第36卷，第9期
2016年9月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 36, No. 9, pp2736-2741
September, 2016

海洋气溶胶多光谱偏振特性研究

杨 斌[1,2]，颜昌翔[1*]

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033
2. 中国科学院大学，北京 100049

摘 要 为提高海洋气溶胶的反演精度，定量研究了气溶胶在可见近红外波段的多光谱偏振辐射特性。首先建立了合理的海洋气溶胶及海面模型，基于逐次散射法准确模拟了光在气溶胶中及大气—海洋交界面处的矢量辐射传输过程，接着从光谱角度定量分析了典型波段处的反射率和偏振反射率，在此基础上提出了海洋气溶胶偏振辐射的光谱分布模型，并用卫星数据对模型进行验证，最后研究了气溶胶光学厚度、观测角度、海水叶绿素a浓度和海面风速对气溶胶多光谱偏振辐射的影响。研究表明，在可见近红外波段不考虑大气吸收和耀斑效应时，气溶胶偏振辐射的光谱变化符合幂函数模型；在不同波段处，海洋气溶胶的偏振辐射受海水叶绿素a浓度和海面风速的影响不同；海洋气溶胶的多光谱偏振辐射信息有效体现了气溶胶的自身特性，且与反射率相比，偏振反射率随各因素的变化存在更明显的谱段差异性。因此，可以运用气溶胶的多光谱偏振信息反演海洋气溶胶参数，多光谱探测的加入对提高气溶胶反演精度具有重要意义。

关键词 海洋气溶胶；多光谱；矢量辐射传输方程；偏振

中图分类号：P236 **文献标识码**：A **DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2016)09-2736-06

引 言

气溶胶是指悬浮于大气中直径为 $10^{-3}\sim10$ μm 的微粒，是大气重要组成部分[1]。气溶胶通过散射、吸收地球长波与太阳短波辐射对气候产生直接影响，又与云相互作用间接影响气候[2-4]。气溶胶与光、其他物质之间的相互作用，取决于其自身性质，而气溶胶的自身特性均包含于其辐射的光谱、偏振信息中，因此对气溶胶光谱、偏振特性的研究逐渐成为重要课题[5]。

目前多角度偏振探测可以获取气溶胶辐射的矢量信息，这对提高气溶胶遥感能力具有重要意义[6-8]。同时，气溶胶辐射的光谱变化也与气溶胶粒径、复折射率等参量紧密相关，在偏振遥感的基础上加入多光谱探测，能更准确的反演气溶胶参数。为充分利用获取的多光谱偏振信息，首先应明确气溶胶在不同谱段的偏振辐射特性及其影响因素，但关于气溶胶多光谱偏振特性的研究未见报道。

本文主要从光谱角度，研究了海洋气溶胶的偏振辐射特性。通过求解矢量辐射传输方程，定量分析了含气溶胶层的总反射率和偏振反射率，并给出了气溶胶偏振辐射的光谱分布模型；同时重点分析了气溶胶在各谱段偏振辐射对主要因素的敏感性，为运用多光谱偏振信息反演气溶胶参数提供了一定的理论基础。

1 气溶胶模型及海面模型

1.1 气溶胶模型

建立合理的气溶胶模型是分析海洋气溶胶偏振辐射特性的关键。本文运用双对数正态谱描述海洋气溶胶的双峰分布[9]，其定义式为

$$n(r)=\sum_{i=1}^{2}\frac{c_i}{r\sigma_i\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(\ln r-\ln r_{m,i})^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (1)$$

式中 c_i 为数密度比例，$r_{m,i}$ 为粒子平均半径，σ_i 为模态分布标准差。分析海洋气溶胶的组成，确定各模态的参数及其数密度比例，建立气溶胶模型如表1所示。

图1为两种模态及其组成的海洋气溶胶的尺度谱分布。在海洋气溶胶中，细模态成分占主导地位，由图可知，当粒子半径小于50 nm时，海洋气溶胶的尺度谱与细模态粒子谱分布几乎一致，此时只需用单一细模态粒子描述其尺度谱分布。

收稿日期：2015-03-23，修订日期：2015-07-19
基金项目：国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA12A103)资助
作者简介：杨 斌，1990年生，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生 e-mail：yangbin8086@163.com
*通讯联系人 e-mail：yancx@ciomp.ac.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　海洋气溶胶模型参数

Table 1　Parameters of the aerosol models over ocean

Particle model	$r_m/\mu m$	σ	$c/\%$
Fine mode	0.005	1.1	99.47
Coarse mode	0.3	0.9	0.53

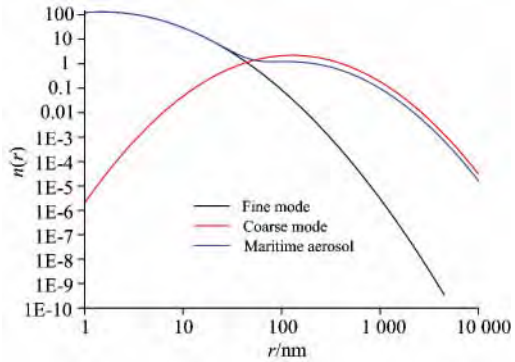


图 1　两种模态及海洋气溶胶的尺度谱

Fig. 1　Size distribution of two modes and maritime aerosol

1.2　海面模型

海洋气溶胶的偏振特性易受海面反射影响，海面建模是分析海洋气溶胶多光谱偏振特性的另一关键环节。本文结合 cox[10] 和 koepke[11] 等模型，充分考虑太阳耀斑、海洋白冠效应及水体反射，将海面反射率 ρ_{os} 用三部分组合表示

$$\rho_{os}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) = \{1-W\}\rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) + \rho_{wc}(\lambda) + \{1-\rho_{wc}(\lambda)\}\rho_{sw}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) \tag{2}$$

式中 θ_s 和 θ_v 分别为太阳天顶角和卫星天顶角，φ 为相对方位角，ρ_{gl} 为耀斑反射率，ρ_{wc} 为白冠反射率，ρ_{sw} 为海洋水体反射率[10-11]。其中，

$$\rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_s) = \frac{\pi P(Z'_x, Z'_y)R(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_s)}{4\cos(\theta_s)\cos(\theta_v)\cos^4(\beta)} \tag{3}$$

$$\rho_{sw}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) = \frac{1}{n^2}\frac{R_w(\lambda)t_d(\theta_s)t_u(\theta_v)}{1-aR_w(\lambda)} \tag{4}$$

$$\rho_{wc}(\lambda) = W \cdot \rho_{ef}(\lambda) \tag{5}$$

式(3)中 P 为海面面元的斜率分布，Z'_x 和 Z'_y 为斜率，$R(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_s)$ 为菲涅耳反射系数，n 为海水折射率，式(4)中 $R_w(\lambda)$ 为上行辐亮度与下行辐亮度的比值，t_d 和 t_u 分别为下行和上行辐亮度透过率，a 为系数，式(5)中 $\rho_{ef}(\lambda)$ 为泡沫有效反射率，W 为白冠的相对面积，其与风速有关。

2　多光谱偏振特性

2.1　矢量辐射传输方程

本文用矢量辐射传输方程描述电磁波在大气气溶胶中的传输[12]，其形式为

$$\mu\frac{dI(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = -I(\tau, \mu, \varphi) + \frac{w}{4\pi}\times\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{1}\boldsymbol{M}(\mu, \varphi, \mu', \varphi')\cdot I(\tau, \mu', \varphi')d\mu' d\varphi' + \frac{w}{4\pi}F_0\exp(-\tau/\mu_0)\times \boldsymbol{M}(\mu, \varphi, -\mu_0, \varphi_0)[1, 0, 0, 0]^T + (1-w)B(T)[1, 0, 0, 0]^T \tag{6}$$

其中 I 为斯托克斯矢量，μ 为极角余弦，φ 为方位角，τ 为光学厚度，w 为单次散射反照率，$\boldsymbol{M}$ 为散射相矩阵，即米勒矩阵，F_0 为大气顶太阳入射辐通量，μ_0 为太阳天顶角余弦，φ_0 为太阳方位角。

矢量辐射传输方程为高度非线性微积分方程，需进行数值求解。本文运用逐次散射法(SOS)进行矢量辐射传输计算，计算过程中用总反射率 R 和偏振反射率 R_p 表征偏振遥感中的总辐射和偏振辐射信号，其定义式为

$$R = \frac{\pi I}{\mu_0 F_0} \tag{7}$$

$$R_p = \frac{\pi\sqrt{Q^2+U^2}}{\mu_0 F_0} \tag{8}$$

2.2　海洋气溶胶的辐射特性

由式(6)可知，总反射率 R 和偏振反射率 R_p 是气溶胶散射特性的函数，可用于表征气溶胶的辐射特性。在研究大气窗口的基础上，选取分布在可见近红外波段的 14 个典型谱段进行模拟实验，模拟时剔除海面影响，气溶胶光学厚度取 0.1。

为验证矢量辐射传输模拟得出的反射率和偏振反射率，将模拟值和卫星观测值进行对比，所用卫星数据为 POLDER 490，670 和 865 nm 通道的 8 组偏振数据。图 2 为模拟得出的反射率、偏振反射率以及 POLDER 观测值随波长的变化。

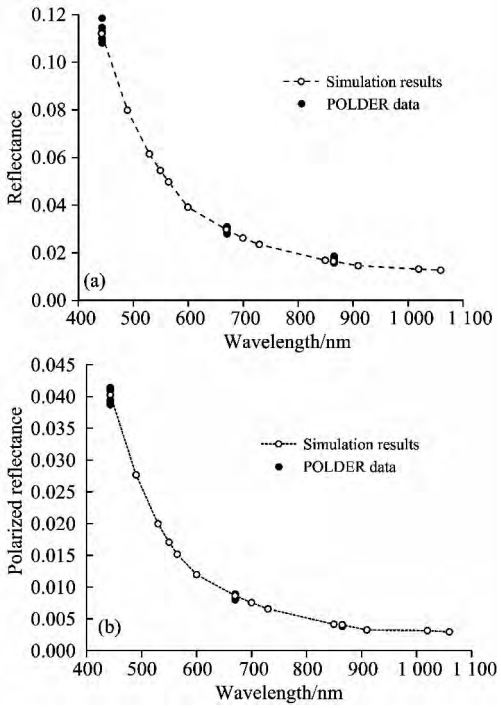


图 2　模拟值和 POLDER 观测值随波长的变化

(a)：反射率；(b)：偏振反射率

Fig. 2　The changes of simulation results and POLDER data with the wavelength

(a)：Reflectance；(b)：Polarized reflectance

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图 2 可知，在三个谱段 POLDER 观测值和模拟得出的反射率和偏振反射率的最大偏差均小于 5%，这一定程度上验证了本文基于 SOS 算法求解矢量辐射传输方程中所建模型的合理性。

在可见光波段，反射率和偏振反射率随波长增大迅速减小；在近红外波段，反射率和偏振反射率仍随波长增大而减小，但变化幅度越来越小。对反射率和偏振反射率的光谱变化进行拟合，得出最佳模型表达式分别为

$$R' = 4.765\,8 \times 10^{5} \lambda^{-2.537\,7} \tag{9}$$

$$R'_{p} = 4.362\,7 \times 10^{6} \lambda^{-3.066\,8} \tag{10}$$

式中 R' 和 R'_{p} 表示反射率和偏振反射率，λ 为波长。

由式(9)和式(10)可知，反射率和偏振反射率的光谱分布符合幂函数模型，且偏振反射率对波长更敏感。分析认为反射率和偏振反射率随波长的变化是瑞利散射和米散射共同作用的结果，由于瑞利散射强度与波长四次方成反比，在较短波段大气分子瑞利散射在总反射率和偏振反射率中占据的比重更大。因此在气溶胶遥感中，可适当选用中心波长较大的探测波段。

3 辐射矢量的敏感性分析

以 550，670，865 和 1 020 nm 为例，分析了海洋气溶胶多光谱偏振特性对气溶胶光学厚度、探测角度、海水叶绿素 a 浓度和海面风速的敏感性。

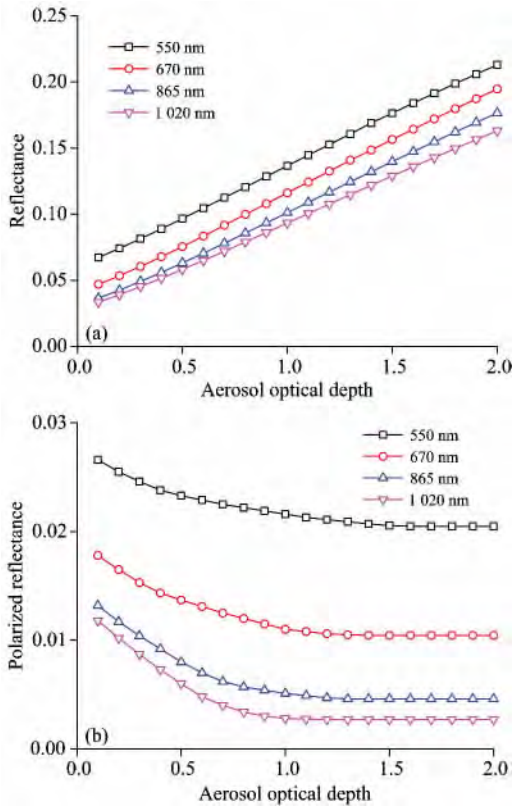


图 3 总反射率和偏振反射率随气溶胶光学厚度的变化

(a)：反射率；(b)：偏振反射率

Fig. 3 The change of total reflectance and polarized reflectance with the aerosol optical depth

(a)：Reflectance；(b)：Polarized reflectance

3.1 气溶胶光学厚度对偏振特性的影响

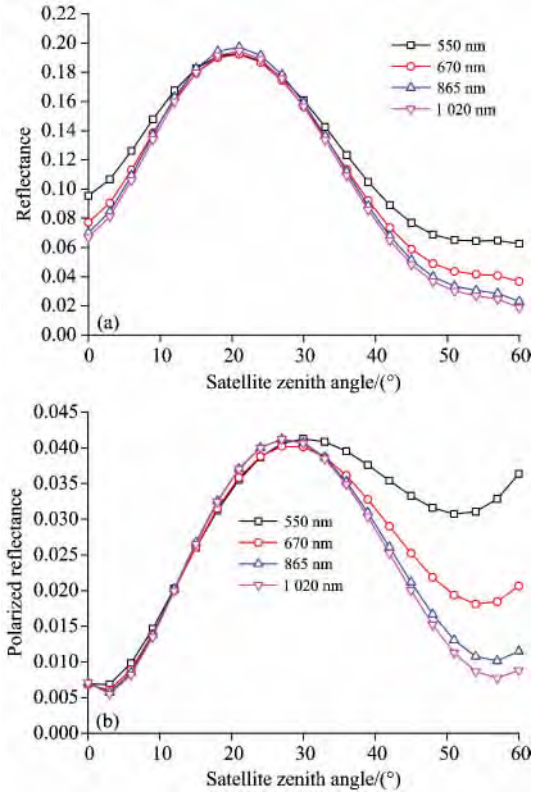
气溶胶光学厚度是表征气溶胶光学特性的重要参数。本文在气溶胶类型恒定的情况下，模拟分析了其光学厚度对偏振特性的影响，模拟时太阳天顶角为 20°，卫星天顶角为 45°，相对方位角为 150°，模拟实验结果如图 3 所示。

由图 3(a)可知，当气溶胶光学厚度增至 2.0 时，各波段反射率增幅均大于 0.13，即总反射率可以有效体现气溶胶厚度信息；各波段反射率变化曲线的斜率接近，表明气溶胶光学厚度对反射率的影响随波长的变化很小，即对于相邻谱段，不考虑大气吸收时可认为反射率随气溶胶厚度的变化相同。

由图 3(b)可知，气溶胶光学厚度对偏振反射率的影响存在明显的谱段差异性。当气溶胶厚度增至 1.3 时，各波段偏振反射率变化幅度约为 0.007，且退偏强度随波长增大而增大；当厚度继续增大时，偏振信息不能穿透气溶胶层，此时偏振反射率对气溶胶总厚度的变化不敏感。对 550 nm 波段，气溶胶光学厚度大于临界值 1.5 时，偏振反射率几乎不再变化，而 1 020 nm 的临界值仅为 1.0，表明各波段偏振信息在气溶胶中穿透能力不同，穿透能力随着波长的增大而减弱。

3.2 观测角度对偏振特性的影响

多角度观测是气溶胶多光谱偏振遥感的重要手段。本文模拟分析了不同观测角度下各波段的反射率和偏振反射率，模拟时太阳天顶角为 20°，太阳方位角为 180°，气溶胶光学厚度为 0.1，模拟实验结果如图 4 所示。



?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

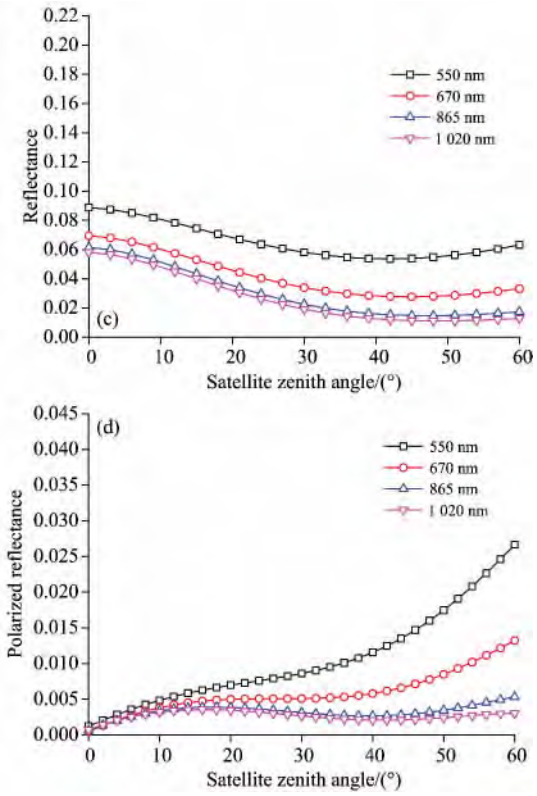


图 4　总反射率和偏振反射率随观测角度的变化

(a)，(b)：卫星方位角为 0°；(c)，(d)：卫星方位角为 90°

Fig. 4　The change of total reflectance and polarized reflectance with the view angle

(a)，(b)：The satellite azimuth angle is 0°；

(c)，(d)：The satellite azimuth angle is 90°

由图 4(a)和图 4(b)可知，由于太阳耀斑效应，各波段反射率增幅超过 0.1，偏振反射率增幅超过 0.03，且不同波段反射率以及偏振反射率差异很小。因此受太阳耀斑效应影响严重的区域，总反射率和偏振反射率主要为太阳耀斑贡献，不能反映气溶胶信息，在气溶胶遥感中应避开此区域。

由图 4(c)和图 4(d)可知，观测角度偏离镜面方向时，随卫星天顶角改变，各波段反射率变化幅度均超过 0.02，表明反射率存在明显的多角度效应；但各波段反射率随角度变化规律一致，而偏振反射率随角度的变化存在明显的谱段差异性，波长越小，偏振反射率随角度的变化越大。因此在气溶胶的多光谱、多角度偏振遥感中，应注重偏振反射率随观测角度变化的光谱差异。

3.3　叶绿素 a 浓度对偏振特性的影响

影响海洋水体反射光谱分布的主要因素为浮游植物，可用叶绿素 a 浓度表征。本文模拟分析叶绿素 a 的影响时太阳天顶角为 20°，卫星天顶角为 45°，相对方位角为 150°，气溶胶光学厚度为 0.1，模拟实验结果如图 5 所示。

由图 5(a)可知，当叶绿素 a 浓度增至 3.0 mg·m^{-3}时，550 和 670 nm 处反射率增幅均大于 2×10^{-3}，865 和 1 020 nm 处的反射率不随叶绿素 a 浓度变化。表明在可见光波段，叶绿色素 a 浓度引起的反射率变化不可忽略；但在近红外波段，反射率对叶绿素 a 浓度不敏感。

由图 5(b)可知，当叶绿素 a 浓度增至 3.0 mg·m^{-3}时，各波段偏振反射率的变化值均远小于 8×10^{-4}，此时可以忽略，即可见近红外波段的偏振反射率对叶绿素 a 浓度不敏感。因此运用大气顶的多光谱偏振反射率反演海洋气溶胶参数时，无需考虑海洋水体反射的影响。

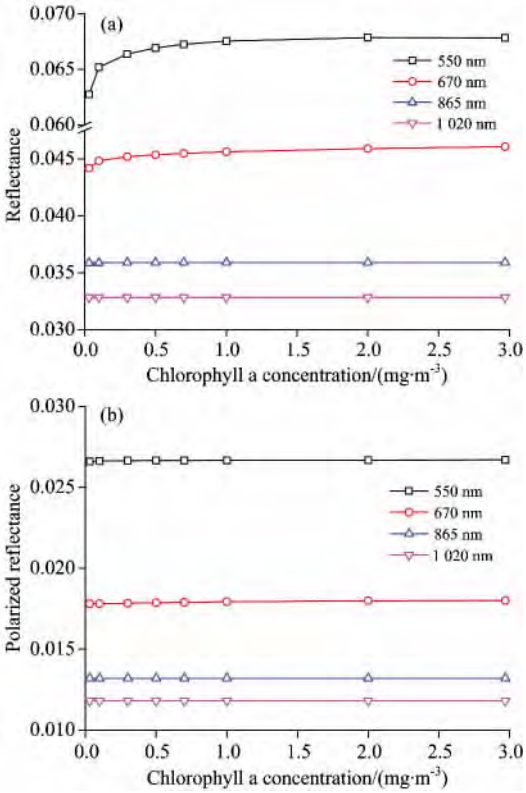


图 5　总反射率和偏振反射率随叶绿素 a 浓度的变化

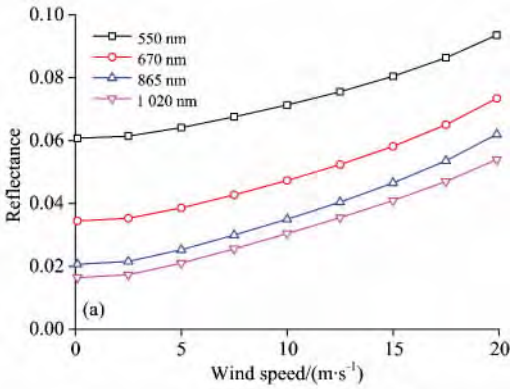
(a)：反射率；(b)：偏振反射率

Fig. 5　The changes of total reflectance and polarized reflectance with chlorophyll a concentration

(a)：Reflectance；(b)：Polarized reflectance

3.4　海面风速对偏振特性的影响

海面风速是气溶胶偏振遥感及反演中需重点考虑的因素。本文定量分析了不同风速下的反射率和偏振反射率，模拟时气溶胶光学厚度为 0.1，太阳天顶角为 20°，卫星天顶角为 45°，相对方位角为 90°，模拟实验结果如图 6 所示。



?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

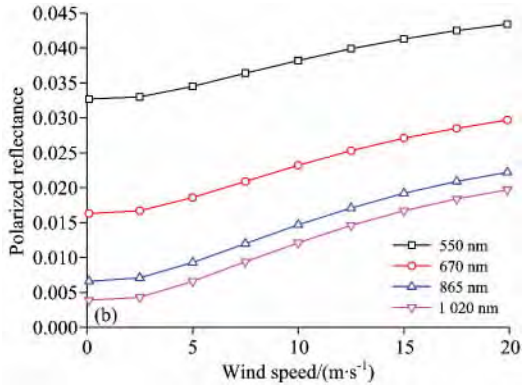


图 6 总反射率和偏振反射率随风速的变化

(a)：反射率；(b)：偏振反射率

Fig. 6 The changes of total reflectance and polarized reflectance with wind speed

(a)：Reflectance；(b)：Polarized reflectance

在偏离海面镜面方向的区域，各波段反射率和偏振反射率均随风速增大而增大，但增幅因波段而异。分析认为这是海洋白冠效应随风速变化的结果，其中各波段反射率增幅均超过 0.03，偏振反射率增幅均超过 0.01，所以在气溶胶偏振遥感中即使避开受太阳耀斑影响的区域，也需考虑风速对总反射率和偏振反射率的影响，且不能忽略海洋白冠反射随波长改变的问题。

4 结 论

通过求解矢量辐射传输方程，从光谱角度定量分析了海洋气溶胶的偏振辐射特性。研究表明：(1)在可见近红外波段，不考虑大气吸收时可认为偏振辐射的光谱分布符合幂函数模型；(2)气溶胶光学厚度引起各波段反射率的变化超过 0.13，避开太阳耀斑影响时观测角度引起的反射率变化为 0.02，海水叶绿素 a 浓度引起的变化为 0.002，风速引起的变化为 0.03，表明总反射率中主要包含气溶胶光学厚度的信息，可用反射率反演气溶胶厚度，但反演过程中需考虑观测角度、下垫面反射和风速的影响；(3)海洋气溶胶下垫面反射对偏振反射率的影响可以忽略；(4)不同波段的反射率随气溶胶厚度、观测角度的变化一致，但偏振反射率随各因素的变化存在明显的谱段差异性，这证明了在气溶胶偏振遥感中加入多光谱探测的必要性和优越性。因此，海洋气溶胶的多光谱偏振信息能有效体现气溶胶的自身特性，多光谱信息的加入有助于提高海洋气溶胶的反演精度。

References

[1] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(D24): 31333.
[2] Hansen J, Sato M, Rud R. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D6): 6831.
[3] Coakley J A, Cess D, Yurevich F B. Jourenal of the Atmospheric Sciences, 1983, 40: 116.
[4] Hansen J, Nazarenko L, Ruedy R, et al. Science, 2005, 308: 1431.
[5] King M D, Kaufman Y J, Tanre D, et al. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(11): 2229.
[6] Chowdhary J, Cairns B, Travis L D, et al. Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 59(3): 383.
[7] HU Ya-dong, HU Qiao-yun, SUN Bin, et al(胡亚东，胡巧云，孙 斌，等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2015, 23(3): 652.
[8] GUO Hong, GU Xing-fa, XIE Dong-hai, et al(郭 红，顾行发，谢东海，等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2014, 34(7): 1873.
[9] CHEN Liang-fu, LI Shen-shen, TAO Jin-hua, et al(陈良富，李莘莘，陶金花，等). The Reasearch and Application of Aerosol Quantitative Remote Sensing Inversion (气溶胶遥感定量反演研究与应用). Beijing: Science Press(北京：科学出版社), 2011. 9.
[10] Cox C, Munk W. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(11): 838.
[11] Koepke P. Applied Optics, 1984, 23(11): 1816.
[12] CHENG Tian-hai, GU Xing-fa, CHEN Liang-fu, et al(程天海，顾行发，陈良富，等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2008, 57(8): 5323.

Multi-Spectral Polarized Properties of Ocean Aerosol

YANG Bin[1,2], YAN Chang-xiang[1*]
1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to improve the retrieval accuracy of ocean aerosol , quantitative study was carried out in terms of the multi-spectral polarized properties of the aerosol in visible and near-infrared wavebands. Firstly, an aerosol model and a sea surface model were built. And the vector radiative transfer procedure of light in aerosol and atmosphere-ocean interface was simulated

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

accurately based on the successive order of scattering method. Then from the perspective of the spectrum, the reflectance and polarized reflectance at the top of atmosphere in typical wavebands were quantitatively analyzed. Based on this, the spectrum distribution model of ocean aerosol polarized radiation was presented. And the model was validated with satellite data. Lastly, the influences of aerosol optical depth, viewing angle, chlorophyll a concentration and wind speed on multi-spectral polarized radiation of ocean aerosol were studied. The study shows that the changes of aerosol multi-spectral polarized radiation with wavelength can be best described with power function model when ignoring the absorbtion of atmosphere and solar flare effect in visible and near-infrared wavebands. This phenomenon can be caused by Rayleigh scattering and Mie scattering. The influences of chlorophyll a concentration and wind speed on multi-spectral polarized radiation of ocean aerosol emerge as very different in different wavebands. Specifically, the influences of chlorophyll a concentration on reflectance and polarized reflectance both can be neglected in near-infrared waveband. But in visible waveband, the influence on the reflectance must not be neglected any longer. Due to the increasement of the wind speed, the reflectance and the polarized reflectance increased significantly. But there are differences in the increases in different wavebands. The multi-spectral polarized radiative information of ocean aerosol can embody its own charactersitics effectively. And furthermore, the change of polarized reflectance with each factor has more obvious differences in different wavebands compared with reflectance. As a result, the multi-spectral polarized information of ocean aerosol can be used to retrieve the parameters of the aerosol over the ocean. The achievement of multi-spectral information has great significance for improving the retrieval accuracy of the ocean aerosol.

Keywords Ocean aerosol; Multi-spectral; Vector radiative transfer equation; Polarization

(Received Mar. 23, 2015; accepted Jul. 19, 2015)

* Corresponding author

《光谱学与光谱分析》期刊社决定采用 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统

《光谱学与光谱分析》期刊社与汤森路透集团签约，自 2010 年 12 月 1 日起《光谱学与光谱分析》决定采用 Thomson Reuters旗下的 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统。

· ScholarOne Manuscripts，该系统不仅能轻松处理稿件，而且能提速科技交流。

· 全球已有 360 多家学会和出版社的 3 800 多种期刊选用了 ScholarOne Manuscripts 系统作为在线投稿、审稿平台，全球拥有超过 1 350 万的注册用户，代表着全球学术期刊在线投审稿的一流水平。

· ScholarOne Manuscripts 与 EndNote，Web of Science 无缝链接和整合；使科研探索、论文评阅和信息传播效率大为提高。

· ScholarOne Manuscripts 是汤森路透科技集团的一个业务部门，拥有丰富的学术期刊业务经验，为学术期刊提供综合管理工作流程系统，使期刊更有效管理投稿、同行评审、加工和发表过程，提高作者心中的专业形象，缩短论文发表时间，削减管理成本，帮助期刊提高科研绩效和实现学术创新。

《光谱学与光谱分析》采用“全球学术期刊首选的在线投稿审稿系统—ScholarOne Manuscripts”，势必对 2010 年 11 月 30 日以前向本刊投稿的作者在查阅稿件信息时，会带来某些不便，在此深表歉意！为了推进本刊的网络化、数字化、国际化进程，以实现与国际先进出版系统对接；为了不断提高期刊质量，加快网络化、数字化建设，加快与国际接轨的进程，希望能得到广大作者、读者们的支持与理解，对您的理解和配合深表感激。这是一件新事物，肯定有不周全、不完善的地方，让我们共同努力，不断改进和完善起来。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2010 年 12 月 1 日

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net