

激光与光电子学进展

实际天气条件下气溶胶的散射偏振特性

马愈昭^{1,2*}, 高晨², 朱峻¹¹中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300;²中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 基于逐次阶散射法对矢量辐射传输方程进行求解, 考虑了多次散射现象以及地表反射模型, 研究了实际天气条件下不同能见度天气中气溶胶的散射偏振特性。基于北京地区 2019 年较长时间范围内的能见度统计, 选取具有代表性的高能见度和低能见度天气。依据 AERONET 气溶胶宏观和微观数据, 采用更能反映地表情况的耦合地表反射模型。仿真得出了不同能见度天气条件下的气溶胶散射光 Stokes 矢量, 进而求得偏振度。仿真结果表明, 低能见度和高能见度天气条件下的气溶胶散射偏振特性有所不同。低能见度天气条件下, 随着太阳天顶角的增大, 向下的 1 次散射光 I 、 Q 、 U 分量无规律变化, 而向下的高阶散射光以及向上的各阶散射光的 I 、 Q 、 U 分量随太阳天顶角的增大而增大。在高能见度天气条件下, 各阶散射光的 I 、 Q 、 U 分量变化趋势比较一致, 均随天顶角的增大而增大, 偏振度也是如此。实际天气条件下的气溶胶散射偏振特性对气溶胶散射偏振特性遥感、气溶胶微物理特性反演具有重要意义。

关键词 大气光学; 能见度; 气溶胶; 多次散射; 偏振; 逐次阶散射法

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222434

Scattering Polarization Characteristics of Aerosols in Actual Weather Conditions

Ma Yuzhao^{1,2*}, Gao Chen², Zhu Jun¹¹Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;²College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract In this study, the polarization properties of light scattered by aerosols are investigated in actual atmospheric conditions at different visibilities considering the multiple scattering effects and the Earth's surface reflection. The vector radiation transfer equation is solved using the successive order scattering method. First, the visibilities of all the days in 2019 are evaluated. Representative high- and low-visibility atmospheres are then used as the transmission media. The macroscopic information and the microphysical properties of the aerosols provided by AERONET are used in the numerical simulations of the polarization properties of the scattered light. The coupled-surface reflection model is subsequently used to determine the properties of light scattered by the Earth's surface. The Stokes vectors are obtained as the simulation results, and the polarization degrees of the scattered light are derived. Our simulation results show that the aerosol scattering properties tend to be different in high-visibility weather conditions compared to low-visibility ones. As the solar zenith angle increases in low-visibility weather, the I , Q , and U elements of the first-order downward scattered light vary irregularly. However, these elements increase at all the orders of upward scattered light and at the high-order downward scattered light. Conversely, for high-visibility weather, the values of the I , Q , and U elements of all the scattered light orders that possess similar variation characteristics, increase with the solar zenith angle. The corresponding polarization degrees exhibit similar trends. The results of our study can be useful for the remote sensing of the polarization properties of aerosol scattered light and for determining the microphysical properties of aerosols.

Key words atmospheric optics; visibility; aerosol; multiple scattering; polarization; successive order scattering

收稿日期: 2022-08-31; 修回日期: 2022-10-08; 录用日期: 2022-11-04; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1833111)

通信作者: *yzma@cauc.edu.cn

1 引言

光在大气中传输时,经大气中的气溶胶粒子散射、吸收以及地表反射后,其偏振特性会发生改变。利用散射光的偏振特性可以有效地分析散射介质的内部特征。能见度是表征天气好坏的最直接因素,也是比较容易测量的宏观参量。它是军事和交通运输业中的一个关键气象要素。在民航中,机场的开放和关闭,都是以能见度数值为参考基准。飞行员在起飞和降落中是否符合所需的目视飞行规则也是以地面报告的能见度为标准。在不同能见度天气条件下,气溶胶的散射光偏振特性可能有所不同。研究实际天气条件下的气溶胶散射偏振特性对气溶胶散射偏振特性遥感、气溶胶微物理特性反演、天气预报等都具有重要意义。

Levy 等^[1]指出,现有的中分辨率成像光谱仪(MODIS)在反演陆地气溶胶光学厚度时,由于使用标量辐射传输理论而忽略了气溶胶的偏振特性,所反演的气溶胶光学厚度具有较大误差。张肃等^[2]采用蒙特卡罗法研究了偏振光经散射介质传输后的偏振度。张颖等^[3]基于倍加累加法求解矢量辐射传输方程,结合 T 矩阵法计算粒子散射特性,建立了适用于多种天气条件的天空光偏振模型。以上研究工作并未考虑光在气溶胶传输中的多次散射现象。而光在浓度较大的气溶胶,即低能见度大气中传输时,多次散射现象可能对散射光偏振特性有较大影响。Bryukhanova 等^[4]考虑了二次散射,从激光雷达方程出发研究了线偏振度和圆偏振度与云滴有效半径、云滴含水量之间的关系。利用倍加累加法不能分辨各阶散射的贡献^[5],而逐次散射法能克服这一不足^[6]。Hou 等^[7]基于改进的逐次阶散射法,提出了偏振辐射传输模型,求解矢量辐射传输方程,考虑了多次散射影响,讨论了好天和坏天的气溶胶散射偏振特性。崔岩等^[8]基于 libRadtran 模式仿真分析不同地表反射率下的天空偏振模式,研究了地表反射率对天空偏振模式的影响。以上研究中并未考虑地表反射模型对气溶胶散射偏振特性的影响。在以上的气溶胶散射光偏振特性研究工作中,或忽略气溶胶的多次散射对散射光偏振特性的影响,或选用的气溶胶模型过于简单,与实际大气气溶胶差别较大,或未充分考虑地表反射的影响。因此,获得的散射光偏振特性可能与实际情况存在较大差别。

本文采用逐次阶散射法求解矢量辐射传输方程,考虑多次散射影响,基于实际探测得到的气溶胶微物理特性和能见度宏观数据,采用更能反映实际地表情况的耦合地表反射模型,研究不同能见度天气条件下的气溶胶散射光 Stokes 矢量,进而求得偏振度,也分析了一次散射光及高阶散射光的偏振特性。

2 光在大气中的散射

光在大气中的散射符合矢量辐射传输理论,矢量

辐射传输方程的一般表示形式为^[9-10]

$$-\mu \frac{d\mathbf{L}(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = -\mathbf{L}(\tau, \mu, \varphi) + \mathbf{S}(\tau, \mu, \varphi), \quad (1)$$

式中: \mathbf{L} 为 Stokes 矢量; τ 为大气光学厚度; μ 为观测天顶角的余弦; φ 为相对于太阳出射光线的方位角; \mathbf{S} 为源函数。 $\mathbf{S}^{(1)}$ 表达式为

$$\mathbf{S}(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0) \mathbf{E}_0 \exp(-\tau/\mu_0) + \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi, \mu', \varphi') \mathbf{L}(\tau, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi', \quad (2)$$

式中: μ_0 为太阳天顶角的余弦; φ_0 为太阳方位角; \mathbf{E}_0 为太阳辐射通量; ω 为单次散射反照率; \mathbf{M} 为对单次散射相矩阵进行了参考平面旋转变换后的散射矩阵,即 Mueller 矩阵。

光在大气中传输时发生了衰减,主要是因为大气中的气溶胶粒子的散射和吸收作用。又因为大气中气溶胶粒子种类多样,成分复杂,呈现出各式各样的物理特性,单个的气溶胶粒子和气溶胶粒子群呈现出不同的散射偏振特性。

2.1 单个气溶胶粒子的散射模型

偏振作为光的基本属性之一,不仅同光的频率、幅度、相位处于相同的地位,更重要的是偏振中含有丰富的目标信息。若想要提取到这些有用信息,必须要对偏振态进行相关研究。因此需要定量研究光子在介质中传输时的散射偏振特性。一般情况下,选用 Stokes 矢量 $\mathbf{L}^{[12-13]}$ 来描述光子偏振态的变化情况,表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \\ \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_x^2 + \mathbf{E}_y^2 \\ \mathbf{E}_x^2 - \mathbf{E}_y^2 \\ 2\mathbf{E}_x \mathbf{E}_y \cos \delta \\ 2\mathbf{E}_x \mathbf{E}_y \sin \delta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{E}_x 和 \mathbf{E}_y 分别表示电场 x 、 y 方向上的振幅; δ 表示电场 x 、 y 方向上的相位差; \mathbf{I} 表示总散射辐射强度; \mathbf{Q} 表示 x 轴方向的线偏振光分量; \mathbf{U} 表示 45° 方向的线偏振光分量; \mathbf{V} 表示圆偏振光分量。

测量出 Stokes 矢量后就可以对光的偏振态进行表示。偏振度是电磁波的重要特征,可以求解电磁波中偏振分量的含量,具体表示为

$$P = \frac{\sqrt{\mathbf{Q}^2 + \mathbf{U}^2 + \mathbf{V}^2}}{\mathbf{I}}, \quad (0 \leq P \leq 1), \quad (4)$$

式中:线偏振光的偏振度 $P=1$;完全非偏振光的偏振度 $P=0$;部分偏振光的偏振度 $0 < P < 1$ 。

单个气溶胶粒子在介质中传输时不仅会发生单次散射,也会发生多次散射,出射的 Stokes 矢量 \mathbf{L}_{out} 和入射的 Stokes 矢量 \mathbf{L}_{in} 的关系为

$$\mathbf{L}_{\text{out}} = \mathbf{T}(-\gamma_n) g \mathbf{M}(\theta_n) g \mathbf{T}(f_n) \times g \times \cdots \times g \times \mathbf{T}(-\gamma_1) g \mathbf{M}(\theta_1) g \mathbf{T}(f_1) \mathbf{L}_{\text{in}}, \quad (5)$$

式中: g 为非对称因子; n 为光子的散射次数; θ 为散射角; f 和 γ 分别为入射光的 Stokes 矢量从参考平面到散

射平面的角度和经散射后回到参考平面的角度。旋转矩阵 $T(\chi)$ 可以表示为

$$T(\chi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\chi & \sin 2\chi & 0 \\ 0 & -\sin 2\chi & \cos 2\chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $M(\theta)$ 是介质在散射角度 θ 下的 Mueller 矩阵。 $M(\theta)^{[14]}$ 表示为

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} m_{11}(\theta) & m_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ m_{12}(\theta) & m_{11}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33}(\theta) & m_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -m_{34}(\theta) & m_{33}(\theta) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} m_{11}(\theta) = \frac{1}{2} (|S_1|^2 + |S_2|^2) \\ m_{12}(\theta) = \frac{1}{2} (|S_1|^2 - |S_2|^2) \\ m_{33}(\theta) = \frac{1}{2} (S_1 S_2^* - S_1^* S_2) \\ m_{34}(\theta) = \frac{i}{2} (S_1 S_2^* - S_2^* S_1) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: * 代表散射复振幅函数的共轭; S_1 和 S_2 为散射振幅函数。

$$\begin{cases} S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n(\alpha, m)\pi_n(\theta) + b_n(\alpha, m)\tau_n(\theta)] \\ S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n(\alpha, m)\tau_n(\theta) + b_n(\alpha, m)\pi_n(\theta)] \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $\pi_n(\theta)$ 和 $\tau_n(\theta)$ 为连带勒让德函数, 仅与散射角 θ 有关。

$$\begin{cases} a_n(\alpha, m) = \frac{\varphi'_n(m\alpha)\varphi_n(\alpha) - m\varphi_n(m\alpha)\varphi'_n(\alpha)}{\varphi'_n(m\alpha)\xi_n(\alpha) - m\varphi_n(m\alpha)\xi'_n(\alpha)} \\ b_n(\alpha, m) = \frac{m\varphi'_n(m\alpha)\varphi_n(\alpha) - \varphi_n(m\alpha)\varphi'_n(\alpha)}{m\varphi'_n(m\alpha)\xi_n(\alpha) - \varphi_n(m\alpha)\xi'_n(\alpha)} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $m = m_r + im_i$ ($m_i \geq 0$) 为复折射指数; $\alpha = 2\pi r/\lambda$ 为球形粒子的尺度参数 (其中, r 为球形粒子的半径, λ 为光波长)。 $\varphi_n(\alpha)$ 和 $\xi_n(\alpha)$ 为 Riccati-Bessel 函数, 可分别表示为

$$\begin{cases} \varphi_n(\alpha) = \sqrt{\pi\alpha/2} \cdot J_{n+1/2}(\alpha) \\ \xi_n(\alpha) = \sqrt{\pi\alpha/2} \cdot H_{n+1/2}^{(2)}(\alpha) \end{cases}, \quad (11)$$

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

2.2 基于逐次阶散射法仿真气溶胶粒子群多次散射

逐次阶散射法是对一次、二次、三次等散射的光子分别计算其强度, 各次散射辐射强度之和为总强度^[15-16], 表示为

$$L(\tau, \mu, \varphi) = \sum_{n=1}^N L_n(\tau, \mu, \varphi). \quad (12)$$

逐次阶散射法的基本处理过程如图 1 所示。研究表明, 在一定的时间与空间范围内, 同一能见度级别下, 气溶胶消光系数廓线具有特定的垂直分布规律^[17]。

到达地球大气层的太阳辐射被空气分子和各种固体和液体粒子散射, 它也被气体分子吸收。光经大气层散射后, 一部分到达地面, 一部分回到大气层中。观测方位角的参考平面如图 2 所示, 在相对方位角为 φ 的半平面内, 太阳天顶角为正 ($\theta_s > 0$), 在半平面 $\varphi + \pi$ 内, 太阳天顶角为负 ($\theta_s < 0$)。除此之外, 定义太阳

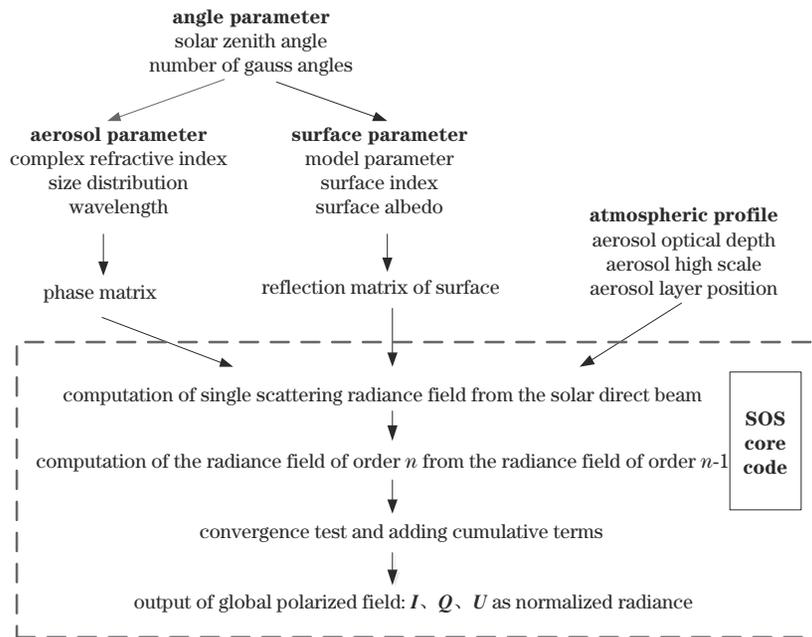


图 1 逐次阶散射法的基本处理过程

Fig. 1 Basic processing of successive order scattering method

天顶角为 0° , 天底角为 180° , 则观测角度在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 时定义为向上, 观测角度在 $[90^\circ, 180^\circ]$ 时定义为向下, 参考平面的水平方向被定义为 $\pm 90^\circ$ 。

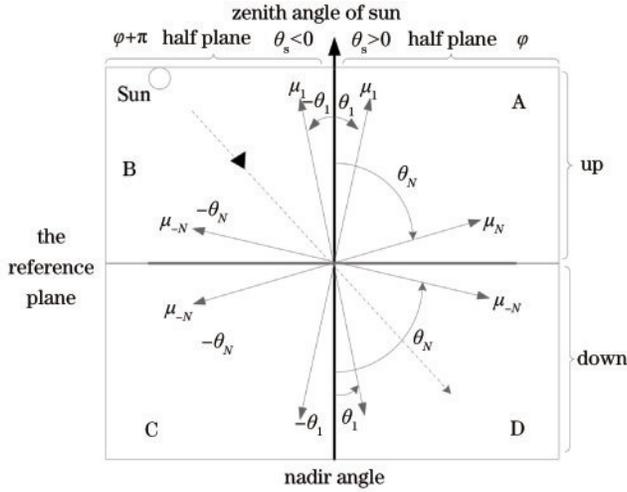


图 2 观测方位角参考平面
Fig. 2 Viewing azimuthal plane

因此, 向上和向下的散射辐射强度的表达式分别为

$$L_n(\tau, \mu > 0, \varphi) = L_n^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) \exp\left[-(\tau^* - \tau)/\mu\right] + \int_{\tau}^{\tau^*} \exp\left[-(\tau' - \tau)/\mu\right] S_n(\tau', \mu, \varphi) d\tau'/\mu, \quad (13)$$

$$L_n(\tau, \mu < 0, \varphi) = -\int_0^{\tau} \exp\left[-(\tau' - \tau)/\mu\right] S_n(\tau', \mu, \varphi) d\tau'/\mu, \quad (14)$$

式中: 源函数 S 分别表示单次散射 S_1 和多次散射 $S_{n>1}$ 。其表达式分别为

$$S_1(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0) \mathbf{E}_0 \exp\left(\frac{\tau}{\mu_0}\right), \quad (15)$$

$$S_{n>1}(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi, \mu', \varphi') L_{n-1}(\tau, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi', \quad (16)$$

$$L_n^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) = (-\mu_0) \mathbf{R}(\mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0) \mathbf{E}_0 \exp(\tau^*/\mu_0)/\pi, \quad (17)$$

$$L_n^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_{-1}^0 (-\mu') \mathbf{R}(\mu, \varphi, \mu', \varphi') L_{n-1}(\tau^*, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi'/\pi, \quad (18)$$

式中: S_n 是在每一个 τ 处的源函数; S_1 是单次散射在每一个 τ 处的源函数; $S_{n>1}$ 是多次散射在每一个 τ 处的源函数; $\mathbf{R}(\mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0)$ 为下垫面的反射率, 根据地表反射模型计算得出。描述地表反射模型的参数有单次散射反照率、折射率和地表反射模型中的经验系数。本文中选用耦合地表反射模型^[18]对气溶胶散射偏振特性进行研究。

直接求解矢量辐射传输方程难度大且不容易得到解析解, 为此需要对方程进行简化。矢量辐射传输方程的求解实质是对光学厚度、方位角及观测天顶角积分的求解, 需要将方位角和观测天顶角进行变量分离, 用解析方法进行求解。将光学厚度划分为 N 层, 用数值方法进行求解。

3 地表反射模型

由式(17)和(18)可知, 散射辐射强度(即 Stokes 矢量)的求解需要考虑地表反射率。根据图 1 可知, 地表反射模型、折射率和反射率的选取影响地表反射率。研究表明, 光在地表发生散射时, 光的偏振态会发生改变, 因此采用耦合地表反射模型研究气溶胶的散射偏振特性会更加准确^[19]。耦合地表反射模型由非偏双向反射分布函数和双向偏振分布函数组成, 即 Roujean 和 Nadal。其公式^[20-21]具体表示为

$$\begin{cases} R_r(\theta_s, \theta_v, \varphi) = K_0 + K_1 f_1(\theta_s, \theta_v, \varphi) + K_2 f_2(\theta_s, \theta_v, \varphi) \\ R_n(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \rho \left[1 - \exp\left(-\beta \frac{F_p(\alpha_s)}{\mu_0 + \mu}\right) \right] \end{cases}, \quad (19)$$

式中: θ_s 表示太阳天顶角; θ_v 表示观测天顶角; K_0, K_1 和 K_2 分别为 Roujean 地表反射模型双向反射率函数表达式中与地表特征相关的系数; α_s 表示入射角; ρ 和 β 为 Nadal 地表反射模型中的经验系数; f_1 和 f_2 分别描述平面反射特性和植被辐射传输特性。 F_p 为偏振光的菲涅耳系数, 可具体表示为

$$\begin{cases} f_1(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{1}{2\pi} [(\pi - \varphi) \cos \varphi + \sin \varphi] \tan \theta_s \tan \theta_v - \frac{1}{\pi} \left(\tan \theta_s + \tan \theta_v + \sqrt{\tan^2 \theta_s + \tan^2 \theta_v - 2 \tan \theta_s \tan \theta_v \cos \varphi} \right) \\ f_2(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \cos \xi + \sin \xi \right] - \frac{1}{3} \\ F_p(\alpha_s) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{N_{\mu_s - \mu_i}}{N_{\mu_s + \mu_i}} \right)^2 - \left(\frac{N_{\mu_s - \mu_t}}{N_{\mu_s + \mu_t}} \right)^2 \right] \end{cases}, \quad (20)$$

式中: ξ 表示太阳入射光与观测视线的夹角; N 表示折射率; μ_i 表示入射角余弦; μ_t 表示折射角余弦。表 1 给

出了耦合地表反射模型的参数。

表 1 耦合地表反射模型的参数

Table 1 Parameter of coupled surface reflection model

Parameter	Value
Single scatter albedo	0.02
N	1.34
K_0	0.349
K_1	0.044
K_2	0.377
ρ	0.0229
β	38.0

4 不同能见度天气条件下的大气气溶胶

鉴于低能见度天气下大气气溶胶的粒子浓度相对较大,且研究现状^[22]表明,低能见度天气下的气溶胶对大气散射和偏振都会产生影响,因此,选择不同

能见度天气进行研究。统计了北京地区 2019 年 1—12 月份的能见度值,华北地区秋冬季节气象条件较为稳定^[23],在较短的时间内气溶胶微物理特性具有相似性,因此选择秋冬季节能见度相差较大的一个月。采用北京海淀气象站(39.98°N,116.28°E)能见度数据,将其按大小进行排序,选择数值最大和最小的各 3 天,分别命名为高能见度和低能见度天气。选取 AERONET 在 Beijing_PKU 监测站点(39.992°N,116.310°E)对应的光学厚度、复折射率等相关参数^[24](表 2)。图 3 给出了上述所选 6 天气溶胶的粒径分布曲线,可以看出,这 6 天的大气气溶胶体积谱分布是 6 个具有不同平均半径和标准差的对数正态分布函数的叠加,即能见度值越小,标准差越小,气溶胶体积谱分布越集中,反之亦然。

表 2 气溶胶粒子的相关参数

Table 2 Parameters of aerosol particles

Date	Visibility /km	Optical depth	Complex refractive index	Standard deviation of visibility /km	Standard deviation of optical depth
9.9	2.2	1.4270	1.4564+0.0021i	2.113	0.1430
9.30	7.1	0.7337	1.4479+0.0056i	3.853	0.1610
9.4	25.6	0.6413	1.4415+0.0036i	4.534	0.1367
9.18	29.1	0.0519	1.5494+0.0088i	2.422	0.0154
9.24	29.5	0.0910	1.5452+0.0065i	0.926	0.0119
9.23	30.0	0.0855	1.5508+0.0089i	0	0.0237

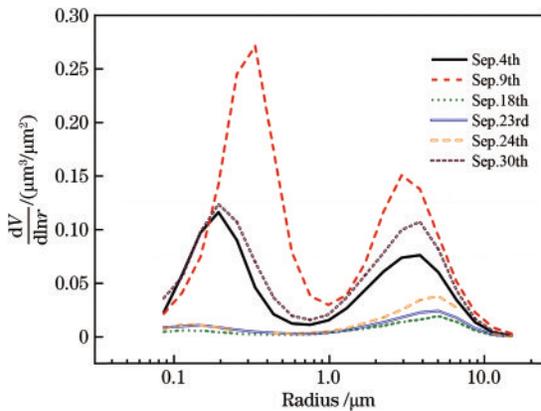


图 3 大气气溶胶的体积谱分布

Fig. 3 Volume spectrum distribution of atmospheric aerosols

本研究均在 670 nm 波段进行模拟,以 AERONET 在不同能见度天气条件下的气溶胶光学厚度、复折射率和粗细粒子浓度、模态半径、方差等同步测量结果作为逐次阶散射法模拟的输入参数,粗细粒子的相关参数需要根据实际大气中气溶胶的粒径分布计算得出。从图 3 可以看出,实际大气中气溶胶的粒径分布满足双峰的对数正态分布^[25-26],可以表示为

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{C_{\text{fine}}}{\sqrt{2\pi} \cdot S_{\text{fine}}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_{\text{fine}})^2}{2S_{\text{fine}}^2}\right] + \frac{C_{\text{coarse}}}{\sqrt{2\pi} \cdot S_{\text{coarse}}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_{\text{coarse}})^2}{2S_{\text{coarse}}^2}\right], \quad (21)$$

式中: C 表示体积浓度;两个特征参数 r 和 S 分别表示模态半径和标准差; r_{fine} 和 r_{coarse} 分别表示细粒子和粗粒子的模态半径。

5 气溶胶的散射偏振特性

假设观测角度为 28.768°,方位角为 5°,运行矢量辐射传输代码后各阶散射的 Stokes 参量都会得出来。气溶胶通常以 Stokes 矢量和偏振度描述散射偏振特性,而偏振度通常是根据散射辐射强度,即 Stokes 矢量中的 I 、 Q 、 U 、 V 四个元素计算出来的。根据图 1 可知,影响散射辐射强度主要有气溶胶粒子的粒径分布、折射率、光学厚度等光学参数以及地表参数。

5.1 气溶胶散射光的 Stokes 矢量

Stokes 矢量在实际测量中较为方便测得,可以很好地描述偏振光的状态,而且由于 I 、 Q 、 U 、 V 四个参数均表示散射辐射强度,方便辐射方程拓展到偏振形式,是描述偏振光的重要手段。在大气辐射传输中,圆偏振分量 V 很小,为此被忽略,只需考虑 $(I \ Q \ U)^T$,相应的 Mueller 矩阵和 Stokes 旋转矩阵降为三维。本文中假设入射光为太阳光,对应的 Stokes 矢量为 $(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ 。

本文研究了所选 6 天的散射辐射强度和偏振度随太阳天顶角的变化,发现高能见度 3 天和低能见度 3 天分别呈现出相似的变化规律。因此,选取能够代表高能见度(9月24日)和低能见度(9月9日)的天气,给出

对应的仿真结果。图 4 给出了低能见度天气下 I 、 Q 、 U 各阶以及总散射辐射强度值。低能见度天气下, I 、 Q 、 U 向下 [图 4(a)(c)(e)] 的分量均在太阳天顶角为 28.768° 发生突变, 并且 1 阶散射和总散射均随太阳天顶角无规律变化, 高阶散射(2~7 阶)随着太阳天顶角的增大而增大, 而 I 、 Q 、 U 向上 [图 4(b)(d)(f)] 的分量

各阶和总散射的散射辐射强度的变化趋势基本相同, 均随太阳天顶角的增大而增大。对向上和向下的各阶以及总的散射辐射强度值进行比较, I 的前两阶散射和总散射的散射辐射强度值总是向下大于向上, 而 Q 、 U 分量却正好相反, 各阶散射和总散射的散射辐射强度值总是向下小于向上。

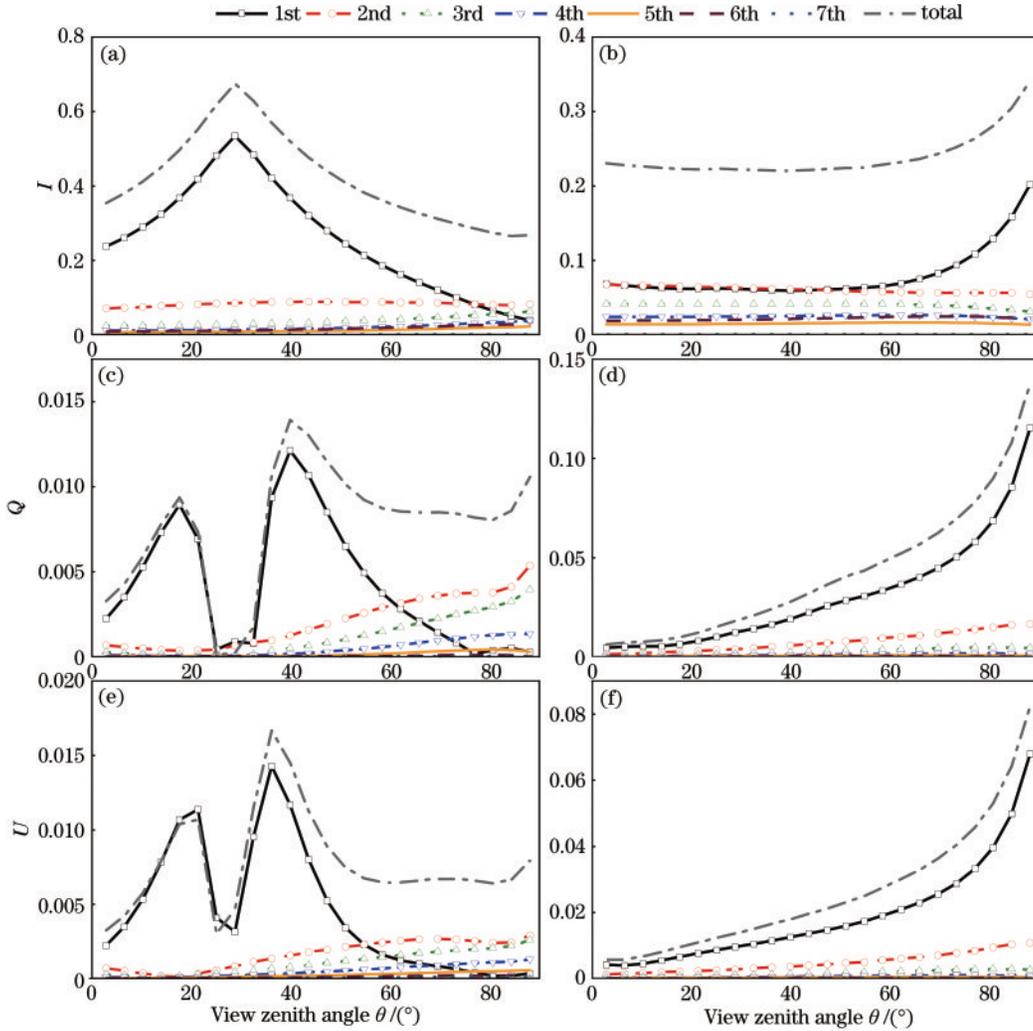


图 4 气溶胶在低能见度天气下的散射辐射强度。(a)向下的 I 随太阳天顶角的变化曲线;(b)向上的 I 随太阳天顶角的变化曲线;(c)向下的 Q 随太阳天顶角的变化曲线;(d)向上的 Q 随太阳天顶角的变化曲线;(e)向下的 U 随太阳天顶角的变化曲线;(f)向上的 U 随太阳天顶角的变化曲线

Fig. 4 Scattering radiation intensity of aerosol in low-visibility weather. (a) Curve of downward I with solar zenith angle; (b) curve of upward I with solar zenith angle; (c) curve of downward Q with solar zenith angle; (d) curve of upward Q with solar zenith angle; (e) curve of downward U with solar zenith angle; (f) curve of upward U with solar zenith angle

图 5 给出了高能见度天气下 I 、 Q 、 U 各阶散射和总散射的散射辐射强度。与低能见度天气不同的是, 高能见度天气下 I 、 Q 、 U 变化趋势基本相同, 均随太阳天顶角的增大而增大。这三个参量各阶散射和总散射的散射辐射强度值总是向上 [图 5(b)、(d)、(f)] 的大于向下 [图 5(a)、(c)、(e)] 的。散射辐射强度值随着散射阶数的增大散射量逐渐减小, U 分量在第 6、7 阶散射时散射量完全等于 0, 而 I 、 Q 在第 6、7 阶散射时仍有大于 10^{-3} 量级的散射量。

表 3 给出了两种不同能见度天气下, 1 阶散射辐射强度与总散射辐射强度的比值。在低能见度天气时, I 、 Q 分量在地表(向下)发生的单次散射辐射强度值明显要大于大气(向上)的, 而 U 分量正好相反。高能见度天气下, 在地表(向下)发生的 1 阶散射辐射强度值始终大于大气(向上)的, 这说明不同能见度天气条件下地表对散射辐射造成的影响不同。除向下的 I 分量外(表 3 中第 1 行), 单次散射的贡献总是高能见度天气大于低能见度天气。

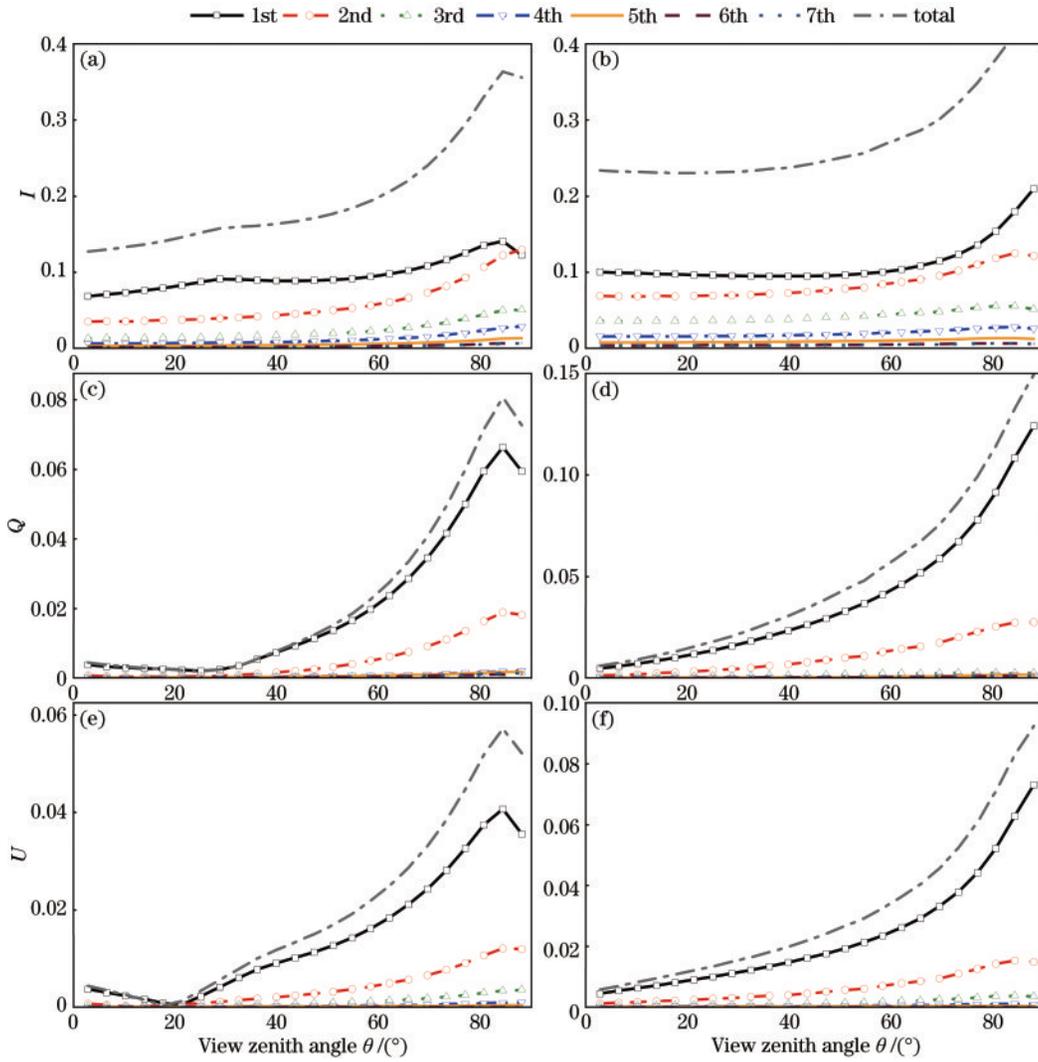


图 5 气溶胶在高能见度天气下的散射辐射强度。(a)向下的 I 随太阳天顶角的变化曲线;(b)向上的 I 随太阳天顶角的变化曲线;(c)向下的 Q 随太阳天顶角的变化曲线;(d)向上的 Q 随太阳天顶角的变化曲线;(e)向下的 U 随太阳天顶角的变化曲线;(f)向上的 U 随太阳天顶角的变化曲线

Fig. 5 Scattering radiation intensity of aerosol in high-visibility weather. (a) Curve of downward I with solar zenith angle; (b) curve of upward I with solar zenith angle; (c) curve of downward Q with solar zenith angle; (d) curve of upward Q with solar zenith angle; (e) curve of downward U with solar zenith angle; (f) curve of upward U with solar zenith angle

表 3 1 阶散射辐射强度占总散射辐射强度的比例

Table 3 Proportion of the first-order scattered radiation intensity to the total scattered radiation intensity

Scattered radiation intensity	Low-visibility weather /%	High-visibility weather /%
Downward I	56.2	50.3
Downward Q	88.1	91.2
Downward U	54.4	83.2
Upward I	32.2	40.5
Upward Q	70.3	77.0
Upward U	70.4	74.1

5.2 气溶胶散射光的偏振度

根据式(4)可知,由气溶胶的散射辐射强度可以计算得到不同天气条件下气溶胶的散射光偏振度。图 6 给出了低能见度天气下各阶散射的偏振度(n 阶散射

偏振度包含 $\leq n$ 阶的散射分量)随太阳天顶角的变化曲线。可以看出:气溶胶在大气[图 6(b)]中发生散射时,原有的非偏振光在 90° 时趋向于线偏振光;气溶胶在地面[图 6(a)]发生散射时,扰乱了原有偏振度的变化规律。在地面发生偏振与散射阶数无关,是无规律变化的。在大气层中气溶胶粒子的偏振度值随着散射阶数的增大而减小,1 阶散射的偏振度值远大于总散射的偏振度值。

图 7 给出了高能见度天气下各阶散射的偏振度随太阳天顶角变化曲线。气溶胶粒子在大气层[图 7(b)]中的偏振度大于地面[图 7(a)],1 阶散射偏振度值最大,且随着包含的高阶散射数量的增加偏振度逐渐下降。在地面各阶偏振随着太阳天顶角的增大先减小后增大;在大气层中气溶胶粒子发生偏振随太阳天顶角的增大而增大。

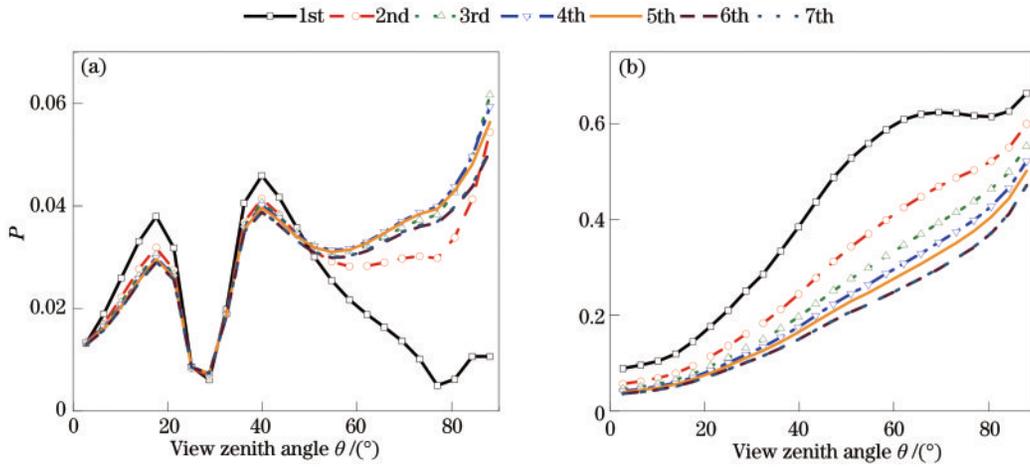


图 6 低能见度天气下各阶散射的线偏振度。(a)向下的偏振度随太阳天顶角的变化曲线;(b)向上的偏振度随太阳天顶角的变化曲线
Fig. 6 Linear polarization degree of each order scattering in low-visibility weather. (a) Curve of downward polarization degree versus solar zenith angle; (b) curve of upward polarization degree versus solar zenith angle

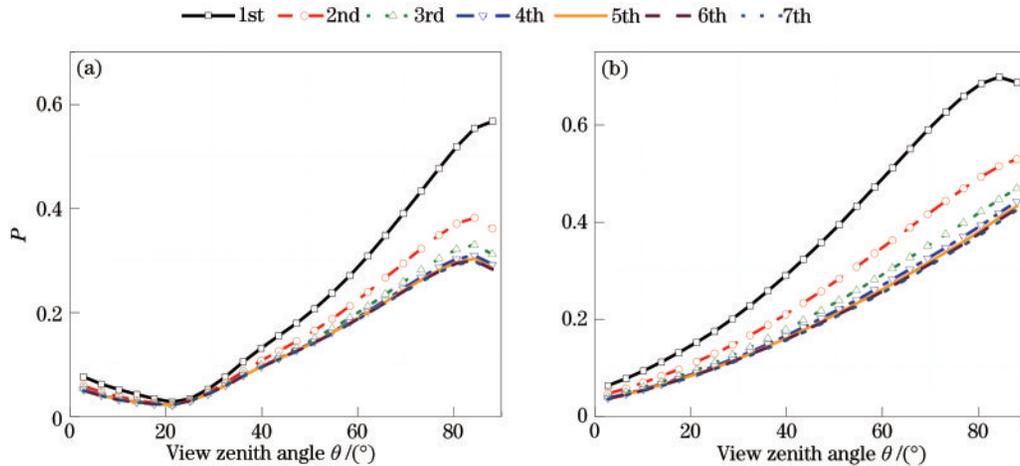


图 7 高能见度天气下各阶散射的线偏振度。(a)向下的偏振度随太阳天顶角的变化曲线;(b)向上的偏振度随太阳天顶角的变化曲线
Fig. 7 Linear polarization degree of each order scattering in high-visibility weather. (a) Curve of downward polarization degree versus solar zenith angle; (b) curve of upward polarization degree versus solar zenith angle

6 结 论

本文考虑多次散射影响,基于实际探测得到的气溶胶微物理特性和能见度宏观数据,采用更能反映实际地表情况的耦合地表反射模型,研究得出不同能见度天气条件下各阶气溶胶散射光 Stokes 矢量和偏振度。结果表明,在不同的能见度天气条件下,各阶散射光的散射辐射强度和偏振度数值的变化规律都存在较大差异,地表反射对散射光偏振特性有较大影响。在低能见度场景中,地表处发生的散射和偏振变化均无规律,在大气层发生的散射变化量由不明显到明显,偏振度随太阳天顶角的增大而增大。在高能见度场景中,向上的各阶散射、总散射的散射辐射强度和各阶散射的线偏振度总是大于向下的, I 、 Q 、 U 矢量均随太阳天顶角的增大而增大。相同天气条件下,向下的单次散射所作贡献大于向上的。该研究结果对气溶胶光学特性的反演具有一定意义,可以得到更为精确的遥感遥测数据。

致谢 感谢 AERONET 网站 (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) Beijing_PKU 监测站点负责人李婧提供气溶胶地基观测数据。

参 考 文 献

- [1] Levy R C, Remer L A, Kaufman Y J. Effects of neglecting polarization on the MODIS aerosol retrieval over land[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2576-2583.
- [2] 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. Zhang S, Zhan J T, Bai S K, et al. Influence of smoke concentration on transmission characteristics of polarized light[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0729001.
- [3] 张颖, 张熠, 赵慧洁. 多种天气条件下的天空光偏振模型[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(4): 453-459. Zhang Y, Zhang Y, Zhao H J. A skylight polarization model of various weather conditions[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(4): 453-459.

- [4] Bryukhanova V V, Nee E V, Doroshkevich A A. Effect of particles size distribution of droplet cloud on polarization characteristics of double scattering lidar return[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10466: 104664M.
- [5] Tomanič T, Rogelj L, Milanič M. Robustness of diffuse reflectance spectra analysis by inverse adding doubling algorithm[J]. Biomedical Optics Express, 2022, 13(2): 921-949.
- [6] Zhang T Y, Sun J M, Yang Y. A numerical study of effects of radiation on deep convective warm based cumulus cloud development with a 3-D radiative transfer model[J]. Atmosphere, 2020, 11(11): 1187.
- [7] Hou W Z, Sun B, Li Z Q, et al. Study the polarization and depolarization properties of atmospheric aerosol multiple scattering based on the successive order of scattering[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9678: 96780Z.
- [8] 崔岩, 刘亚飞, 刘康, 等. 地表反照率对天空偏振模式的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1701002.
Cui Y, Liu Y F, Liu K, et al. Effect of surface albedo on sky polarization mode[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1701002.
- [9] 姚海, 何姿, 丁大志, 等. 粗糙面上粒子层矢量辐射传输方程的二阶迭代解法[J]. 物理学报, 2022, 71(3): 034201.
Yao H, He Z, Ding D Z, et al. High-order iterative method for vector radiative transfer equation of particle layer on rough surface[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(3): 034201.
- [10] 庞明琪, 刘海峥, 张代军, 等. 高温激波层 CO₂ 辐射与传输特性数值计算研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 20210376.
Pang M Q, Liu H Z, Zhang D J, et al. A numerical study of carbon dioxide radiation and transmission property in high temperature shock layer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 20210376.
- [11] Wang C H, Feng Y Y, Yang Y H, et al. Chebyshev collocation spectral method for vector radiative transfer equation and its applications in two-layered media[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 243: 106822.
- [12] 杨志勇, 陆高翔, 张志伟, 等. 热辐射环境下目标红外偏振特性分析[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0220001.
Yang Z Y, Lu G X, Zhang Z W, et al. Analysis of infrared polarization characteristics of target in thermal radiation environment[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0220001.
- [13] 于婷, 战俊彤, 马莉莉, 等. 椭球形粒子浓度对激光偏振传输特性的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0208002.
Yu T, Zhan J T, Ma L L, et al. Effect of ellipsoidal particle concentration on laser polarization transmission characteristics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0208002.
- [14] 宋俊宏, 肖作江, 李英超, 等. 油雾粒子浓度变化对散射穆勒矩阵的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2301001.
Song J H, Xiao Z J, Li Y C, et al. Influence of concentration variation of oil mist particles on scattering Mueller matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2301001.
- [15] Min Q L, Duan M Z. A successive order of scattering model for solving vector radiative transfer in the atmosphere[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 87(3/4): 243-259.
- [16] Lenoble J, Herman M, Deuzé J L, et al. A successive order of scattering code for solving the vector equation of transfer in the earth's atmosphere with aerosols[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2007, 107(3): 479-507.
- [17] Sun X J, Zhou Y B, Zhang R W, et al. Influences of extinction coefficient profile on the estimation of Slant Visual Range[J]. Atmospheric Environment, 2015, 122: 484-492.
- [18] 程天海, 顾行发, 余涛, 等. 地表双向反射对天基矢量辐射探测的影响分析[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7368-7375.
Cheng T H, Gu X F, Yu T, et al. Effect of surface reflectances on the space-based vector radiative detection[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 7368-7375.
- [19] 马愈昭, 高晨, 程飞帆, 等. 考虑地表反射类型的气溶胶散射偏振特性[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0201001.
Ma Y Z, Gao C, Cheng F F, et al. Aerosols scattering polarization characteristics based on different surface reflection type[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0201001.
- [20] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D18): 20455.
- [21] Nadal F. Analyse de la polarisation pour la télédétection de l'atmosphère et des surface grâce aux mesures spatiales polder[M]. France: Université Paris VII, 1999.
- [22] 贾军. 低能见度大气雾霾粒子中的偏振光传输特性[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
Jia J. Polarized light transmission characteristics in low visibility haze particles[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [23] 高星星, 陈艳, 张镭, 等. 华北地区气溶胶的季节垂直分布特征及其光学特性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 395-403.
Gao X X, Chen Y, Zhang L, et al. Vertical distribution of seasonal aerosols and their optical properties over Northern China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(3): 395-403.
- [24] Li Z Q. Aerosol robotic network[EB/OL]. [2022-08-06]. <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>.
- [25] 顾行发, 程天海, 李正强. 大气气溶胶偏振遥感[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
Gu X F, Cheng T H, Li Z Q. Atmospheric aerosol polarized remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [26] Cao N W, Yang S P, Cao S J, et al. Accuracy calculation for lidar ratio and aerosol size distribution by dual-wavelength lidar[J]. Applied Physics A, 2019, 125(9): 590.