

# 火星沙尘环境中的偏振光传输特性仿真

杨玉峰<sup>1,2\*\*</sup>, 韩安丽<sup>1\*</sup>, 雷思琛<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

<sup>2</sup>西安理工大学陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710048

**摘要** 对偏振光在火星沙尘中的传输特性进行了研究, 首先分析了火星沙尘粒子散射系数、吸收系数和不对称因子随粒径尺寸的变化关系, 然后利用偏振蒙特卡罗方法模拟了偏振光在火星大气中的多重散射, 计算并分析了波长、粒径分布、风速、高度、粒子数浓度对偏振光传输特性的影响。研究表明: 偏振光退偏度随着传输距离的增大而增大, 粒子数浓度越大, 偏振度退化越严重。当波长为 0.55  $\mu\text{m}$  时, 对于所选用的两组粒径分布, 有效粒径小时反而退偏严重, 15.3 m/s 和 1.7 m/s 风速对应的退偏度相差将近两个数量级, 在所选的 6 个波长中 7.46  $\mu\text{m}$  激光在火星沙尘中传输时偏振保持性最好, 而波长 0.66  $\mu\text{m}$  激光在火星沙尘中传输时透射性是最好的。

**关键词** 散射; 火星; 沙尘粒子; 蒙特卡罗方法; 偏振度

中图分类号 TN012

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1329002

## Simulation of Polarized Light Transmission Characteristics in Martian Dust Environment

Yang Yufeng<sup>1,2\*\*</sup>, Han Anli<sup>1\*</sup>, Lei Sichen<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

<sup>2</sup>Shaanxi Civil-Military Collaboration Key Laboratory of Intelligence Coordination Networks, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** In this paper, the transmission characteristics of polarized light in Martian dust are investigated. First, the relationship among the particle scattering coefficient, absorption coefficient, asymmetry factor, and particle size of Martian dust is analyzed. Then, the multiple scattering of polarized light in the Martian atmosphere is simulated using polarized Monte Carlo method. The effects of wavelength, particle size distribution, wind speed, height, and particle number concentration on the transmission characteristics of polarized light are calculated and analyzed. The results show that the degree of depolarization of polarized light increases with the increasing transmission distance, and the greater the particle number concentration, the more severe the depolarization degree. When the wavelength is 0.55  $\mu\text{m}$ , the depolarization of the selected two groups of particle size distribution is serious for the small effective particle size, and the depolarization difference corresponding to the wind speeds of 15.3 m/s and 1.7 m/s is nearly two orders of magnitude. The polarization retention of 7.46  $\mu\text{m}$  laser is the best in the six selected wavelengths, and the 0.66  $\mu\text{m}$  laser has the highest transmittance in the Martian dust.

**Key words** scattering; Mars; dust particles; Monte Carlo method; degree of polarization

**OCIS codes** 290.1310; 290.2200; 290.1990; 290.4210

## 1 引言

火星作为距离地球第二近的类地行星, 一直是世界各国深空探测的重点关注对象, 而偏振光因其特有的性质, 被广泛运用到探测领域<sup>[1-3]</sup>, 未来我国的火星探测器也将装备偏振探测装置。

入射偏振光与散射介质发生碰撞后, 除了光强、运动方向会发生改变, 激光的偏振态也会随之发生改变。Plass 等<sup>[4-7]</sup>在 1968—1973 年间利用蒙特卡罗方法计算并分析了激光在云层以及地球大气气溶胶中发生多重散射后偏振度和偏振方向的变化, 为后期探测云层和大气中的气溶胶参数提供了基础。

收稿日期: 2020-03-06; 修回日期: 2020-03-08; 录用日期: 2020-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61405157)、陕西省重点产业创新链(2017ZDCXL-GY-06-01)

\* E-mail: 2292325631@qq.com; \*\* E-mail: yangyufeng@xaut.edu.cn; \*\*\* E-mail: lsc429@163.com

1989年 Kattawar 等<sup>[8]</sup>使用蒙特卡罗方法进一步研究得到了大气环境中介质粒子非均匀分布时每次散射后的 Stokes 参量, 研究结果使算法变得更加精准。郭镭力等<sup>[9-10]</sup>计算并分析了卷云和水云的偏振特性, 为利用多角度偏振遥感数据反演卷云和水云各参数提供了理论基础。2015年 Fernández 等<sup>[11]</sup>用矢量蒙特卡罗方法分析了多重散射中瑞利和康普顿效应的完全偏振特性。同年, 孙贤明等<sup>[12]</sup>采用蒙特卡罗方法模拟了激光对多层离散随机介质的多次散射, 基于极化激光雷达特性, 给出了快速半解析蒙特卡罗方法的仿真步骤。2018年 Otsuki<sup>[13]</sup>用蒙特卡罗方法对来自双折射混浊平板介质偏振光的前向散射进行了分析。同年 Nemchinsky 等<sup>[14]</sup>通过蒙特卡罗方法研究了纳米颗粒的非球形粒子对电磁散射的影响, 非球形纳米颗粒的形状近似为椭圆柱体。汪杰君等<sup>[15]</sup>研究了偏振光在气溶胶中的传输特性, 为研究偏振光在气溶胶传输中的能量衰减提供了理论依据。2019年叶坤涛等<sup>[16]</sup>研究了粒子形态对浑浊介质后向散射偏振特性的影响, 研究的过程与结果为实现各类偏振光技术提供了理论参考。

本文通过研究偏振光在火星复杂大气中的传输特性, 找出它们的变化规律, 不仅可以进行相应补偿, 也可以根据变化获得相关的有用信息, 为未来改善火星光学探测设备性能以及火星上无线激光通信提供理论支撑。

## 2 偏振光多重散射的模拟

本文选用“Meridian Planes Monte Carlo”的模拟方法<sup>[17]</sup>, 具体步骤如下:

1) 确定光子的初始状态, 包括位置坐标、运动方向坐标等。

2) 光子的移动。每碰撞散射一次光子位置的移动公式如下:

$$\begin{cases} x = x' + u_x L \\ y = y' + u_y L, \\ z = z' + u_z L \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $(\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  为方向角余弦;  $L$  为移动步长,  $L = -\ln \xi / \mu_t$ , 其中  $\xi$  为平均分布在 0 到 1 之间的随机数;  $\mu_t$  为粒子群的平均衰减系数。

3) 散射角的选择。假设入射波的 Stokes 矢量  $\mathbf{S}_0 = [I_0 \ Q_0 \ U_0 \ V_0]'$ , 那么其相函数为<sup>[18]</sup>

$$p(\alpha, \beta) = m_{11}(\alpha) I_0 + m_{12}(\alpha) [Q_0 \cos(2\beta) + U_0 \sin(2\beta)], \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为散射角;  $\beta$  为入射子午面到散射面的旋转角;  $m_{11}(\alpha)$  和  $m_{12}(\alpha)$  为 Mueller 矩阵  $\bar{\mathbf{M}}(\alpha)$  的两个元素。这里使用“舍选抽样”法, 根据(2)式分别在  $(0, \pi)$ 、 $(0, 2\pi)$ 、 $(0, 1)$  区间上取随机数  $\alpha_r, \beta_r, P_r$ , 如果  $P_r \leq p(\alpha_r, \beta_r)$ , 则选取成功, 进入下一步, 否则重新选取。

4) 光子散射追踪及偏振态处理。成功选取散射角  $\alpha$  与旋转角  $\beta$  后, Stokes 参量将会被进行如下三步转换:

(1) 从入射子午面旋转到散射面, 入射 Stokes 参量  $\mathbf{S}$  与旋转矩阵  $\bar{\mathbf{L}}(\beta)$  相乘得到旋转后的 Stokes 参量  $\bar{\mathbf{S}}_1$ ,  $\bar{\mathbf{L}}(\beta)$  的计算式为

$$\bar{\mathbf{L}}(\beta) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

(2) 散射面上的变换, 就是将 Stokes 参量在散射面上由一点转移到另一点, 参考面不变, 转换矩阵为 Mueller 矩阵  $\bar{\mathbf{M}}(\alpha)$ 。与此同时, 进行方向角余弦的转换, 新的方向余弦为  $(\hat{u}_x, \hat{u}_y, \hat{u}_z)$ 。

(3) 由散射面回到新的子午面, 达到最后目标, 使 Stokes 参量乘以旋转矩阵  $\bar{\mathbf{L}}(-\gamma)$ , 其中  $\gamma$  为 Stokes 参量以光波运动方向为轴逆时针旋转的角度, 以新的子午面为参考, 公式如下:

$$\cos \gamma = \frac{-\mu_z + \hat{\mu}_z \cos \alpha}{\pm \sqrt{(1 - \cos^2 \alpha)(1 - \hat{\mu}_z^2)}}. \quad (4)$$

若  $\beta \in (\pi, 2\pi)$ , (4) 式取正号; 若  $\beta \in (0, \pi)$ , (4) 式取负号。

散射后的 Stokes 参量  $\bar{\mathbf{S}}_0$  由散射前的 Stokes 参量  $\bar{\mathbf{S}}$  表示为<sup>[19]</sup>

$$\bar{\mathbf{S}}_0 = \bar{\mathbf{L}}(-\gamma) \bar{\mathbf{M}}(\alpha) \bar{\mathbf{L}}(\beta) \bar{\mathbf{S}}. \quad (5)$$

5) 光子的生命及边界。当光子逃逸出界面或其生命权重  $W$  的值小于设定值时运动结束。

Stokes 参量同光子能量统计一样可以相加, 是一个统计结果, 所以最后总的偏振光的状态为

$$\bar{\mathbf{S}}_{\text{total}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{\mathbf{S}}_n, \quad (6)$$

式中:  $N$  为光子数目。描述偏振光的偏振态程度的量化值用偏振度  $P$  表示<sup>[20]</sup>:

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} / I, \quad (7)$$

式中:  $I$  为光束的总光强;  $Q$  为  $x$ 、 $y$  两个方向强度分量的相差值;  $U$  为  $\pm 45^\circ$  线偏振光分量;  $V$  为左旋

或右旋的圆偏振分量;  $P$  是完全偏振光的光强在其所在光波强度中占的比例。用退偏度描述线偏振光偏振度的变化:

$$D_{ep} = \frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}} \times 100\%, \quad (8)$$

式中:  $I_{\parallel} = \frac{I+Q}{2}$  为平行方向的光强;  $I_{\perp} = \frac{I-Q}{2}$  为垂直方向的光强。

### 3 仿真与计算

#### 3.1 火星沙尘粒子的物理特性

Clancy 等<sup>[21-22]</sup> 利用 Gamma 分布对火星沙尘粒径分布进行了拟合, 结果显示该分布能够很好地用于计算单次散射反照率, 而 Pollack 等<sup>[23-24]</sup> 指出粒子粒径大于  $0.01 \mu\text{m}$  时粒径分布可以由对数正态分布更好地拟合, 对数正态分布的概率密度函数为

$$n(r) = c_{\text{onst}} r^{-1} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2\ln^2 \sigma_g}\right], \quad (9)$$

式中:  $c_{\text{onst}} = 1/(\sigma_g \cdot \sqrt{2\pi})$ ;  $r_g$  和  $\sigma_g$  分别为粒径的几何平均值和标准差, 它们与有效半径  $r_{\text{eff}}$  和有效方差  $v_{\text{eff}}$  之间的关系为

$$r_g = \frac{r_{\text{eff}}}{\exp\left(\frac{5}{2}\ln^2 \sigma_g\right)}, \quad (10)$$

$$\sigma_g = \exp(\sqrt{\ln(v_{\text{eff}} + 1)}). \quad (11)$$

#### 3.2 偏振激光在火星沙尘中的传输特性仿真计算

不同尺寸的火星沙尘粒子对于不同波长激光的光学特性也不相同, 为了对比不同波长不对称因子、散射系数和吸收系数随粒径的变化特性, 下面选用文献[23]和文献[25]采用的 6 个典型波长(可见光波长  $0.49, 0.55, 0.66 \mu\text{m}$ , 近红外波长  $0.86 \mu\text{m}$ , 以及中红外波长  $7.46 \mu\text{m}$  和  $10.6 \mu\text{m}$ ) 对不同尺寸火星沙尘粒子的不对称因子、散射系数和吸收系数进行了计算, 其中粒子数浓度为  $1.0 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 。

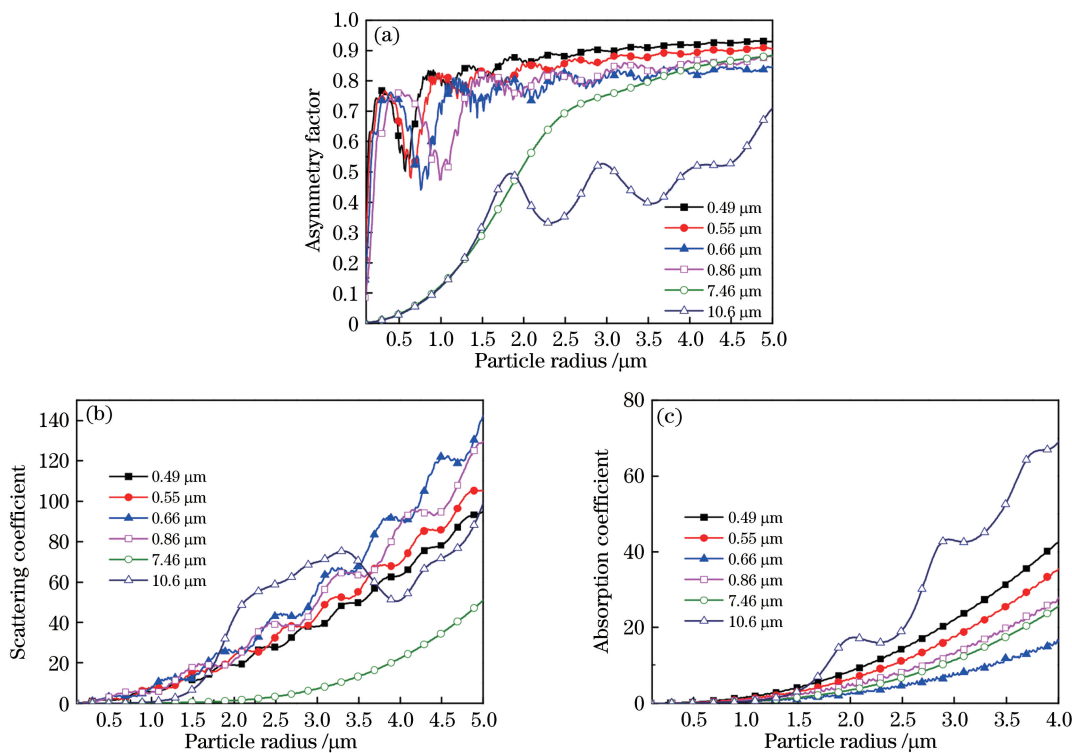


图 1 不同波长火星沙尘粒子光学特性随半径的变化曲线。(a) 不对称因子; (b) 散射系数; (c) 吸收系数

Fig. 1 Optical properties of Martian dust particles varying with radius at different wavelengths. (a) Asymmetry factor; (b) scattering coefficient; (c) absorption coefficient

由图 1(a) 可知, 波长越小对应的不对称因子越接近于 1, 而  $10.6 \mu\text{m}$  波长对应的不对称因子最小, 这说明整体上不对称因子随波长的变化是呈单调递减的, 虽然不对称因子随着粒子半径的增大有所波动, 但整体上是逐渐增大的, 不对称因子小说明该

波长下的火星沙尘粒子的后向散射特性越大, 不对称因子越接近 1 时前向散射特性越强。由图 1(b) 和图 1(c) 可知, 散射系数和吸收系数随粒子半径的增大逐渐增大, 但随波长变化没有单调递增或递减的变化趋势, 这是由其复折射率造成的。从图 1 可

以看出,  $10.6 \mu\text{m}$  对应的不对称因子是最小的,  $7.46 \mu\text{m}$  对应的散射系数是最小的,  $0.66 \mu\text{m}$  对应的吸收系数是最小的。

沙尘环境中不同高度和不同风速下火星沙尘粒子的平均半径和分布宽度也不同,受火星重力因素和风速的影响,离地面近的火星沙尘粒子快速沉降而没有形成沙尘悬浮层。因此,沙尘暴过后,风速越高火星沙尘粒子数浓度反而越低。本文主要针对约  $18 \text{ km}$  高度的激光传输特性,因此根据文献[23],取粒子有效半径和有效方差分别为  $r_{\text{eff}} = 2.34 \mu\text{m}$  和  $v_{\text{eff}} = 0.86 \mu\text{m}$ 。结合火星沙尘粒子的尺寸分布和物

理特性,下面对偏振光在火星沙尘中的偏振特性变化进行分析。

根据 2014 年 Fedorova 等<sup>[24]</sup>研究的在火星发生沙尘暴时沙尘粒子浓度和高度之间的关系,以及 2004 年 Merrison 等<sup>[26]</sup>研究的火星上悬浮沙尘粒子的浓度和风速之间的关系,选取人眼最为敏感的  $0.55 \mu\text{m}$  入射波长(绿光),其对应的复折射率为  $1.5 + 0.007i$ ,计算并分析偏振光在火星沙尘粒子中的传输特性。图 2 所示为水平线偏振光[1 1 0 0]在不同风速下的透射随传输距离的退偏变化。

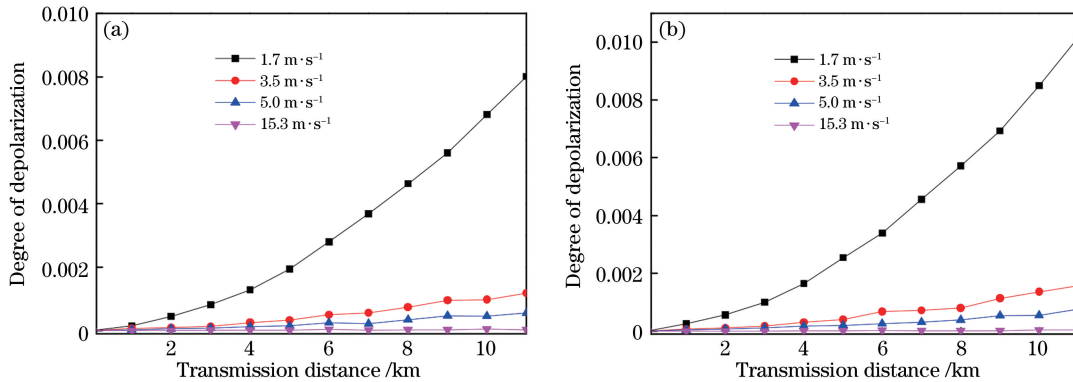


图 2 不同风速下在不同粒径沙尘中偏振光随传输距离的退偏。(a)  $r_{\text{eff}} = 2.34 \mu\text{m}$ ,  $v_{\text{eff}} = 0.86 \mu\text{m}$ ;  
(b)  $r_{\text{eff}} = 1.85 \mu\text{m}$ ,  $v_{\text{eff}} = 0.51 \mu\text{m}$

Fig. 2 Degree of depolarization of polarized light varying with transmission distance in different-particle-size dust at different wind speeds. (a)  $r_{\text{eff}} = 2.34 \mu\text{m}$ ,  $v_{\text{eff}} = 0.86 \mu\text{m}$ ; (b)  $r_{\text{eff}} = 1.85 \mu\text{m}$ ,  $v_{\text{eff}} = 0.51 \mu\text{m}$

由图 2(a)可知,偏振光退偏度随着传输距离的增加基本呈现单调递增的趋势,且风速越小,退偏度越大,传输  $4 \text{ km}$  距离风速  $15.3 \text{ m/s}$  和风速  $1.7 \text{ m/s}$  对应的退偏度相差将近两个数量级。图 2 给出了不同粒径分布下退偏度随传输距离的变化曲线,比较图 2(a)和图 2(b)可知,二者在变化趋势上基本一致,只是在数值上有所不同,同样是传输  $4 \text{ km}$ ,  $r_{\text{eff}} = 2.34 \mu\text{m}$ 、 $v_{\text{eff}} = 0.86 \mu\text{m}$  时对应的退偏度为  $0.00801$ ,而  $r_{\text{eff}} = 1.85 \mu\text{m}$ 、 $v_{\text{eff}} = 0.51 \mu\text{m}$  时对应的退偏度增大到了  $0.01107$ ,这说明在浓度相同的情况下,粒径越小的偏振度退化反而越严重。综合来看,火星沙尘粒子的退偏度随着传输距离的增加而增加,另外,风速越小,粒子数浓度越大,偏振度退化越严重。

单调递减,其中表示  $x$ ,  $y$  两个方向强度分量的相差值的  $Q$  降低更快,这说明  $x$  和  $y$  方向上的强度分量快速接近,即迅速退偏。比较图 3(a)和图 3(b)可知,当粒子数浓度为  $1.8 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$  时偏振光传输  $2 \text{ km}$  时偏振度就可以达到  $0.957$ ,而在粒子数浓度为  $1.1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$  时要达到这个退偏度需要传输约  $3.6 \text{ km}$ ,这说明当海拔高度相等时,粒子数浓度越高,退偏度增大越快,即退偏更快。图 3(a)~(d)中粒子数浓度从  $1.8 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$  降到了  $2.2 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ (粒子数浓度降低了将近一个数量级),其结果是同样传输  $4 \text{ km}$  退偏度从  $0.987$  降到了  $0.238$ ,这说明粒子数浓度越大,退偏越明显,当粒子数浓度为  $1.8 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$  时,随着传输距离的增大退偏度更快接近 1。

图 3 对不同高度、不同粒子数浓度下的透射参量  $I$ 、 $Q$  和退偏度随传输距离的变化进行了分析。图 3(a)和图 3(b)对应的海拔高度为  $18 \text{ km}$ ,由于沙尘粒子的浓度非常高( $1.8 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ ),因此当水平偏振光入射时,随着传输距离的增大  $I$ 、 $Q$  和退偏度

接下来对水平偏振光和垂直偏振光入射到火星沙尘中的水平方向光强和垂直方向光强的变化性质进行研究,取  $r_{\text{eff}} = 2.34 \mu\text{m}$ ,  $v_{\text{eff}} = 0.86 \mu\text{m}$ ,高度为  $18 \text{ km}$  时的粒子数浓度为  $1.8 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ ,计算结果如图 4 所示。



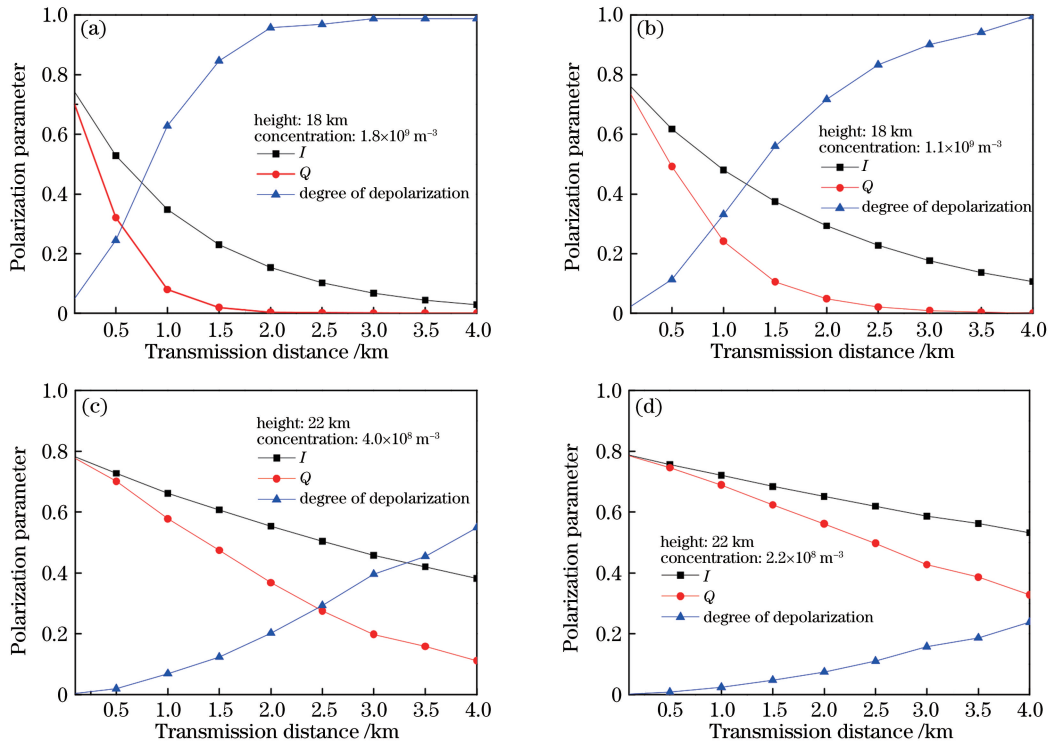


图 3 不同高度不同粒子数浓度下的偏振光偏振参数随传输距离的变化。(a)高度 18 km, 粒子数浓度  $1.8 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ ; (b)高度 18 km, 粒子数浓度  $1.1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ ; (c)高度 22 km, 粒子数浓度  $4.0 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ ; (d)高度 22 km, 粒子数浓度  $2.2 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$

Fig. 3 Polarization parameter of polarized light varying with transmission distance at different particle number concentrations and at different heights. (a) Height is 18 km, and particle number concentration is  $1.8 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ ; (b) height is 18 km, and particle number concentration is  $1.1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ ; (c) height is 22 km, and particle number concentration is  $4.0 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ ; (d) height is 22 km, and particle number concentration is  $2.2 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$

图 4(a)和图 4(b)表示水平偏振光 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]$ 入射到火星沙尘中水平方向强度和垂直方向强度随传输距离的变化曲线。图 4(c)和图 4(d)为垂直偏振光 $[1 \ -1 \ 0 \ 0]$ 入射到火星沙尘中时,水平方向和垂直方向强度随传输距离的变化曲线,它与平行偏振光 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]$ 入射时几乎对称重合,图 4(a)和图 4(d)结果一致,图 4(b)和图 4(c)结果一致。由图 4(a)可知水平分量强度随传输距离的增加不断减小,而  $0.66 \ \mu\text{m}$  对应的水平方向光强在 6 个波长中是最大的,这是因为在图 1(c)中  $0.66 \ \mu\text{m}$  波长的吸收系数最小,因此传输过程中衰减也最小的。在传输距离大于  $0.5 \ \text{km}$  后  $10.6 \ \mu\text{m}$  对应的水平方向光强在 6 个波长中是最小的,这是因为在图 1(a)中  $10.6 \ \mu\text{m}$  不对称因子最小,因此前向散射也最小。由图 4(b)可知,随着传输距离的增加,垂直方向光强先增大,在  $1 \ \text{km}$  左右达到峰值,然后不断减小,且  $0.66 \ \mu\text{m}$  波长时垂直方向光强也明显高于其他 5 个波长,而在小于  $2.5 \ \text{km}$  时虽然  $10.6 \ \mu\text{m}$  对应的垂直方向光强很小,但  $7.46 \ \mu\text{m}$  波长对应的垂直方向光强更小,

这是因为在图 1(b)中  $7.46 \ \mu\text{m}$  的散射系数是最小的,因此前向散射最小。综合而言,在火星沙尘粒子中, $0.66 \ \mu\text{m}$  波长激光由于吸收系数最小因此在所选择的 6 个波长中其水平方向和垂直方向强度都是最大的, $7.46 \ \mu\text{m}$  激光的水平方向强度减少量和垂直方向强度增加量明显小于其他波长,该结果与文献[25]类似,这说明  $7.46 \ \mu\text{m}$  激光的偏振保持性更好。

## 4 结 论

基于对数正态分布,利用偏振蒙特卡罗方法对偏振光在火星沙尘中的传输特性进行了研究,仿真计算了不同风速、不同粒子数浓度、不同粒径分布和不同高度下偏振光的传输特性。火星沙尘粒子数浓度越大或传输距离越远时退偏越明显,当波长为  $0.55 \ \mu\text{m}$  时,有效粒径越小时,退偏越严重,风速  $15.3 \ \text{m/s}$  和  $1.7 \ \text{m/s}$  对应的退偏度相差将近两个数量级。另外,由于  $7.46 \ \mu\text{m}$  激光的散射系数和吸收系数都较小,因此在火星沙尘中传输时偏振保持性

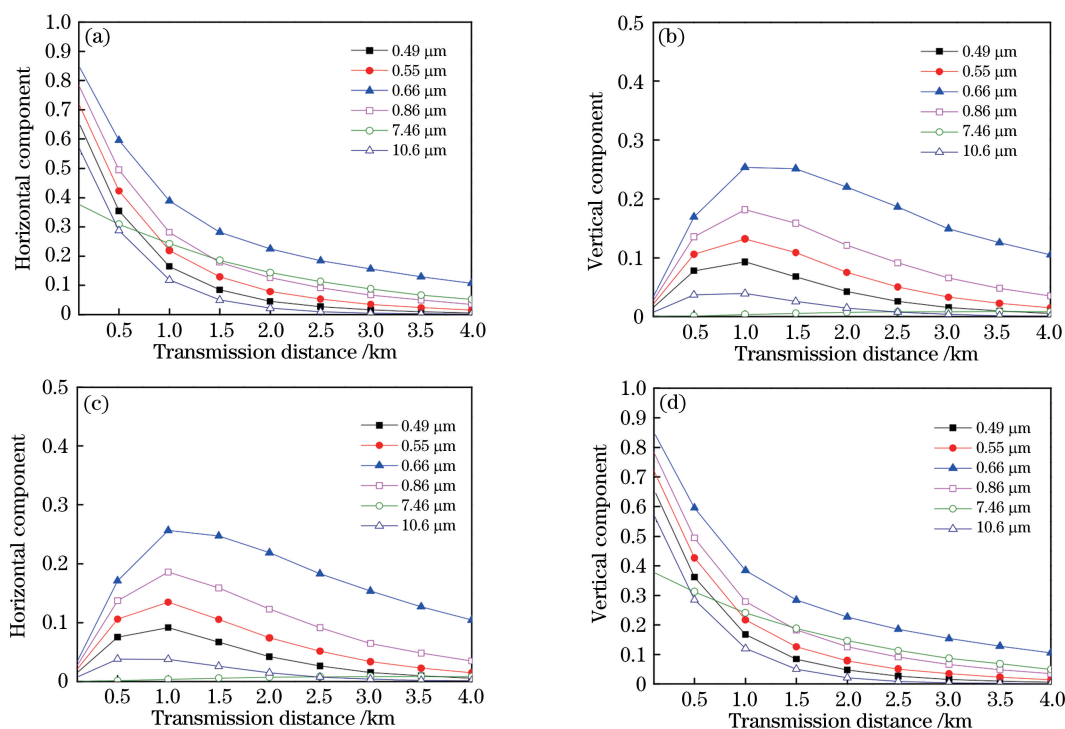


图 4 不同偏振光入射下的结果。(a)水平偏振光入射时水平方向分量随传输距离的变化;(b)水平偏振光入射时垂直方向分量随传输距离的变化;(c)垂直偏振光入射时水平方向分量随传输距离的变化;(d)垂直偏振光入射时垂直方向分量随传输距离的变化

Fig. 4 Results under different polarized light. (a) Horizontal component of polarized light varying with transmission distance under light incidence with horizontal polarization; (b) vertical component of polarized light varying with transmission distance under light incidence with horizontal polarization; (c) horizontal component of polarized light varying with transmission distance under light incidence with vertical polarization; (d) vertical component of polarized light varying with transmission distance under light incidence with vertical polarization

更好。而  $0.66 \mu\text{m}$  激光的吸收系数最小,因此在火星沙尘中传输时垂直方向和水平方向的强度衰减最慢。

### 参 考 文 献

- [1] Xu J, Ge B Z. Simulation and analysis of polarization properties of single particle light scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0429001.  
徐捷, 葛宝臻. 单颗粒光散射偏振特性的模拟和分析[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0429001.
- [2] 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.
- [3] Tu X Z, Pau S K H. Optimized design of N optical filters for color and polarization imaging[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 3011-3024.
- [4] Plass G N, Kattawar G W. Degree and direction of polarization of multiple scattered light. 2: earth's atmosphere with aerosols[J]. Applied Optics, 1972, 11(12): 2866-2879.
- [5] Kattawar G W, Plass G N. Degree and direction of polarization of multiple scattered light. 1: homogeneous cloud layers[J]. Applied Optics, 1972, 11(12): 2851-2865.
- [6] Plass G N, Kattawar G W, Catchings F E. Matrix operator theory of radiative transfer. 1: Rayleigh scattering[J]. Applied Optics, 1973, 12(2): 314-329.
- [7] Plass G N, Kattawar G W. Monte Carlo calculations of light scattering from clouds[J]. Applied Optics, 1968, 7(3): 415-419.
- [8] Kattawar G W, Adams C N. Stokes vector calculations of the submarine light field in an atmosphere-ocean with scattering according to a Rayleigh phase matrix: effect of interface refractive index on radiance and polarization[J]. Limnology and Oceanography, 1989, 34(8): 1453-1472.
- [9] Guo L L, Wang M J. Polarized radiative transfer characteristics of ice cloud atmospheres at large zenith angles [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1101002.  
郭镭力, 王明军. 大天顶角入射下冰云大气偏振辐射传输特性[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1101002.

- [10] Cheng T H, Gu X F, Yu T, et al. Multi-angular polarized radiation characteristics of water clouds[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(4): 267-271.  
程天海, 顾行发, 余涛, 等. 水云多角度偏振辐射特性研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(4): 267-271.
- [11] Fernández J E, Bastiano M, Tartari A. Vector Monte Carlo for simulation of polarized photons[J]. *X-Ray Spectrometry*, 1998, 27(5): 325-331.
- [12] Sun X M, Xiao S, Wan L, et al. Monte Carlo simulation of polarization lidar multiple scattering by multi-layer discrete random media [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1213001.  
孙贤明, 肖寒, 万隆, 等. 蒙特卡罗方法模拟多层离散随机介质对偏振激光雷达的多次散射[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 42(12): 1213001.
- [13] Otsuki S. Forward scattering of polarized light from birefringent turbid slab media: Monte Carlo simulation [J]. *Journal of The Optical Society of America A*, 2018, 35(3): 406-416.
- [14] Nemchinsky V, Khrabry A. Effect of polarization forces on carbon deposition on a non-spherical nanoparticle. Monte Carlo simulations[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25(2): 023501.
- [15] Wang J J, Liu X Y, Zhang Y T, et al. Transmission characteristics of polarized light in aerosol [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080103.  
汪杰君, 刘小燕, 张玉婷, 等. 偏振光在气溶胶中的传输特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080103.
- [16] Ye K T, Ji'E M, Zhai S J. Influence of particle shape on polarization characteristics of backscattering light in turbid media[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0105004.  
叶坤涛, 吉俄木沙, 翟盛杰. 粒子形态对浑浊介质后向散射光偏振特性的影响[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0105004.
- [17] Wang G C. Research on transmission characteristics of laser under complex atmospheric background[D]. Xi'an: Xidian University, 2007: 69-73.  
王光池. 激光在复杂大气背景下传输特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 69-73.
- [18] Hopcraft K I, Chang P C Y, Walker J G, et al. Properties of a polarized light-beam multiply scattered by a Rayleigh medium [M]//*Light Scattering from Microstructures*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 135-158.
- [19] Yang L H, Ke X Z, Ma D D. Depolarization characteristics of the polarized laser in atmosphere [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(11): 62-67.  
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.
- [20] Wang L, Xu Z H, Feng H J. Monte Carlo simulation for diffuse backscattering of polarized light from poly-disperse highly dense media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(6): 2694-2698.  
王凌, 徐之海, 冯华君. 多分散高浓度介质偏振光后向扩散散射的 Monte Carlo 仿真[J]. *物理学报*, 2005, 54(6): 2694-2698.
- [21] Clancy R T, Lee S W, Gladstone G R, et al. A new model for Mars atmospheric dust based upon analysis of ultraviolet through infrared observations from Mariner 9, Viking, and Phobos [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100(E3): 5251-5263.
- [22] Tomasko M G, Doose L R, Lemmon M T, et al. Properties of dust in the Martian atmosphere from the imager on Mars Pathfinder [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 8987-9007.
- [23] Pollack J B, Ockert-Bell M E, Shepard M K. Viking Lander image analysis of Martian atmospheric dust [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100(E3): 5235-5250.
- [24] Fedorova A A, Montmessin F, Rodin A V, et al. Evidence for a bimodal size distribution for the suspended aerosol particles on Mars [J]. *Icarus*, 2014, 231: 239-260.
- [25] Yang Y F, Qin J H, Wang Z L. Influence of Martian dust aerosol on laser transmission characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 0329001.  
杨玉峰, 秦建华, 王昭雷. 火星沙尘气溶胶对激光传输特性的影响 [J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 0329001.
- [26] Merrison J P, Gunnlaugsson H P, Jensen J, et al. A miniature laser anemometer for measurement of wind speed and dust suspension on Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2004, 52(13): 1177-1186.