

湿度对偏振光传输特性影响的研究

张肃¹, 付强¹, 段锦², 战俊彤¹

(1. 长春理工大学 空地激光通信国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 电信学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 城市污染的日益增强导致大气环境中烟煤粒子含量不断上升, 为了进一步研究烟煤环境下湿度对偏振光传输特性的影响, 研究气溶胶粒子的半径及折射率等参数随湿度的改变情况, 并采用蒙特卡洛的仿真方法, 模拟不同入射偏振光在烟煤介质中的传输过程, 得到出射光斯托克斯参量的仿真图样及偏振特性。结果表明: 烟煤环境下相对湿度的变化对偏振特性有规律性的影响。随着相对湿度的增加, 线偏振光入射时出射光的偏振特性逐渐增强, 且能很好的保持自身的偏振态; 圆偏振光入射时出射光的偏振度在相对湿度为 85% 时达到最大值, 偏振度及偏振角波动较大且无明显规律。因此随着相对湿度的增加入射光为线偏振光时出射光在保持偏振态及偏振特性增强方面更具优势。

关键词: 物理光学; 偏振光传输特性; 蒙特卡洛; 烟煤环境; 湿度

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0511001

Research of influence of humidity on transmission characteristics of polarized light

Zhang Su¹, Fu Qiang¹, Duan Jin², Zhan Juntong¹

(1. Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Growing urban pollution leads to the rise of the carbonaceous particle content in the atmospheric environment. To further research the influence of the humidity on transmission characteristics of polarized light, radius, refractive index and the other parameters of aerosol particles at different humidities were studied, and through Monte Carlo method the transmission process of different incident light in carbonaceous medium was simulated, which could get the Stocks simulation pattern and polarization characteristics of the emergent light. The results show that the change of increase of the relative humidity can influence the polarization characteristic regularly. With the increase of the relative humidity, when the incident light is linear polarization, the polarization characteristics of emergent lights will have a increasing tendency, and can keep their polarization states; When the incident light is circular polarization, the degree of polarization (DOP) of the emergent light will have a maximum value at the humidity of 85%, and there will be no obvious regularity in the fluctuation of DOP and polarization angle. Therefore, when the incident light is linearly polarized light, the emergent light has a more advantageous in the polarization state keeping

收稿日期: 2015-09-05; 修订日期: 2015-10-03

基金项目: 国家 973 计划; 长春理工大学青年基金

作者简介: 张肃(1985-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事偏振传输、光学信息处理等方面的研究。Email: susiezhang21@126.com

and polarization characteristic enhancement with the increase of the relative humidity.

Key words: physical optics; transmission characteristics of polarized light; Monte Carlo; carbonaceous environment; humidity

0 引言

偏振作为独立于光强和波长的又一光的固有特性,具有其他光学特性所不具有的信息载体作用^[1],能够反映自然界中任何物体在表面形貌、纹理、材质等自身性质上所产生的偏振差异,在军事侦察^[2-3]、医疗诊断^[4]、卫星遥感^[5]等领域都有着广泛的应用前景。

随着目前环境污染问题的日趋严峻,导致偏振光在传统常态大气环境中传输的偏振特性发生改变。基于此,许多研究者在常态大气偏振传输特性研究的基础上作了进一步的研究。郝增周等研究沙尘气溶胶粒子群的散射及偏振特性,基于 Mie 散射理论,计算沙尘气溶胶粒子群对散射和偏振特征的影响^[6];杨利红等人采用蒙特卡洛方法模拟激光在浓雾和弱雾中的传输,并通过分析计算,研究雾气粒子影响下光的偏振特性^[7];王子谦等也采用了蒙特卡洛的仿真方法,在混浊大气情况下进行了偏振模式的全天域建模,准确的表征了混浊大气偏振模式的全局分布特征^[8];刘琦等研究了水云光学特性对大气偏振特性的影响,对水云条件下大气偏振的模式进行了仿真,为偏振光导航传感器的实际应用提供了理论基础^[9]。

但在众多的环境污染天气中,最容易发生且最易被人们所忽视的烟煤型污染,在一个较长的潜伏期内危害着大气环境,同时,周围环境的湿度影响在一定程度上改变烟煤粒子的半径及折射率等参数,使得对偏振特性的研究又增加了更多的不确定因素。为了研究偏振光在这种特定烟煤环境下传输特性随相对湿度的变化,在 Mie 散射理论的基础上,采用蒙特卡洛建模仿真方法,结合湿度对烟煤气溶胶粒子的影响,分析不同偏振光入射时,出射光偏振特性随相对湿度变化的趋势,为偏振光在烟煤环境下的传输提供理论基础及实验依据。

1 蒙特卡罗模拟

蒙特卡洛方法可以模拟各个光子在大气传输中

的散射和吸收过程,并以统计的方法推算其辐射强度分布^[10]。基于蒙特卡洛方法的光子多次散射过程的流程图如图 1 所示,其蒙特卡洛模拟过程主要经过初始参数设定、散射后初始参数的更新、光子在介质中传输的 Mie 散射过程、散射角与方位角的确定及散射过程中斯托克斯矢量变化等主要步骤,最后通过判断光子的存亡、是否射出介质边界及完成散射的光子数量来确定整个散射过程的终止^[11]。

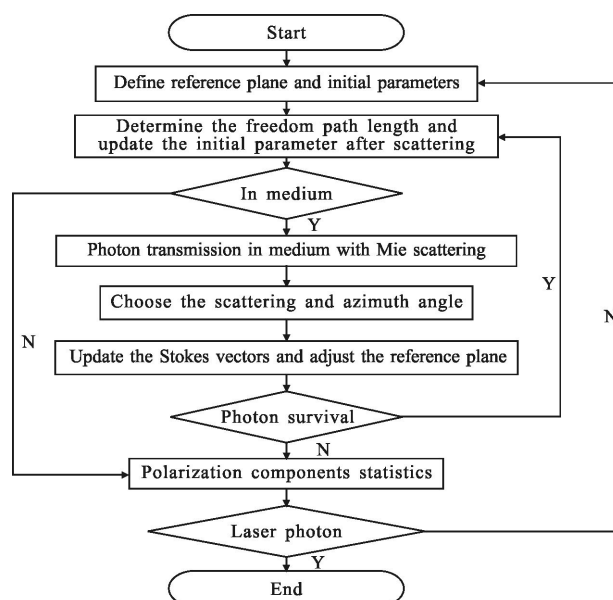


图 1 基于蒙特卡洛方法的光子多次散射过程流程图

Fig.1 Multiple scattering process diagram based on Monte Carlo

1.1 初始参数设定

若 S_0 和 S' 分别为入射和出射光的斯托克斯矢量,用来描述其偏振态,以入射初始位置 $(0, 0, 0)$ 为坐标原点,建立坐标系,以 XOZ 面作为初始时的参考平面,若光子沿 z 轴方向入射,则入射初始方向余弦为 $(0, 0, 1)$ 。

1.2 散射后初始参数的更新

在光子传输的过程中,由于散射作用,散射后坐标 (x', y', z') 会不断发生变化:

$$\begin{cases} x' = x + \mu_x l \\ y' = y + \mu_y l \\ z' = z + \mu_z l \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x, y, z) 为散射前坐标; (μ_x, μ_y, μ_z) 为传输的方向余弦; l 为光子自由程长度。根据比尔-朗伯定律推导, 得:

$$l = -\frac{\ln(\zeta_l)}{k_e} \quad (2)$$

式中: ζ_l 为在 $(0, 1)$ 区间均匀分布的随机数, 表示光子在自由程 l 时的存活概率; k_e 为总消光系数。

同样, 对于方向余弦, 当 $|\mu_z| < 0.9999$ 时, 经散射后新的方向余弦 (μ_x', μ_y', μ_z') 为:

$$\begin{cases} \mu_x' = \sin\alpha(\mu_x\mu_z\cos\beta - \mu_y\sin\beta) / \sqrt{1 + \mu_z^2} + \mu_x\cos\alpha \\ \mu_y' = \sin\alpha(\mu_y\mu_z\cos\beta + \mu_x\sin\beta) / \sqrt{1 + \mu_z^2} + \mu_y\cos\alpha \\ \mu_z' = -\sin\alpha\cos\beta\sqrt{1 - \mu_z^2} + \mu_z\cos\alpha \end{cases} \quad (3)$$

上式中, 若 $|\mu_z| > 0.9999$ 时, 则

$$\begin{cases} \mu_x' = \sin\alpha\cos\beta \\ \mu_y' = \sin\alpha\sin\beta \\ \mu_z' = \text{SIGN}(\mu_z)\cos\alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中: “SIGN” 为符号函数。

1.3 散射过程中斯托克斯矢量的变化

若由入射斯托克斯矢量 S_0 到出射光的斯托克斯 S' 共经过 n 次散射, 则在整个散射过程中有以下的变换关系:

$$S' = R(-\gamma_n) \cdot M(\theta_n) \cdot R(\phi_n) \cdot (-\gamma_{n-1}) \cdot M(\theta_{n-1}) \cdot R(\phi_{n-1}) \cdot \dots \cdot R(-\gamma_1) \cdot M(\theta_1) \cdot R(\phi_1) S_0 \quad (5)$$

式中: M 为 Mueller 矩阵; R 为旋转矩阵; θ 为散射角; ϕ 和 γ 分别为入射光斯托克斯矢量由参考面转到散射面的角度及经散射之后又转回参考面的角度。旋转角 γ 可表示为:

$$\cos\gamma = \frac{-\mu_{zn} + \mu_{z(n+1)}\cos\theta_n}{\pm\sqrt{(1 - \cos^2\theta_n)(1 - \mu_{z(n+1)}^2)}} \quad (6)$$

式中: μ_{zn} 和 $\mu_{z(n+1)}$ 分别为散射前后光子方向余弦。

旋转矩阵 $R(-\gamma)$ 和 $R(\phi)$ 可表示为:

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\phi) & \sin(2\phi) & 0 \\ 0 & -\sin(2\phi) & \cos(2\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

下面分别通过 Mie 散射过程和拒绝的方法便可确定 Mueller 矩阵和散射角 θ 及方位角 ϕ 。

1.4 Mie 散射过程

通常情况下, 当粒子半径 r 与入射光波长相差不大时, 则此时球形粒子 Mueller 矩阵 $M(\theta)$ 可按 Mie 散射过程求得^[12]:

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} m_{11}(\theta) & m_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ m_{12}(\theta) & m_{11}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33}(\theta) & m_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -m_{34}(\theta) & m_{33}(\theta) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $m_{11}(\theta)$ 、 $m_{12}(\theta)$ 、 $m_{33}(\theta)$ 和 $m_{44}(\theta)$ 可用散射振幅表示

$$\begin{aligned} m_{11}(\theta) &= \frac{1}{2}(|S_1|^2 + |S_2|^2), & m_{12}(\theta) &= \frac{1}{2}(|S_1|^2 - |S_2|^2) \\ m_{33}(\theta) &= \frac{1}{2}(S_1S_2^* - S_1^*S_2), & m_{44}(\theta) &= \frac{i}{2}(S_1S_2^* - S_2^*S_1) \end{aligned} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[a_n \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} + b_n \frac{P_n^1(\cos\theta)}{d\theta} \right] \\ S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[a_n \frac{P_n^1(\cos\theta)}{d\theta} + b_n \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} \right] \end{cases} \quad (10)$$

公式(10)中:

$$P_n^1(\cos\theta) = \frac{\sin\theta}{2^n n!} \left(\frac{d}{d\cos\theta} \right)^{n+1} (\cos^2\theta - 1)^n \quad (11)$$

$$\begin{cases} a_n(x) = \frac{\psi_n'(mx)\psi_n(x) - m\psi_n(mx)\psi_n'(x)}{\psi_n'(mx)\xi_n(x) - m\psi_n(mx)\xi_n'(x)} \\ b_n(x) = \frac{m\psi_n'(mx)\psi_n(x) - \psi_n(mx)\psi_n'(x)}{m\psi_n'(mx)\xi_n(x) - \psi_n(mx)\xi_n'(x)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_n^1(\cos\theta)$ 是 Associated Legendre 多项式, 尺度函数 $x = k\alpha = 2\pi\alpha/\lambda$, 粒子复折射率 $m = m_r + im_i (m_i \geq 0)$ 。 $\psi_n(x)$ 和 $\xi_n(x)$ 是 Riccati-Bessel 函数:

$$\begin{cases} \psi_n = \sqrt{\pi x/2} J_{n+1/2}(x) \\ \xi_n = \sqrt{\pi x/2} H_{n+1/2}^{(2)}(x) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $J_{n+1/2}$ 和 $H_{n+1/2}^{(2)}$ 分别为第一类 Bessel 球函数和第二类 Hankel 函数。

1.5 散射角和方位角的确定

散射角 $\theta \in [0, \pi]$, $m_{11}(\theta)$ 满足归一化条件

$$2\pi \int_0^\pi m_{11}(\theta) \sin(\theta) d\theta = 1 \quad (14)$$

则散射角的累积概率分布函数可以表示为:

$$P\{0 \leq \alpha \leq \theta\} = 2\pi \int_0^\alpha m_{11}(\alpha) \sin\alpha d\alpha = \xi \quad (15)$$

式中: ξ 为 $(0, 1)$ 上均匀分布的随机数, 采用拒绝的方法确定散射角, 若 $P \leq P(\theta)$, 则 θ 就作为新的散射角; 若 $P > P(\theta)$, 重新生成 P 和 θ , 直到求得散射角为止。当散射角确定之后, 方位角 ϕ 可根据条件概率分布函数 $P_\phi(\phi)$ 用相同的方法获得:

$$P_\phi(\phi) = 1 + \frac{m_{12}(\theta)[Q_0\cos(2\phi) + U_0\sin(2\phi)]}{m_{11}(\theta)} \quad (16)$$

则此时新的散射角 θ 与方位角 ϕ 都可被确定。完成整个蒙特卡洛的模拟过程。

2 湿度对气溶胶粒子的影响

周围环境的相对湿度对气溶胶粒子半径有很大的影响,进而影响气溶胶粒子的折射率。

当相对湿度为 f 时,则此时气溶胶粒子半径 r_h 与干气溶胶粒子半径 r_0 具有以下关系^[13]:

$$r_h = (1-f)^{-1/u} r_0 \quad (17)$$

式中: u 为常数,表示气溶胶粒子的吸湿性,根据不同的气溶胶粒子,吸湿性与干气溶胶粒子的等效半径不同。

粒子半径的改变同样会导致粒子复折射率的变化

$$m_{re} = m_{rw} + (m_{r0} - m_{rw}) \left[\frac{r_h}{r_0} \right]^{-3} \quad (18)$$

$$m_{ie} = \frac{m_{iw}}{2} + \left(\frac{m_{i0}}{2} - \frac{m_{iw}}{2} \right) \left[\frac{r_h}{r_0} \right]^{-3} \cdot (m_{re}^2 + 2) \quad (19)$$

式中: m_{re} 为吸湿后复折射率的实部; m_{ie} 为虚部,则

吸湿后粒子折射率 $m_e = m_{re} + m_{ie}$; 下标 0 和 w 分别表示干气溶胶和水,水粒子的复折射率 $m_w = 1.333 + 1.96 \times 10^{-4}i$ ^[13]。表 1 所示为沙尘型、海洋型及烟煤型三种不同干气溶胶粒子的半径、折射率及常数 u 的取值。

表 1 三种不同干气溶胶粒子的半径、折射率及常数 u 的取值

Tab.1 Radius, reflective index and constant value of three different types of dry aerosol particles

Particles	Radius r_0 / μm	Reflective index m_0	Constant u
Sand-dust aerosol	0.6	1.53+0.008i	4.8
Marine aerosol	0.5	1.38+4.3 $\times 10^{-4}i$	3.9
Carbonaceous aerosol	0.37	1.75+0.44i	4.4

根据表 1 中数据,可得到三种气溶胶粒子相对湿度与粒子尺寸、粒子复折射率实部及虚部的关系,如图 2 所示。

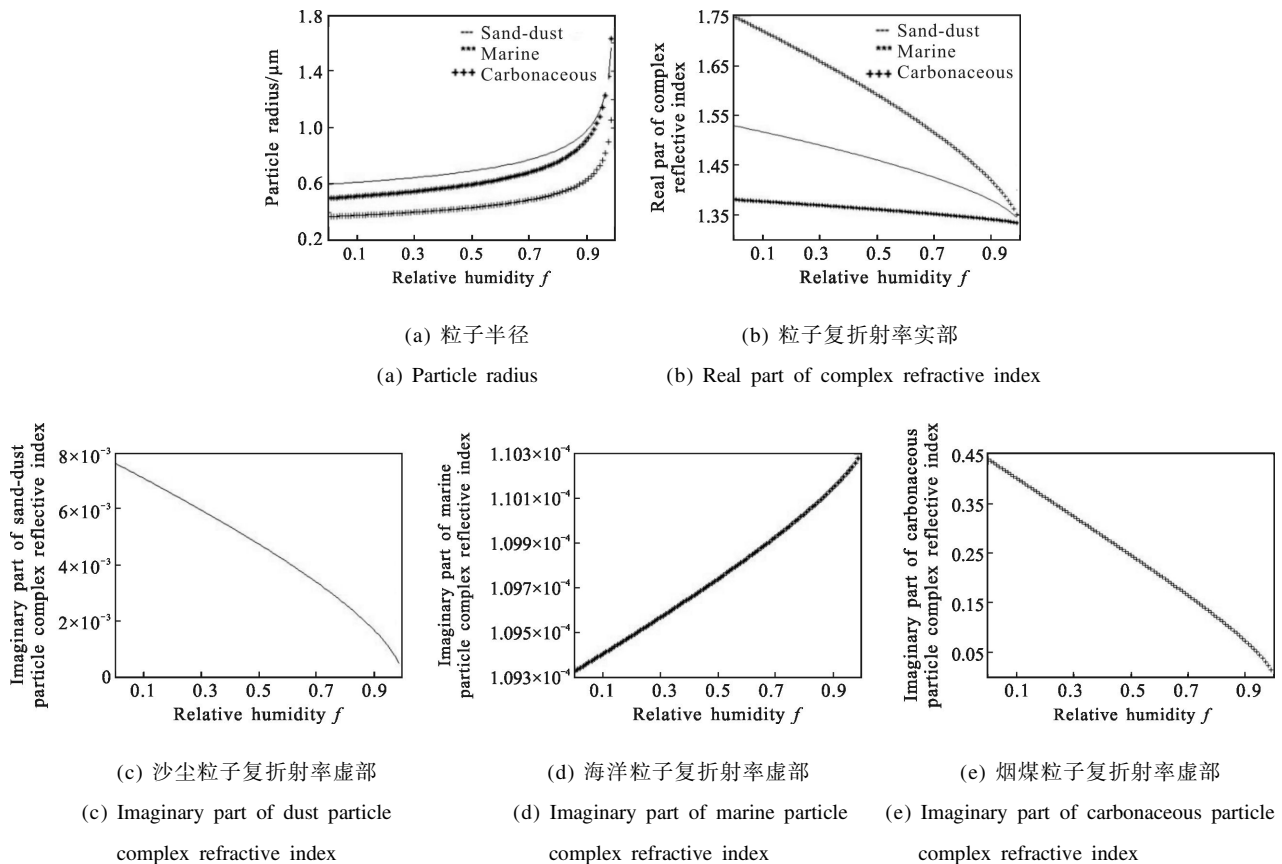


图 2 沙尘、海洋及烟煤型气溶胶粒子各参数随相对湿度变化关系

Fig.2 Each parameters of sand-dust, marine and carbonaceous aerosol particles at different relative humidities

3 建模与仿真结果

研究烟煤环境下相对湿度对偏振光退偏的影响,在烟煤传输介质中,分别输入水平([1 1 0 0])、垂直([1 -1 0 0])、对角线([1 0 1 0])及右旋([1 0 0 1])偏振光,选择可见光波长 532 nm,光子个数 10^6 个,考虑湿度对烟煤粒子半径与折射率的影响,用蒙特卡洛方法进行仿真建模,得到的结果如下所示。

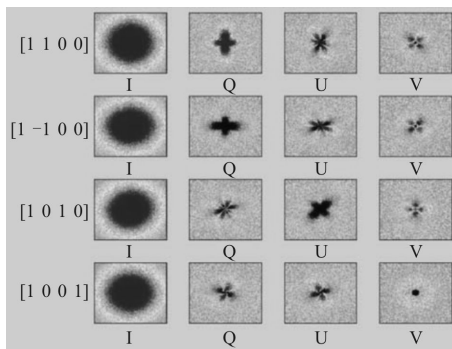
3.1 仿真图样随相对湿度变化的关系

分别计算烟煤气溶胶粒子在相对湿度为 20%、65%和 99%下的半径及折射率,如表 2 所示。经蒙特卡洛建模仿真,分别得到烟煤气溶胶粒子在这三种相对湿度下出射光斯托克斯的仿真图样,如图 3 所示。从图中可以看出,经散射后随着相对湿度的增加,水平、垂直和对角线三种入射线偏振光的偏振特性逐渐加强;而当入射光为右旋圆偏光时,I、Q、U 三个偏振分量的仿真图样呈逐渐增强的趋势,V 分量则是呈现先增强后减弱的趋势。

表 2 三种相对湿度下烟煤粒子的半径与折射率

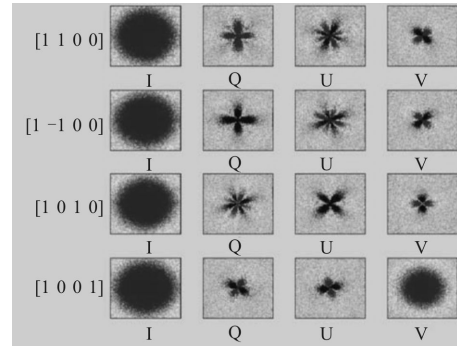
Tab.2 Radius and reflective index of carbonaceous particle at three different relative humidity

	Radius/ μm	Real part of reflective index	Imaginary part of reflective index
Relative humidity 20%	0.389	1.691	0.362
Relative humidity 65%	0.47	1.537	0.185
Relative humidity 99%	1.054	1.351	0.014



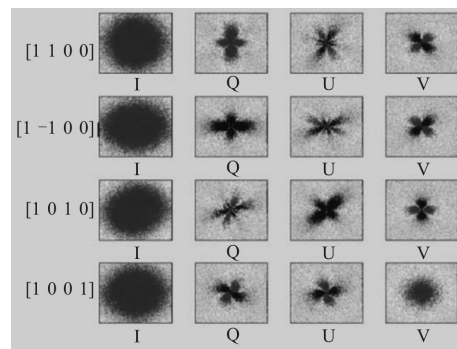
(a) 相对湿度 20%

(a) Relative humidity of 20%



(b) 相对湿度 65%

(b) Relative humidity of 65%



(c) 相对湿度 99%

(c) Relative humidity of 99%

图 3 不同相对湿度不同入射光经烟煤环境传输后的出射光斯托克斯仿真图样

Fig.3 Stocks simulation patterns of emergent lights for different kinds of incident lights after transmitting in carbonaceous environment at different relative humidities

3.2 偏振度和偏振角随相对湿度变化的关系

为了更近一步说明湿度对偏振特性的影响,对蒙特卡洛仿真得到的斯托克斯矢量进行统计,在 0~1 的相对湿度范围内,每隔 5%选择一个采样点,加上接近于 0 和 1 的 1%及 99%两点,共 21 个点进行采样,并对这些点分别求得其所对应的偏振度 ($Dop = \frac{\sqrt{Q^2+U^2+V^2}}{I}$) 及偏振角 ($PA = \frac{1}{2} \arctan(U/Q)$),依次进行拟合,得到偏振度与偏振角随相对湿度变化的关系。图 4 所示为偏振度随相对湿度变化的关系曲线,其中四条曲线分别代表四种不同的入射光,由图可知,当以线偏振光入射时偏振度不断上下波动,但整体呈现上升的趋势,都在相对湿度为 99%时达到偏振度的最大值;而圆偏振分量入射时,整体波动趋势较大,且在 85%时达到偏振度的最大值。分别提取

相对湿度为 20%、65% 和 99% 时的 3 点,也可以看出偏振度的大小与图 3 中斯托克斯仿真图样所示的偏振特性强弱的趋势相符合,进而验证了仿真图样。

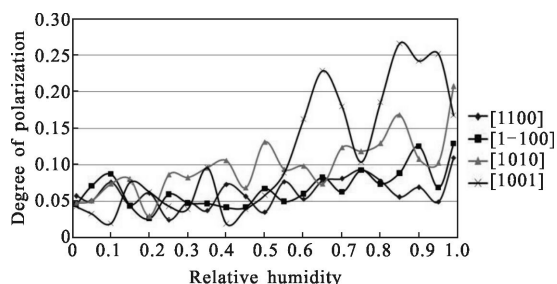


图 4 偏振度随相对湿度的变化

Fig.4 Degree of polarization at different relative humidities

图 5 所示为偏振角随相对湿度变化的关系曲线,从图中可以看出当相对湿度小于 30% 时,四种入射光线的偏振角变化都比较明显,震动幅度较大;当相对湿度在 30% 与 60% 之间时偏振角上下震动幅度比较平缓;而当相对湿度大于 60% 时,线偏振光入射的光线经介质传输后出射光的偏振角震动越来越趋于稳定,圆偏光的出射偏振角则又呈现一种波动较大的趋势。

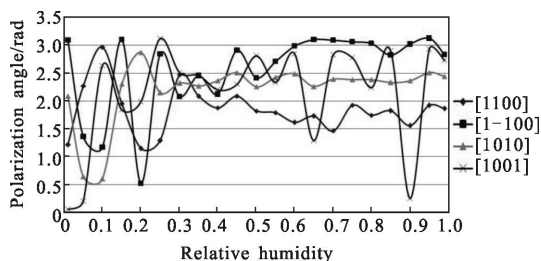


图 5 偏振角随相对湿度的变化

Fig.5 Polarization angle at different relative humidities

3.3 线偏振度和圆偏振度随相对湿度变化的关系

根据以上入射光分别为圆偏振光和线偏振光时经烟煤粒子传输后所产生的差异进行进一步分析,仍对上述 21 个点进行采样,给出如图 6 所示的四种偏振光入射时,出射光线偏振度 ($Dolp = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}$) 和圆偏振度 ($Docp = \frac{V}{I}$) 随相对湿度变化的关系。可以看出,随着相对湿度的增加,三种线偏振光入射时(如图 6(a)~(c)所示),出射光中的线偏振分量仍占据主要部分,则相对湿度的增加使得入射线偏振光经烟煤介质传输后仍为线偏振光;对于入射为右旋偏振

光的情况,随着相对湿度的增加,圆偏振分量逐渐超过线偏振分量占据主要成分,尤其在相对湿度为 50% 以后更为明显,这一现象的产生是因为随着相对湿度的不断增加,粒子半径不断增大,根据 Zege 等所提出的“粒子尺寸的增大会导致线偏振分量逐渐向圆偏振分量转化”的理论^[14],验证了该现象产生的正确性,但相对湿度同样对折射率也有影响,导致圆偏振度并不是一直稳步上升,而是仍存在波动,则最终导致圆偏振度随相对湿度的增加而大幅波动上升,线偏振度则呈现减弱的趋势,如图 6(d)所示。

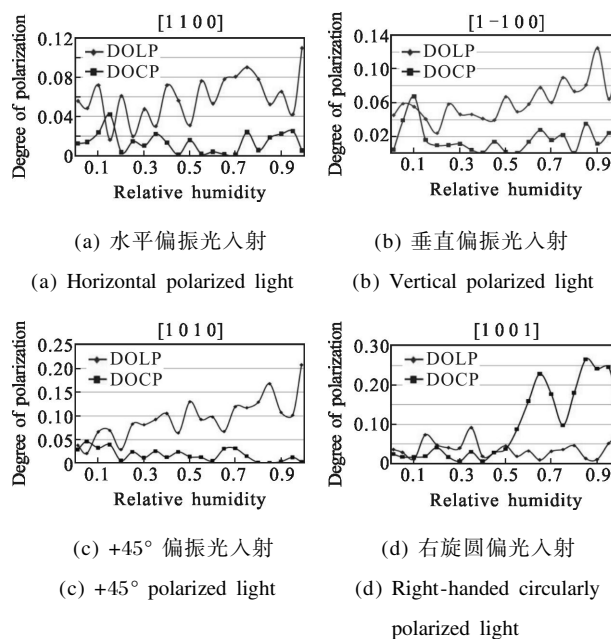


图 6 四种入射光线偏振度与圆偏振度随相对湿度变化的关系
Fig.6 Degree of linear and circular polarization of four kinds of incident lights at different relative humidities

4 结 论

针对烟煤环境下湿度对偏振光传输特性的影响问题,分析了烟煤气溶胶粒子半径与折射率随相对湿度的改变情况,并在此基础上,采用蒙特卡洛模拟方法,对具有典型代表的 21 个湿度点采样,分别得到湿度为 20%、65% 和 99% 下的出射光斯托克斯仿真图样,偏振度、偏振角随相对湿度的变化情况以及相对湿度对线偏振度和圆偏振度的影响分析,并得到以下现象:(1) 随着相对湿度的增加,线偏振光入射时出射光的偏振特性呈现逐渐增强的趋势;圆偏振光入射时出射光的线偏振分量逐渐增强,圆偏振分量则呈先增强后减弱的趋势。(2) 线偏振光入射时

出射光偏振度随相对湿度的增加上下波动且缓慢增强,圆偏振光入射时出射光的偏振度上下波动幅度较大,且在85%时达到最大值。(3)随着相对湿度的增加,线偏振光入射出射光仍为线偏振光;圆偏振光入射时经传输后出射光中线偏振分量则是逐渐向圆偏振分量转化,最终导致在相对湿度50%以后圆偏振度远远大于线偏振度。总结以上现象,可以发现线偏振光入射时出射光保持原有偏振态,且偏振特性随相对湿度的增加不断增加;圆偏振光入射时出射光中线偏振分量随湿度增加不断向圆偏振分量转化,最终导致出射光的偏振特性呈现不规则波动的现象。则在湿度不断增加的情况下,线偏振光入射时出射光的偏振特性表现出更显著的优势。

参考文献:

- [1] Milun J Rakovic, George W Kattawar, Mehrube Mehrubeoglu, et al. Light backscattering polarization patterns from turbid media: theory and experiment [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3399-3408.
- [2] Wang Xia, Xia Runqiu, Jin Weiqi, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182. (in Chinese)
王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振探测技术进展 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3175-3182.
- [3] Yang Wei, Gu Guohua, Chen Qian, et al. Method of target detection for infrared polarization image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2746-2751. (in Chinese)
杨蔚, 顾国华, 陈钱, 等. 红外偏振图像的目标检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2746-2751.
- [4] Gunnsteinn Hall, Steven L Jacques, Kevin W Eliceiri, et al. Goniometric measurements of thick tissue using Monte Carlo simulations to obtain the single scattering anisotropy coefficient [J]. *Biomedical Optics Express*, 2012, 3(11): 2707-2719.
- [5] Qiu Zhenwei, Hong Jin. Retardance characteristics analysis of lens in polarization remote sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 806-811. (in Chinese)
裘桢炜, 洪津. 偏振传感器镜头相位延迟特性分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 806-811.
- [6] Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, et al. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002. (in Chinese)
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): 0101002.
- [7] Yang Lihong, Ke Xizheng, Ma Dongdong. Depolarization characteristics of the polarized laser in atmosphere [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(11): 62-67. (in Chinese)
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.
- [8] Wang Ziqian, Zhang Xudong, Jin Haihong, et al. All sky turbid atmospheric polarization pattern modeling based on Monte Carlo method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1013001. (in Chinese)
王子谦, 张旭东, 金海红, 等. 基于 Monte Carlo 方法的混浊大气偏振模式全天空建模 [J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1013001.
- [9] Liu Qi, Chu Jinkui, Wang Jing, et al. Research and simulation analysis of atmospheric polarization properties under water cloud condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0301004. (in Chinese)
刘琦, 褚金奎, 王兢, 等. 水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301004.
- [10] Min Xu. Electric field Monte Carlo simulation of polarized light propagation in turbid media [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6530-6539.
- [11] Jessica C Ramella-Roman, Scott A Prahl, Steve L Jacques. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I [J]. *Optics Express*, 2005, 13(12): 4420-4438.
- [12] Wayan Sudiarta I. Mie-scattering formalism for spherical particales embedded in an absorbing medium [J]. *Optical Society of America*, 2001, 18(6): 1275-1278.
- [13] Cai Jia, Gao Jun, Fan Zhiguo, et al. The polarization characteristics research of aerosol particles under the humidity influence [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(5): 639-644. (in Chinese)
蔡嘉, 高隽, 范之国, 等. 湿度影响下的气溶胶粒子的偏振特性 [J]. 发光学报, 2013, 34(5): 639-644.
- [14] Zege E P, Chaikovskaya L I. New approach to the polarized radiative transfer problem [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1996, 55(1): 19-31.