

文章编号: 1005-5630(2015)04-0348-05

# 气溶胶浓度对偏振光传输特性的影响

宣建楠, 隋成华, 鄢 波

(浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 采用双光路检测配置条件, 结合 Mie 氏理论, 运用斯托克斯矢量形式, 以烟雾模拟特定气溶胶环境, 探究偏振光经过不同烟雾环境的传输变化情况。考虑到大气气溶胶成分、质量浓度和颗粒大小以及光源的波长和偏振态等多因素的影响, 主要在气溶胶质量浓度和光源配置方面进行研究。实验结果表明, 不同烟雾质量浓度时, 水平线偏振光的偏振特性基本不改变, 右旋偏振光和 45° 线偏振光退偏程度随烟雾质量浓度的增加而增加, 460 nm 和 556 nm 波长的偏振光在变化趋势上保持一致。

**关键词:** 偏振态; 斯托克斯矢量; 气溶胶

**中图分类号:** TH74 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.04.014

## The influence of aerosol concentration on the transmission characteristics of polarized light

XUAN Jianman, SUI Chenghua, YAN Bo

(College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310023, China)

**Abstract:** This paper used smoke to simulate specific aerosol environment. Based on Mie's theory and Stokes vector, two-ray-path detector explored the change of the polarization state when the different polarized light passed the smoke. There were many factors including the atmospheric aerosol composition, concentration, particle size and the wavelength and polarization state of light source. Mainly the aerosol concentration and light source configuration were studied and measured. The results show that the different mass concentration of the smoke cannot change the horizontal linear polarization state. Degree of polarization of 45° linear polarized light and circular polarized light decreases with the increase of mass concentration of smoke. The change trend of degree of polarization on 460 nm wavelength is similar with that on 556 nm.

**Keywords:** polarization state; Stokes vector; aerosol

## 引 言

自然环境中, 存在着大量微小粒子群, 如大气中的气溶胶粒子、烟气中的粒子等, 入射偏振光通过介质散射后, 偏振态通常与入射时并不一致, 分析多种散射偏振特性可以检测散射介质的内部特征, 研究这

收稿日期: 2014-11-28

基金项目: 浙江省科技厅重大专项资助项目(2010C11G2020039)

作者简介: 宣建楠(1990—)男, 硕士研究生, 主要从事光信息传输与处理方面的研究。E-mail: 15068860745@163.com

通信作者: 隋成华(1956—)男, 教授, 主要从事光纤传感和光信息处理方面的研究。E-mail: suich@zjut.edu.cn

些粒子对光波的传输特性影响在大气科学和生物医学中有着重要意义。另一方面,随着信息科学的兴起,大气中存在大量携带信息的光信号,必然与大气发生作用,在特定环境或已知条件的空间进行偏振传输时,可以从中提取更多的重要信息,对通信、环境监测、大气遥感和目标探测等方面具有非常重要的意义。目前,在偏振性的研究上,如气溶胶成分、质量浓度和颗粒大小以及光源特性方面,系统的研究并不多。本文主要通过 Mie 散射理论和斯托克斯矢量<sup>[1]</sup>,研究多种偏振光在烟雾环境中的偏振传输变化<sup>[2-7]</sup>,对多因素影响下偏振光在散射介质中的一般传输特性进行了定性和定量的分析,为今后进一步系统研究打下基础。

## 1 基本理论

### 1.1 气溶胶

大气环境中常引入气溶胶的概念来描述环境中颗粒的尺寸范围。一般来说,气溶胶是指悬浮在气体中的由小粒子构成的多分散系,其颗粒半径范围为 0.001~100  $\mu\text{m}$ ,而环境中往往包含了大量的微小颗粒。根据粒子尺度  $\alpha = 2\pi r/\lambda$  作为判别标准(其中, $r$ 为粒子半径, $\lambda$ 为波长):(1)  $\alpha \ll 1$ ,称为 Rayleigh 散射或分子散射;(2)  $1 < \alpha < 50$ ,称为 Mie 散射或大颗粒散射;(3)  $\alpha > 50$ ,属于几何光学散射范畴。文中主要采用的烟雾颗粒尺度( $r$ 为 0.1~1.2  $\mu\text{m}$ 即  $\alpha$ 为 1.2~13.5)在 Mie 散射范围<sup>[8]</sup>,且主要讨论前向散射模型<sup>[9]</sup>。在前向散射中有过关于子弹光和蛇形光<sup>[10]</sup>的研究,本实验中采用一定浓度的烟雾,可以忽略子弹光的影响。

### 1.2 Mie 矩阵散射理论和斯托克斯矢量测量原理

斯托克斯早期提出用 4 个参量描述光波的强度和偏振态,4 个参量都是光强的时间平均值,它可以描述所有偏振态,再结合 Mie 散射理论中米勒矩阵可以描述光在介质中的偏振传输特性。由于较难直接测量它的相位关系,常通过测量光经过偏振片和相位延迟器不同组合后的光强值,间接计算得到斯托克斯参量。以下给出了一种测量公式<sup>[11-12]</sup>:

$$\begin{cases} I_0 = I_{(0^\circ,0)} + I_{(90^\circ,0)} \\ Q_0 = I_{(0^\circ,0)} - I_{(90^\circ,0)} \\ U_0 = 2I_{(45^\circ,0)} - I_0 \\ V_0 = 2I_{(45^\circ,\frac{\pi}{2})} - I_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_{(0^\circ,0)}$ 为偏振片取水平方向,不加相位延迟器的光强值; $I_{(45^\circ,0)}$ 为偏振片取 45°方向,不加相位延迟器的光强值; $I_{(90^\circ,0)}$ 为偏振片取垂直方向,不加相位延迟器的光强值; $I_{(45^\circ,\frac{\pi}{2})}$ 为偏振片取 45°方向,加相位延迟器(四分之一波片)的光强值; $I_0$ 为总光强; $Q_0$ 为水平方向的光强值; $U_0$ 为 45°方向的光强值, $V_0$ 为右旋光光强值。

对  $I_0$ 、 $Q_0$ 、 $U_0$  和  $V_0$  测量值作关于  $I_0$  的归一化处理得相应值  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  和  $V$ ( $I$ 、 $Q$ 、 $U$ 、 $V$  为斯托克斯矢量的 4 个参量),如表 1 所示。同时,偏振度(degree of polarization, DOP)可以用以下公式计算出:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (2)$$

## 2 实验与分析

### 2.1 实验装置

主要采用涵盖 2 种波段(460 nm 和 556 nm)的窄带滤光片、四分之一波片以及线偏振片的组合装置构成多种入射光,测量装置如图 1 所示。

实验系统的起偏和检偏光路部分主要分为前后 A 和 B 2 个部分:A 部分主要由滤光片和相应波段的四分之一波片以及偏振片构成。为获得不同波长的不同类型的偏振光,实验中采用 460 nm 和 556 nm 的

表 1 斯托克斯矢量的取值范围和物理意义

Tab. 1 The scope and physical meanings of the Stokes vector

斯托克斯参量	取值范围	物理意义
$I$	1	总光强
$Q$	$-1 \leq Q \leq 1$	水平(垂直)方向的光强
$U$	$-1 \leq U \leq 1$	45°(±)方向上的光强
$V$	$-1 \leq V \leq 1$	右(左)旋光光强

滤光片以及相应波段的四分之一波片配合偏振片多种方式组合而成。B 部分主要包括相应的四分之一波片和线偏振片。

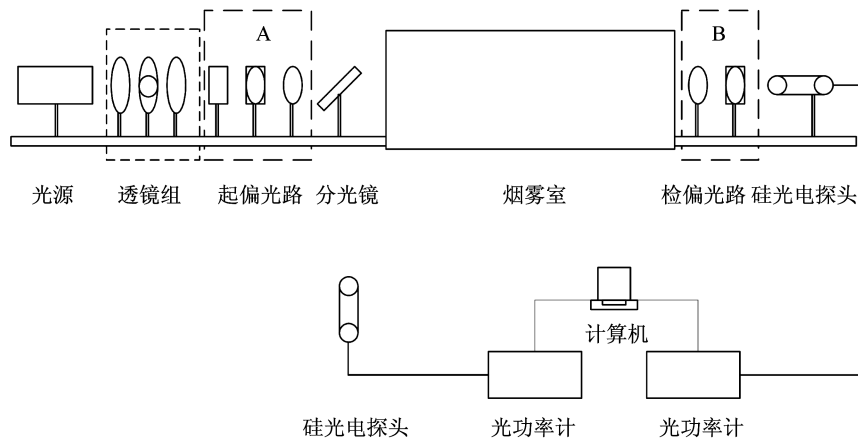


图 1 测量装置示意图

Fig. 1 Measurement device diagram

系统入射光起偏方法:入射光是色温为 5 600 K 的标准白光光源,通过改变滤光片种类可以获得不同波长的光,通过加入偏振片可以获得水平偏振光或 45°线偏振光,再加入波片可以获得圆偏振光。系统出射光检偏方法:设被考查光是持续稳定的,组合测量装置选取为一个四分之一波片、一个可旋转线偏振器和一个光功率测量装置。测量步骤为:1)在光路中只加入线偏振器,通过旋转线偏振器来改变  $\theta$  角度,分别使  $\theta$  为 0°、45°、90°测量光强得到  $I_{(0^\circ,0)}$ 、 $I_{(45^\circ,0)}$ 、 $I_{(90^\circ,0)}$ ;2)在光路中再加入四分之一波片,通过旋转线偏振器来改变  $\theta$  角度使  $\theta$  为 45°,测量光强得到  $I_{(45^\circ,\pi/2)}$ 。将测量所得光强值分别代入以上式(1)中。

本装置中有 2 路探测光信号的光路,其中一路为参考光路,另一路则为实验光路,即通过分光镜产生 2 路相同的光,一路保持不变,另一路则经过雾室。实验在常温常湿下进行,用粉尘仪测定烟雾质量浓度。

2.2 实验数据与分析

表 2 为 460 nm 右旋偏振光经过不同烟雾质量浓度时的斯托克斯矢量变化情况,随着烟雾质量浓度增加,V 分量明显减小,Q 和 U 分量变化不明显,P 偏振度明显减小,变化趋势与 V 分量近似。表 3 为 460 nm 的 45°线偏振光入射时,随烟

表 2 右旋偏振光(460 nm)入射经过不同烟雾质量浓度的斯托克斯矢量变化

Tab. 2 The change of the Stokes vector in the different concentration of the smoke with right polarized light (460 nm)

烟雾质量浓度/(kg · m <sup>-3</sup> )	I	Q	U	V	P	ΔP
0	1.000	-0.119	-0.081	0.989	1.000	0.008
2.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.116	-0.089	0.975	0.986	0.007
4.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.105	-0.028	0.963	0.969	0.008
6.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.031	-0.025	0.817	0.818	0.009
8.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.122	-0.053	0.711	0.723	0.007

雾质量浓度增加,U 分量明显减小,Q 和 V 分量变化不明显,P 偏振度明显减小,变化趋势与 U 分量近似。表 4 为水平线偏振光入射时,随烟雾质量浓度增加,Q、U 和 V 分量基本不变,偏振度变化不明显,保持较好的最初偏振特性。图 2 显示了 3 种偏振光的偏振度与烟雾质量浓度的关系,随着烟雾质量浓度的增加,3 条退偏曲线出现明显的不同。实验中偏振光的偏振特性变化与通过均匀且各向同性球形粒子后的单次 Mie 散射理论相吻合,在烟雾室中水平线偏振光可以保持很好的偏振态。而随着烟雾质量浓度增加,实际为复杂的多次散射,由于颗粒本身的形状大小等属性并非严格的各向同性球形粒子,出现了退偏和保偏现象。

表 3 45°线偏振光(460 nm)入射经过不同烟雾质量浓度的斯托克斯矢量变化

Tab.3 The change of the Stokes vector in the different concentration of the smoke with 45° polarized light (460 nm)

烟雾质量浓度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	I	Q	U	V	P	ΔP
0	1.000	-0.221	0.973	-0.058	0.999	0.008
2.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.219	0.925	-0.063	0.954	0.008
4.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.189	0.919	-0.072	0.940	0.007
6.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.166	0.871	0.009	0.886	0.009
8.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.241	0.780	-0.040	0.817	0.009

表 4 水平线偏振光(460 nm)入射经过不同烟雾质量浓度的斯托克斯矢量变化

Tab.4 The change of the Stokes vector in the different concentration of the smoke with 0° polarized light (460 nm)

烟雾质量浓度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	I	Q	U	V	P	ΔP
0	1.000	0.996	0.103	-0.093	1.005	0.008
2.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.981	0.082	-0.172	1.000	0.008
4.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.979	0.102	-0.158	0.997	0.007
6.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.977	0.128	-0.064	0.988	0.009
8.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.977	0.164	-0.024	0.991	0.007

表 5 为 556 nm 的右旋偏振光入射时斯托克斯矢量变化情况, V 分量随着烟雾质量浓度增加而明显减小, Q 和 U 分量变化不明显, P 偏振度明显减小。表 6 为 45°线偏振光入射时, U 分量随烟雾质量浓度增加而减小但趋势变缓, Q 和 V 分量变化不明显, P 偏振度明显减小。表 7 为水平线偏振光入射时, 随烟雾质量浓度增加, Q、U 和 V 分量基本不变, 偏振度变化不明显, 保持较好的最初偏振特性。由图 3 可以看出, 3 种偏振光随着烟雾质量浓度的增加, 其退偏曲线出现明显的不同。

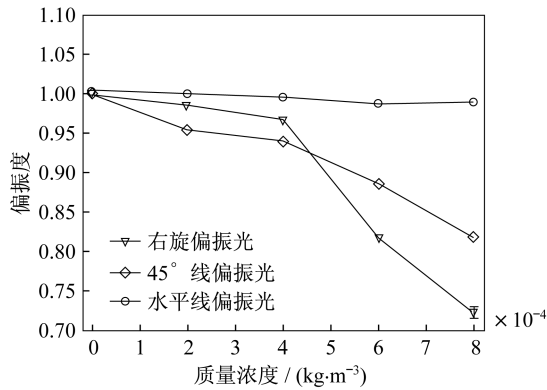


图 2 3 种偏振态入射光(460 nm)经过不同烟雾质量浓度的 DOP 变化

Fig.2 The change of DOP in the different smoke with three kinds of polarized light (460 nm)

表 6 45°线偏振光(556 nm)入射经过不同烟雾质量浓度的斯托克斯矢量变化

Tab.6 The change of the Stokes vector in the different concentration of the smoke with 45° polarized light (556 nm)

烟雾质量浓度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	I	Q	U	V	P	ΔP
0	1.000	-0.211	0.974	0.084	1.000	0.008
2.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.229	0.880	-0.031	0.910	0.007
4.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.236	0.880	-0.025	0.912	0.007
6.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.182	0.821	0.014	0.840	0.009
8.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	-0.168	0.820	0.033	0.837	0.008

表 5 右旋偏振光(556 nm)入射经过不同烟雾质量浓度的斯托克斯矢量变化

Tab.5 The change of the Stokes vector in the different concentration of the smoke with right polarized light (556 nm)

烟雾质量浓度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	I	Q	U	V	P	ΔP
0	1.000	0.035	0.121	0.981	0.989	0.008
2.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.047	0.074	0.965	0.969	0.007
4.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.044	0.056	0.960	0.963	0.007
6.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.060	0.021	0.748	0.751	0.009
8.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.061	0.015	0.666	0.669	0.009

表 7 水平线偏振光(556 nm)入射经过不同烟雾质量浓度的斯托克斯矢量变化

Tab.7 The change of the Stokes vector in the different concentration of the smoke with 0° polarized light (556 nm)

烟雾质量浓度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	I	Q	U	V	P	ΔP
0	1.000	0.998	0.058	0.008	1.000	0.008
2.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.992	0.118	-0.026	0.999	0.008
4.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.988	0.111	-0.029	0.995	0.009
6.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.988	0.159	0.040	1.001	0.008
8.00×10 <sup>-4</sup>	1.000	0.992	0.117	-0.022	0.999	0.008

比较图 2 和图 3,相同烟雾条件,两个波长的偏振光传输变化趋势相近。由于两个波长比较相近,实际的颗粒尺度数相近,都在 Mie 散射范围中,考虑到多次散射带来的差异,相同的偏振变化趋势符合基本理论。

### 3 结 论

通过改变烟雾质量浓度,可以改变偏振光的偏振传输特性,而相近波长的偏振光的偏振度变化曲线差异不明显。水平线偏振光入射时:随烟雾质量浓度增加基本不改变入射光偏振特性;右旋偏振光和 45°线偏振光入射时偏振度都有明显随烟雾质量浓度增加而减小;而当烟雾质量浓度较低时,偏振态变化趋势较缓,可以做到保偏。本文为偏振光在不同气溶胶质量浓度的偏振传输研究提供了重要依据,也为偏振光在不同气溶胶成分以及颗粒大小形状等方面的研究提供了参考。

### 参考文献:

- [ 1 ] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003:45-62.
- [ 2 ] UGOLNIKOV O S,POSTYLYAKOV O V,MASLOV I A. Effects of multiple scattering and atmospheric aerosol on the polarization of the twilight sky[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer,2004,88 (1/3):233-241.
- [ 3 ] 杨利红,柯熙政,马冬冬. 偏振激光在大气传输中的退偏研究[J]. 光电工程,2008,35(11):62-67.
- [ 4 ] 覃彬. 基于 Mie 散射天空偏振光特性的研究[D]. 大连:大连理工大学,2013:4-12.
- [ 5 ] 陈璐玲,杨晖,郑刚,等. 动态线偏振光散射纳米颗粒粒度测量法的研究与分析[J]. 光学仪器,2010,32(5):1-5.
- [ 6 ] 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):6-14.
- [ 7 ] 张倩倩,高隽,徐小红,等. 多粒子散射的偏振传输特性分析[J]. 中国激光,2012,39(12):184-191.
- [ 8 ] 蔡君兰,赵明月,杨军. 卷烟侧流烟气研究进展[J]. 烟草科技,2002(7):22-25.
- [ 9 ] MA L Z,SHI P,ZHANG W Z,et al. New forward scattering model for polarized light propagating in atmosphere[J]. Journal of Applied Optics,2010,31(3):503-507.
- [10] 隋成华,范竞藩. 子弹光雾中成像的研究[J]. 光学仪器,1997,19(4/5):3-6.
- [11] 覃兆宇,程兆谷,张志平,等. 偏振光斯托克斯参量的高速实时测量技术[J]. 光学学报,2007,27(4):659-662.
- [12] 陈卫斌,顾培夫. 偏振光的 Stokes 矩阵表示及应用[J]. 光学仪器,2004,26(2):42-46.

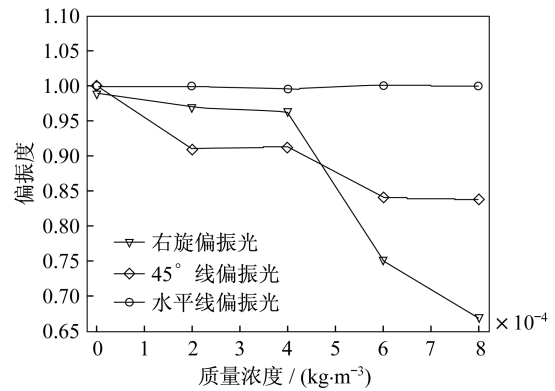


图 3 3 种偏振态入射光(556 nm)经过不同烟雾质量浓度的偏振度变化

Fig. 3 The change of DOP in the different smoke with three kinds of polarized light (556 nm)

(编辑:刘铁英)