

文章编号: 0253-2239(2010)03-0618-07

# 海洋-大气耦合矢量辐射传输粗糙海面模型

何贤强<sup>1,2</sup> 潘德炉<sup>1,2</sup> 白雁<sup>1,2</sup> 朱乾坤<sup>1,2</sup> 龚芳<sup>2</sup> 毛志华<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012; <sup>2</sup> 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

**摘要** 详细导出了粗糙海面的反射矩阵、透射矩阵和源函数矢量计算模型,并应用于海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型 PCOART。在此基础上,分别利用粗糙海面瑞利大气矢量辐射传输问题和海洋-大气耦合辐射传输问题对粗糙海面模型进行了验证,结果表明,模型计算得到的粗糙海面大气瑞利散射斯托克斯矢量是精确的,且瑞利散射辐亮度计算相对误差小于 0.5%。粗糙海面海洋-大气耦合辐射传输问题验证结果表明该粗糙海面计算模型是精确的。相对已有的标量粗糙海面海洋-大气耦合辐射传输模型,该模型不仅可以获得整个海洋-大气耦合系统的辐亮度场,而且可以获得辐射斯托克斯矢量场。

**关键词** 大气光学;粗糙海面;海洋-大气耦合;矢量辐射传输;瑞利散射

中图分类号 P422.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0618

## Rough Sea-Surface Model for Vector Radiative Transfer of Coupled Ocean-Atmosphere System

He Xianqiang<sup>1,2</sup> Pan Delu<sup>1,2</sup> Bai Yan<sup>1,2</sup> Zhu Qiankun<sup>1,2</sup> Gong Fang<sup>2</sup> Mao Zhihua<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)  
(<sup>2</sup> Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

**Abstract** The reflecting matrix, transmitting matrix and internal radiation source function vector of the rough sea surface were deduced in detail, and were applied to the vector radiative transfer numerical model of the coupled ocean-atmosphere system named PCOART. The model was validated by the two rough sea-surface radiative transfer problems, one was the vector radiative transfer problem of the Rayleigh atmosphere, and the other was the radiative transfer problem of the coupled ocean-atmosphere system. The result shows that the model gives accurate simulation for the two aspects, especially with the relative error of Rayleigh scattering radiance less than 0.5%. Compared with the existing scalar radiative transfer numerical model of the coupled ocean-atmosphere system, this model can derive the radiance field and the Stokes vector field for the whole ocean-atmosphere system.

**Key words** atmospheric optics; rough sea surface; coupled ocean-atmosphere; vector radiative transfer, Rayleigh scattering

## 1 引 言

在过去的十年里,国际上发射了十多个海洋水色卫星遥感器,比较典型的水色遥感器包括海视宽视场传感器(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor, SeaWiFS)、海洋水色水温扫描仪(Ocean Color and Temperature Scanner, OCTS)、中分辨率成像光谱仪

(Moderate Resolution Imaging Spectrometer, MODIS)和中等分辨率成像光谱仪(Medium Resolution Imaging Spectrometer, MERIS)等。我国于 2002 年 5 月 15 日发射了第一颗海洋水色卫星 HY-1A,且在 2007 年 4 月 11 日又成功发射了第二颗海洋水色卫星 HY-1B,其上携带水色水温扫描仪(Chinese Ocean

收稿日期: 2009-03-10; 收到修改稿日期: 2009-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(40706061, 40976110)、国家 863 计划(2007AA12Z137, 2008AA09Z104)和近海海洋综合调查与评价专项项目(908-01-ST10, 908-ZC-I-04)资助课题。

作者简介: 何贤强(1978—),男,博士,副研究员,主要从事海洋水色遥感技术方面的研究。

E-mail: hexianqiang\_hxq@hotmail.com

Color and Temperature Scanner, COCTS)。这些水色遥感器均比 (Coastal Zone Color Scanner, CZCS) 在波段设置、信噪比等方面有了极大的改进, 其获取的遥感信息也比 CZCS 丰富得多。为了从遥感器获取的光谱信息中提取大气、海洋信息, 需要对辐射在海洋-大气耦合介质中的传输过程有深入地了解。但海洋、大气辐射传输是一个极其复杂的过程, 其精确计算需要采用数值计算技术。辐射传输数值计算的方法主要有加倍法<sup>[1]</sup>、离散纵标法<sup>[2]</sup>、球谐函数法<sup>[3]</sup>、蒙特-卡罗模拟法<sup>[4]</sup>、不变嵌入法<sup>[5]</sup>、X-Y 函数法<sup>[6]</sup>、逐次散射法<sup>[7]</sup>和有限元法<sup>[8,9]</sup>等。利用这些数值计算方法, 国际上已开发了几十种大气、海洋辐射传输数值计算模型, 如 DISORT<sup>[10]</sup>和 Hydrolight<sup>[11]</sup>。但适用于海洋-大气耦合系统辐射传输数值计算的较少, 主要有 COART<sup>[12]</sup>和 MOMO<sup>[13]</sup>, 张鉴等<sup>[14]</sup>利用矩阵算法处理海洋-大气耦合系统辐射传输来模拟水色遥感信息的变化特性, 但他们均只考虑了标量辐射传输问题。为了全面了解辐射在海洋-大气耦合系统的传输过程, 需要求解实际粗糙海面条件下的矢量辐射传输问题。在已开发的平静海面的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型 (Polarized Coupled Ocean-Atmosphere Radiative Transfer, PCOART) 基础上<sup>[15~17]</sup>, 增加粗糙海面计算模型, 使得 PCOART 能

模拟实际海洋、大气辐射传输问题。首先对粗糙海面的反射矩阵、透射矩阵及源函数矢量计算模型进行详细导出, 在此基础上, 对模型进行验证。

## 2 粗糙海面计算模型

假设粗糙海面是由许多随机分布的小波面组成, 根据 Cox & Munk<sup>[18]</sup>的研究结果, 小波面的分布概率密度函数为

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

式中  $\mathbf{e}_n$  为小波面的外法线方向矢量;  $\mu_n$  为小波面法线与天顶方向的夹角余弦;  $\sigma$  为正态分布方差, 可由海面 10 m 高处的风速  $v$  (单位: m/s) 计算获得

$$\sigma^2 = 0.003 + 0.00512v. \quad (2)$$

假定小波面的反射矩阵、透射矩阵分别为  $\mathbf{r}(\pm\mu, \phi_i \rightarrow \pm\mu_r, \phi_r)$  和  $\mathbf{t}(\pm\mu, \phi_i \rightarrow \pm\mu_t, \phi_t)$ , 其中  $\mu_i, \phi_i$  分别为入射辐射的天顶角余弦和方位角,  $\mu_r, \phi_r$  分别为反射辐射的天顶角余弦和方位角,  $\mu_t, \phi_t$  分别为透射辐射的天顶角余弦和方位角, 注意这里取向为正 ( $\mu > 0$ )。则粗糙海面的反射和透射辐射是所有小波面的反射和透射辐射的半球积分

$$\begin{cases} \mathbf{I}_r(\mp\mu_r, \phi_r) = \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{r}(\pm\mu, \phi \rightarrow \mp\mu_r, \phi_r) \mathbf{I}_i(\pm\mu, \phi) d\mu d\phi \\ \mathbf{I}_t(\pm\mu_t, \phi_t) = \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{t}(\pm\mu, \phi \rightarrow \pm\mu_t, \phi_t) \mathbf{I}_i(\pm\mu, \phi) d\mu d\phi \end{cases}, \quad (3)$$

将  $\mathbf{I}_r, \mathbf{I}_i, \mathbf{I}_t, \mathbf{r}$  及  $\mathbf{t}$  分别对方位角进行傅里叶展开

$$\begin{cases} \mathbf{I}_r(\mu_r, \phi_r) = \mathbf{I}_r^0(\mu_r) + \sum_{m=1}^M [\mathbf{I}_r^{cm}(\mu_r) \cos m(\phi_r - \phi_0) + \mathbf{I}_r^{sm}(\mu_r) \sin m(\phi_r - \phi_0)] \\ \mathbf{I}_t(\mu_t, \phi_t) = \mathbf{I}_t^0(\mu_t) + \sum_{m=1}^M [\mathbf{I}_t^{cm}(\mu_t) \cos m(\phi_t - \phi_0) + \mathbf{I}_t^{sm}(\mu_t) \sin m(\phi_t - \phi_0)] \\ \mathbf{I}_i(\mu, \phi) = \mathbf{I}_i^0(\mu) + \sum_{m=1}^M [\mathbf{I}_i^{cm}(\mu) \cos m(\phi - \phi_0) + \mathbf{I}_i^{sm}(\mu) \sin m(\phi - \phi_0)] \\ \mathbf{r}(\mu, \phi \rightarrow \mu_r, \phi_r) = \mathbf{r}^0(\mu_r, \mu) + \sum_{m=1}^M [\mathbf{r}^{cm}(\mu_r, \mu) \cos m(\phi - \phi_r) + \mathbf{r}^{sm}(\mu_r, \mu) \sin m(\phi - \phi_r)] \\ \mathbf{t}(\mu, \phi \rightarrow \mu_t, \phi_t) = \mathbf{t}^0(\mu_t, \mu) + \sum_{m=1}^M [\mathbf{t}^{cm}(\mu_t, \mu) \cos m(\phi - \phi_t) + \mathbf{t}^{sm}(\mu_t, \mu) \sin m(\phi - \phi_t)] \end{cases}, \quad (4)$$

利用三角函数的正交性, 并将天顶角积分写为高斯求和形式, 可得

$$\begin{cases} \mathbf{I}_r^m(\mp \mu_i) = [1 + \delta_{\langle 0, m \rangle}] \pi \sum_{j=1}^N \mathbf{r}^m(\mp \mu_k, \pm \mu_j) \mathbf{I}_i^m(\pm \mu_j) c_j, m = 0, \dots, M \\ \mathbf{I}_t^m(\pm \mu_i) = [1 + \delta_{\langle 0, m \rangle}] \pi \sum_{j=1}^N \mathbf{t}^m(\pm \mu_k, \pm \mu_j) \mathbf{I}_i^m(\pm \mu_j) c_j, m = 0, \dots, M \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{I}_r^m$  为  $\mathbf{I}_r^{cm}$  或  $\mathbf{I}_r^{sm}$ ,  $\mathbf{I}_t^m$  为  $\mathbf{I}_t^{cm}$  或  $\mathbf{I}_t^{sm}$ ,  $\mathbf{r}^m$  为  $\mathbf{r}^{cm}$  或  $\mathbf{r}^{sm}$ ,  $\mathbf{t}^m$  为  $\mathbf{t}^{cm}$  或  $\mathbf{t}^{sm}$ 。则粗糙海面的反射矩阵和透射矩阵形式为

$$\begin{cases} N \times N: \mathbf{R}_{m(\text{oa})}^- = [1 + \delta_{\langle 0, m \rangle}] \pi \mathbf{r}^m(-\mu_k, \mu_j) c_j, k, j = 1, \dots, N \\ 2N \times 2N: \mathbf{R}_{m(\text{oa})}^+ = [1 + \delta_{\langle 0, m \rangle}] \pi \mathbf{r}^m(\mu_k^{\circ}, -\mu_j^{\circ}) c_j^{\circ}, k, j = 1, \dots, 2N \\ 2N \times N: \mathbf{T}_{m(\text{oa})}^+ = [1 + \delta_{\langle 0, m \rangle}] \pi \mathbf{t}^m(\mu_k^{\circ}, \mu_j) c_j, k = 1, \dots, 2N, j = 1, \dots, N \\ N \times 2N: \mathbf{T}_{m(\text{oa})}^- = [1 + \delta_{\langle 0, m \rangle}] \pi \mathbf{t}^m(-\mu_k, -\mu_j^{\circ}) c_j^{\circ}, k = 1, \dots, N, j = 1, \dots, 2N \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $^{\circ}$ 为水下值,此外粗糙海面对到达海面的太阳直射光会产生漫反射和漫透射,形成海-气界面层的源函数矢量

$$\begin{aligned} N: \mathbf{J}_{m(\text{oa})}^- &= \mathbf{r}^m(-\mu_k, \mu_0) \mathbf{F}_0 \exp(-\tau_A/\mu_0), k = 1, \dots, N \\ 2N: \mathbf{J}_{m(\text{oa})}^+ &= \mathbf{t}^m(-\mu_k, \mu_0) \mathbf{F}_0 \exp(-\tau_A/\mu_0), k = 1, \dots, 2N \end{aligned}, \quad (7)$$

式中  $\tau_A$  为整层大气的光学厚度。综上所述,粗糙海面反射矩阵、透射矩阵及源函数矢量的关键在于小波面反射矩阵  $\mathbf{r}$  和透射矩阵  $\mathbf{t}$  的计算。

## 2.1 小波面反射矩阵

如图 1 所示,假设入射辐射为  $\mathbf{I}_i$ , 其方位为  $(\theta_i, \phi_i)$ ; 反射辐射为  $\mathbf{I}_r$ , 其方位为  $(\theta_r, \phi_r)$ 。则小波面的反射穆勒 (Mueller) 矩阵  $\mathbf{F}_r$  为

$$\mathbf{F}_r = \begin{bmatrix} \rho_+ & \rho_- & 0 & 0 \\ \rho_- & \rho_+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{33} & \rho_{34} \\ 0 & 0 & -\rho_{34} & \rho_{33} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中  $\rho_{\pm} = \frac{1}{2} [ |R_V|^2 \pm |R_H|^2 ]$ ,

$$\rho_{33} = \text{Re}(R_V \cdot R_H^*),$$

$$\rho_{34} = -\text{Im}(R_V \cdot R_H^*),$$

$$R_H = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{n_w^2 - 1 + \cos^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{n_w^2 - 1 + \cos^2 \theta_i}},$$

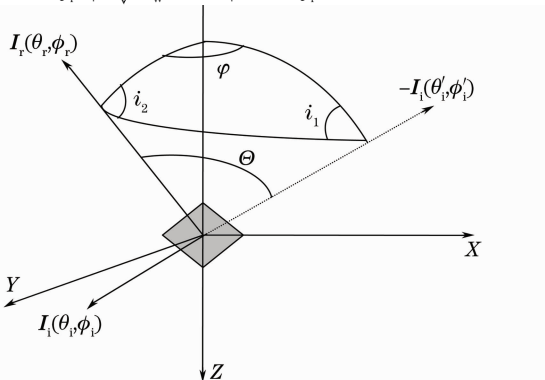


图 1 粗糙海面小波面反射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the facet reflection of rough sea surface

$$R_V = \frac{n_w \cos \theta_i - \sqrt{n_w^2 - 1 + \cos^2 \theta_i}}{n_w \cos \theta_i + \sqrt{n_w^2 - 1 + \cos^2 \theta_i}}, *$$

为取共轭,式 中  $n_w$  为相对折射率。与平静海面不同的是,粗糙海面小波面的入射和反射辐射矢量的参考面(子午面)不在同一平面上,需要进行参考面的旋转。经旋转后的小波面反射矩阵  $\mathbf{R}_f$  为

$$\mathbf{R}_f = \mathbf{L}(\pi - i_2) \mathbf{F}_r \mathbf{L}(i_1), \quad (9)$$

式中  $i_1, i_2$  为旋转角,  $\mathbf{L}$  为旋转矩阵,即

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

从方位  $(\theta_i, \phi_i)$  入射,方位  $(\theta_r, \phi_r)$  反射的小波面法线矢量与天顶方向的夹角余弦为

$$|\mu_n| = \frac{|\cos(\pi - \theta_i)| + |\cos \theta_r|}{2 \cos \Theta},$$

式中  $\Theta$  为  $-\mathbf{I}_i$  与  $\mathbf{I}_r$  的夹角。则根据海面 10 m 高度处的风速及(1)式,可得到该入射、反射几何条件的小波面概率  $p(|\mu_n|)$ 。此外还需要考虑小波面倾斜对入射辐射和反射辐射的遮挡影响,由小波面遮挡效应系数表征

$$S(\theta_i, \phi_i \rightarrow \theta_r, \phi_r) = \frac{1}{1 + U(|\cos \theta_i|) + U(|\cos \theta_r|)}, \quad (11)$$

式中

$$\begin{aligned} U(\cos \theta) &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{2\sigma^2}{\pi} \frac{(1 - \cos^2 \theta)}{\cos^2 \theta}} \times \right. \\ &\left. \exp\left[-\frac{\cos^2 \theta}{2\sigma^2(1 - \cos^2 \theta)}\right] - \text{erf}\left[\frac{\cos \theta}{\sigma \sqrt{2(1 - \cos^2 \theta)}}\right] \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $\text{erf}(x)$  为误差函数：

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt. \quad (13)$$

此外还需考虑辐照度余弦定律，则最终小波面的反射矩阵为

$$r(\theta_i, \phi_i \rightarrow \theta_r, \phi_r) = \frac{1}{4 |\cos \theta_r| |\mu_n|} p(|\mu_n|) \times S(\theta_i, \phi_i \rightarrow \theta_r, \phi_r) \mathbf{R}_i(\theta_i, \phi_i \rightarrow \theta_r, \phi_r). \quad (14)$$

### 2.2 小波面透射矩阵

如图 2 所示， $\xi_i$  为小波面入射辐射的方向矢量，其方位为  $(\theta_i, \phi_i)$ ； $\xi_t$  为小波面透射辐射的方向矢量，其方位为  $(\theta_t, \phi_t)$ 。入射辐射和透射辐射的夹角余弦为  $\Theta$ ，则只有当  $\cos \Theta > \sin \theta_c$  时才能满足折射定律条件， $\theta_c$  为发生全反射的临界角。由折射定律，可得小波面的外法线方向矢量  $e_n$

$$\begin{cases} e_{nr} = \frac{(n_r \sin \theta_i \cos \phi_i - \sin \theta_t)}{\sqrt{1 + n_r^2 - 2n_r \cos \Theta}} \\ e_{ny} = \frac{n_r \sin \theta_i \sin \phi_i}{\sqrt{1 + n_r^2 - 2n_r \cos \Theta}} \\ e_{nz} = \frac{(n_r \cos \theta_i - \cos \theta_t)}{\sqrt{1 + n_r^2 - 2n_r \cos \Theta}} \end{cases}, \quad (15)$$

式中  $n_r$  为相对折射率。当大气向水体入射时，只有当  $(e_{nz} > 0)$  且  $(e_{nr} > -|\cos \theta_i|)$  或者  $(e_{nz} < 0)$  且  $(e_{nr} < |\cos \theta_i|)$  时，入射辐射才处于小波面的上方；而当水体向大气入射时，只有当  $(e_{nz} > 0)$  且  $(e_{nr} < |\cos \theta_i|)$  或者  $(e_{nz} < 0)$  且  $(e_{nr} > -|\cos \theta_i|)$  时，入射辐射才处于小波面的下方。小波面的透射 Mueller 矩阵为

$$\mathbf{F}_t = \frac{1}{2} \frac{n_w^2 \sin 2\theta_i \sin 2\theta_t}{(\sin b \cdot \cos a)^2} \times \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 a & 1 - \cos^2 a & 0 & 0 \\ 1 - \cos^2 a & 1 + \cos^2 a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\cos a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\cos a \end{bmatrix}, \quad (16)$$

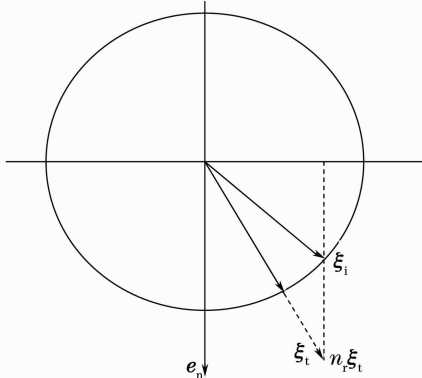


图 2 粗糙海面小波面折射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the facet refraction of rough sea surface

式中  $a = \theta_i - \theta_t, b = \theta_i + \theta_t$ 。(21) 式在没有发生全反射时成立，当发生全反射时，则  $\mathbf{F}_t = 0$ 。同样，由于入射和透射辐射矢量的参考面不在同一平面上，需要进行参考面的旋转。经参考面旋转后的小波面透射矩阵  $\mathbf{T}_t$  为

$$\mathbf{T}_t = \mathbf{L}(\pi - i_2) \mathbf{F}_t \mathbf{L}(i_1), \quad (17)$$

由小波面的外法线方向矢量  $e_n$ ，可得方位  $(\theta_i, \phi_i)$  入射，方位  $(\theta_t, \phi_t)$  透射的小波面概率  $p(|\mu_n|) = p(|e_{nz}|)$ 。同样还需考虑入射辐射和透射辐射的小波面遮挡效应系数，并考虑辐照度余弦定律，则最终小波面的透射矩阵为

$$t(\theta_i, \phi_i \rightarrow \theta_t, \phi_t) = \frac{\cos \Theta_i \cos \Theta_t}{|\cos \theta_t| |\mu_n| (\cos \Theta_i - n_r \cos \Theta_t)^2} \times p(|\mu_n|) S(\theta_i, \phi_i \rightarrow \theta_t, \phi_t) \mathbf{T}_t(\theta_i, \phi_i \rightarrow \theta_t, \phi_t), \quad (18)$$

式中  $\Theta_i, \Theta_t$  分别为入射角和折射角。

## 3 粗糙海面模型验证

### 3.1 粗糙海面瑞利大气矢量辐射传输问题验证

瑞利大气是一种理想的大气，其假设大气层是由纯大气分子组成，而不包含任何其它物质。由于瑞利大气辐射传输问题相对比较简单，通常被用于检验辐射传输计算模型的计算精度。在文献[15]中，利用 MODIS 精确瑞利散射查找表验证了平静海面条件下 PCOART 计算大气瑞利散射的精度，结果表明 PCOART 计算获得的辐射斯托克斯矢量  $(\mathbf{I}, \mathbf{Q}, \mathbf{U}, \mathbf{V})^T$  是精确的，且其中  $\mathbf{I}$  元素的相对误差均小于 0.25%。同样仍以 MODIS 精确瑞利散射查找表计算得到的粗糙海面瑞利散射斯托克斯矢量为标准，对 PCOART 计算得到的粗糙海面瑞利散射斯托克斯矢量进行精度验证。利用 PCOART 数值解下述条件下的瑞利大气矢量辐射传输问题

1) 大气和海水各一层。大气层由纯大气分子组成，其光学厚度取为 AQUA/MODIS 各波段等效的瑞利散射光学厚度，单次散射率为 1.0；海水层为纯吸收，其光学厚度设为 10，且海底反射率为 0；

2) 海面 10 m 处的风速分别取 5 m/s 和 15 m/s；

3) 大气顶太阳入射辐照度取为 AQUA/MODIS 各波段等效的太阳辐照度，天顶角取值从 0 到 60°，间隔为 30°；

4) 遥感观测天顶角取 100 阶勒让德多项式在 (0, 1) 区间上的 0 点，间隔约为 1.8°。

瑞利散射相矩阵取为

$$P(\alpha) = \frac{3}{2} \frac{(1-\delta)}{(1+(\delta/2))} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left( \frac{1+\delta}{1-\delta} + \cos^2 \alpha \right) & -\frac{1}{2} (1 - \cos^2 \alpha) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} (1 - \cos^2 \alpha) & \frac{1}{2} (1 + \cos^2 \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\delta)}{(1-\delta)} \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (19)$$

式中  $\delta$  为退偏系数, 取  $\delta=0.0279^{[19]}$ 。限于篇幅, 这里仅给出太阳天顶角  $30^\circ$  时 412 nm 波段的验证结果, 其它太阳天顶角及波段验证结果与此类似。图 3 为海面风速为 5 m/s 和 15 m/s 时, PCOART 计算瑞利散射斯托克斯矢量  $I$  元素值(即瑞利散射辐亮度)的相对误差, 结果表明 PCOART 计算瑞利散射辐亮度的相对误差小于 0.5%。图 4 为海面风速为 15 m/s

时 PCOART 计算瑞利散射斯托克斯矢量  $Q$  和  $U$  元素值与 MODIS 精确瑞利散射查找表计算结果的比较(瑞利散射斯托克斯矢量  $V$  元素为 0)。从图 3 和图 4 可以看出, PCOART 计算得到的粗糙海面大气瑞利散射斯托克斯矢量是精确的, 且计算获得的瑞利散射辐亮度相对误差小于 0.5%。

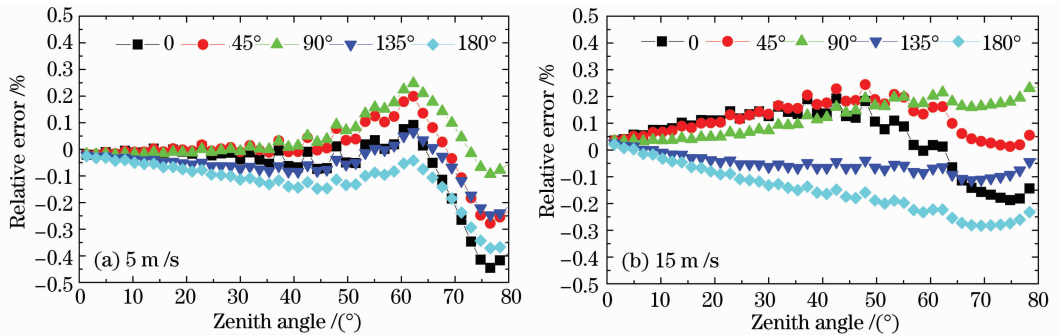


图 3 海面风速为 5 m/s(a), 15 m/s (b) 时, PCOART 计算瑞利散射斯托克斯矢量  $I$  元素的相对误差

Fig. 3 Relative errors of the component  $I$  of the Stokes vector calculated by PCOART with sea surface wind speed (a) 5 m/s, (b) 15 m/s

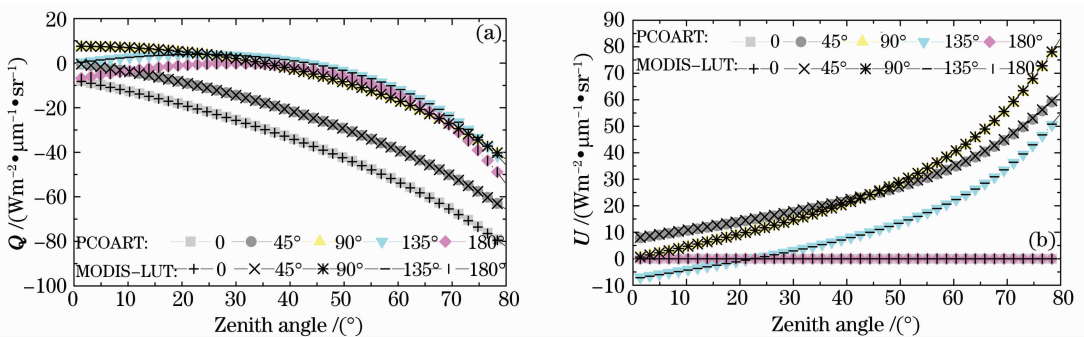


图 4 PCOART 与 MODIS 精确瑞利散射查找表计算瑞利散射斯托克斯矢量  $Q$  和  $U$  元素值的比较(海面风速 15 m/s)

Fig. 4 Comparison of the components  $Q$  and  $U$  of the Stokes vector between PCOART and MODIS LUT with sea surface wind speed of 15 m/s

### 3.2 粗糙海面海洋-大气耦合辐射传输问题验证

通过与 MODIS 精确瑞利散射查找表计算瑞利散射斯托克斯矢量的比较, 说明 PCOART 处理粗糙海面矢量辐射传输过程是完全正确的。但瑞利大气相对较为简单, 需要进一步对 PCOART 计算复杂的粗糙海面海洋-大气耦合辐射传输问题进行验证。到目前为止, 国内外尚缺乏粗糙海面的海洋-大

气耦合矢量辐射传输模型, 因此无法直接来验证 PCOART 计算粗糙海面海洋-大气耦合矢量辐射传输问题的精度。利用 Jin 等<sup>[21]</sup>基于离散纵标法研制的标量海洋-大气耦合辐射传输模型 COART, 对 PCOART 计算粗糙海面海洋-大气耦合辐射传输问题的精度进行验证。分别利用 COART 和 PCOART 计算以下条件的海洋-大气耦合辐射传输

问题：

- 1) 太阳天顶角为  $30^\circ$ ；
- 2) 美国标准大气模式(US62),且不含气溶胶；
- 3) 粗糙海面,且海面 10 m 处的风速分别取 5 m/s和 15 m/s；
- 4) 无限深水体,叶绿素浓度为  $1.0 \mu\text{g/L}$ ,且垂向均匀分布；
- 5) 水体颗粒采用 Petzold 散射相函数<sup>[21]</sup>。

由于 COART 模型中的一些参数和处理方法是隐含固化的,无法修改,因此两者仍存在以下计算条件的差异：

1) COART 考虑大气分子的吸收,而 PCOART 不考虑大气分子吸收(PCOART 模型也可以设置大气分子吸收层,但由于无法获取 COART 模型中的大气分子吸收系数,PCOART 计算时予以忽略)。对避开大气分子强吸收带的波段,大气分子吸收的影响非常微弱；

2) 由于 Petzold 散射相函数具有强烈的前向散射特征,其精确计算需很大的高斯离散点数和傅里

叶展开项数,这将极大地增加计算量。为了减小计算量,PCOART 采用 Delta-M 方法<sup>[22]</sup>对 Petzold 散射相函数进行前处理<sup>[15]</sup>。由于 Delta-M 方法将强烈的前向散射部分直接当作透射光,这将对下行的辐亮度产生影响,特别是极大地削弱了水下太阳折射光附近方向的下行辐亮度。

图 5 为海面风速 15 m/s 时,PCOART 与 COART 计算获得的海洋-大气耦合系统不同高度处(大气顶、海表面和 5 m 水下) 412 nm 辐亮度结果的比较。图 5 中横坐标为观测天顶角,  $0^\circ \sim 90^\circ$  表示上半球上行辐亮度,  $90^\circ \sim 180^\circ$  表示下半球下行辐亮度。可以看出,PCOART 与 COART 的计算结果非常一致,特别是大气顶和海表面的辐亮度场分布。即使在具有高度非线性结构的太阳耀斑区,PCOART 计算结果也与 COART 一致。但在水下 5 m 深度处,PCOART 与 COART 计算获得的下行辐亮度分布存在一定的差异,特别是在水下太阳折射光方向附近的下行辐亮度,主要原因是 PCOART 采用 Delta-M 方法削弱了下行辐亮度。

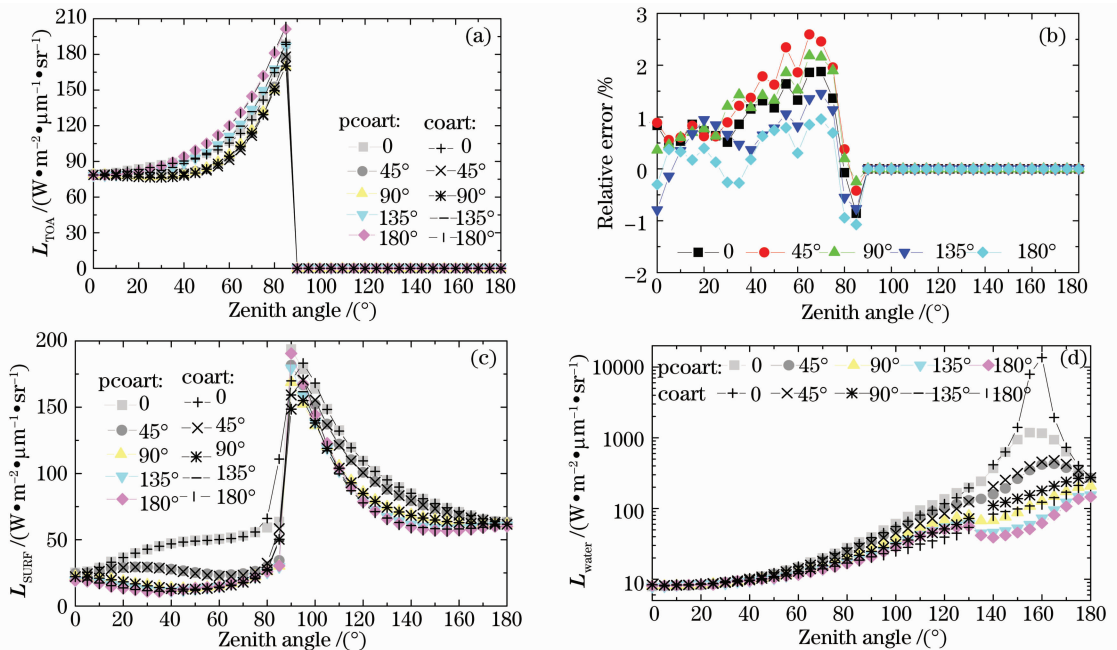


图 5 PCOART 与 COART 计算 412 nm 辐亮度结果比较(海面风速 15 m/s)。(a)大气顶辐亮度；  
(b)大气顶辐亮度计算相对误差；(c)海表面辐亮度；(d)水下 5 m 辐亮度

Fig. 5 Comparison of the radiances at 412 nm between PCOART and COART with the sea surface wind speed of 15 m/s.  
(a) radiances at top of atmosphere; (b) relative errors of radiance at top of atmosphere; (c) radiances at the sea surface; (d) radiances at the underwater 5 m depth

## 4 结 论

在已开发的平静海面海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型 PCOART 的基础上,增加粗糙

海面计算模块,使得 PCOART 能模拟实际粗糙海面的海洋、大气辐射传输问题。首先详细导出了粗糙海面海-气界面层的反射矩阵、透射矩阵和源函数

矢量。利用小波面假设及 Cox&Munk 小波面分布概率密度函数,并考虑小波面倾斜对入射辐射和反射辐射的遮挡影响,以及辐射斯托克斯矢量参考面的旋转,建立了小波面的反射矩阵和透射矩阵。在此基础上,分别利用瑞利大气矢量辐射传输问题和海洋-大气耦合辐射传输问题对粗糙海面模型进行了验证。以 MODIS 精确瑞利散射查找表计算得到的粗糙海面瑞利散射斯托克斯矢量为标准,对模型计算得到的粗糙海面瑞利散射斯托克斯矢量进行精度验证。结果表明,模型计算得到的粗糙海面大气瑞利散射斯托克斯矢量是精确的,且计算获得的瑞利散射辐亮度相对误差小于 0.5%。利用标量海洋-大气耦合辐射传输模型 COART,对本模型计算粗糙海面海洋-大气耦合辐射传输问题的精度进行验证,结果表明,两者计算结果非常一致,特别是大气顶和海表面的辐亮度场分布。即使在具有高度非线性结构的太阳镜面反射方向(太阳耀斑区),本模型计算结果也与 COART 一致,说明建立的粗糙海面计算模型是精确的。相对已有的标量海洋-大气耦合辐射传输模型,本模型不仅可以获得整个海洋-大气耦合系统的辐亮度场,而且可以获得完整的辐射斯托克斯矢量场,对发展偏遥感技术具有重要意义<sup>[23]</sup>

### 参 考 文 献

- 1 G. N. Plass, G. W. Kattawar, F. E. Catchings. Matrix operator theory of radiative transfer. I: Rayleigh scattering[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(2): 314~329
- 2 K. Stamnes, P. Conklin. A new multi-layered discrete ordinate approach to radiative transfer calculations in anisotropically scattering atmospheres [J]. *J. Quant. Spect. Rad. Trans.*, 1984, **31**(3): 273~282
- 3 A. H. Karp, J. J. Greenstadt, A. J. Filmore. Radiative transfer through an arbitrary thick scattering atmosphere[J]. *J. Quant. Spect. Rad. Trans.*, 1980, **24**(5): 391~406
- 4 D. G. Collins, W. G. Blattner, M. B. Wells *et al.*. Backward Monte-Carlo calculations of polarization characteristics of the radiation emerging from a spherical shell atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11): 2684~2705
- 5 R. E. Bellman, R. Kalaba, M. C. Prestrud. Invariant Imbedding and Radiative Transfer in Slabs of Finite Thickness [M]. New York: American Elsevier, 1963
- 6 S. Chandrasekhar. Radiative Transfer[M]. New York: Dover Publications, 1960
- 7 W. M. Irvine. Multiple scattering in planetary atmospheres[J]. *Icarus*, 1975, **25**(2): 175~204
- 8 A. W. Siegfried, Gerstl, Andrew Zardecki. Discrete-ordinated finite-element method for atmospheric radiative transfer and remote sensing[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(1): 81~93

- 9 V. B. Kisselev, L. Roberti, G. Perona. Finite-element algorithm for radiative transfer in vertically inhomogeneous media; numerical scheme and applications [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(36): 8460~8471
- 10 K. Stamnes, S. C. Tsay, W. Wiscombe *et al.*. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(12): 2502~2509
- 11 C. D. Mobley. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Water[M]. Academic Press, San Diego, 1994
- 12 Z. H. Jin, K. Stamnes. Radiative transfer in nonuniformly refracting layered media; atmosphere-ocean system[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(3): 431~442
- 13 Frank Fell, Juergen Fischer. Numerical simulation of the light field in the atmosphere-ocean system using the matrix-operator method[J]. *J. Quant. Spect. Rad. Trans.*, 2001, **69**(3): 351~388
- 14 Zhang Jian, He Xiaoxiong, Zhao Fengsheng. Simulation of the properties of information relating to ocean colour remote sensing by radiative transfer in the atmosphere-ocean system[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2003, **20**(5): 623~628  
张 鉴, 何晓雄, 赵凤生. 利用大气-海洋系统辐射传输模拟水色遥感信息量的变化特性[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(5): 623~628
- 15 He Xianqiang, Pan Delu, Bai Yan *et al.*. Vector radiative transfer numerical model of coupled ocean-atmosphere system using matrix-operator method[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**(3): 442~452
- 16 He Xianqiang, Pan Delu, Bai Yan *et al.*. Exact computation of atmospheric diffuse transmittance for Chinese ocean color and temperature scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 626~633  
何贤强, 潘德炉, 白 雁 等. 海洋水色水温扫描仪精确大气漫射透射比计算[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 626~633
- 17 He Xianqiang, Pan Delu, Zhu Qiankun *et al.*. Exact rayleigh scattering calculation for Chinese ocean color and temperature scanner[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 145~151  
何贤强, 潘德炉, 朱乾坤 等. 海洋水色及水温扫描仪精确瑞利散射计算[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 145~151
- 18 C. Cox, W. Munk. Measurement of the roughness of the sea surface from photography's of the sun's glitter[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(11): 838~850
- 19 A. T. Young. Revised depolarization corrections for atmospheric extinction[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(20): 3427~3428
- 20 Z. H. Jin, Thomas P. Charlock, Ken Rutledge *et al.*. Analytical solution of radiative transfer in the coupled atmosphere-ocean system with a rough surface[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(28): 7443~7455
- 21 T. Petzold. Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters[M]. SIO Ref. 72-78 San Diego: Scripps Institution of Oceanography Ref, 1972
- 22 W. J. Wiscombe. The delta-M method: rapid yet accurate radiative flux calculations for strongly asymmetric phase functions [J]. *J. the Atmospheric Sciences*, 1977, **34**(9): 1408~1422
- 23 Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing *et al.*. Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 999~1003  
叶 松, 方勇华, 孙晓兵 等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 999~1003