

# 海面溢油水包油乳化液探测参数的 BRRDF 仿真研究

张晓丹<sup>1</sup>, 孔德明<sup>2\*</sup>, 袁丽<sup>1</sup>, 孔德翰<sup>3</sup>, 孔令富<sup>1</sup>, 贾海阳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>2</sup>燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>3</sup>河北环境工程学院信息工程系, 河北 秦皇岛 066000

**摘要** 激光诱导荧光(LIF)是一种有效的海面溢油遥感探测技术,双向反射辐射再分布函数(BRRDF)可以描述介质表面入射激光与出射荧光的量值关系,为 LIF 技术探测海面溢油污染提供理论指导。基于蒙特卡罗方法建立了海面溢油水包油乳化液的光子传输模型,利用米散射理论计算水包油乳化液的固有光学参数,分析其不同乳化时间、荧光波长、探测接收角度下的 BRRDF 与光子出射、入射天顶角余弦的乘积  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$ 。仿真结果表明,随着水包油乳化液乳化时间的增加,  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  整体呈上升趋势,且在荧光量子产率较大的荧光波长处较大。收发共轴 LIF 系统的接收光功率受探测接收角度、水包油乳化液的厚度和浓度的影响,当探测接收角度小于  $50^\circ$  时,系统的接收光功率较大。

**关键词** 激光诱导荧光; 水包油乳化液; 双向反射辐射再分布函数; 蒙特卡罗方法

中图分类号 P733.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1701001

## BRRDF Simulation Research on Detection Parameters of Oil-in-Water Emulsion of Oil Spill on Sea Surface

Zhang Xiaodan<sup>1</sup>, Kong Deming<sup>2\*</sup>, Yuan Li<sup>1</sup>, Kong Dehan<sup>3</sup>, Kong Lingfu<sup>1</sup>, Jia Haiyang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

<sup>3</sup>Department of Information Engineering, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao, Hebei 066000, China

**Abstract** Laser induced fluorescence (LIF) is an effective remote sensing technology for detecting oil spills on the sea surface. Bidirectional reflectance and reradiation distribution function (BRRDF) can describe the quantitative relationship between the incident laser and the emission fluorescence on the surface of mediums, which provides theoretical guidance for LIF technology to detect oil spill pollution on the sea surface. Based on Monte Carlo method, the photon transmission model of oil-in-water emulsion is established. The intrinsic optical parameters of oil-in-water emulsion are calculated by using the Mie scattering theory. The product of BRRDF and the cosine of photon emission and incident zenith angles  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  is analyzed under different emulsifying time, fluorescence wavelength, and detection receiving angle. Simulation results show that with the increase of emulsifying time of oil-in-water emulsion,  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  is an overall upward trend, and it is larger at the fluorescence wavelength where the fluorescence quantum yield is larger. The receiving optical power received by the transceiver coaxial LIF system is affected by its detection-receiving angles, thickness and concentration of oil-in-water emulsion, When the detection receiving angle is less than  $50^\circ$ , the received optical power of the system is larger.

**Key words** laser induced fluorescence; oil-in-water emulsion; bidirectional reflectance and reradiation distribution function; Monte Carlo method

**OCIS codes** 300.2530; 010.4450; 290.7050; 290.1483

收稿日期: 2020-04-09; 修回日期: 2020-05-19; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05019001-011)

\* E-mail: demingkong@ysu.edu.cn

# 1 引 言

随着海洋运输业和海洋石油开采业的快速发展,海面溢油污染日益严重<sup>[1]</sup>。能否及时监测海面溢油信息、鉴别溢油种类、评估溢油范围及污染程度是快速有效治理溢油污染的基础<sup>[2]</sup>。现有的海面溢油监测技术包括高光谱遥感<sup>[3-4]</sup>、反射光谱<sup>[5-6]</sup>、差分激光三角法<sup>[7-8]</sup>、激光诱导荧光(LIF)技术<sup>[9-10]</sup>等。其中,LIF技术具有探测灵敏度高、空间分辨率高、便捷等优点,广泛应用于海面溢油遥感探测<sup>[11]</sup>。

溢油进入海域迅速扩散,并受海面风浪、光氧化、生物降解等作用逐渐形成水包油或油包水乳化液,在激光雷达的照射下可受激发射荧光。目标荧光可由双向反射再辐射分布函数(BRRDF)表征,Glassner等<sup>[12]</sup>研究了目标荧光辐射的过程;Hullin等<sup>[13]</sup>提出了包含荧光发射过程的BRRDF。目前对BRRDF的研究已应用到海洋遥感领域中,孙兰君<sup>[14]</sup>利用BRRDF仿真分析了未乳化阶段不同厚度的海面溢油油膜荧光特性,但对乳化液在不同乳化时间、探测接收角度等参数下的荧光特性研究较少。

针对水包油乳化液,本文基于蒙特卡罗方法建立了光子在介质中传输的BRRDF模型,模拟了水包油乳化液在不同探测参数下的BRRDF( $X_{BRRDF}$ )与光子出射天顶角 $\theta_r$ 、入射天顶角 $\theta_i$ 的余弦乘积 $X_{BRRDF} \cos \theta_r \cos \theta_i$ ,并得到了基于LIF技术探测海面溢油水包油乳化液的接收光功率与探测参数的关系。

## 2 水包油乳化液的BRRDF仿真

### 2.1 仿真原理

$X_{BRRDF}$ 由入射波长 $\lambda_i$ 、入射天顶角 $\theta_i$ 、入射方位角 $\varphi_i$ 、出射波长 $\lambda_r$ 、出射天顶角 $\theta_r$ 、出射方位角 $\varphi_r$ 构成,是描述出射方向 $(\theta_r, \varphi_r)$ 的微分辐亮度 $dL_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda_r)$ 与入射方向 $(\theta_i, \varphi_i)$ 的微分辐照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda_i)$ 比值关系的函数,可表示为<sup>[13]</sup>

$$X_{BRRDF}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda_i, \lambda_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda_i)} = \frac{d\Phi_r dS}{d\Phi_i \cos \theta_i \cos \theta_r dA d\Omega_r}, \quad (1)$$

式中, $d\Phi_r$ 、 $d\Phi_i$ 分别为出射光和入射光的辐射微通量, $dS$ 、 $dA$ 分别为入射光和出射光的微面元面积, $d\Omega_r$ 为出射方向的微立体角。图1为 $X_{BRRDF}$ 的几何示意图。

根据 $X_{BRRDF}$ 的定义和激光荧光雷达方程可知<sup>[14-15]</sup>,相同探测接收条件下,在某一接收波长处,

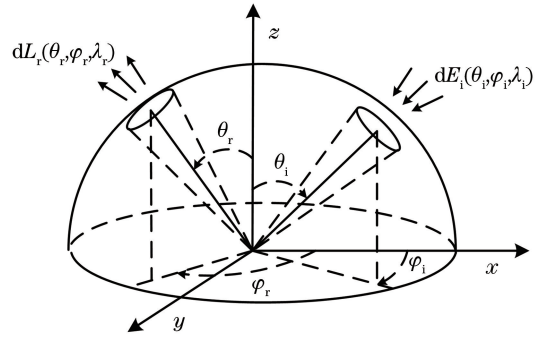


图1  $X_{BRRDF}$ 的几何示意图

Fig. 1 Geometric diagram of  $X_{BRRDF}$

LIF探测系统接收到的光功率 $P_r$ 与 $X_{BRRDF} \cos \theta_r \cos \theta_i$ 成正比,可表示为

$$P_r \propto X_{BRRDF} \cos \theta_r \cos \theta_i. \quad (2)$$

通过模拟海面溢油污染中水包油乳化液不同探测参数的 $X_{BRRDF} \cos \theta_r \cos \theta_i$ ,可得到LIF系统的接收光功率与探测参数的关系。为获取目标不同出射方向的 $X_{BRRDF} \cos \theta_r \cos \theta_i$ ,采用蒙特卡罗方法模拟光子在水包油乳化液污染海水中的传输过程,记录介质上方各单位立体角出射的荧光光子总权重,其中,蒙特卡罗方法的程序参考文献<sup>[16]</sup>编写。

因光子在海水中传输时会发生衰减,因此,用水包油乳化液上方的空气层和下方的海水层共同组成溢油乳化液污染的介质层。光子在介质中传输时,会发生折射、反射、散射、辐射荧光等随机事件,光子在介质中传输的示意图如图2所示。

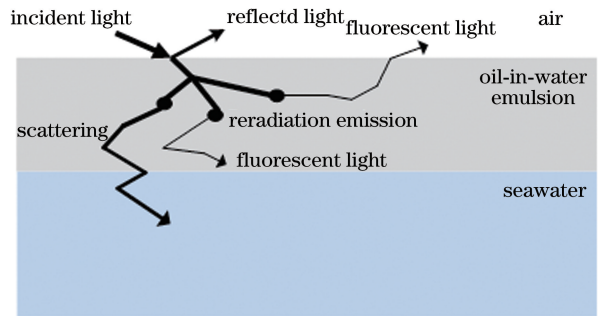


图2 光子的传输示意图

Fig. 2 Schematic diagram of photon transmission

利用蒙特卡罗方法模拟光子在溢油乳化液污染介质层中的传输过程,首先,光子以初始信息(包括位置方向权重等)进入介质。然后,光子发生随机事件,确定其步长、位置、方向及体散射相函数等。该过程伴随着光子权重的变化,当光子权重过小时,发射下一个光子。记录光子的位置及权重,直至光子从海面出射。重复上述过程直到发射完所有光子,最后统计所有光子的出射信息。

光子在介质中通过散射改变其传输方向,主要由光子所在波长处的散射相函数<sup>[17]</sup>决定。若油滴受激发射出荧光,则荧光的初始运动方向由各向同性散射相函数,即  $\theta = \arccos(2\xi - 1)$  决定,其中,  $\xi$  为  $[0, 1]$  之间的一个随机数。然后采用荧光波段的介质散射相函数更新光子运动方向。若未产生荧光,则按照激光波段的介质散射相函数更新光子运动方向。在散射事件之间光子发生的吸收作用,满足微观朗伯-比尔定律。吸收作用是通过重新统计光子的权重实现的,可表示为<sup>[18]</sup>

$$w_i = w_{i-1} \cdot \exp(-\mu_a \cdot s), \quad (3)$$

式中,  $w_i, w_{i-1}$  分别为第  $i$  和第  $i-1$  次散射后的权重,  $\mu_a$  为光子在介质中的吸收系数,  $s$  为光子步长。

由于吸收作用,光子权重  $w$  会逐渐减小,因此,设置权重阈值为  $10^{-6}$ ,采用俄罗斯赌盘规则判断当前光子是否需要继续传输。当  $w \leq 10^{-6}$ ,光子的传输概率为  $1/m (m=10)$ 。此时更新光子权重,可表示为<sup>[19]</sup>

$$w = \begin{cases} mw, & \text{if } \xi \leq 1/m \\ 0, & \text{if } \xi > 1/m \end{cases}, \quad (4)$$

表 1 不同乳化时间的水包油乳化液油滴粒径分布

Table 1 Oil droplet size distribution of oil-in-water emulsions with different emulsification time

Time /d	Radius for maximum of distribution $r_0/\mu\text{m}$	Parameter of a shape of distribution $\sigma$
0	0.250	1.02
1	0.200	0.98
7	0.125	0.90
14	0.080	0.87

表 2 Petrobaltic 油品和海水的的光学参数

Table 2 Optical parameters of Petrobaltic oil and seawater

Wavelength /nm	Petrobaltic		Seawater		
	$a / \text{m}^{-1}$	Refractive index	$a / \text{m}^{-1}$	$b / \text{m}^{-1}$	Refractive index
405	20110	1.490	0.7	0.70	1.345
500	3270	1.482	0.3	0.50	1.339
618	1260	1.477	0.4	0.45	1.334

表 3 水包油乳化液油滴粒子的吸收系数、散射系数(Petrobaltic 油品)

Table 3 Absorption coefficient and scattering coefficient of oil droplets particle of oil-in-water emulsion (Petrobaltic oil)

Time /d	405 nm		500 nm		618 nm	
	$a / \text{m}^{-1}$	$b / \text{m}^{-1}$	$a / \text{m}^{-1}$	$b / \text{m}^{-1}$	$a / \text{m}^{-1}$	$b / \text{m}^{-1}$
0	0.1236	2.6905	0.0215	2.8400	0.0084	2.8804
1	0.1612	4.3136	0.0278	4.4935	0.0108	4.5165
7	0.1781	8.6540	0.0300	8.4395	0.0117	8.0408
14	0.1678	12.1213	0.0279	10.8637	0.0108	9.6768

### 2.2.2 不同乳化时间的仿真研究

溢油进入海面经风化形成水包油乳化液后要经历很长时间才能被微生物降解直至降入海底,这会

式,  $w=0$  时光子死亡,此时停止对该光子的追踪,重新发射并跟踪下一个光子。

对于介质中具有荧光性质的油滴,吸收入射光能量辐射荧光时,由荧光光子产率  $\gamma$  作为荧光阈值概率。当  $\gamma > \xi$  时,荧光物质油滴产生荧光<sup>[20-21]</sup>,此时荧光光子的初始权重  $w_0$  可表示为<sup>[22]</sup>

$$w_0 = w[1 - \exp(-\mu_{\text{afx}} \cdot s)], \quad (5)$$

式中,  $\mu_{\text{afx}}$  为油滴在激光波长处的吸收系数。

## 2.2 仿真研究

### 2.2.1 仿真参数设置

光子在介质中传输发生的随机事件概率由介质的吸收系数  $a$ 、散射系数  $b$  等光学参数决定。实验使用文献[23-24]中的水包油乳化液在不同乳化时间的油滴粒径分布参数、Petrobaltic 油品的的光学参数和 Petzold 测量的海水光学参数,如表 1、表 2 所示。由米散射理论<sup>[25]</sup> 计算得出体积分数为  $10^{-6}$  的水包油乳化液油滴粒子在不同波长、不同乳化时间的吸收系数  $a$ 、散射系数  $b$ ,结果如表 3 所示。

表 1 不同乳化时间的水包油乳化液油滴粒径分布

Table 1 Oil droplet size distribution of oil-in-water emulsions with different emulsification time

Time /d	Radius for maximum of distribution $r_0/\mu\text{m}$	Parameter of a shape of distribution $\sigma$
0	0.250	1.02
1	0.200	0.98
7	0.125	0.90
14	0.080	0.87

表 2 Petrobaltic 油品和海水的的光学参数

Table 2 Optical parameters of Petrobaltic oil and seawater

Wavelength /nm	Petrobaltic		Seawater		
	$a / \text{m}^{-1}$	Refractive index	$a / \text{m}^{-1}$	$b / \text{m}^{-1}$	Refractive index
405	20110	1.490	0.7	0.70	1.345
500	3270	1.482	0.3	0.50	1.339
618	1260	1.477	0.4	0.45	1.334

表 3 水包油乳化液油滴粒子的吸收系数、散射系数(Petrobaltic 油品)

Table 3 Absorption coefficient and scattering coefficient of oil droplets particle of oil-in-water emulsion (Petrobaltic oil)

Time /d	405 nm		500 nm		618 nm	
	$a / \text{m}^{-1}$	$b / \text{m}^{-1}$	$a / \text{m}^{-1}$	$b / \text{m}^{-1}$	$a / \text{m}^{-1}$	$b / \text{m}^{-1}$
0	0.1236	2.6905	0.0215	2.8400	0.0084	2.8804
1	0.1612	4.3136	0.0278	4.4935	0.0108	4.5165
7	0.1781	8.6540	0.0300	8.4395	0.0117	8.0408
14	0.1678	12.1213	0.0279	10.8637	0.0108	9.6768

对海水造成严重的污染。因此,根据溢油乳化时间,了解乳化液微观状态,对治理海洋生态环境具有重要意义。

为了研究水包油乳化液在不同乳化时间下辐射的荧光特性,基于水包油乳化液介质层结构和固有的光学参数,仿真得到厚度为 5 cm,体积分数为  $10^{-6}$  的水包油乳化液在不同乳化时间的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$ 。仿真模型的条件:气体与水体界面水平、海水为无限深、水体内部无其他光源,光源与探测器的距离无限远,且不考虑光偏振现象。为突出水体的内部散射,去除水

体的镜面反射部分。仿真中激光波长为 405 nm,荧光波长分别为 618,500 nm,入射  $10^8$  个虚拟光子到受乳化溢油污染的海水表面,入射天顶角  $\theta_i = 45^\circ$ ,方位角  $\varphi_i = 180^\circ$ 。荧光波长为 618 nm,水包油乳化液在乳化时间为 0,1,7,14 d 的仿真结果如图 3 所示。其中,上方圆周上的角度表示光子的方位角,半径上的坐标表示光子的天顶角,从小到大依次  $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 。

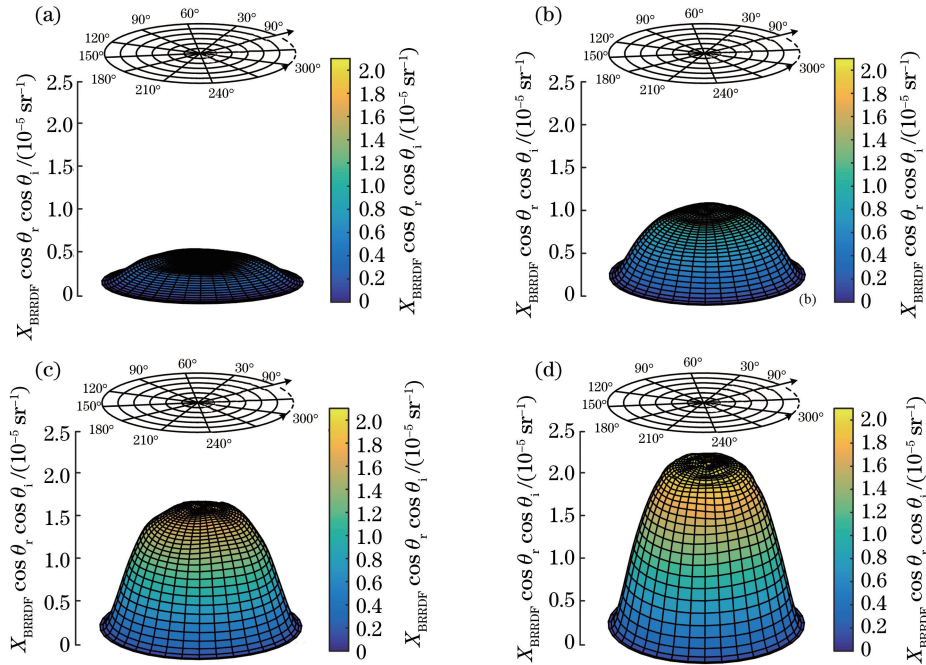


图 3 水包油乳化液在不同乳化时间的仿真结果。(a) 0 d;(b) 1 d;(c) 7 d;(d) 14 d

Fig. 3 Simulation results of oil-in-water emulsion at different emulsification time. (a) 0 d; (b) 1 d; (c) 7 d; (d) 14 d

从图 3 中可以发现,  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  的形状大致关于中心对称,与光子入射方向的方位角无关,原因是产生的荧光为各向同性的。  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  随乳化时间的增加,总体均呈上升趋势,原因是水包油乳化液的吸收系数、散射系数和消光系数随乳化时间的增加发生了变化。水包油乳化液的消光系数为吸收系数和散射系数之和,根据表 3 中的数据计算得到,油滴粒子的消光系数在激发波长、荧

光波长处随乳化时间的增加逐渐增大。水包油乳化液具有吸收和散射性质,且满足微观朗伯-比尔定律<sup>[26]</sup>,当溶液的体积分数极小时,荧光强度与消光系数成正比,即  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  随消光系数的增大而增大。荧光波长 500 nm 与荧光波长 618 nm 的变化趋势一致。

图 4 为荧光波长分别为 618,500 nm 时,在入射方位角为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  所在方向截面上,水包油乳化

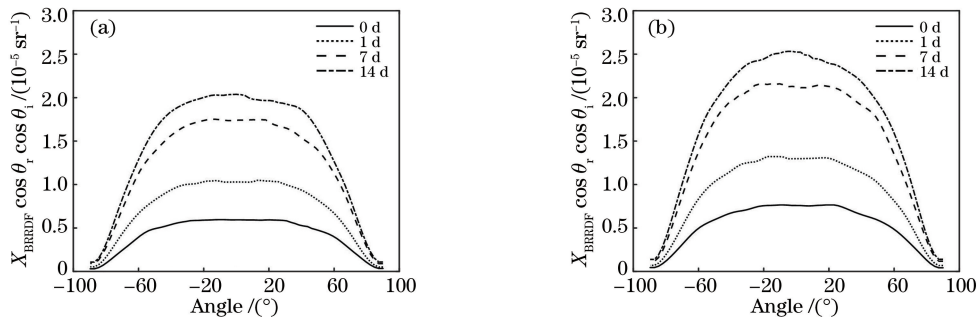


图 4 不同荧光波长处的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$ 。(a) 618 nm;(b) 500 nm

Fig. 4  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  at different fluorescence wavelengths. (a) 618 nm; (b) 500 nm



液在不同乳化时间下的仿真结果。

对比图 4(a)、图 4(b)可以发现,618,500 nm 波长处的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  不同,且 500 nm 荧光波长处的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  整体偏高。原因是水包油乳化液受激光照射时,油滴吸收能量发射出 500 nm 荧光比 618 nm 荧光的概率高。500,618 nm 波长处的荧光量子产率分别为 0.30、0.24<sup>[14]</sup>,前者荧光被发射的能力更强,可使系统接收到更多的荧光光子。

由上述仿真可知,利用 LIF 系统的接收光功率可反推出水包油乳化液的乳化时间,然后通过不同荧光波长处 LIF 系统接收光功率的比值推断乳化时间,使结果更加可信。根据推断结果能进一步预测出水包油乳化液对生态环境的影响,为有关部门采取有效治理与防御方案给出合理建议。

### 2.2.3 探测与接收角的仿真研究

激光诱导荧光设备搭载无人机、飞机、卫星等对

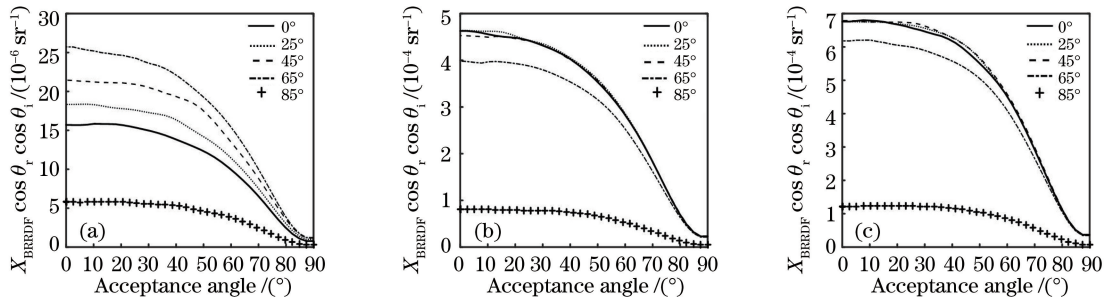


图 5 不同水包油乳化液  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  的仿真曲线。(a)第 1 组;(b)第 3 组;(c)第 5 组

Fig. 5  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  simulation curves of different oil-in-water emulsions. (a) Group1; (b) group3; (c) group5

由图 5 可以发现,  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  受探测天顶角、接收天顶角,乳化液厚度、体积分数的影响。且  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  随  $\theta_r$  的增大逐渐减小,当  $\theta_r = 0^\circ$  时有最大值,即探测角  $\theta_i$  一定时,LIF 系统在  $\theta_r = 0^\circ$  时的接收光功率最大。接收角  $\theta_r$  一定时,图 5(a)中,LIF 系统的接收光功率随  $\theta_i$  的增大先增大后减小,图 5(b)、图 5(c)中则表现为先不变后减小。原因是相比图 5(b),图 5(a)的水包油乳化液厚度较小,在  $0^\circ \leq \theta_i \leq 65^\circ$  时,随探测天顶角的增加,更多的油滴粒子激发出荧光光子;相比图 5(c),图 5(a)的乳液体积分数较小,即消光系数较小,在  $0^\circ \leq \theta_i \leq 65^\circ$  时,随探测角度的增加,荧光光子更易出射到水面被接收。

一般情况下,基于 LIF 技术的探测系统为收发共轴结构,即  $\theta_i = \theta_r$ ,因此,实验仿真了不同水包油乳化液在  $\theta_i = \theta_r$  处的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$ 。图 6(a)为相同体积分数下的仿真结果,图 6(c)为相同厚度下的仿真结果,图 6(b)为厚度为 5 cm+体积分数为  $10^{-6}$  时仿真结果的放大图。

海面溢油进行监测时,接收光功率直接影响信息的采集和分析结果。而光功率受探测和接收角度的影响,因此选择合适的探测、接收角度对评估系统探测性能和实际监测具有重要意义。

因接收光功率与方位角无关,为了研究 LIF 系统的探测天顶角、接收天顶角与接收光功率的关系,分别对 5 组不同水包油乳化液在探测天顶角为  $0^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $65^\circ$  和  $85^\circ$  进行仿真,结果如图 5 所示。五组水包油乳化液分别设为厚度为 5 cm+体积分数为  $10^{-6}$ 、厚度为 80 cm+体积分数为  $10^{-6}$ 、厚度为 200 cm+体积分数为  $10^{-6}$ 、厚度为 5 cm+体积分数为  $10 \times 10^{-6}$ 、厚度为 5 cm+体积分数为  $20 \times 10^{-6}$ ,依次标记为 1~5 组。图 5 为第 1 组、第 3 组、第 5 组水包油乳化液在不同探测天顶角和接收天顶角的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$ 。

由图 6 可以发现,  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  随水包油乳化液体积分数和厚度的增大呈增大趋势,其最大值对应的探测接收角(最佳探测接收角)随乳液体积分数、厚度的增大均向左移动。从图 6(b)中发现,对于厚度、体积分数较小的水包油乳化液,  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  在  $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$  附近有最大值,即 LIF 探测系统在此处的接收光功率最大,当  $\theta_i = \theta_r > 50^\circ$  时光功率迅速减小;从图 6(a)、图 6(c)中发现,对于厚度、体积分数较大的水包油乳化液,  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  在  $\theta_i = \theta_r = 0^\circ$  附近有最大值。

综上所述,不同厚度和体积分数的水包油乳化液的最佳探测接收角存在一定差异,但不宜过大,对于厚度或体积分数较大的乳化液,其探测时系统的接收光功率较大,可适当增加探测接收角。实际探测中,对未知厚度和体积分数的水包油乳化液选择  $0^\circ \leq \theta_i = \theta_r \leq 50^\circ$  时,收发共轴 LIF 探测系统的接收光功率较大。由于海面溢油的其他状态如连续油膜状态,其光学性质与水包油乳化液不同,因此其

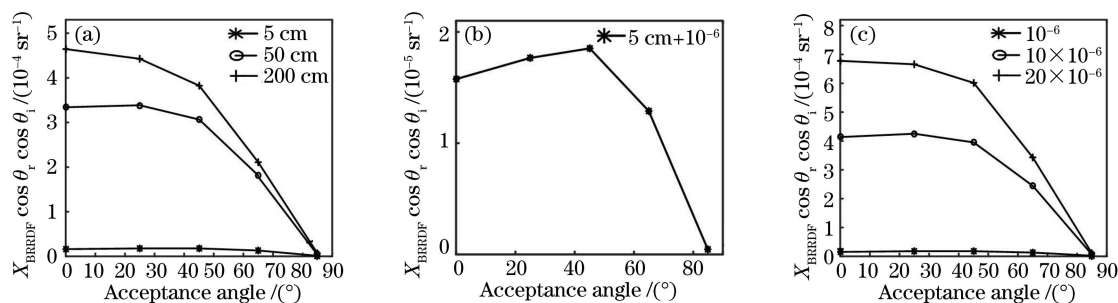


图6 不同水包油乳化液在  $\theta_i = \theta_r$  处的仿真结果。(a) 体积分数为  $10^{-6}$ ; (b) 厚度为 5 cm + 体积分数为  $10^{-6}$ ; (c) 厚度为 5 cm

Fig. 6 Simulation results of different oil-in-water emulsions at  $\theta_i = \theta_r$ . (a) Volume fraction is  $10^{-6}$ ; (b) thickness is 5 cm and volume fraction is  $10^{-6}$ ; (c) thickness is 5 cm

最佳探测接收角不能完全等同于水包油乳化液的仿真研究结果。

### 3 结 论

计算了水包油乳化液油滴在不同乳化时间的光学参数,仿真结果表明,油滴的光学参数随乳化时间的增加呈上升趋势。用蒙特卡罗模型模拟波长为 405 nm 的激光在水包油乳化液污染海水中的传输过程,得到荧光波长为 618,500 nm 处不同乳化时间的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$ 。结果表明,随乳化时间的增加,水包油乳化液的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  整体呈上升趋势,原因是水包油乳化液的消光系数随乳化时间的增加而增大。对比不同荧光波长处的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  发现,荧光波长不同,  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  也存在一定差异。最后通过改变探测角度,得到不同水包油乳化液的  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$ ,发现水包油乳化液的厚度、体积分数以及探测接收角度均会影响 LIF 系统的接收光功率,且探测接收角小于  $50^\circ$  时收发共轴 LIF 系统的接收光功率较大。这表明  $X_{\text{BRRDF}} \cos \theta_r \cos \theta_i$  可作为推断水包油乳化液乳化时间的重要依据,同时可以给出探测系统的最佳探测接收角度,为基于 LIF 技术对海洋溢油污染区域监测提供了重要理论基础,对探测系统的设计和实际监测也具有指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] Fedotov Y V, Belov M L, Kravtsov D A, et al. Comparative laser-induced fluorescence evolution analysis of different oil pollution on the terrestrial surface[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537: 022019.
- [2] Jarzabek D, Juskiewicz W. Analysis of the impact of weather conditions on the effectiveness of oil spill recovery operation in simulated conditions (pisces II) [J]. Annual of Navigation, 2017, 24(1): 315-326.
- [3] Uslu F S. Kernel parameter variation-based selective ensemble support vector data description for oil spill detection on the ocean via hyperspectral imaging[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017, 11(3): 032404.
- [4] Liu D L, Zhang J Q, Wang X R. Reference spectral signature selection using density-based cluster for automatic oil spill detection in hyperspectral images [J]. Optics Express, 2016, 24(7): 7411-7425.
- [5] Otremba Z, Piskozub J. Modelling the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of seawater polluted by an oil film[J]. Optics Express, 2004, 12(8): 1671-1676.
- [6] Sun L J, Tian Z S, Ren X Y, et al. Modeling the bidirectional reflectance distribution function of seawater with spilt oil [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(13): 134211.  
孙兰君, 田兆硕, 任秀云, 等. 溢油海水双向反射分布函数的建模及仿真[J]. 物理学报, 2014, 63(13): 134211.
- [7] Geng Y F, Chen X, Jin W, et al. Influence of seawater refractive index on the precision of oil film thickness measurement by differential laser triangulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0408004.  
耿云飞, 陈曦, 金文, 等. 海水折射率对差分激光三角法油膜厚度测量精度的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408004.
- [8] Wu D, Lü Q N, Ge B Z. Development of oil film thickness sensor based on buoy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0108004.  
吴颀, 吕且妮, 葛宝臻. 浮标式油膜厚度测量传感器的研制[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108004.
- [9] Chen Y N, Yang R F, Zhao N J, et al. Experimental study on quantitative detection of oil slick thickness

- based on laser-induced fluorescence[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(11): 3646-3652.
- [10] Zhu Q S, Hao S G, Luo N N, et al. Detection and quantification of vegetable oil adulteration based on laser-induced fluorescence spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1211002.  
朱泉水, 郝仕国, 罗宁宁, 等. 基于激光诱导荧光的植物油掺假检测与量化分析[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1211002.
- [11] Luan X N, Zhang F, Guo J J, et al. Polarization characterization of laser-induced fluorescence from the simulated oil samples based on polar decomposition of Mueller matrix [J]. spectroscopy and spectral analysis, 2018, 37(7): 2092-2099.
- [12] Glassner A S. A model for fluorescence and phosphorescence[M] // Sakas G, Müller S, Shirley P, et al. Photorealistic Rendering Techniques. Focus on Computer Graphics (Tutorials and Perspectives in Computer Graphics). Berlin, Heidelberg: Springer, 1995: 60-70.
- [13] Hullin M B, Hanika J, Ajdin B, et al. Acquisition and analysis of bispectral bidirectional reflectance and reradiation distribution functions [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4): 97.
- [14] Sun L J. Research on remote sensing technology of ocean environmental parameters based on laser induced fluorescence[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 41-64.  
孙兰君. 基于激光诱导荧光的海洋环境参量遥感探测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 41-64.
- [15] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. Applied Optics, 2000, 39(24): 4381-4391.
- [16] Wang L H, Jacques S L, Zheng L Q. MCML: Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1995, 47(2): 131-146.
- [17] Morel A, Antoine D, Gentili B. Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function[J]. Applied Optics, 2002, 41(30): 6289-6306.
- [18] Churmakov D Y, Meglinski I V, Piletsky S A, et al. Analysis of skin tissues spatial fluorescence distribution by the Monte Carlo simulation [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(14): 1722-1728.
- [19] Zhang Y L, Wang Y M, Huang A P. Influence of suspended particles based on Mie theory on underwater laser transmission[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0505002.  
张莹璐, 王英民, 黄爱萍. 米氏理论下悬浮粒子对水下激光传输的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0505002.
- [20] McShane M J, Rastegar S, Pishko M, et al. Monte Carlo modeling for implantable fluorescent analyte sensors [J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2000, 47(5): 624-632.
- [21] Ralston C Y, Wu X, Mullins O C. Quantum yields of crude oils [J]. Applied Spectroscopy, 1996, 50(12): 1563-1568.
- [22] Pogue B W, Burke G. Fiber-optic bundle design for quantitative fluorescence measurement from tissue [J]. Applied Optics, 1998, 37(31): 7429-7436.
- [23] Otremba Z. Oil droplets as light absorbents in seawater[J]. Optics Express, 2007, 15(14): 8592-8597.
- [24] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters[R]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography, 1972: 152-174.
- [25] Otremba Z, Krol T. Light attenuation parameters of polydisperse oil-in-water emulsion [J]. Optica Applicata, 2001, 31(3): 599-609.
- [26] Oda M, Yamashita Y, Nishimura G, et al. Quantitation of absolute concentration change in scattering media by the time-resolved microscopic beer-lambert law [J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 1994, 345: 861-870.