

引用格式: MA Yu-zhao, GAO Chen, CHENG Fei-fan, *et al.* Aerosols Scattering Polarization Characteristics Based on Different Surface Reflection Type[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(2): 0201001

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

考虑地表反射类型的气溶胶散射偏振特性

马愈昭^{1,2},高晨²,程飞帆²,李猛³,熊兴隆^{1,2}

(1 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)

(3 中国民航大学 民航空管研究院,天津 300300)

摘 要:采用逐次阶散射法求解矢量辐射传输方程来研究气溶胶在不同地表反射模型下的散射偏振特性.首先,选取单一地表反射模型和耦合地表反射模型两种地表反射模型.然后,根据地表反射模型计算得到相应的地表反射率,进而采用逐次阶散射法对矢量辐射传输方程进行求解,得到散射光的 Stokes 矢量.最后,由 Stokes 矢量计算得出散射光的偏振度.仿真结果表明,两种地表反射模型下气溶胶单次散射的散射辐射强度和线偏振度均相等;耦合地表反射模型的总散射辐射强度和线偏振度总是大于单一地表反射模型;单一地表反射模型的气溶胶单次散射相对总散射的贡献总是大于耦合地表反射模型.研究结果对气溶胶光学特性的反演具有一定意义.

关键词:气溶胶;偏振;逐次阶散射法;地表反射;多次散射

中图分类号:TN929.12

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204902.0201001

Aerosols Scattering Polarization Characteristics Based on Different Surface Reflection Type

MA Yu-zhao^{1,2}, GAO Chen², CHENG Fei-fan², LI Meng³, XIONG Xing-long^{1,2}

(1 *Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*)

(2 *College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*)

(3 *Institute of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*)

Abstract: By solving the vector radiation transmission equation with the successive order of scattering method, the polarization characteristics of the light scattered by the atmosphere aerosols under different earth surface reflection models are studied. Two surface reflection models, single surface reflection and coupled surface reflection, are used in the numerical simulations. The reflectivity of earth surface is obtained according the corresponding model. The Stokes vector of the scattered light is derived by solving the vector radiation transmission equation with successive order of scattering method. Furthermore, the polarization degree of the scattered light is calculated. The simulation results show that the scattering radiation intensities of the first scattering order are equal for the two earth surface models. It is the same case for polarization degree of the first scattering order light. On the other hand, the total scattering radiation intensity of the coupled surface reflection model is larger than that of the single surface reflection model; The contribution of the first scattering light of the coupled model is smaller than that of

基金项目:国家自然科学基金(No.U1833111),中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(No.3122018D001)

第一作者:马愈昭(1978-),女,副教授,博士,主要研究方向为大气光学和光通信. Email:yzma@cauc.edu.cn

收稿日期:2019-10-30;录用日期:2019-12-04

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

the single reflection model. The results are of significance to the inversion of aerosol optical properties.

Key words: Aerosol; Polarization; Successive order of scattering; Surface reflection; Multiple scattering

OCIS Codes: 010.0280; 010.1310; 290.1310; 290.5855; 080.1120

0 引言

光在传输过程中经气溶胶粒子散射和地表反射后,偏振态可能会发生改变.气溶胶的散射偏振特性对大气光学特性的反演具有重要的影响.因此,在研究散射光光学特性时,必须考虑光的偏振,否则,实验结果与真实结果间会存在误差.文献[1]指出在利用标量辐射传输方程计算晴天的散射辐射强度时有5%~10%的误差.文献[2]指出忽略偏振会影响反照率和相位函数,从而间接影响气体混合比和粒子形状,误差值大于10%.实践表明地表反射模型对气溶胶散射偏振特性有一定的影响.文献[3-4]虽然考虑了不同天气条件下气溶胶粒子的各阶散射辐射强度以及偏振度,但没有研究地表反射模型对其的影响.文献[5-6]分析了地表双向反射分布函数对大气的影,但没有考虑少许的地表偏振分量对其的影响.综合考虑以上因素,在利用辐射传输方程研究气溶胶散射偏振特性时,需考虑地表反射模型.

分析求解矢量辐射传输方程的方法主要有离散坐标法、倍加累加法、Monte Carlo法、逐次阶散射法^[7-14].逐次阶散射法相比其它几种方法具有明显的优势,它能够跟踪光子的散射过程,且能把吸收过程整合到光子路径上,相对容易分析散射和吸收现象的作用和特征.从沿光路全过程积分的角度看,这种直接的处理方式已经将介质的均匀结构融合在计算之中.对于光学厚度较小的气溶胶粒子而言,只需经过几次迭代就可以获取足够精度的散射辐射强度.

综上,针对地表反射率对气溶胶散射偏振特性的影响,考虑地表反射模型对气溶胶散射偏振特性的影响,本文采用逐次阶散射法对矢量辐射传输方程进行数值求解.通过模拟太阳辐射经气溶胶散射、地表反射到达接收器的物理过程,重点分析了两种不同地表反射模型对气溶胶的散射辐射强度以及偏振度的影响,给出单一和耦合两种不同的地表反射模型,得出气溶胶散射辐射强度、偏振度与地表反射模型之间的关系.

1 辐射传输方程以及求解

矢量辐射传输方程由标量辐射传输方程演化而来,考虑了散射辐射的偏振影响,适用于研究大气遥感遥测.

1.1 矢量辐射传输方程

矢量辐射传输方程^[15-18]的一般形式可以表示为

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

式中, τ 为大气光学厚度; μ 为观测天顶角的余弦; φ 为观测方位角; \mathbf{S} 为源函数,其表达式为

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

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, $\mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi, \mu', \varphi')$ 是散射矩阵; \mathbf{L} 为Stokes矢量, $\mathbf{L} = [I, Q, U, V]^T$.Stokes矢量在实际中方便测量,可以完全描述偏振光状态,并且由于四个Stokes矢量的量纲相同(均为散射辐射强度),方便辐射方程拓展到偏振形式,是描述偏振光的最佳手段. I 为光的总散射辐射强度; Q 和 U 为线偏振光的两个分量; V 为圆偏振散射辐射强度.在大气辐射传输中,圆偏振分量很小,为此被忽略,因此只需考虑 $[I \ Q \ U]^T$ 量,相应的Muller矩阵和Stokes旋转矩阵降为3维.

1.2 逐次阶散射法

逐次阶散射法是对一次、二次、三次散射等的光子分别计算其强度,各次散射强度之和为总强度,即

$$\mathbf{L}(\tau, \mu, \varphi) = \sum_{n=1}^N \mathbf{L}_n(\tau, \mu, \varphi) \quad (3)$$

式中, n 表示散射次数.

到达地球大气层的太阳辐射被空气分子、各种固体和液体粒子散射,也被几个特定波长的气体分子吸收,散射辐射部分达到地表,部分反射到大气层中.矢量辐射坐标中规定反射到大气层中的方向为向上($\mu > 0$),到达地表的方向为向下($\mu < 0$).因此,向上和向下的散射辐射强度的表达式分别为

$$L_n(\tau, \mu > 0, \varphi) = L_n^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) e^{-(\tau^* - \tau)/\mu} + \int_{\tau}^{\tau^*} e^{-(\tau' - \tau)/\mu} S_n(\tau', \mu, \varphi) d\tau' / \mu \quad (4)$$

$$L_n(\tau, \mu < 0, \varphi) = - \int_0^{\tau} e^{-(\tau' - \tau)/\mu} S_n(\tau', \mu, \varphi) d\tau' / \mu \quad (5)$$

式中,源函数 S 分别表示为单次散射 $S_1(\tau, \mu, \varphi)$ 和多次散射 $S_{n>1}(\tau, \mu, \varphi)$, 即

$$S_1(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} M(\tau, \mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0) E_0 \exp\left(\frac{\tau}{\mu_0}\right) \quad (6)$$

$$S_{n>1}(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} M(\tau, \mu, \varphi, \mu', \varphi') L_{n-1}(\tau, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' \quad (7)$$

$$L_1^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) = (-\mu_0) R(\mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0) E_0 e^{\tau^*/\mu_0} / \pi \quad (8)$$

$$L_{n>1}^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_{-1}^0 (-\mu') R(\mu, \varphi, \mu', \varphi') L_{n-1}(\tau^*, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' / \pi \quad (9)$$

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; $R(\mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0)$ 为下垫面的反射率,可以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(Single Scattering Albedo, SSA)、折射率(refractive index)和地表反射模型中的经验系数.本文选用单一地表反射模型和耦合地表反射模型对气溶胶的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.

2 地表反射模型

散射辐射强度计算需要考虑地表反射率(式(9)).影响地表反射率的参数有:单次散射反照率、折射率和地表反射模型中的经验系数.选用单一地表反射模型和耦合地表反射模型^[19]对气溶胶的散射偏振特性进行研究.单一地表反射模型选用非偏双向反射分布函数(Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF),即 Roujean 模型^[20];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(Bidirectional Polarization Distribution Function, BPDF)组成,BPDF 采用 Nadal 模型^[21].

表 1^[22-23]给出了两种地表反射模型的参数值.其中, 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 和 β 是 Nadal 地表反射模型中的经验系数.

表 1 两种地表反射模型的参数
Table 1 Parameters for two types of surface reflections

Parameter	BRDF	BRDF+BPDF
SSA	0.02	0.02
Refractive index	1.34	1.34
K_0	0.349	0.349
K_1	0.044	0.044
K_2	0.377	0.377
α	无	0.0229
β	无	38.0

3 气溶胶粒子散射偏振特性

气溶胶散射偏振特性实质是对散射辐射强度和偏振度的研究,而偏振度根据 Stokes 矢量中的四个元素计算得出,因此散射辐射强度的求解极为关键.影响散射辐射强度的参数主要是气溶胶粒子谱分布的特征参数和地表反射率.

3.1 气溶胶类型

实际大气中气溶胶粒子是不同粒径大小的混合体,可以分为粗粒子和细粒子.气溶胶模式种类多样,能有效反映实际大气中气溶胶体积大小分布的是双峰对数正态分布^[24-25],可以表示为

$$\frac{dV}{d\ln r} = \frac{C_{\text{fine}}}{\sqrt{2\pi} \cdot S_{\text{fine}}} \exp \left[-\frac{(\ln R - \ln R_{\text{fine}})^2}{2(S_{\text{fine}})^2} \right] + \frac{C_{\text{coarse}}}{\sqrt{2\pi} \cdot S_{\text{coarse}}} \exp \left[-\frac{(\ln R - \ln R_{\text{coarse}})^2}{2(S_{\text{coarse}})^2} \right] \quad (10)$$

式中, C 表示体积浓度;两个特征参数 R 和 S 分别为模态半径和标准差; R_{fine} 和 R_{coarse} 分别表示细粒子和粗粒子的模态半径.选用490 nm蓝光波段对实验结果进行仿真,原因是该波段大气散射较强,地表反射较弱,仅有可见光波段的1/2~1/4,可通过对蓝光波段地表反射率的模拟实现对气溶胶光学厚度的反演.同时,该波段的分子散射和吸收都低于其它波段,气溶胶垂直廓线的影响对该波段气溶胶光学厚度反演的影响较小.表2给出了粗粒子和细粒子的气溶胶粒子谱分布的特征参数^[26],其中, m_r 和 m_i 分别为复折射率实部和虚部, ω 为单次散射反照率, g 为非对称因子.

表2 各组分气溶胶粒子谱分布的特征参数

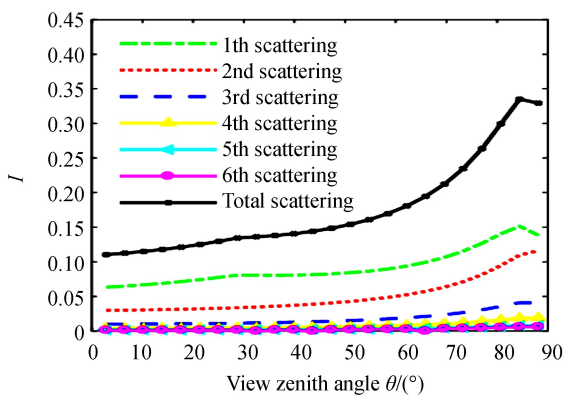
Table 2 Characteristic parameters of aerosol particle spectral distribution of each component

Parameter	Coarse mode	Fine mode
C	0.192	0.269
R	2.580	0.257
S	0.568	0.535
m_r	1.478	1.478
m_i	0.0099	0.0099
ω	0.927	0.927
g	0.729	0.729

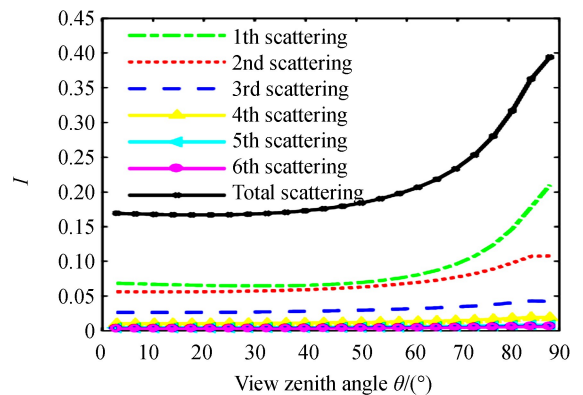
3.2 散射辐射强度

Stokes 矢量在实际中可以方便测量,完全描述偏振光的状态,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,是描述偏振光的最佳手段.

图1和2分别给出了气溶胶在单一地表反射模型和耦合地表反射模型下 I 、 Q 、 U 各阶以及总的散射辐射强度,并将其分解为向上和向下两个方向.比较图1和2中相同方向的参量,耦合地表反射模型的散射阶数等于7时才能收敛,而单一地表反射模型的散射阶数只需要6阶即可,即单一地表反射模型收敛得更快一些.就总的散射辐射强度而言,耦合的地表反射模型得到的散射辐射强度大于单一地表反射模型的散射辐射强度,因为耦合地表反射模型中包含了少量的地表偏振分量.而这两种地表反射模型中一阶散射辐射强度基本相等,主要的不同体现在更高阶的散射辐射强度上.比较图1、2中相同方向的参量,单一地表反射模型和耦合地表反射模型的三个Stokes参量的散射辐射强度,整体表现出向上的散射辐射强度要大于向下的散射辐射强度.



(a) I varying with the zenith angle of the sun at downward



(b) I varying with the zenith angle of the sun at upward

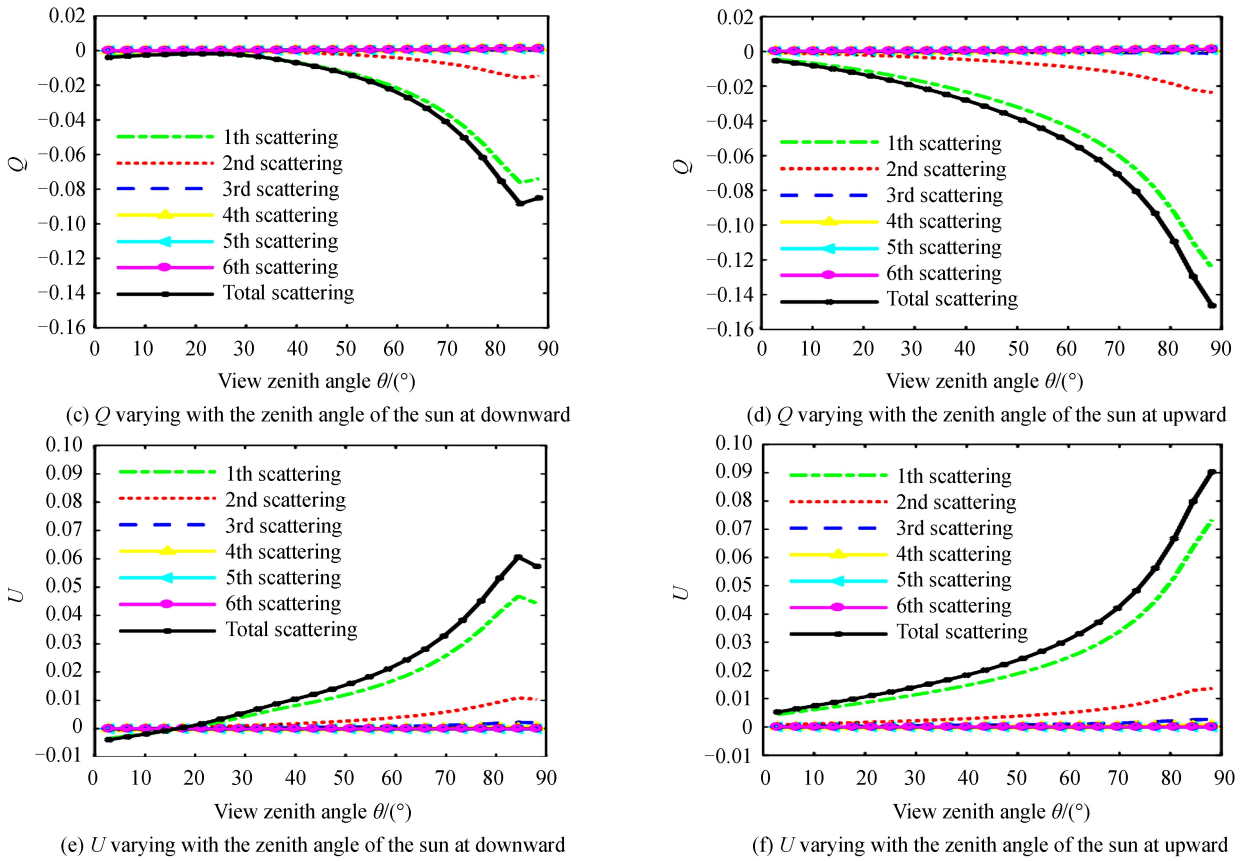
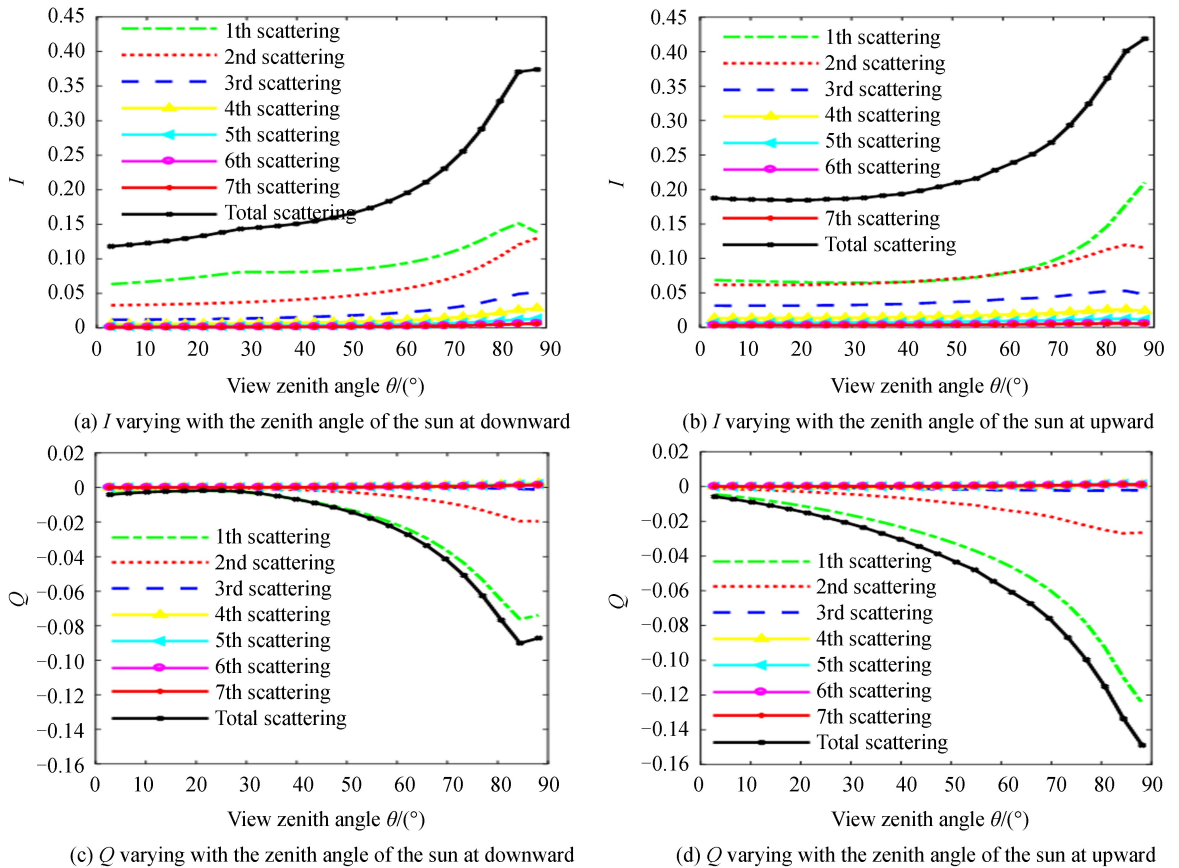


图 1 气溶胶在单一地表反射模型下的散射辐射强度

Fig.1 Scattering radiation intensity of aerosol under a single surface reflection model



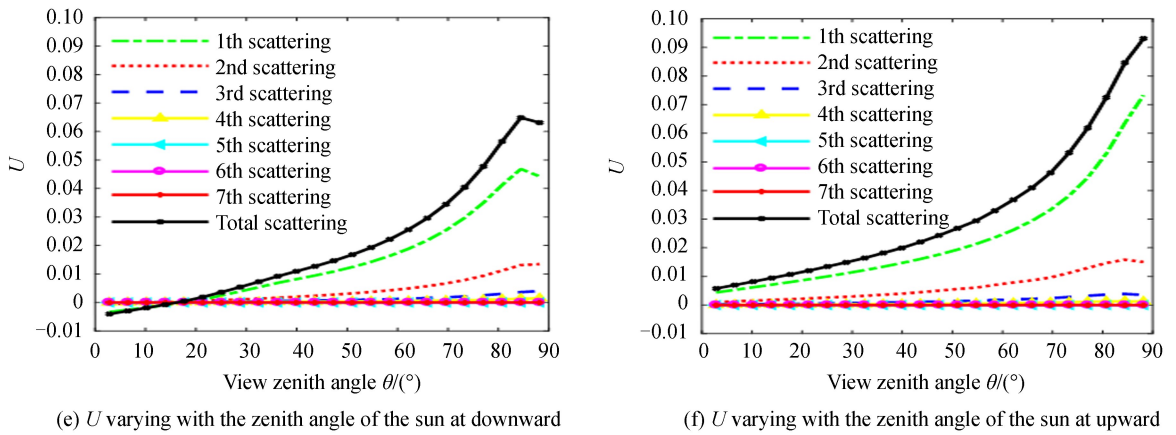


图2 气溶胶在耦合地表反射模型下的散射辐射强度

Fig.2 Scattering radiation intensity of aerosol under coupled surface reflection model

表3给出了两种地表反射模型下,一阶散射辐射强度相对总散射辐射强度的比值.在地表反射模型相同的条件下, I 和 Q 向下的占比大于向上的,相比之下, U 在向上和向下两个方向的散射辐射强度值相差不大.当地表反射模型不同而辐射方向相同时, I 、 Q 和 U 在单一地表反射模型的1阶贡献要比耦合的地表反射模型的大.

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

Scattering radition	Intensity	Single surface	Couple surface
Down	I	54.3%	50.5%
	Q	93.9%	93.5%
	U	76.4%	72.7%
Up	I	40.7%	36.2%
	Q	83.4%	77.3%
	U	80.4%	73.8%

3.3 偏振度

在使用逐次阶散射法计算得到 I 、 Q 、 U 三个参量后,可以利用其计算得到偏振度.偏振度描述了电磁波的重要特征,可以去求解电磁波中偏振分量的含量,即偏振度^[26-27]为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (0 \leq P \leq 1) \quad (11)$$

式中,线偏振光的偏振度为 $P=1$,完全非偏振光的偏振度为 $P=0$,部分偏振光的偏振度为 $0 < P < 1$.

图3、4分别给出了气溶胶在单一地表反射模型和耦合的地表反射模型下总散射与各阶散射随太阳天顶角变化的线偏振度,得出:两种不同的地表反射模型,两个不同的辐射方向,总的线偏振度都比一阶散射的线偏振度小.两种地表反射模型下,一阶散射的线偏振度基本相等;随着太阳天顶角的增大,向下的线偏振度总是先减小后增大,而向上的线偏振度总是先增大后减小;耦合地表反射模型下总散射的线偏振度要大于单一地表反射模型下的线偏振度,由此可以推出两种地表反射模型下线偏振度的不同主要体现在多次散射上,并且可以得出地表反射率是低偏振或无偏的,对大气层顶的偏振辐射贡献小,大气层顶的偏振信号主要来自于大气中分子和气溶胶的散射.气溶胶在耦合地表反射模型下,7阶散射的线偏振度大于2~6阶散射的线偏振度.

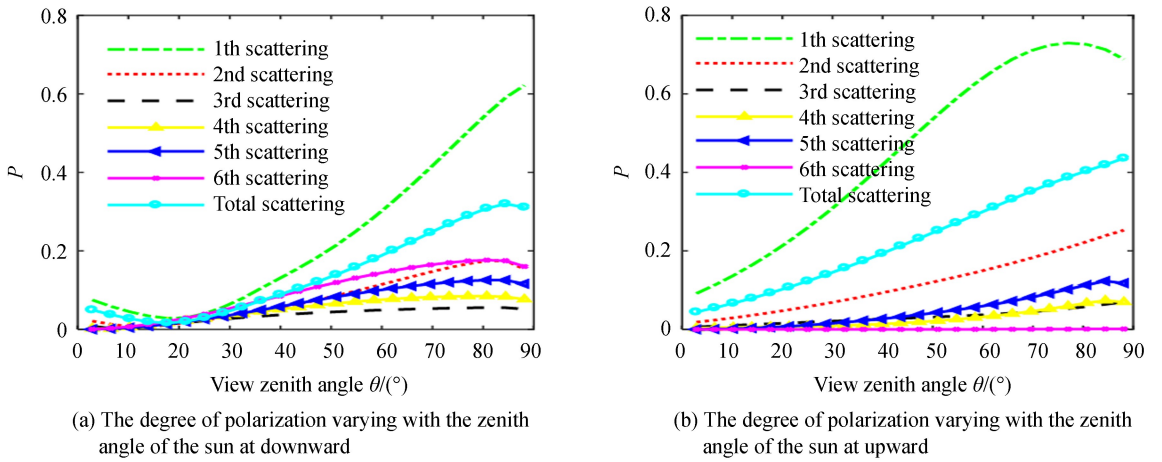


图3 单一地表反射模型下各阶散射的线偏振度

Fig.3 Linear polarization degree of each order scattering under a single surface reflection model

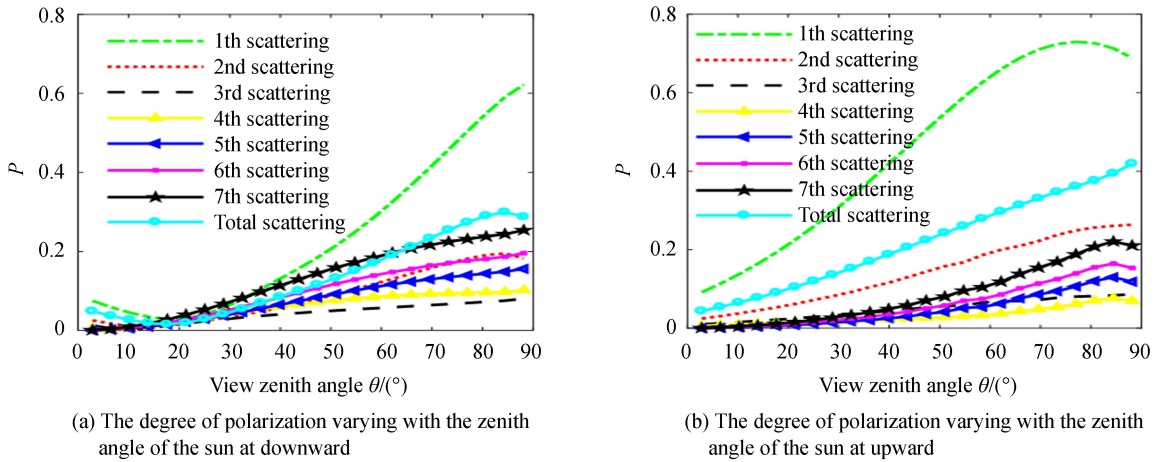


图4 耦合地表反射模型下各阶散射的线偏振度

Fig.4 Linear polarization degree of each order scattering under coupled surface reflection model

4 结论

本文采用逐次阶散射法研究气溶胶在不同地表反射模型下的散射辐射强度、偏振度与散射阶数的关系。仿真模拟结果表明:

1)两种地表反射模型下,1阶散射的散射辐射强度和线偏振度都相等;相对于高阶散射,1阶散射的散射辐射强度更趋向于总散射辐射强度, I 和 Q 两个分量的1阶散射辐射强度的贡献总是向上的大于向下的,而 U 分量向上和向下相差不大,并且气溶胶在耦合地表反射模型下1阶散射辐射强度的贡献大于单一地表反射模型的1阶散射辐射强度。

2)就总的散射辐射强度而言,耦合地表反射模型下的散射辐射强度要大于单一地表反射模型下的散射辐射强度,这是因为耦合地表反射模型中有少部分来自于地表的偏振分量。

3)不同地表反射模型,不同辐射方向,总散射的线偏振度总是小于1阶散射的线偏振度,而在耦合地表反射模型下,7阶散射的线偏振度大于2~6阶线偏振度。

除此之外,利用该方法可以更进一步研究不同微物理特性下气溶胶各阶散射量与偏振量的关系,可以得到更为精确的遥感遥测数据。

参考文献

[1] LACIS A A, MISHCHENKO C J, CAIRNS M I. Modeling errors in diffuse-sky radiation: vector vs. scalar treatment[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(2): 135-138.
 [2] STAM D M, HOVENIER J W. Errors in calculated planetary phase functions and albedos due to neglecting polarization

- [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2005, **444**(1): 275-286.
- [3] HOU Wei-zhen, SUN Bin, LI Zheng-qiang, *et al.* Study the polarization and depolarization properties of atmospheric aerosol multiple scattering based on the successive order of scattering[C]. AOPC 2015: Telescope and Space Optical Instrumentation, Beijing, 2015.
- [4] ZHAO Tai-fei, WANG Chan, KE Xi-zheng. The study of UV scattering polarization properties of spherical particles of haze[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, **37**(3): 665-671.
赵太飞,王婵,柯熙政.球形雾霾粒子的紫外光散射偏振特性研究[J].光谱学与光谱分析,2017,**37**(3):665-671.
- [5] CHEN Chuan, YI Wei-ning, CUI Wen-yu, *et al.* Influence and correction of BRDF retrieval of surface by atmospheric scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **30**(7): 346-352.
陈川,易维宁,崔文煜,等.大气散射对地表双向反射分布函数反演的影响与修正[J].光学学报,2018,**30**(7):346-352.
- [6] SUN Zhong-qiu, ZHAO Yun-sheng, LU Shan, *et al.* Function of polarization on the bidirectional reflectance factor of vegetation samples[J]. *Jouanal of Remote Sensing*, 2018, **22**(6): 947-956.
孙仲秋,赵云升,卢珊,等.偏振反射信息在植被遥感双向反射研究中的作用[J].遥感学报,2018,**22**(6): 947-956.
- [7] LASZLO I, STAMNES K, WISCOMBE W J, *et al.* The discrete ordinate algorithm, disort for radiative transfer[J]. *Light Scattering Reviews*, 2016, **11**: 3-65.
- [8] KAMDEM H T T, YMELI G L, TAPIMO R. The discrete ordinates characteristics solution to the one-dimensional radiative transfer equation[J]. *Jouanal of Computational and Theoretical Transport*, 2017, **46**: 346-365.
- [9] BAI Wen-guang, ZHANG Peng, ZHANG Wen-jian, *et al.* A model for accurately calculating hyper-spectral, middle-shortwave infrared radiative transfer for remote sensing[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2018, **61**(3): 317-326.
- [10] DIDIER R, FRANCOIS S, DOMINIQUE J. Model polarized radiative transfer in the ocean-atmosphere system with the GPU-accelerated SMART-G Monte Carlo code[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, **222**: 89-107.
- [11] FAUCHEZ T, DAVIS A B. A fast hybrid (3-D/1-D) model for thermal radiative transfer in cirrus via successive orders of scattering[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(1): 344-366.
- [12] DUAN Min-zheng, MIN Qi-long, LÜ Da-ren. A polarized radiative transfer model based on successive order of scattering[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, **27**(4): 891-900.
- [13] MIN Qi-long, DUAN Min-zheng. A successive order of scattering model for vector radiative transfer in the atmosphere [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiztive Transfer*, 2004, **87**: 243-259.
- [14] ZHAI Peng-wang, HU Yong-xiang. A vector radiative transfer model for coupled atmosphere and ocean systems based on successive order of scattering method[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(4): 2057-2079.
- [15] DUAN Min-zheng. Simultaneously retrieval of atmospheric aerosol optical thickness and surface albedo over land by using polarized radiance as well as scalar radiance from POLDER measurement[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of sciences, 2001.
段民征.陆地上空大气气溶胶和地表反照率的同时反演——卫星标量辐射和偏振信息的联合利用[D].北京:中国科学院大气物理研究所,2001.
- [16] ZHANG Min, CHENG Juan, QIU Jian-xian. High order positivity-preserving discontinuous Galerkin schemes for radiative transfer equations on triangular meshes[J]. *Journal of Computational Physics*, 2019, **397**: 10811.
- [17] DAN Ling, CHENG Juan, SHU Chi-wang. Conservative high order positivity-preserving discontinuous galerkin methods for linear hyperbolic and radiative transfer equations[J]. *Journal of Scientific Computing*, 2018, **77**(3): 1801-1831.
- [18] 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 & Radiative Transfer*, 2007, **107**: 479-507.
- [19] CHENG Tian-hai, GU Xing-fa, YU Tao, *et al.* Effect of surface reflectances on the space-based vector radiative detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(10): 7368-7375.
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.
- [20] CHEN Chuan. Key techniques studying on high-resolution remote sensing imaging simulation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
陈川.高分辨率遥感城乡仿真关键技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- [21] XIANG Kun-shen, CHENG Tian-hai, GU Xing-fa, *et al.* Polarized properties of typical surface types over China based on the multi-angular polarized remote sensing measurements[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(22): 384-393.
相坤生,程天海,顾行发,等.基于多角度偏振载荷数据的中国典型地物偏振特性研究[J].物理学报,2015,**64**(22):384-393.
- [22] ROUJEAN J L, LEROY M, DESCHAMPS P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth surface for the correction of remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(20): 455-468.
- [23] 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.
- [24] GU Xing-fa, CHENG Tian-hai, LI Zheng-qiang, *et al.* Atmospheric aerosol polarized remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
顾行发,程天海,李正强,等.大气气溶胶偏振遥感[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [25] CAO Nian-wen, YANG Si-peng, CAO Shu-jie, *et al.* Accuracy calculation for lidar ratio and aerosol size distribution by dual-wavelength lidar[J]. *Applied Physics A*, 2019, **125**(9): 1-10.
- [26] LEE K H, KIM Y J. Satellite remote sensing of Asian aerosols: a case study of clean, polluted, and Asian dust storm days[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, **3**: 1771-1784.
- [27] WANG Xi. Analysis of polarization characteristics of light scattering by T-matrix method for typical smog particle model [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
王希.典型雾霾粒子模型的 T 矩阵法光散射偏振特性分析[D].西安:西安理工大学,2019.