

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.03.001

基于散射矩阵的气溶胶识别与粒径分布反演研究

陈民旺^{1,2}, 裘桢炜^{2*}, 洪津²

(1 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

2 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 散射矩阵是描述介质散射特性的重要参数, 该参数对介质的理化特性敏感。为研究利用该参数对气溶胶进行识别及理化特性获取的可行性, 设计并实验测量了聚 α 烯烃和氯化钠两种气溶胶样品的散射矩阵, 讨论了二者矩阵元素的角度分布规律, 并基于 Mie 散射理论, 采用模板匹配的方法利用测量结果对聚 α 烯烃气溶胶的粒径分布进行了反演。结果表明通过矩阵元素的角度分布规律可以对两种气溶胶进行有效识别与区分, 结合相关散射模型与反演方法还可以获得气溶胶的理化特性。该研究为气溶胶识别及其理化特性的获取提供了方法参考。

关键词: 散射矩阵; 气溶胶识别; 粒径分布; 反演

中图分类号: O436.2; X513

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)03-191-010

Research on aerosol recognition and particle size distribution inversion based on scattering matrix

CHEN Minwang^{1,2}, QIU Zhenwei^{2*}, HONG Jin²

(1 School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Scattering matrix is an important parameter to describe the scattering characteristics of medium, which is sensitive to the physical and chemical properties of the medium. In order to investigate the feasibility of using this parameter to identify aerosols and obtain their physicochemical properties, an experimental measurement was designed to obtain the scattering matrices of the two aerosol samples of poly-alpha-olefin and sodium chloride, and the angular distribution of the two matrix elements was

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目 (YZ201664)

作者简介: 陈民旺 (1997-), 硕士研究生, 主要从事气溶胶偏振散射测量数据处理与应用的研究。E-mail: cmw1997@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 洪津 (1969-), 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱偏振遥感技术和航空航天遥感工程技术等方面的研究。

E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2021-03-11; 修改日期: 2021-03-29

*通信作者。E-mail: zwqiu@aiofm.ac.cn

discussed. Furthermore, based on Mie scattering theory, the particle size distribution of poly-alpha-olefin aerosols was inverted using template matching method and the measurement results. The results show that based on the angular distribution of matrix elements, the two kinds of aerosols can be effectively identified and distinguished, and the physicochemical properties of aerosols can also be obtained by combining the correlation scattering model and inversion method. This research provides a method reference for aerosol identification and acquisition of physicochemical properties.

Key words: scattering matrix; aerosol recognition; particle size distribution; inversion

0 引言

气溶胶不仅会导致环境污染,而且还会直接影响人体健康,对人们生活有着重要影响。为了评估不同气溶胶带来的环境与健康效应,更好地对其溯源、监测及治理,必须提高对气溶胶理化特性等方面的了解,发展气溶胶识别及其理化特性获取的方法。

散射矩阵用于描述光散射现象发生时入射光到散射光 Stokes 矢量的改变,该参数随散射角的变化而变化,且与介质的复折射率、粒径分布、微观形貌、组成成分等理化特性有关^[1],因此不同理化特性气溶胶的散射矩阵往往有着自身特有的角度分布规律。通过对散射矩阵的角度分布规律进行测量与研究,一方面有利于发展气溶胶的识别方法,另一方面结合相关反演算法可以从散射矩阵元素中提取气溶胶的理化特性。

目前大多数气溶胶测量设备只能对小角度范围或单个角度的部分矩阵元素进行观测,例如太阳-天空辐射计的观测角度在 $0^\circ\sim 100^\circ$ 之间,且只能获得矩阵元素 F_{11} 和 F_{12}/F_{11} ^[2],激光雷达可以获得后向 180° 散射角的 F_{22}/F_{11} ^[3]。相应地,在基于矩阵元素的气溶胶理化特性反演方面,由于散射矩阵元素观测数量以及散射角度测量范围的不足,目前主要仍是基于部分矩阵元素的小角度观测结果^[4,5]。显然,更大散射角度范围、更多散射矩阵元素的测量能够提供更为准确的气溶胶信息,多项研究和相关理论表明,多矩阵元素、多角度的测量结果对随机噪声有着更强的抗干扰能力^[6,7]。

气溶胶形貌对光散射有着重要影响,球形与非球形气溶胶各自具有独特的散射特性^[8],因此可以利用二者散射特性的差异对它们进行识别。偏振浊度计是一种兼具大范围散射角度和完整散射矩阵测量功能的仪器,使用该仪器对聚 α 烯烃 (PAO) 和氯化钠两种不同类型的气溶胶进行了测量,二者在形貌上分别具有较好的球形以及非球形(立方)特征。本文试图通过分析二者散射矩阵元素角度分布规律来对这两种气溶胶进行识别,并基于 Mie 散射理论和相关算法对 PAO 气溶胶的粒径分布进行反演,进一步探究球形与非球形气溶胶散射特性的差异,也为获取气溶胶粒径分布参数提供方法参考。

1 实验装置与方案

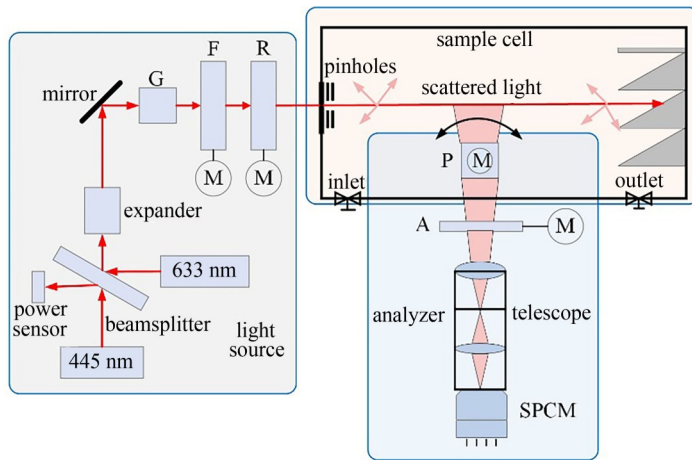
1.1 散射矩阵与偏振浊度计

散射是指光通过非均匀介质时,光的一部分能量重新分配而向各个方向传播的现象。当用 Stokes 矢量 (I, Q, U, V) 描述光的偏振态时,每个散射角度入射光和散射光的 Stokes 矢量都可以由 4×4 的散射矩阵 F 相联系。当颗粒随机均匀取向时,散射矩阵仅包含 F_{11} 、 F_{12} 、 F_{22} 、 F_{33} 、 F_{34} 、 F_{44} 这6个独立元素,其表达式为^[9]

$$\begin{pmatrix} I_{sca} \\ Q_{sca} \\ U_{sca} \\ V_{sca} \end{pmatrix} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 D^2} \begin{bmatrix} F_{11}(\theta) & F_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ F_{12}(\theta) & F_{22}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}(\theta) & F_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -F_{34}(\theta) & F_{44}(\theta) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{inc} \\ Q_{inc} \\ U_{inc} \\ V_{inc} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 inc 和 sca 分别代表入射光和散射光, λ 为光的波长, D 为散射介质到探测器的距离, θ 为散射角。

根据散射光的偏振测量原理, 中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感中心研制了偏振浊度计以获得介质的散射矩阵, 图 1 为仪器的测量原理图^[10]。如图所示, 激光器 (445 nm、633 nm) 发出的光经格兰泰勒棱镜、波片后可以调制成一定状态的偏振光, 然后进入样品池被颗粒物散射, 出射的散射光经全反射棱镜反射并通过检偏器, 最后被光子计数器接收, 通过采集的信号以及仪器的定标参数, 便可以获得散射矩阵。电机带动全反射棱镜在 $3.5^\circ \sim 170^\circ$ 范围的散射角度内旋转, 探测器便可以接收不同角度的散射光, 从而获得散射矩阵随散射角的变化规律。



注: G: 格兰泰勒棱镜; F: 衰减片轮; R: 波片轮; P: 全反射棱镜; A: 检偏器
SPCM: 单光子计数器模块; M: 旋转电机

图 1 偏振浊度计原理图^[10]

Fig. 1 Schematic diagram of polarized nephelometer^[10]

在实际的数据处理中, 为便于不同气溶胶散射特性的比较, 作以下数据处理: 各矩阵元素 [除 $F_{11}(\theta)$ 以外] 以相同散射角的 $F_{11}(\theta)$ 测量值为基准进行归一化, 得到比值 $F_{ij}(\theta)/F_{11}(\theta)$, $F_{11}(\theta)$ 则以其在 30° 的测量值为基准进行归一化^[7]。最终散射矩阵称为归一化散射矩阵, 其具体表达式为

$$\tilde{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} F_{11}/F_{11}(30^\circ) & F_{12}/F_{11} & 0 & 0 \\ F_{12}/F_{11} & F_{22}/F_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}/F_{11} & F_{34}/F_{11} \\ 0 & 0 & -F_{34}/F_{11} & F_{44}/F_{11} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

1.2 实验方案

实验测量 PAO 和氯化钠两种气溶胶。PAO 是一种合成基础油, 常用于高效过滤器的检漏, 基础油的复折射率通常在 $1.46 \sim 1.48$ 之间^[11,12], 实验所用 PAO 原液的典型折射率为 1.4653, 实验时由发生器发生后导入样品池; 氯化钠是海盐气溶胶的主要成分, 其晶体的典型折射率为 1.54^[13], 实验时将氯化钠饱和溶液作为气溶胶

原液, 将其通过干燥管除湿后再导入样品池。实验可获得 445 nm 和 633 nm 两个波段的测量数据, 本研究内容仅以 445 nm 测量结果进行后续分析。

实验辅助设备如下: 发生器型号为 ATM226 (Topas, 德国), 适用于多分散油性、盐性气溶胶颗粒物的发生, 其发生气溶胶的典型粒径分布如图 2 所示, 纵轴为气溶胶数浓度, 横轴为气溶胶半径; 干燥管型号为汇分 3062-CH, 内部装有蓝色硅胶干燥剂。

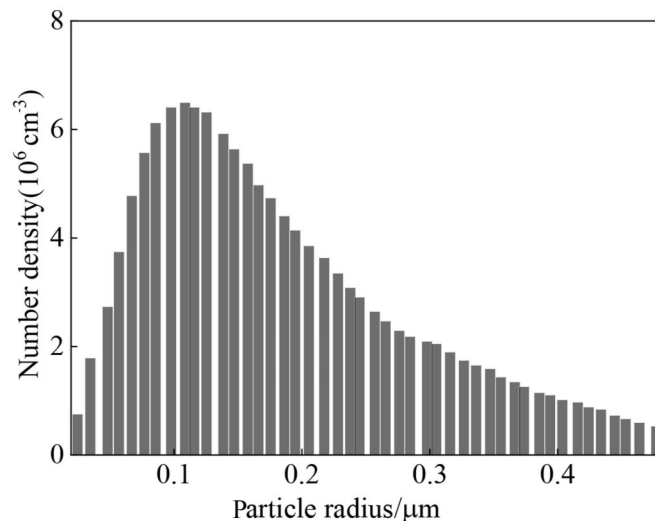


图 2 ATM226 发生气溶胶的典型粒径分布

Fig. 2 Typical particle size distribution of aerosols generated by ATM226

2 测量结果及讨论

图 3 和图 4 分别为 PAO 气溶胶和氯化钠气溶胶在 445 nm 下的散射矩阵测量结果, 其中矩阵元素 F_{11}/F_{11} (30°) 以对数坐标绘制。从测量结果可以较为明显地看出这两种气溶胶散射矩阵随散射角变化规律的差异, 以下为各个矩阵元素的具体分析。

由图 3 (a) 和图 4 (a) 可以看出, $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$ 都存在陡峭的前向散射峰, 并随着散射角的增大而迅速减小, 在散射角 120° 左右达到最小值, 之后又随着散射角的增大而略微增大, 不同的是: PAO 的最小值约为 0.03, 氯化钠的最小值则大得多, 约为 0.1; 其次, PAO 在后向散射角的上升趋势较为明显, 氯化钠则延续了侧向散射的平缓特征, 与大部分非球形颗粒物的散射特征类似^[14]; 最后, PAO 的角度分布曲线更为光滑, 这可能是由于其粒径谱分布的多分散特性更加明显, 因为粒径谱的积分效应使得不同粒径下散射强度的起伏特征被平均^[15]。

由图 3 (b) 和图 4 (b) 可以看出, 两种气溶胶在矩阵元素 F_{12}/F_{11} 的角度分布上差异较大。PAO 气溶胶的 F_{12}/F_{11} 在散射角 120° 之前的值均在 0 左右, 在散射角 120° 之后快速增大, 峰值约为 0.5, 出现在散射角 160° 左右; 对于氯化钠气溶胶, 侧向散射角度的 F_{12}/F_{11} 小于 0, 且在整体上随散射角呈现 V 型特征, 即前后向散射角的值较大, 散射角 90° 附近取得最小值。

由图 3 (c) 和图 4 (c) 可以看出, PAO 气溶胶的 F_{22}/F_{11} 在整个散射角度下均接近 1 (> 0.97), 这与大部分液态颗粒物的观测结果相符合; 氯化钠气溶胶则呈现出以下特征: 在前向散射角 (约 60° 之前) 接近 1, 随散射角的

增大逐渐减小, 在散射角 130° 左右达到最小值, 约为 0.8, 此后又在后向散射角度出现小幅上升。 F_{22}/F_{11} 常用于表征散射介质的形状特征, 该值越接近 1 表明球形特征越明显, Mie 散射理论表明球形颗粒物的 F_{22}/F_{11} 在所有散射角的值均为 1^[1]。因此可以看出, PAO 气溶胶相较于氯化钠气溶胶有着更好的球形特性, 氯化钠的非球形特征可能与其晶体的立方形态有关, 该参数可以作为区分二者的重要依据之一。

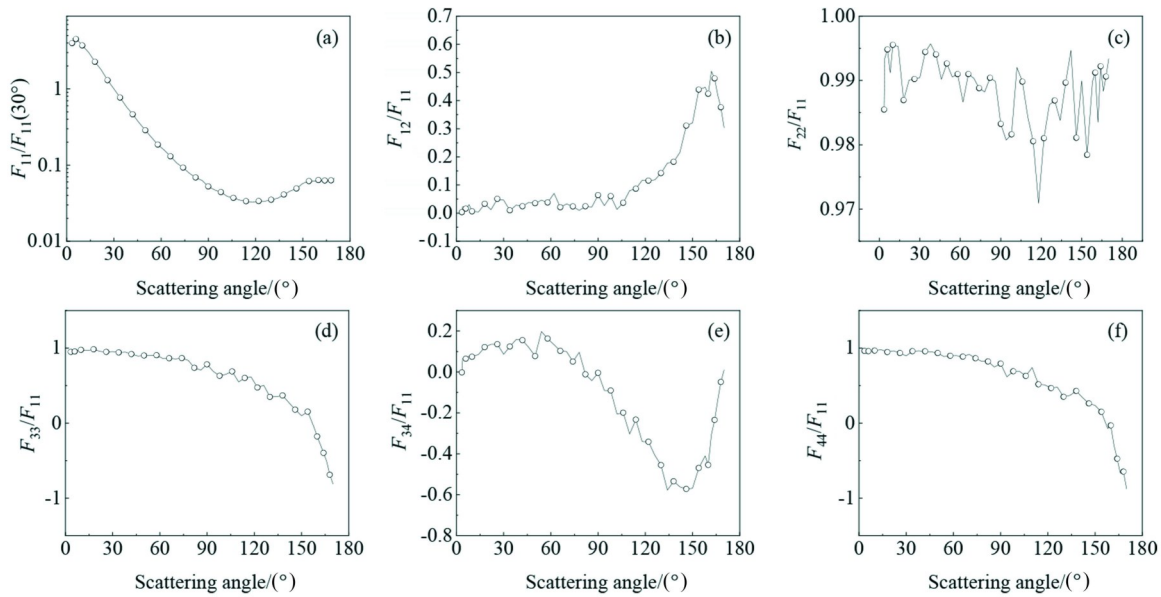


图 3 PAO 气溶胶的散射矩阵测量结果。(a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{22}/F_{11} ; (d) F_{33}/F_{11} ; (e) F_{34}/F_{11} ; (f) F_{44}/F_{11}
 Fig. 3 Scattering matrix measurement results of PAO aerosol. (a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{22}/F_{11} ;

(d) F_{33}/F_{11} ; (e) F_{34}/F_{11} ; (f) F_{44}/F_{11}

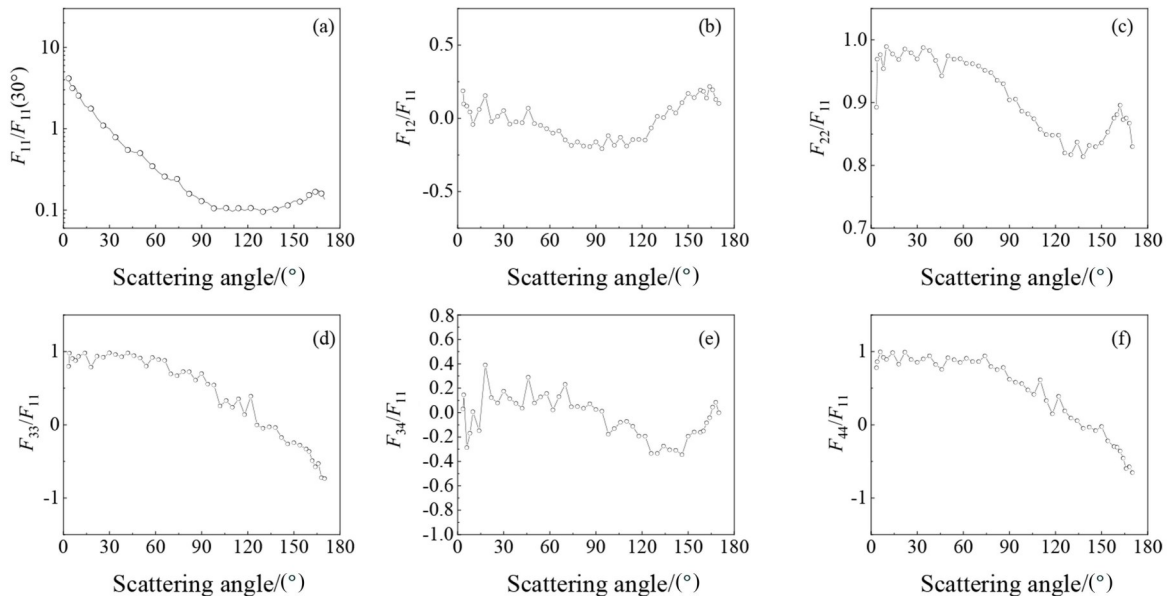


图 4 氯化钠气溶胶的散射矩阵测量结果。(a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{22}/F_{11} ; (d) F_{33}/F_{11} ; (e) F_{34}/F_{11} ; (f) F_{44}/F_{11}
 Fig. 4 Scattering matrix measurement results of NaCl aerosol. (a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{22}/F_{11} ;

(d) F_{33}/F_{11} ; (e) F_{34}/F_{11} ; (f) F_{44}/F_{11}

由图 3 (e) 和图 4 (e) 可以看出, PAO 和氯化钠的 F_{34}/F_{11} 角度分布特征存在明显差别。对于 PAO 气溶胶而

言,前向散射角(80°之前)有着较小的正分支,随后快速减小,并在散射角140°左右出现最小值,约为-0.6;氯化钠气溶胶的 F_{34}/F_{11} 的角度分布较PAO更为对称,最小值出现在散射角130°左右,值约为-0.4。

由图3(d)、(f)和图4(d)、(f)可以看出,两种气溶胶的 F_{33}/F_{11} 或 F_{44}/F_{11} 的趋势均为从前向散射角度的1逐渐下降到后向的-1,但是它们在下降的趋势上存在差异:PAO的 F_{33}/F_{11} 或 F_{44}/F_{11} 在散射角150°附近由正转负,而氯化钠气溶胶的正负交叉点出现在散射角120°左右,也即是PAO气溶胶的 F_{33}/F_{11} 或 F_{44}/F_{11} 在由1到0的过程中更为平缓,从0到-1的过程中更为陡峭。

此外,由 F_{22}/F_{11} 的分析可知,氯化钠有着较为明显的非球形特征, F_{33}/F_{11} 和 F_{44}/F_{11} 的测量结果更加证实了这一点,因为Mie散射理论表明球形气溶胶的 F_{33}/F_{11} 和 F_{44}/F_{11} 相等,非球形气溶胶则有差别,从氯化钠气溶胶的测量结果可以看出,其 F_{44}/F_{11} 的值比 F_{33}/F_{11} 大,在后向散射角度更为明显,这与诸多非球形气溶胶的测量结果类似^[16,17]。

3 基于Mie散射的粒径反演

3.1 粒径分布反演模式

粒径分布是气溶胶的重要物理特性之一,指的是散射空间中颗粒物数目随粒径的变化情况,其反演模式分为独立和非独立两种^[18]。前者不对粒径分布进行先验假设,而直接求解,后者则是假定散射介质的粒径分布符合某一函数,这种情况下只需确定函数的具体参数即可。实验研究发现对数正态分布函数在大部分情况下可以较好地描述气溶胶的粒径分布^[19],因此可以采用非独立模式对粒径分布进行反演。粒径分布 $n(r)$ 的计算公式为

$$n(r) = cr^{-1} \exp \left[- \frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right], \quad (3)$$

式中 c 为常数, r 为气溶胶半径, r_g 和 $\ln^2 \sigma_g$ 分别为对数正态分布假设下气溶胶的平均半径和方差。

3.2 粒径分布反演的可行性分析

若要通过反演得到粒径分布,那么反演所用的散射模型必须能够正确描述实际测量对象的光散射。Mie理论是基于球形假设的散射模型,一般来说,当介质的散射矩阵元素 F_{22}/F_{11} 在所有角度上的值大于0.9时,Mie散射模型可以较好地描述其光散射^[20]。 F_{22}/F_{11} 的测量结果表明可以利用Mie散射模型对PAO气溶胶的粒径分布进行反演。

此外,散射矩阵对粒径分布参数的敏感性也必须考虑,这是因为反演是病态的,存在粒径分布参数不同而散射矩阵相同的可能性。在进行敏感性分析时,根据气溶胶发生的典型粒径分布分别设置 r_g 和 $\ln^2 \sigma_g$ 为0.1~0.3 μm 和0.1~0.3,粒径范围取0~1 μm 。图5和图6为波长445 nm时,依次改变两个参数的PAO气溶胶散射矩阵的模拟计算结果, r_g 分别取0.1、0.2、0.3 μm , $\ln^2 \sigma_g$ 分别取0.1、0.2、0.3,折射率取1.4653。模拟计算采用T矩阵法,该方法的相关理论在1965年由Waterman^[21]提出,是模拟计算旋转对称颗粒物散射矩阵的常用方法之一,计算使用的代码根据Mishchenko等^[1]编写的源代码修改而来。

可以看出,在粒径分布两个参数的变化范围内,除了 F_{33}/F_{11} 在0°~90°散射角范围内对这两个参数的变化不敏感,其余矩阵元素对粒径分布的变化都较为敏感,因此该粒径分布范围满足反演所需的敏感条件。

3.3 PAO粒径分布反演方法及结果分析

采用模板匹配的方法来反演粒径分布参数。具体方法如下:根据复折射率、粒径范围、波长等信息,在被

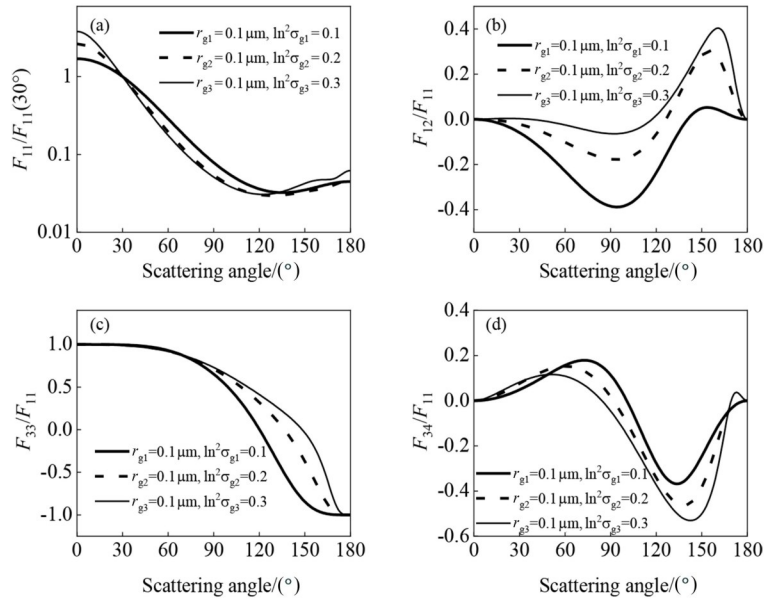


图 5 不同方差的 Mie 理论计算结果。(a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{33}/F_{11} ; (d) F_{34}/F_{11}

Fig. 5 Mie theoretical calculation results of different variances. (a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{33}/F_{11} ; (d) F_{34}/F_{11}

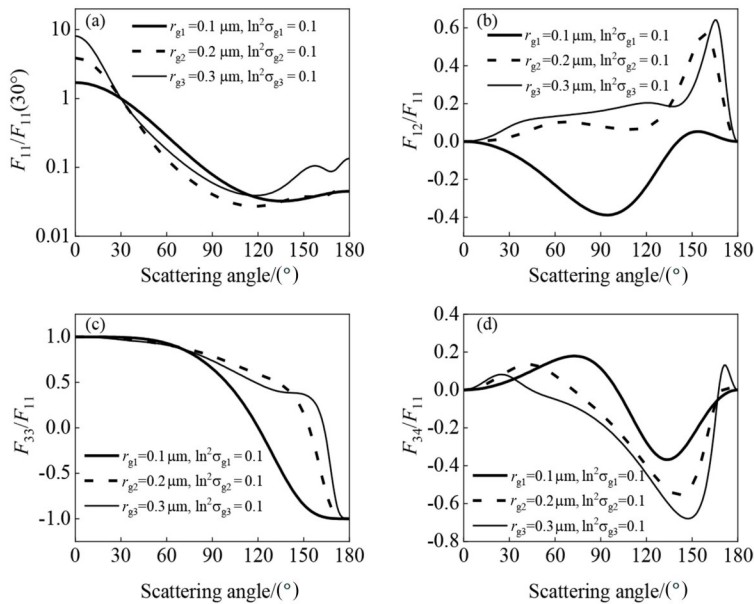


图 6 不同平均半径的 Mie 理论计算结果。(a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{33}/F_{11} ; (d) F_{34}/F_{11}

Fig. 6 Mie theoretical calculation results of different average radius. (a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{33}/F_{11} ; (d) F_{34}/F_{11}

测气溶胶粒径参数变化范围之内建立待测气溶胶的散射矩阵查找表, 并选择实验测量的 $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$ 、 F_{12}/F_{11} 、 F_{21}/F_{11} 、 F_{22}/F_{11} 、 F_{33}/F_{11} 、 F_{34}/F_{11} 、 F_{43}/F_{11} 、 F_{44}/F_{11} 共 8 个矩阵元素与查找表中计算的理论结果进行比较, 计算公式为

$$f = \sum (\tilde{F}_{ij,mea} - \tilde{F}_{ij,mie})^2, \quad (4)$$

式中 $\tilde{F}_{ij,mea}$ 和 $\tilde{F}_{ij,mie}$ 分别为矩阵元素测量值和 Mie 理论计算结果, 将 f 值最小的一组理论结果所对应的参数值作为 PAO 气溶胶的粒径分布。理论计算中参数的选取与实验时的实际情况相对应, 波长取 445 nm, 折射率

取 1.4653, 粒径范围设定为 $0 \sim 1 \mu\text{m}$, 测量角度为 $3.5^\circ \sim 170^\circ$ 范围内的 48 个数据, 参数 r_g 取值范围为 $0.05 \sim 0.3 \mu\text{m}$, 参数 $\ln^2\sigma_g$ 取值范围为 $0.02 \sim 0.50$, 同时考虑到计算时间和反演精度, 在建立查找表时将两个参数的步长均设置为 0.01。

图 7 为 PAO 实验测量结果与反演参数计算的 Mie 理论结果对比 (由于理论计算中 $F_{21} = F_{12}$, $F_{43} = -F_{34}$, 因此图中只绘制了 6 个矩阵元), 反演所得 PAO 粒径分布参数为 $r_g = 0.12 \mu\text{m}$, $\ln^2\sigma_g = 0.31$ 。可以发现, 大部分矩阵元素的 Mie 理论计算结果与测量结果一致性高, 这表明反演的粒径分布参数可以较好地用于表征 PAO 的实际粒径分布。

可以看出, Mie 理论计算结果与测量结果在 F_{12}/F_{11} 和 F_{34}/F_{11} 前向散射角度的值存在偏差, 具体原因如下: 首先, 从 F_{22}/F_{11} 的测量结果可以看出, PAO 气溶胶为近似球形, 使用 Mie 理论描述其光散射会存在一定偏差; 其次, 对数正态分布函数只是实际粒径分布的近似, PAO 气溶胶的真实粒径分布无法准确地用两个参数来表征; 最后, 实验过程中其他气溶胶的影响、PAO 折射率的不确定性均对反演结果有着一定影响。考虑到上述原因, Mie 理论计算结果与测量结果存在差异是合理的。因此, 基于散射矩阵测量数据来进行气溶胶理化特性的反演是可行的。

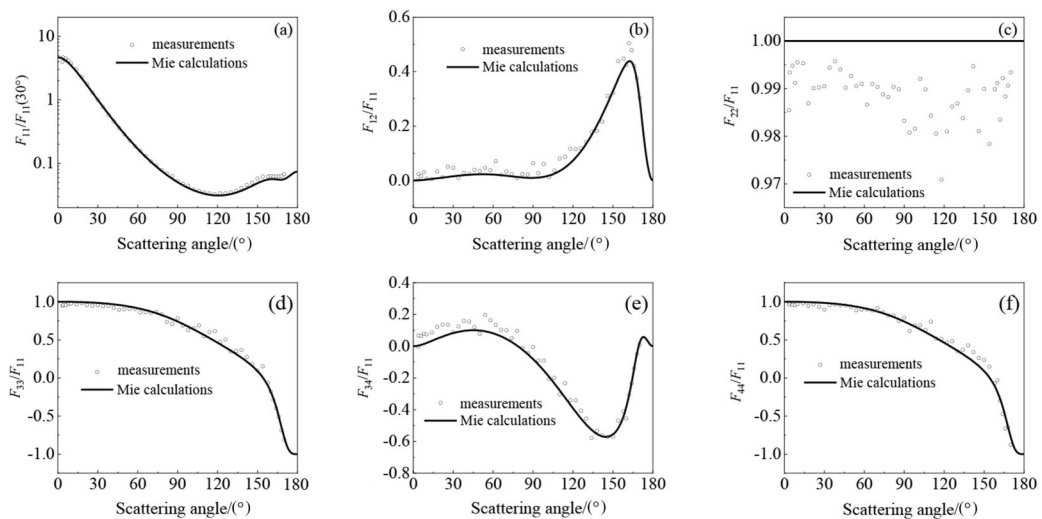


图 7 PAO 气溶胶测量结果与反演参数计算的 Mie 理论结果对比。(a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{22}/F_{11} ; (d) F_{33}/F_{11} ; (e) F_{34}/F_{11} ; (f) F_{44}/F_{11}

Fig. 7 Comparison of PAO aerosol measurement results and Mie theoretical results calculated by inversion parameters.

(a) $F_{11}/F_{11}(30^\circ)$; (b) F_{12}/F_{11} ; (c) F_{22}/F_{11} ; (d) F_{33}/F_{11} ; (e) F_{34}/F_{11} ; (f) F_{44}/F_{11}

4 结 论

设计实验使用偏振浊度计对 PAO 和氯化钠两种气溶胶样品的散射矩阵进行了测量, 讨论了二者各个矩阵元素随散射角的变化规律, 基于 Mie 散射理论和模板匹配的方法对 PAO 的粒径分布进行了反演。结果表明 PAO 和氯化钠两种气溶胶的散射特性显著不同, 通过散射矩阵中的多个特征均能够对二者进行有效识别与区分, 此外, 反演的粒径分布参数能够较好地描述本文中 PAO 的散射矩阵测量结果。该研究可为散射矩阵用于气溶胶识别及理化参数的反演提供参考。

参考文献:

- [1] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A. *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles* [M]. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2002.
- [2] Li Z, Zhang Y, Xu H, *et al.* The fundamental aerosol models over China region: A cluster analysis of the ground-based remote sensing measurements of total columnar atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(9): 4924-4932.
- [3] Kim M H, Omar A H, Tackett J L, *et al.* The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(11): 6107-6135.
- [4] Ding C Z. *Study on Size Retrieval of Weakly-Scattering Particles from Light Scattering* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
丁驰竹. 基于光散射的水中弱散射颗粒粒度反演研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [5] Shan L, Li H R, Hong B, *et al.* Inversion of multimodal particle size distribution based on the artificial bee colony algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12): 197-210.
单良, 李浩然, 洪波, 等. 基于人工蜂群算法的多峰颗粒粒度分布反演 [J]. 光子学报, 2020, 49(12): 197-210.
- [6] Li Y D, Zhang Q X, Deng X J, *et al.* Inversion of size distribution of fire smoke particles based on simulated annealing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 215-220.
李耀东, 张启兴, 邓小玖, 等. 基于模拟退火的火灾烟颗粒粒径反演 [J]. 中国激光, 2011, 38(1): 215-220.
- [7] Hovenier J. W, Volten H, Muñoz O, *et al.* Laboratory studies of scattering matrices for randomly oriented particles: Potentials, problems, and perspectives [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, 79/80: 741-755.
- [8] Mugnai A, Wiscombe W J. Scattering from nonspherical Chebyshev particles. 3: Variability in angular scattering patterns [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(15): 3061-3073.
- [9] Mishchenko M I, Yurkin M A. On the concept of random orientation in far-field electromagnetic scattering by nonspherical particles [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 494-497.
- [10] Hu Q. *Scattering Matrix Polarimetry Technique and Its Application to Aerosol Particles* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
胡强. 气溶胶颗粒物散射矩阵偏振测量技术及应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [11] Chen W Y, Zou K, Wang X W, *et al.* Correlation of properties and compositions of hydrotreated lube base oil [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2014, 45(10): 94-98.
陈文艺, 邹恺, 王秀文, 等. 几种加氢润滑油基础油性质和组成的研究 [J]. 石油炼制与工, 2014, 45(10): 94-98.
- [12] Wang X W, Chen W Y, Zou K. Prediction of the structural group compositions of lube base oil [J]. *Petrochemical Technology*, 2014, 43(2): 221-225.
王秀文, 陈文艺, 邹恺. 润滑油基础油结构族组成的预测 [J]. 石油化工, 2014, 43(2): 221-225.
- [13] Rong H, Gu X J, Wen Z Y, *et al.* Measurement of refractive index of aerosol particles using aerosol time-of-flight mass spectrometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2017, 12(5): 349-355.
荣华, 顾学军, 温作赢, 等. 用气溶胶飞行时间质谱仪测量气溶胶粒子折射率 [J]. 大气与环境光学学报, 2017, 12(5): 349-355.
- [14] Mishchenko M I, Wiscombe W J, Hovenier J W, *et al.* *Overview of Scattering by Nonspherical Particles* [M]. Light Scattering by Nonspherical Particles. Amsterdam: Elsevier, 2000: 29-60.
- [15] Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation* [M]. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2002.
- [16] Liu L, Mishchenko M I, Hovenier J W, *et al.* Scattering matrix of quartz aerosols: Comparison and synthesis of laboratory and Lorenz-Mie results [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, 79/80: 911-920.

- [17] Merikallio S, Muñoz O, Sundström A M, *et al.* Optical modeling of volcanic ash particles using ellipsoids [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(9): 4102-4116.
- [18] Xu F, Cai X S, Su M X, *et al.* Study of independent model algorithm for determination of particle size distribution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(2): 223-228.
徐峰, 蔡小舒, 苏明旭, 等. 独立模式算法求解颗粒粒径分布的研究 [J]. 中国激光, 2004, 31(2): 223-228.
- [19] Li X B, Gong C W, Li C, *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.
- [20] Hull P, Shepherd I, Hunt A. Modeling light scattering from Diesel soot particles [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(17): 3433-3441.
- [21] Waterman P C. Matrix formulation of electromagnetic scattering [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(8): 805-812.