

光学学报

粗糙水面环境溢油目标多角度可见光偏振特性

张伟^{1,2}, 战俊彤^{1*}, 张肃¹, 付强¹, 李英超¹, 段锦³, 包世成^{1,2}, 姜会林¹

¹长春理工大学吉林省空间光电技术重点实验室空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

³长春理工大学电信学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了更加准确地表征粗糙水面环境下溢油的偏振反射特性,建立了改进型溢油偏振二向反射分布函数(pBRDF)模型。该模型基于 Priest-Gerber (P-G)理论,引入遮蔽函数、漫反射和体散射分量,并结合水面微小平面的概率分布函数,更加适合检测粗糙水面背景的溢油偏振反射特性。在粗糙水面环境下对 5 种不同溢油(机油、原油、柴油、煤油、汽油)目标进行多角度可见光波段偏振特性测试实验。结果表明:若相对方位角为 180°,线偏振度随观测天顶角的增大先增大后减小,随入射天顶角的增大也先增大后减小;线偏振度随相对方位角的增大先增大后减小,在相对方位角为 180°时达到最大,且受波长影响较小。该模型的置信精度可达到 80% 以上,证明了该模型的准确性,为研究粗糙海面溢油的偏振特性提供了一种新的途径。

关键词 海洋光学; 偏振特性; 偏振二向反射分布函数; P-G 模型; 可见光; 溢油目标

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221428

1 引言

水面溢油目标偏振特性作为水面偏振成像技术的重要理论支撑逐渐成为研究热点。在太阳光照射下,油膜与水面所携带的偏振信息会有所不同,相比于目标强度图像,偏振图像能提供更多的目标特征信息^[1-5],不同性质的溢油目标偏振反射特性相差较大,研究水面溢油的偏振反射特性,为快速准确检测海上溢油提供了保证。

目前关于水面溢油偏振特性的研究大多是基于偏振二向反射分布函数(pBRDF)模型进行分析^[6]。Gregoris 等^[7]基于 Cox-Munk 模型^[8]对粗糙海面进行建模,分析了太阳耀光的偏振特性,并对海面耀光在红外波段进行测量,结果显示接收的辐射主要来自海洋的自发辐射。周杨^[9]基于 Cox-Munk 模型与菲涅耳理论建立耀光条件下粗糙海面 pBRDF 模型,并以 2010 年墨西哥湾溢油污染事件为对象,开展溢油耀光偏振遥感的卫星资料验证,结果表明,当太阳天顶角与传感器天顶角之和为 82.6°时,溢油与背景海水偏振度差异最明显,该模型精度在非耀光条件下达到 60%。陆敏等^[10]基于菲涅耳理论结合偏振双向反射率因子和概率密度分布函数,建立了完善的粗糙海面镜面反射 pBRDF 模型,结果表

明,海面风速越大,偏振反射率峰值越小,同时表明利用偏振探测技术获取目标场景的偏振度和偏振角图像可提高图像质量。李英超等^[11]基于菲涅耳理论建立了粗糙海面溢油镜面反射偏振度检测模型,并开展溢油偏振特性室外实验,结果表明不同溢油的可见光偏振特性存在明显差异,偏振对比度普遍高于 5%。

国内外科研机构的研究证实了利用偏振技术探测溢油的有效性^[12-14],但多数在研究粗糙水面时,只考虑了镜面反射,未考虑水面的遮蔽与散射部分对偏振度的影响。本文通过引入遮蔽因子并且综合考虑镜面反射、漫反射和体散射分量,提出一种改进的水面油膜 pBRDF 模型。在室内可见光条件下,以粗糙水面环境为背景,以机油、原油、柴油、煤油、汽油为目标,获得不同入射天顶角、观测天顶角、相对方位角和波长下的目标偏振反射特性,并分析粗糙水面溢油目标线偏振度随入射天顶角、观测天顶角、相对方位角和波长的变化特征,最后将仿真数据与实际数据进行对比,验证所提模型的准确性,以期后续海面溢油偏振探测研究提供参考。

2 理论基础

2.1 pBRDF

Nicodemus 最早提出 BRDF 的概念,BRDF 可以

收稿日期: 2022-07-06; 修回日期: 2022-08-27; 录用日期: 2022-09-26; 网络首发日期: 2022-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(62127813,61890963)、吉林省教育厅项目(JJKH20220737KJ,JJKH20220738KJ)、吉林省科技厅项目(20210201093GX,20200201261JC)

通信作者: *zhanjuntong@cust.edu.cn

用来描述不同入射角和反射角光线的散射特性^[15], BRDF 可表示为^[16]

$$F(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (1)$$

式中: λ 为波长; θ_i 和 φ_i 分别为入射光的天顶角和方位角; θ_r 和 φ_r 分别为反射光的天顶角和方位角; $F(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 为 BRDF; $dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 为沿 (θ_r, φ_r) 反射方向的辐亮度; $dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)$ 为沿 (θ_i, φ_i) 入射方向的辐照度。

BRDF 的几何示意图如图 1 所示, z 为目标表面法线; n 为微元面法线; α 表示目标表面法线 z 和微元面法线 n 的夹角; β 表示入射光和微元面法线的夹角。

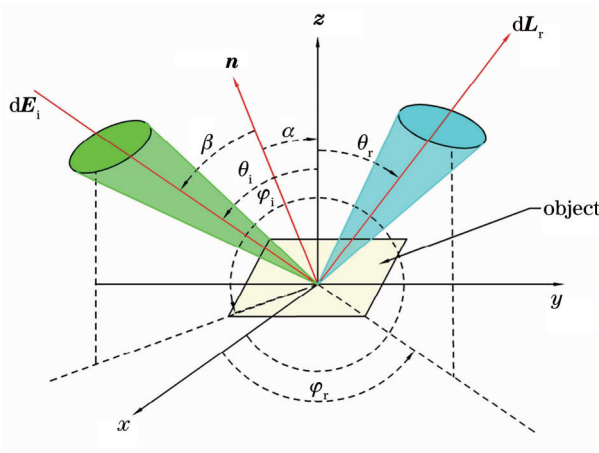


图 1 BRDF 的几何示意图
Fig. 1 Geometric diagram of BRDF

考虑偏振效应的 BRDF 称为 pBRDF, 它是研究目标表面偏振反射特征最基本的模型。利用微面元函数和穆勒矩阵可以对目标表面的镜面反射进行建模^[17], 即

$$F_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \alpha} \frac{\exp\left(-\frac{\tan^2 \alpha}{2\sigma^2}\right)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} M_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r), \quad (2)$$

式中: j, k 分别表示矩阵的行与列; σ 为目标表面材料的粗糙度; M 为穆勒矩阵。

Priest-Gerber(P-G)模型为表征地面目标偏振特性的模型, 而地面目标偏振特性模型的微面元函数不适用于海面, 所以本文将海面微面元函数引入模型中。传统的海面溢油 pBRDF 模型忽略了漫反射、体散射和阴影与遮蔽效应的影响, 本文在 P-G 模型的基础上引入上述参量, 最终建立的完整的 pBRDF 模型表达式为

$$F = F_s + F_d + F_b = \frac{P \cdot S_n \cdot M}{4 \cos \theta_i \cos \theta_r \cos \alpha} + F_d + F_b, \quad (3)$$

式中: F_s 为镜面反射分量; P 为海面微面元函数; S_n 为

阴影与遮蔽函数; M 为穆勒矩阵, 它是一个 4×4 的矩阵; F_d 为漫反射分量; F_b 为体散射分量。

2.2 镜面反射

实际的海平面是粗糙的, 因此可以把粗糙海面分解成多个方向倾斜的微小面元。Yoshimori 等^[18]研究了海面风速与二维粗糙海面微小平面概率分布函数之间的关系, 得到

$$P(S_{up}, S_{cross}) = \frac{1}{2\pi \sigma_{up} \sigma_{cross}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{S_{up}^2}{\sigma_{up}^2} + \frac{S_{cross}^2}{\sigma_{cross}^2} \right)\right], \quad (4)$$

式中: S_{up} 为倾斜微小平面逆风方向的斜率; S_{cross} 为倾斜微小平面侧风方向的斜率; σ_{up} 为倾斜微小平面逆风方向斜率的均方根(RMS)值; σ_{cross} 为倾斜微小平面侧风方向斜率的 RMS 值。

根据 Scripps 海洋学研究所的统计数据^[19], 海水和油膜的粗糙度与风速 v 分别满足如下关系:

$$\begin{cases} \sigma_{up, water}^2 = 0 + 0.00316 \times v \pm 0.004 \\ \sigma_{cross, water}^2 = 0.003 + 0.00192 \times v \pm 0.002 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_{up, oil}^2 = 0.005 + 0.0078 \times v \pm 0.002 \\ \sigma_{cross, oil}^2 = 0.003 + 0.0084 \times v \pm 0.002 \end{cases} \quad (6)$$

倾斜的微面元示意图如图 2 所示, 其中 z 为目标表面法线, L_n 表示海面倾斜微小面元的法线方向, L_{wind} 为风向, φ_{wind} 为风向的相对方位角, α 为海面倾斜的微小面元与平面 $o-xy$ 的夹角, 2β 为太阳光照射海面微小面元时入射光和反射光的夹角。

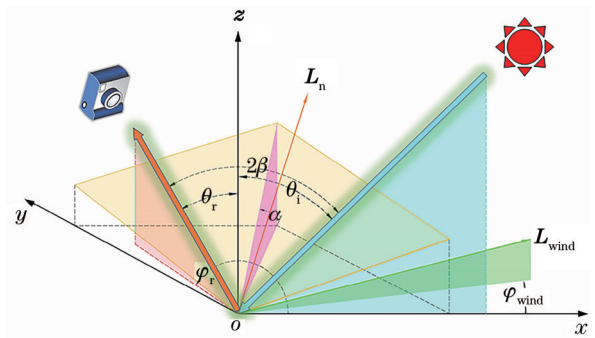


图 2 倾斜的微面单元示意图
Fig. 2 Schematic of inclined micro plane unit

S_x 和 S_y 为海面倾斜微小面元的方向斜率, 各参数关系如下:

$$\left\{ \begin{aligned} S_x &= \frac{-(\sin \theta_i + \sin \theta_r \cos \varphi_r)}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \\ S_y &= \frac{\sin \theta_r \sin \varphi_r}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \\ \tan^2 \alpha &= S_x^2 + S_y^2 \\ S_{up} &= S_x \cos \varphi_{wind} + S_y \sin \varphi_{wind} \\ S_{cross} &= S_y \cos \varphi_{wind} - S_x \sin \varphi_{wind} \\ \cos(2\beta) &= \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi_r \end{aligned} \right. \quad (7)$$

阴影与遮蔽函数用来表示不同粗糙程度的目标表面上入射辐射对微面元镜面反射的贡献,本文采用 Scancer 提出的考虑多重散射的函数^[20],表达式为

$$S_h(\theta_i, \theta_r, \sigma) = \frac{1}{1 + \Lambda(\theta_i) + \Lambda(\theta_r)}, \quad (8)$$

$$\Lambda(x) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\sigma}{\cos x} \exp\left(\frac{-\cot^2 x}{\sigma^2}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{\cot x}{\sigma}\right) \right], \quad (9)$$

式中: $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数。

2.3 漫反射

漫反射是光线入射到物体表面后无规则反射的现象,不仅与出射角有关,也与入射角有关。本文采用 Minnaert 模型^[21]计算漫反射分量,该模型能模拟反射系数随角度变化的情况,表达式为

$$f_d = \frac{\rho_0}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^{c-1}, \quad (10)$$

式中: ρ_0 为相对漫反射系数; c 为待定系数,它的取值范围为 $0 \sim 1$ 。当 $c=1$ 时,该模型转化为 Lambert 模型。

虽然 Minnaert 模型不考虑偏振特性,但是它对反射光的总能量是有贡献的,所以所提模型中的漫反射

分量表达式为

$$F_d = \frac{\rho_0}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^{c-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

2.4 体散射

对于体散射, Hors 等^[22]将 K-M 理论进行改进,引入 ρ_d 来描述体散射的影响。 ρ_d 的表达式为

$$\rho_d = (1 - R_i) \frac{(1 - k_2) R_\infty}{1 - k_2 R_\infty}, \quad (12)$$

式中: R_i 为入射光照射到物体表面时的菲涅耳反射率; k_2 为物体表面散射光的菲涅耳反射率,通常情况下, $k_2 = R_i$ 。假设物体表面为无穷厚, R_∞ 为相对漫反射系数,因此体散射分量的表达式为

$$F_b = \frac{\rho_d \cos \theta_r}{\pi} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

2.5 最终模型

假设入射光为自然光,综合式(4)、(7)~(9)、(11)、(13),最终建立的模型为

$$F_{jk}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{S_{up}^2}{\sigma_{up}^2} + \frac{S_{cross}^2}{\sigma_{cross}^2} \right)\right]}{8\pi\sigma_{up}\sigma_{cross} \cos \theta_i \cos \theta_r \cos \alpha} \frac{1}{1 + \Lambda(\theta_i) + \Lambda(\theta_r)} M_{j,k}^s + \frac{\rho_0}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^{c-1} M_{j,k}^d + \frac{\cos \theta_r}{\pi} \rho_d M_{j,k}^b, \quad (14)$$

式中: $M_{j,k}^s, M_{j,k}^d, M_{j,k}^b$ 分别为镜面反射、漫反射与体散射的穆勒矩阵。该模型不仅含有镜面反射,还包含漫反射与体散射,更加符合海面的实际情况。

2.6 偏振度与偏振角的计算

Stokes 矢量可以用来描述部分偏振光,其定义为

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{DoP} \cdot S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} + (1 - V_{DoP}) \begin{bmatrix} S_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_r - I_l \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中: $I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}$ 分别为将偏振片旋转 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 后得到的图像线偏振光强; I_r 与 I_l 分别为右旋和左旋圆偏振光强; S_0 为反射光的总强度; S_1 为 x 方向与 y 方向上的线偏振光强度差; S_2 为 $\frac{\pi}{4}$ 与 $\frac{3}{4}\pi$ 方向上的线偏振光强度差; S_3 为左旋与右旋圆偏振光的强度差。偏振度 P_{DoP} 为偏振光占反射光的比值^[23],表达式为

$$P_{DoP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}. \quad (16)$$

线偏振度 V_{DoLP} 为线偏振光占反射光的比值,表达式为

$$V_{DoLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}. \quad (17)$$

偏振角 V_{AoP} 表示能量最大的偏振方向与 x 轴的夹角,表达式为

$$V_{AoP} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \quad (18)$$

由于自然光中圆偏振分量极少,可以忽略不计,故入射光为自然光时, Stokes 矢量为 $E_i = [1 \ 0 \ 0]^T$, T 为矩阵的转置。由式(1)求得反射光的 Stokes 矢量表达式为

$$L_r = F_{j,k} E_i = \begin{bmatrix} F_{00}^s + F_{00}^d + F_{00}^b \\ F_{10}^s \\ F_{20}^s \end{bmatrix}. \quad (19)$$

由于忽略了圆偏振度分量,此时计算得到的线偏振度可以认为是目标的偏振度,综合式(14)、(17)、(18)得到的线偏振度表达式为

$V_{\text{DoLP}} =$

$$\sqrt{\left\{ \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S_{\text{up}}^2}{\sigma_{\text{up}}^2} + \frac{S_{\text{cross}}^2}{\sigma_{\text{cross}}^2}\right)\right]}{8\pi\sigma_{\text{up}}\sigma_{\text{cross}}\cos\theta_i\cos\theta_r\cos\alpha} \frac{1}{1+\Lambda(\theta_i)+\Lambda(\theta_r)} M_{10} \right\}^2 + \left\{ \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S_{\text{up}}^2}{\sigma_{\text{up}}^2} + \frac{S_{\text{cross}}^2}{\sigma_{\text{cross}}^2}\right)\right]}{8\pi\sigma_{\text{up}}\sigma_{\text{cross}}\cos\theta_i\cos\theta_r\cos\alpha} \frac{1}{1+\Lambda(\theta_i)+\Lambda(\theta_r)} M_{20} \right\}^2}$$

$$\frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S_{\text{up}}^2}{\sigma_{\text{up}}^2} + \frac{S_{\text{cross}}^2}{\sigma_{\text{cross}}^2}\right)\right]}{8\pi\sigma_{\text{up}}\sigma_{\text{cross}}\cos\theta_i\cos\theta_r\cos\alpha} \frac{1}{1+\Lambda(\theta_i)+\Lambda(\theta_r)} M_{00} + \frac{\rho_0}{\pi}(\cos\theta_i\cos\theta_r)^{c-1} + \frac{\cos\theta_r}{\pi}\rho_d \quad (20)$$

式中： M_{10} 、 M_{20} 、 M_{00} 为穆勒矩阵的相应参数。

3 实验设计与参数反演

3.1 实验设计

为了验证所提模型的准确性以及得到溢油的偏振特性规律,在暗室内对溢油样品(汽油、柴油、煤油、机油和原油)进行实验,实验采用海盐与纯净水按照 3.5% 的含盐量配置而成的混合溶液模拟海水。

实验所用的 BRDF 系统为长春理工大学自研的测量装置,型号为 cust-BRDF-01,测量范围如下:观测天顶角为 $-60^\circ \sim 60^\circ$,方位角为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。液晶可调滤波器采用 Thorlabs 公司生产的 KURIOS-XL1(/M) 液晶可调滤波器,该仪器的波段范围为 $420 \sim 730 \text{ nm}$,最小步长为 1 nm 。光源为 THORLABS 公司生产的 SLS201L 光源,波段为 $360 \sim 2600 \text{ nm}$,用来模拟太阳光,入射光的天顶角范围为 $30^\circ \sim 50^\circ$;相机为大恒图像公司生产的水星偏振相机,型号为 MER2-302-37GM/C,该相机的光谱范围为 $400 \sim 1000 \text{ nm}$,中心波长为 600 nm ,可同时得到原图以及 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 S_0 、 S_1 、 S_2 、 V_{DoLP} 和 V_{AOP} 的图像。由于该系统的光谱范围为

$400 \sim 1000 \text{ nm}$,可以接收可见光范围内的所有波长,满足探测时的可见光条件。实际探测时的入射天顶角为 $0^\circ \sim 90^\circ$,观测天顶角为 $0^\circ \sim 90^\circ$,相对方位角为 $0^\circ \sim 360^\circ$,形成一个半球观测空间。本文仿真的角度如下:入射天顶角为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° ,观测天顶角为 $0^\circ \sim 90^\circ$,相对方位角为 $0^\circ \sim 360^\circ$,也基本形成一个半球观测空间,可满足实际海面探测时的探测需求。

实验原理如图 3(a)所示,光源发出的光照射到溢油表面,经溢油反射后进入偏振相机,利用计算机系统对拍摄的图像进行处理。反射光分为镜面反射、漫反射与体散射。以相同的角度出射的光为镜面反射光;向四面八方反射的光为漫反射光;散射体现出物质的吸收作用,光线向四周射去。图 3(b)、(c)分别为镜面反射、漫反射与体散射示意图。为防止溢油样品溢出和混合,通过亚克力管将不同油种间隔开。亚克力管具有高透过率,可有效降低杂散光影响。实验过程中为有效降低其他杂散光对实验造成的影响,在水箱以及 BRDF 装置附近铺上具有高吸收率的黑布,实验过程保持室内清洁,防止室内烟尘对实验结果造成影响^[24-26]。图 4 为实验装置实物图。

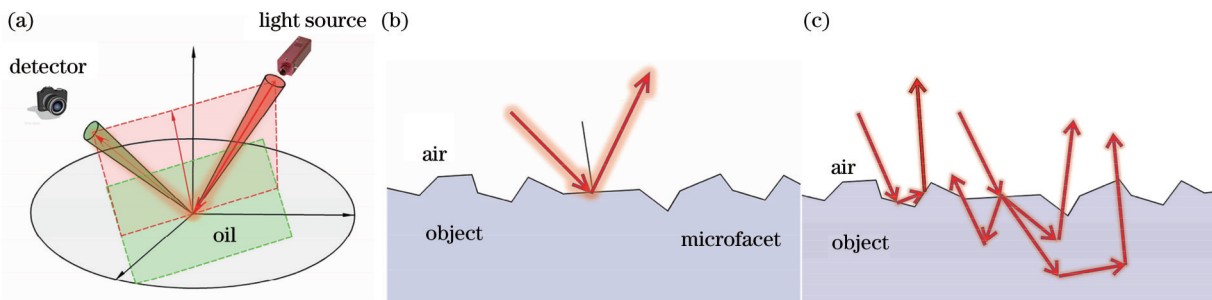


图 3 实验原理与反射示意图。(a)实验原理图;(b)镜面反射示意图;(c)漫反射与体散射示意图
Fig. 3 Experimental principle and reflection diagram. (a) Schematic of experimental principle; (b) schematic of specular reflection; (c) schematic of diffuse reflection and volume scattering

固定光线的入射天顶角为 50° ,相对方位角为 180° ,观测天顶角为 50° ,波长在 $420 \sim 730 \text{ nm}$ 范围内每 10 nm 改变一次,得到线偏振度与波长的关系。

光线入射天顶角为 30° 、 40° 、 50° ,改变探测器接收

角来模拟观测天顶角,观测天顶角从 0° 到 60° 每次改变 10° ,相对方位角从 120° 到 240° 每隔 10° 改变一次,得到线偏振度与入射天顶角、观测天顶角、相对方位角的关系,并将仿真得到的数据与实测数据进行对比分析,得

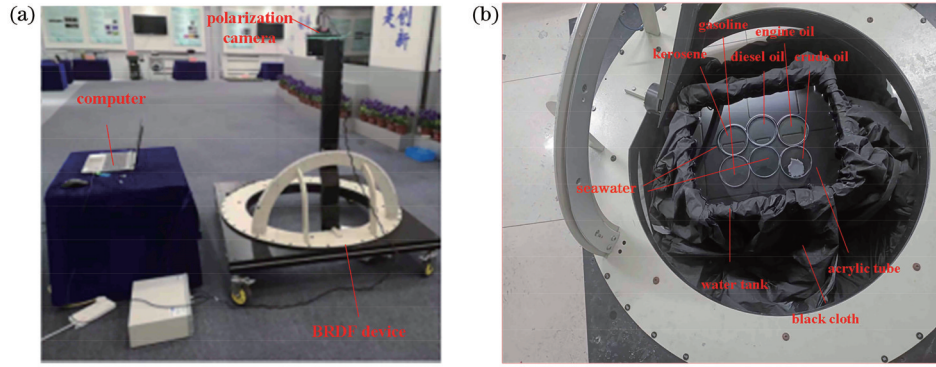


图 4 实验装置实物图。(a)实验装置图;(b)实验现场图

Fig. 4 Physical diagram of experimental device. (a) Experimental device diagram; (b) experimental site picture

到模型的精确度。

3.2 参数反演

参数反演可以提取有效的目标特征,从而获得有效的目标特征信息^[27],通过仿真数据和观测数据得到有价值的参数。这些参数的测量难度一般较大,只能通过反演的方式获得。通常,模型反演即为根据方向性观测数据,对应独立的模型参数,使计算的方向反射数据与观测数据拟合最好^[28]。本文推导出的 pBRDF 模型中含有 5 个未知参数,可根据若干组实测数据采用算法对函数模型的未知参数进行求解,采用非线性最小二乘法求解函数模型的未知参数。最小二乘法是一种数学优化方法,利用实际值与估计值的差值平方和最小寻找数据的最佳函数匹配,利用最小二乘法可以简单地计算出未知参数,使求得的数据与实际数据误差最小。最小二乘法的表达式为

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, w_i)]^2, \quad (21)$$

式中: x_i 与 y_i 为一对观测数据; w_i 为待定参数; m 为观测数据组的数量。

将模型的仿真值与实测值的最小标准差作为模型参数的最佳选择,经过多次计算后,当目标函数收敛到

一定程度时,此时可以确定模型的最优解,认为此时的仿真值与测量值的符合度最高,拟合效果最好。所建立模型的优化函数^[29]为

$$\min \Delta E(n, k, c, \rho_0, R_\infty) = \frac{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} [X_{\text{DoLP}}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) - X_{\text{DoLP}}^m(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} [X_{\text{DoLP}}^m(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)]^2}, \quad (22)$$

式中: n, k 为目标表面复折射率参数的实部与虚部; $X_{\text{DoLP}}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为所建立模型的仿真值; $X_{\text{DoLP}}^m(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为实验测量值。在暗室中,采用 SLS201L 光源照明,波段范围为 360~2600 nm,固定光线的入射天顶角为 50°,将 MER2-302-37GM/C 水星偏振相机安装在 cust-BRDF-01 BRDF 装置上对溢油样品进行探测,探测波段范围为 400~1000 nm,中心波长为 600 nm,探测得到观测天顶角为 0°~60°,相对方位角为 180°的溢油偏振图像。将上述条件下得到的不同溢油的线偏振度代入式(22)中,得到参数的最佳结果,且复折射率并不是一个固定值,它与波长有关。表 1 为在上述波段条件下,即波段范围为 400~1000 nm,中心波长为 600 nm 条件下的复折射率与其他参量的反演结果。

表 1 参数反演结果

Table 1 Parameter inversion results

Material	n	k	c	ρ_0	R_∞
Seawater	1.35	0.00284	0.931	0.061	0.076
Engine oil	1.45	0.886	0.937	0.352	0.624
Crude oil	1.47	0.0000362	0.826	0.029	0.041
Diesel oil	1.48	0.385	0.952	0.181	0.352
Kerosene	1.40	0.939	0.941	0.367	0.648
Gasoline	1.42	1.431	0.988	0.379	0.677

将反演出来的结果代入式(15),得到反射光线偏振度随观测天顶角变化的仿真值,以海水为例,与文献[9]的参考模型进行对比,对比结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,由于参考模型没有考虑漫反射和体散射,因此参考模型的最大线偏振度为 1。实际

上海水表面粗糙,无法实现全偏振,其最大线偏振度会比 1 小,而在未考虑漫反射和体散射的情况下,海水线偏振度普遍偏高。参考模型在其他观测天顶角下的线偏振度也比实验测得的线偏振度大,相比较于参考模型,所提模型的精确度更高。

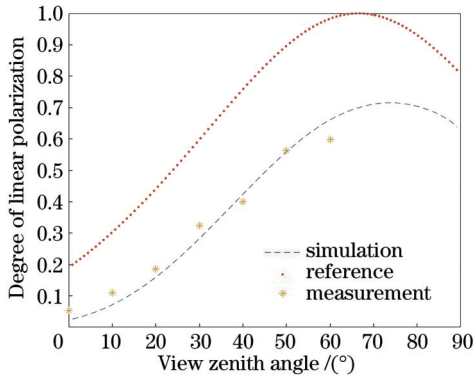


图 5 不同模型下的海水偏振度对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of the degree of polarization of seawater under different models

4 溢油目标多角度可见光偏振特性

4.1 溢油目标观测天顶角与线偏振度的关系分析

仿真条件为入射天顶角 $\theta_i=50^\circ$, 相对方位角 $\varphi_r=180^\circ$, 观测天顶角为 $0^\circ\sim 90^\circ$, $n, k, c, \rho_0, R_\infty$ 等参数如表 1 所示, 改变观测天顶角, 获取不同观测天顶角与溢油目标线偏振度的关系。实验过程中的入射天顶角、相对方位角与仿真条件一致。光源波段范围为 $400\sim 1000\text{ nm}$, 中心波长为 600 nm , 观测天顶角为 $0^\circ\sim 60^\circ$, 每隔 10° 取多次探测平均值作为实测值, 观测天顶角与线偏振度关系的仿真与实测数据对比结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 当入射天顶角不变, 相对方位角为 180° 时, 线偏振度随着观测天顶角的增大呈现先增

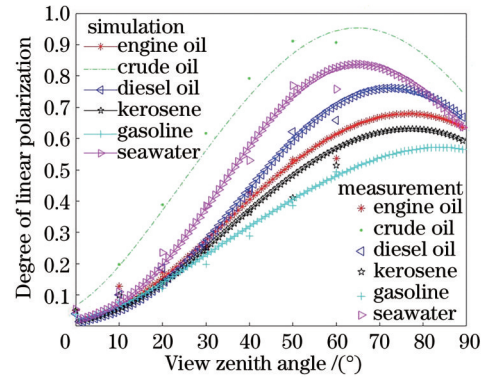


图 6 入射天顶角 $\theta_i=50^\circ$ 、相对方位角 $\varphi_r=180^\circ$ 时线偏振度的仿真值与实测值

Fig. 6 Simulation value and measured value of the degree of linear polarization when incident zenith angle $\theta_i=50^\circ$ and relative azimuth angle $\varphi_r=180^\circ$

后减小的趋势。其中在观测天顶角为 50° 时, 机油、原油、柴油、煤油、汽油的线偏振度分别与海水相差了 30.7% 、 18.6% 、 19.1% 、 46.6% 、 47.2% , 因此在角度一定时, 通过偏振技术探测海上溢油的办法是可行的。

图 6 所示的仿真曲线与实测曲线吻合较好, 将仿真数据与实测数据进行对比, 对置信度进行计算, 置信度公式^[30]为

$$M = \left(1 - \sum_{a=1}^n \frac{|R - R_{m,a}|}{R_{m,a}} / N \right) \times 100\%, \quad (23)$$

式中: R_a 为仿真值; $R_{m,a}$ 为实验测量值; N 为实验组数。置信度的计算结果如表 2 所示。

表 2 不同油种在 50° 入射天顶角、 180° 相对方位角、 $0^\circ\sim 60^\circ$ 观测天顶角时仿真模型的置信度

Table 2 Confidence of simulation model for different oils at 50° incident zenith angle, 180° relative azimuth angle, and $0^\circ\sim 60^\circ$ view zenith angle

Material	Engine oil	Crude oil	Diesel oil	Kerosene	Gasoline	Seawater
Confidence / %	88.3	87.2	86.9	85.2	90.8	87.6

4.2 溢油目标相对方位角与线偏振度的关系分析

设置仿真条件为入射天顶角 $\theta_i=50^\circ$, 观测天顶角范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$, 相对方位角为 $0^\circ\sim 360^\circ$, $n, k, c, \rho_0, R_\infty$ 等参数如表 1 所示, 不同溢油目标在 2π 观测空间内的线偏振度仿真结果如图 7 所示。

设置仿真条件为入射天顶角 $\theta_i=50^\circ$, 观测天顶角 $\theta_r=50^\circ$, 相对方位角范围为 $120^\circ\sim 240^\circ$, $n, k, c, \rho_0, R_\infty$ 等参数如表 1 所示, 改变相对方位角角度, 获取不同相对方位角与溢油目标线偏振度的关系。实验过程中入射天顶角和观测天顶角与仿真时一致, 入射光线波长范围为 $400\sim 1000\text{ nm}$, 中心波长为 600 nm , 相对方位

角范围为 $120^\circ\sim 240^\circ$, 每隔 10° 取多次探测平均值作为实测值, 仿真数据与实测数据对比结果如图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以看出, 实验与仿真结果的变化规律基本一致, 即线偏振度均随相对方位角的增大呈现先增大后减小的趋势, 在相对方位角为 180° 时存在极大值。在 $120^\circ\sim 240^\circ$ 相对方位角内线偏振度较高, 而在其他相对方位角处线偏振度极低, 这说明海上溢油目标探测受相对方位角的影响很大, 因此海上探测溢油目标应尽量靠近 180° 相对方位角。

将仿真数据与实测数据进行对比, 对置信度进行计算, 所得结果如表 3 所示。

表 3 不同油种在 50° 入射天顶角、 50° 观测天顶角、 $120^\circ\sim 240^\circ$ 相对方位角时模型的置信度

Table 3 Confidence of model for different oils at 50° incident zenith angle, 50° view zenith angle, and $120^\circ\sim 240^\circ$ relative azimuth

Material	Engine oil	Crude oil	Diesel oil	Kerosene	Gasoline	Seawater
Confidence / %	89.3	84.5	89.7	81.6	82.9	86.1

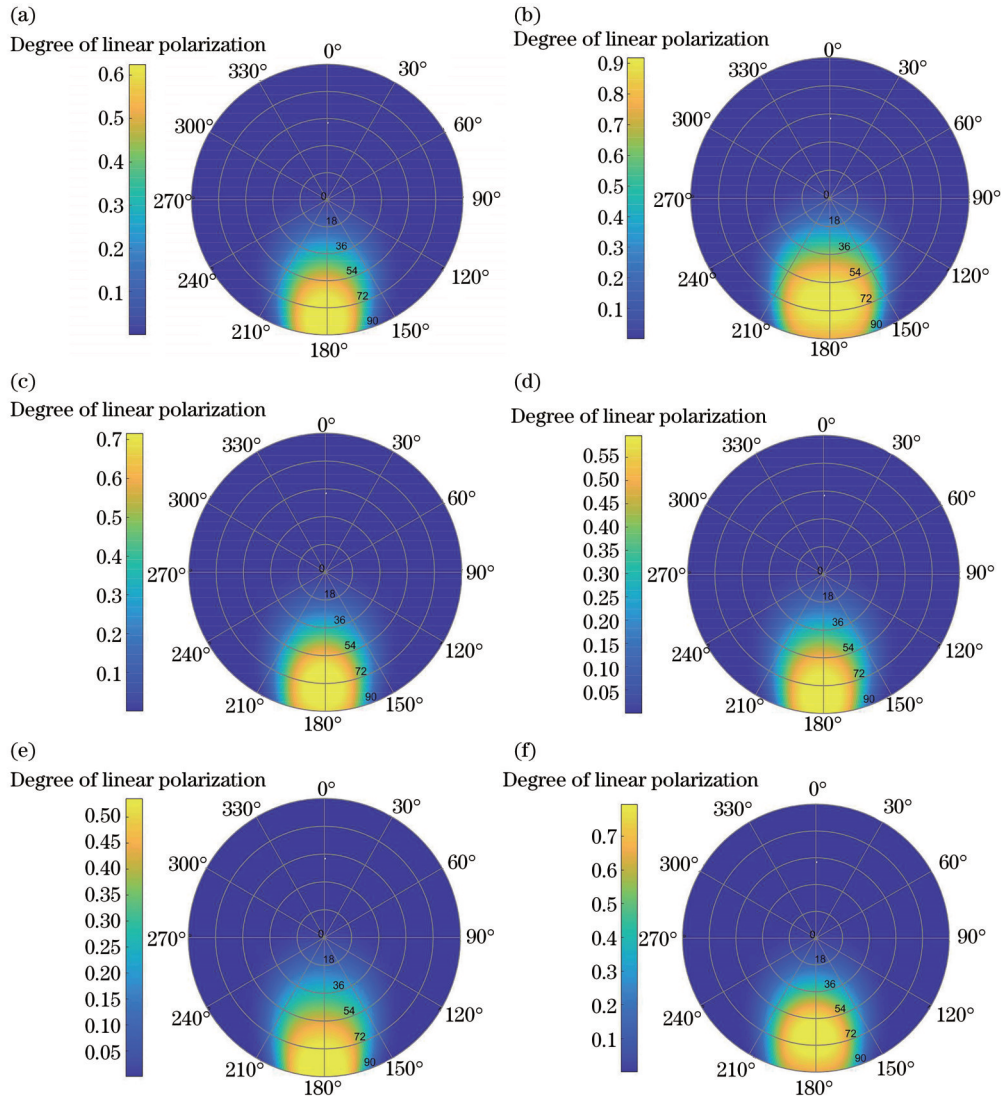


图 7 不同溢油在 2π 观测空间内线偏振度的仿真结果。(a) 机油; (b) 原油; (c) 柴油; (d) 煤油; (e) 汽油; (f) 海水

Fig. 7 Simulation results of the degree of linear polarization of different oils in 2π observation space. (a) Engine oil; (b) crude oil; (c) diesel oil; (d) kerosene; (e) gasoline; (f) seawater

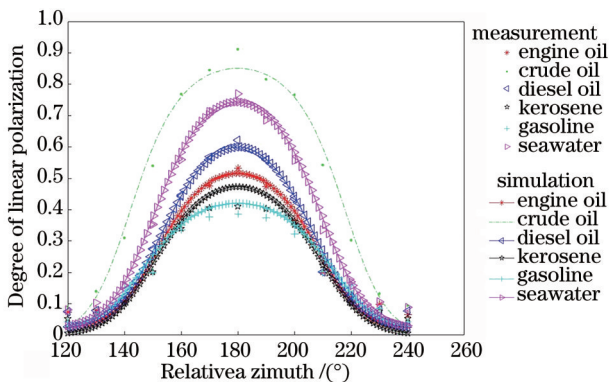


图 8 入射天顶角 $\theta_i=50^\circ$ 、观测天顶角 $\theta_r=50^\circ$ 时线偏振度的仿真值与实测值

Fig. 8 Simulation value and measured value of the degree of linear polarization when incident zenith angle $\theta_i=50^\circ$ and view zenith angle $\theta_r=50^\circ$

4.3 溢油目标入射天顶角与线偏振度的关系分析

设置仿真条件如下: 观测天顶角范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$,

相对方位角为 $0^\circ\sim 360^\circ$, 入射天顶角分别为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$, $n, k, c, \rho_0, R_\infty$ 等参数如表 1 所示, 以柴油为例, 柴油目标在 2π 观测空间内的不同入射天顶角下的线偏振度仿真结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 线偏振度随入射天顶角的增大呈现先增大后减小的趋势, 且无论入射天顶角如何变化, 线偏振度均随着相对方位角的增大呈现先增大后减小的趋势。当相对方位角为 180° 时, 线偏振度存在极大值; 当相对方位角为 0° , 且入射天顶角与观测天顶角相同时, 线偏振度最小。当相对方位角为 180° 时, 观测天顶角与线偏振度的关系保持不变, 均为随观测天顶角的增加呈现先增大后减小的趋势。在相对方位角为 $120^\circ\sim 240^\circ$ 范围内线偏振度较高, 在其他相对方位角范围内线偏振度较低, 这与 4.2 节得到的结论一致。

设置仿真条件如下: 观测天顶角范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$, 入射天顶角范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$, 相对方位角为 $180^\circ, n, k, c,$

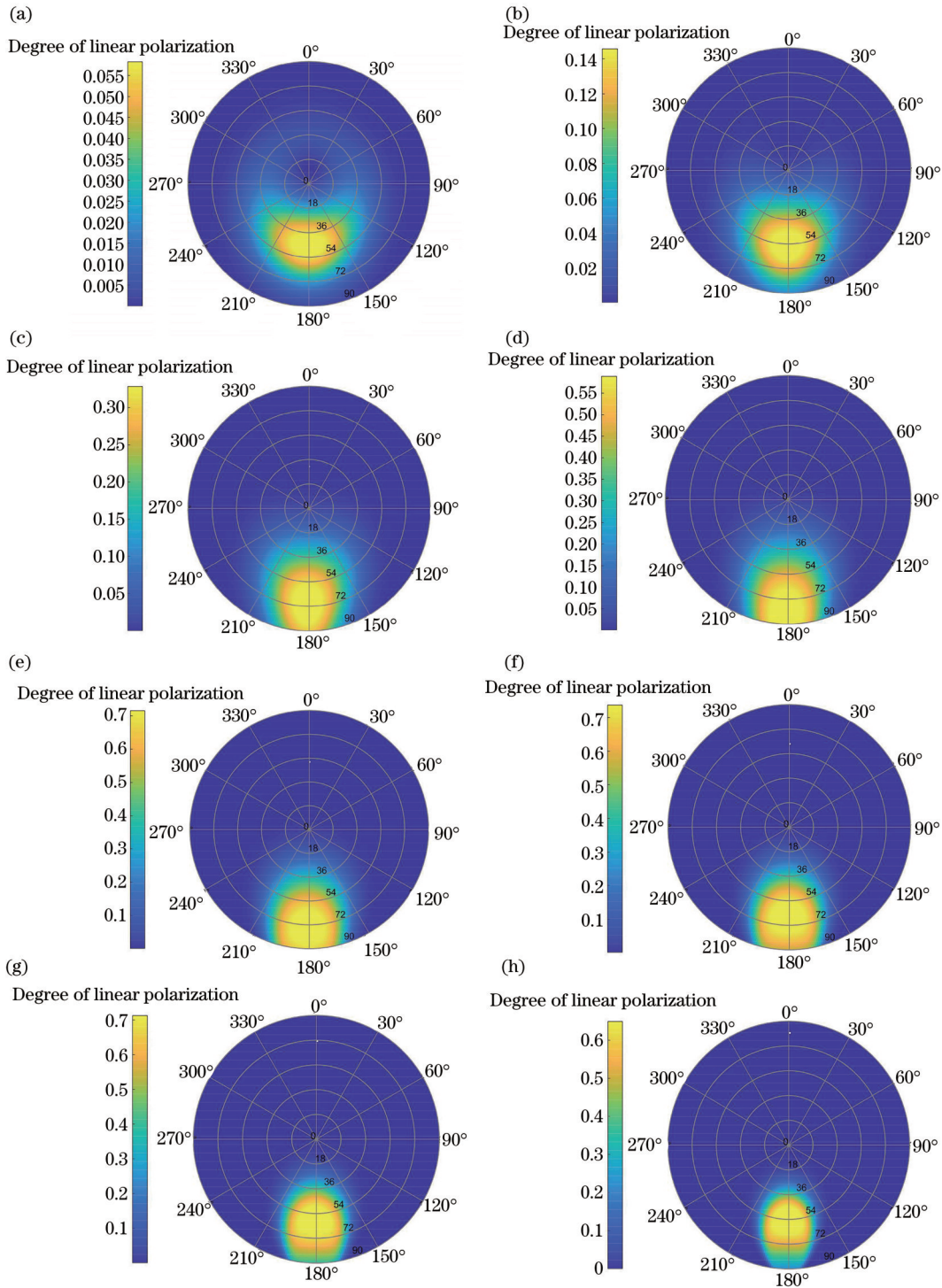


图 9 柴油在 2π 观测空间内线偏振度的仿真结果。(a) $\theta_i=10^\circ$; (b) $\theta_i=20^\circ$; (c) $\theta_i=30^\circ$; (d) $\theta_i=40^\circ$; (e) $\theta_i=50^\circ$; (f) $\theta_i=60^\circ$; (g) $\theta_i=70^\circ$; (h) $\theta_i=80^\circ$

Fig. 9 Simulation results of the degree of linear polarization of diesel in 2π observation space. (a) $\theta_i=10^\circ$; (b) $\theta_i=20^\circ$; (c) $\theta_i=30^\circ$; (d) $\theta_i=40^\circ$; (e) $\theta_i=50^\circ$; (f) $\theta_i=60^\circ$; (g) $\theta_i=70^\circ$; (h) $\theta_i=80^\circ$

ρ_0 、 R_∞ 等参数如表 1 所示, 图 10 所示为相对方位角为 180° 时, 不同溢油样品的入射天顶角和观测天顶角与线偏振度的关系。

从图 10 可以看出, 无论是哪种溢油, 在相对方位角为 180° 的情况下, 线偏振度随入射天顶角的增大呈现先增大后减小的趋势, 这与图 9 所示的变化趋势一

致。当入射天顶角一定时, 线偏振度随观测天顶角的增大也呈现出先增大后减小的趋势。

设置仿真条件如下: 观测天顶角范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$, 相对方位角为 180° , 入射天顶角分别为 30° 、 40° 、 50° , n 、 k 、 c 、 ρ_0 、 R_∞ 等参数如表 1 所示。实验过程中观测天顶角、相对方位角与仿真时相同, 入射光线的波长范围为

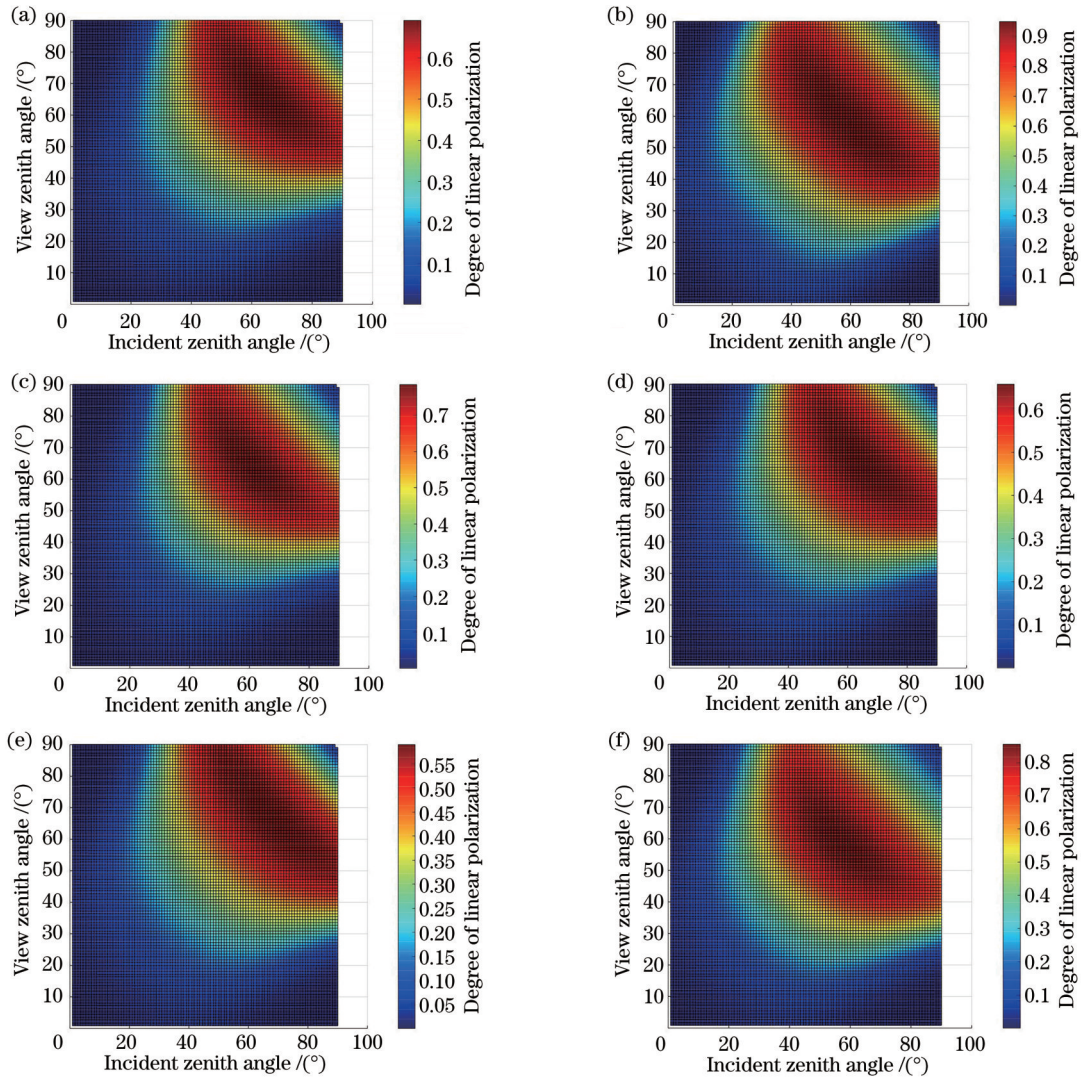


图 10 相对方位角为 180° 时,不同溢油的入射天顶角和观测天顶角与线偏振度的关系。(a) 机油;(b) 原油;(c) 柴油;(d) 煤油;(e) 汽油;(f) 海水

Fig. 10 Relationship between incident zenith angle and view zenith angle of different oils and degree of linear polarization when the relative azimuth angle is 180° . (a) Engine oil; (b) crude oil; (c) diesel oil; (d) kerosene; (e) gasoline; (f) seawater

400~1000 nm, 中心波长为 600 nm, 入射天顶角分别为 30° 、 40° 、 50° , 取多次探测平均值作为实测值, 入射天顶角与线偏振度关系的仿真与实测数据的对比结果如图 11 所示。从图 11 可以看出, 实验结果与仿真结果的吻合度较高, 将仿真数据与实测数据进行对比, 对置信度进行计算, 所得结果如表 4 所示。

从表 2~4 可以看出, 无论是对于汽油、柴油、煤油、机油、原油, 还是海水, 所建立的模型都有较高的置信度, 其置信度均在 80% 以上, 其中当入射天顶角为 50° 、相对方位角为 180° 时, 汽油的仿真置信度达到了 90.8%。可见, 所建立的模型精度较高, 可对海上溢油

的探测提供帮助。

4.4 溢油目标波长与线偏振度关系分析

实验条件如下: 入射天顶角为 50° , 观测天顶角为 50° , 相对方位角为 180° , 入射波长范围为 420~730 nm, 每隔 10 nm 取多次探测平均值作为实测值, 波长与线偏振度关系的实测数据如图 12 所示。

从图 12 可以看出, 线偏振度虽然整体在可见光范围内随波长的增加而增大, 但变化幅度很小, 相比于入射天顶角、观测天顶角和相对方位角, 波长对溢油目标的线偏振度影响不大。这也说明了实际海上溢油目标可见光偏振探测受波长影响很小, 受入

表 4 不同油种在 30° 、 40° 、 50° 入射天顶角, 0° ~ 90° 观测天顶角, 180° 相对方位角时模型的置信度

Table 4 Confidence of model for different oils at 30° , 40° , and 50° incident zenith angle, 0° ~ 90° view zenith angle, and 180° relative azimuth angle

Material	Engine oil	Crude oil	Diesel oil	Kerosene	Gasoline	Seawater
Confidence / %	84.1	85.2	88.7	82.9	85.4	86.2

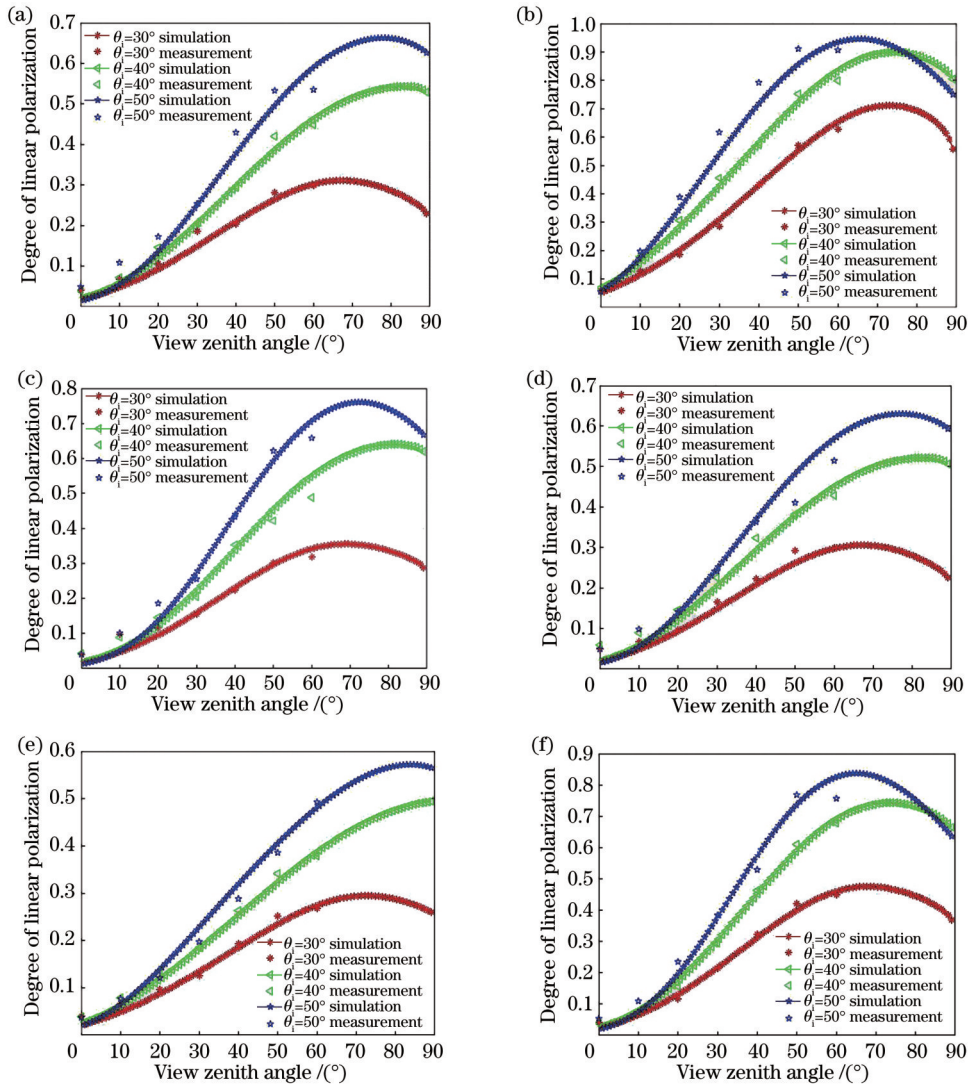


图 11 当入射天顶角 $\theta_i=30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$, 相对方位角 $\varphi_r=180^\circ$ 时线偏振度的仿真值与实测值。(a) 机油; (b) 原油; (c) 柴油; (d) 煤油; (e) 汽油; (f) 海水

Fig. 11 Simulation value and measured value of the degree of linear polarization when incident zenith angle $\theta_i=30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ and relative azimuth angle $\varphi_r=180^\circ$. (a) Engine oil; (b) crude oil; (c) diesel oil; (d) kerosene; (e) gasoline; (f) seawater

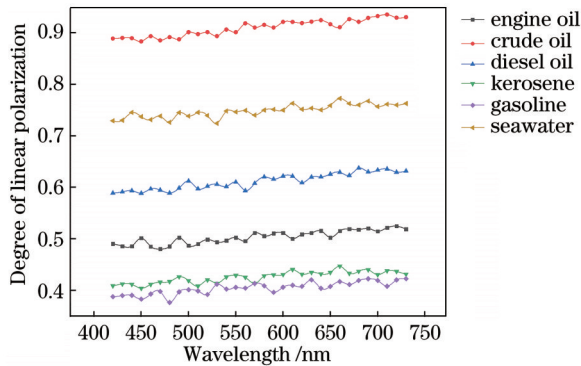


图 12 波长与线偏振度关系实测曲线

Fig. 12 Measured curves of relationship between wavelength and degree of linear polarization

射天顶角、观测天顶角和相对方位角 3 个因素的影响很大。

5 结 论

在微面元理论的基础上, 综合考虑镜面反射、漫反射和体散射, 对传统的海面溢油模型进行优化, 提出包含散射部分的海面溢油 pBRDF 模型, 该模型可减小仅考虑镜面反射所带来的误差。将所提模型的仿真结果与实验结果进行对比, 结果表明, 仿真拟合的曲线与实测数据的吻合度较高, 所建立的模型精度良好。

对线偏振度与入射天顶角、观测天顶角、相对方位角、波长的关系进行研究, 结果表明: 入射天顶角、观测天顶角、相对方位角、波长对溢油的线偏振度均有影响, 线偏振度在可见光范围内随波长的增加略有增大, 但是相对于入射天顶角, 观测天顶角和相对方位角的线偏振度变化不大; 线偏振度随相对方位角增大呈现先增大后减小的趋势, 当相对方位角为 180° 时出现峰值, 且此时线偏振度随观测天顶角的增大呈现先增大

后减小的趋势,随入射天顶角的增大也呈现先增大后减小的趋势,并且此时对比度较高;在相对方位角为 0° 的条件下,入射天顶角与观测天顶角相等时的线偏振度最小。建立海面溢油目标 pBRDF 模型以及研究入射天顶角、观测天顶角、相对方位角和波长对线偏振度的影响,有助于实现对海面溢油目标的准确探测,并在未来可以为溢油探测提供参考。本研究也存在一些不足,例如没有研究温度对线偏振度的影响,且在某些角度下仪器存在挡光的现象,所提模型在某些相对方位角下的线偏振度极低,未来将对模型和实验方案进一步优化,研究温度对溢油线偏振度的影响,并建立更完善的模型。

参 考 文 献

- 战俊彤,付强,张肃,等.前向散射角度对偏振成像对比度影响的研究[J].光学学报,2015,35(7):0711007.
Zhan J T, Fu Q, Zhang S, et al. Research on the effects of forward scattering angle to polarization imaging contrast[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0711007.
- 卢珍,张春影,杨秀云,等.不同类型植被双向反射与偏振特性[J].遥感信息,2017,32(5):23-30.
Lu Z, Zhang C Y, Yang X Y, et al. Bidirectional reflectance and polarization characteristics of different vegetation covers[J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(5): 23-30.
- 张肃,付强,段锦,等.基于提升小波的低对比度目标偏振识别技术[J].光学学报,2015,35(2):0211002.
Zhang S, Fu Q, Duan J, et al. Low contrast target polarization recognition technology based on lifting wavelet[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211002.
- Hou W Z, Wang J, Xu X G, et al. Improving remote sensing of aerosol microphysical properties by near-infrared polarimetric measurements over vegetated land: information content analysis [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2018, 123 (4): 2215-2243.
- Chenault D B, Vaden J P. Infrared polarimetric sensing of oil on water[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10631: 106310E.
- 汪杰君,王鹏,王方原,等.材料表面偏振双向反射分布函数模型修正[J].光子学报,2019,48(1):0126001.
Wang J J, Wang P, Wang F Y, et al. Modified model of polarized bidirectional reflectance distribution function on material surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 0126001.
- Gregoris D, Yu S, Cooper A, et al. Dual-band infrared polarization measurements of Sun glint from the sea surface[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1687: 381-391.
- Cox C S, Munk W H. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter[J]. Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography, 1956, 6(9): 401-408.
- 周杨.海面溢油耀光偏振遥感实验研究[D].南京:南京大学,2018.
Zhou Y. Experimental study on polarized optical remote sensing of marine oil spills under sunglint[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- 陆敏,王治乐,高萍萍,等.海面油膜的偏振反射特性仿真实验[J].红外与激光工程,2020,49(4):0426002.
Lu M, Wang Z L, Gao P P, et al. Simulation experiment of polarization reflection characteristics of the oil slick[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0426002.
- 李英超,刘嘉楠,史浩东.基于偏振特性的海洋溢油油种识别研究[J].光子学报,2021,50(7):0712001.
Li Y C, Liu J N, Shi H D. Research on identification of marine oil spill based on polarization characteristics[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7): 0712001.
- Bello J, Smirnov A G, Toomey P. Development of a fluorescence polarization submersible instrument for the detection of submerged heavy oil spill[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8372: 83720B.
- 史浩东,王稼禹,李英超,等.复杂海况下海洋生态环境多维度光学监测方法[J].光学学报,2022,42(6):0600004.
Shi H D, Wang J Y, Li Y C, et al. Multi-dimensional optical monitoring method of marine ecological environment under complex sea conditions[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0600004.
- 李岩松,赵慧洁,李娜,等.基于中红外偏振的海面太阳耀光背景下的目标探测[J].中国激光,2022,49(19):1910004.
Li Y S, Zhao H J, Li N, et al. Detection of marine targets covered in sun glint based on mid-infrared polarization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1910004.
- Löw J, Kronander J, Ynnerman A, et al. BRDF models for accurate and efficient rendering of glossy surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(1): 1-14.
- Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[M]. Washington, D. C.: U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1977.
- Priest R G, Gemer T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model theory and measurements[EB/OL]. [2022-03-06]. <https://www.nist.gov/publications/polarimetric-brdf-microfacet-model-theory-and-measurements-0>.
- Yoshimori K, Itoh K, Ichioka Y. Optical characteristics of a wind-roughened water surface: a two-dimensional theory[J]. Applied Optics, 1995, 34(27): 6236-6247.
- Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(11): 838-850.
- 徐瑞超.偏振脉冲激光粗糙面散射退偏特性研究[D].西安:西安工业大学,2018.
Xu R C. Depolarization properties of polarized laser pulse beams scattering on random rough surface[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018.
- Minnaert M. The reciprocity principle in lunar photometry[J]. The Astrophysical Journal Letters, 1941, 93: 403-410.
- Hors L, Hartemann P, Dolfi D, et al. Phenomenological model of paints for multispectral polarimetric imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4370: 94-105.
- 于婷,战俊彤,马莉莉,等.椭球形粒子浓度对激光偏振传输特性的影响[J].中国激光,2019,46(2):0208002.
Yu T, Zhan J T, Ma L L, et al. Effect of ellipsoidal particle concentration on laser polarization transmission characteristics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0208002.
- 张肃,战俊彤,付强,等.不同形状的非球形粒子对偏振传输特性的影响[J].光学学报,2019,39(6):0629001.
Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Influence of non-spherical particles with different shapes on polarization transmission characteristic[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0629001.
- 张肃,战俊彤,付强,等.非均匀烟雾环境对偏振光传输特性的影响[J].光学学报,2018,38(7):0729002.
Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Influence of inhomogeneous smog environment on transmission characteristics of polarized light[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0729002.
- 张肃,战俊彤,白思克,等.烟雾浓度对偏振光传输特性的影响[J].光学学报,2016,36(7):0729001.
Zhang S, Zhan J T, Bai S K, et al. Influence of smoke concentration on transmission characteristics of polarized light[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0729001.
- 高峰,李小文,夏宗国,等.基于知识的分阶段不确定性多角度遥感反演[J].中国科学(D辑:地球科学),1998,28(4):346-350.

- Gao F, Li X W, Xia Z G, et al. Knowledge-based multi-angle remote sensing inversion of staged uncertainty[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 1998, 28(4): 346-350.
- [28] 刘佳, 范文义. BRDF 模型及其反演研究的现状及展望[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(1): 104-110.
Liu J, Fan W Y. Review on BRDF model and the inversion strategy[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(1): 104-110.
- [29] 汪方斌, 伊龙, 王峰, 等. 基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1129002.
- Wang F B, Yi L, Wang F, et al. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surfaces based on diffuse reflection optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1129002.
- [30] 战俊彤, 张肃, 付强, 等. 不同湿度环境下可见光波段激光偏振特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(9): 20200057.
Zhan J T, Zhang S, Fu Q, et al. Laser polarization characteristics of visible light band in different humidity environments[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20200057.

Polarization Characteristics of Multi-Angle Visible Light of Oil Spill Target in Rough Water Environment

Zhang Wei^{1,2}, Zhan Juntong^{1*}, Zhang Su¹, Fu Qiang¹, Li Yingchao¹, Duan Jin³,
Bao Shicheng^{1,2}, Jiang Huilin¹

¹National and Local Joint Engineering Research Center for Space Optoelectronics Technology, Jilin Key Laboratory of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

³School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract

Objective Oil spill pollution has caused great harm to the marine environment and human society. Accurate identification of marine oil spills can help formulate oil spill treatment strategies and assess disaster losses. Optical characteristics, essential characteristics of marine targets, can reflect the physical and chemical properties, geometric surface, and other characteristic information of marine targets from the aspects of wavelength (frequency), energy, phase angle, polarization state, scattering or radiation characteristics, etc. In addition to the intensity, spectrum, and multi-angle detection methods, there is also polarization information in the reflected radiation of the detected target. When the light wave interacts with the surface of seawater, oil film, and other media, the polarization characteristics of the reflected light wave will change. Polarization detection has fogged permeability to a certain extent, which can weaken the influence of sea fog, significantly improve the contrast between target and background, and weaken or even eliminate the influence of solar flares. However, research on the polarization detection mechanism and the modeling of marine oil spills is still insufficient, which restricts the understanding of polarization characteristics and affects practical applications. Therefore, it is necessary to study the polarization detection mechanism of marine oil spills and build a theoretical model to improve the marine detection ability.

Methods On the basis of the Priest and Germer (P-G) theory, this study comprehensively considers specular reflection, diffuse reflection, and volume scattering, optimizes the traditional model for oil spills on the sea surface, and proposes a polarized bidirectional reflection distribution function (pBRDF) model for oil spills on the sea surface that includes the scattering part. Then, it tests the polarization characteristics of five different oil spill targets (i. e., engine oil, crude oil, diesel oil, kerosene, and gasoline) in the rough water surface environment. By the comparison of the experimental data with the simulations, the visible light polarization characteristics of different oil spills are obtained, and the correctness of the model is verified.

Results and Discussions The linear polarization of different oil spills is different, but the general law remains the same. When the incident zenith angle is unchanged and the relative azimuth is 180° , the linear polarization tends to increase first and then decrease with the increase in the observed zenith angle (Fig. 6). When the incident zenith angle is constant, the degree of linear polarization also tends to increase first and then decrease with the increase in the observed zenith angle (Fig. 10). The degree of linear polarization rises before it declines as the relative azimuth grows, and it reaches the

maximum at the relative azimuth of 180° . The linear polarization degree is high in the relative azimuth angle range of $120^\circ - 240^\circ$ and low otherwise (Fig. 7). In addition, the improved pBRDF model of oil spills has high confidence accuracy, which is more than 80% (Tables 2-5).

Conclusions According to the micro panel theory, this paper comprehensively considers specular reflection, diffuse reflection, and volume scattering, optimizes the traditional model for oil spills on the sea surface, and proposes a pBRDF model of oil spills on the sea surface that includes the scattering part. The model can reduce the error caused by the case only considering specular reflection. The comparison with the experimental data shows that the fitted curve is in good agreement with the measured data, and the model built in this paper is accurate.

The relationships between the linear polarization and the incident zenith angle, observation zenith angle, relative azimuth, and wavelength are studied. The results indicate that the incident zenith angle, observation zenith angle, relative azimuth, and wavelength have an impact on the linear polarization of oil spills. The linear polarization increases slightly with the increase of wavelength in the visible light range, but the linear polarization of the observation zenith angle and relative azimuth barely changes relative to that of the incident zenith angle. The linear polarization tends to increase first and then decrease as the relative azimuth rises, and the peak appears at the relative azimuth of 180° . At this time, the same trend of linear polarization holds as the observation zenith angle and the incident zenith angle grow, and the contrast is high. When the relative azimuth is 0° , the linear polarization registers the smallest when the incident zenith angle is equal to the observed zenith angle. The construction of the pBRDF model for oil spills on the sea surface and the investigation of the influence of the incident zenith angle, observation zenith angle, relative azimuth, and wavelength on linear polarization are conducive to realizing the accurate detection of oil spills on the sea surface and can provide a reference in this regard. The model and experimental scheme will be further optimized to study the influence of temperature on the linear polarization of oil spills and build a more accurate model.

Key words oceanic optics; polarization characteristics; polarized bidirectional reflectance distribution function; P-G model; visible light; oil spill target