

doi: 10. 3788/gzxb20174605. 0526001

红外波段下湿度对偏振光传输特性的影响

张肃¹, 付强¹, 战俊彤¹, 段锦², 李英超¹, 姜会林¹

(1 长春理工大学 空地激光通信国防重点学科实验室, 长春 130022)

(2 长春理工大学 电信学院, 长春 130022)

摘 要:针对红外波段下湿度对偏振光传输特性的影响问题,以自然界中较常见的烟煤粒子作为研究对象,采用蒙特卡洛法仿真研究,不同红外波段下湿度对线偏光和圆偏光传输特性的影响情况及其之间差异特性.结果表明:在短波波段,线偏光与圆偏光的偏振度随湿度的增加都呈现逐渐上升的趋势;在中波波段,随湿度的增加两种偏振光都呈现下降趋势;而在长波波段,湿度对偏振状态几乎没有影响.进一步比较可知,在短波波段,圆偏光具有更好的偏振特性,而在中长波情况下,线偏光的偏振特性更加显著.因此,在应用红外偏振进行探测时,本研究对波段的选取、湿度的控制及偏振态的应用具有重要的指导意义.

关键词:红外波段;湿度;偏振特性;偏振差异;蒙特卡洛算法

中图分类号:O436.3

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)05-0526001-7

Humidity on Transmission Characteristics Influence of Polarized Light under Infrared Wavelengths

ZHANG Su¹, FU Qiang¹, ZHAN Jun-tong¹, DUAN Jin², LI Ying-chao¹, JIANG Hui-lin¹

(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: For the influence problem of the humidity on polarization transmission character under infrared wavebands, this paper applies Monte Carlo simulation for the common carbonaceous aerosol particles existing in nature. The influence of humidity on polarization transmission characteristics and polarization character difference under infrared wavelengths is researched. The results indicate that the Degree of Polarization (DOP), both linear and circular polarization, gradually rises with the increasing of humidity in the short wave bands; In the medium wave bands, the DOP of them descends with the increasing of the humidity; In long wave bands, the influence of relative humidity on DOP is minimal. To compare linear polarization with circular polarization, we demonstrate that the latter always performs better than the former in the short wave bands, whereas the former maintains its better polarization state. Therefore, in infrared polarization applications these conclusions introduce a method for the wavelength selection, humidity controlling and polarization state application.

Key words: Infrared wavelength; Humidity; Polarization character; Polarization difference; Monte Carlo algorithm

OCIS Codes: 260.5430; 290.5890; 290.4020; 290.4210; 290.5855

0 引言

偏振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等特征,可弥

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 201 * * * * * 070)、国家重点基础研究发展计划(No. 6 * * * * 5)和长春理工大学青年基金(No. QXNJ-2014-16)资助

第一作者: 张肃(1985-),女,助理研究员,博士,主要研究方向为偏振探测及现代光学信息处理. Email: susiezhang21@126.com

收稿日期: 2016-11-24; **录用日期:** 2017-02-10

<http://www.photon.ac.cn>

补普通可见光探测设备在低对比度环境中应用的缺陷,不仅能获得目标的光强分布,同时能得到目标对应于每一点上的偏振信息,被广泛应用在可见光设备受限的探测领域^[1-2].

基于此,为了获得更好的偏振探测结果,许多研究在实验测试环境不稳定的情况下,采用理论仿真方法研究偏振探测的传输特性.现如今,应用最广泛的仿真模型是蒙特卡洛方法,通过改变波长、传输介质的半径、折射率等参数对传输过程进行仿真^[3-4].应用这种方法,许多研究者研究不同液体介质对粒子后向散射图样的影响,并得到了一致的验证结果^[5-6].文献[7]研究不同水质及不同传输距离下的偏振传输特性,采用偏振复原法来减少散射效应对偏振度的影响.针对固体类气溶胶传输特性的描述,文献[8]研究红外波段下圆偏光与线偏光的偏振特性差异,验证了圆偏光的优越性.

现有对偏振传输特性的研究多是通过改变传输距离、介质浓度及粒子半径、折射率等参数实现的.然而对于烟尘等低对比度固体气溶胶环境,湿度对偏振传输特性的影响同样重要.尤其是近些年来,随着红外偏振器件使用的不断增加^[9-10],提高不同红外波段下偏振探测质量对于红外偏振探测具有重要的指导意义.

为了研究红外波段下湿度变化对偏振光传输特性的影响,以经典的烟煤气溶胶粒子作为研究对象,在前期研究的可见光偏振传输特性的基础上^[11-12],采用适用于湿度变化的改进后的蒙特卡洛方法仿真不同红外波长不同湿度环境下的偏振传输特性及经传输后不同入射偏振光之间的偏振差异,经改进,该方法可直接通过输入湿度及在该波长下干气溶胶粒子的半径、折射率等参数得到偏振传输后结果,与传统仿真方法相比,增加了湿度这一参数变化对偏振传输的影响,但却具有与传统方法相同的仿真精度和置信度.从理论与仿真结果两方面进行验证,提出具体的应用模型,为红外偏振探测及实验研究奠定了理论基础.

1 湿度对气溶胶粒子的影响

周围环境的相对湿度系数 f 对气溶胶粒子的半径及折射率都有很大影响.由于气溶胶粒子间的差异,导致其吸湿性与半径都不相同,若干气溶胶粒子的半径为 r_0 ,吸湿性系数用常数 u 表示,则吸湿之后新的气溶胶粒子半径 r_h 、复折射率实部 m_{re} 和虚部 m_{ie} 分别为

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

$$m_{re} = m_{rw} + (m_{r0} - m_{rw}) \left[\frac{r_h}{r_0} \right]^{-3} \quad (2)$$

$$m_{ie} = \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2} + \left(\frac{m_{i0}}{m_{r0}^2 + 2} - \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2} \right) \left[\frac{r_h}{r_0} \right]^{-3} \cdot (m_{re}^2 + 2) \quad (3)$$

式中, m_{rw} 和 m_{iw} 分别为水粒子的复折射率实部和虚部, m_{r0} 和 m_{i0} 分别为干气溶胶粒子的复折射率实部和虚部,则吸湿后粒子折射率 $m_e = m_{re} + m_{ie}$.表 1 为不同红外波长下烟煤干气溶胶粒子半径和折射率的取值,以及水粒子的折射率变化.

表 1 烟煤干气溶胶粒子和水粒子参数随红外波长的变化 (单位: μm)

Table 1 Radius, reflective index of dry carbonaceous aerosol and water particle under different infrared wavelengths (unit: μm)

Wavelength	r_0	m_{r0}	m_{i0}	m_{rw}	m_{iw}
1.06	0.37	1.75	0.44	1.326	4.18×10^{-6}
2	0.37	1.8	0.49	1.306	1.1×10^{-3}
3	0.37	1.84	0.54	1.371	0.272
4	0.37	1.92	0.58	1.351	0.0046
5	0.37	1.97	0.6	1.325	0.0124
6	0.37	2.02	0.62	1.265	0.107
7.2	0.37	2.06	0.65	1.312	0.0321
8.2	0.37	2.13	0.68	1.286	0.0351
9	0.37	2.17	0.7	1.262	0.0399
10	0.37	2.21	0.72	1.218	0.0508
11	0.37	2.23	0.73	1.153	0.0968
12.5	0.37	2.27	0.75	1.123	0.259

由于烟煤粒子的吸湿系数为 4.4,根据表 1 中数据,可得到烟煤干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 1 所示.

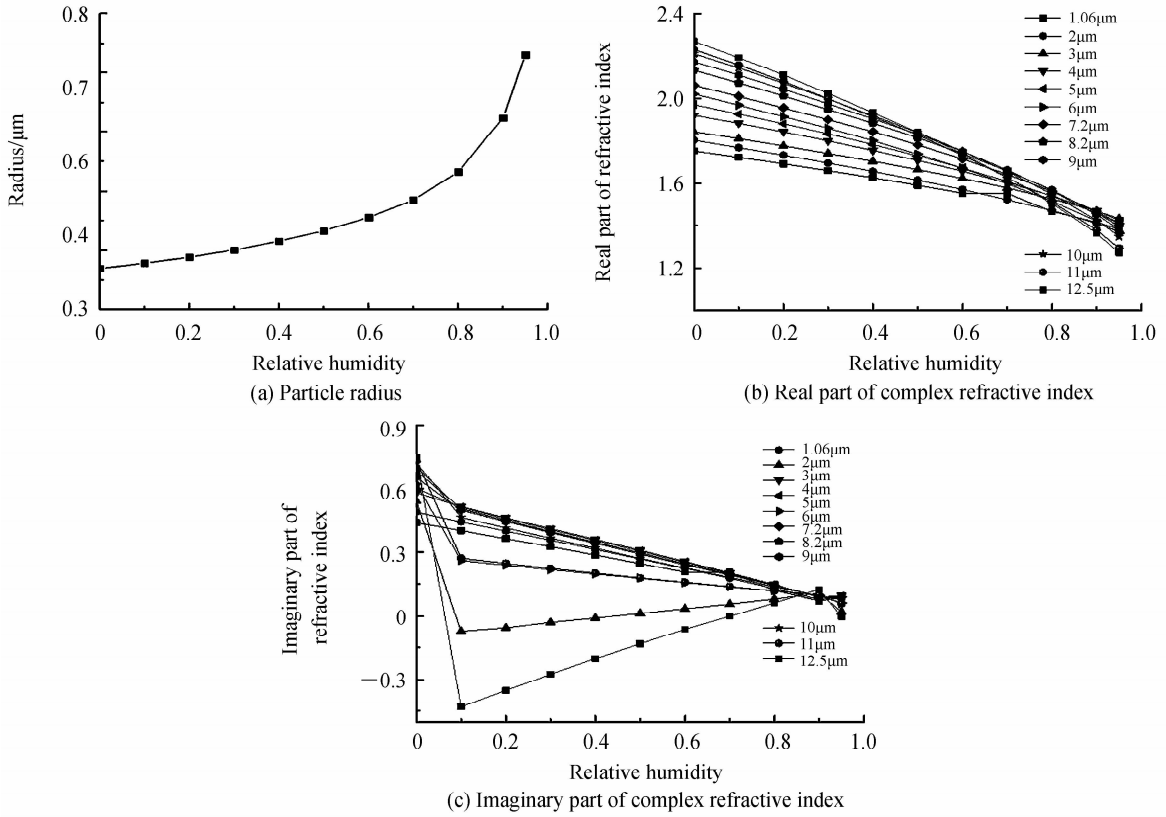


图 1 不同红外波长下烟煤干气溶胶粒子各参数随相对湿度变化关系

Fig. 1 Each parameters of carbonaceous aerosol particles at different relative humidity

2 浑浊介质中多次散射建模仿真

图 2 为光在介质中传输过程的示意图,假设介质中粒子为各向同性的均匀球形粒子,采用蒙特卡罗多次散射建模仿真.其中,以入射初始位置 $O(0, 0, 0)$ 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 $(0, 0, 1)$. S_0 和 S' 分别为入射和出射光的斯托克斯矢量,平板 M 为出射光子的接收屏,光子在介质中的传输距离为 L .

2.1 光子在传输介质中坐标的更新

由比尔-朗伯定律,可知光子自由程长度

$$l = -\frac{\ln(\zeta_l)}{k_e} \quad (4)$$

式中 ζ_l 表示光子在自由程 l 时的存活概率,由 $(0, 1)$ 区间均匀分布的随机数表示, k_e 为消光系数.

在粒子散射过程中,散射前后光子坐标将发生变化,若设散射前的光子坐标为 (x, y, z) ,散射后坐标为 (x', y', z') ,则可由光子传输的方向余弦 (μ_x, μ_y, μ_z) 和光子自由程长度 l 建立关系,即

$$\begin{cases} x' = x + \mu_x l \\ y' = y + \mu_y l \\ z' = z + \mu_z l \end{cases} \quad (5)$$

式中,对于初始位置,光子入射的初始坐标和初始余弦分别为 $(0, 0, 0)$ 和 $(0, 0, 1)$. 式(5)中,光子传输的方向余弦 (μ_x, μ_y, μ_z) 经散射后更新,散射后的方向余弦 (μ_x', μ_y', μ_z') 表示为

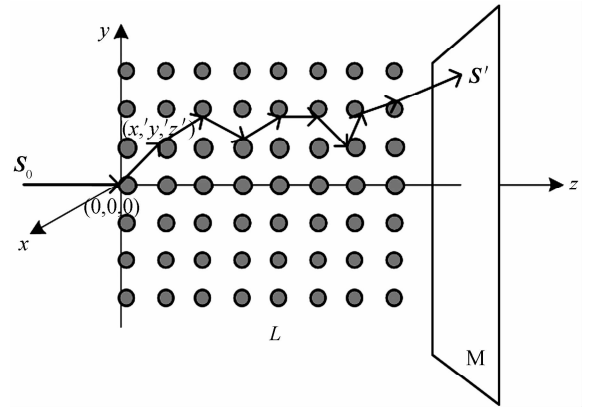


图 2 光在介质中传输过程的示意图

Fig. 2 Transmission process diagram of light in medium

$$\begin{cases} \mu_x' = \sin\alpha(\mu_x\mu_z\cos\beta - \mu_y\sin\beta) / \sqrt{1+\mu_z^2} + \mu_x\cos\alpha \\ \mu_y' = \sin\alpha(\mu_y\mu_z\cos\beta + \mu_x\sin\beta) / \sqrt{1+\mu_z^2} + \mu_y\cos\alpha \\ \mu_z' = -\sin\alpha\cos\beta\sqrt{1-\mu_z^2} + \mu_z\cos\alpha \end{cases} \quad (6)$$

其中,要求 $|\mu_z| < 0.9999$.

当 $|\mu_z| > 0.9999$ 时,方向余弦表示为

$$\begin{cases} \mu_x' = \sin\alpha\cos\beta \\ \mu_y' = \sin\alpha\sin\beta \\ \mu_z' = \text{SIGN}(\mu_z)\cos\alpha \end{cases} \quad (7)$$

其中“SIGN”为符号函数.

2.2 光子在介质中散射过程

出射斯托克斯矢量 \mathbf{S}' 与入射斯托克斯矢量 \mathbf{S}_0 之间经过粒子 n 次散射后可建立以下关系

$$\mathbf{S}' = \mathbf{R}(-\gamma_n) \cdot \mathbf{M}(\theta_n) \cdot \mathbf{R}(\phi_n) \cdot \mathbf{R}(-\gamma_{n-1}) \cdot \mathbf{M}(\theta_{n-1}) \cdot \mathbf{R}(\phi_{n-1}) \cdots \cdot \mathbf{R}(-\gamma_1) \cdot \mathbf{M}(\theta_1) \cdot \mathbf{R}(\phi_1) \mathbf{S}_0 \quad (8)$$

式中 $\mathbf{R}(\phi)$ 和 $\mathbf{R}(\gamma)$ 分别为由参考面转到散射面的角度 ϕ 和经散射之后又转回参考面的角度 γ 所产生的旋转矩阵,表示为

$$\mathbf{R}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\phi) & \sin(2\phi) & 0 \\ 0 & -\sin(2\phi) & \cos(2\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\gamma) & \sin(2\gamma) & 0 \\ 0 & -\sin(2\gamma) & \cos(2\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(8)中的矩阵 $\mathbf{M}(\theta)$ 表示由散射角度 θ 产生的 Mueller 矩阵,有

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

由 Mie 散射可知, $m_{11}(\theta)$ 、 $m_{12}(\theta)$ 、 $m_{33}(\theta)$ 和 $m_{44}(\theta)$ 可表示为

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

其中,散射振幅函数 S_1 和 S_2 为

$$\begin{cases} S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[a_n(x,m) \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} + b_n(x,m) \frac{P_n^1(\cos\theta)}{d\theta} \right] \\ S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[a_n(x,m) \frac{P_n^1(\cos\theta)}{d\theta} + b_n(x,m) \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} \right] \end{cases} \quad (13)$$

式中, $P_n^1(\cos\theta)$ 是 Associated Legendre 多项式, $P_n^1(\cos\theta) = \frac{\sin\theta}{2^n n!} \left(\frac{d}{d\cos\theta} \right)^{n+1} (\cos^2\theta - 1)^n$, $a_n(x,m)$ 和 b_n

(x,m) 表示为

$$\begin{cases} a_n(x,m) = \frac{\psi_n'(mx)\psi_n(x) - m\psi_n(mx)\psi_n'(x)}{\psi_n'(mx)\xi_n(x) - m\psi_n(mx)\xi_n'(x)} \\ b_n(x,m) = \frac{m\psi_n'(mx)\psi_n(x) - \psi_n(mx)\psi_n'(x)}{m\psi_n'(mx)\xi_n(x) - \psi_n(mx)\xi_n'(x)} \end{cases} \quad (14)$$

尺度函数 $x = k\alpha = 2\pi\alpha/\lambda$, m 为折射指数, $\psi_n(x)$ 和 $\xi_n(x)$ 是 Riccati-Bessel 函数

$$\begin{cases} \psi_n(x) = \sqrt{\pi x/2} J_{n+1/2}(x) \\ \xi_n(x) = \sqrt{\pi x/2} H_{n+1/2}^{(2)}(x) \end{cases} \quad (15)$$

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

2.3 光子传输终止

经 n 次散射后,光子能量权重变为

$$W_n = W_{n-1} \cdot k_s / (k_s + k_a) \quad (16)$$

其中 k_s 为粒子散射系数, k_a 为吸收系数, 分别表示为

$$k_s = \pi \int_{r_1}^{r_2} r^2 Q_{sc} n(r) dr \quad (17)$$

$$k_a = \pi \int_{r_1}^{r_2} r^2 Q_{ab} n(r) dr \quad (18)$$

式中, r_1 、 r_2 分别对应多分散系大气中粒子半径上限和下限, Q_{sc} 、 Q_{ab} 为由米散射计算出的散射因子和吸收因子。

当光子能量权重低于某一阈值(一般为 10^{-4})或飞离边界时,光子传输终止。

此时,斯托克斯矢量必须经过最后一次旋转以保证参考平面与探测器所在的平面相同,旋转的角度为

$$\omega = \pm \tan^{-1}(\mu_y / \mu_x) \quad (19)$$

其中,反射模式取正号,透射取负号。

3 建模与仿真结果

研究发现不同角度入射的线偏光经同一介质传输后具有几乎相同的偏振度,同样,对于圆偏振光也具有相同的性质^[13],因此在实验中,仅选择水平入射的线偏光与右旋圆偏光作为研究对象,并通过对比,研究在不同红外波段下经介质传输后圆偏光与线偏光的偏振特性差异,用 DOP_{diff} 表示为

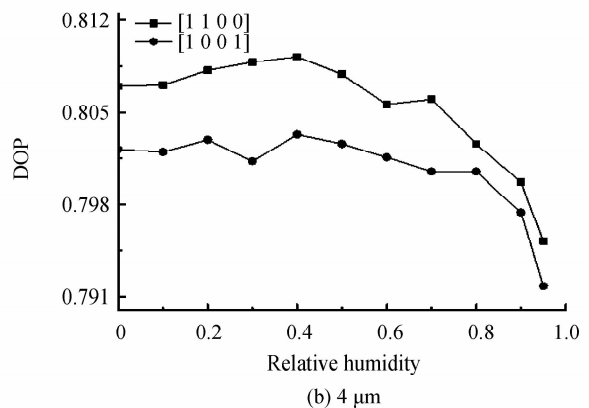
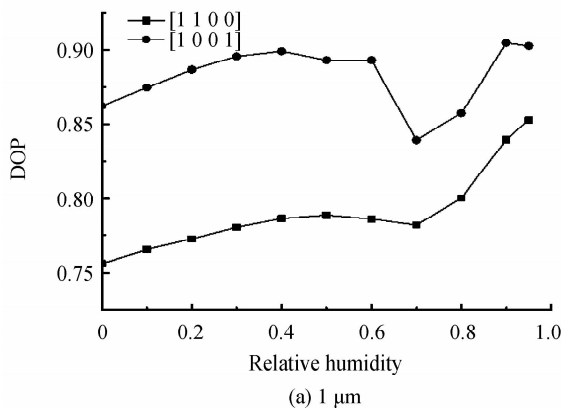
$$DOP_{diff} = DOP_R - DOP_H \quad (20)$$

式中, DOP_R 和 DOP_H 分别为右旋圆偏光和水平线偏光的偏振度。

在仿真过程中,假设光子数为 10^6 个,选择自然界中较常见的烟煤粒子作为例子,研究在不同相对湿度及红外波段下两种不同入射的偏振光的偏振特性变化,及其之间的差异。

3.1 三种波段情况下偏振度随不同相对湿度的变化

图 3 给出了三种不同波长(1.06 μm 、4 μm 和 10 μm)在不同相对湿度下水平线偏光和右旋圆偏光的变化情况,其中方点直线和圆点直线分别为水平线偏光和右旋圆偏光。从仿真结果中可知在短波情况下随着相对湿度的增加,线偏光和圆偏光的偏振度都呈逐渐上升的趋势(如图 3(a)所示);相反地,在中波波段,偏振度都呈现逐渐下降的趋势(如图 3(b)所示);在长波波段,偏振度变化的程度都很小(如图 3(c)所示)。产生这一现象是由于湿度对长波波段的影响不大,而对中波波段具有吸收作用所导致的。另外,在短波波段的情况下,圆偏光的偏振特性始终优于线偏光;而在中波与长波波段下,线偏光的偏振特性更具优势。



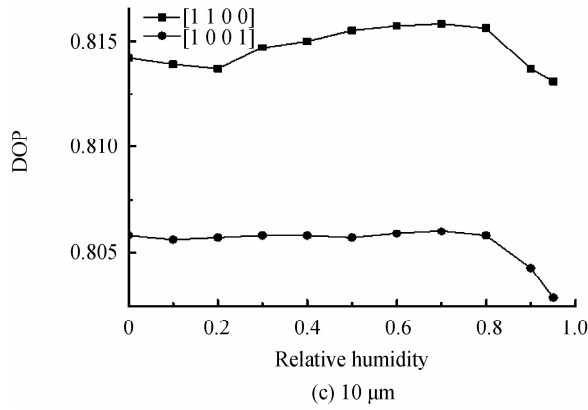


图 3 不同相对湿度下的 DOP_H 和 DOP_R
Fig. 3 DOP_H and DOP_R under different relative humidity

3.2 三种相对湿度情况下偏振度随不同波长的变化

在干燥环境(相对湿度为 0)、中度湿度(相对湿度为 50%)和高度湿度(相对湿度为 95%)三种不同相对湿度情况下, DOP_H 和 DOP_R 随不同波长的变化情况如图 4 所示. 其中, 图 4(a)为线偏光的变化情况, 从结果中可知, 在短波波段, 相对湿度较高的线偏光具有更好的偏振特性; 而在中波与长波波段, 不同相对湿度下的偏振特性变化差异并不明显. DOP_R 的变换情况如图 4(b)所示, 其中不同相对湿度下的右旋圆偏振光随红外波段的变化趋势与线偏光大致相同(如图 4(a)所示), 只是在偏振度的取值上有所差异. 通过以上变化可知, 波长越长, 相对湿度对偏振特性的影响越小, 而在短波波段时, 相对湿度较大的偏振光具有更好的偏振特性. 可以说, 3.2 节结果是对 3.1 节结果的另外一种以波长为横轴的表达方式.

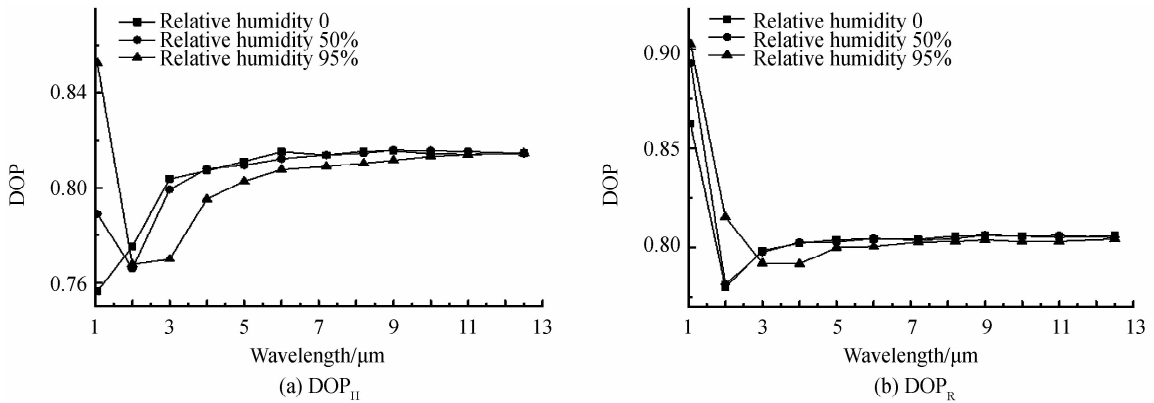


图 4 DOP_H 和 DOP_R 随红外波长的变化
Fig. 4 DOP_H and DOP_R under different infrared wavelengths

3.3 不同相对湿度与不同波长情况下的偏振差异的变化

为了更直观地给出经传输后偏振特性的差异变化, 不同红外波长与不同相对湿度情况下圆偏光与线偏光间偏振差异的变化如图 5 所示. 其中红外波段范围在 $1.06 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 之间(如图中纵轴所示), 横轴表示湿度范围, 色条表示圆偏光与线偏光间的偏振差异变化, 当 $DOP_{\text{diff}} < 0$ 时, 由图中深色区域表示, 而其他颜色情况下, 则 $DOP_{\text{diff}} > 0$. 从图中结果可知, 无论相对湿度怎样变化, 在短波波段下, 圆偏光都具有较好的偏振特性; 而在其他红外波段情况下, 线偏光的偏振特性明显优于圆偏光, 这一结论也与文献[8]中亚利桑那大学研究的红外波段下粒子

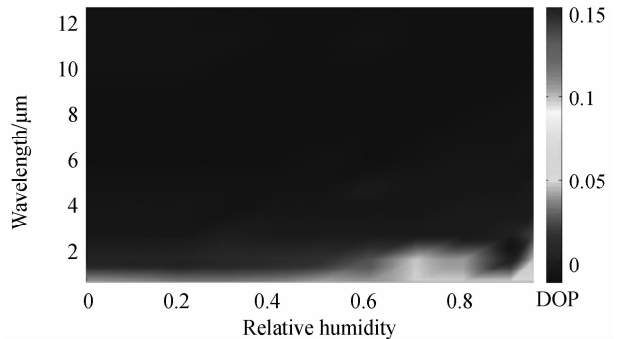


图 5 不同相对湿度和红外波段下 DOP_{diff} 的变化
Fig. 5 DOP_{diff} under different in frared wave bands and relative humidity

半径变化对偏振特性差异影响中的部分结论可以相互验证,即“小粒子在短波红外波段下,圆偏振特性表现较好,而在中长波段下,线偏光的偏振特性较好”。

通过以上实验结论,可得到如下的应用模型:对于烟煤粒子(小粒子 $r=0.37$,大折射率 1.75-2.27 之间) 1)在短波波段,偏振度随湿度的增加而逐渐增大;在中波波段,偏振度随湿度的增加而减少;而在长波波段,湿度的变化对偏振度几乎没有影响。所以,在相对湿度较大时,尽量使用长波波段进行探测,不会对探测结果造成很大的影响。2)在短波波段,无论湿度怎样变化,圆偏光始终保持着好的偏振特性;而在中长波波段下,线偏光都具有较高的偏振度。所以,在短波波段下,要尽量采用圆偏光进行探测,而在中长波波段下,采用线偏光进行探测。因此,当使用红外偏振法在具有一定湿度影响下的环境中对目标进行探测时,可根据应用模型相应的选择不同的入射偏振光进行探测以得到更好的探测结果。

4 结论

改进传统的蒙特卡洛程序,研究红外波段下湿度环境对线偏光与圆偏光的影响及其之间的差异。研究结果表明:1)在短波波段,线偏光和圆偏光的偏振度都随相对湿度的增加而增大;在中波波段,湿度的吸收特性明显,则两种状态的偏振光偏振特性都随相对湿度的增加而减弱;在长波波段,相对湿度对偏振光的影响不大。2)通过在同一波段同一相对湿度环境下线偏光与圆偏光的比较可知,在短波波段,圆偏光具有更好的偏振特性;而在中长波波段,线偏光具有更好的保偏特性。该研究更精确地给出了湿度环境下不同偏振光在红外波段下的适用范围,为红外偏振探测的应用奠定了理论基础。

参考文献

- [1] WANG Guo-cong, WANG Jian-li, ZHANG Zhen-duo, *et al.* Influence on space target polarization imaging detection resulting from atmosphere turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4): 0410003.
王国聪,王建立,张振铎,等. 大气湍流对空间目标偏振成像探测的影响[J]. 光子学报, 2016, **45**(4): 0410003.
- [2] ZHAN Jun-tong, ZHANG Su, FU Qiang, *et al.* Impact of the oil mist concentration degree of polarization of the laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(3): 0314006.
战俊彤,张肃,付强,等. 油雾浓度对激光偏振度的影响[J]. 光子学报, 2016, **45**(3): 0314006.
- [3] GUO Yi-hong, NAN Zeng, HE Hong-hui, *et al.* A study on forward scattering Mueller matrix decomposition in anisotropic medium[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 18361-18370.
- [4] ZHANG Shuo, PU Jin-yun, LI Dong-zhen, *et al.* Monte-carlo simulation for the infrared radiation attenuation by water fogs and the analysis for transmission field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0512004.
张硕,浦金云,李东臻,等. 细水雾遮蔽红外辐射的蒙特卡洛模拟及透射场分析[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0512004.
- [5] ANNE V, JOHANNES M, JANI T, *et al.* Polarized backscattering by clusters of spherical particles[J]. *Optical Letters*, 2015, **40**(15): 3663-3666.
- [6] PIEDERRIEIE Y, BOULVERT F, CARIOUS J, *et al.* Backscattered speckle size as a function of polarization; influence of particle-size and concentration[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(13): 5030-5039.
- [7] XU Qiang, GUO Zhong-yi, TAO Qiang-qiang, *et al.* Transmitting characteristics of polarization information under seawater[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(21): 6584-6588.
- [8] VAN DER LAAN J D, SCRYMGEOUR D A, KEMME S A, *et al.* Detection range enhancement using circularly polarized light in scattering environments for infrared wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(9): 2266-2274.
- [9] BARRY C, IAIN C. Recent trails results of a LWIR polarimeter[C]. SPIE, 2009, **7298**: 72980A-1~72980A-12.
- [10] JONATHAN B H, PEZZANITI J L, David B C, *et al.* Real-time sub-pixel registration of imagery for an IR polarimeter[C]. SPIE, 2012, **8364**: 83640C-1~83640C-14.
- [11] ZHANG Su, PENG Jie, ZHAN Jun-tong, *et al.* Research of the influence of non-spherical ellipsoid particle parameter variation on polarization characteristic of light[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(6): 064205-1-064205-9.
张肃,彭杰,战俊彤,等. 非球形椭球粒子参数变化对光偏振特性的影响[J]. 物理学报, 2016, **65**(6): 064205.
- [12] ZHANG Su, FU Qiang, DUAN Jin, *et al.* Research of influence of humidity on transmission characteristics of polarized light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(5): 0511001.
张肃,付强,段锦,等. 湿度对偏振光传输特性影响的研究[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(5): 0511001.
- [13] ZHANG Su, ZHAN Jun-tong, BAI Si-ke, *et al.* Influence of Smoke Concentration on Transmission Characteristics of Polarized Light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(7): 0729001.
张肃,战俊彤,白思克,等. 烟雾浓度对偏振光传输特性的影响[J]. 光学学报, 2016, **36**(7): 0729001.

Foundation item: the National High Technology Research and Development Program of China (No. 201 * * * * * 070), the National Basic Research Program of China (No. 6 * * * * 5) and Youth Fund of Changchun University of Science and Technology (No. QXNJ-2014-16)