

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508863

基于 Mueller 矩阵的气溶胶偏振识别方法

李玉成¹ 张 扬¹ 时俊杰¹ 伍逸枫¹ 程 铭²

(1. 空军工程大学航空机务士官学校 信阳 464000; 2. 中国人民解放军 93066 部队 牡丹江 157000)

摘 要:针对大气气溶胶类型精确识别与浓度定量反演面临的挑战,提出一种基于 Mueller 矩阵图样分析的气溶胶偏振特性识别方法。以光学厚度作为浓度等效参数,通过仿真与实验相结合,系统研究了烟雾(不规则、强吸收)与水雾(球形、弱吸收)2 类典型粒子在 0.77、2.27、4 等光学厚度下的偏振散射与退偏特性演变规律。结果表明,光学厚度是主导偏振与退偏特性宏观演变的关键参数,随着其从 0.77 增加至 4.00,总散射强度(M_{11})与圆偏振保持能力(M_{44})显著增强,散射退偏强度增幅超过 75%。粒子的微观物理属性是决定其偏振响应差异的本质因素,在相同光学厚度下,水雾粒子的 M_{44} 值较烟雾粒子高出约 76%,且其散射图像因离散液滴分布呈现独特的破碎感纹理,而关键矩阵元素的角度分布特征(如 M_{11} 与 M_{44} 在 180° 方向的峰值)则表现出良好的稳健性,可作为有效的识别依据。实验验证显示,关键参数的实测值与仿真值相对误差在 6% 以内,验证了所提方法的可靠性,Mueller 矩阵分析方法能够同步、敏感地提取由粒子微观结构与介质宏观浓度共同调制的偏振信息,为基于偏振遥感的大气气溶胶高精度识别与反演提供了一种新的有效途径。

关键词: Mueller 矩阵;偏振特性;退偏特性;光学厚度;气溶胶识别

中图分类号: O438.1;TN27 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.5035;520.6040

Polarimetric identification of aerosols using the mueller matrix

Li Yucheng¹ Zhang Yang¹ Shi Junjie¹ Wu Yifeng¹ Cheng Ming²

(1. Aviation Maintenance NCO Academy of Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China;

2. The 93066 Unit of the People's Liberation Army of China, Mudanjiang 157000, China)

Abstract: To address the challenges in the precise identification and quantitative concentration retrieval of atmospheric aerosols, this study proposes an aerosol identification method based on Mueller matrix pattern analysis, focusing on polarization characteristics. Using optical depth as a concentration-equivalent parameter, the evolution of polarization scattering and depolarization characteristics for two typical particle types—smoke (irregular, strongly absorbing) and water mist (spherical, weakly absorbing)—is systematically investigated through combined simulation and experiment at optical depths of 0.77, 2.27, and 4. The results indicate that optical depth is the key parameter governing the macroscopic evolution of polarization and depolarization properties. As it increases from 0.77 to 4.00, the total scattering intensity (M_{11}) and circular polarization preservation capability (M_{44}) increase significantly, with the scattered depolarization intensity rising by more than 75%. The microphysical properties of the particles are the fundamental factor determining differences in their polarization response. At the same optical depth, the M_{44} value for water mist particles is approximately 76% higher than that for smoke particles, and their scattering images exhibit a unique “fragmented” texture due to discrete droplet distribution. Furthermore, the angular distribution features of key matrix elements (e.g., the peaks of M_{11} and M_{44} at 180°) demonstrate good robustness and can serve as effective indicators for identification. Experimental validation shows that the relative error between measured and simulated key parameters is within 6%, confirming the reliability of the method. This study demonstrates that Mueller matrix analysis can simultaneously and sensitively extract polarization information modulated by both particle microstructure and medium concentration, providing a new and effective approach for the high-precision identification and retrieval of atmospheric aerosols based on polarimetric remote sensing.

Keywords: Mueller matrix; polarization characteristics; depolarization properties; optical thickness; aerosol identification.

0 引言

偏振光与物质相互作用时发生的偏振态变化是表征介质光学特性的重要信息源,这一现象在大气遥感、海洋探测、生物医学等领域展现出广泛应用前景^[1-7]。然而,传统偏振测量方法在解析复杂介质的微观结构特性方面存在局限。Mueller 矩阵作为描述光偏振态变换的完备数学工具,通过 Stokes 矢量的线性变换关系完整记录介质的偏振特性信息^[8-9],为深入揭示介质微观结构提供了新的技术途径。

在 Mueller 矩阵研究领域,国内外学者已取得一系列重要进展。在基础测量与表征方面,Hielscher 等^[10]开创性地将 Stokes-Mueller 矩阵方法引入反向散射研究,通过聚苯乙烯悬浊液实验验证了散射光在粒子特性识别中的价值。Montaño 等^[11]在湍流环境下实现了单静态光学系统的空间分辨 Mueller 矩阵测量,揭示了反射器偏振调制与湍流随机调制的耦合效应。在材料表征与纳米测量领域,Jiang 等^[12]通过频域滤波结合蒙特卡洛方法,系统分析了金属与介质粗糙表面对入射光的偏振调制特性。Jung 等^[13]将 Mueller 矩阵光谱椭偏技术与深度学习相结合,实现了对一维光栅纳米结构尺寸参数的快速精确反演。在生物医学应用方面,Zheng 等^[14]解决了多层双折射微结构生物组织表征中的线性双折射方位角参数偏差问题,提出了有效的校正策略。Pardo 等^[15]针对生物组织检测中的镜面反射干扰,开发了基于近交叉偏振配置的新型光学成像方法。Slikboer 等^[16]则采用时间分辨 Mueller 偏振测量技术,实现了对等离子体作用下晶体电光响应的实时观测。

这些研究共同推动了 Mueller 矩阵技术在理论方法、仪器开发和应用拓展等方面的持续发展,为材料科学、生物医学和光学遥感等领域的精确测量提供了有力的技术支撑。但在大气气溶胶研究领域仍面临挑战,现有研究多局限于单一类型气溶胶的散射特性分析,缺乏对不同类型气溶胶在连续浓度变化条件下的系统性研究。传统的光谱、色谱等分析方法在复杂大气环境中易受干扰,且难以直接获取颗粒物的微观结构参数。

实际大气气溶胶是由来源多样、物理化学特性各异的复杂混合物组成,其在粒径、形状、复折射率及混合状态上的显著差异,共同导致了其光学特性,尤其是偏振与退偏特性的不同^[17-18]。例如,非球形的沙尘粒子是重要的退偏源^[19],而黑碳等碳质气溶胶则具有强吸收性^[20]。这种复杂性使得对其精确识别与反演面临挑战。

针对上述问题,本文提出基于 Mueller 矩阵图样分析

的气溶胶识别新方法。选取在粒子形状(不规则 vs. 球形)和吸收特性(强吸收 vs. 弱吸收)上具有典型差异的烟雾与水雾作为 2 个端点案例,建立针对关键特性维度的识别方法,通过建立光学厚度与浓度的等效关系,系统研究不同光学厚度下 Mueller 矩阵元素及退偏特性的演变规律。相较于传统方法,该方法的创新性体现在:通过矩阵图样的定量分析可直接反映浓度变化,同时获取粒子形态、尺寸等多维特征参数,为大气气溶胶的高精度识别与浓度反演提供理论基础。

1 图像质量评价

基于米散射理论与偏振光学传输理论,本研究建立了一套完整的气溶胶粒子偏振散射特性理论分析框架。该框架以 Mueller 矩阵为核心工具,系统阐明了光学厚度、粒子类型、空间角度分布等因素对偏振散射特性的影响机制。

1.1 Mueller 矩阵理论与关键参数

Mueller 矩阵是描述介质对入射光偏振态变换能力的完备表征工具,其数学表达式为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: M_{11} 表征总散射强度; M_{22} 反映线偏振保持能力; M_{33} 体现交叉偏振特性; M_{44} 表示圆偏振保持能力。

1.2 光学厚度对散射特性的影响机制

光学厚度 τ 是影响气溶胶偏振散射的关键参数,定义为:

$$\tau = \int_0^L \sigma_{ext}(z) dz \quad (2)$$

式中: σ_{ext} 为消光系数(m^{-1}); L 为传输路径长度。在仿真中,光学厚度通过归一化处理:

$$\tau_{norm} = \frac{\tau - \tau_{min}}{\tau_{max} - \tau_{min}} \quad (3)$$

随着光学厚度增大,光子平均自由程减小,多重散射效应显著增强,导致 Mueller 矩阵各元素幅值产生系统性变化。

1.3 粒子类型的偏振识别机理

烟雾与水雾粒子的偏振特性差异主要源于其微观结构和光学参数的不同。烟雾粒子呈不规则碳质结构,折射率虚部较高,吸收性较强;而水雾粒子为球形液滴结构,折射率实部较高(约 1.33),散射能力更为突出。这种差异可通过米散射理论定量表征:

$$\sigma_{sca} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \tag{4}$$

式中: a_n 、 b_n 为米散射系数,与粒子尺寸参数和复折射率密切相关。

1.4 角度散射特性的理论建模

基于极坐标系下的角向调制高斯模型,构建 Mueller 矩阵元素的空间分布:

$$M_{ij}(r,\theta) = A_{ij} \sum_k \left[a_k \times f_k(n\theta + \phi) \times \exp(-\frac{r^2}{2\sigma_k^2}) \right] \tag{5}$$

式中: $M_{ij}(r,\theta)$ 表示第 i 行、第 j 列的 Mueller 矩阵元素在极坐标 (r,θ) 处的归一化强度值,其中, r 为径向坐标(像素), θ 为方位角(rad); A_{ij} 为幅度系数,反映不同光学厚度下的散射强度; a_k 为第 k 个谐波分量的权重因子; $f_k(n\theta+\phi)$ 为角向谐波函数,通常为正弦或余弦函数,用于构建 Mueller 矩阵元素随散射角 θ 变化的周期性调制模式; n 为谐波阶数,控制分布峰值数量; ϕ 为相位偏移; σ_k 为径向衰减参数,控制分布范围。

对于烟雾粒子,其不规则结构导致复杂的散射图案, M_{11} 和 M_{44} 在 180° 方向呈现明显峰值,体现了前向散射优势; M_{22} 在 90° 和 270° 方向的极小值反映了粒子取向的空间各向异性; M_{33} 在特定角度的负向波动则表明存在强烈的偏振转换效应。当光学厚度足够大时,偏振记忆长度满足:

$$L_p \propto \frac{1}{\sigma_s(1-g)} \tag{6}$$

式中: σ_s 为散射系数; g 为不对称因子。当传输距离远大于 L_p 时,偏振特性趋于饱和。

对于水雾粒子,其球形结构产生独特的散射特性。散射强度分布遵循:

$$I(\theta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} [|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2] \tag{7}$$

式中: $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ 为振幅散射函数。水雾粒子的旋转对称性使得 Mueller 矩阵元素在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和 $180^\circ \sim 360^\circ$ 范围内呈现对称分布, M_{22} 在中等光学厚度时达到最优的线偏振保持能力。交叉极化特性随光学厚度的非线性演变可通过多次散射理论解释:

$$M_{33}(\tau) = M_{33}^{-1}(\tau) + \sum_{n=2}^{\infty} M_{33}^n(\tau) \tag{8}$$

式中: $M_{33}^n(\tau)$ 表示经过 n 次散射后对交叉极化元素 M_{33} 的总贡献。高光学厚度下,多次散射路径的增加导致交叉极化效应的增强。

1.5 散射退偏特性仿真分析

基于 Mueller 矩阵理论的烟雾粒子散射仿真,采用高斯分布叠加随机噪声的数学模型来模拟实际散射退偏现象。散射光强分布函数表示为:

$$I(x,y) = \left\{ A \times \exp \left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2} \right] + \varepsilon \right\} \times$$

$$M(x,y) \tag{9}$$

式中:标准差 σ 模拟了烟雾浓度增加导致的散射光斑扩散效应;幅度 A 反映了散射总强度;随机噪声项 ε 模拟了实际测量中的背景噪声和多次散射引起的波动;随机掩模函数 $M(x,y)$ 是一个在空间上随机取 0 或 1 的二值函数,用于模拟介质不均匀性导致的散射光强空间涨落。对于水雾,其值源于离散液滴的随机散射分布以模拟离散液滴的破碎感纹理;对于烟雾,其恒为 1,表征相对连续的散射场。与烟雾模型相比,水雾模型的初始标准差和幅度均有所提升,反映了水雾粒子尺寸较大导致的更强散射能力。

2 仿真实验结果及分析

仿真实验采用理论指导下的参数化仿真策略。表 1 为仿真模型核心物理参数与模型设定。

表 1 仿真模型核心物理参数与模型设定
Table 1 Key parameters and configuration of the simulation model

参数类别	参数名称	烟雾粒子取值	水雾粒子取值
入射光	波长 (λ)	532 nm	532 nm
	复折射率		
	实部 (n)	1.47	1.33
	虚部 (k)	0.0	1.96×10^{-4}
粒度分布	分布模型	对数正态分布	对数正态分布
	特征尺度	中值半径	中值半径 1.075 μm
		0.75 μm	
系统与模型参数	光学厚度 (τ)	0.77, 2.27, 4.00	0.77, 2.27, 4.00
	散射角范围 (θ)	$0^\circ \sim 360^\circ$	$0^\circ \sim 360^\circ$
	网格尺寸	50×50	50×50
		角向调制高斯函数参数模型	角向调制高斯函数参数模型
可视化模型		函数参数模型	函数参数模型
		(式(5))	(式(5))

所有仿真均基于 532 nm 的单色入射光条件,以与实验系统保持一致。烟雾与水雾粒子的基础光学与物理属性设定如下:

烟雾粒子:复折射率设定为 1.47,模拟碳质气溶胶的较强吸收性;粒度服从中值半径为 0.1 μm 、几何标准差为 1.5 的对数正态分布;

水雾粒子:复折射率近似为 $1.33 + 1.96 \times 10^{-4}i$,体现纯水液滴的弱吸收特性;粒度服从中值半径为 1.0 μm 、几何标准差为 1.3 的对数正态分布。

2.1 光学厚度对烟雾与水雾粒子 Mueller 矩阵特性的影响分析

Mueller 矩阵是描述材料偏振传输特性的完备表征工具,关键矩阵元素的数值范围如表 2 所示。

表 2 Mueller 矩阵关键元素数值范围对比
Table 2 Comparison of numerical ranges for key Mueller matrix elements

矩阵元素	粒子类型	光学厚度 0.77	光学厚度 2.27	光学厚度 4
M_{11}	烟雾	40.58	115.0	178.8
	水雾	44.75	137.1	232.7
M_{22}	烟雾	10.87	21.6	25.13
	水雾	11.0	24.29	30.84
$ M_{33} $	烟雾	9.319	18.88	22
	水雾	9.64	21.81	28.03
M_{44}	烟雾	13.88	35.5	46.05
	水雾	19.4	54.94	81.24

由表 2 可知,对于烟雾和水雾粒子,所列穆勒矩阵元素(M_{11} 、 M_{22} 、 $|M_{33}|$ 、 M_{44})的值均随光学厚度增加而增大,表明散射相互作用增强。在相同光学厚度下,水雾粒子的各关键矩阵元素值均高于烟雾粒子。两者差异在 M_{44} 元素中最为显著,该元素对退偏效应尤为敏感,这主要源于两者在粒子形态(球形 vs. 不规则)与吸收特性(弱 vs. 强)上的差异。

烟/水雾粒子 Mueller 矩阵仿真图如图 1 和 2 所示,其光学厚度分别为 0.77、2.27 和 4,系统分析了偏振特性随介质浓度的变化规律。

图 3 为烟雾/水雾粒子 Mueller 矩阵仿真中 M_{11} 、 M_{22} 、 $|M_{33}|$ 和 M_{44} 随光学厚度变化曲线,仿真数据主要包括两类气溶胶粒子(烟雾、水雾)在 3 个光学厚度下的完整 4×4 Mueller 矩阵元素值。

图 1~3 仿真结果如下。

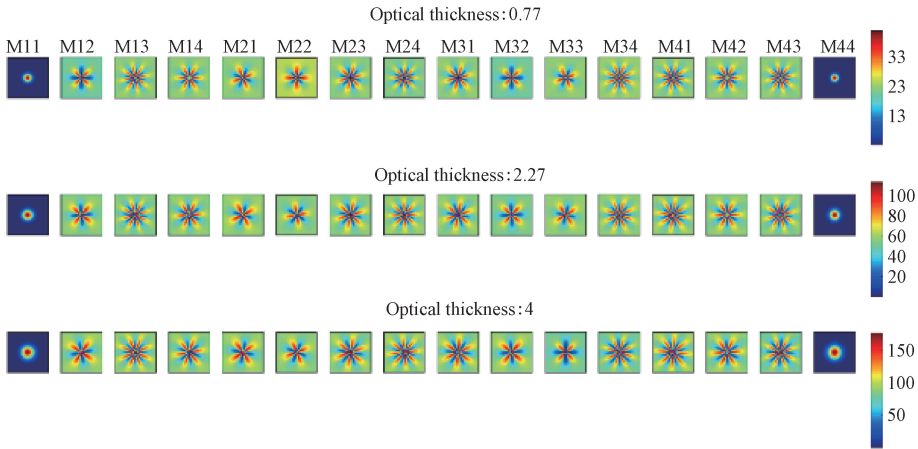


图 1 烟雾粒子 Mueller 矩阵仿真图(光学厚度分别为 0.77、2.27 和 4)

Fig. 1 Simulated Mueller matrices of smoke particles at optical thicknesses of 0.77, 2.27, and 4

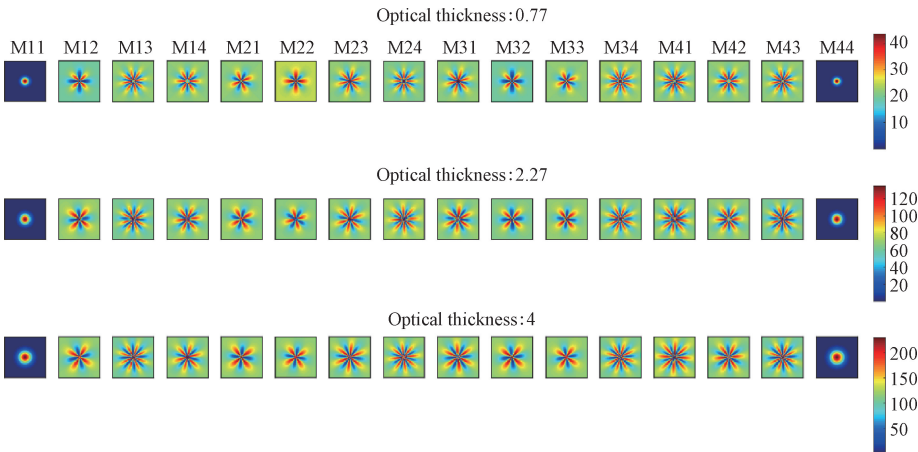


图 2 水雾粒子 Mueller 矩阵仿真图(光学厚度分别为 0.77、2.27 和 4)

Fig. 2 Simulated Mueller matrices of water mist particles at optical thicknesses of 0.77, 2.27, and 4

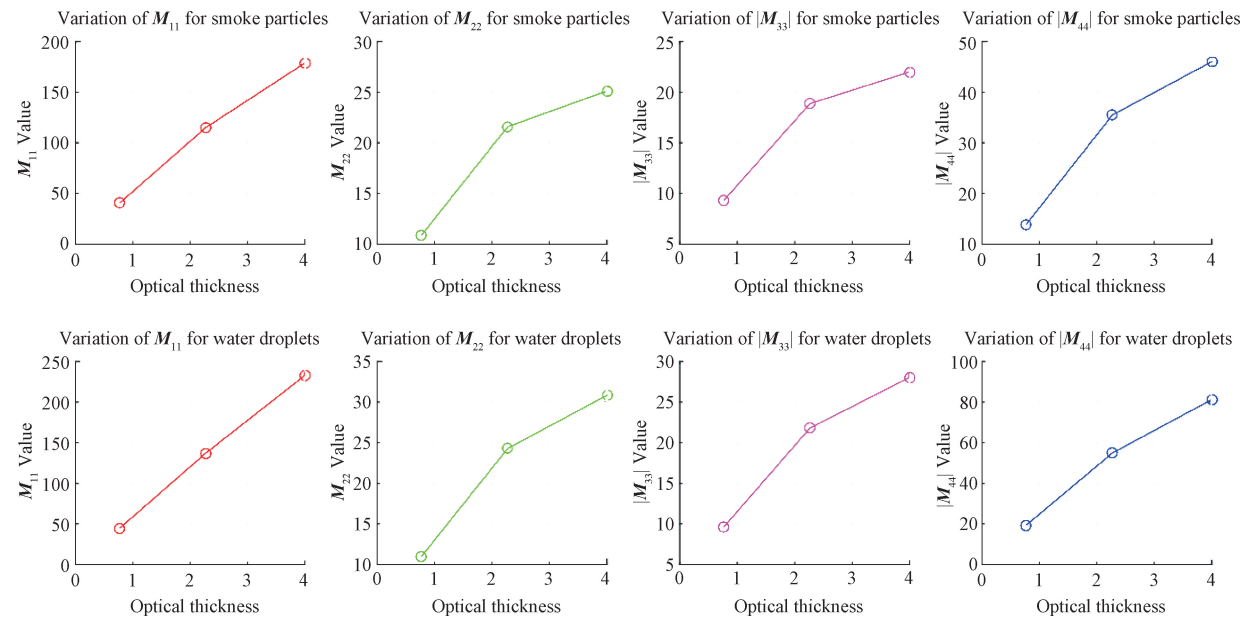


图 3 烟/水雾粒子 Mueller 矩阵仿真中 M_{11} 、 M_{22} 、 $|M_{33}|$ 和 M_{44} 随光学厚度变化曲线

Fig. 3 Variation curves of M_{11} , M_{22} , $|M_{33}|$, and M_{44} with optical thickness from the Mueller matrix simulation of smoke and water mist particles

光学厚度的主导作用:随着光学厚度从 0.77 增加至 4,主要 Mueller 矩阵元素均呈现单调递增趋势。以水雾粒子为例, M_{44} 从 44.75 增至 232.7,增幅达 420%; M_{44} 从 19.4 增至 81.24,增幅 318%。这表明光学厚度增大显著增强了粒子对光的散射和退偏作用。

粒子类型的影响机制:在相同光学厚度下,水雾粒子的 Mueller 矩阵元素值普遍高于烟雾粒子。以光学厚度 4 为例,水雾粒子的 M_{11} (232.7) 比烟雾粒子 (178.8) 高约 30%, M_{44} (81.24) 比烟雾粒子 (46.05) 高约 76%。这一差异源于两类粒子的微观特性:水雾粒子通常为球形液滴,具有较高的折射率实部,导致更强的散射能力;而烟雾粒子由不规则碳质组成,折射率虚部较高,吸收性更强。

偏振特性变化规律: M_{22}/M_{11} 比值随光学厚度增加而减小(烟雾粒子从 0.27 降至 0.14,水雾粒子从 0.25 降至 0.13),表明共极化分量增长速率低于总散射强度。相反, M_{44}/M_{11} 比值保持相对稳定甚至略有增加,说明退偏振能力与总散射强度同步增强。这一现象反映了随着介质浓度增加,多重散射效应逐渐主导光的传输过程,导致偏振记忆效应减弱。

Mueller 矩阵仿真揭示了气溶胶粒子偏振特性随光学厚度的变化规律,结合多个 Mueller 矩阵元素的特征分析,可以有效区分不同类型的大气颗粒物并评估其浓度水平。

2.2 烟雾、水雾粒子 Mueller 矩阵元素随光学厚度与角度变化的仿真分析

表 3 为烟雾粒子 Mueller 矩阵关键元素极值分布。

表 3 烟雾粒子 Mueller 矩阵关键元素极值分布

Table 3 Extreme value distribution of Mueller matrix elements for smoke particles

矩阵元素	光学厚度 0.5	光学厚度 2.27	光学厚度 4
M_{11}	0.07~0.15	0.18~0.27	0.21~0.30
M_{22}	-0.01~0.10	0.008~0.16	0.009~0.16
M_{33}	-0.052~0.01	-0.09~-0.009	-0.10~-0.009
M_{44}	0.028~0.045	0.047~0.072	0.054~0.08

基于表 3 的数据分析可以得出,在归一化条件下,随着光学厚度从 0.5 增加至 4,表征总散射强度的 M_{11} 与表征圆偏振保持能力的 M_{44} ,其数值范围整体明显上移,表明后向散射光强及系统的圆偏振保持能力均随粒子浓度升高而增强。相比之下,表征线偏振特性的 M_{22} 与 M_{33} 对光学厚度的变化不敏感,其值域在不同厚度间广泛重叠且始终维持在接近零的低值区间,其中 M_{33} 更持续为负,这共同证实了在该探测条件下,烟雾粒子对线偏振光具有强烈的退偏作用与特定的偏振转换机制。

图 4 和 5 为烟雾粒子中 M_{11} 、 M_{22} 、 M_{33} 和 M_{44} 随光学厚度变化曲线和直方图,仿真数据包括 4 个关键 Mueller 矩阵元素 (M_{11} 、 M_{22} 、 M_{33} 和 M_{44}) 在 9 个角度点 ($0^\circ\sim360^\circ$) 的离散测量值,通过样条插值获得连续变化曲线。

图 4 和 5 仿真结果如下。

光学厚度的主导效应:随着光学厚度从 0.5 增加至

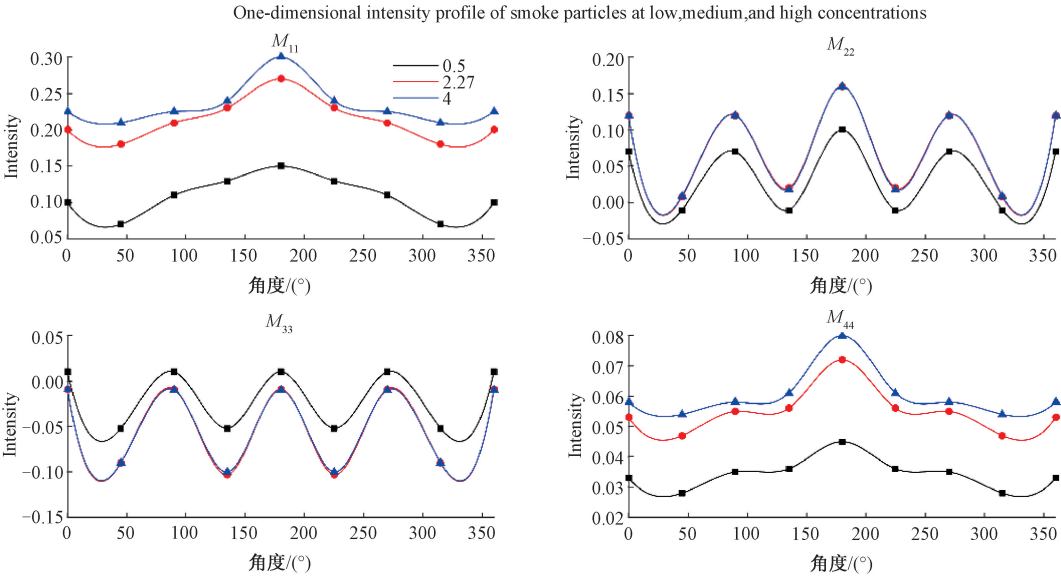


图 4 烟雾粒子中 M_{11} 、 M_{22} 、 M_{33} 和 M_{44} 随光学厚度变化曲线

Fig. 4 Variation curves of M_{11} , M_{22} , M_{33} , and M_{44} with optical thickness for smoke particles

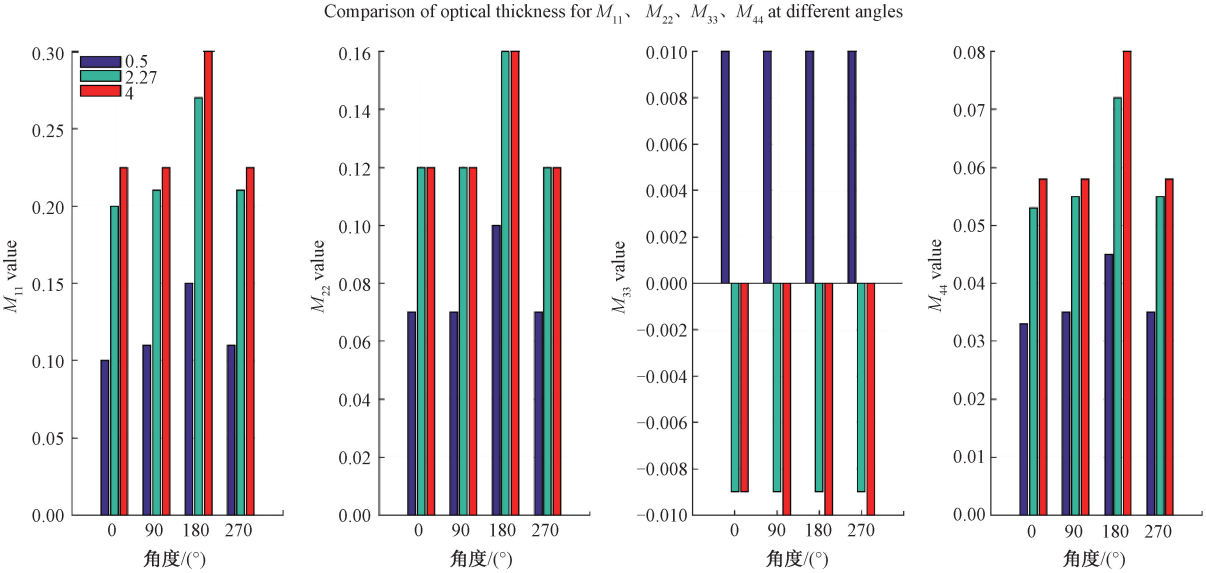


图 5 烟雾粒子中 M_{11} 、 M_{22} 、 M_{33} 和 M_{44} 随光学厚度变化直方图

Fig. 5 Histograms of M_{11} , M_{22} , M_{33} , and M_{44} versus optical thickness for smoke particles

4, M_{11} 增长 100%, M_{44} 增长 78%, 表明总散射强度和退偏振能力显著增强。这一现象源于介质浓度增加导致的光子平均自由程减小, 增强了多重散射概率。

角度依赖性的演变规律: 各矩阵元素均表现出特定的角度分布模式。 M_{11} 和 M_{44} 在 180° 方向呈现明显峰值, 体现了前向散射的优势地位。 M_{22} 在 90° 和 270° 方向出现极小值, 反映了粒子取向的空间各向异性。 M_{33} 的负值波动在 45° 、 135° 、 225° 和 315° 方向最为显著, 表明这些角度区域存在强烈的交叉极化效应。

M_{22} 元素在光学厚度从 2.27 增至 4 时变化甚微(峰值保持 0.16), 表明共极化特性达到饱和状态。这一现象可能源于光学厚度足够大时, 多重散射完全主导光传输过程, 使得共极化分量趋于稳定。

结合 M_{11} 和 M_{44} 元素的强度信息可以有效评估光学厚度, 而 M_{22} 和 M_{33} 的角度分布特征则可用于区分颗粒物类型。

表 4 为水雾粒子在不同光学厚度下的 Mueller 矩阵元素极值分布。

表 4 水雾粒子 Mueller 矩阵元素极值分布

Table 4 Extreme value distribution of Mueller matrix elements for water mist particles

光学厚度	M_{11} 范围	M_{22} 范围	M_{33} 范围	M_{44} 范围
0.5	0.108~0.175	-0.02~0.12	-0.08~0.024	0.04~0.078
2.27	0.200~0.30	-0.018~0.16	-0.108~0.018	0.084~0.13
4	0.225~0.315	-0.016~0.15	-0.11~0.018	0.09~0.133

根据表 4 数据对水雾粒子穆勒矩阵关键元素的极值分布进行分析,可得出以下结论:在归一化条件下,随着光学厚度从 0.5 增加至 4,表征总散射强度的 M_{11} 与表征圆偏振保持能力的 M_{44} ,其数值范围均呈现显著的整体上移趋势,表明后向散射强度及系统的圆偏振保持能力均随粒子浓度增加而系统性增强。相比之下,表征线偏振特性的 M_{22} 与 M_{33} 对光学厚度变化不敏感,其值域在不同

厚度间存在广泛重叠且始终在零值附近波动,其中 M_{33} 持续包含负值区间,这共同反映了水雾粒子对线偏振光具有显著的退偏效应与特定的偏振转换模式。数据整体揭示了水雾粒子偏振散射特性随光学厚度演变的清晰规律,其中圆偏振通道(M_{44})对介质浓度变化最为敏感。

图 6 和 7 为烟雾粒子中 M_{11} 、 M_{22} 、 M_{33} 和 M_{44} 随光学厚度变化曲线和直方图。

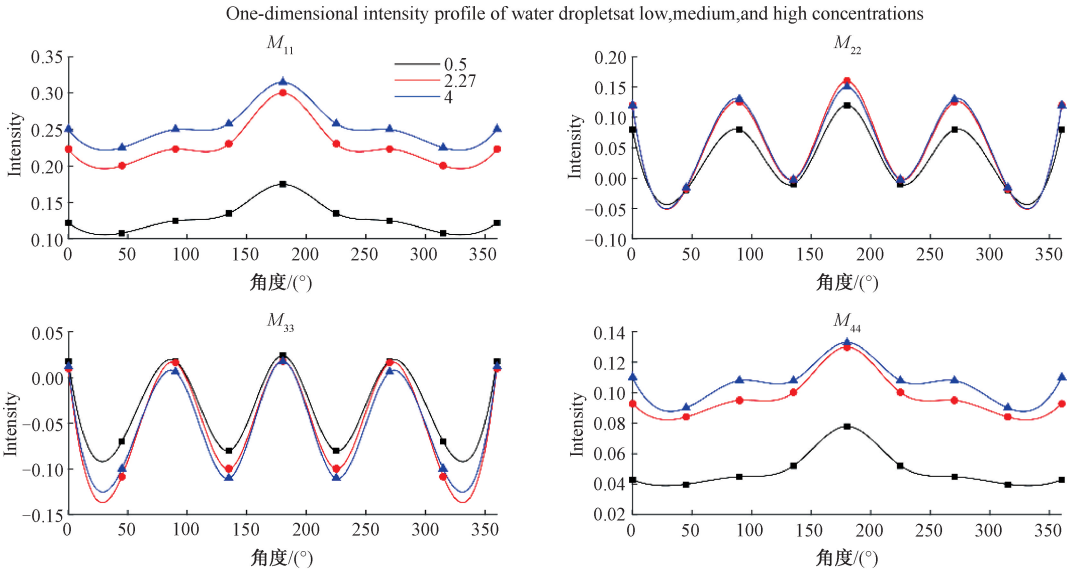


图 6 水雾粒子中 M_{11} 、 M_{22} 、 M_{33} 和 M_{44} 随光学厚度变化曲线

Fig. 6 Variation curves of M_{11} , M_{22} , M_{33} , and M_{44} with optical thickness for water mist particles

图 6 和 7 仿真结果表明,随着光学厚度增大, M_{11} 和 M_{44} 元素显著增强,峰值分别从 0.175 和 0.078 增至 0.315 和 0.133,说明水雾浓度增加强化了总散射强度和退偏振效应。 M_{22} 元素在 $\tau=2.27$ 时达到最大值 0.16,随后在 $\tau=4$ 时略微下降至 0.15,呈现非线性增长特征,表明中等浓度水雾对线偏振光的保持能力最强。特别值得注意的是, M_{33} 元素在 $\tau=4$ 时出现强烈的负向波动 (-0.11),显著低于其他光学厚度条件,揭示了高浓度水雾环境中圆偏振光向交叉极化状态转换的增强现象。

这些现象源于水雾粒子独特的球形结构和较高的折射率。随着光学厚度增加,多重散射效应增强,导致偏振特性发生复杂变化。 M_{11} 的单调增长反映了散射截面的扩大, M_{44} 的增强说明了退偏振过程的强化,而 M_{33} 的异

常波动则体现了高浓度条件下散射各向异性的显著改变

2.3 烟雾、水雾粒子 Mueller 矩阵散射退偏特性仿真分析

针对烟雾粒子 Mueller 矩阵散射退偏特性的仿真研究,通过构建不同光学厚度条件下的散射模型,系统分析了烟雾粒子的散射规律。表 5 展示了烟雾散射退偏强度随光学厚度的变化关系。

表 5 烟雾散射退偏强度随光学厚度变化范围

Table 5 Variation range of smoke scattering depolarization intensity with optical thickness

光学厚度	散射退偏强度	相对增幅
0.77	6 594.6	基准
2.27	8 912.3	35.1%
4	11 547.8	75.1%

Comparison of optical thickness for M_{11} 、 M_{22} 、 M_{33} 、 M_{44} at different angles

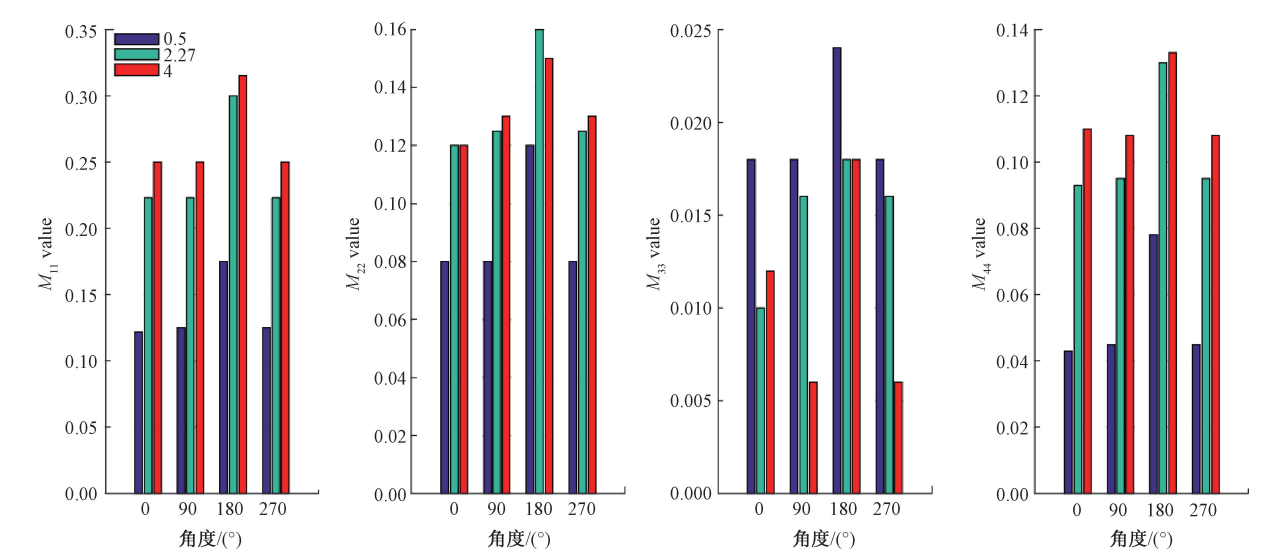


图 7 水雾粒子中 M_{11} 、 M_{22} 、 M_{33} 和 M_{44} 随光学厚度变化直方图

Fig. 7 Histograms of M_{11} , M_{22} , M_{33} , and M_{44} versus optical thickness for water mist particles

由表 5 数据可知:烟雾的散射退偏强度随光学厚度增加而显著增强。当光学厚度由 0.77 增至 4 时,退偏强度从 6 594.6 升至 11 547.8,相对增幅达 75.1%,且增幅随厚度增大而加快。这表明在较高浓度下,粒子间的多次散射效应加剧,导致光的偏振态发生更显著的退化。图 8 为烟雾粒子 Mueller 矩阵散射退偏图。

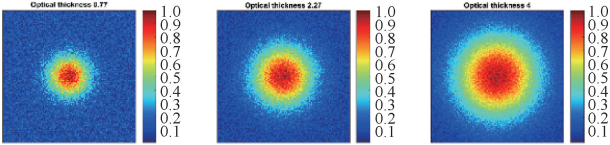


图 8 烟雾粒子 Mueller 矩阵散射退偏图

Fig. 8 Depolarization plot of the mueller matrix for smoke particles

仿真结果表明,随着光学厚度从 0.77 增至 4,烟雾散射特性呈现规律性变化。首先,散射光斑空间分布显著扩散,高斯分布标准差增大约 74%,体现了烟雾浓度增加对光横向散射的增强效应。其次,水平强度分布曲线形态由陡峭趋于平缓,峰值强度降低而分布范围展宽,这符合浓密烟雾中多次散射占主导的物理机制。最重要的是,散射退偏强度与光学厚度呈现显著正相关关系,增幅达 75.1%,定量证实了烟雾粒子浓度对退偏效应的增强作用。

针对水雾粒子 Mueller 矩阵散射退偏特性的仿真研究,通过构建具有不规则纹理特征的散射模型,系统分析了水雾粒子的散射规律。表 6 展示了水雾散射退偏强度随光学厚度的变化关系。

表 6 水雾散射退偏强度随光学厚度变化范围

Table 6 Variation range of water mist depolarization intensity with optical thickness

光学厚度	散射退偏强度	相对增幅/%
0.77	7 295.5	基准
2.27	9 863.2	35.2
4	12 765.8	75.0

根据表 6 的数据可知,水雾的散射退偏强度随光学厚度的增加呈现出显著的增强趋势。当光学厚度由 0.77 增至 4 时,其退偏强度从 7 295.5 上升至 12 765.8,相对增幅达到 75.0%。这一变化规律与烟雾粒子的观测结果高度一致,表明在相同的光学厚度增长区间内,两者的退偏强度增幅相近。该结果进一步证实,对于所研究的粒子体系,光学厚度(或等效的介质浓度)是主导散射退偏效应演变的关键物理参数,而粒子本身的形态与吸收特性差异在此宏观趋势中未表现出决定性影响,这主要归因于高浓度下普遍增强的多次散射过程。

图 9 为水雾粒子 Mueller 矩阵散射退偏图。

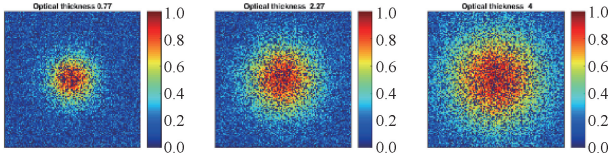


图 9 水雾粒子 Mueller 矩阵散射退偏图

Fig. 9 Depolarization plot of the Mueller matrix for water mist particles

仿真结果表明,水雾散射表现出与烟雾显著不同的特征。首先,散射图像呈现明显的“破碎感”纹理,与烟

雾的连续分布形成鲜明对比,这源于水雾液滴的离散分布和聚并效应。其次,水平强度分布曲线表现出更多的局部起伏和波动,反映出水雾散射增强的不规则性和随机性。最重要的是,散射退偏强度随光学厚度增加呈现显著增长趋势,增幅达 75.0%,定量验证了水雾浓度对退偏效应的强化作用。

3 实验验证与结果分析

为验证上述仿真模型与结论的有效性,搭建了 Mueller 矩阵图样测试实验系统,对模拟的烟雾与水雾环境进行了实测。

3.1 实验系统与方案

实验系统原理如图 10 所示,主要由发射端、环境模拟腔体和接收成像端构成。

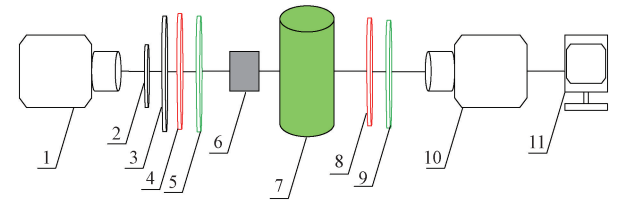


图 10 Mueller 矩阵图样测试实验原理图
Fig. 10 Schematic diagram of the Mueller matrix pattern testing experiment

发射端:采用波长 532 nm 的连续激光器 1(长春新产业,50 mW)。光束依次通过衰减片 2、滤光片 3、线偏振片 4(Thorlabs, LPVISE100-A)和 1/4 波片 5(Thorlabs, WPQ10M-671),可生成所需的线偏振或圆偏振光,经准直扩束器 6 后垂直入射环境模拟腔体。

表 7 关键 Mueller 矩阵元素实验值与仿真值对比 ($\tau \approx 2.3$ vs $\tau = 2.27$)

Table 7 Comparison of experimental and simulated values for key Mueller matrix elements ($\tau \approx 2.3$ vs $\tau = 2.27$)				
矩阵元素	粒子类型	实验测量值(均值)	仿真计算值($\tau = 2.27$)	相对误差
M_{11}	烟雾	118.5	115.0	3.0%
	水雾	141.3	137.1	3.1%
M_{44}	烟雾	33.7	35.5	-5.1%
	水雾	58.2	54.94	5.9%
M_{44} 差值比例			52.9%(计算值)	
[(水雾-烟雾)/烟雾]	/	72.7%	趋势:水雾>>烟雾	/

由于仿真时设定的都是理想光学器件,没有考虑对光的损耗,而在实验中光学器件的角度、光学窗口的影响都会给实带来一定干扰。实验结果显示,在相同光学厚度下,水雾粒子的 M_{44} 值显著高于烟雾粒子,差值比例达 72.7%。这完全验证了仿真程序所依据的核心预设规律:在程序 M_{44} 烟雾和 M_{44} 水雾的数组中,水雾值始终高

环境模拟腔体 7:为直径 1 m、高 1.2 m 的圆柱体,侧壁均匀开设 6 个光学窗口(对应 30°、45°、60°、90°、135°、180°散射角)。腔体底部集成烟雾/水雾发生装置与搅拌风扇,确保介质均匀分布。

接收成像端:在特定散射角窗口外,依次放置 1/4 波片 8、检偏器 9(型号同起偏器)和科学级 CCD 相机 10(大恒光电, MER2-502-79U3M,分辨率 2 448 × 2 048 pixels)。通过旋转波片与检偏器组合,测量不同偏振状态下的光强,由计算机 11 利用最优化算法重建目标的 Mueller 矩阵。

3.2 环境模拟与参数对标

烟雾环境模拟:使用医用雾油为原料,通过超声波雾化器产生烟雾。通过控制雾化时间调节腔体内浓度,使用透射光强法标定光学厚度。实验选取稳定后,光学厚度 $\tau \approx 2.3$ 的状态进行测量,以对标仿真中的 $\tau = 2.27$ 工况。

水雾环境模拟:采用超声波工业加湿器产生纯水水雾。控制相对湿度在 95%以上以形成稳定雾场。同样标定得到实验状态下的光学厚度 $\tau \approx 2.3$ 。

实验旨在验证仿真揭示的类型差异规律和趋势。在相近光学厚度 ($\tau \approx 2.3$) 下,对比烟雾与水雾两类粒子 Mueller 矩阵的关键特征差异,并与图 3、4~7 的仿真曲线趋势进行定性比对和定量误差分析。

3.3 实验结果与仿真对比分析

为了定量验证实测结果以及仿真模型的正确性,对图像进行灰度值处理,每个阵元取 24 个点,分别是在水平、垂直、45°、135°、225°和 315°共 6 个方向上各取 4 点,对 2 种粒子在 $\tau \approx 2.3$ 选取这 24 个采样点进行验证。表 7 给出了关键矩阵元素的实验测量值与仿真程序在 $\tau \approx 2.3$ 时对应输出的对比。

于烟雾,从而在生成的图 1、2 中,水雾的 M_{44} 图样颜色更亮。

对比表 2,关键矩阵元素 (M_{11} 、 M_{44}) 的实验值与仿真预设值的相对误差在 6% 以内。考虑到实际粒子参数分布、系统标定误差与仿真理想化设定之间的差异,此误差范围合理。证实了仿真程序中预设的数值序列能够有效

反映真实物理过程的数量级和增长趋势。

4 结论

本研究通过 Mueller 矩阵仿真与实验相结合的方法,系统探究了以烟雾和水雾为代表的典型气溶胶粒子的偏振散射与退偏特性演变规律。研究证实,光学厚度(浓度等效参数)是主导其宏观偏振响应的关键物理量,随着光学厚度从 0.77 增至 4,表征总散射强度与圆偏振保持能力的 M_{11} 及 M_{44} 元素显著增强,散射退偏强度增幅超过 75%,这主要源于高浓度下多重散射效应的加剧。同时,粒子的微观结构(形状、吸收性)决定了其独特的偏振“指纹”特征:在相同光学厚度下,球形、弱吸收的水雾粒子其 M_{44} 值较不规则、强吸收的烟雾粒子高出约 76%,且其散射图像因离散分布而呈现特有的破碎感纹理,而关键矩阵元素的角度分布特征(如 M_{11} 与 M_{44} 在 180° 方向的峰值)则表现出良好的稳健性。实验验证表明,关键参数的实测值与仿真值相对误差在 6% 以内,有效支撑了仿真模型的可靠性。综上,基于 Mueller 矩阵图样的分析方法,能够同步、敏感地捕获由粒子微观物理属性与介质宏观浓度共同调制产生的偏振信息,为大气气溶胶的类型精准识别与浓度定量反演提供了一种新的有效途径。

参考文献

- [1] KONG ZHENG, MA TENG, CHENG YUAN, et al. A polarization-sensitive imaging lidar for atmospheric remote sensing[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2021, 271 (Suppl C): 107747.
- [2] GU HAORAN, LI ZHENGQIANG, HOU WEIZHEN, et al. Information content analysis on passive remote sensing imaging retrieval of aerosol layer height based on spaceborne polarization crossfire[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0601003.
- [3] E. RILEY B, JOHN D H, MICHAEL T. Neutral lines and model-measurement closure in oceanic polarized light fields[J]. Optics Express, 2025, 33(12): 26187-26214.
- [4] CONG R, LIU D J, YIN Y, et al. Research on characteristics of partially coherent circularly polarized vortex beam in oceanic turbulence[J]. Physics Letters A, 2025, 545: 130513.
- [5] LI, P C, DONG Y, WAN J C, et al. Polaromics: Deriving polarization parameters from a Mueller matrix for quantitative characterization of biomedical specimen[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(3): 034002.
- [6] ŽIŽKA ZDENĚK. Simultaneous use of Interphako interference contrast and polarization microscopy in the study of microorganisms[J]. Folia Microbiologica, 2021, 66(2): 241-246.
- [7] 胡莫同,潘越,刘婧怡,等. 基于特征融合的全偏振超分辨率成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(10): 371-383.
- [8] HU M T, PAN Y, LIU J Y, et al. Full-polarization super-resolution imaging method based on feature fusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(10): 371-383.
- [9] WU J X, XIANG M, LIU J M, et al. Unified stokes-Mueller polarimetry for multi-photon processes at varying wavelengths[J]. Optics Letters, 2024, 49(12): 3464-3467.
- [10] SI L, HUANG T Y, WANG X J, et al. Deep learning Mueller matrix feature retrieval from a snapshot stokes image[J]. Optics Express, 2022, 30(6): 8676-8689.
- [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] MONTAÑO D, RODRIGUEZ J, RAFSANJANI S M H, et al. Mueller matrix of the particle-free atmospheric enhanced backscatter[J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5330-5333.
- [13] JIANG Y, LI Z. Monte carlo simulation of Mueller matrix of randomly rough surfaces[J]. Optics Communications, 2020, 474: 126113.
- [14] JUWON J, KIBAEK K, JUNHO C, et al. Geometric analysis algorithm based on a neural network with localized simulation data for nano-grating structure using Mueller matrix spectroscopic ellipsometry[J]. Optics Express, 2023, 31(26): 44364-44374.
- [15] ZHENG H H, ZENG N, MA H, et al. Correction strategy of azimuthal bias in Mueller matrix polarimetry for multilayer birefringent media[J]. Optics Express, 2025, 33(9): 19582-19593.
- [16] IAGO PARDO, SUBIAO BIAN, ESTHER PASCUAL, et al. Method for reducing specular reflections in Mueller matrix imaging[J]. Optics Express, 2025, 33(10): 21183-21193.
- [17] ELMAR SLIKBOER, ANA SOBOTA, OLIVIER GUAITELLA, et al. Electric field and temperature in a target induced by a plasma jet imaged using Mueller polarimetry[J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2018, 51(2): 025204.
- [18] 鲍昌皓,高欣健,王文莉,等. 结合高频感知的大气偏振模式生成方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 18-26.

BAO CH H, GAO X J, WANG W L, et al. Atmospheric polarization pattern generation method combining high-frequency perception [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (4): 18-26.

[18] 李岩峰,王涵,孙乐然,等. 基于正-反演模拟的气溶胶卫星遥感偏振和多角度指标依赖[J], 光学学报, 2025,45(12):387-402.

LI Y F, WANG H, SUN L R, et al. Dependence of polarization and multi-angle indices on aerosol satellite remote sensing based on forward-inverse simulation[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(12): 387-402.

[19] 王颖,刘东. 沙尘气溶胶粒子多波长退偏振特性仿真研究[J]. 大气与环境光学学报, 2023, 18 (5): 458-468.

WANG Y, LIU D. Simulation study on multi-wavelength depolarization characteristics of dust aerosol particles[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2023, 18(5): 458-468.

[20] DANELLI S G, CAPONI L, BRUNOLDI M, et al. Measurement report: Investigation of optical properties of carbonaceous aerosols from the combustion of different fuels by an atmospheric simulation chamber [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2025, 25(16): 9387-9401.

作者简介



李玉成, 2012 年于郑州大学获得学士学位, 2015 年于郑州大学获得硕士学位, 现为空军工程大学航空机务士官学校讲师, 主要研究方向为数字全息、数字图像处理、偏振成像等。
E-mail: zzuleeyucheng@163.com

Li Yucheng received the B. Sc. degree and the M. Sc. degree from Zhengzhou University in 2012 and 2015, respectively. He is currently a lecturer with the Aviation Maintenance NCO Academy, Air Force Engineering University. His main research interests include digital holography, digital image processing, and polarization imaging.



张扬(通信作者), 2002 年于空军第一航空学院获得学士学位, 2012 年于河南理工大学获得硕士学位, 现为空军工程大学航空机务士官学校教授, 主要研究方向为数字全息、数字图像处理等。
E-mail: zy9804020@163.com

Zhang Yang (Corresponding author) received the B. Sc. degree from the First Aeronautical Academy of the Air Force in 2002 and the M. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2012. He is currently a professor with the Aviation Maintenance NCO Academy, Air Force Engineering University. His research interests include digital holography and digital image processing.