855

## 1 引言

雾是自然界一种常见的大气运动现象, 它是悬浮在近地面空气中沉降的水滴或冰晶点形成的一种胶体。对雾的形成机理和微结构<sup>[1]</sup>, 雾滴谱的分布<sup>[2-4]</sup>, 雾在毫米波段<sup>[5]</sup>、红外波段<sup>[2,4,6]</sup>, 可见波段<sup>[7-8]</sup>的衰减特性, 雾的能见度<sup>[9]</sup>以及雾场的多重散射特性<sup>[10]</sup>研究较多, 能够针对地区性的平流雾和辐射雾提出雾滴谱的特征, 分析雾场的消光特性等。

典型的雾滴谱分布模型主要有指数谱分布(如  $\Gamma$  分布<sup>[11]</sup>)、幂指数律分布<sup>[12]</sup>、对数正态分布<sup>[4]</sup>等。多地区

收稿日期: 2014-05-10; 收到修改稿日期: 2014-06-17; 网络出版日期: 2014-11-27

基金项目: 国家博士后基金(2014M552659)

作者简介: 魏海亮(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事电磁波在海雾中传输特性方面的研究。

E-mail: 2247633582@qq.com

导师简介: 邵利民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋气象方面的研究。E-mail: shaolimindl@sohu.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

的实测数据表明诸多雾滴谱分布符合这三种描述,如沪宁地区的辐射雾<sup>[13]</sup>和舟山地区的平流雾<sup>[1]</sup>满足 $\Gamma$ 分布形式,青岛地区的平流雾<sup>[7,14]</sup>则符合对数正态分布。根据指数谱分布模型和能见度公式,也能推导出与能见度相关的雾滴谱分布<sup>[8]</sup>。

赵振维等<sup>[2-4]</sup>采用雾滴谱的 $\Gamma$ 分布模型推导了雾滴谱特征与含水量及能见度的关系,提出了运用3 mm波,10.6  $\mu\text{m}$ 波在雾场中的衰减特性和能见度测量雾滴谱特征的方法,获得了平流雾在3 mm波的传播特性<sup>[5]</sup>。他们也分析平流雾和辐射雾的雾滴谱特征,表明平流雾的雾滴浓度随含水量的增加而增大,而辐射雾正好相反<sup>[6]</sup>。他们还比较了雾在可见波段和红外波段的衰减特性,表明浓度高的平流雾对10.6  $\mu\text{m}$ 红外辐射的衰减大于可见光的衰减<sup>[2]</sup>。

Kruse公式是能见度与雾场的衰减关系的经典描述,Fischer和Pierce等<sup>[15-16]</sup>认为它仅适用于气溶胶粒子尺寸远小于波长的情况,考虑到实际雾滴的粒径,Kruse公式没有考虑前向散射的影响。Wang等<sup>[17]</sup>也指出气溶胶粒子的直径超过15  $\mu\text{m}$ 时,雾场的衰减效应随粒子尺寸增大而减少,根据Van der Hulst的散射公式计算的消光效率因子也随粒子尺寸增大而减小,因此10.6  $\mu\text{m}$ 红外波在雾场中传播时具有最强衰减效应的雾滴粒子直径是15  $\mu\text{m}$ 。

戴兵等<sup>[10]</sup>建立了椭球雾滴模型,采用辐射传输方程的多重散射理论分析雾场的散射光强分布,包括雾滴谱分布和雾滴形状分布等因素。椭球形雾滴场的散射谱呈椭圆形特征,不同方位角的散射光强角分布差异明显。考虑到实际雾滴尺寸差异较大,雾场的散射谱呈现以中央亮斑为中心,向四角弥散的图样。

基于辐射传输方程的多重散射理论也应用于生物组织的散射特征分析,叶海水等<sup>[18-19]</sup>根据视细胞的浓度分布和形状因子修正散射相位矩阵,分析了视网膜视细胞的散射光场偏振性的分布,并将其结论应用于偏振开关的眼底相机和偏振移相的光谱域光学相干断层扫描(OCT)系统中。

激光在雾中传输时,由于受到雾滴粒子的散射和吸收作用,能量不断地衰减,同时其偏振状态也发生改变,散射的激光发生退偏现象。传输过程中偏振特性的变化成为限制激光偏振技术应用与发展的重要因素,对研究激光在雾中的传输具有重要的价值。本文基于雾滴谱分布,采用Mie散射与辐射传输理论相结合的多重散射模型,分析了不同地区平流雾和辐射雾的典型雾滴谱分布对红外辐射光的偏振性影响。通过对比散射光场的偏振态,从偏振态分析平流雾场和辐射雾场特征差异以及能见度对雾场散射光偏振性的影响。

## 2 基本原理和方法

基于Mie散射理论,雾场气溶胶微粒的半径 $r_d$ 和相对折射率 $m$ ,是决定散射截面 $C_{\text{sca}}$ 、消光截面 $C_{\text{ext}}$ 以及相互正交的两个散射振幅函数 $S_1$ 和 $S_2$ 的重要因素<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} C_{\text{sca}}(r_d, m) = \frac{4\pi}{k^2} \left[ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n(r_d, m)|^2 + |b_n(r_d, m)|^2) \right], \\ C_{\text{ext}}(r_d, m) = \frac{4\pi}{k^2} \text{Re} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [a_n(r_d, m) + b_n(r_d, m)] \right\}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_1(r_d, m, \Theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n(r_d, m)\pi_n(\Theta) + b_n(r_d, m)\tau_n(\Theta)], \\ S_2(r_d, m, \Theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n(r_d, m)\pi_n(\Theta) + a_n(r_d, m)\tau_n(\Theta)], \end{cases} \quad (2)$$

式中 $a_n$ 和 $b_n$ 是Lorenz-Mie系数,角函数 $\pi_n(\Theta)$ 和 $\tau_n(\Theta)$ 均是和散射角 $\Theta$ 相关的Legendre多项式, $\Theta=0\sim 90^\circ$ 时为前向散射, $\Theta=90\sim 180^\circ$ 时为后向散射, $k$ 为波数。通常情况下,雾场气溶胶微粒具有不同的尺寸,它的雾滴数浓度与尺寸分布的关联性称为雾滴谱分布,且与地域、气候环境、温度等因素相关。典型的雾滴谱分布模型可分为沪宁地区辐射雾<sup>[12]</sup>、舟山地区平流雾<sup>[1]</sup>、青岛地区平流雾<sup>[7,14]</sup>以及与能见度 $V$ 相关的雾滴谱分布模型<sup>[9,13]</sup>,其模型可分别表示为

$$\begin{cases} n(r_d) = 1.315r_d^2 \exp(-0.425r_d), 5 \mu\text{m} \leq r_d \leq 15 \mu\text{m}, \\ n(r_d) = 0.0146r_d^{3.524} \exp(-0.371r_d), 9 \mu\text{m} \leq r_d \leq 14 \mu\text{m}, \\ n(d) = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\sqrt{2\pi} d \sigma_i} \exp\left[-\frac{(\ln d - \ln d_i)^2}{(\ln \sigma_i)^2}\right], \\ d_1 = 0.26, \sigma_1 = 1.4, d_2 = 0.65, \sigma_2 = 1.9, d_3 = 2, \sigma_3 = 1.2, 0.5 \mu\text{m} \leq d \leq 5 \mu\text{m}, \\ n(r_d) = 1.059 V 1.15r_d^5 \exp(-0.8359 V^{0.43} r_d), 2 \mu\text{m} \leq r_d \leq 10 \mu\text{m}. \end{cases} \quad (3)$$

在雾场的多重散射模型中,引入修正的散射相位函数或相位矩阵表示气溶胶微粒的雾滴谱分布对发生散射事件概率的影响。对每个微粒尺寸计算的散射截面和消光截面,乘以归一化雾滴谱分布函数,并在雾滴半径范围内积分处理,相当于平均散射截面  $\bar{C}_{\text{scat}}$  和平均消光截面  $\bar{C}_{\text{ext}}$

$$\begin{cases} \bar{C}_{\text{scat}} = \int_{r_1}^{r_2} C_{\text{scat}}(r_d, m) n(r_d) dr_d = \sum_{i=1}^{N_r} u_i n(r_i) C_{\text{scat}}(r_i, m), \\ \bar{C}_{\text{ext}} = \int_{r_1}^{r_2} C_{\text{ext}}(r_d, m) n(r_d) dr_d = \sum_{i=1}^{N_r} u_i n(r_i) C_{\text{ext}}(r_i, m). \end{cases} \quad (4)$$

积分处理过程采用高斯勒让德积分处理,将连续积分转换为几个积分节点的离散求和。 $N_r$ 为积分节点的数量, $r_i$ 为积分节点, $u_i$ 为积分权重。采用同样的处理方法,结合气溶胶微粒的雾滴谱分布,计算平均Müller矩阵  $\bar{\mathbf{M}}(m, \Theta)$  和平均散射矩阵  $\bar{\mathbf{F}}(m, \Theta)$

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{M}}(m, \Theta) = \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{M}(r_d, m, \Theta) n(r_d) dr_d, \\ \bar{\mathbf{F}}(m, \Theta) = \frac{4\pi}{k^2 \bar{C}_{\text{ext}}} \mathbf{M}(m, \Theta), \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{M}(r_d, m, \Theta)$  为  $4 \times 4$  的方阵,其非零元素大小取决于振幅函数  $S_1$  和  $S_2$ 。散射矩阵与相位矩阵具有相同的物理意义,在前向散射的子午平面空间内,采用旋转矩阵完成散射矩阵的坐标变换,即可获得相位矩阵。如图1所示,描述了含雾滴谱分布的相位矩阵计算流程。

基于动态的粒子数守恒原理,雾场气溶胶微粒的多重散射采用辐射传输理论描述散射和吸收造成的粒子数变化,这个模型的直接求解非常困难。作为辐射传输理论的近似模型,Kubelka-Munk(KM)理论<sup>[20]</sup>能够简化多重散射过程中光强或偏振性的求解,

$$\mu \frac{\partial}{\partial \tau} \mathbf{I}(\tau, \mu, \varphi) + \mathbf{I}(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\omega}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} \mathbf{P}(\mu, \varphi, \mu', \varphi') \mathbf{I}(\tau, \mu', \phi) d\varphi' d\mu', \quad (6)$$

矢量辐射传输方程的  $\mathbf{I}(\tau, \mu, \phi)$  包含  $I, Q, U$  和  $V$  四个斯托克斯参数。式中  $\tau \in [0, \tau_0]$  为光学参数,表示光子进入雾场的深度与气溶胶微粒的光子平均自由程的比值;  $\mu \in [-1, 1]$  为极角  $\theta$  的余弦值;  $\varphi \in [0, 2\pi]$  为球坐标系中的方位角;  $\omega$  为雾场气溶胶微粒的平均反照率。等式右边积分项中的  $\mathbf{P}$  为相位矩阵,表示沿着  $(\mu', \varphi')$  方位入射到  $\tau$  处向  $(\mu, \varphi)$  方位发生散射事件的概率。

### 3 数值模拟结果与分析

采用广义球形谐波法求解雾场气溶胶微粒的多重散射光偏振性分布,雾滴谱分布采用(3)式的四种模型,由于不同雾场的气溶胶微粒尺寸差异较大,因此仿真中采用不同的入射光波长,遵循Mie散射模型的必要条件,即入射光波长与粒子尺寸接近,气溶胶微粒的折射率也存在差异,如表1所示<sup>[21]</sup>。

表1 不同波长的雾滴折射率

Table 1 Fog drop refractive index at different wavelengths

Wavelength / $\mu\text{m}$	Real index	Imaginary index
1.06	1.326	$5.0 \times 10^{-6}$
5.00	1.325	$1.2 \times 10^{-2}$
10.6	1.178	$7.1 \times 10^{-2}$

以波长为  $10.6 \mu\text{m}$  的完全圆偏光正入射到舟山地区的平流雾场中,雾滴谱分布修正前的两种模型分别假设雾场气溶胶微粒的直径最小均为  $9 \mu\text{m}$ 、最大均为  $14 \mu\text{m}$ 。求解平均散射截面和平均消光截面时,高斯

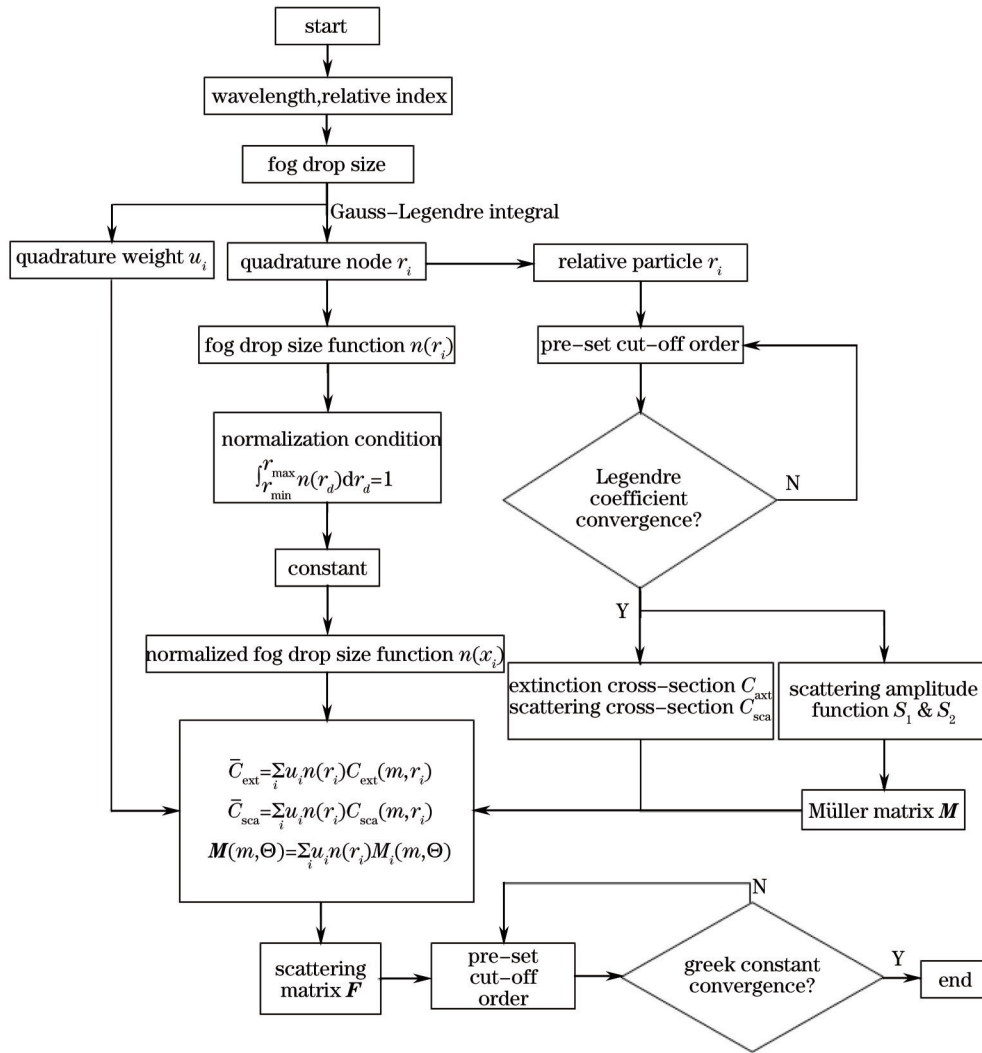


图1 含雾滴谱分布的相位矩阵计算流程

Fig.1 Flowchart of phase matrix with fog drop size distribution

勒让德积分的积分节点数设为31。光束与三种直径的微粒发生多重散射后,含有雾滴谱分布的修正模型结果更趋于中间值,如图2所示。

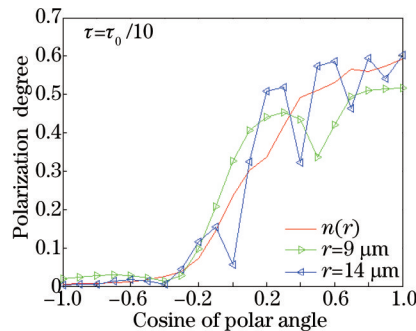


图2 舟山地区雾滴谱分布修正前后的散射光偏振性对比

Fig.2 Scattered light's polarization with and without fog drop size distribution in Zhoushan

如图3(a)所示,描绘了含雾滴谱分布修正的偏振性分布。横轴表示散射极角余弦,纵轴为光学参数,即光进入雾场深度与光子平均自由程的比值。色度条的蓝色表示低偏振度,红色表示高偏振度。完全圆偏特性的入射光偏振态为1。从散射光的偏振分布可知,气溶胶团簇表现出明显的退偏特性,在后向散射区域(-1 < mu < 0),散射光偏振态改变更为明显。当改变圆偏光的入射角时,如图3(b)所示,入射角增大到60°,代表高偏振度的红色区域不断增多,这表明散射光的保偏性随入射角增大而增大。

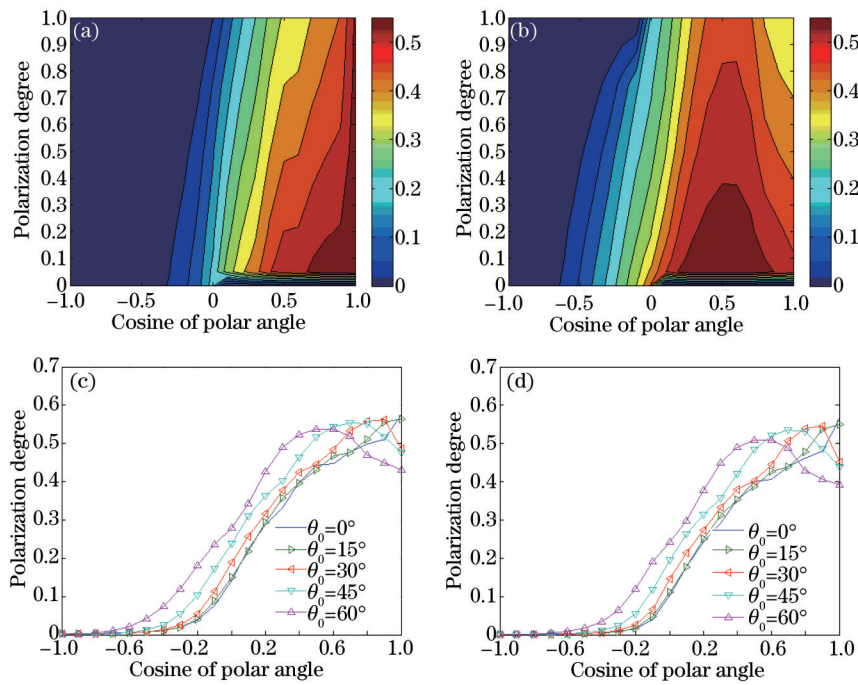


图3 舟山地区平流雾场的散射光场偏振性:正入射与斜入射的对比。(a)  $0^\circ$ 入射;(b)  $60^\circ$ 入射;(c)  $\tau = \tau_0/2$ ;(d)  $\tau = 3\tau_0/4$

Fig.3 Normal incident and oblique incident in Zhoushan fog field. (a)  $0^\circ$  incident; (b)  $60^\circ$  incident;

(c)  $\tau = \tau_0/2$ ; (d)  $\tau = 3\tau_0/4$

对正入射与斜入射两种情况进行比较分析,如图3(c)和3(d)所示,在不同的光学参数下,斜入射具有与正入射类似的偏振态分布。随着入射角增大,退偏性减弱,且每条散射光偏振度与极角余弦的曲线均出现峰值,且峰值对应的极角等于入射角,即退偏性最弱的位置出现在沿着入射直线的前向散射方向。

散射光的偏振态主要取决于光束的入射角、光束进入气溶胶团簇的深度、以及散射极角等参数;决定气溶胶团簇的退偏性因素主要包括雾滴谱分布、雾滴折射率、吸收系数以及入射光波长等。

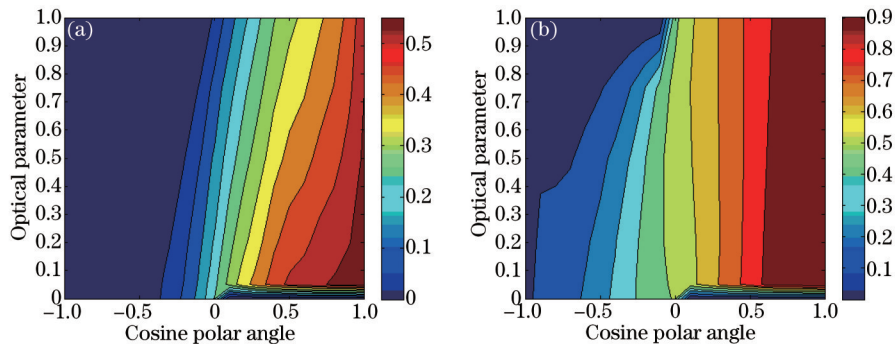


图4 雾场散射光的偏振性分布。(a) 沪宁地区辐射雾  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ; (b) 青岛地区平流雾  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$

Fig.4 Light's polarization scattered from fog field. (a) Huning radiation fog  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ;

(b) Qingdao advection fog  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$

分别以不同的波长正入射在辐射雾和平流雾场,模拟的偏振性分布如图4(a)和4(b)所示。可知,在短波长方向,平流雾场气溶胶微粒的退偏特性较弱,而辐射雾场气溶胶微粒在长波长方向具有较强的退偏性。

图5(a)~(c)揭示了以  $\lambda = 5.0 \mu\text{m}$  光束正入射时,不同能见度的雾场散射光偏振性分布差异。在前向散射区域内,随着能见度的增大,散射光的偏振性增加,即退偏特性减弱。在大部分后向散射区域内,这种情况正好相反,如图5(d)所示。

## 4 结 论

针对平流雾场和辐射雾场的气溶胶微粒尺寸差异,分析了光在雾场传播的偏振性变化时,采用雾滴谱分布函数修正散射相位矩阵,揭示了气溶胶微粒尺寸对雾场内部散射过程的影响。结合 Mie 散射和多重散

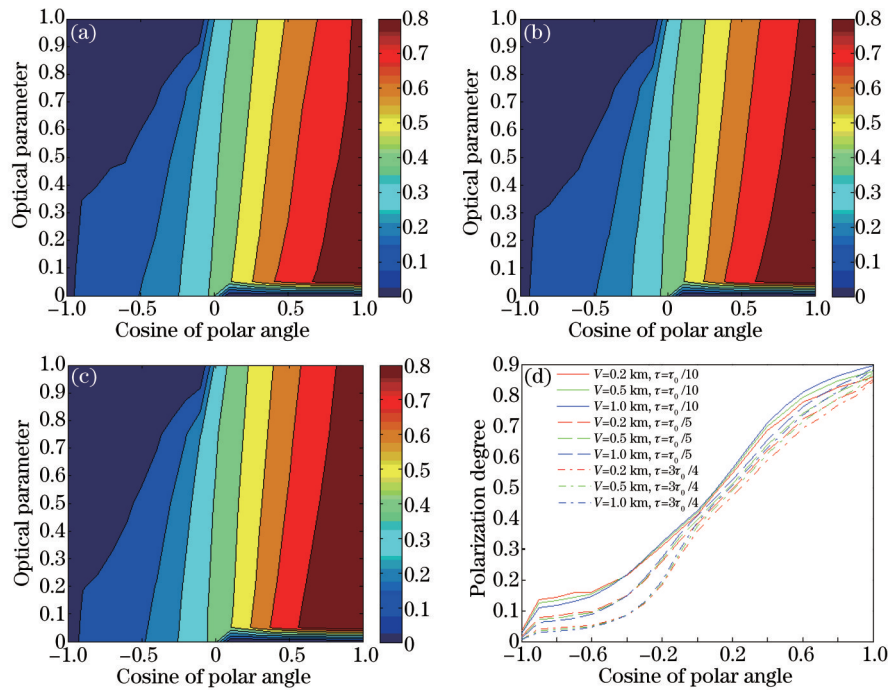


图5 不同能见度的雾场散射光偏振性分布。(a) 能见度为0.2 km; (b) 能见度为0.5 km; (c) 能见度为1.0 km; (d) 散射光偏振性  
Fig.5 Light's polarization distribution scattered from fog with different visibilities. (a) 0.2 km visibility;

(b) 0.5 km visibility; (c) 1.0 km visibility; (d) scattered light's polarization

射模型,采用广义球形谐波法数值求解散射光的偏振性分布。

仿真结果表明,散射光的偏振态主要取决于光束的入射角、光束进入气溶胶团簇的深度以及散射极角等参数;决定气溶胶团簇的退偏性因素主要包括雾滴谱分布、雾滴折射率、吸收系数以及入射光波长等。在短波长方向,平流雾场气溶胶微粒的退偏特性较弱,而辐射雾场气溶胶微粒在长波长方向具有较强的退偏性。在前向散射区域内,散射光的偏振性随着能见度的增大而增加,即退偏特性减弱。在大部分后向散射区域内,这种情况相反。

### 参考文献

- 1 Yang Zhongqiu, Xu Shaozu, Geng Biao. Spring sea fog forming and microphysical structure in Zhoushan[J]. Periodical of Ocean, 1989, 11(4): 431-438.  
杨中秋, 许绍祖, 耿 骠. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构[J]. 海洋学报, 1989, 11(4): 431-438.
- 2 Zhao Zhenwei, Wu Zhensen, Shen Guangde, *et al.*. Attenuation due to fog for 10.6  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. J Infrared Millim Waves, 2002, 21(2): 95-98.  
赵振维, 吴振森, 沈广德, 等. 雾对10.6  $\mu\text{m}$  的红外辐射特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(2): 95-98.
- 3 Dai Mengyan, Wu Wenjian, Hu Biru. Research of electro-optics attenuation due to fog and its application in camouflage [J]. Electro-Optics Technology Application, 2005, 20(5): 22-24.  
代梦艳, 吴文健, 胡碧茹. 雾的光电遮蔽性能探析[J]. 光电技术应用, 2005, 20(5): 22-24.
- 4 Li Xuebin, Gong Chunwen, Li Chao, *et al.*. Size distribution and attenuation for infrared radiation of fog particles[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(7): 742-745.  
李学彬, 宫纯文, 李 超, 等. 雾滴谱分布和雾对红外的衰减[J]. 激光与红外, 2009, 39(7): 742-745.
- 5 Shen Guangde, Zhao Zhenwei, Lin Leke, *et al.*. Sea fog reflects on radio wave progration at 3 mm wavelength[J]. J Infrared Millim Waves, 2000, 19(6): 478-480.  
沈广德, 赵振维, 林乐科, 等. 海雾对3毫米波传播特性的影响研究[J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(6): 478-480.
- 6 Zhao Zhenwei, Wu Zhensen. Methods of deterring fog drop size distribution and fog attenuation at infrared wavelength [J]. J Xidian University, 2004, 29(2): 253-256.  
赵振维, 吴振森. 确定雾滴谱的方法和雾的红外辐射衰减特性[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 29(2): 253-256.
- 7 Sheng Lifang, Liang Weifang, Qu Wenjun, *et al.*. Relationship of aerosol size distribution and visiblity in a sea fog[J].

- Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(6): 1-8.  
盛立芳, 梁卫芳, 屈文军, 等. 海雾过程中大气气溶胶谱变化及消光作用[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(6): 1-8.
- 8 Elias T, Haefelin M, Drobninski P, *et al.*. Particulate contribution to extinction of visible radiation pollution, haze, and fog[J]. Atmospheric Research, 2009, 92(4): 443-454.
- 9 Li Sujuan, Jiang Weian. Estimation of fog's impact on visibility[J]. J Civil Aviation University of China, 2010, 28(6): 1-4.  
李素娟, 蒋维安. 雾对能见度的影响估算[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(6): 1-4.
- 10 Dai Bing, Yuan Yinnan, Mei Deqing, *et al.*. Multiple scattering spectra through fog particles in the ellipsoidal model[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 084201.  
戴 兵, 袁银男, 梅德清, 等. 椭球模型下通过雾场的多重散射光谱[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 084201.
- 11 Deimendjian D. Scattering and polarization properties of water clouds and hazes in visible and near infrared[J]. Appl Opt, 1984, 3(2): 187-196.
- 12 Liu Yuya. The Study of the Detection Potential on Fog and Its Visibility by Doppler Radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information & Technology, 2008. 20-21.  
刘玉雅. 多普勒天气雷达对雾及其能见度探测潜力的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008. 20-21.
- 13 Huang Jianping, Mei Qingyin, Jin Yongcai, *et al.*. Microphysical structure features and evolution processes of radiation fog in Huning region[J]. Meteorology, 1998, 24(5): 3-8.  
黄建平, 梅清银, 靳永才, 等. 沪宁地区辐射雾的微物理结构[J]. 气象, 1998, 24(5): 3-8.
- 14 Chen Jingjing. Seasonal Variations of Aerosol Optical Properties in Qingdao[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. 39-46.  
陈静静. 青岛大气气溶胶光学特性的季节变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. 39-46.
- 15 K W Fischer, M R Witiw, E Eisenberg. Optical attenuation in fog at a wavelength of 1.55 micrometers[J]. Atmospheric Research, 2008, 87(3-4): 252-258.
- 16 R M Pierce, J Ramaprasad, E Eisenberg. Optical attenuation in fog and clouds[C]. SPIE, 2001, 4530: 58-71.
- 17 Wang X, Fu T, Zhao Y. Study on attenuation performance of water fog to 10.6  $\mu\text{m}$  laser emission by laser granularity analyzer and transmitter[C]. SPIE, 2010, 7656: 76566Q.
- 18 Ye Haishui, Gao Zhishan, He Jun, *et al.*. Visual cell concentration effect on the polarization of scattered light[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0317002.  
叶海水, 高志山, 何 军, 等. 视细胞浓度分布对散射光偏振性的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0317002.
- 19 Ye Haishui. Research on Key Techniques of Retinal Scattering Analysis and Retinal Imaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014. 51-69.  
叶海水. 视网膜散射特征分析与成像关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014. 51-69.
- 20 R D M Garcia, C E Siewert. A generalized spherical harmonics solution for radiative transfer models that include polarization effects[J]. J Quant Spectrosc Radiat Transfer, 1986, 36: 401-423.
- 21 Yin Hong. Atmospheric Radiation Foundation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993. 72-74.  
尹 宏. 大气辐射学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1993. 72-74.