

doi: 10.3788/gzxb20164502.0201001

基于蒙特卡罗法研究海水中矿物质的光传输特性

程天际, 胡帅, 高太长, 赵世军

(解放军理工大学 气象海洋学院, 南京 211101)

摘 要: 为了研究多次散射效应下偏振光在含矿物质粒子海水中的传输特性, 建立了一种基于蒙特卡罗法的矢量辐射传输模型. 验证了模型准确性, 并利用该模型研究了矿物质粒子复折射率、粒子群平均半径和入射光偏振状态对传输特性的影响. 模拟仿真结果表明, 不同类型矿物质粒子中, 较小复折射率实部的粒子, 传输特性对复折射率实部变化的敏感性较大; 较大复折射率实部的粒子, 传输特性对复折射率实部变化敏感性较小. 粒子复折射率的虚部是影响光波传输特性的另一重要因素, 粒子的吸收性越大, 其传输效果越差. 随着海水矿物质粒子群平均半径变大, 光波透射率降低, 反射率增大. 圆偏振光与自然光在含矿物质粒子海水中的传输特性相对接近, 在海水中, 透射率最高的是垂直偏振光, 最差的是圆偏振光; 反射率最大的是自然光, 最小的是水平偏振光. 其中水平偏振光传输特性受入射光入射角影响较大.

关键词: 海洋光学; 矢量辐射传输; 蒙特卡罗; 矿物质颗粒; 多次散射效应; 透射率; 反射率

中图分类号: P733.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0201001-9

Study on Propagation Characteristics of Polarized Light in Seawater Containing Mineral Particles Based on Monte Carlo Method

CHENG Tian-ji, HU Shuai, GAO Tai-chang, ZHAO Shi-jun

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: In order to study the transmission characteristics of polarized light in seawater with mineral particles suspended, a Monte Carlo based vector radiative transfer model considering the multiscattering effect was proposed. The accuracy of the model was verified by literature results, and the influences of the mineral particles' micro-physical properties as well as polarization states on transmission characteristics of incident light were studied respectively. The result shows that there is a negative correlation between the sensitivities of propagation properties' response to the variation of the refractive index and the real part of refractive. The imaginary part of refractive index which denotes the absorption ability of particles is an other important factor that influences the propagation characteristics of light. The transmission rate will decrease rapidly with the increase of the imaginary part of refractive index. With the increasing of effective radius, the transmission rate of light drops gradually, but the fact is reversed for the reflection rate. The transmission properties of circularly polarized light and natural light are similar. The transmission rate of vertically polarized light is the largest, while the transmission ability for circularly polarized is the worst. The reflection ability of natural light is the strongest among the four kinds of light, but the reflection ability of horizontally polarized light is the worst. The incident angle of horizontally polarized light has a more significant influence on the transmission properties than the other three types of polarized light.

Key words: Ocean optics; Vector radiative transfer; Monte Carlo; Mineral particle; Multiple scattering effect; Transmission rate; Reflection rate

OCIS Codes: 010.4450; 010.5620; 290.5850; 290.5855

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 41576171, 41575025)资助

第一作者: 程天际(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋光学. Email: cheng_tianji@163.com

导师(通讯作者): 高太长(1958-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为大气海洋探测学. Email: 2009gaotc@gmail.com

收稿日期: 2015-09-17; 录用日期: 2016-01-04

0 引言

海水中大量悬浮矿物质粒子尺寸在微米级,可对太阳辐射进入海水中的光波产生较强的散射作用^[1-2],对海洋卫星遥感、蓝绿激光对潜通信、海洋光学探测和海洋辐射传输产生重大的影响^[3-4].特别是沿海地区,海浪冲击陆地产生的土地侵蚀和入海口江、河排出物富含大量的矿物质,往往是地区光学特性的决定因素^[5].海水中所含矿物质粒子的层度增加,多次散射增强,散射效应将会更加显著.实际不同区域海水中所含矿物质粒子的复折射率、粒子群平均半径各不相同,使其散射特性具有很大差异,导致其光的传输特性具有很大改变.由于光的偏振特性,在处理多次散射问题中采用仅考虑光的强度信息的标量法是不精确的^[6-7].且散射光的偏振特性可以应用于目标物特性识别^[8-10]、水下成像、蓝绿激光水下通信等,具有重大应用价值.因此,研究多次散射效应下偏振光在不同矿物质粒子的传输特性具有重大意义.

对于海洋悬浮矿物质粒子传输特性的研究,近年来成为研究热点.1997年,M. Sydor等研究证明,在近岸的海洋水体中,悬浮矿物质粒子对海洋卫星遥感产生很大的影响^[11].2002年,K. Y. H. Gin等通过大量分析研究证明,即使在远洋的水体中,相对浓度较少的悬浮矿物质粒子也会在一定程度上影响海色卫星遥感精度,使测量结果产生较大误差^[12].2004年,Babin等对干旱地区多种矿物质进行了实验室测量,分析了其特性,其矿物质粒子样品大多取自陆地,也忽略了光的偏振因素的影响^[13].2008年,周雯等利用Mie理论模型对海水中不同矿物质的散射和吸收特性进行了模拟计算和分析,得到了不同参量变化条件下对矿物质散射和吸收特性的影响结果^[14].相对而言,目前对于悬浮矿物质粒子遥感反演的研究较多^[15-18],而对于矿物质粒子光学传输特性研究相对较少,且多数研究仅考虑光强度信息的光学传输特性,忽略了光的偏振因素影响,对于海洋辐射传输结果会产生一定误差.为了得到更为精确的悬浮矿物质粒子散射特性,本文利用蒙特卡罗方法,采用拒绝法对光子散射方向进行抽样,建立了蒙特卡罗矢量辐射传输模型.验证了模型的准确性,并对海水中矿物质粒子进行了矢量辐射传输模拟,研究分析多次散射效应下偏振光在不同矿物质粒子中的传输特性.

1 矢量辐射传输的基本物理参数

1.1 Stokes 矢量

光是电磁波的一种表现形式,光的强度和偏振特性可以用Stokes矢量准确描述,即

$$\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T \quad (1)$$

式中 I 表示光的强度, Q 表示偏振光中垂直或水平方向偏振的比例, U 表示偏振光中与垂直或水平方向成 45° 方向偏振的比例, V 表示左旋偏振分量与右旋偏振分量之差.

各分量的定义及关系为

$$\begin{cases} I = E_1 E_1^* + E_p E_p^* \\ Q = E_1 E_1^* - E_p E_p^* \\ U = E_1 E_p^* + E_p E_1^* \\ V = i(E_1 E_p^* - E_p E_1^*) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 E_1 、 E_p 为平行和垂直于定义参考平面的电场分量.

1.2 旋转变换矩阵

Stokes矢量是在某一参考平面上定义的.在辐射传输过程中,光线会发生线路改变导致Stokes矢量相对应的参考面也要发生旋转改变,变换前后Stokes矢量计算方法为

$$\mathbf{S}' = \mathbf{L}(\chi) \mathbf{S} \quad (3)$$

式中 \mathbf{S}' 为新参考平面定义下的Stokes矢量, χ 为沿着光传播的方向看过去,参考平面顺时针旋转的角度. $\mathbf{L}(\chi)$ 为Stokes矢量的旋转变换矩阵,其具体参量表达为

$$\mathbf{L}(\chi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\chi & \sin 2\chi & 0 \\ 0 & -\sin 2\chi & \cos 2\chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

1.3 Müller 矩阵

光在海水中传播,碰到海水中的矿物质粒子将会发生散射.粒子的散射特性可用Müller矩阵来表示,如式(5)所示,粒子的Müller矩阵是采用Mie散射理论进行计算的.

$$\mathbf{F}(\Theta) = \begin{pmatrix} F_{11}(\Theta) & F_{12}(\Theta) & F_{13}(\Theta) & F_{14}(\Theta) \\ F_{21}(\Theta) & F_{22}(\Theta) & F_{23}(\Theta) & F_{24}(\Theta) \\ F_{31}(\Theta) & F_{32}(\Theta) & F_{33}(\Theta) & F_{34}(\Theta) \\ F_{41}(\Theta) & F_{42}(\Theta) & F_{43}(\Theta) & F_{44}(\Theta) \end{pmatrix} \quad (5)$$

当电磁波在传输过程中碰到粒子并发生散射作用时,已知入射光Stokes矢量 \mathbf{S}_m ,则散射光Stokes矢量 \mathbf{S}_{out} 为

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{F}(\Theta) \mathbf{S}_m \quad (6)$$

2 蒙特卡罗矢量辐射传输模型的建立

蒙特卡罗法是一种基于随机抽样技术的统计模拟方法,是模拟辐射传输过程的有效手段.本文通过把光子辐射传输过程分解为自由移动、散射过程,并采用加权估计法计算光子的透过率与反射率,建立了相应的蒙特卡罗矢量辐射传输模型.

2.1 光子自由游动

自由游动指光子在传输过程中,从一次散射到下一次散射之间运动的过程.光子的自由行程是根据布尔格定律,求解出累计概率分布函数并反解得到的,即

$$L_i = -\frac{1}{k_{ex}} \ln \zeta_1 \quad (7)$$

式中 L_i 为游动的距离, ζ_1 为 $[0, 1]$ 区间的均匀分布随机数, k_{ex} 为消光系数.光子经过自由游动发生下一次散射的坐标与原始坐标关系为

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + u_x L_i \\ y_i = y_{i-1} + u_y L_i \\ z_i = z_{i-1} + u_z L_i \end{cases} \quad (8)$$

式中 $s = (u_x, u_y, u_z)$ 为光子运动的方向余弦, $u_x = \sin\theta\cos\varphi$, $u_y = \sin\theta\sin\varphi$, $u_z = \cos\theta$; θ 和 φ 分别为光子传播方向的入射角和圆周角.

2.2 光子散射过程

散射过程主要包括两个部分:一是光子散射后新运动方向的随机产生,二是散射后光的新偏振状态的计算.蒙特卡罗算法中,对于标量辐射传输的计算,相对简单,其散射方向的方位角在 $[0, 2\pi]$ 区间均匀分布,与入射角无关.而当考虑光的偏振特性时,则相对较为复杂,偏振光散射方向的确定与散射后 Stokes 矢量的求解如下所示.

散射后的 Stokes 矢量为

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{F}(\Theta) \mathbf{L}(-i_1) \mathbf{S}_{in} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{F}(\Theta)$ 为 Müller 矩阵, $\mathbf{L}(-i_1)$ 为旋转矩阵,作用是将入射光 Stokes 矢量由入射子午面(入射光线和 z 轴构成的平面)旋转至散射平面.在散射平面上入射光碰见粒子产生散射,散射角度为 Θ ,再将散射平面上散射的 Stokes 矢量旋转至散射子午面上(散射光和 z 轴构成的平面).这样就得到了散射后的 Stokes 矢量(见图 1).

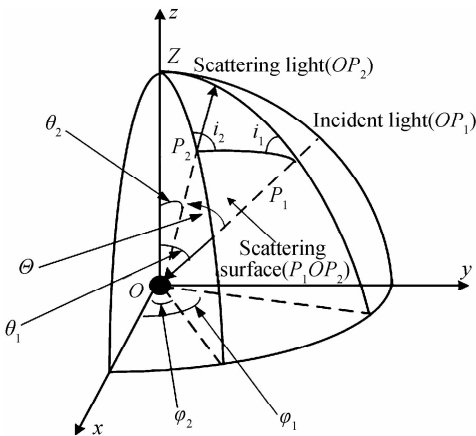


图 1 矢量辐射传输散射过程模拟图

Fig. 1 Scattering process of vector radiative transfer

对于在粒子随机取向或球形假设条件下,散射光 Stokes 矢量 \mathbf{S}_{out} 第一分量 I_{out} 为

$$I_{out} = I_{in} F_{11} + Q \cdot F_{12} \cos 2i_1 - U \cdot F_{12} \sin 2i_1 \quad (10)$$

式中 I_{in} 为入射光 Stokes 矢量 \mathbf{S}_{in} 第一分量, i_1 为入射子午面与散射平面夹角, F_{12} 为 Müller 矩阵 $\mathbf{F}(\Theta)$ 第一行第二列元素.

其最大值求取方法为

$$I_{out, max} = \max(I_{in} F_{11}(\Theta) + \sqrt{Q^2 + U^2} \cdot F_{12}(\Theta)) \quad (11)$$

式中 $F_{11}(\Theta)$ 为 Müller 矩阵 $\mathbf{F}(\Theta)$ 第一行第一列元素.

之后采用拒绝法求解散射方向,对 Θ 和 i_1 进行抽样.首先随机生成 Θ 和 i_1 ,代入式(10)得到 I_{out} ,代入式(11)得到 $I_{out, max}$.对 $I_{out, max}$ 进行随机分层 $\xi I_{out, max}$, ξ 为 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数.比较 I_{out} 和 $\xi I_{out, max}$ 的大小,如果 $I_{out} \geq \xi I_{out, max}$,则接受此 Θ 和 i_1 ;如果 $I_{out} < \xi I_{out, max}$,则拒绝接受此 Θ 和 i_1 ,并重新随机生成 Θ 和 i_1 ,以此类推.其实质上是利用每个随机数 ξ 生成一个抽样区域,当某点 I_{out} 越大,其被不同 $\xi I_{out, max}$ 抽样区域抽中的概率越大,其被接受 Θ 和 i_1 的概率也越大.

拒绝法得到光子散射方向的具体步骤如图 2 所示.

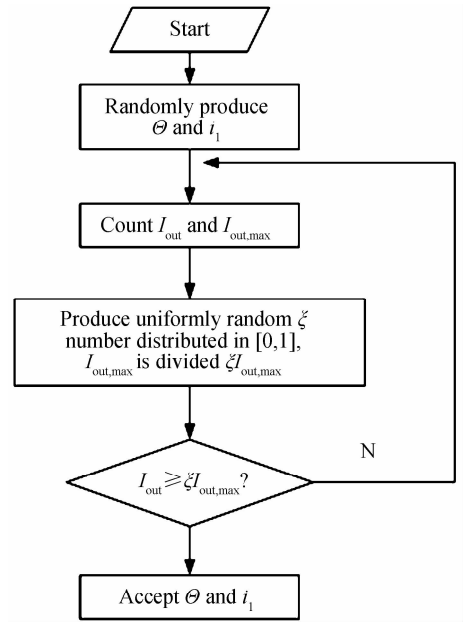


图 2 拒绝法求解散射方向流程图

Fig. 2 Flow chart of rejection method to sample scattering directions

在获得光子新的散射方向后,利用球面三角余弦定理,算出 Θ 和 i_1 的光子的新方向余弦 i_2 , θ_2 和 φ_2 .

$$\theta_2 = \arccos(\cos\theta_1 \cos\Theta + \sin\theta_1 \sin\Theta \cos i_1) \quad (12)$$

$$i_2 = \begin{cases} \arccos\left(\frac{\cos\theta_1 - \cos\theta_2 \cos\Theta}{\sin\theta_2 \sin\Theta}\right) & (0 < i_1 < \pi) \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{\cos\theta_1 - \cos\theta_2 \cos\Theta}{\sin\theta_2 \sin\Theta}\right) & (\pi < i_1 < 2\pi) \end{cases} \quad (13)$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \varphi_1 - \arccos\left(\frac{\cos\Theta - \cos\theta_1 \cos\theta_2}{\sin\theta_1 \sin\theta_2}\right) & (0 < i_1 < \pi) \\ \varphi_1 + \arccos\left(\frac{\cos\Theta - \cos\theta_1 \cos\theta_2}{\sin\theta_1 \sin\theta_2}\right) & (\pi < i_1 < 2\pi) \end{cases} \quad (14)$$

式中 θ_1 表示入射光与 z 轴的夹角, θ_2 表示反射光与 z 轴的夹角.

2.3 光子传输特性

复杂的光强度空间积分和数值积分过程会造成透射率与反射率计算误差, 为了避免此类误差, 采用加权估计法计算透射率与反射率.

光子发生散射, 散射后的光子能量是在该次散射入射能量基础上, 以单散射反照率为比例衰减, 即

$$S'_{out, new} = \frac{S'_{out}}{S'_{out}(1)} \cdot S_m(1) \cdot \bar{\omega} \quad (15)$$

式中, $S_m(1)$ 为该次散射入射能量, $\bar{\omega}$ 为单散射反照率.

光子能量衰减程度用权重来进行表示, 当光子经过多次散射, 第 i 次散射后, 光子权重表示为:

$$W_i = W_{i-1} \cdot \bar{\omega} = \bar{\omega}^i \quad (16)$$

式中, W_{i-1} 为第 $(i-1)$ 次散射后光子权重.

散射过程中, 假设光子均有概率透射或反射出空间, 第 k 个光子在第 i 各散射点的透射概率 P_i^k 与反射概率 R_i^k 为

$$\begin{cases} P_i^k = \omega_i \exp(-k_{ex} \frac{H-z_i}{u_{zi}}) G(u_{zi}) \\ R_i^k = \omega_i \exp(-k_{ex} \frac{0-z_i}{u_{zi}}) G(-u_{zi}) \end{cases} \quad (17)$$

式中 $G(u_{zi})$ 为阶跃函数, ω_i 为光子的权重, 表征光子所携带能量的大小, H 为总水层的厚度, z_i 为光子当前位置距离入射面的距离.

将光子在各散射点的透射概率 P_i 与反射概率 R_i 叠加, 即为该光子对透射率 P_{Trans}^k 和反射率 R_{ref}^k 的贡献, 表达式为

$$P_{Trans}^k = P_{dir} + \sum_{i=1}^N P_i^k, R_{ref}^k = \sum_{i=1}^N R_i^k \quad (18)$$

式中 N 表示散射的次数, P_{dir} 为直接透射概率, 可通过比尔定律求得. 若共模拟 M 个光子, 透射率与反射率可看成各光子贡献的平均值, 即

$$\begin{cases} T = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M P_{Trans}^k = P_{dir} + \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N-1} P_i^k \\ R = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M R_{ref}^k = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N-1} R_i^k \end{cases} \quad (19)$$

表 1 蒙特卡罗仿真精度验证

Table 1 Validation of the accuracy of Monte Carlo simulation

Diameter of particle	100 nm		1 000 nm		2 000 nm	
	Transmission rate	Reflection rate	Transmission rate	Reflection rate	Transmission rate	Reflection rate
Essay[19]	0.323 1	0.676 9	0.552 0	0.448 0	0.706 7	0.292 6
Method of this article	0.323 2	0.676 8	0.552 2	0.447 8	0.706 8	0.292 7

蒙特卡罗具体模拟流程图如图 3.

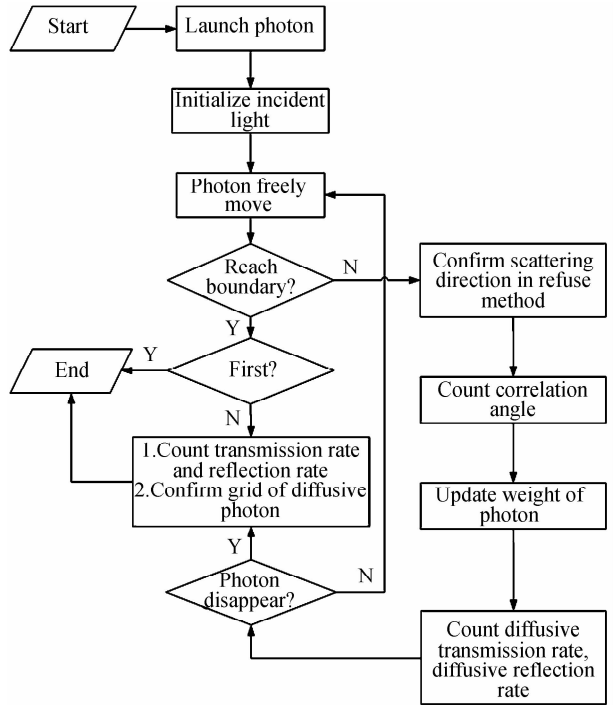


图 3 蒙特卡罗矢量辐射传输模拟流程图

Fig. 3 Flow chart of vector radiative transfer simulation with Monte Carlo method

3 海水矿物质传输特性仿真模拟

3.1 蒙特卡罗矢量辐射传输模型的验证

利用参考文献[19-20]方法验证模型的准确性. 初始光为自然光, Stokes 矢量为 $[1, 0, 0, 0]$, 波长为 $0.6328 \mu\text{m}$, 粒子复折射率为 $1.59-0i$, 传播距离为 $4/k_{sc}$, 共模拟了 10^6 个光子. 将模拟结果与文献[19]结果进行比较, 如表 1.

设粒子粒径分布模型为修正 Gamma 模型: $N(r) = a \cdot r^a \exp(-b \cdot r^x)$, 初始光波长为 $0.6328 \mu\text{m}$, 粒子复折射率为 $1.59-0i$, 传播距离为 $4/k_{sc}$, 在光学厚度相同 ($\tau=4$)、粒径分布不同情况下, 共模拟了 10^6 个光子, 将模拟结果与文献[20]结果进行比较, 如表 2 所示. 由表 1、表 2 中数据可以看出, 本模型模拟结果是准确的.

表2 蒙特卡罗仿真精度验证
Table 2 Validation of the accuracy of Monte Carlo simulation

Gamma distribution a, b, α, γ	$\langle g \rangle$	k_{sc}/km	Essay[20]	Method of this article
1,0,0,0 0.000 $1 < r < 0.001$	1.6×10^{-5}	1.369×10^{-21}	0.311 3	0.311 1
1,1,0,1 0.000 $1 < r < 0.001$	1.6×10^{-5}	1.369×10^{-21}	0.3112	0.310 9
1,0,0,0 1.0 $< r < 2.0$	0.7154	1.709×10^{-2}	0.6501	0.6498
1,1,0,1 1.0 $< r < 2.0$	0.7115	3.558×10^{-3}	0.6454	0.6452

3.2 粒子复折射率对传输特性影响

利用本模型模拟分析不同复折射率的矿物质粒子对透射率与反射率影响. 模拟过程中光波取自自然光, Stokes 矢量[1,0,0,0], 波长 500 nm.

海水矿物质粒子粒径分布模型为

$$n(r) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} r \ln \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right] \quad (20)$$

式中, r_g 表示平均半径, N 代表数密度(个/ cm^3), σ_g 表示标准差. 粒径分布中最小粒子半径 0.05 μm , 最大粒子半径 100 μm , 该粒径分布范围符合 Stramski 所测得矿物质粒径分布结果. 粒子群平均粒子半径 0.5 μm . 不同类型矿物质粒子相对于海水的复折射率实部取 1.1、1.3、1.5 三种参数, 符合 Kerr^[21] 对不同类型矿物质粒子复折射率实部测量结果. 复折射率虚部采用较弱与较强两种数据, 较弱虚部数据采用 Stramski^[22] 对大量碎屑粒子显微分光光度计实测数据分析得到的模型, 虚部数据为 2.9×10^{-4} ; 较强虚部数据为 8×10^{-3} . 光子穿过水层厚度(即传播距离)的变化范围 0~1 km, 入射角变化范围 $0^\circ \sim 85^\circ$, 模拟光子数 10^8 个. 吸收系数、散射系数、单次散射反照率如表 3, 透射率、反射率结果如图 4、图 5.

由图可知, 传播距离 0~1 km 逐渐增大, 透射率逐渐减少, 反射率逐渐增大. 分析其原因, 主要是传播距离增大, 光子不断与矿物质粒子产生碰撞, 导致光子能量不断减小, 光波不断衰减, 透射率降低; 同时, 随着传播距离增大, 多次散射效应增强, 导致后向散射能量增加, 表现为反射率增大. 也可以看出, 在传播距离不断增大过程中, 透射率、反射率初始变化斜率较大, 随后变化较为平缓. 说明随着光波不断往下传播, 其透射

率、反射率对传播距离变化的敏感性迅速降低.

在入射角从 $0^\circ \sim 85^\circ$ 逐渐增大过程中, 透射率逐渐减小, 反射率逐渐增大, 其中当入射光入射角为 0° 时光波的透射率最好, 随着入射角不断增大, 光波透射率逐渐降低, 反射率逐渐增大. 分析其原因, 主要是入射角越小, 入射角余弦值越大, 对于相同厚度海水层, 光波相对传播距离也就越大, 致使透射率降低. 同时多次散射效应的增强, 引起后向反射能量增加, 表现为反射率增大. 也可以看出, 在入射角不断增大过程中, 透射率、反射率初始变化较为平缓, 随后变化斜率较大. 说明随着入射角不断增大, 光波透射率、反射率对光波入射角变化的敏感性迅速增加.

对于不同复折射率的矿物质粒子而言, 复折射率实部越大, 透射率越小, 反射率越大. 当复折射率实部为 1.3、1.5 时, 其透射率、反射率的差异并不是很大. 而当复折射率实部为 1.1 时, 与其其余两种较大复折射率实部的粒子相比, 透射率、反射率差异显著. 例如复折射率实部从 1.3 减小到 1.1, 透射率增加 37.1%, 反射率减小 65.9%; 复折射率实部从 1.5 减小到 1.3, 透射率仅增加 5.8%, 反射率仅减小 5.1%. 说明不同类型矿物质粒子中, 较小复折射率实部的粒子, 传输特性对复折射率实部变化敏感性较大, 较大复折射率实部的粒子, 传输特性对复折射率实部变化敏感性较小. 复折射率虚部决定粒子的吸收性, 虚部越大, 粒子的吸收性越强. 由图可知复折射率虚部对透射率、反射率影响很大, 较大复折射率虚部的粒子会使透射率与反射率大幅降低. 说明粒子的吸收性是影响光的传输效应一个重要参数, 粒子的吸收性越大, 光波透过率及反射率会迅速降低.

表3 不同复折射率粒子的散射特性参数

Table 3 The parameters of scattering characteristics of particles with different refractive indexes

Real part	Imaginary part	Absorption coefficient	Scattering coefficient	Single scattering albedo
1.1	2.9×10^{-4}	0.843 2	18.394 6	0.956 2
1.3	2.9×10^{-4}	0.949 7	18.096 6	0.950 1
1.5	2.9×10^{-4}	0.992 3	17.941 0	0.947 6
1.1	8×10^{-3}	1.924 9	17.300 3	0.899 9
1.3	8×10^{-3}	2.116 6	16.928 4	0.888 9
1.5	8×10^{-3}	2.179 2	16.755 8	0.884 9

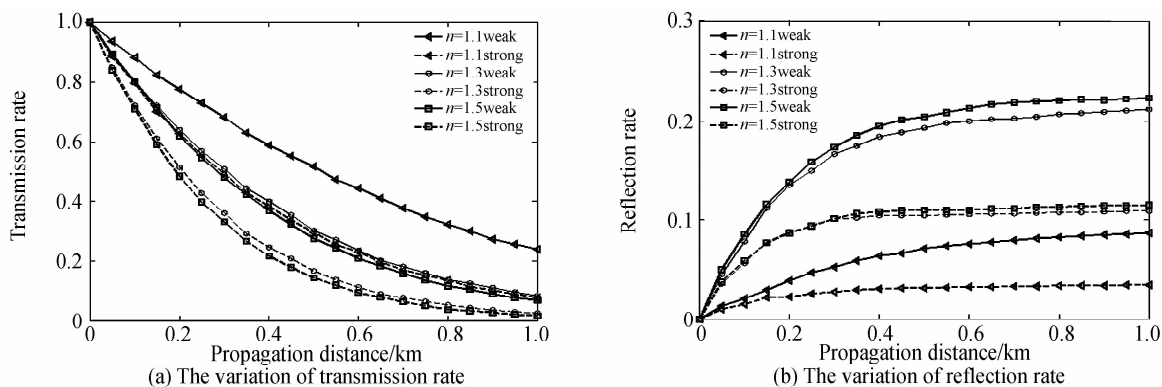


图4 不同复折射率粒子的传输特性随传播距离变化影响

Fig. 4 The variation of light propagation properties with distance for seawater with particle of different refractive index

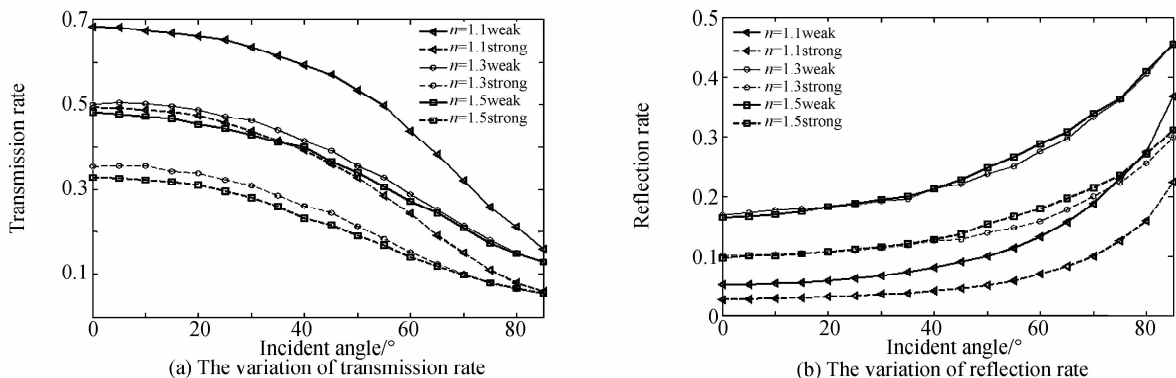


图5 不同复折射率粒子的传输特性随入射角变化影响

Fig. 5 The variation of light propagation properties with incident angle for seawater with particle of different refractive index

3.3 粒子群平均半径对传输特性影响

利用本模型研究海水矿物质粒子群对光波传输特性影响。模拟过程中,光波取自然光,Stokes 矢量 $[1, 0, 0, 0]$,波长 500 nm. 粒子复折射率实部 1.3,虚部采用较弱虚部数据. 粒径分布中最小粒子半径 0.05 μm ,最

大粒子半径 100 μm ,粒子群平均半径取 0.45 μm 、0.5 μm 和 0.55 μm 三个参数. 传播距离的变化范围 0~1 km,入射角变化范围 $0^\circ\sim 85^\circ$,模拟光子数 10^8 个. 吸收系数、散射系数、单次散射反照率如表 4,透射率、反射率结果如图 6、图 7.

表 4 不同平均半径粒子群的散射特性参数

Table 4 The parameters of scattering characteristics of particle with different average radius

Average radius	Absorption coefficient	Scattering coefficient	Single scattering albedo
0.45	0.714 1	14.899 9	0.954 3
0.50	0.949 7	18.096 6	0.950 1
0.55	1.228 2	21.588 0	0.946 2

由图中可以看出,粒子群的平均半径对光波传输特性影响较大,粒子群平均半径越大,其光波透射率越小,反射率越大. 说明海水矿物质大颗粒粒子占的比例越多,光波传播衰减越大,后向散射能量越强.

平均半径越大,光波透射率、反射率对平均半径变化的敏感性也就越大.

在传播距离逐渐增大过程中(参见图 6),粒子群平均半径由 0.5 μm 减小至 0.45 μm ,透射率平均增大 10.4%,反射率平均增大 5.3%. 平均半径由 0.55 μm 减小至 0.5 μm ,透射率平均增大 21.4%,反射率平均增大 8.9%. 说明在传播距离逐渐增大过程中,粒子群

在光波入射角逐渐增大过程中(参见图 7),粒子群平均半径由 0.5 μm 减小至 0.45 μm ,透射率平均增大 20.0%,反射率平均增大 2.2%. 平均半径由 0.55 μm 减小至 0.5 μm ,透射率平均增大 20.2%,反射率平均增大 5.0%. 说明在入射角逐渐增大过程中,光波透射率、反射率对平均半径变化敏感性与粒子群平均半径的大小关联不大.

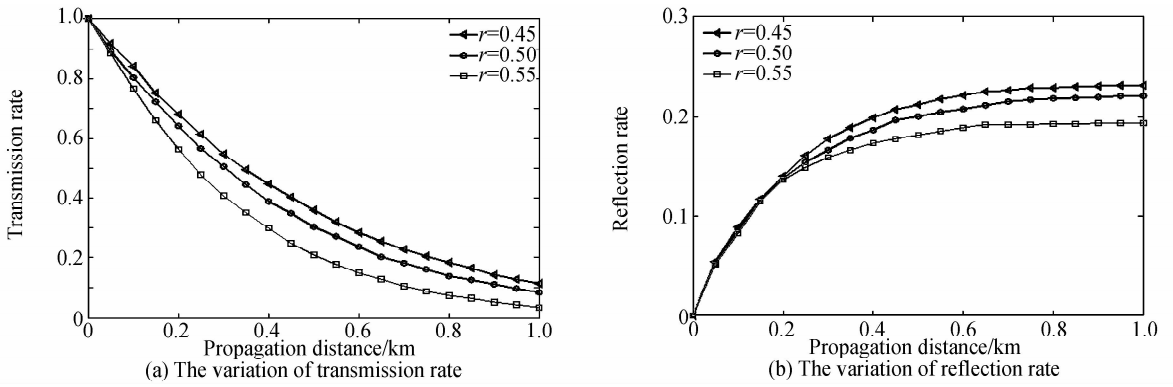


图6 不同平均半径粒子群的传输特性随传播距离变化影响

Fig. 6 The variation of light propagation properties with distance for seawater with particle of different effective radius

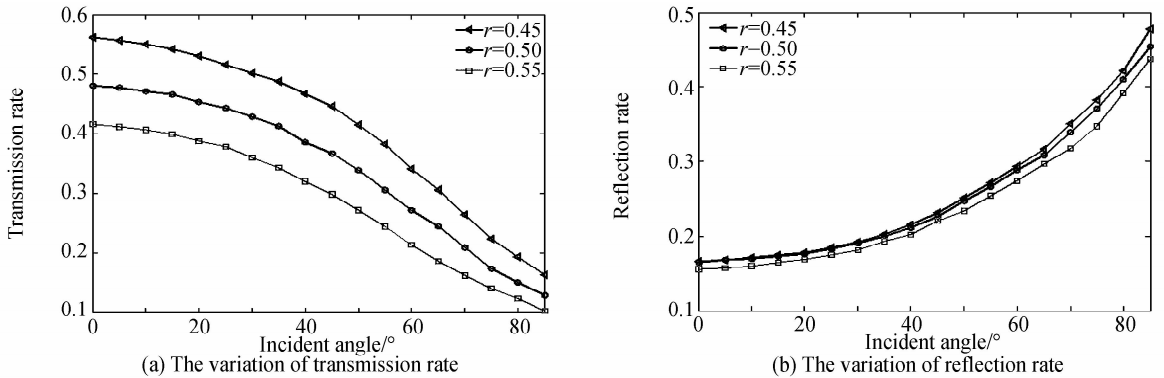


图7 不同平均半径粒子群的传输特性随入射角变化影响

Fig. 7 The variation of light propagation properties with incident angle for seawater with particle of different effective radius

3.4 入射光偏振状态对传输特性影响

利用本模型研究入射光偏振状态对光波传输特性影响. 传播距离取 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 km, 入射角取 0° 、 20° 、 40° 、 60° 和 80° . 讨论不同类型偏振光在海水矿物质粒子中传输特性差异. 模拟过程中, 光波长 500 nm, 矿物质粒子复折射率实部 1.3, 虚部采用较弱虚部数据, 粒径分布中最小粒子半径 $0.05 \mu\text{m}$, 最大粒子半径 $100 \mu\text{m}$, 粒子群平均半径 $0.5 \mu\text{m}$, 模拟光子数 10^8 个. 得到吸收系数为 0.949 7, 散射系数为 18.096 6, 单次散射反照率为 0.950 1, 透射率、反射率结果如表 5、表 6.

由表中可以看出, 在传播距离及入射角较小时, 各

种类型偏振光的透射率、反射率偏差并不是很大, 但随着传播距离及入射角的增加, 不同类型偏振光的透射率、反射率偏差不断增加. 分析其原因, 这是因为随着传播距离及入射角增大, 导致光波传输过程中与粒子的多次散射效应增强, 使得不同偏振光产生的差异不断增大.

分析不同类型偏振光之间的差异, 圆偏振光与自然光的透射率与反射率相对接近, 水平偏振光与垂直偏振光的透射率与反射率相对接近. 透射率最好的是垂直偏振光, 最差的是圆偏振光; 反射率最好的是自然光, 最差的是水平偏振光. 说明光波在海水矿物质粒子中传输时, 垂直偏振光的光波衰减最小, 自然光的后向

表5 传播距离变化下不同入射光的透射率与反射率比较

Table 5 The variation of transmission and reflection rate with the propagation distance for light with different polarization states

Distance /km	Natural light (1,0,0,0)		Horizontally polarized (1,1,0,0)		Vertically polarized (1,-1,0,0)		Circularly polarized (1,0,0,1)	
	Transmission rate	Reflection rate	Transmission rate	Reflection rate	Transmission rate	Reflection rate	Transmission rate	Reflection rate
0.1	0.810 00	0.082 70	0.812 26	0.080 15	0.813 57	0.079 64	0.809 94	0.082 61
0.2	0.645 32	0.138 35	0.651 49	0.133 29	0.651 01	0.134 57	0.645 37	0.138 43
0.3	0.506 16	0.171 09	0.510 35	0.166 80	0.511 29	0.166 42	0.506 91	0.172 02
0.4	0.397 09	0.190 79	0.401 74	0.185 97	0.402 70	0.185 76	0.397 04	0.192 42
0.5	0.305 00	0.203 29	0.310 96	0.198 07	0.311 50	0.197 56	0.305 54	0.204 29

表6 入射角变化下不同入射光的透射率与反射率比较

Table 6 The variation of transmission and reflection rate with incident angle for light with different polarization states

Incident angle/ $^{\circ}$	Natural light (1,0,0,0)		Horizontally polarized (1,1,0,0)		Vertically polarized (1,-1,0,0)		Circularly polarized (1,0,0,1)	
	Transmission rate	Reflection rate	Transmission rate	Reflection rate	Transmission rate	Reflection rate	Transmission rate	Reflection rate
0	0.302 13	0.207 27	0.312 85	0.199 01	0.313 71	0.201 89	0.301 12	0.207 26
20	0.289 12	0.212 18	0.290 21	0.205 72	0.297 34	0.205 01	0.288 37	0.212 53
40	0.228 87	0.241 72	0.232 14	0.234 88	0.232 5	0.230 53	0.228 81	0.240 41
60	0.151 00	0.291 90	0.151 81	0.294 92	0.154 49	0.283 75	0.152 34	0.290 88
80	0.084 30	0.405 51	0.083 52	0.401 93	0.086 01	0.405 62	0.083 89	0.407 32

散射能量最强,而且由表中的数据可得,在入射角由低到高变化过程中,水平偏振光的透射率衰减幅度非常大,说明水平偏振光的传输特性对入射角敏感性很大。

4 结论

本文给出了一种基于蒙特卡罗法的矢量辐射传输模型,利用此模型分析了多次散射效应下,海水矿物质粒子复折射率、粒子群平均半径和入射光偏振状态对传输特性的影响。研究结果表明:

1)不同类型海水矿物质粒子中,较小复折射率实部的粒子,传输特性对复折射率实部变化敏感性较大,较大复折射率实部的粒子,传输特性对复折射率实部变化敏感性较小。粒子复折射率虚部即粒子的吸收性是影响粒子传输特性的重要因素,粒子的吸收性越大,其传输效果越不明显。

2)海水矿物质粒子群平均半径越大,光波透射率越小,反射率越大。在传播距离逐渐增大过程中,粒子群平均半径越大,光波透射率、反射率对平均半径变化的敏感性也就越大。而在入射角逐渐增大过程中,光波透射率、反射率对平均半径变化敏感性与粒子群平均半径大小关联不大。

3)圆偏振光与自然光在海水矿物质粒子中传输特性相对接近,水平偏振光与垂直偏振光的传输特性相对接近。其中透射率最好的是垂直偏振光,最差的是圆偏振光;反射率最好的是自然光,最差的是水平偏振光。其中水平偏振光传输特性受人射角的影响较大。

4)光在海水矿物质粒子的传输中,随着光波不断往下传播,其透射率、反射率对传播距离变化的敏感性迅速减小。入射角不断增大,会导致光波透射率、反射率对光波入射角变化的敏感性迅速增加。

参考文献

[1] STRAMSKI D, WOZNIAK S B, FLATAU P J. Optical properties of Asian mineral dust suspended in seawater[J]. *Limnology & Oceanography*, 2004, **49**(3): 749-755.

[2] BABIN M, STRAMSKI D. Variations in the mass-specific absorption coefficient of mineral particles suspended in water [J]. *Limnology & Oceanography*, 2004, **49**(3): 756-767.

[3] BABIN M, MOREL A, FOURNIER-SICRE V, et al. Light

scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration[J]. *Limnology & Oceanography*, 2003, **48**(2): 843-859.

- [4] STRAMSKI D, BOSS E, BOGUCKI D, et al. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 2004, **61**(1): 27-56.
- [5] CHEN Yan, KONG Jin-ling, SUN Xiao-ming, et al. Retrieval of sea surface suspended sediment concentration in bohai gulf offshore area based on semi-analysis model[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, **30**(3): 33-36,55.
- 陈燕, 孔金玲, 孙晓明, 等. 基于半分析模型的渤海湾近岸海域悬浮泥沙浓度遥感反演[J]. *地理与地理信息科学*, 2014, **30**(3): 33-36,55.
- [6] HU Shuai, GAO TAI-chang, LI Hao, et al. Influence of atmospheric refraction on radiative transfer at visible light band [J]. *Chinese Journal of Physics*, 2015, **64**(18): 184203.
- 胡帅, 高太长, 李浩, 等. 大气折射对可见光波段辐射传输特性影响研究[J]. *物理学报*, 2015, **64**(18): 184203.
- [7] HU Shuai, GAO TAI-chang, LI Hao, et al. Laser Transfer properties of aerosols at near-infrared waveband based on sectional-weighted sampling of scattering phase functions[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(8): 0802008.
- 胡帅, 高太长, 李浩, 等. 基于相函数分段加权采样的近红外激光传输特性[J]. *中国激光*, 2015, **42**(8): 0802008.
- [8] CAO Xian-ping, SUN Ping. Characteristics of degree of polarization of backscattering light in scattering medium at different wavelengths[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 608-613.
- 曹先平, 孙萍. 不同波长的散射介质后向散射光偏振度特性[J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 608-613.
- [9] LI Ying-le, LI Jin, WANG Ming-jun, et al. Characteristics of complex scattering for a medium sphere in rainfall in GHz wave band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 368-372.
- 李应乐, 李瑾, 王明军, 等. 雨介质中球形目标的GHz复合散射特性[J]. *光子学报*, 2013, **42**(3): 368-372.
- [10] GONG Lei, WU Zhen-sen, PAN Yong-qiang. The diagnosis of Rayleigh defect particle position by light scattering character on the optical surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0831003.
- 巩蕾, 吴振森, 潘永强. 利用光散射特性研究光学表面中瑞利缺陷粒子的方位诊断[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 0831003.
- [11] SYDOR D, ARNONE R A. Effect of suspended particulate and dissolved organic matter on remote sensing of coastal and riverine waters[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(27): 6905 - 6912.
- [12] GIN K Y H, KOH S T, LIN I I. Study of the effects of suspended marine clay on the reflectance spectra of phytoplankton[J]. *International Journal of Remote Sensing*,

- 2002, **23**(11), 2163 - 2178.
- [13] BABIN M, STRAMSKI D. Variations in the mass-specific absorption coefficient suspended in water[J]. *Limnology & Oceanography*, 2004, **49**(3): 756 - 767.
- [14] ZHOU Wen, CAO Wen-xi, LI Cai, *et al.* Modeling absorption and scattering properties of mineral particles suspended in seawater based on Mie theory[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, **27**(1): 22-26.
周雯, 曹文熙, 李彩, 等. 海水中矿物质粒子吸收和散射特性 Mie 理论分析[J]. *热带海洋学报*, 2008, **27**(1): 22-26.
- [15] HUANG Jue, CHEN Xiao-ling, CHEN Li-qiong, *et al.* Particles size distribution and its influence on remote sensing retrieval of turbid poyang lake[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(11): 3085-3089.
黄珏, 陈晓玲, 陈莉琼, 等. 鄱阳湖高浑浊水体悬浮粒子物粒径分布及其对遥感反演的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(11): 3085-3089.
- [16] CHEN Bin, HUANG Hai-jun. Study on the suspended sediment concentration and the sediment grain size distribution characteristics in the southwest coastal Laizhou Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, **33**(4): 436-460.
陈斌, 黄海军. 莱州湾西南岸海域悬浮泥沙与沉积物粒度分布特征[J]. *海洋通报*, 2014, **33**(4): 436-460.
- [17] LV Jun-wei, LIU Xiang-nan. Geostatistical analysis on spatial variability of suspended solids concentration in the coast water of Hongkong[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(3): 734-741.
- 吕君伟, 刘湘南. 香港近岸海域悬浮固体浓度空间变异特征的地统计分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 734-741.
- [18] WANG Fei, WANG Shan-shan, WANG Xin, *et al.* Remote sensing retrieval and dynamic driving force analysis of suspended sediment in Hangzhou Bay [J]. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences)*, 2014, **48**(1): 112-135.
王飞, 王珊珊, 王新, 等. 杭州湾悬浮泥沙遥感反演与变化动力分析[J]. *华中师范大学学报*, 2014, **48**(1): 112-135.
- [19] RAMELLA-ROMAN J C, PRAHL S A, JACQUES S L. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(12): 4420-4438.
- [20] RAMELLA-ROMAN J C, PRAHL S A, JACQUES S L. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part II[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(25): 10392-10405.
- [21] WOZNIAK S B, STRAMSKI D. Modeling the optical properties of mineral particles suspended in seawater and their influence on ocean reflectance and chlorophyll estimation from remote sensing algorithms [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(17): 3489-3503.
- [22] STRAMSKI D, BRICAUD A, MOREL A. Modeling the inherent optical properties of the ocean based on the detailed composition of the planktonic community [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(18): 2929-2945.