

# 可见光和红外波段大气体散射偏振度特性研究

孙学金 李 浩 唐丽萍

(解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101)

**摘要** 搜集整理了大气粒子观测资料,运用米氏理论,从求解 Mueller 矩阵入手,计算并分析了可见光和红外波段大气体散射的偏振度特性。结果表明,大气体散射总体上为正偏振,前向散射不改变入射光的偏振状态,后向散射存在轻微的负偏振;大气线偏振度随散射角分布比较平滑,随着尺度参数的减小趋于瑞利散射的情况;散射尺度参数和粒子复折射指数是大气线偏振度的决定因子;在可见光与近红外波段,雾线偏振度随波长变化较小,随散射角呈“多峰”形式分布,在  $120^\circ$ ,  $140^\circ$  和  $180^\circ$  达到极大值;在红外波段,气溶胶线偏振度随波长变化较小,随散射角呈“单峰”分布形式,极大值出现在  $80^\circ \sim 140^\circ$  之间。

**关键词** 大气光学;可见光;红外;气溶胶;雾;散射;线偏振度

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0501001

## Study on Atmosphere Volume Scattering Polarization Degree Characteristics in Visible and Infrared Band

Sun Xuejin Li Hao Tang Liping

(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China)

**Abstract** A few observation samples of atmosphere particles are collected. Based on Mie scattering theory, atmosphere volume scattering polarization degree is simulated and analyzed in visible and infrared band by solving the Mueller matrix. The results show that atmosphere volume scattering polarization is positive as a whole. The polarization of incident light does not change in forward scattering angles, but it is slightly negative in backward scattering angles. Atmosphere linear polarization degree varies smoothly with scattering angle, and gradually approaches to Rayleigh scattering when scattering scale parameter decreases. Scattering scale parameter and particle complex refractive index are determining factors of atmosphere linear polarization degree. In the visible light and near-infrared band, the linear polarization degree of fog changes less with wavelength, and varies with scattering angle as multi-peaks distribution. The linear polarization degree of fog reaches maximum at scattering angles of  $120^\circ$ ,  $140^\circ$  and  $180^\circ$ . In the infrared band, the linear polarization degree of aerosol changes less with wavelength, and varies with scattering angle as single-peak distribution. The linear polarization degree of aerosol reaches maximum at scattering angles between  $80^\circ$  and  $140^\circ$ .

**Key words** atmospheric optics; visible-light; infrared; aerosol; fog; scattering; linear polarization degree

**OCIS codes** 010.1110; 290.5855; 290.1310

### 1 引 言

理论和实验研究表明,散射光的偏振信息载有介质的特征。作为强度探测的有益补充,偏振探测把可用信息从光强、光谱和空间扩展到光强、光谱、空间、偏振度、偏振方位角、偏振椭圆率和旋转方向,可以获取更多的介质物理和光学参数,这对提高

遥感能力具有重要意义<sup>[1]</sup>。随着偏振测量技术的发展<sup>[2,3]</sup>,基于偏振的大气遥感发展较快<sup>[4,5]</sup>。研究大气散射偏振规律是发展大气偏振遥感以及提高探测资料解译水平的重要基础<sup>[6]</sup>,对发展大气辐射理论也具有价值<sup>[7,8]</sup>。目前,对于大气散射强度特性的研究已有一些成果<sup>[9~11]</sup>,随着偏振探测与应用

收稿日期: 2010-09-06; 收到修改稿日期: 2011-01-12

作者简介: 孙学金(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事大气光学遥感与大气物理等方面的研究。

E-mail: xjsun2002@sina.com

的发展,对大气散射偏振特性的理论研究也日益受到重视<sup>[12]</sup>,相关问题引起多个学科的关注<sup>[13]</sup>。随着观测资料的丰富和计算技术的发展,从理论上系统性研究大气散射偏振特性的条件已经具备。

本文根据不同天气条件下雾和气溶胶的实际观测资料,运用米氏理论,从求解 Mueller 矩阵入手,研究可见光和红外波段大气散射偏振度特性,为建立大气散射偏振模型和开展大气偏振探测提供理论支持。

## 2 计算方法与所用资料

### 2.1 大气散射偏振度的计算方法

图 1 给出了单次散射的示意图<sup>[14]</sup>,光沿着  $z$  轴入射, $xoz$  平面为参考面,入射光和散射光确定的平面为散射面, $\Phi$  是参考面和散射面之间的旋转角, $\theta$  是人射光与观测方向的夹角,即散射角。

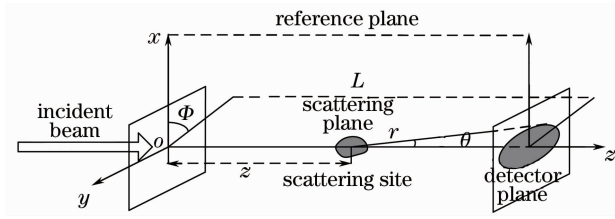


图 1 单次散射示意图

Fig. 1 Scheme of single scattering

在可见光与红外波段,可用米氏理论计算单个均质球状大气粒子对电磁波散射和吸收作用的问题解<sup>[15~18]</sup>,具有强度量纲的斯托克斯(Stokes)矢量描述光的偏振态表示为

$$\mathbf{S} = [I \quad Q \quad U \quad V]^T, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{S}$  是 Stokes 矢量, $I$  是总光强, $Q$  是水平或垂直方向的线偏振量, $U$  是  $\pm 45^\circ$  的线偏振量, $V$  是左旋或右旋圆偏振量。

利用 Mueller 矩阵将入射光和散射光的 Stokes 矢量联系起来:

$$\mathbf{S}^s = \mathbf{M}_{4 \times 4} \times \mathbf{S}^0, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{S}^0, \mathbf{S}^s$  分别是入射光和散射光的 Stokes 矢量, $\mathbf{M}_{4 \times 4}$  是包含 16 个元素的 Mueller 矩阵。

作为近似,假设大气散射粒子为均质球状,则 Mueller 矩阵可简化为

$$\mathbf{M}_{4 \times 4} = \frac{\mathbf{F}_{4 \times 4}}{k^2 R^2} = \frac{1}{k^2 R^2} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0 & 0 \\ F_{12} & F_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33} & -F_{34} \\ 0 & 0 & F_{34} & F_{33} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $R$  是观测点距散射体的距离; $k$  是波数, $k = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$  为波长; $\mathbf{F}_{4 \times 4}$  为变换矩阵,其元素计算如下:

$$\begin{cases} F_{11} = \frac{1}{2} [ |S_2(\theta)|^2 + |S_1(\theta)|^2 ] \\ F_{12} = \frac{1}{2} [ |S_2(\theta)|^2 - |S_1(\theta)|^2 ] \\ F_{33} = \frac{1}{2} [ S_2(\theta)S_1^*(\theta) + S_2^*(\theta)S_1(\theta) ] \\ F_{34} = \frac{i}{2} [ S_2(\theta)S_1^*(\theta) - S_2^*(\theta)S_1(\theta) ] \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $S_1(\theta), S_2(\theta)$  是平行和垂直两个正交分量的复振幅函数,计算如下:

$$\begin{cases} S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [ a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta) ] \\ S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [ b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau_n(\cos \theta) ] \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\pi_n(\cos \theta) = \frac{1}{\sin \theta} P_n^1(\cos \theta), \tau_n(\cos \theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^1(\cos \theta), P_n^1(\cos \theta)$  是缔合勒让德多项式, $a_n, b_n$  为米氏散射参数,计算如下:

$$\begin{cases} a_n = \frac{z_n(m_c \xi) [\zeta z_n(\xi)]' - z_n(\xi) [m_c \zeta z_n(m_c \xi)]'}{z_n(m_c \xi) [\zeta h_n(\xi)]' - h_n(\xi) [m_c \zeta z_n(m_c \xi)]'} \\ b_n = \frac{m_c^2 [\zeta z_n(\xi)]' z_n(m_c \xi) - z_n(\xi) [m_c \zeta z_n(m_c \xi)]'}{m_c^2 [\zeta z_n(\xi)]' h_n(m_c \xi) - h_n(\xi) [m_c \zeta z_n(m_c \xi)]'} \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\xi$  是散射尺度参数, $\xi = 2\pi r/\lambda, r$  是粒子半径, $m_c$  是粒子复折射指数,其值取决于粒子成分和波长, $z_n, h_n$  是球贝塞尔函数,分别表示球内、球外的辐射函数。

引入散射相矩阵得:

$$\mathbf{P}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & -P_{34} \\ 0 & 0 & P_{34} & P_{33} \end{bmatrix} = \frac{4\pi \mathbf{F}_{4 \times 4}}{k^2 \sigma_s}, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{P}_{4 \times 4}$  为散射相矩阵, $\sigma_s$  是粒子的散射截面为

$$\sigma_s = \frac{\pi}{k^2} \int_0^\pi [ |S_2(\theta)|^2 + |S_1(\theta)|^2 ] \sin \theta d\theta. \quad (8)$$

实际大气散射是多粒子系的体散射。大气湍流使粒子位置随机变化,各散射波位相独立,因此可将大气散射按单次散射线性叠加近似处理<sup>[15~18]</sup>。又由于粒子的取向随机,大气散射平均来说类似于等效球体群,因此可将粒子按球状近似处理<sup>[15~18]</sup>。用体散射相矩阵描述大气的体散射特性为

$$\mathbf{P}_{4 \times 4}^V = \begin{bmatrix} P_{11}^V & P_{12}^V & 0 & 0 \\ P_{12}^V & P_{11}^V & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}^V & -P_{34}^V \\ 0 & 0 & P_{34}^V & P_{33}^V \end{bmatrix} = \frac{4\pi \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{F}_{4 \times 4} n(r) dr}{k^2 \int_{r_1}^{r_2} \sigma_s n(r) dr}, \quad (9)$$

式中  $\mathbf{P}_{4 \times 4}^V$  为体散射相矩阵,  $r$  为粒子半径,  $r_1, r_2$  分别为粒子半径的下限、上限,  $n(r)$  是粒子尺度谱,  $n(r)dr$  表示单位体积内半径在  $(r, r+dr)$  范围内的质粒数。

对于非偏振的入射光, 归一化的 Stokes 矢量为  $\mathbf{S}^0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ , 则散射光的线偏振度 (记作  $D_{LP}$ ) 为

$$D_{LP} = -P_{12}^V / P_{11}^V. \quad (10)$$

## 2.2 所用资料

粒子尺度谱、波长和复折射指数是大气散射的

表 1 不同类型粒子的复折射指数

Table 1 Complex refractive index for different type of particles

Wavelength / $\mu\text{m}$ Type	0.55		1.06		5.0		10.59	
	Real part	Imaginary part	Real part	Imaginary part	Real part	Imaginary part	Real part	Imaginary part
Fog	1.333	0.000196	1.326	0.000005	1.325	0.012	1.179	0.067
Marine aerosol	1.418	0.002	1.405	0.004	1.372	0.010	1.380	0.057
Rural aerosol	1.530	0.006	1.520	0.014	1.390	0.013	1.720	0.085
Dust aerosol	1.530	0.008	1.520	0.008	1.250	0.016	1.620	0.120
Urban aerosol	1.607	0.158	1.600	0.163	1.593	0.218	1.859	0.310

## 3 结果与分析

图 2(a), (b) 分别是南京地区一次辐射雾, 北京地区一次城市气溶胶的天气条件下大气散射线偏振度在不同波长下随散射角的变化曲线, 图中曲线

三要素。搜集整理了中国境内典型天气条件下 30 个大气粒子的实测资料<sup>[15,19,20]</sup>, 包括辐射雾、平流雾、乡村气溶胶、城市气溶胶、海洋气溶胶和沙尘气溶胶六类样本, 粒子尺度谱由实测得到, 其中雾为 Junge 分布, 乡村气溶胶、城市气溶胶和海洋气溶胶为 D 谱分布, 沙尘气溶胶为对数正态分布, 计算得:

$$n(r) = ar^{-b}, \quad (11)$$

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = ar^{-a} \exp(-br^\gamma), \quad (12)$$

$$\frac{dN}{d(\lg r)} = \sum_{i=1}^{c_n} \frac{c_i N_0}{2\pi^{1/2} \lg \sigma_i} \exp\left[-\frac{(\lg r - \lg r_{mi})^2}{2 \lg^2 \sigma_i}\right], \quad (13)$$

式中  $N$  和  $n$  分别为粒子数密度和粒子数密度谱, 其余符号均为粒子尺度谱参数, 由观测资料拟合给出。

为研究可见光和红外波段大气散射偏振特性, 选择 0.55, 1.06, 5.0 和 10.59  $\mu\text{m}$  4 个卫星遥感大气的典型波长<sup>[13]</sup> 为研究对象。粒子复折射指数取决于粒子成份, 且随波长不同呈现相当复杂的变化, 其值根据文献<sup>[20]</sup> 取得, 如表 1 所示。

上的数字为波长, 单位为微米。从图 2 可以看出, 在  $0 \sim 20^\circ$  散射角区间, 不同波长下雾和气溶胶体散射线偏振度近似为 0, 即大气前向散射不改变入射光的偏振状态, 当入射光是非偏振时, 前向散射光也是

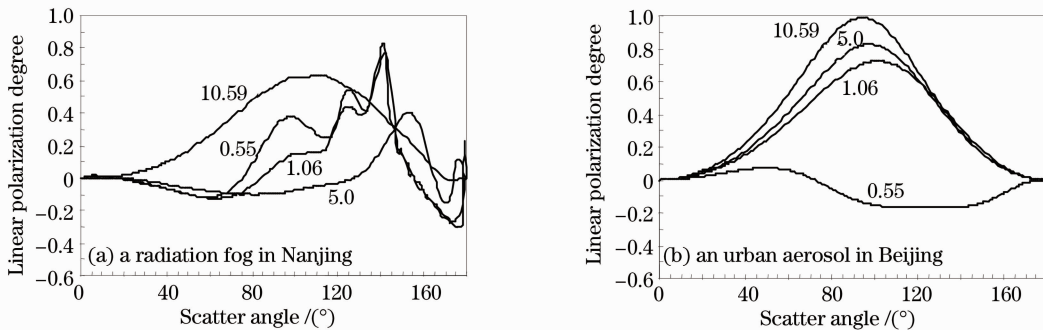


图 2 一次辐射雾和城市气溶胶的线偏振度随散射角分布曲线

Fig. 2 Linear polarization degrees at different scattering angles for a radiation fog and an urban aerosol

非偏振的。但雾和气溶胶的后向散射偏振特性有着明显的区别,雾在  $180^\circ$  处线偏振度存在极大值,而气溶胶在  $180^\circ$  处线偏振度为 0。图 2 中,雾线偏振度随散射角的分布以“多峰”形式为主,即线偏振度存在多个极值,而气溶胶线偏振度随散射角的分布以“单峰”形式为主。这种分布形式上的区别主要由于雾和气溶胶粒子大小不同引起的,单个粒子瑞利散射的线偏振度随散射角的分布以  $90^\circ$  角对称,即呈“单峰”分布形式<sup>[13]</sup>,雾滴半径在  $10\ \mu\text{m}$  量级,气溶胶半径在  $0.1\ \mu\text{m}$  量级,即相同波长下气溶胶散射比雾更接近瑞利散射。

从图 2 还可以看出,不同波长下的线偏振度曲线相互分散,这表明可见光和红外波段大气体散射线偏振度随入射波长不同而有较大差异。从曲线的离散程度可以看出,雾线偏振度受波长影响比气溶胶大。不同波段内大气体散射线偏振度受波长的影响程度并不相同,图 2(a)表明  $0.55\ \mu\text{m}$  和  $1.06\ \mu\text{m}$  波长对应的曲线基本一致,这是由于这两个波长下雾复折射指数值接近,使得可见光和近红外波段雾线偏振度随波长变化不大。图 2(b)表明  $1.06, 5.0$  和  $10.59\ \mu\text{m}$  波长对应的曲线基本一致,虽然这三个波长下气溶胶的复折射指数值相差较大,但由于此时散射

尺度参数均较小,使得红外波段气溶胶线偏振度随波长变化不大。

单个粒子散射线偏振度随散射角的分布会产生剧烈振荡现象<sup>[13]</sup>,但从图 2 可以看出,雾和气溶胶大气体散射线偏振度随散射角的分布比较光滑。这是由于大气体散射是多粒子系散射相互叠加的结果,不同大小粒子散射的峰值和谷值互相抵消,从而使得线偏振度随散射角的剧烈振荡现象消失。

图 3 是 4 种波长下 6 个雾样本体散射线偏振度随散射角的分布。从图 3 可以看出,在前向散射角某一区间内不同类型雾的线偏振度曲线几乎完全重合,即在该散射角区间内雾线偏振度几乎不受雾滴谱的影响,这是由于大气前向散射线偏振度较小导致的。可以看出,在  $1.06, 0.55, 5.0$  和  $10.59\ \mu\text{m}$  波长下,该散射角区间分别为  $(0, 75^\circ), (0, 70^\circ), (0, 30^\circ)$  和  $(0, 20^\circ)$ 。根据表 1 可知,这 4 个波长下雾复折射指数虚部依次增大,这表明随着吸收效应的增强,该散射角区间长度有缩短的趋势。在上述散射角区间以外,不同类型雾的线偏振度曲线相当离散,这表明在这些方向上雾线偏振度容易受到雾滴谱的影响。

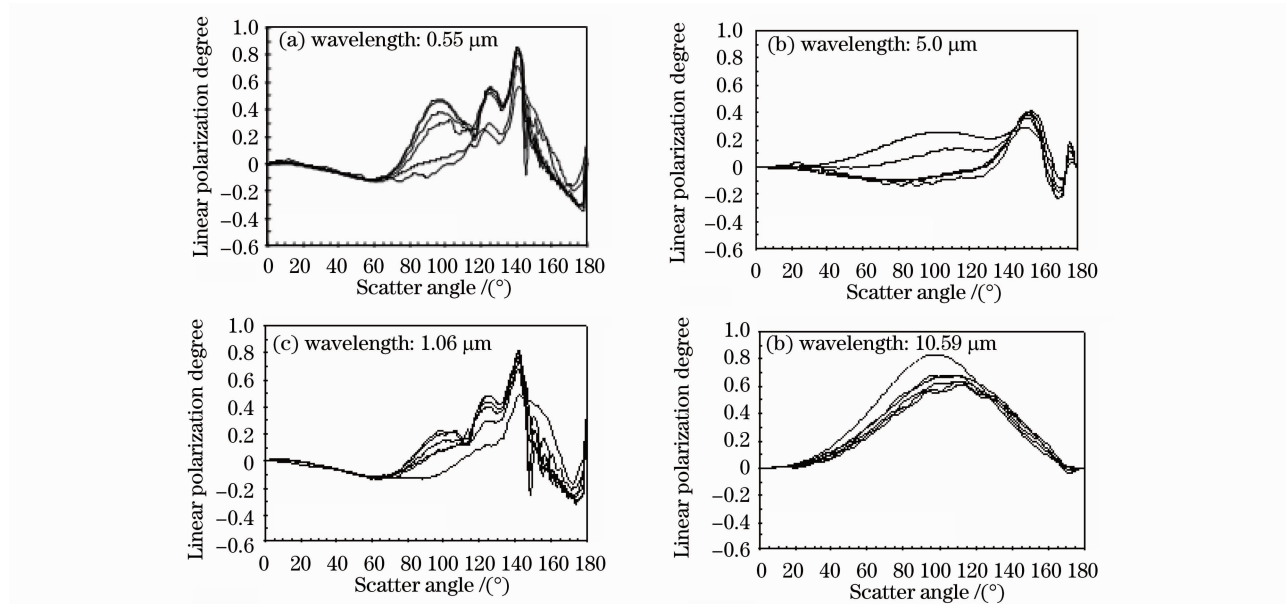


图 3 不同类型雾线偏振度随散射角的分布曲线

Fig. 3 Linear polarization degrees at different scattering angles for fogs

从图 3 还可以看出,在  $120^\circ, 140^\circ$  和  $180^\circ$  附近,  $0.55\ \mu\text{m}$  和  $1.06\ \mu\text{m}$  波长下雾线偏振度达到极大值,这三个角度分别是霓、主虹和宝光环出现的位置<sup>[13]</sup>。图 3 表明,随着波长的增大,不同类型雾线偏振度趋于一致,在  $10.59\ \mu\text{m}$  波长下一致程度最

好,此时在  $100^\circ$  附近出现了一个正偏振度极大值,雾线偏振度分布也由“多峰”形式转变为“单峰”形式,这是由于相应的散射尺度参数减小引起的。

图 4 是 4 种波长下 24 个气溶胶样本体散射线偏振度随散射角的分布。从图 4 可以看出,不同类



型的气溶胶线偏振度随散射角分布曲线的离散度大于雾的情况,这表明与雾相比,气溶胶线偏振度更容易受到粒子类型的影响。这是因为雾的成分单一,不同类型雾复折射指数相同,而气溶胶的来源多、成

分复杂。根据表 1 得到不同类型气溶胶之间复折射指数实部与虚部的最大值与最小值差(如图 5 所示),可以看出不同类型气溶胶不仅粒子尺度谱不同,而且复折射指数也大不相同。

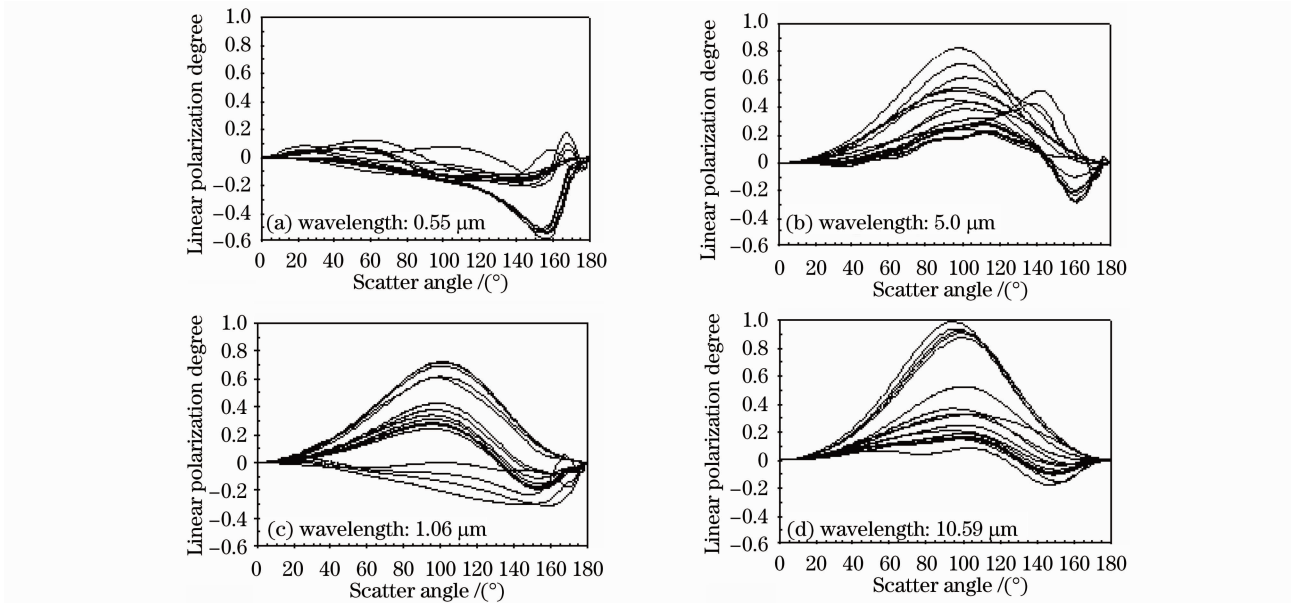


图 4 不同类型气溶胶线偏振度随散射角的分布曲线

Fig. 4 Linear polarization degrees at different scattering angles for aerosols

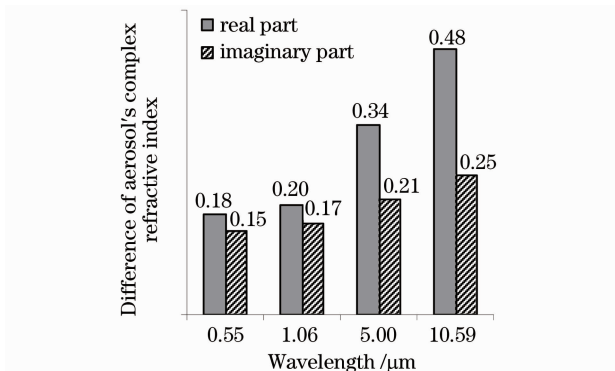


图 5 气溶胶复折射指数的差异

Fig. 5 Difference of aerosol's complex refractive indexes

从图 4 还可以看出,在 1.06, 5.0 和 10.59  $\mu\text{m}$  波长下,不同类型气溶胶线偏振度分布呈“单峰”形式,线偏振度最大值出现在  $80^\circ \sim 140^\circ$  之间,这是由于此散射角内存在从粒子表面直接反射的光,并且其偏振度较高引起的<sup>[2]</sup>。可以看出,0.55  $\mu\text{m}$  波长下不同类型气溶胶线偏振度分布不再具备“单峰”形式,这是由于该波长下散射尺度参数较大引起的。图 4 还表明,随着波长增大,不同类型气溶胶线偏振度随散射角的分布并没有趋于一致,这和图 3 所给出的雾的情况不相同,主要原因在于不同类型气溶胶复折射指数存在差异,而且该差异随波长变化。从图 5 可以看出,不同类型气溶胶复折射指数的差

异最大值,无论是实部还是虚部,均随波长的增大而增大,从而使得较长波长下的散射尺度参数较小,但不同类型气溶胶线偏振度仍有很大的区别。

#### 4 结 论

搜集整理了多种不同类型雾和气溶胶的观测资料,运用米氏理论,从求解 Mueller 矩阵入手,对可见光与红外波段大气散射偏振度特性进行了模拟计算与分析。在入射光为自然光条件下,得到以下主要结论:1)大气散射总体上为正偏振,前向散射不改变入射光的偏振状态,后向散射存在轻微负偏振;2)大气线偏振度随散射角的分布比较平滑,没有剧烈震荡现象,随着尺度参数的减小趋于瑞利散射的情况;3)散射尺度参数和粒子复折射指数是大气散射偏振度的决定因子;4)在可见光与近红外波段,雾线偏振度随波长变化较小,随散射角的分布呈“多峰”形式,在  $120^\circ, 140^\circ$  和  $180^\circ$  达到极大值;5)在红外波段,气溶胶线偏振度随波长变化较小,随散射角的分布呈“单峰”形式,极大值出现在  $80^\circ \sim 140^\circ$  之间。

所得结果可为大气散射偏振模型的建立和大气偏振探测提供理论支持。所得结果是否具有普遍性,仍需进一步研究。另外,粒子形状<sup>[21]</sup>、特殊成

份<sup>[22]</sup>和多次散射<sup>[23]</sup>等因素对大气散射偏振的影响尚需研究。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Biliu, Shi Jiaming, Zhao Dapeng *et al.*. Mechanism of infrared polarization detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 778~781  
刘必臻, 时家明, 赵大鹏等. 红外偏振探测的机理[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(5): 778~781
- 2 Sun Xiaobing, Hong Jin, Qiao Yanli. Investigation of measurements of polarized properties of atmospheric scattering radiation [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2005, **22**(1): 111~115  
孙晓兵, 洪津, 乔延利. 大气散射辐射偏振特性测量研究[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(1): 111~115
- 3 Yang Jinghua, Di Xu, Yue Chunmin *et al.*. Polarization analysis on reflected light and three-dimensional measurement of object shape[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2115~2119  
杨进华, 邸旭, 岳春敏等. 反射光偏振特性分析与物体形状的测量[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2115~2119
- 4 Cheng Tianhai, Chen Liangfu, Gu Xingfa *et al.*. Cloud phase classification and validation based on multi-angular polarized characteristics of cloud [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1849~1855  
程天海, 陈良富, 顾行发等. 基于多角度偏振特性的云相态识别及验证[J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 1849~1855
- 5 Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo *et al.*. Research on the depolarization ratio characteristic of the aerosol in the atmosphere with the CALIPSO satellite data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2943~2951  
赵一鸣, 江月松, 张绪国等. 利用 CALIPSO 卫星数据对大气气溶胶的去偏振度特性分析研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 2943~2951
- 6 Sun Xuejin, Wang Xiaolei, Li Hao *et al.*. Atmospheric Sounding [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009  
孙学金, 王晓蕾, 李浩等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009
- 7 Zhang Heyong, Ren Deming, Zhao Weijiang *et al.*. Research of scattering phase function of spheric particle under polarized state [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(9): 70~75  
张合勇, 任德明, 赵卫疆等. 偏振状态下球形粒子的散射相位函数研究[J]. 光电工程, 2008, **35**(9): 70~75
- 8 Leng Shaohua, Liu Linhua. Effects of polarization on numerical accuracy of radiative transfer [J]. *J. Thermal Science and Technology*, 2008, **7**(3): 211~216  
冷少华, 刘林华. 偏振对辐射传递计算精度的影响[J]. 热科学与技术, 2008, **7**(3): 211~216
- 9 Li Hao, Sun Xuejin. Theoretical analysis of measurement error of forward scattering visibility meter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(6): 1~5  
李浩, 孙学金. 前向散射能见度仪测量误差的理论分析[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(6): 1~5
- 10 Shao Shiyong, Huang Yinbo, Wei Heli *et al.*. Phase function of prolate spheroidal mono-disperse aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 108~113  
邵士勇, 黄印博, 魏合理等. 单分散长椭球形气溶胶粒子的散射相函数研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 108~113
- 11 Sun Xianming, Wang Haihua, Liu Wanqiang *et al.*. Nonspherical model for sand dust storm and its application to the research of light multiple scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1506~1510  
孙贤明, 王海华, 刘万强等. 沙尘暴粒子的非球形模型及其对激光的多次散射特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1506~1510
- 12 Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Theory analysis of polarization characteristic of the light scattered by the aerosol [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(6): 862~865  
赵一鸣, 江月松, 路小梅. 气溶胶散射光偏振度特性的理论研究[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(6): 862~865
- 13 Liao Guonan. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. Guo Caili, Zhou Shijian Transl. Beijing: Meteorological Press, 2004  
廖国男. 大气辐射导论[M]. 郭彩丽, 周诗健译. 北京: 气象出版社, 2004
- 14 Yang Lihong, Ke Xizheng, Ma Dongdong. 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
- 15 Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. Advanced Atmospheric Physics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 750~768  
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 750~768
- 16 Sebastian Bartel, Andreas H. Hielscher. Monte-Carlo simulations of the diffuse backscattering Mueller matrix for highly scattering media [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(10): 3723~3731
- 17 D. J. Bogueki, J. Piskozub. Monte-Carlo simulation of propagation of a short light beam through turbulent oceanic flow [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(21): 13988~13996
- 18 Jacek Piskozub, Dariusz Straraski. Influence of forward and multiple light scatter on the measurement of beam attenuation in highly scattering marine environments [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(24): 4723~4731
- 19 Yan Fengjin, Hu Huanling, Zhou Jun. Measurement of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 855~859  
阎逢旗, 胡欢陵, 周军. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射指数虚部的测量[J]. 光学学报, 2003, **23**(7): 855~859
- 20 Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. Atmospheric Aerosol Tutorial [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995. P277  
章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995. P277
- 21 Gao Taichang, Liu Lei, Li Hao. Effect of shape and character of aerosol on its near-infrared scattering characteristics [J]. *J. PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, **8**(3): 302~306  
高太长, 刘磊, 李浩. 近红外波段气溶胶粒子形状和性质对散射特性的影响[J]. 解放军理工大学学报, 2007, **8**(3): 302~306
- 22 Xie Qiyuan, Zhang Heping, Zhang Yongming *et al.*. Experimental study on Stokes scattering matrixes of smode particles [J]. *Infrared Millim. Waves*, 2007, **26**(4): 279~283  
谢启源, 张和平, 张永明等. 火灾烟颗粒 Stokes 散射矩阵的实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, **26**(4): 279~283
- 23 Yang Ming, Wang Baorong, Li Yingjie. Polarization characteristics of atmospheric scattering light [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, **24**(2): 1~5  
杨明, 王宝荣, 李颖杰. 大气散射光偏振特性分析[J]. 光电技术应用, 2009, **24**(2): 1~5