

海洋背景下气溶胶的偏振光散射特性研究

孙贤明 王海华 申晋 万隆

山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049

摘要 基于矢量辐射传输理论,利用矩阵算法研究了海洋-大气耦合系统中,海雾气溶胶对太阳光的偏振散射特性。整个大气层垂直方向分为若干平面平行层,考虑了大气分子、云层以及气溶胶的垂直分布;海洋表面按照风驱随机粗糙海面进行了分析,考虑了海洋波斜率分布和遮蔽效应;海洋体也由若干平面平行层构成,考虑了海水以及叶绿素的吸收和散射影响。大气和海洋体每层的反射矩阵和透射矩阵以及源函数由离散坐标方法计算,整个海-气系统的散射特性由矩阵方法通过耦合层与层之间相互辐射得到。研究了整个海-气系统反射的太阳辐射以及偏振度对太阳光的波长、入射天顶角、观测角度、海洋表面风速、云和气溶胶的光学厚度,以及气体吸收等的敏感性。计算结果表明,多波长多角度偏振度信息随海洋表面和大气环境变化敏感,可以结合辐射强度和偏振度对海洋背景下气溶胶特性进行遥感反演。

关键词 海洋光学; 矢量辐射传输; 偏振; 海洋气溶胶; 粗糙海面

中图分类号 TP701

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.040101

Study on Polarized Light Scattering by Aerosol over Ocean

Sun Xianming Wang Haihua Shen Jin Wan Long

School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China

Abstract Based on the radiative transfer theory, the polarized light scattering characteristics of sea spray in an atmosphere-ocean system by sunlight is studied based on the matrix operator method. The whole atmosphere layer is divided into many sub-layers in the vertical direction, and the vertical distributions of the atmosphere molecular, clouds and aerosol are considered. The ocean surface is dealt as the wind-generated rough ocean surface, and the wave slope distribution and the shadowing effect of the ocean wave are considered. The ocean body is divided into many plane parallel sub-layers, and the absorption and scattering characteristics of sea water and the chlorophyll are considered by an empirical model. The reflection and transmission matrices and source vectors are obtained for each atmospheric or oceanic layer through the discrete ordinate solution. The scattering characteristics of the whole atmosphere-ocean system are constructed using the matrix operated method, which combines the radiative interaction between the layers. The sensitivity studies for the reflected solar radiation by the whole atmosphere-ocean system are conducted for various solar wavelength, incidence solar zenith angle, observation angle, ocean-surface wind speed, the optical thickness of the clouds and aerosols, and the absorption of the gas. The simulation results show that the multi-wavelength and multi-angular polarization information are sensitive to the varies of the atmosphere and ocean surface conditions. The reflected solar radiative intensity and the polarization degree can be combined to retrieve the aerosol information.

Key words oceanic optics; vector radiative transfer; polarization; ocean aerosol; rough ocean surface

OCIS codes 010.5620; 010.1310; 010.4458

1 引言

地球的气候依赖于太阳、地球大气和地球表面之间的辐射收支平衡,无论是太阳辐射还是地球大气的长期变化,都会引起全球气候的变化,从而影响局部天气和人类的生活^[1-6]。气溶胶作为影响气候的一个重要因子,其气候效应主要表现在两个方面:1)通过吸收、散射、辐射太阳和地球长波辐射的直接气候效应;2)

收稿日期: 2015-09-29; 收到修改稿日期: 2015-11-10; 网络出版日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61205191)、山东省自然科学基金(ZR2013FL023)

作者简介: 孙贤明(1979—), 博士, 副教授, 主要从事大气辐射传输方面的研究。E-mail: xmsunsdut@163.com

通过影响云辐射性质和调节降雨的间接气候效应。研究表明,一个世纪以来地球温度升高了 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,气溶胶对气候的影响被认为可以与温室气体相比,但是对于气溶胶的定量研究仍然不足,并且被认为是影响气候变化最不确定的因素^[7-8]。占地球总面积 70% 的海洋是自然气溶胶的主要来源之一,每年由海洋产生的海盐气溶胶总量约为 $10^{15} \sim 10^{16}\text{ g}$,这些气溶胶再经过季风输运到整个地球大气中,因此对海盐气溶胶的产生、输运、清除过程的精确监测具有重要的意义。

由于气溶胶时空变化的不确定性,所以需要对其进行全球长期精确的监测,从而掌握其直接和间接的气候效应,显然利用卫星进行监测是最有效的方法。已有的研究发现,仅监测辐射强度很难获得气溶胶特性(如光学厚度、尺寸分布、折射率、化学构成等)的唯一解,而利用光的偏振信息可以较好地解决解的唯一性问题,但利用反射光的偏振信息进行遥感时必须保证很高的精度,在进行海洋气溶胶的遥感监测时,作为下垫面的海面会对入射光的偏振性产生改变。国际上研究者发展了多种考虑多次散射的大气辐射传输算法,这些算法既可以计算光的散射强度又可以计算光的偏振特性,主要包括不变嵌入法、逐次散射法、蒙特卡罗方法、累加法以及矩阵法。其中一些算法已经应用于大气-海洋系统中,如蒙特卡罗方法应用于研究平静海面折射率对光偏振态的影响^[9],累加法应用于研究风驱海面的偏振反射率等^[10],逐次散射方法应用于水色遥感反演等^[11]。矩阵算法也广泛应用于大气辐射传输研究,标量矩阵算法是基于 Nakajima - Tanaka 公式给出^[12],其利用矩阵算法将每一个平面平行层的离散纵标解进行耦合,从而得到整个多层系统的辐射场。Ota 等^[13]将标量矩阵算法进行了拓展,得到了矢量矩阵算法,并将其应用于大气海洋的耦合辐射研究中。本文利用此方法,将大气、海洋表面以及海洋体对太阳光的散射进行耦合,从而得到了整个大气层顶的偏振反射函数,分析了反射函数对观测波长、观测几何、海面以及海洋体特性、气溶胶和云层微物理以及光学特性等的敏感性,从而为遥感反演海洋气溶胶微物理特性提供理论支持。

2 大气-海洋辐射传输模式

采用大气-海洋辐射传输模式分为大气、海洋表面和海洋体三部分,其中大气和海洋体分为若干平面平行的各向同性层,其中大气层分为 50 层,分别考虑了大气分子散射、吸收、云层以及海雾气溶胶的垂直分布,海洋体主要考虑海水和叶绿素的吸收和散射,对于海洋表面,采用了风驱随机粗糙海面模型进行模拟。

大气模式根据 LOWTRAN7 分为热带、中纬度夏季、中纬度冬季、亚北极夏季、亚北极冬季以及美国标准大气共 6 种,主要给出了压力、温度、水汽(H_2O)、二氧化碳(CO_2)、臭氧(O_3)、一氧化二氮(N_2O)、一氧化碳(CO)、甲烷(CH_4)以及氧气(O_2)的垂直廓线,同时还考虑各种微量气体的垂直廓线。

对于大气分子主要考虑其散射和吸收,其中大气分子吸收根据逐线辐射传输模式的相关 K 分布方法得到,大气分子的散射由瑞利散射给出,其散射光学厚度为^[14]

$$\tau = 0.008569\lambda^{-4} \left(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4} \right) \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad (1)$$

式中 λ 为光波长,单位为 μm , P 为分子层所在高度的大气压,单位为 Pa , P_0 为标准大气压。大气分子的单次散射相矩阵为^[14]

$$P(\alpha) = \begin{bmatrix} \frac{3}{4}(1 + \cos^2\alpha) & -\frac{3}{4}\sin^2\alpha & 0 & 0 \\ -\frac{3}{4}\sin^2\alpha & \frac{3}{4}(1 + \cos^2\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}\cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta' \frac{3}{2}\cos\alpha \end{bmatrix} + (1 - \Delta) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\Delta = \frac{1 - \delta}{1 + \delta/2}$, $\Delta' = \frac{1 - 2\delta}{1 - \delta}$, δ 为去偏振因子,对于不同的气体分子, δ 值不同,通常对于空气分子 $\delta \approx 0.03$ 。

对于海雾气溶胶粒子,假设其为球形粒子,其散射特性由 Mie 理论给出,海雾气溶胶粒子的尺寸分布假设为对数正态分布,即

$$\frac{dN(r)}{d \lg r} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_g} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg r - \lg r_g}{\lg \sigma_g} \right)^2 \right], \quad (3)$$

式中 $r_g = 2.04 \mu\text{m}$, $\sigma_g = 2.51$ 。

海雾气溶胶的主要成分是海盐,随着湿度的增大,水汽将会在海盐上凝结,从而使气溶胶的尺寸、构成以及折射率发生变化,进而其光学特性也将发生改变,本文按照 Shettle 等的模式^[15]对此进行了考虑。

大气中的云层也会对整个海-气系统的辐射特性产生很大的影响,多次散射会对反射光产生很强的去偏振效应,本文考虑了水云的影响,水云层的尺寸分布取对数正态分布如(1)式所示,令 $r_g = 8 \mu\text{m}$, $\sigma_g = 1.5$ 。

要研究整个海-气系统对太阳光的反射特性,必须考虑海洋表面的反射和透射特性,对于平坦的海洋表面,可以将其假设为镜面,利用 Snell-Fresnel 定律对散射的太阳辐射进行求解,但是对于风驱粗糙海面,其对辐射传输的影响是非常复杂的,很多研究者对此进行了研究,这里采用 Nakajima 的方法^[16],将风驱粗糙海面的反射和透射矩阵表示为

$$R(\mu, \varphi; \mu', \varphi') = \frac{1}{4\mu_n \mu} G(\nu, \nu') p(\mu_n) r(\cos \beta, m), \quad (4)$$

$$T(\mu, \varphi; \mu', \varphi') = \frac{m^2 \cos^2 \beta_i}{\mu_n \mu \cos(\beta - m \cos \beta_i)^2} G(\nu, \nu') p(\mu_n) t(\cos \beta, m) \times H[(m-1)(m\mu - \mu')] H\left(\alpha - \frac{1}{m_0}\right), \quad (5)$$

式中 H 为 Heaviside 阶梯函数, r 和 t 为平坦海面的反射和透射矩阵, β 和 β_i 各自代表相对于波面法向的入射和透射角度, m 为海水相对于空气的折射率, μ 和 ϕ 为观测天顶角余弦和方位角, μ' 和 ϕ' 为入射天顶角余弦和方位角, μ_n 为海洋表面波面法向天顶角余弦,其与 μ 和 ϕ 以及 μ' 和 ϕ' 的关系为

$$\mu_n = (\mu + \mu')/2 \cos \omega, \quad (6)$$

$$\cos \omega = \sqrt{(1 - \alpha)/2}, \quad (7)$$

$$\alpha = \mu\mu' + \sqrt{1 - \mu^2} \sqrt{1 - \mu'^2} \cos(\phi - \phi'), \quad (8)$$

海洋波面的斜面概率密度函数假设为各向同性的高斯分布^[17-18],即

$$p(\mu_n) = \frac{1}{\pi \sigma^2 \mu_n^3} \exp\left(-\frac{1 - \mu_n^2}{\sigma^2 \mu_n^2}\right), \quad (9)$$

式中 σ^2 为均方斜率,其取值根据实测数据参数化为^[17]

$$\sigma^2 = 0.00534 u_{10}, \quad (10)$$

式中 u_{10} 为水面上 10 m 高处的风速,单位为 m/s。

$G(\nu, \nu')$ 为遮蔽因子,用于考虑海面波浪对光的遮蔽效应^[18-20],其定义为

$$G(\nu, \nu') = \frac{1}{1 + F(\nu) + F(\nu')}, \quad (11)$$

式中

$$F(\nu) = \frac{1}{2} \left[\frac{\exp(-\nu^2)}{\sqrt{\pi} \nu} - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \exp(-t^2) dt \right], \quad (12)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\sigma \sqrt{1 - \mu^2}} \quad \nu' = \frac{\mu'}{\sigma \sqrt{1 - \mu'^2}}. \quad (13)$$

海洋体的光散射特性,主要考虑海水和水溶胶两部分,对于海水来说,根据参数化公式来计算其消光和散射系数,对于水溶胶,主要考虑浮游生物的影响,根据叶绿素的浓度参数化其吸收系数、散射系数、后向散射系数以及不对称因子,散射相矩阵结合瑞利散射相矩阵和 H-G 相函数给出^[21-22]。

3 矢量辐射传输矩阵方法

光的偏振特性通常由斯托克斯矢量的四个参量来描述,即 $I = [I \quad Q \quad U \quad V]^T$,其中 T 代表转置算符。对于平面平行层来说,矢量辐射传输方程为^[14]

$$\mu \frac{\partial I(\tau, \mu, \varphi)}{\partial \tau} = -I(\tau, \mu, \varphi) + \omega \int_{-1}^1 d\mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' P(\mu, \varphi; \mu', \varphi') I(\tau, \mu', \varphi') + (1 - \omega) B(\tau), \quad (14)$$

式中 τ 为光学厚度, ω 为单次散射反照率, $P(\mu, \varphi; \mu', \varphi')$ 为单次散射相矩阵, $B(\tau)$ 为热辐射矢量。

在求解(14)式时,将相矩阵利用傅里叶变换对方位角展开^[23],从而使(14)式中的变量不含 ϕ ,即

$$\begin{aligned} \pm \mu_i \frac{\partial}{\partial \tau} I^{(m)}(\tau, \pm \mu_i; \mu_0) &= -I^{(m)}(\tau, \pm \mu_i; \mu_0) + \\ &\omega \sum_{j=1}^N w_j \left[P^{(m)}(\pm \mu_i, \mu_j) I^{(m)}(\tau, \mu_j; \mu_0) + P^{(m)}(\pm \mu_i, -\mu_j) I^{(m)}(\tau, -\mu_j; \mu_0) \right] + \\ &S_{s+}^{(m)}(\pm \mu_i; \mu_0) \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) + S_{s-}^{(m)}(\pm \mu_i; \mu_0) \exp\left(-\frac{2\tau_a - \tau}{\mu_0}\right) + (1 - \omega) B^{(m)}(\tau), \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $\pm \mu_i$ 和 w_i 为高斯积分的积分点和权重, S_{s+} 和 S_{s-} 为单次散射源函数, τ_a 为从大气层顶到海面的光学厚度,进而利用离散坐标法求解每层大气或海洋层的反射和透射特性。

在得到每一层反射矩阵、透射矩阵以及源函数后,需要将整个海-气系统利用矩阵法将其结合起来^[24],当已知层1和层2的散射特性后,结合层向下的辐射特性为

$$R_{1+2}^+ = R_1^+ + T_1^{-1} (1 - R_2^+ R_1^-)^{-1} R_2^+ T_1^+, \quad (16)$$

$$T_{1+2}^+ = T_2^+ (1 - R_1^- R_2^+)^{-1} T_1^+, \quad (17)$$

$$\varepsilon_{1+2}^+ = \varepsilon_2^+ + T_2^+ (1 - R_1^- R_2^+)^{-1} (R_1^- \varepsilon_2^- + \varepsilon_1^+), \quad (18)$$

向上的辐射特性为

$$R_{1+2}^- = R_2^- + T_2^+ (1 - R_1^- R_2^+)^{-1} R_1^- T_2^-, \quad (19)$$

$$T_{1+2}^- = T_1^- (1 - R_2^+ R_1^-)^{-1} T_2^-, \quad (20)$$

$$\varepsilon_{1+2}^- = \varepsilon_1^- + T_1^- (1 - R_2^+ R_1^-)^{-1} (R_2^+ \varepsilon_1^+ + \varepsilon_2^-), \quad (21)$$

式中 R 和 T 为反射和透射矩阵, ε 为源矢量,“+”和“-”分别代表从下入射和从上入射。

利用(16)~(21)式可以得到结合层的斯托克斯矢量为

$$I^* = (1 - R_1^- R_2^+)^{-1} (R_1^- \varepsilon_2^- + \varepsilon_1^+), \quad (22)$$

$$I^\Gamma = R_2^+ I^* + \varepsilon_2^-. \quad (23)$$

4 数值分析

计算了整个海-气系统的辐射特性,采用的大气模式为中纬度夏季大气模式,并且考虑了大气的吸收和空气分子的瑞利散射,海洋体考虑海洋表面下 50 m 海水层,叶绿素含量为 0.15 mg/m³,研究了海面风速、气溶胶光学厚度、观测角度、太阳入射角度、观测波长、云层厚度等对整个海-气系统辐射特性的影响。

图1给出了 0.865 μm 和 0.67 μm 单色太阳光入射时,大气层顶反射的辐射强度和偏振度随观测天顶角的变化曲线,偏振度定义为 $\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}/I$,入射太阳天顶角分别为 23.4° 和 43.2°,相对方位角为 0°,海盐气溶胶的光学厚度为 0.2,风速分别为 2.5、7.5、12.5 m/s。从图中可以看出,风速对辐射强度以及偏振度都有一定影响,当风速较小时,海面接近平静海面,因此反射强度在镜面散射角出现峰值。随着风速的增大,海面粗糙度增大,镜面反射减少,反射的辐射强度随风速的差别主要在镜面反射区,另外偏振度对风速的敏感度相对较弱,尤其在 0~40° 范围内。

图2给出了大气层顶反射的辐射强度和偏振度随观测天顶角以及太阳波长的变化,太阳天顶角分别为 23.4° 和 43.2°,相对方位角为 0°,海面风速为 7.5 m/s,海盐气溶胶光学厚度为 0.2,从图中可以看出,反射的辐射强度随波长的变化明显,但是波长为 0.85、1.61、2.2 μm 的偏振度在大部分角度差距很小,其中 1.37 μm 的太阳光偏振度最高,而 1.61 μm 的偏振度最低。

图3给出太阳入射天顶角为 43.2°,相对方位角为 180°,其他计算条件与图2相同时,整个海-气系统的反射辐射强度和偏振度,从图中可以看出,相比于图2,辐射强度特点基本相同,但是偏振度随波长的变化却更为复杂,偏振度对相对方位角的变化是非常敏感的。

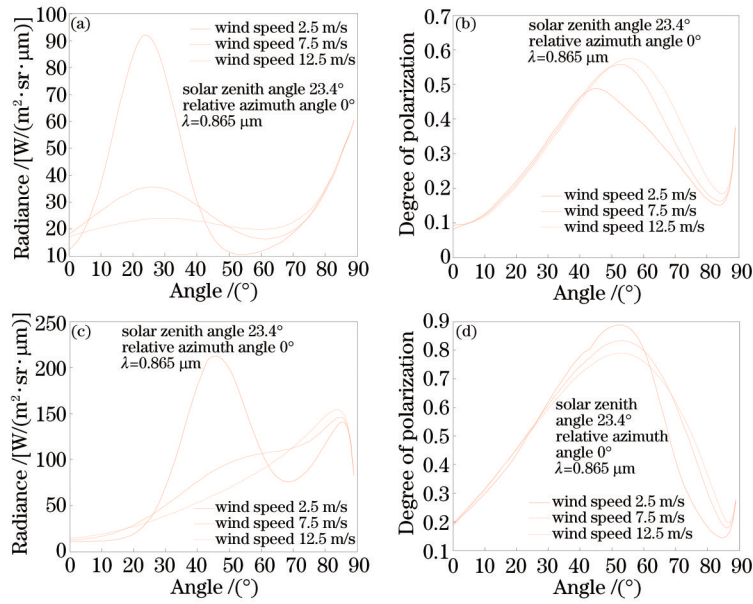


图1 大气层顶反射辐射强度和偏振度随观测天顶角和风速的变化

Fig.1 Total reflectance and degree of polarization vary with the observation and wind speeds

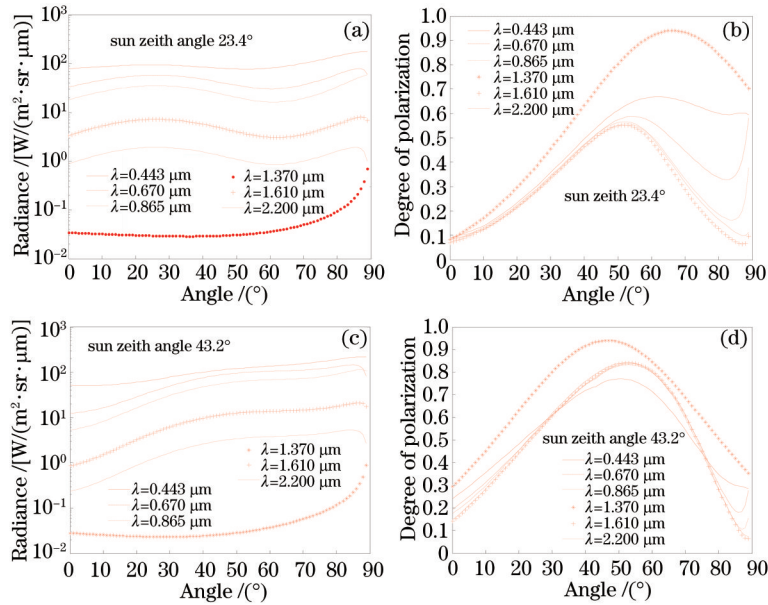


图2 大气层顶反射辐射强度和偏振度随观察角度和波长的变化

Fig.2 Total reflectance and degree of polarization vary with the observation and wavelengths

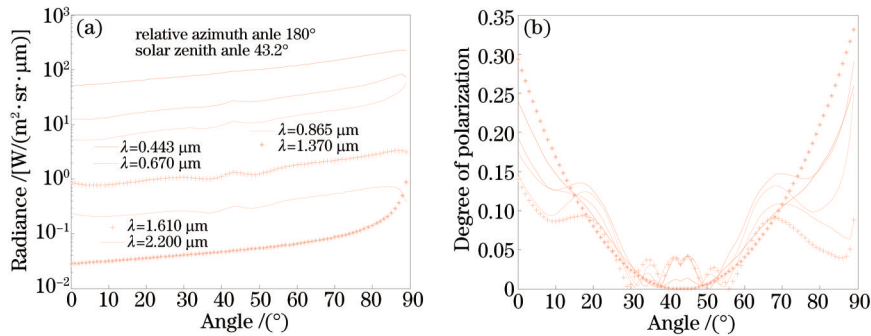


图3 大气层顶反射辐射强度和偏振度随观察角度和波长的变化

Fig.3 Total reflectance and degree of polarization vary with the observation and wavelengths

图4给出了整个海-气系统顶部向上的辐射强度和偏振度随观测天顶角和海盐气溶胶光学厚度的变化,海盐气溶胶的光学厚度分别为0.1、0.2和0.3,太阳入射天顶角为 23.4° ,相对方位角为 0° ,太阳波长为 $0.67\ \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,在镜面发射角,光学厚度越大,反射的辐射强度越小。而其他角度,则是光学厚度越大而反射的辐射强度越大,这是因为光学厚度越大,气溶胶对镜面反射光的衰减和散射就越强,而在其他角度则是光学厚度越大反射的太阳辐射越强。从图4(b)可以看出,光学厚度越大,偏振度越小,这是因为气溶胶对太阳光起到了去偏振的作用。

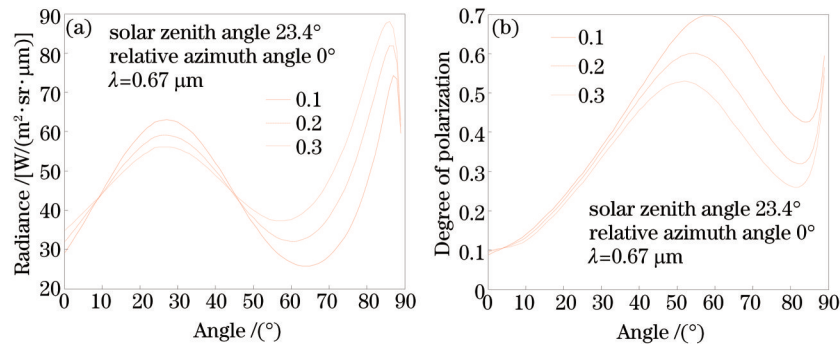


图4 大气层顶反射辐射强度和偏振度随海盐气溶胶光学厚度的变化

Fig.4 Total reflectance and degree of polarization vary with the observation and aerosol optical thickness

图5给出了海-气系统中加入水云后,大气层顶向上的辐射强度和偏振度随天顶角和水云光学厚度的变化,入射波长分别为 $0.67\ \mu\text{m}$ 和 $1.61\ \mu\text{m}$,入射天顶角为 23.4° ,相对方位角为 0° ,光学厚度分别为2、4、8、16和32,海盐气溶胶的光学厚度为0.2,水云的尺寸分布服从伽马分布。从图中可以看出,随着光学厚度的增加,反射的辐射强度也在增大,但偏振度在减少,说明云层起到了去偏振的作用,另外对于两种不同的波长来说,反射的辐射强度随天顶角的变化趋势基本相同,但是偏振度有很大的不同。

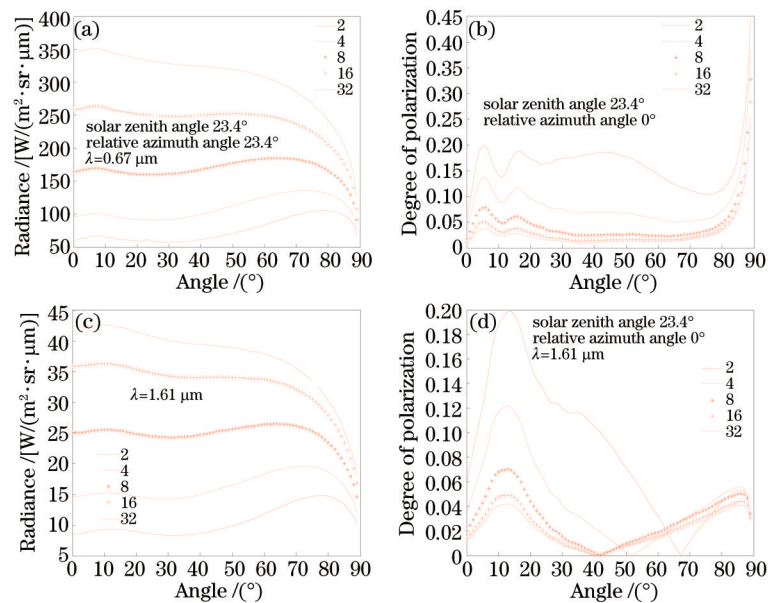


图5 大气层顶反射辐射强度和偏振度随水云光学厚度的变化

Fig.5 Total reflectance and degree of polarization vary with the observation and water clouds optical thickness

5 结 论

利用矩阵算法计算了整个海洋-大气系统对太阳辐射的偏振反射特性,研究了整个海-气系统反射强度和偏振度对各种大气、海洋表面以及入射和观测几何条件的敏感性。入射太阳波长分别选取了 0.443 、 0.67 、 0.865 、 1.37 、 1.61 、 $2.2\ \mu\text{m}$,这些波长对应于POLDER和GLORY卫星的偏振通道,从计算结果表明,总的反射辐射强度和偏振度对太阳入射角度、观测角度、云和气溶胶光学厚度、海洋表面风速均有较强的敏感性,偏

振度对某些波长的敏感度比反射强度弱。由于多次散射的存在,水云和气溶胶对太阳光产生了去偏振,光学厚度越大偏振度越低。海洋风速对反射强度产生较大影响,海洋表面的风速越小,海面越接近于镜面,因此镜面反射角处的反射越强;风速越大,海面越粗糙,因此镜面反射的影响越小,但风速对偏振度的影响比对反射强度弱。

参考文献

- 1 Gong Chunwen, Li Xuebin, Li Jianyu, *et al.*. New method of aerosol extinction coefficient measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0101001.
宫纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0101001.
- 2 Shi Bo, Tao Zongming, Ma Xiaomin, *et al.*. Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501006.
史博, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0501006.
- 3 Bo Guangyu, Xie Chenbo, Wang Bangxin, *et al.*. Case study of the relationship between aerosol angstrom exponent and relative humidity[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0713002.
伯广宇, 谢晨波, 王邦新, 等. 相对湿度影响地表气溶胶波长指数的个例研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0713002.
- 4 Bu Yichuan, Zhao Yongkai, Chen Zhengyan, *et al.*. Research on real-time aerosol particle shape identification based on scattered light detection[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0413003.
卜一川, 赵永凯, 陈正岩, 等. 基于光散射的实时气溶胶粒子形状识别技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0413003.
- 5 Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli. Validation of retrieving aerosol optical parameters over the sea using airborne directional polarized camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0601004.
黄红莲, 易维宁, 乔延利. 基于航空偏振相机的海上气溶胶光学特性反演与验证[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0601004.
- 6 Mishchenko M I, Cairns B, Kopp G, *et al.*. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: Introducing the Glory Mission[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(5): 677-691.
- 7 Hansen J, Sato M, Ruedy R, *et al.*. Global temperature change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(39): 14288-14293.
- 8 Hansen J, Nazarenko L, Ruedy R, *et al.*. Earth's energy imbalance: Confirmation and implications[J]. *Science*, 2005, 308(5727): 1431-1435.
- 9 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.
- 10 Takashima T, Masuda K. Degree of radiance and polarization of the upwelling radiation from an atmosphere-ocean system [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(15): 2423-2429.
- 11 Chami M. Importance of the polarization in the retrieval of oceanic constituents from the remote sensing reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2007, 112(C5): 395-412.
- 12 Nakajima T, Tanaka M. Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1986, 35(1): 13-21.
- 13 Ota Y, Higurashi A, Nakajima T, *et al.*. Matrix formulations of radiative transfer including the polarization effect in a coupled atmosphere-ocean system[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(6): 878-894.
- 14 Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. *Space Science Reviews*, 1974, 16(4): 527-610.
- 15 Shettle E P, Fenn R W. Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties[R]. *Air Force Geophysics Lab Hanscom Afb Ma*, 1979.
- 16 Nakajima T, Tanaka M. Effect of wind-generated waves on the transfer of solar radiation in the atmosphere-ocean system [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1983, 29(6): 521-537.
- 17 Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. *J Opt Soc Am*, 1954, 44(11): 838-850.
- 18 Ebuchi N, Kizu S. Probability distribution of surface wave slope derived using sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers[J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(3): 477-486.
- 19 Saunders P M. Shadowing on the ocean and the existence of the horizon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(18): 4643-4649.

- 20 Hovenier J W, Mee C V D, Domke H. Transfer of polarized light in planetary atmospheres: Basic concepts and practical methods[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2005.
- 21 Bricaud A, M Babin, A Morel, *et al.*. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100: 13321–13332.
- 22 Morel A, S Maritorena. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2001, 106(C4): 7163–7180.
- 23 Hulst H C van de. Multiple light scattering. Tables, formulas and applications[M]. New York: Academic Press, 1980.
- 24 Nakajima T, Tanaka M. Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1986, 35(1): 13–21.

栏目编辑: 史 敏