

## 油雾粒子浓度变化对散射穆勒矩阵的影响

宋俊宏<sup>1,2</sup>, 肖作江<sup>1,2\*</sup>, 李英超<sup>1,2</sup>, 张肃<sup>1,2\*\*</sup>, 战俊彤<sup>1,2</sup>, 付强<sup>1,2</sup>, 姜羿帆<sup>3</sup><sup>1</sup> 长春理工大学吉林省空间光电技术重点实验室, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>3</sup> 吉林东光精密机械厂, 吉林 长春 130000

**摘要** 针对大气环境中颗粒物浓度检测问题,以油雾环境为研究对象,在经典 Mie 散射理论基础上,建立蒙特卡罗偏振散射模型,采用 Stokes-Mueller 矩阵分析方法研究 Mueller 矩阵元素的变化规律,并使用 Mueller 矩阵分解方法对图样进行讨论,通过分析 Mueller 矩阵元素中信息可以有效获取介质特性。基于采用光学厚度表征油雾浓度的方法,将实验测试和模拟仿真有机结合,以证明模型的正确性。结果表明,随着光学厚度的增加,即浓度的增加, Mueller 矩阵元素  $M_{11}$  图样随之增大,非偏振光学特征不断增强;且 Mueller 矩阵分解出的散射退偏矩阵强度值不断增大,散射退偏能力增强。该方法可更直观地判别不同浓度的颗粒物介质特征,达到可视化的效果,为大气颗粒物浓度的检测提供理论基础及测试新方法。

**关键词** 大气光学; Mueller 矩阵分解; 油雾环境; 光学厚度; 蒙特卡罗仿真

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2301001

## Influence of Concentration Variation of Oil Mist Particles on Scattering Mueller Matrix

Song Junhong<sup>1,2</sup>, Xiao Zuojiang<sup>1,2\*</sup>, Li Yingchao<sup>1,2</sup>, Zhang Su<sup>1,2\*\*</sup>,  
Zhan Juntong<sup>1,2</sup>, Fu Qiang<sup>1,2</sup>, Jiang Yifan<sup>3</sup><sup>1</sup> Jilin Provincial Key Laboratory of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;<sup>2</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;<sup>3</sup> Jilin Dongguang Precision Machinery Factory, Changchun, Jilin 130000, China

**Abstract** For the concentration detection of particulate matter in the atmospheric environment, a Monte Carlo polarization scattering model was established on the basis of the Mie scattering theory, with the oil mist environment as the research object. The Stokes-Mueller matrix analysis method was employed to study the variation of Mueller matrix elements, and the patterns were investigated through Mueller matrix decomposition. Analyzing the Mueller matrix elements was an effective way of obtaining medium properties. Using the method based on oil mist concentration characterized by optical thickness, the model was proved correctly by experimental tests and simulations. The results indicate that with the increase in optical thickness (i. e., increase in concentration), the pattern of the Mueller matrix element  $M_{11}$  enlarges, and the non-polarized optical characteristics intensify. Moreover, the intensity value of the scattering depolarization matrix decomposed by the Mueller matrix goes up, and the scattering depolarization ability is enhanced. This method can distinguish the characteristics of particulate matter media at different concentrations more intuitively and achieve a visualization effect. It provides a theoretical basis and a new test method for the detection of atmospheric particulate matter concentration.

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-05-10; 录用日期: 2021-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(61905025, 61890963)、吉林省科技厅项目(20200201261JC)

通信作者: \*xiao2706@163.com; \*\*susiezhang21@126.com

**Key words** atmospheric optics; Mueller matrix decomposition; oil mist environment; optical thickness; Monte Carlo simulation

**OCIS codes** 010.1290; 010.1310; 290.4020; 290.4210

## 1 引言

偏振光在介质中传播时,其偏振态将发生变化<sup>[1]</sup>,从偏振态的变化中可以提取出光的辐射、反射和透射过程中有关介质和目标的重要信息。通过对散射光偏振态变化的研究发现目标介质的性质已被广泛应用于大气环境、海洋科学、生物科学和医学等许多学科<sup>[2-8]</sup>。然而,仅通过研究偏振态的变化不可能获得介质的全部光学特性,Mueller 矩阵是一种能充分表征介质偏振特性的方法<sup>[9]</sup>,也称为描述光偏振状态的 Stokes 矢量的传递函数<sup>[10]</sup>,因此研究介质的 Mueller 矩阵具有重要意义。

早期人们在对 Mueller 测量方法的研究中,通过改变入射光和出射光的偏振状态来得到目标信息。Hielscher 等<sup>[11]</sup>最先将 Stokes-Mueller 矩阵描述方法引入反向散射实验,对聚苯乙烯悬浊液进行研究,证明了散射光在识别细胞粒子浓度、大小和各向异性因子等方面有重要的研究意义。在此基础上,Bartel 等<sup>[12]</sup>结合蒙特卡罗算法,研究不同粒子和光学性质对反向散射 Mueller 图样的影响,该研究为采用反向散射 Mueller 矩阵表征生物组织系统的研究提供了条件。随着散射 Mueller 矩阵研究范围的不断扩展,Soni 等<sup>[13]</sup>利用散射 Mueller 矩阵分解方法,研究了球状金属纳米粒子的散射光在其表面等离子体共振光谱区的偏振特性,这对基于纳米粒子的生物医学成像以及涉及纳米等离子体的其他应用中的对比度增强具有重要意义。Qian 等<sup>[14]</sup>采用偏振光散射技术,研究由硫酸钠溶液形成的泡沫对 6 种独立 Mueller 矩阵元素的影响。Raman 等<sup>[15]</sup>首次确定了不同颗粒物 (PM) 的完整 Mueller 矩阵和偏振特征,这为气溶胶偏振探测提供了基础。在球形粒子仿真的基础上,He 等<sup>[16]</sup>对蒙特卡罗方法进行了改进,基于球-圆柱体双折射模型对牛骨骼肌进行模拟,该方法可用于描述组织的生理状态。Liu 等<sup>[17]</sup>采用低分辨率穆勒矩阵成像方法,研究了微藻细胞的特征偏振参数,证明特定的偏振参数可用于高通量检测。

以上研究者们大多将 Mueller 矩阵数值模拟方法应用于生物组织、化学溶液等介质中粒子种

类的识别。针对大气环境颗粒物,为了避免目前光谱、色谱、质谱仪器等常用分析方法直接测量出来的偏振参量受其他多种因素的影响且对样品微观结构分析不明确的缺陷,提出将 Mueller 矩阵图样的分析应用于浓度检测中,以油雾粒子为研究对象,研究油雾介质 Mueller 矩阵特性,在 Mie 散射理论的基础上,结合蒙特卡罗算法,实现油雾粒子偏振光学模型的建立。研究环境浓度对 Mueller 图样的影响,并使用 Mueller 矩阵分解方法对图样进行分析,同时开展实验,应用光学厚度表征非稳定性油雾浓度,对仿真正确性进行检验。相比于其他浓度测量方法,通过 Mueller 矩阵图样的比较可更为直观地反映颗粒物浓度的变化,从而可在介质环境中获得比普通光学测试更多的介质特性参量信息,这样可提高测试精度,避免其他浓度测量方法产生误差,为大气介质环境中颗粒物检测提供了新的方法与理论基础。

## 2 Mueller 矩阵的仿真建模

### 2.1 基于蒙特卡罗的 Mueller 矩阵求解

在大气介质中传输的粒子可近似为均匀球形粒子,介质中粒子在散射角  $\theta$  下的 Mueller 矩阵由 Mie 散射理论给出<sup>[18]</sup>:

$$\mathbf{M}(\theta) = \begin{bmatrix} \mu_{11}(\theta) & \mu_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ \mu_{12}(\theta) & \mu_{11}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33}(\theta) & \mu_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -\mu_{34}(\theta) & \mu_{33}(\theta) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

设入射光的 Stokes 矢量为  $\mathbf{S}_0$ , 经过一次散射后的 Stokes 矢量为  $\mathbf{S}_1$ , 则有

$$\mathbf{S}_1 = \mathbf{R}(-\phi)\mathbf{M}(\theta)\mathbf{R}(\gamma)\mathbf{S}_0, \quad (2)$$

式中: $\phi$  和  $\gamma$  分别为入射 Stokes 矢量从参考平面变换到散射平面的角度和发生散射后又转回参考平面的角度; $\mathbf{R}(\phi)$  和  $\mathbf{R}(\gamma)$  分别是  $\phi$  和  $\gamma$  两个角度下生成的旋转变换矩阵,可以表示为

$$\mathbf{R}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & \sin 2\phi & 0 \\ 0 & -\sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

或

$$\mathbf{R}(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\gamma & \sin 2\gamma & 0 \\ 0 & -\sin 2\gamma & \cos 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

发生  $n$  次散射后, 出射光  $\mathbf{S}_n$  与入射光  $\mathbf{S}_0$  的 Stokes 矢量的关系可表示为

$$\mathbf{S}_n = \mathbf{R}(-\phi_n)\mathbf{M}(\theta_n)\mathbf{R}(\gamma_n)\cdots \mathbf{R}(-\phi_1)\mathbf{M}(\theta_1)\mathbf{R}(\gamma_1)\mathbf{S}_0. \quad (5)$$

图 1 为光在介质中传输的示意图, 为了简化研究问题, 针对浓度对 Mueller 矩阵图案的影响, 把介质视为均匀同性球形粒子,  $\mathbf{S}_n$  和  $\mathbf{S}_0$  代表出射光和入射光的 Stokes 矢量,  $L$  是传输距离。

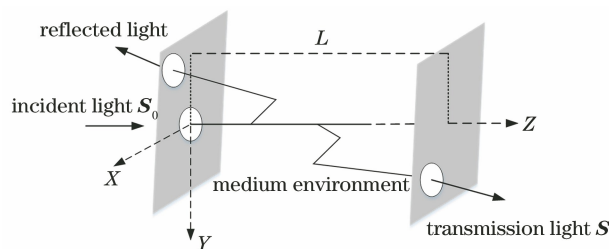


图 1 光在介质中的传输过程

Fig. 1 Transmission of light in medium

若入射光以水平偏振光入射, 其 Stokes 矢量  $\mathbf{S}_0$  为  $[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ , 光线经过介质的散射, 遇到透光轴方向沿垂直方向的检偏器, 最后得到的光的 Stokes 矢量设为  $\mathbf{S}$ , 则有

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2\mathbf{M}_1\mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} + M_{12} - M_{21} - M_{22} \\ -M_{11} - M_{12} + M_{21} + M_{22} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{M}_1$  为待测器件的 Mueller 矩阵;  $\mathbf{M}_2$  是透光轴沿着垂直方向的检偏器的 Mueller 矩阵。

用  $S_{ij}$  表示不同的偏振态组合, 在下标中,  $i$  代表入射光的偏振态,  $j$  代表出射光的偏振态。水平偏振光用数字 1 来表示, 垂直偏振光用数字 2 表示,

+45°和-45°线偏振光分别用数字 3 和 4 表示, 左旋圆偏光和右旋圆偏光分别用数字 5 和 6 表示。当以水平偏振光入射、垂直偏振光出射时, (6) 式中出射光强  $I$  由  $S_{12}$  表示, 即  $S_{12} = M_{11} + M_{12} - M_{21} - M_{22}$ 。全部起偏和检偏的 36 种组合如表 1 所示。

表 1 起偏、检偏组合

Table 1 Combinations of polarization generation and polarization detection

Polarization	Horizontal	Vertical	+45°	-45°	Left-hand	Right-hand
Horizontal	$M_{11} + M_{21}$	$M_{11} + M_{12}$	$M_{11} + M_{31}$	$M_{11} - M_{31}$	$M_{11} + M_{12}$	$M_{11} - M_{41}$
	$+M_{12} + M_{22}$	$-M_{21} - M_{22}$	$+M_{12} + M_{32}$	$+M_{12} - M_{32}$	$+M_{41} + M_{42}$	$+M_{12} - M_{42}$
Vertical	$M_{11} + M_{21}$	$M_{11} - M_{21}$	$M_{11} + M_{31}$	$M_{11} - M_{31}$	$M_{11} - M_{12}$	$M_{11} - M_{41}$
	$-M_{12} - M_{22}$	$-M_{12} + M_{22}$	$-M_{12} - M_{32}$	$-M_{12} + M_{32}$	$+M_{41} - M_{42}$	$-M_{12} + M_{42}$
+45°	$M_{11} + M_{21}$	$M_{11} - M_{21}$	$M_{11} + M_{31}$	$M_{11} - M_{31}$	$M_{11} + M_{13}$	$M_{11} - M_{41}$
	$+M_{13} + M_{23}$	$+M_{13} - M_{23}$	$+M_{13} + M_{33}$	$+M_{13} - M_{33}$	$+M_{41} + M_{43}$	$+M_{13} - M_{43}$
-45°	$M_{11} + M_{21}$	$M_{11} - M_{21}$	$M_{11} + M_{31}$	$M_{11} - M_{31}$	$M_{11} + M_{41}$	$M_{11} - M_{41}$
	$-M_{13} - M_{23}$	$-M_{13} + M_{23}$	$-M_{13} - M_{33}$	$-M_{13} + M_{33}$	$-M_{13} - M_{43}$	$-M_{13} + M_{43}$
Left-hand	$M_{11} + M_{21}$	$M_{11} - M_{21}$	$M_{11} + M_{31}$	$M_{11} - M_{31}$	$M_{11} + M_{41}$	$M_{11} - M_{41}$
	$-M_{14} - M_{24}$	$-M_{14} + M_{24}$	$-M_{14} - M_{34}$	$-M_{14} + M_{34}$	$-M_{14} - M_{44}$	$-M_{14} + M_{44}$
Right-hand	$M_{11} + M_{21}$	$M_{11} - M_{21}$	$M_{11} + M_{31}$	$M_{11} - M_{31}$	$M_{11} + M_{14}$	$M_{11} - M_{41}$
	$+M_{14} + M_{24}$	$+M_{14} - M_{24}$	$+M_{14} + M_{34}$	$+M_{14} - M_{34}$	$+M_{41} + M_{44}$	$+M_{14} - M_{44}$

求解表 1 中数据, 可得待测介质的 Mueller 矩阵:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} = \\
 \frac{1}{4} &\begin{bmatrix} S_{11} + S_{12} + S_{21} + S_{22} & S_{11} + S_{12} - S_{21} - S_{22} & S_{31} + S_{32} - S_{43} - S_{44} & S_{61} + S_{62} - S_{51} - S_{52} \\ S_{11} + S_{21} - S_{12} - S_{22} & S_{11} + S_{22} - S_{12} - S_{21} & S_{31} + S_{42} - S_{32} - S_{41} & S_{61} + S_{52} - S_{62} - S_{51} \\ S_{13} + S_{23} - S_{14} - S_{24} & S_{13} + S_{24} - S_{14} - S_{23} & S_{33} + S_{44} - S_{34} - S_{43} & S_{63} + S_{54} - S_{64} - S_{53} \\ S_{25} + S_{15} - S_{56} - S_{66} & S_{15} + S_{26} - S_{25} - S_{16} & S_{35} + S_{46} - S_{45} - S_{36} & S_{56} + S_{65} - S_{66} - S_{55} \end{bmatrix}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

### 2.2 Mueller 矩阵极化分解方法

现实中测量出来的 Mueller 矩阵十分复杂,包含噪声等干扰信息,为了得到清晰的偏振成像图像,有必要使用光学理论和数学方法对 Mueller 矩阵进行计算分析。其中,由 Lu 等<sup>[19]</sup>提出的 Mueller 矩阵分解法是较为常见的方法,退偏的 Mueller 矩阵可分解为二向色性矩阵  $\mathbf{M}_D$ 、散射退偏矩阵  $\mathbf{M}_\Delta$  和相位延迟矩阵  $\mathbf{M}_R$  的乘积:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_\Delta \mathbf{M}_R \mathbf{M}_D, \quad (8)$$

其中二向色性矩阵  $\mathbf{M}_D$  由 Mueller 矩阵第一行决定:

$$\mathbf{M}_D = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{D}^T \\ \mathbf{D} & m_D \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{D}$  是双向衰减向量。对于  $\mathbf{M}_D$ ,子矩阵  $m_D$  可以写为

$$m_D = \sqrt{1 - \mathbf{D}^2} \mathbf{I} + (1 - \sqrt{1 - \mathbf{D}^2}) \mathbf{D} \mathbf{D}^T, \quad (10)$$

式中: $\mathbf{I}$  是一个三阶的单位阵; $\mathbf{D}$  可以表示为

$$\mathbf{D} = [m_{12} \quad m_{13} \quad m_{14}]^T. \quad (11)$$

退偏矩阵可以写为

$$\mathbf{M}_\Delta = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{P}_\Delta & m_\Delta \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: $\mathbf{P}_\Delta$  代表退偏器件的偏振向量,可以写为

$$\mathbf{P}_\Delta = \frac{\mathbf{P} - m\mathbf{D}}{1 - \mathbf{D}^2}. \quad (13)$$

定义矩阵  $\mathbf{M}'$  为

$$\mathbf{M}' = \mathbf{M} \mathbf{M}_D^{-1}, \quad (14)$$

则把矩阵  $\mathbf{M}'$  分解为退偏矩阵和相位延迟矩阵:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_\Delta \mathbf{M}_R &= \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{P}_\Delta & m_\Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0} & m_R \end{bmatrix} = \\
 \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{P}_\Delta & m_\Delta m_R \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{P}_\Delta & m' \end{bmatrix} = \mathbf{M}'. \quad (15)
 \end{aligned}$$

将原来的  $4 \times 4$  Mueller 矩阵的分解简化为  $3 \times 3$  矩阵分解,令  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  是  $m'm'^T$  的三个特征根,

则  $m_\Delta$  有  $\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \sqrt{\lambda_3}$  三个特征根,因此可以得到  $m_\Delta$  的表达式为

$$\begin{aligned}
 m_\Delta &= \pm [m'm'^T + (\sqrt{\lambda_1 \lambda_2} + \sqrt{\lambda_2 \lambda_3} + \sqrt{\lambda_3 \lambda_1}) \mathbf{I}]^{-1} \times \\
 &[\sqrt{\lambda_1} + \sqrt{\lambda_2} + \sqrt{\lambda_3}] m'm'^T + \sqrt{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

(16) 式中的正负号由  $m'$  的行列式决定,  $\mathbf{M}_\Delta$  根据 (13)、(16) 式计算得出,因此矩阵的退偏系数  $\Delta$  可以表示为

$$\Delta = 1 - \frac{|\text{tr}(m_\Delta)|}{3} = 1 - \frac{|\text{tr}(\mathbf{M}_\Delta - 1)|}{3}, \quad (17)$$

式中:tr 是矩阵的迹,为对角线元素之和。

$\mathbf{M}_R$  则可以表示为

$$\mathbf{M}_R = \mathbf{M}_\Delta^{-1} \mathbf{M}'. \quad (18)$$

对于总的相位延迟值  $R$ ,它可以由分解出的相位延迟矩阵  $\mathbf{M}_R$  计算得到:

$$R = \arccos \left[ \frac{\text{tr}(\mathbf{M}_R)}{2} - 1 \right]. \quad (19)$$

根据以上分解,可以把相位延迟矩阵和二向色性矩阵当成非退偏矩阵。前者仅改变入射光不同偏振分量之间的相位差,后者仅改变入射光不同偏振分量之间的振幅差。

## 3 Mueller 矩阵图样测试实验

### 3.1 实验测试装置

图 2(a)所示为 Mueller 矩阵图样测试实验的原理图,将激光器(1)发出的光经过衰减片(2)进行衰减,再经过滤光片(3)进行滤光,之后经过偏振片(4)进行起偏,通过调节偏振片的角度可以得到想要的线偏光,1/4 波片(5)的作用是产生圆偏光,可根据需要将其旋入或旋出光路,得到的偏振光通过准直扩束器(6)进入油雾模拟环境(7)。实验前,通过超声雾化机(型号:Z-3000 II,台湾安特利公司)对甘油(可见光波段下折射率为 1.47)进行超声波雾



化,产生人造油雾介质环境,油雾发生装置每分钟可以释放 18000 inch<sup>3</sup> (1 inch=2.54 cm) 油雾,从油雾模拟环境(7)底部注入,并通过底部风扇系统的搅拌使油雾环境中粒子浓度保持均匀,根据实验要求,可以定量模拟不同浓度的油雾状态,并保

证油雾的稳定状态,出射光通过 1/4 波片(8)和偏振片(9)到达 CCD 相机(10),最终由计算机(11)进行分析处理,图 2(b)所示为 Mueller 矩阵图样测试实验的实物图。



图 2 Mueller 矩阵图样测试实验原理图。(a)原理示意图;(b)实物图

Fig. 2 Experimental schematic diagram of Mueller matrix pattern test. (a) Principle diagram; (b) physical photo

### 3.2 Mueller 矩阵图样测试

实验中,由于油雾浓度的不可控性,采取用光学厚度来表征油雾浓度的方式进行实验,用不同的光学厚度来代表不同充入时间油雾的浓度。根据比尔定律,以光强为  $I_0$  的入射光进行入射,出射光强  $I$  和入射光强  $I_0$  的关系为

$$I = I_0 \exp(-\mu_c L) = I_0 \exp(-\tau), \quad (20)$$

式中: $\tau$  为光学厚度, $\tau = \mu_c L$ ,  $L$  是介质的厚度, $\mu_c$  为消光系数。通过(20)式可确定透过率与光学厚度的关系为

$$T = I/I_0 = \exp(-\tau). \quad (21)$$

通过控制每次油雾模拟系统中充入油雾的时间来控制介质光学厚度,即浓度。基于本课题组前期实验研究基础可知油雾粒子半径为 0.75  $\mu\text{m}$ 、折射率为 1.47<sup>[20]</sup>,在充油雾 0.5~4 s 内,所得光学厚度如图 3 所示。

本文选取实验时间为充油雾后 2~6 min,即油雾状态达到稳定阶段。根据表 1 中的 36 种组合,旋转偏振片角度得到水平偏振光、垂直偏振光和 +45°/-45°偏振光,旋入或旋出 1/4 波片可以得到圆偏振光。相应地,调节检偏系统中偏振片和 1/4 波片角度,以达到检测 Mueller 矩阵图样的目的。

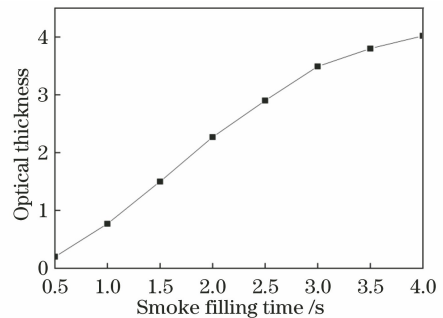


图 3 光学厚度与充烟时间的关系曲线

Fig. 3 Relationship between optical thickness and smoke filling time

针对每种浓度进行测试后,开启油雾箱排空装置,排空油雾,充油时间分别选择 1, 2, 4 s, 对应低、中、高三不同浓度,相对应的光学厚度分别为 0.77, 2.27, 4.0。重复以上发射、接收系统调节和 CCD 相机采集步骤,最后通过计算机进行处理分析。

## 4 仿真和实验结果

### 4.1 仿真结果

在蒙特卡罗仿真中,选择可见光波长为 532 nm,模拟光子个数为  $10^7$ ,油雾气溶胶球形粒子半径为 0.75  $\mu\text{m}$ ,折射率为 1.47。图 4(a)、(b)、(c)

分别为光学厚度为 0.77、2.27 和 4 时的 Mueller 矩阵仿真图。

#### 4.2 实测结果

根据(7)式对 36 组起偏、检偏组合测试结果进行 Mueller 矩阵图样计算,结果如图 5 所示。图 5

(a)、(b)、(c)分别为低浓度、中浓度、高浓度时的实测 Mueller 矩阵图。在不同的浓度下,Mueller 矩阵图形对称情况基本相似,其变化规律和模拟结果有很好的 consistency。

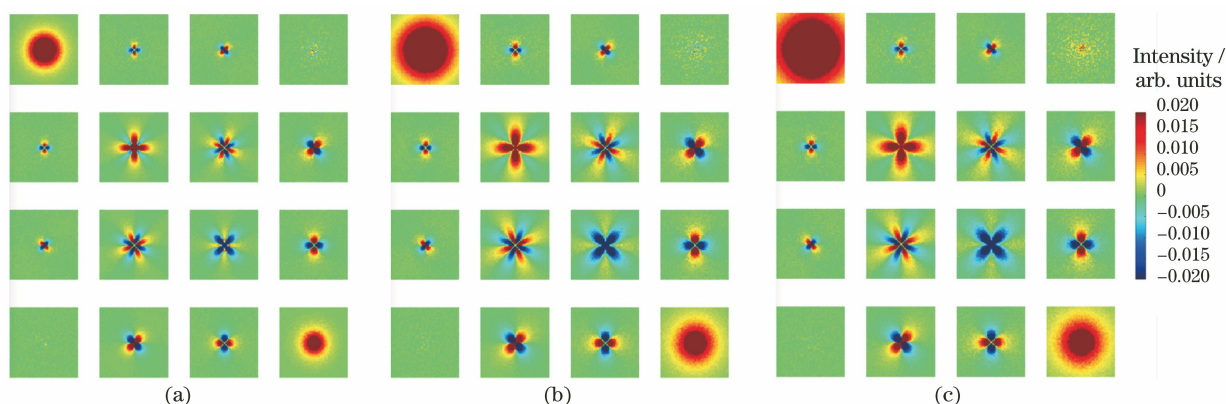


图 4 Mueller 矩阵仿真图。(a)光学厚度为 0.77;(b)光学厚度为 2.27;(c)光学厚度为 4

Fig. 4 Simulation diagrams of Mueller matrix. (a) Optical thickness is 0.77; (b) optical thickness is 2.27; (c) optical thickness is 4

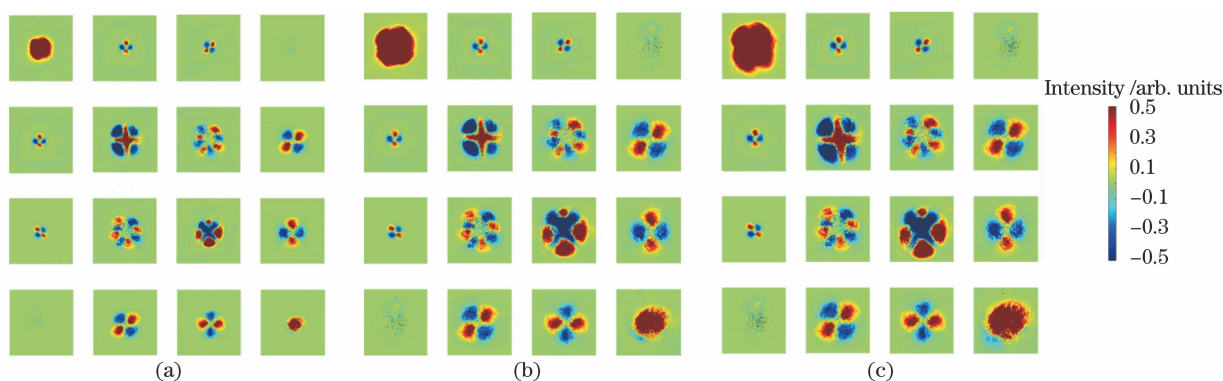


图 5 Mueller 矩阵实测图。(a)低浓度;(b)中浓度;(c)高浓度

Fig. 5 Measured diagrams of Mueller matrix. (a) Low concentration; (b) medium concentration; (c) high concentration

#### 4.3 仿真与实测结果分析

油雾粒子是均匀同性球形散射粒子,具有非常明显的对称性。从图 4 和图 5 的仿真与实测结果中可以看出,油雾粒子多次散射的 Mueller 矩阵中的 16 个元素图像并不是独立存在的,具有旋转关系。 $M_{11}$  和  $M_{44}$  的图样都是同心花瓣形状; $M_{12}$  和  $M_{21}$  具有相同的花瓣分布,沿 Y 轴方向花瓣值为正,沿 X 轴方向花瓣值为负,而且花瓣强度绝对值相等; $M_{13}$  和  $M_{31}$ 、 $M_{23}$  和  $M_{32}$ 、 $M_{34}$  和  $M_{43}$  极性是相反的。矩阵中其他元素可以通过旋转得到。比如  $M_{12}$  在旋转  $45^\circ$  后变为  $M_{13}$ , $M_{32}$  在旋转  $45^\circ$  后变为  $M_{23}$ 。 $M_{14}$  和  $M_{41}$  没有较明显的花瓣分布,这一结果和之前研究者的结论<sup>[21]</sup>一致,证明了仿真结果的正确性。对于不同光学厚度下的油雾介质,可以从

Mueller 矩阵中得出规律。从  $M_{11}$  的分布可以获取散射体系中的散射系数和吸收系数信息,同时其可表征油雾粒子的非偏振光学特征。从图 4 中可以看出,随着光学厚度的增加, $M_{11}$  不断增大,说明随着浓度的增加,介质内散射和吸收系数不断增大,偏振光转化为非偏振光,非偏振光学特征不断增强; $M_{44}$  的变化与散射体大小密切相关,在图 4 中可以看出,同一油雾散射体粒径下  $M_{44}$  的变化不大。

为了对油雾介质 Mueller 矩阵各元素进行定量分析,需要将油雾粒子 Mueller 矩阵中各元素的二维图形转换为一维强度分布曲线进行圆周展开处理。以入射点为圆心、一定长度为半径逆时针画圆,为了覆盖全部的图样信息,选择 5 pixel 作为半径,其中垂直向上方向为  $0^\circ$ ,垂直向下方向为

180°,取此圆周上的像素值分别对应于 0°~360°的角度值在直角坐标系上展开。由于二向色性和线性相位延迟是在各向异性系统中才存在的现象,均匀同性球形油雾介质不能产生二向色性和相位延迟,只能影响 Mueller 矩阵分解的散射退偏项<sup>[22]</sup>,因此只对低、中、高浓度下的  $M_{22}$ 、 $M_{33}$  和  $M_{44}$  一维强度分布进行分析,如图 6 所示。图 6

中,随着光学厚度的增加,即探测光子的散射次数增加,退偏项  $M_{22}$ 、 $M_{33}$  和  $M_{44}$  随之增大,这是由于随着散射次数的增加,光子平均自由程增加,光子的偏振行为随着散射行为的复杂性增大而变得更为随机,从而产生退偏现象。通过定量分析也可看出,随着光学厚度的增大,该退偏现象逐渐趋于稳定。

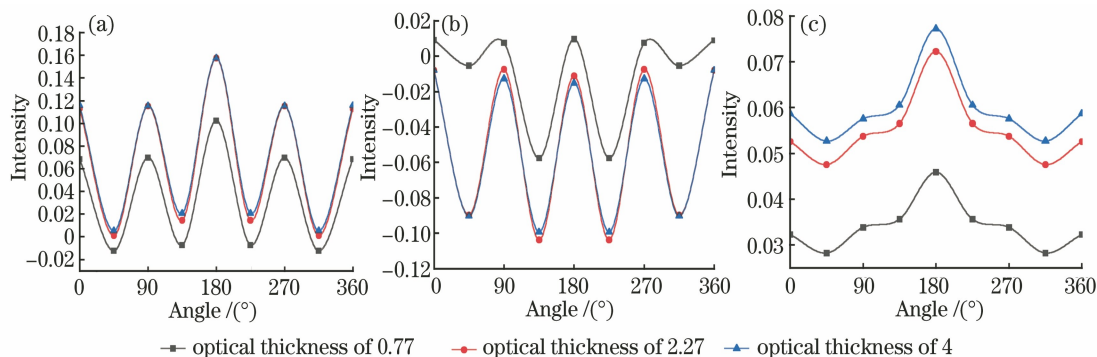


图 6 一维强度图。(a)  $M_{22}$ ; (b)  $M_{33}$ ; (c)  $M_{44}$

Fig. 6 One-dimensional intensity diagrams. (a)  $M_{22}$ ; (b)  $M_{33}$ ; (c)  $M_{44}$

分别对光学厚度为 0.77, 2.27, 4 的油雾介质 Mueller 矩阵图像进行分解分析。通过改变光学厚度来分析散射退偏规律,图 7(a)、(b)、(c)分别为光学厚度为 0.77, 2.27, 4 时模拟得到的油雾粒子 Mueller 矩阵分解的散射退偏图样,其中生成的图像大小为 140 pixel×140 pixel;在图 7 中选择水平

方向 51 pixel(即 40~90 pixel)的宽度,计数点的总数是 7140,这可以很好地覆盖中心图案,并且避免了选择更多像素对分布造成的干扰。为了定量分析该区域的散射退偏图样,绘制光学厚度为 0.77, 2.27, 4 时的模拟 Mueller 矩阵分解的散射退偏图样水平强度分布曲线,如图 8 所示。

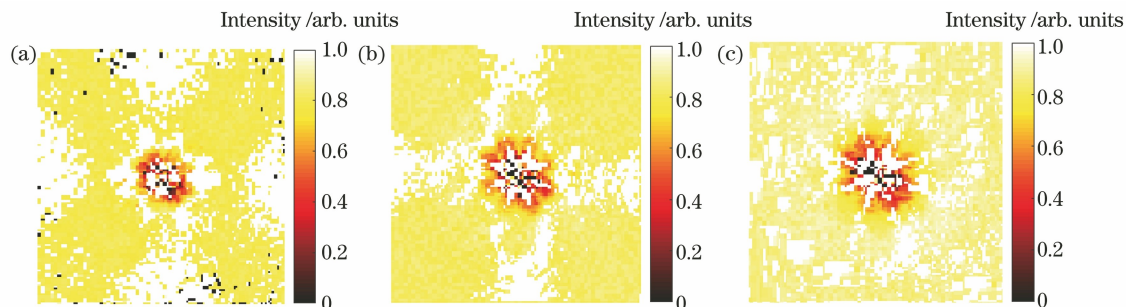


图 7 Mueller 矩阵散射退偏图。(a)光学厚度为 0.77; (b)光学厚度为 2.27; (c)光学厚度为 4

Fig. 7 Scattering depolarization diagrams of Mueller matrix. (a) Optical thickness is 0.77; (b) optical thickness is 2.27; (c) optical thickness is 4

对图 7 中所选整个区域中像素点进行求和处理,计算散射退偏强度,得到光学厚度为 0.5 的散射退偏强度值为 6594.6,光学厚度为 2 的散射退偏强度值为 6767.1,光学厚度为 4 的散射退偏强度值为 6886.3。从强度值的变化可以看出,随着光学厚度的增加,即浓度的增加,光子多次散射的概率增大,散射过程中丢失的偏振信息增多。因此,随着浓度的增加,油雾粒子退偏增强并趋于稳定。

选择低浓度、中浓度和高浓度时的油雾球形粒

子 Mueller 矩阵图像进行分解分析,处理方式和模拟时一致。图 9(a)、(b)、(c)分别为低浓度、中浓度和高浓度时的实测 Mueller 矩阵分解的散射退偏图样,图 10(a)、(b)、(c)分别为低浓度、中浓度和高浓度时的实测 Mueller 矩阵分解的散射退偏图样水平强度分布曲线。对图 9 中所选整个区域中的像素点进行求和处理,得到低浓度的散射退偏强度值为 7465.2,中浓度的散射退偏强度值为 8043.6,高浓度的散射退偏强度值为 8590.1。从数据可以看出,



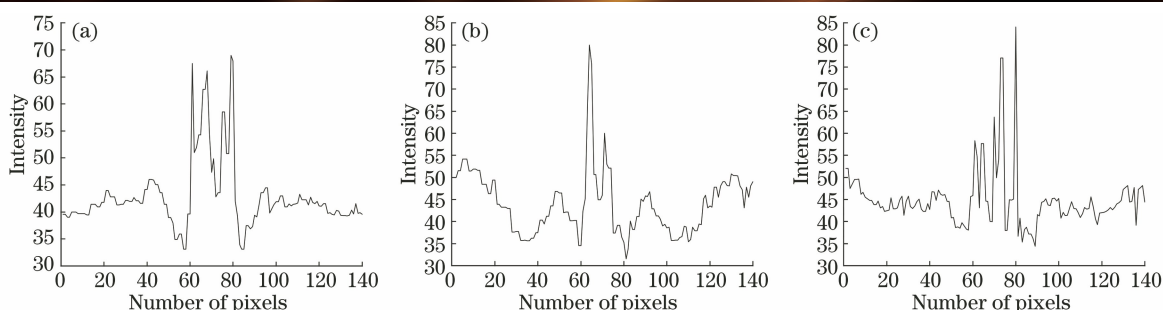


图 8 散射退偏图样的水平强度分布曲线。(a)光学厚度为 0.77; (b)光学厚度为 2.27; (c)光学厚度为 4  
Fig. 8 Horizontal intensity distribution curves of scattering depolarization patterns. (a) Optical thickness is 0.77; (b) optical thickness is 2.27; (c) optical thickness is 4

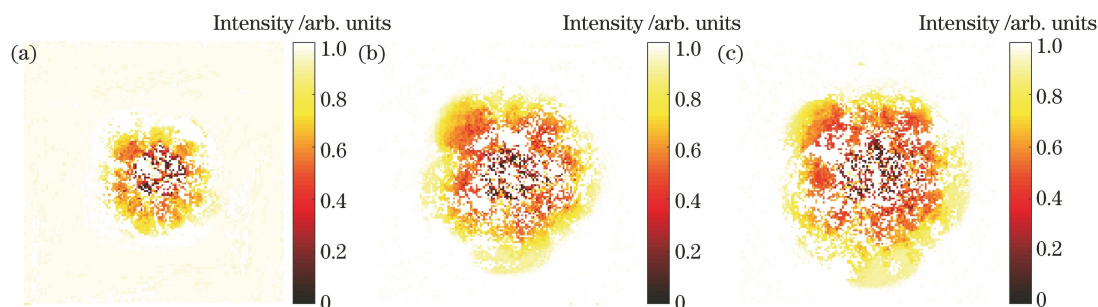


图 9 Mueller 矩阵散射退偏图。(a)低浓度;(b)中浓度;(c)高浓度  
Fig. 9 Scattering depolarization diagrams of Mueller matrix. (a) Low concentration; (b) medium concentration; (c) high concentration

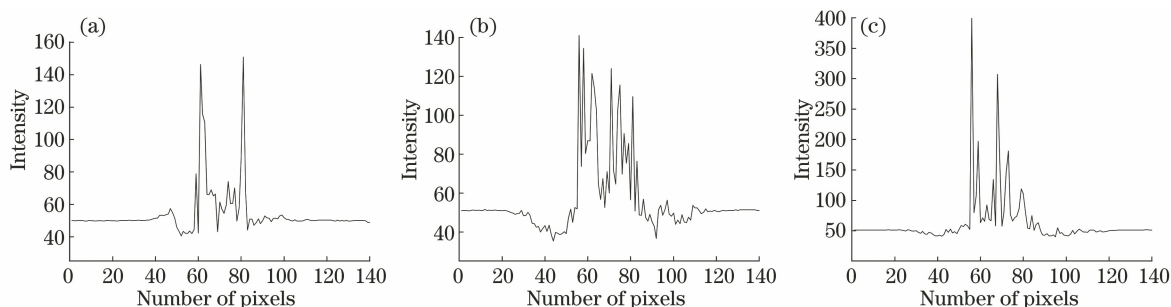


图 10 散射退偏图样的水平强度分布曲线。(a)低浓度;(b)中浓度;(c)高浓度  
Fig. 10 Horizontal intensity distribution curves of scattering depolarization patterns. (a) Low concentration; (b) medium concentration; (c) high concentration

随着浓度的增加,散射退偏值也随之增加,仿真过程中不同的粒子个数及实测过程中烟雾的不稳定性,导致测试数据与仿真数据存在差距,但二者的变化规律相同,验证了模型的正确性。

## 5 结 论

由于大气环境复杂多变,以往研究者较少将 Mueller 矩阵应用到大气颗粒物多次散射的研究中。以油雾粒子为研究对象,在经典 Mie 散射理论基础上,建立蒙特卡罗偏振散射模型,采用 Stokes-Mueller 矩阵分析方法研究各向同性的油雾粒子球体系,并使用 Mueller 矩阵分解方法对图样进行分

析。利用光学厚度表征油雾粒子浓度,将实验测试和模拟仿真有机结合,验证了模型的正确性。结果表明:1)Mueller 矩阵能够完整地表征大气粒子介质的偏振特性,对于不同光学厚度下的油雾粒子,随着光学厚度的增加, $M_{11}$  随之增大,说明非偏振光学特征不断增强;2)通过对 Mueller 矩阵的分解,可得出光学厚度对散射退偏的影响,即光学厚度越大,浓度越大,则油雾粒子散射退偏能力越强。因此,研究 Mueller 矩阵的变化,可以更直观地判别不同浓度的油雾介质特征,其可应用于大气颗粒物浓度检测。实现颗粒物的浓度检测对大气污染监测具有重要意义,且为大气颗粒物浓度的检测提供了理论基础及



测试方法。

另外, Mueller 矩阵的测试中需要同时完成 36 组测试,具有一定的复杂性,在下一步的研究工作中,重点考虑采用偏振相机替代传统相机与偏振片检偏组合的方式,来简化测试光路和设备,提高测量精度。

### 参 考 文 献

- [1] Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, et al. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3): 598-615.
- [2] Li Z Y, Liu Z H, Zou P, et al. Prelaunch calibration and ground verification test of spaceborne particulate observing scanning polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0312002.  
李朕阳, 刘振海, 邹鹏, 等. 星载偏振扫描仪发射前定标及地面验证实验 [J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0312002.
- [3] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Simulation research on sky polarization characteristics under complicated marine environment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2201001.  
张肃, 战俊彤, 付强, 等. 复杂海洋环境下天空光偏振特性模拟研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2201001.
- [4] Ye K T, Ji' E M S, Zhai S J. Influence of particle shape on polarization characteristics of backscattering light in turbid media [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0405004.  
叶坤涛, 吉俄木沙, 翟盛杰. 粒子形态对浑浊介质后向散射光偏振特性的影响 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0405004.
- [5] Guo S, Su H, Huang X C, et al. Research progress in optical methods for noninvasive blood glucose detection [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1235-1248.  
郭帅, 苏杭, 黄星灿, 等. 光学无创血糖浓度检测方法的研究进展 [J]. *中国光学*, 2019, 12(6): 1235-1248.
- [6] Shen Y X, Yao Y, He H H, et al. Mueller matrix polarimetry: a label-free, quantitative optical method for clinical diagnosis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207001.  
沈元星, 姚悦, 何宏辉, 等. 非标记、定量化穆勒矩阵偏振成像在辅助临床诊断中的应用 [J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207001.
- [7] Cao Y X, Zhang G Q, Lu Y N. Optical and mechanical design of polarization filtered dermoscopy [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 273-280.  
曹逸兴, 张国旗, 卢勇男. 基于偏振滤波的皮肤镜光学和机械设计 [J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 273-280.
- [8] Ye K T, Xia X T, Ji' E M S. Scattering polarization characteristics of white blood cells disturbed by extracellular fluid [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051701.  
叶坤涛, 夏雪婷, 吉俄木沙. 受细胞外液扰动的白细胞散射偏振特征 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051701.
- [9] Qi J, Elson D S. Mueller polarimetric imaging for surgical and diagnostic applications: a review [J]. *Journal of Biophotonics*, 2017, 10(8): 950-982.
- [10] Spandana K U, Mahato K K, Mazumder N. Polarization-resolved Stokes-Mueller imaging: a review of technology and applications [J]. *Lasers in Medical Science*, 2019, 34(7): 1283-1293.
- [11] Hielscher A H, Mourant J R, Bigio I J. Influence of particle size and concentration on the diffuse backscattering of polarized light from tissue phantoms and biological cell suspensions [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 125-135.
- [12] Bartel S, Hielscher A H. Monte Carlo simulations of the diffuse backscattering Mueller matrix for highly scattering media [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(10): 1580-1588.
- [13] Soni J, Purwar H, Ghosh N. Quantitative polarimetry of plasmon resonant spheroidal metal nanoparticles: a Mueller matrix decomposition study [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 1599-1607.
- [14] Qian S Y, Chen J J J. Experimental investigation of liquid foams by polarised light scattering technique via the Mueller matrix [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 104: 189-200.
- [15] Raman P, Fuller K A, Gregory D A. Polarization signatures of airborne particulates [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(7): 074106.
- [16] He H H, He C, Chang J T, et al. Monitoring microstructural variations of fresh skeletal muscle tissues by Mueller matrix imaging [J]. *Journal of Biophotonics*, 2017, 10(5): 664-673.
- [17] Liu Z D, Liao R, Wan J C, et al. Polarization staining and high-throughput detection of marine microalgae using single cell average Mueller matrices [J]. *Optik*, 2019, 180: 84-90.
- [18] Wolf S, Voshchinnikov N V. Mie scattering by ensembles of particles with very large size parameters [J]. *Computer Physics Communications*, 2004, 162(2): 113-123.

- [19] Lu S Y, Chipman R A. Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(5): 1106-1113.
- [20] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Effects of environment variation of glycerol smoke particles on the persistence of linear and circular polarization[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20236-20248.
- [21] Hielscher A H, Eick A A, Mourant J R, et al. Diffuse backscattering Mueller matrices of highly scattering media[J]. Optics Express, 1997, 1(13): 441-453.
- [22] Wang Y F, Huang Y, Zeng N, et al. Study on the influence of optical absorption on polarization characterization of tissues[J]. Journal of Biomedical Optics, 2018, 23(12): 121609.