

# 融合拉曼散射光和荧光信号反演海面溢油厚度的算法研究

崔永强<sup>1</sup>, 孔德明<sup>2\*</sup>, 马勤勇<sup>1</sup>, 谢贝贝<sup>1</sup>, 张晓丹<sup>1</sup>, 孔德瀚<sup>3</sup>, 孔令富<sup>1</sup>

1. 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066000
2. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066000
3. 河北环境工程学院信息工程系, 河北 秦皇岛 066000

**摘要** 随着海洋溢油问题的日益严重, 多种遥感技术被用于海面溢油监测, 其中激光诱导荧光(LIF)技术是目前被认为最有效的海面溢油探测技术之一。Hoge 等基于 LIF 技术提出了一种利用拉曼散射光评估薄油膜厚度的积分反演算法并广泛应用于海面溢油探测, 针对该算法存在误差较大的问题, 提出一种融合拉曼散射光和荧光信号评估海面溢油厚度的反演算法。首先利用拉曼散射光信号反演油膜厚度, 然后利用该反演结果计算获取溢油油品的荧光特征光谱, 最后利用荧光信号反演油膜厚度。文中推导了利用荧光信号反演油膜厚度的算法, 给出了油品荧光特征光谱的逼近算法, 并给出了利用荧光信号反演油膜厚度的误差分析。通过实验对该方法进行了验证, 选用原油和柴油为实验油品, 以波长 405 nm 的激光作为激发光源, 采集波长范围为 420~700 nm, 采集了海水的背景荧光和拉曼散射光信号、实验油品 2, 5, 10 和 20  $\mu\text{m}$  等不同厚度油膜的光谱信号。将采集数据分为训练集和测试集, 利用训练集数据采用梯度下降法获取油品的荧光特征光谱, 利用测试集数据分别采用积分拉曼法和该方法反演油膜厚度。采用积分拉曼法, 原油不同厚度油膜反演结果的平均误差分别为 12.6%, 4.6%, 4.4% 和 2.3%, 柴油不同厚度油膜反演结果的平均误差分别为 14.0%, 7.0%, 4.2% 和 3.6%; 采用本文方法, 原油不同厚度油膜反演结果的平均误差分别为 2.5%, 2.2%, 1.2% 和 1.1%, 柴油不同厚度油膜反演结果的平均误差分别为 3.0%, 2.4%, 2.7% 和 1.6%。实验结果表明, 2  $\mu\text{m}$  油膜反演结果的误差降低最多, 原油和柴油 2  $\mu\text{m}$  油膜的反演结果误差分别由 12.6% 和 14.0% 降低为 2.5% 和 3.0%, 其他厚度油膜反演结果的误差也有较大程度的降低, 油膜厚度反演结果的误差均小于 3%, 采用本文算法可以有效提高油膜厚度反演结果的精度。

**关键词** 激光诱导荧光; 荧光光谱; 海面溢油; 油膜厚度; 梯度下降法

**中图分类号:** O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)01-0104-06

## 引言

随着海洋运输业和石油开采业的快速发展, 轮船排污、运油船只及海上钻井平台泄漏等溢油事故时有发生, 海上溢油污染问题日益严重<sup>[1]</sup>。快速高效的溢油探测对溢油污染的快速处理和水体环境的保护具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。

油膜厚度是海面溢油的重要参数。海面溢油厚度的评估, 传统方法是根据《波恩协议》油膜色彩与油膜厚度的对应关系人工确定油膜厚度。近年来多种遥感技术应用于溢油监测, 其中激光诱导荧光(laser induced fluorescence, LIF)技术

被认为是最有效的海面溢油探测技术之一<sup>[4-6]</sup>。Kung 等提出了利用 LIF 探测技术评估海面溢油的建模方法<sup>[7]</sup>, Hoge 等基于该方法提出了一种利用拉曼散射光评估薄油膜厚度的积分反演算法并进行了溢油探测实验<sup>[8]</sup>。我国对海面溢油也开展了大量的研究, 中国海洋大学成功研制了用于海洋参数测量的激光雷达系统并完成水面油膜的探测实验<sup>[9]</sup>。然而, 基于拉曼散射光的海面溢油反演算法在反演较薄油膜厚度时存在误差较大的问题, 基于此, 本文提出了一种融合拉曼散射光和荧光信号反演海面溢油厚度的算法, 利用拉曼散射光和荧光信号反演油膜厚度, 提高反演结果的精度, 并通过实验验证了该算法的正确性和有效性。

收稿日期: 2020-12-06, 修订日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173289)资助

作者简介: 崔永强, 1979 年生, 燕山大学信息科学与工程学院博士研究生 e-mail: hbyd\_yqc@sina.com

\* 通讯作者 e-mail: demingkong@ysu.edu.cn

## 1 油膜厚度反演算法

### 1.1 积分拉曼法原理

如引言所述, Hoge 等提出了一种适用于薄油膜厚度评估的反演算法, 其原理是海水受激光束照射激发的拉曼散射光由于海面油膜的吸收而呈负指数衰减, 依据拉曼散射光的衰减程度反演油膜厚度<sup>[8]</sup>, 该算法原理如图 1 所示。

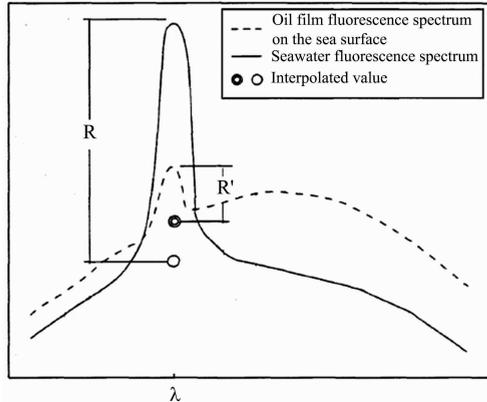


图 1 海面油膜厚度反演算法原理

Fig. 1 Principle diagram of inversion algorithm for oil film

采用 LIF 探测无溢油覆盖的海面, 探测器接收到清洁海水发射的拉曼散射光信号强度为  $R$ , 在海面存在溢油的条件下, 海水的拉曼散射光由于油层的吸收而衰减, 此时探测器接收到的拉曼散射光信号强度为  $R'$ , 因此油膜厚度  $d$  可表示为<sup>[8]</sup>

$$d = -\frac{1}{k_e + k_\lambda} \ln \frac{R'}{R} \quad (1)$$

式(1)中:  $k_e$  和  $k_\lambda$  分别为油膜在激发波长和波长  $\lambda$  处的消光系数;  $R'$  为油膜覆盖海面时海水的拉曼峰信号强度;  $R$  为纯净海水的拉曼峰信号强度。

### 1.2 积分拉曼法误差分析

设  $R_r$  和  $R_t$  分别为油膜拉曼信号的插值计算结果和理论值,  $d_r$  和  $d_t$  分别为油膜的反演计算厚度和理论厚度,  $E$  为拉曼信号的测量误差,  $E'$  为反演结果的误差, 即

$$R_r = (1 + E)R_t \quad (2)$$

$$d_r = (1 + E')d_t \quad (3)$$

由式(1)可得

$$d_r - d_t = -\frac{1}{k_e + k_\lambda} \ln(1 + E) \quad (4)$$

一般情况下,  $E \ll 1$ , 因此, 式(4)可以近似为

$$d_r - d_t = -\frac{1}{k_e + k_\lambda} E \quad (5)$$

由式(5)可得反演结果的误差  $E'$  为

$$E' = \frac{E}{\ln \frac{R_t}{R_r}} \quad (6)$$

在  $R_t$  不同相对误差条件下, 反演结果的误差  $E'$  与  $R_t/R$  的关系如图 2 所示。

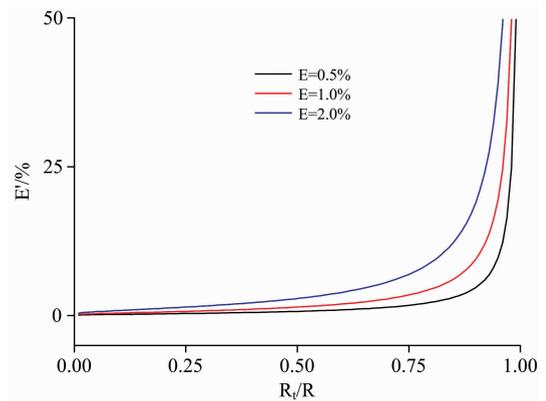


图 2  $E'$  与  $R_t/R$  的关系

Fig. 2 The relationship between  $E'$  and  $R_t/R$

由图 2 可见, 随着  $R_t/R$  的增加反演结果的相对误差逐渐增加, 当  $R_t/R$  趋于 1 时误差较大且随  $R_t/R$  的增加快速变大。由于薄油膜对海水的拉曼散射光吸收较弱, 其对应的  $R_t/R$  趋近于 1, 因此应用积分拉曼法反演薄油膜厚度时, 即使较小的误差同样会导致反演结果存在较大误差。

### 1.3 基于荧光信号的反演算法

采用 LIF 技术探测溢油覆盖的海面, 探测器接收到波长  $\lambda$  处的信号  $K$  包括油膜荧光信号、海水背景荧光信号和海水拉曼散射光信号三部分, 该信号可以表示为<sup>[7]</sup>

$$K = \eta P_0 \{1 - \exp[-(k_e + k_\lambda)d]\} + (\xi P_0 + \delta_r \Psi P_0) \exp[-(k_e + k_\lambda)d] \quad (7)$$

式(7)中,  $P_0$  为入射的激光能量,  $k_e$  和  $k_\lambda$  分别为油膜在激发波长和波长  $\lambda$  处的消光系数,  $d$  为油膜厚度,  $\eta$ ,  $\xi$  和  $\Psi$  分别为在波长  $\lambda$  处的油膜荧光转换效率、海水荧光转换系数和海水拉曼转换系数,  $\delta_r$  为  $\delta$  函数。

采用 LIF 技术探测无溢油覆盖的海面, 此时探测器接收到的信号为海水的背景荧光和拉曼散射光信号, 由式(7)可得波长  $\lambda$  处的信号  $K_w$  可表示为

$$K_w = \xi P_0 + \delta_r \Psi P_0 \quad (8)$$

油品的荧光特征光谱在波长  $\lambda$  处的信号记为  $K_o$ , 由式(7)可得

$$K_o = \lim_{d \rightarrow \infty} \eta P_0 \{1 - \exp[-(k_e + k_\lambda)d]\} = \eta P_0 \quad (9)$$

由式(7)、式(8)和式(9)可得利用荧光信号反演油膜厚度公式

$$d = -\frac{1}{k_e + k_\lambda} \ln \frac{K_o - K}{K_o - K_w} \quad (10)$$

式(10)可以消除积分拉曼法由于插值、去除荧光等操作引入的计算误差, 但是该算法需要获取油品的荧光特征光谱  $K_o$ , 因此利用式(10)反演油膜厚度的关键是获取准确的油品荧光特征光谱  $K_o$ 。

利用积分拉曼法获得的油膜厚度  $d$ , 由式(7)和式(9)推导可得  $K_o$  的计算公式为

$$K_o = \frac{K - K_w \exp[-(k_e + k_\lambda)d]}{1 - \exp[-(k_e + k_\lambda)d]} \quad (11)$$

由于积分拉曼法反演油膜厚度存在一定的误差, 因此利用式(11)计算获得的  $K_o$  与实际值也具有一定的差异, 可以

通过迭代逼近的方法获取准确的  $K_0$ 。方法如下:

- (1) 利用积分拉曼法反演油膜厚度  $d$ 。
- (2) 利用式(11)计算  $K_0$ 。
- (3) 计算  $K_0$  加权平均值  $\bar{K}_0$ ，并计算  $K_0$  与  $\bar{K}_0$  的差值，小于阈值则结束。
- (4) 根据  $K_0$  与  $\bar{K}_0$  的差值修改  $d$ ，继续执行 2。

本文采用梯度下降法逼近油品的荧光特征光谱，具体实现方法如下:

设油品的荧光特征光谱信号强度  $y$  与油膜厚度  $x$  的关系为

$$y(x) = \frac{K - K_w \exp[-(k_e + k_\lambda)x]}{1 - \exp[-(k_e + k_\lambda)x]} \quad (12)$$

代价函数定义为

$$J(x) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N \omega_i y(x_i) - y(x_i) \right]^2 \quad (13)$$

由于积分拉曼法反演油膜厚度的误差与油膜厚度成反比，因此在计算加权平均值时，采用油膜厚度反演结果作为权重值，使得较厚油膜具有较高的权重而较薄油膜的权重较小，式中

$$\omega_i = x_i \quad (14)$$

$$W = \sum_{i=1}^N \omega_i \quad (15)$$

梯度计算公式为

$$\nabla J(x_i) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N \omega_i y(x_i) - y(x_i) \quad (16)$$

每次迭代后调整油膜厚度为

$$x_i = x_i - \alpha \nabla J(x_i) \quad (17)$$

式(17)中:  $N$  为样本数量,  $\alpha$  为学习率。

关于阈值可根据反演精度要求进行设置, 一般可设置为  $\bar{K}_0$  值的 1% 范围内, 阈值设置越小迭代结果精度越高, 迭代获取的  $\bar{K}_0$  越最接近油品荧光特征光谱  $K_0$  的真实值。学习率参数  $\alpha$  用于调整迭代步长, 在相同阈值条件下,  $\alpha$  越小则迭代次数越多。

#### 1.4 误差分析

由式(13)可得

$$d = -\frac{1}{k_e + k_\lambda} \ln \left( 1 - \frac{K - K_w}{K_0 - K_w} \right) \quad (18)$$

在荧光波峰波段, 油品的信号强度通常要远大于纯净海水的信号强度, 而薄油膜信号强度和纯净海水信号强度的差值较小, 可得

$$\frac{K - K_w}{K_0 - K_w} \approx 0 \quad (19)$$

因此式(18)可近似为

$$d = \frac{1}{k_e + k_\lambda} \frac{K - K_w}{K_0 - K_w} \quad (20)$$

设油膜荧光特征光谱的理论值为  $K_0$ , 利用该算法获取的近似值为  $\bar{K}_0$ ,  $d_r$  和  $d_t$  分别为油膜的反演计算厚度和理论厚度,  $E$  为  $K_0$  的计算误差,  $E'$  为反演结果的误差, 即

$$\bar{K}_0 = (1 + E)K_0 \quad (21)$$

$$d_r = (1 + E')d_t \quad (22)$$

由式(20)、式(21)和式(22)可得到

$$E' = -\frac{E}{1 + E} \quad (23)$$

因此, 该算法反演油膜厚度的误差可近似为油膜荧光特征光谱的计算误差。

## 2 实验部分

实验装置和材料包括: AvaSpec-ULS2048 光谱仪、NDV4542 激光二极管、手柄支架、500 mL 烧杯和移液器, 实验油品为原油与白油的混合油(1:10)和柴油。实验过程如下:

(1) 在烧杯中放置 500 mL 海水, 采集纯净海水的背景荧光和拉曼散射光信号。

(2) 在烧杯中放置 500 mL 海水, 分别放置厚度为 2, 5, 10 和 20  $\mu\text{m}$  厚度的原油和柴油油膜, 静置 30 min, 待其扩散均匀后, 采集不同厚度油膜的荧光光谱。

(3) 在烧杯中放置足够厚油膜, 采集实验油品的荧光特征光谱。

光谱仪与激光器平行放置, 激光器发射的激光经 45° 反射镜改变激光束方向后, 照射到距离激光器 5 m 处放置的实验油品, 实验油品发射的荧光信号经反射镜改变方向后由光谱仪接收。实验装置如图 3 所示。

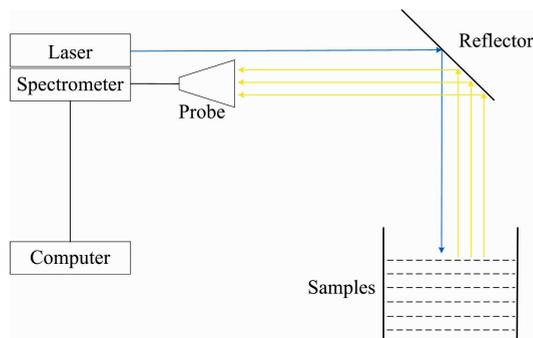


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental equipment structure

在采集过程中, 保持探头与样本距离不变, 采用 AvaSoft8 软件采集光谱信号, 积分时间为 200 ms, 采集波长范围为 420~700 nm, 每个油膜样本采集 50 条光谱数据, 每条数据均采用多次采集的光谱信号平均值作为采集结果。实验采集的部分光谱信号如图 4 所示。

## 3 结果与讨论

由图 4 可见, 海水的拉曼峰在 465 nm 附近, 薄油膜的拉曼峰与海水的拉曼峰差异较小, 随着油膜厚度增加拉曼峰强度逐渐降低。原油的荧光信号较弱, 柴油的荧光信号较强。由于拉曼峰与荧光波段重合, 因此利用积分拉曼法反演油膜厚度时, 需要消除荧光的影响。

将采集数据的 70% 作为训练集, 30% 作为测试集, 采用梯度下降法获取油品的荧光特征光谱, 以原油为例, 设置阈值参数为  $0.0001\bar{K}_0$ , 步长为 0.01。选取油品荧光信号较强波

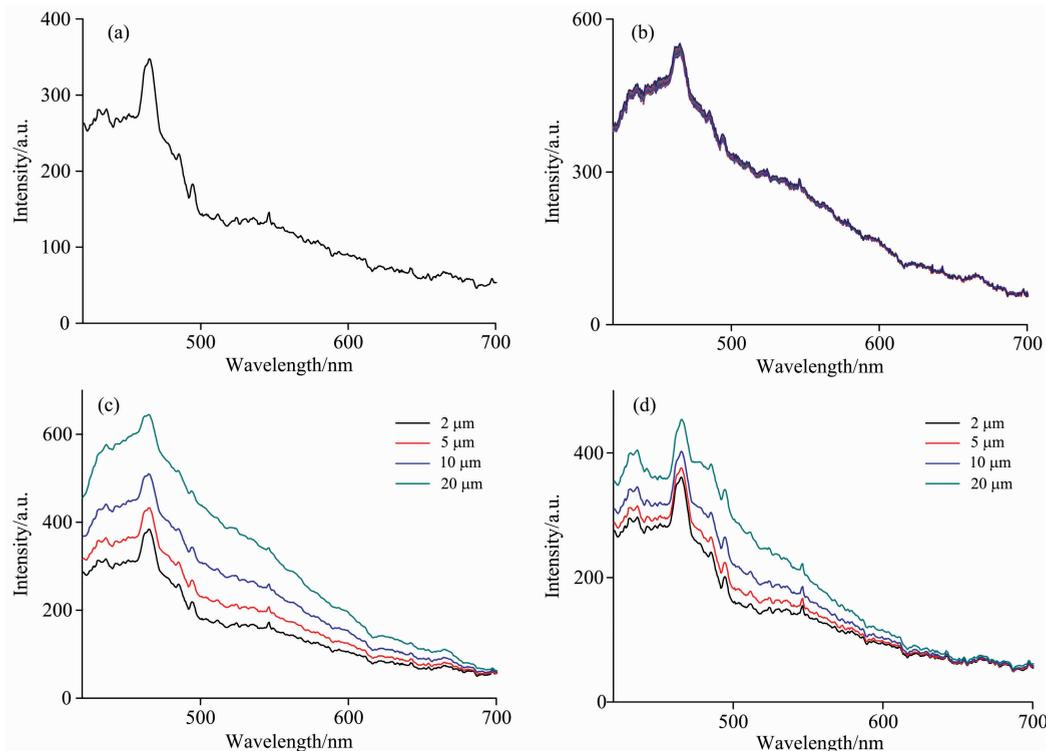


图 4 实验采集光谱信号

(a): 海水的背景荧光和拉曼散射光信号; (b): 10  $\mu\text{m}$  原油油膜荧光光谱信号;  
 (c): 原油不同厚度油膜的荧光光谱信号; (d): 柴油不同厚度油膜的荧光光谱信号

Fig. 4 Spectral signals collected in the experiment

(a): Background fluorescence and Raman scattering light spectra of sea water; (b): Fluorescence spectra of 10  $\mu\text{m}$  oil film;  
 (c): Fluorescence spectra of crude oil films with different thickness; (d): Fluorescence spectra of diesel oil films with different thickness

段, 在迭代 0, 10 和 100 次之后原油的荧光特征光谱如图 5 所示。在荧光波峰波段, 计算  $\bar{K}$ 。与油品荧光特征光谱  $K$ 。不同迭代次数的误差, 结果如图 6 所示。

膜厚度, 结果如表 1 所示。

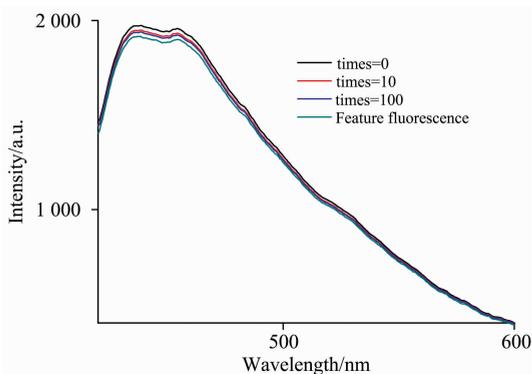


图 5 不同迭代次数获取的荧光特征光谱

Fig. 5 Feature fluorescence spectrum with different iterations

随着迭代次数的增加, 计算获取的荧光特征光谱与实验室获取的荧光特征光谱逐渐逼近, 迭代 100 次后, 在荧光波峰波段的误差在 1% 以内。采用式 (10) 反演油膜厚度时,  $K_r$  引入的反演误差如图 7 所示。

利用获取的油品荧光特征光谱, 采用测试集数据反演油

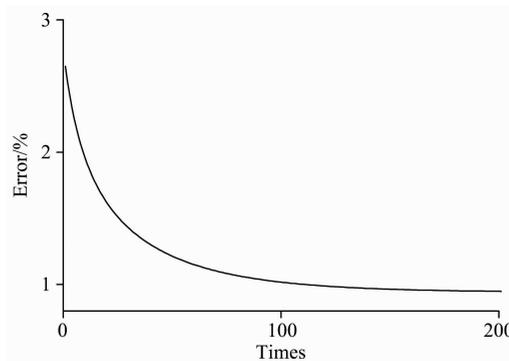


图 6 不同迭代次数  $K_r$  的误差值

Fig. 6 Error of  $K_r$  with different iterations

由表 1 可见, 积分拉曼法在油膜较薄时反演结果误差较大, 2  $\mu\text{m}$  厚度的原油和柴油油膜反演误差分别为 12% 和 14%, 随着油膜厚度的增加, 反演结果误差逐渐减小, 20  $\mu\text{m}$  厚度的原油和柴油油膜反演结果误差分别为 2.3% 和 3.6%, 而本文算法对不同厚度油膜反演结果的误差没有较大差异, 对不同厚度油膜均能取得较好的反演结果。本文算法反演结果的误差与积分拉曼法对比结果如图 8 所示。

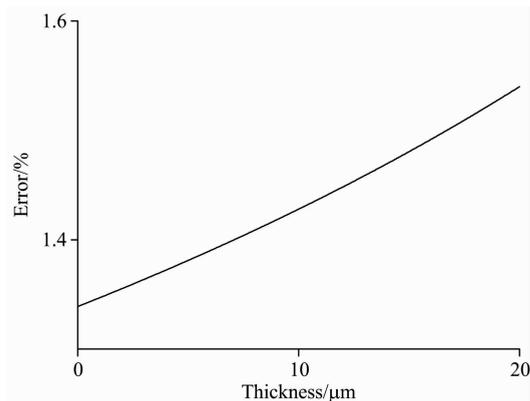


图 7  $K_0$  引入的反演结果误差  
Fig. 7 Error introduced by  $K_0$ .

表 1 油膜厚度反演结果  
Table 1 Inversion results of oil films

油品类型	实际厚度/ $\mu\text{m}$	积分拉曼法		本文方法	
		反演厚度/ $\mu\text{m}$	相对误差/%	反演厚度/ $\mu\text{m}$	相对误差/%
原油	2	1.76	12.0	2.05	2.5
	5	4.77	4.6	5.11	2.2
	10	9.56	4.4	9.88	1.2
	20	20.46	2.3	20.22	1.1
柴油	2	1.72	14.0	2.06	3.0
	5	4.65	7.0	5.12	2.4
	10	10.42	4.2	10.27	2.7
	20	20.71	3.6	20.31	1.6

由图 8 可见,采用本文算法可以有效提高油膜厚度反演结果的精度,尤其是  $2\ \mu\text{m}$  薄油膜效果最好,原油和柴油  $2\ \mu\text{m}$  油膜的反演结果误差分别由 12% 和 14% 降低为 2.4% 和 3.0%,其他厚度油膜反演结果的精度也有较大的提高,各种厚度油膜的反演结果误差均小于 3%,具有较高的反演精度。

### 4 结 论

针对积分拉曼法反演海面溢油厚度误差较大的问题,本

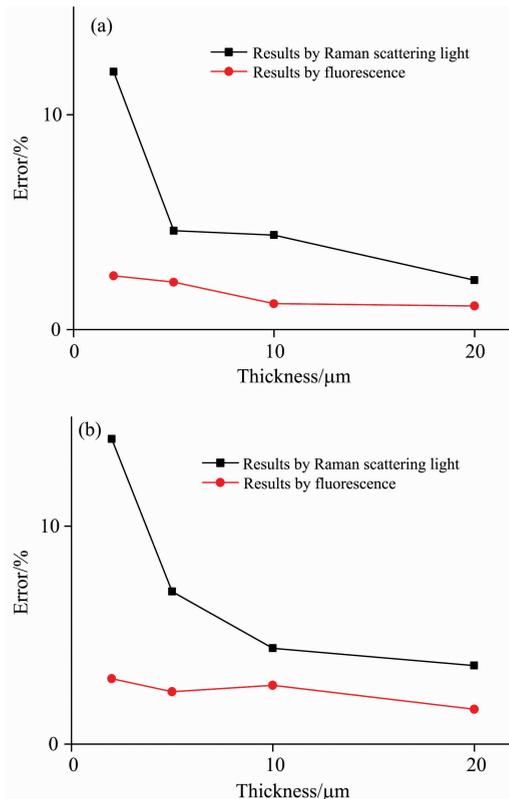


图 8 不同厚度油膜反演结果误差  
(a): 原油; (b): 柴油  
Fig. 8 Errors of oil films with different thickness  
(a): Crude oil; (b): Diesel oil

文提出了一种融合拉曼散射光和荧光信号反演油膜厚度的算法,首先利用积分拉曼法反演油膜厚度,然后利用该反演结果采用梯度下降法获取溢油油品荧光特征光谱的近似值,最后利用荧光信号反演油膜厚度。文中推导了利用荧光信号反演油膜厚度的算法,给出了油品荧光特征光谱的逼近算法,并给出了利用荧光信号反演油膜厚度的误差分析。以原油和柴油为实验油品,对该算法进行了实验验证,实验结果表明该算法能够有效提高薄油膜厚度的反演精度。利用迭代获取的溢油荧光特征光谱,该方法也可用于较厚油膜的厚度评估。

### References

[1] Dutta S, Joseph M, Kumari E V S S, et al. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(5): 633.  
 [2] LI Yi-xuan, LI Bo, LIN Guan-yu, et al(李羿轩, 李 博, 林冠宇, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2020, 40(8): 0801001.  
 [3] Li G N, Li Y, Liu B X, et al. Sensors, 2019, 19(23): 5176.  
 [4] Uslu F S. Journal of Applied Remote Sensing, 2017, 11(3): 032404.  
 [5] Fingas M, Brown C E. Sensors, 2018, 18(1): 91.  
 [6] CHEN Peng, MAO Zhi-hua, TAO Bang-yi, et al(陈 鹏, 毛志华, 陶邦一, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2018, 47(9): 0903004.  
 [7] Kung R T, Itzkan I. Applied Optics, 1976, 15(2): 409.  
 [8] Hoge F E. Applied Optics, 1983, 22(21): 3316.  
 [9] Li X L, Zhao C F, Ma Y J, et al. Journal of Ocean University of China, 2014, 13(4): 597.

# Algorithm Research on Inversion Thickness of Oil Spill on the Sea Surface Using Raman Scattering and Fluorescence Signal

CUI Yong-qiang<sup>1</sup>, KONG De-ming<sup>2\*</sup>, MA Qin-yong<sup>1</sup>, XIE Bei-bei<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-dan<sup>1</sup>, KONG De-han<sup>3</sup>, KONG Ling-fu<sup>1</sup>

1. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China

2. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China

3. Department of Information Engineering, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao 066000, China

**Abstract** As the problem of marine oil spills becomes more and more serious, a variety of remote sensing technologies are used to monitor oil spills on the sea surface. Among them, Laser-Induced Fluorescence (LIF) technology is considered one of the most effective oil spill detection technologies. Based on LIF technology, Hoge et al. proposed an integral inversion algorithm based on Raman scattering light to evaluate the thickness of thin oil film, which has been widely used in oil spill detection on the sea surface. Given the large error of the algorithm, an inversion algorithm for evaluating the thickness of oil spills on the sea surface is proposed by using Raman scattering light and fluorescence signals. Firstly, the oil film thickness is inverted by Raman scattering light signal, and then the fluorescence feature spectrum of oil is calculated using the inversion result, and finally, the oil film thickness is inverted by using the fluorescence signal. The algorithm for inversion of oil film thickness using fluorescence signal is deduced, the approximation algorithm of oil fluorescence feature spectrum and the error analysis of oil film thickness inversion using fluorescence signal is given. Experiments verify the method, Crude oil and diesel are selected as the experimental oil and the laser with wavelength of 405 nm is used as the excitation source. The collection wavelength range is 420~700 nm. The background fluorescence and Raman scattering spectra of sea water, the fluorescence spectra of 2, 5, 10 and 20  $\mu\text{m}$  oil films are collected. The collected data are divided into a training set and a test set. The fluorescence feature spectrum of the oil is obtained by gradient descent method using the training set data, and the oil film thickness is retrieved by the Raman integration method and the method in this paper respectively, using the test set. Using Raman integral method, the average errors for different thicknesses of crude oil are 12.6%, 4.6%, 4.4% and 2.3%, and the average errors for different thicknesses of diesel oil are 14.0%, 7.0%, 4.2% and 3.6%; Using this method, the average errors for different thickness of crude oil are 2.5%, 2.2%, 1.2% and 1.1%, and the average errors for different thickness of diesel oil are 3.0%, 2.4%, 2.7% and 1.6%. The experimental results show that the errors of the 2  $\mu\text{m}$  oil film inversion results are reduced the most. The errors of the 2  $\mu\text{m}$  oil film inversion results for crude oil and diesel oil are reduced from 12.6% and 14.0% to 2.5% and 3.0%. The errors of the oil film inversion results of other thicknesses are also greatly reduced. The errors of the oil film thickness inversion results are all less than 3%. The algorithm can effectively improve the accuracy of the oil film thickness inversion results.

**Keywords** Laser induced fluorescence; Fluorescence spectrum; Oil spill on the sea surface; Oil film thickness; Gradient descent

(Received Dec. 6, 2020; accepted Mar. 12, 2021)

\* Corresponding author