

轻质油乳化物荧光特性变化规律的实验研究

袁丽¹, 孔德明^{2*}, 张晓丹¹, 孔令富¹, 焦慧慧¹, 王立彬¹, 孔德瀚³

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

²燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

³河北环境工程学院, 河北 秦皇岛 066000

摘要 乳化溢油是溢油进入海域之后与海水相互作用产生的一种溢油污染形态。而这种形态在开展激光诱导荧光(LIF)探测时表现出不同于其他形态的特性。因此,从荧光光谱的角度出发,以柴油和煤油为实验对象,开展轻质油乳化物荧光特性变化规律的实验研究。结果表明:轻质油的乳化会经历不同阶段,随着油水比分布的不断变化,将对激光照射发射荧光光谱产生不同的影响。不同阶段的光谱曲线对比分析可知:当激发波长为 405 nm,发射波长为 420~500 nm 时,乳化过程存在荧光峰数目增多、峰值有增有减、谱峰的比值改变、荧光峰位偏移等一系列光谱变化特征。这些变化的特征构成轻质油乳化的荧光特性变化规律。该规律可为实际乳化溢油的 LIF 探测识别和状态评估提供一定依据。由于轻质油组分的差异,相同荧光特性变化趋势下的变化程度会有不同,想要实现乳化溢油的精准监测,后续还需结合具体油种考虑。

关键词 光谱学; 激光诱导荧光; 荧光光谱; 油水比; 油包水; 水包油

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1011003

Experimental Study on Fluorescence Characteristics Change of Light Oil Emulsions

Yuan Li¹, Kong Deming^{2*}, Zhang Xiaodan¹, Kong Lingfu¹, Jiao Huihui¹,
Wang Libin¹, Kong Dehan³

¹College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

³Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Emulsified oil spill is a kind of oil spill pollution form caused by the interaction between oil-spilled and sea water. This kind of morphology is different from other forms in laser-induced fluorescence (LIF) detection. Therefore, from the perspective of fluorescence spectrum, diesel oil and kerosene were used as the experimental objects to carry out the experimental study on the fluorescence characteristics of light oil emulsions. Experimental results show that the emulsification of light oil will go through different stages, and will have different effects on the fluorescence spectrum of laser irradiation emission with the constant change of oil-water ratio distribution. The comparative analysis of the spectral curves at different stages shows that when the excitation wavelength is 405 nm and the emission wavelength is 420 nm to 500 nm, the number of fluorescence peaks increases, the peaks increase or decrease, the peak ratio changes, and the fluorescence peak position shifts during the emulsification process. The changing characteristics constitute the rule of fluorescence characteristics of light oil emulsification. This regular pattern can provide some basis for LIF detection and identification of actual emulsified oil spill. Due to the difference of light oil components, the change degree under the same change trend of fluorescence characteristics will be different. In order to achieve the accurate monitoring of emulsified oil spills, it is necessary to combine with specific oil types.

Key words spectroscopy; laser-induced fluorescence; fluorescence spectrum; oil-water ratio; water-in-oil; water-in-oil

OCIS codes 300.2530; 300.6280; 300.6170

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-05-19; 录用日期: 2020-05-26

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05019001-011)

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

1 引 言

溢油进入海域后,在一系列物理、化学和生物等因素的作用下,历经扩展、离散、迁移、挥发、溶解等过程^[1],在未沉入海底前,会以不同的风化状态存在于海面上。根据溢油是否与海水发生作用,可划分为乳化与未乳化两种。激光诱导荧光(LIF)探测技术就是依靠激光源发射激光到海面,海水和各种溢油成分会受激发射出含各种成分信息的荧光^[2],被认为是最重要和最有效的监测溢油的技术手段之一^[3]。目前基于激光荧光遥感的研究大多集中于未乳化溢油的监测,如油膜厚度的反演、溢油种类的识别等,对海面溢油的重要存在形式——乳化溢油,尚未开展相关研究。而乳化溢油会给海洋环境带来更大危害,因此实现海面乳化溢油的定性描述和程度鉴别,即迅速准确给出乳化溢油的光谱分析数据,满足基于LIF的乳化溢油探测需要,具有重要的作用和意义。本文从荧光光谱的角度出发,以典型轻质油为例,分析油水乳液中油水不同比例所产生的荧光光谱特性差异,从而模拟出实际溢油乳化过程中的光谱变化规律,以期实现对乳化轻质油LIF探测的可行性。

2 实验和方法

2.1 实验原理

基于石油组分的荧光物质基础,荧光光谱法对芳烃化合物有着独特的检测能力,是鉴别海面溢油的重要方法之一^[4],具有灵敏度高、选择性好等优点^[5]。通过分析荧光信息可以快速获取水中溢油、有色可溶性有机物等物质的品类和含量信息。

乳化指液体以极微小液滴分散在“互不相溶”的另一种液体中的作用。所谓溢油的乳化,是指在风化作用下溢油和海水混合在一起形成油水乳液的过程^[6]。这一过程中的油水成分及其分布不断地发

生变化,而多样化的溢油乳液微观变化都将对激光照射发射荧光光谱产生不同的影响。

本文把荧光分析技术应用于乳化溢油,考察不同油水比对荧光特性变化的影响作用。

2.2 实验过程

实验系统:搭建一套便携式LIF光谱测量系统,激光器波长为405 nm,输出激光经光纤传输,信号由光谱仪采集后再通过计算机进行处理与分析。其中激发光源由电源和NDV4542激光二极管组成,光谱仪采用Avantes公司生产的AvaSpec-ULS2048型号光纤光谱仪。

乳液制备:采用在市售0#柴油和3#煤油中加入乳化剂的方法来制备轻质油乳液,选取的两种乳化剂分别是Tween80和Span80^[7]。亲水亲油平衡(HLB)值是乳化剂的主要特征,规定100%亲油性乳化剂的HLB值为0,100%亲水性乳化剂的HLB值为20,期间等分20份以表示亲水亲油性的强弱。对于混合乳化剂,HLB值等于A的HLB值乘A%加B的HLB值乘B%^[8]。实验所用两种乳化剂的HLB值分别为15.0和4.3^[9],考虑到乳液的稳定性以及实验的统一性,所采用的混合乳化剂组成为1:10,因此混合后的HLB值约为5.27,总质量分数约为5%。

实验过程中将Span80加入油中,而将Tween80加入水中,分别摇匀,再混合放入500 mL烧杯中,用搅拌机先快速持续搅拌20 min,再慢速搅拌5 min,即可制备出一定油水比的轻质油乳液。油水比配备的间隔为5%~10%,再根据荧光光谱曲线的升高与降低趋势,适时插入间隔值。最终配备样本含水率为3%,5%,10%,15%,20%,25%,30%,35%,45%,50%,55%,60%,65%,70%,75%,80%,85%,90%,93%,95%,98%。实验样品质量配比样表如表1所示。

表1 乳化溢油质量配比样表

Table 1 Sample table of emulsified spilled oil quality ratio

NO.	Light oil quality /g	Emulsifier quality /g		Sea water quality /g	Moisture content /%
		Span80	Tween80		
1	497.37	2.392	0.239	26.32	5.00
2	497.22	2.525	0.253	55.56	10.00
3	497.06	2.674	0.268	88.24	15.00
4	496.88	2.841	0.284	125.00	20.00

乳液制备完成后,静置片刻,采用搭建的LIF系统对制备的不同乳液分别进行激光诱导荧光实验测量。并将相同测量条件下的纯柴油和纯煤油光

谱作为参考值。与此同时,用显微镜分别采集制备的不同乳液的图片,观察不同乳化程度下溢油乳液内部液滴的分布。

3 结果与讨论

3.1 油包水向水包油的相转变

乳化液是一种液体分散于另一种液体中形成的多相分散体系。乳化液的组成有两个相,以小液滴形式存在的相被称为分散相,也称为不连续相;成片相连的相被称为分散介质,也称为连续相。组成乳化油的两相,一般是“水”相和“油”相^[10]。根据油与水在乳液中的角色不同,把乳化液分为不同类型。油包水型乳化液是水为分散相,油为连续相;水包油型乳化液是水为连续相,油为分散相;如果分散相本

身又成为连续相,即分散相中又有了分散液滴,则形成的是多重型乳化液。对乳化柴油来说,根据显微镜下看到的液滴分布图片(图 1)发现,柴油乳化液的含水率在小于 35% 的范围内属于油包水型;当含水率达到 35% 左右时,开始出现油包水包油,并且随含水率的不断升高,还会存在水包油包水,即在在这一范围内存在多重乳化的现象;当含水率超过 85% 时属于水包油型。对乳化煤油来说(图 2),含水率在 30% 以内属于油包水型,含水率在 80% 以上属于水包油型,含水率在 30%~80% 范围内属于多重型,即油包水包油和水包油包水。

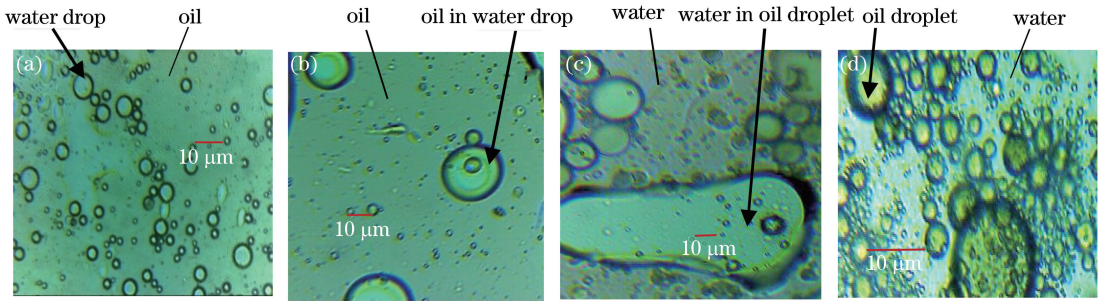


图 1 不同油水比的乳化柴油显微图片。(a)油包水;(b)油包水包油;(c)水包油包水;(d)水包油

Fig. 1 Micrographs of emulsified diesel oil with different oil-water ratios. (a) Water-in-oil; (b) oil-water-oil; (c) water-oil-water; (d) oil-in-water

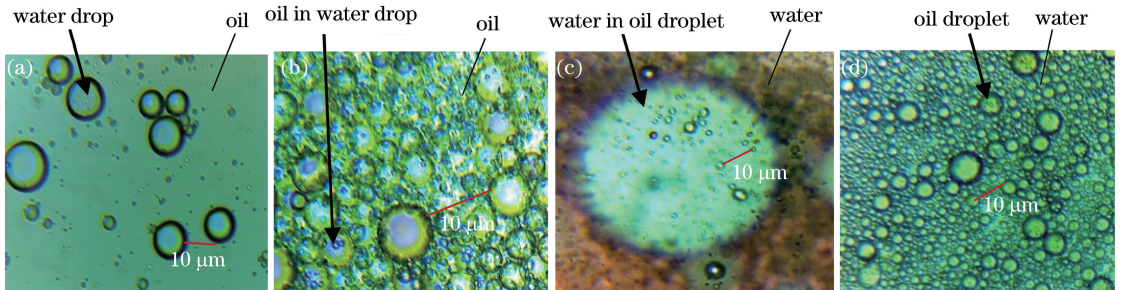


图 2 不同油水比的乳化煤油显微图片。(a)油包水;(b)油包水包油;(c)水包油包水;(d)水包油

Fig. 2 Micrographs of emulsified kerosene with different oil-water ratios. (a) Water-in-oil; (b) oil-water-oil; (c) water-oil-water; (d) oil-in-water

3.2 乳化过程的光谱分析

根据前面乳化过程的相转变,将测得的乳化柴油和乳化煤油光谱曲线按含水率不同进行相应乳化阶段的划分:油包水阶段、多重阶段、水包油阶段。图 3 和图 4 分别为对应的不同阶段乳化柴油和乳化煤油的光谱曲线。

结合具体发射波长和荧光峰值的数据,与未乳化的纯柴油、纯煤油的光谱分别进行对比,如图 5 所示。

1) 主要荧光峰的个数不同

从图 5(a)可以看出,分别在 460 nm 和 480 nm 两个发射波长位置出现荧光峰。而图 3(a)可以看到两个明显的荧光峰(即 420~430 nm 与 450~

460 nm 两个发射波长范围),图 3(b)可以看到三个明显的荧光峰(前面两个与 480~490 nm 发射波长内),图 3(c)可以看到四个明显的荧光峰(前面的三个与 490~500 nm 发射波长内)。

从图 5(b)可以看出,在 430 nm 左右的发射波长位置出现一个特征荧光峰,在 450 nm 左右的发射波长位置还出现一个尖峰。而图 4(a)可以看到三个主要荧光峰(即 420~430 nm, 480~490 nm, 490~500 nm 三个发射波长范围),图 4(b)可以看到四个主要荧光峰,又增加了 450~460 nm 发射波长范围的一个荧光峰,图 4(c)可以看到四个主要荧光峰。

上述荧光峰数目分析可归纳为表 2。

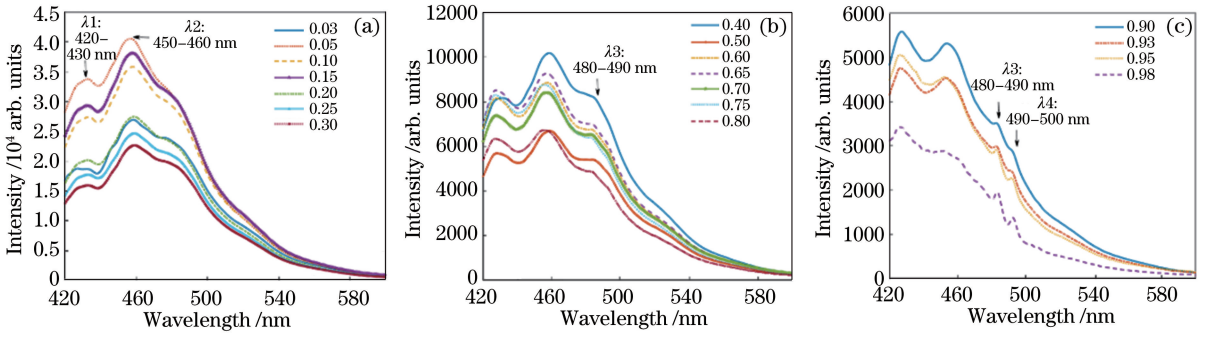


图3 不同阶段的乳化柴油光谱。(a)油包水阶段;(b)多重阶段;(c)水包油阶段

Fig. 3 Spectra of emulsified diesel oil in different stages. (a) Water-in-oil stage; (b) multiple stage; (c) oil-in-water stage

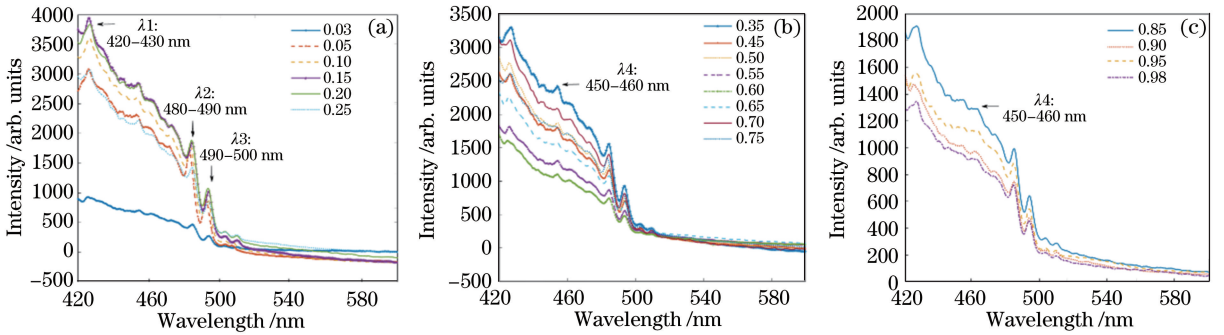


图4 不同阶段的乳化煤油光谱。(a)油包水阶段;(b)多重阶段;(c)水包油阶段

Fig. 4 Spectra of emulsified kerosene in different stages. (a) Water-in-oil stage; (b) multiple stage; (c) oil-in-water stage

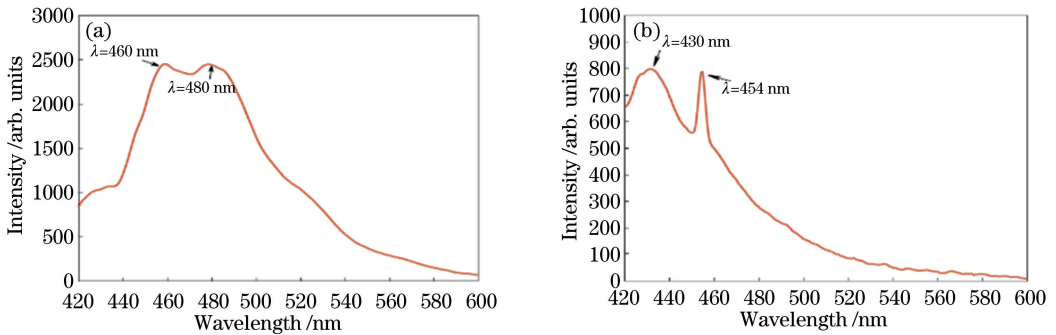


图5 光谱曲线。(a)纯柴油;(b)纯煤油

Fig. 5 Spectrum curves. (a) Pure diesel oil; (b) pure kerosene

表2 荧光峰数目对比表

Table 2 Comparison of fluorescence peak number

Number of fluorescence peak	Non emulsified	Emulsified		
		Water-in-oil stage	Multiple stage	Oil-in-water stage
Diesel oil	2	2	3	4
Kerosene	2	3	4	4

可见,两种轻质油的乳化均表现出比未乳化时荧光峰数目增多的现象,乳化的不同阶段也呈现荧光峰增多的趋势。主要是油中不同含量的荧光性组分会发生不同程度的猝灭造成。在未乳化和含水率低时荧光分子间的距离小,激发态分子很容易将它的能量交给邻近的分子,由于碰撞的能量转移概率

大而致猝灭现象严重。乳化过程、水的加入、含水率的升高等因素都会增大分子间距离,从而降低分子碰撞的概率,使更多荧光性组分的特征峰得以逐步显现。

2) 荧光峰的强度值不同

通过上述对荧光峰数目的分析,纯柴油和乳化

柴油各阶段均存在的荧光峰的发射波长为 450~460 nm,纯煤油和乳化煤油各阶段均存在的荧光峰

的发射波长为 420~430nm。对两种乳化油的荧光峰进行峰值变化分析,如图 6 所示。

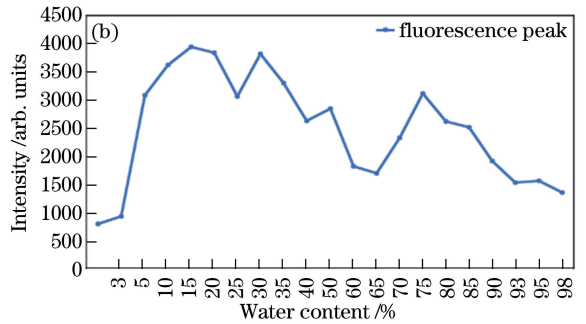
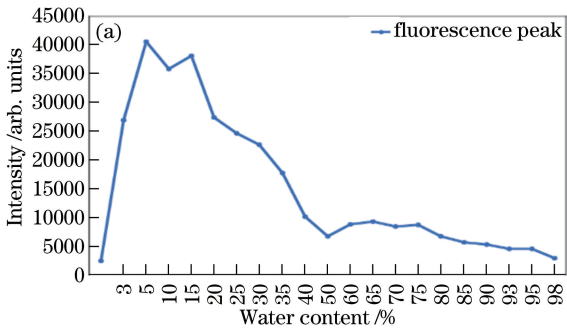


图 6 荧光峰值与含水率关系。(a)乳化柴油;(b)乳化煤油

Fig. 6 Relationship between fluorescence peak and water content. (a) Emulsified diesel oil; (b) emulsified kerosene

从图 6 可以看出,不管是乳化柴油还是乳化煤油,乳化阶段的荧光峰强度均呈现出比未乳化时强度值高的现象,并且乳化阶段光谱曲线的高低顺序和对应的含水率高低并不一致,即荧光峰值与含水率之间不存在单调的线性关系。

显,因此发射出的荧光峰强度是增加的。当升高到一定范围时,随含水的继续增加,水对荧光性组分的降低和稀释作用越来越明显,致使荧光产量减少,此时荧光峰值逐渐降低;而水包油型乳化液中水的影响发挥主导地位,随含水率的升高,荧光峰值会越来越低。在多重阶段,水和油的结合方式分为水包油包水和油包水包油两种,不同结合方式对荧光的影响作用不同,所以该阶段的荧光值并没有呈现一直的递减,出现的拐点即为多重阶段两种不同结合方式的区分位置。

图 6(a)中,当含水率小于 35%(即油包水阶段)时,存在先随含水率升高而升高,后随含水率升高而降低的变化趋势;当含水率在 35%~85%范围内(即多重阶段)时,存在两个不同的变化区间,一个是 35%~50%范围内的逐渐降低,另一个是 50%~85%范围内的缓慢升高,即在含水率为 50%时存在拐点;而当含水率超过 85%(即水包油阶段)时,存在随含水率升高而降低的趋势。图 6(b)中也存在油包水阶段随含水率的升高先升高后降低,水包油阶段随含水率升高逐渐降低的趋势,在多重阶段(含水率为 30%~80%)也存在两个不同的变化区间,和乳化柴油不同的是,当含水率为 60%时存在拐点。

3) 特征峰的峰值比会有变化

未乳化与加水乳化后的荧光强度不同,反映出两者的光谱响应具有本质区别。主要考虑纯油和乳化溢油中荧光物质的能级结构不同:前者主要是多环芳烃中的共轭双键体系,而后者与前者的物质组分结构不一样,因为加入水后含有一OH,属于给电子基团,会增强电子共轭程度,使最低激发单重态与基态之间的跃迁几率增大,所以荧光增强。

在荧光分析中,特征峰荧光强度比值是进行油品定性的重要特征之一,其反映的是不同多环芳烃相对含量的比值。在未乳化时,同一油品的峰值比是不变的,而在乳化过程中,这一比值会随着含水量的变化而变化。

而乳化不同阶段,荧光峰强度的变化反映出油中荧光性组分随含水率的变化趋势。考虑其原因为油包水型乳化液一开始荧光性组分自吸收强烈,分子间的能量转移更易发生,也容易发生猝灭现象,随着海水的加入,相当于油被稀释,油的吸收作用会降低,水虽对荧光发射有降低作用,但此时作用不明

对整个乳化过程中均存在的荧光峰进行峰值变化的分析,包括乳化柴油在 420~460 nm 范围内的两个特征荧光峰,以及乳化煤油在 480~500 nm 范围内的两个荧光峰,如图 7 所示。

图 7(a)中,油包水阶段的光谱曲线都存在左峰峰值比右峰峰值低的现象,即比值均小于 0.8,且比值随着含水量的升高而逐渐降低;水包油阶段的光谱曲线左峰峰值普遍存在比右峰峰值高的现象,即比值均大于 1,且比值随含水量的升高而增加;多重阶段的光谱曲线两峰的峰值比较接近,右峰稍比左峰高,即比值在 0.65~1.05 范围内,且比值也随含水量的增加而一直升高。所以两峰峰值比是油包水阶段的值低于水包油阶段,多重阶段的比值介于两者范围之间。

图 7(b)中,虽然在油包水阶段和水包油阶段都

存在左峰比右峰值高的现象,但高出的程度不同,比值也不同,整个乳化过程中的比值基本是一直随含水量的升高而呈下降的趋势,所以每个乳化阶段均

存在一个不同数值范围的比值。即油包水阶段的比值均高于水包油阶段的比值,多重阶段的比值也是介于两者之间。

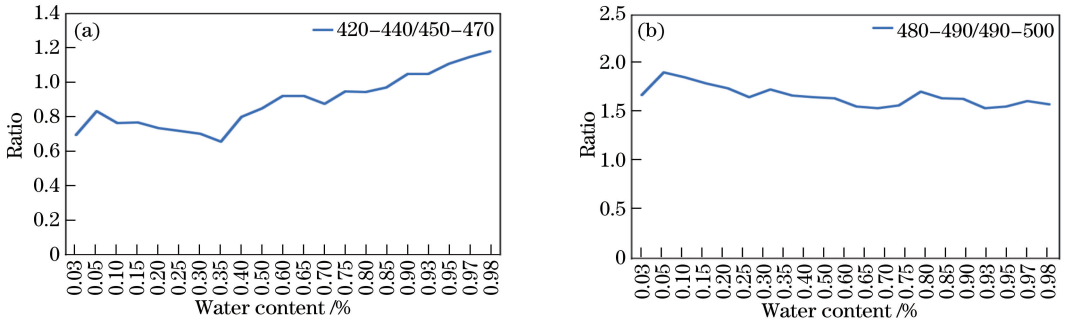


图 7 荧光峰值比与含水率关系。(a)乳化柴油;(b)乳化煤油

Fig. 7 Relationship between fluorescence peak ratio and water content. (a) Emulsified diesel oil; (b) emulsified kerosene

主要考虑到不同的芳烃组分乳化过程中受水的影响并不是统一的,随着含水率的升高会有不同的变化程度和趋势。而某组分与含水率的关系,即为前面分析的乳化不同阶段荧光峰强度的变化原因。

体值(即荧光峰位)是不同的,考虑和前面荧光峰数目增多以及乳化后荧光强度增强的原因是一致的,而乳化过程的各阶段,荧光峰位也会有不同的偏移。

4) 荧光峰位会有细微的偏移

纯柴油和乳化柴油各阶段均存在的荧光峰的发射波长为 450~460 nm,纯煤油和乳化煤油各阶段均存在的荧光峰的发射波长为 420~430 nm。将两种乳化油的荧光峰继续进行峰位变化的分析,如图 8 所示。

图 8(a)为乳化柴油在 450~460 nm 发射波长范围的荧光峰,当含水率小于 35%(即油包水阶段)时,荧光峰位向长波方向偏移;当含水率大于 85%(即水包油阶段)时,荧光峰位向短波方向偏移;当含水率在 35%~85%范围内时,荧光峰位也向短波方向偏移。图 8(b)为乳化煤油在 420~430 nm 发射波长范围的荧光峰,油包水阶段的荧光峰位向长波方向偏移,水包油阶段的荧光峰位向短波方向偏移,多重阶段的荧光峰位偏移趋势呈现凹字形。

从图 8 可以看出,不管是乳化柴油还是乳化煤油,与未乳化时相比,相同荧光峰对应的发射波长具

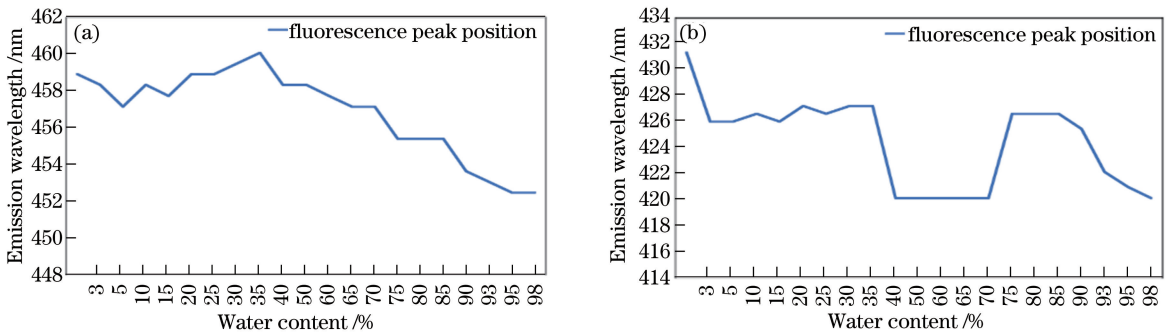


图 8 荧光峰位与含水率关系。(a)乳化柴油;(b)乳化煤油

Fig. 8 Relationship between fluorescence peak position and water content. (a) Emulsified diesel oil; (b) emulsified kerosene

两种乳化油的油包水阶段荧光峰位均会随含水率的升高而稍向长波方向移动;水包油阶段的荧光峰位均会随含水率的升高而稍向短波方向移动。主要考虑液滴分布方式不同,溢油分子中电子受激发射荧光的能级间隔改变略有不同。油包水型为油包裹水滴,水包油型为水包裹油滴,不同的荧光团存在方式会造成荧光峰位置移动规律不同。这点体现出油包水和水包油不同的本质所在。而在多重阶段的

荧光峰位,乳化柴油和乳化煤油的表现不同,且本身乳化煤油在该阶段的特征表现并不明显,所以认为这一阶段的荧光峰位变化不具有规律性。

4 结 论

本文先通过显微镜下观察到的不同油水比的轻质油乳化液液滴分布情况,得出轻质油的乳化是一个由油包水向水包油相转变的过程。在此基础上,

分析了不同变化状态下的荧光光谱曲线的变化。最后总结出轻质油乳化过程的光谱特性变化规律。

根据轻质油乳化的光谱变化规律,在实际 LIF 溢油探测过程中,对不同时刻连续探测同一地点,然后将相同地点不同时刻的光谱曲线进行对比,如果出现荧光峰数目增多,特征峰的荧光峰值变化,可以作为溢油为乳化状态的判定参考;在已经确定为乳化溢油的前提下,可以根据特征峰位发生偏移的方向(向长波移动还是向短波移动),以及峰值高度变化的趋势(有升有降,还是单一的降低)等特征估计溢油乳化的阶段。

从现有的研究结果来看,多种轻质油的乳化,由于受海水作用的影响,主要表现为两个方面:油与水的结合方式,以及油中不同组分随体系含水率变化的趋势。其光谱特性和产生的光谱强度相比,未乳化时会产生明显的变化,这些变化的光谱特征可以为 LIF 实际乳化溢油探测提供参考。掌握和发现各种溢油的光谱特征是 LIF 海面溢油探测的基础和关键,所以研究溢油乳化过程的光谱变化特征具有十分重要的意义。而多种轻质油乳化过程相同的变化趋势下又各有各的不同。仅依据荧光的变化规律还不能实时准确地得出何种油的乳化以及含水率实际数值,需要结合具体油种具体分析。因此,为了实现乳化溢油的深入监测,后期可以考虑构建不同油种乳化的光谱数据信息,形成一个轻质油乳化信息库,通过实际溢油的光谱与信息库中的光谱数据比对的方法,最终实现轻质油乳化的精准鉴别和评估。

参 考 文 献

- [1] Mendelsohn I A, Andersen G L, Baltz D M, et al. Oil impacts on coastal wetlands: implications for the Mississippi river delta ecosystem after the deepwater horizon oil spill[J]. *BioScience*, 2012, 62(6): 562-574.
- [2] Feng W W, Wang R, Sun P Y, et al. The study of fluorescence spectrum using ultraviolet-laser for several typical oil pollutants[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(5): 1168-1170.
- 冯巍巍, 王锐, 孙培艳, 等. 几种典型石油类污染物紫外激光诱导荧光光谱特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(5): 1168-1170.

- [3] Luan X N, Zhang F, Guo J J, et al. Polarization characterization of laser-induced fluorescence from the simulated oil spill samples [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(7): 2092-2099.
- 栾晓宁, 张锋, 郭金家, 等. 模拟溢油样品激光诱导荧光光谱的偏振特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(7): 2092-2099.
- [4] Du Y, Wang S T, Zheng Y N, et al. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons combining fluorescence analysis with APTLD [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(3): 404-412.
- 杜云, 王书涛, 郑亚南, 等. 基于荧光分析法和 APTLD 相结合的多环芳烃的检测[J]. *发光学报*, 2019, 40(3): 404-412.
- [5] 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.
- [6] Salem F M F. Hyperspectral remote sensing: a new approach for oil spill detection and analysis [J]. *Hepatology Research the Official Journal of Japan Society of Hepatology*. 2003, 37(12): 1080-1094.
- [7] Shi J. Study on hyperspectral remote sensing of marine oil emulsions [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019: 12-13.
- 石静. 海面溢油乳化物的高光谱遥感识别研究[D]. 南京: 南京大学, 2019: 12-13.
- [8] Gong J P. HLB value of surface activated agent [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2003, 29(2): 43.
- 巩建平. 表面活性剂的 HLB 值 [J]. *内蒙古石油化工*, 2003, 29(2): 43.
- [9] Cao G, Dan X F, Cheng C J, et al. The preparation and stability of kerosene/water emulsion [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2014, 40(2): 228-232.
- 曹耿, 但小凤, 程昌敬, 等. 煤油/水体系乳状液的制备及其稳定性研究[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2014, 40(2): 228-232.
- [10] Jiang J J. Study of the preparation and stability of water-in-oil emulsions based on phase inversion [D]. Jinan: Shandong University, 2013: 8-9.
- 江晶晶. 基于相转变的油包水乳液制备及稳定性研究[D]. 济南: 山东大学, 2013: 8-9.