

水面浮油膜光谱测量及光谱特征分析

刘旭拢^{1,2}, 邓孺孺¹, 秦雁¹, 梁业恒¹, 刘永明¹

(1. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东省水环境遥感监测工程技术研究中心, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东 广州 510275; 2. 广州地理研究所 广东省遥感与地理信息系统应用重点实验室, 广东 广州 510075)

摘要: 为深入解析水面浮油膜光谱特征, 采用水面以上光谱测量方法, 去除太阳直射和天空光两部分反射的影响, 获取了珠江口水域不同厚度水面柴油膜光谱信息, 对其光谱响应特征和机理进行了分析。结果表明: 水面柴油膜光谱对背景水体光谱具有依赖性, 但水面柴油膜光谱在可见光波段高于背景水体, 且随着油膜厚度增加呈现不断增加的趋势; 油膜反射光谱在蓝、紫光区域出现明显反射峰; 360~500 nm 区域油膜反射率与厚度相关系数大于 0.8, 有利于油膜厚度的遥感估算。最后指出, 水面浮油膜类似于光学薄膜的单层增反膜, 导致光谱反射率的增加, 在 360~420 nm 区域的反射峰和石油类物质的荧光性有关。研究结果可为水域溢油污染遥感监测研究提供理论依据。

关键词: 水面浮油膜; 光谱特征; 遥感反射率

中图分类号: P733.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2016)10-0063-08

doi: 10.11759/hyxx20160118001

溢油污染是最常见的海洋污染之一, 如载油船舶的翻沉、海上钻井平台井喷和输油管道破裂等突发性事故所造成的石油泄漏^[1]。近年来, 随着沿海地区石化产业的快速发展, 近海水域油污染问题也日趋严重。以广东省为例, 广东沿海已成为亚洲主要的石化基地, 在运输、炼制和存储石油时, 含油废水的排泄易形成较为严重的油污染。另外广东省庞大的造船业和拆船业的发展, 也使大量的含油污染物进入水体, 给近海水域生态环境和沿岸居民健康带来恶劣影响^[2]。

浮油膜是溢油进入水体的一种存在形式。水面漂浮的油膜会阻碍水气交换, 降低表层水体的日光辐射量和产氧量, 造成浮游植物大量死亡, 从而使溢油区生态系统遭受严重破坏^[3]。开展快速、准确的水面油膜探测对溢油污染治理和生态环境保护具有重要意义^[4]。随着对地观测技术的不断进步, 利用遥感手段对水面油膜定量化探测成为可能^[5]。而油膜光谱特征是溢油信息遥感提取与油膜厚度估算的物理基础^[6]。目前对水面浮油膜的光谱特性已经开展了一些研究。Palmer 等^[7]指出海面分散的原油油膜反射率随着其厚度增加而降低, 440~900 nm 是溢油油膜信息提取的有效波段。Foudan 等^[8]经过对高光谱影像上溢油信息的分析, 发现石油在 580, 700 nm 具有强的反射峰, 油膜厚度的增加降低了可见光波段的反

射率, 厚油膜在近红外波段反射率要高于甚薄油膜。Wettle 等^[9]在暗室内将原油滴入装有纯水的烧杯, 通过光谱测量发现原油光谱反射率在可见光波段随油膜厚度增加而降低。国内学者张永宁等^[10]对海洋溢油光谱特性进行了测试。赵冬至等^[11]在楼顶平台设置试验水槽, 测量并分析了原油、柴油和润滑油的光谱特征、油水反差规律及吸收特征参数。付玉慧等^[12]绘制了海洋中不同厚度的原油、重柴油等油膜的光谱特征曲线图。陆应诚等^[13]在室内以黑色塑料布包裹的玻璃烧杯为容器注入海水, 测量并分析了原油油膜光谱的变化特征及其与油膜厚度的相关关系。刘丙新等^[14]采用比值法计算了近岸水上原油油膜的相对反射率, 研究了油膜区别于海水的光谱特征, 并基于高光谱影像数据进行了油膜分类。以上研究,

收稿日期: 2016-01-18; 修回日期: 2016-06-01

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAH32B03); 广东省水利科技创新项目(2014-13, 2015-13); 广东省科技计划项目(2016A020222006); 广东省自然科学基金(S2013010013320)

[Foundation: The National Key Technology R&D Program, No. 2012BAH32B03; Irrigation Works Science and Technology Innovation Project of Guangdong Province, No. 2014-13, No. 2015-13; The Science and Technology Planning Project of Guangdong Province No. 2016A020222006; Natural Science Foundation of Guangdong, No. S2013010013320]

作者简介: 刘旭拢(1978-), 女, 河南平顶山人, 博士研究生, 副研究员, 从事溢油遥感监测研究, E-mail: lxl0ng020@126.com; 邓孺孺, 通信作者, 教授, E-mail: eesdrr@mail.sysu.edu.cn

以实验模拟自然水环境下的油膜光谱测量居多,且由于对油膜状态的认知、油种、光谱数据测量和计算方法等的差异,导致油膜光谱特征的研究结果多有不同。适用于任何条件下,任何光谱段的高精度的水面油膜、背景水体的光谱差异规律,仍然没有定论^[15]。基于此,本文在广东省近海水域环境下设计了油膜光谱测量实验,采用水面以上光谱测量方法,获取了不同厚度水面柴油膜光谱信息,分析了油膜光谱响应特征并确定敏感波谱区间,最后探讨了水面柴油膜光谱形成机理,为水面溢油污染遥感定量探测服务。

1 材料与方 法

1.1 光谱测量方法

目前水体光谱的现场测量方法主要有 3 种:剖面法、固有光学特性测量法和水面以上测量法。其中水面以上测量方法被认为是测量近岸水体和内陆水体光谱信息的有效方法^[16]。美国国家航空航天局(NASA)提供的海洋光学测量规范推荐了 3 种水面之上光谱测量方法,不少学者进行了相关研究^[17-19]。本文依照文献^[18]所用方法,于 2015 年 4 月 14 日在广东省珠江口水域进行了野外水面油膜光谱测量实验。实验材料选用“0”号柴油。实验时间为 11:00~13:00,天气晴朗、无风,水面基本平静且目视不可见底。用可弯曲的黑色哑光塑料板制作了深 14 cm、直径 49 cm 的无底圆桶,形成一个圆环状封闭空间以控制油膜的扩散,同时也方便实验结束后回收实验用油,避免造成人为溢油污染。圆桶外壁套上充气的轮胎,利用浮力使圆桶漂浮在水面上,其中出露水面桶壁约为 5 cm,对太阳光的遮挡和反射作用很小。

光谱测量仪器采用美国 ASD 公司生产的双通道地物波谱仪(FieldSpec Dual),光谱范围为 350~1100 nm,最短积分时间为 17 ms,光谱分辨率为 3 nm。测量过程中,首先对背景水体和天空光的辐亮度进行了测量,然后使用定量移液器向封闭水面滴入柴油样品,形成柴油膜并测量其辐亮度。由于柴油不溶于水,而且在水面上具有较好的扩展性,因此理想情况下,当油量较少时,滴入水面的柴油会快速均匀扩散到整个封闭水面形成油膜,其厚度可以由滴入油量和封闭水面的面积计算而得,即:

$$D = \frac{V}{S} \quad (1)$$

式中, D 为油膜厚度, V 为滴入的柴油量, S 为封闭水面的面积。

实验中一共向水面滴入了 14 滴柴油,其中前 8 次每次滴入 2 mL,后 6 次每次滴入 4 mL,共滴入 40 mL 柴油。此时,由于水面上油量较多,受油膜黏性和张力的影响,继续滴入的柴油已经不能完全扩展到整个封闭水面,实验结束。

1.2 光谱数据处理

利用光谱仪采集到的水面以上总的光谱信号源于 4 部分的贡献,包括水体和油膜的后向散射光、油-气界面的太阳直射反射光、天空光的反射光及来自水底的反射光,如下式所示:

$$L_t = L_w + rL_s + L_g + L_b \quad (2)$$

式中, L_t 是光谱仪观测的总信号。 L_w 是进入油膜和水体后被散射回来产生的离水辐亮度,含有水体和油膜的信息。 r 为油-气界面反射率, L_s 是天空光辐亮度, L_g 是油膜表面对太阳直射光随机反射的光谱信号, L_b 是水底反射光信息。水体光谱组成见图 1。

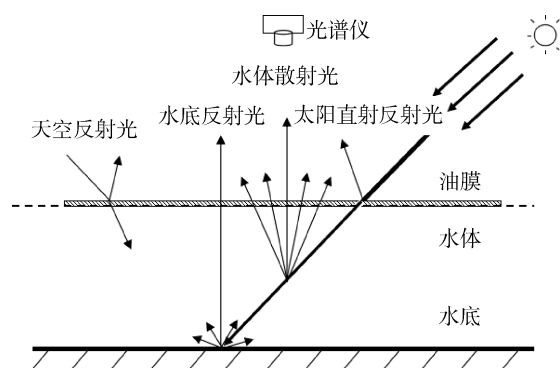


图 1 水面以上水体光谱组成
Fig. 1 Signal composition above water

根据水面光谱构成分析可知, L_w 携带了油膜信息,在油膜遥感监测中起关键作用。对于深不见底的水体,水底反射光谱为 L_b 可视为 0。 L_s 和 L_g 不带有油膜的信息,且在水面光谱中占有相当的比例,因此在光谱数据处理时必须先消除这两部分光的影响,否则会干扰油膜信息的提取。其中 L_g 是随机量,难以测量和估算,本文设置了合理的观测角度,消除大部分的太阳直射反射,同时在采集同一厚度油膜光谱信息时,快速连续测量了 30 条光谱曲线,从中挑选数值较低的 3~5 条进行平均,即认为是近似避免了太阳直射反射光影响的油膜光谱曲线。则光谱仪所观测的水体光谱可简化为:

$$L_t = L_w + rL_s \quad (3)$$

从而可得到油膜表面的离水辐亮度为:

$$L_w = L_t - rL_s \quad (4)$$

式中 L_t 和 L_s 都可以通过光谱仪测量得到, 所以 r 是求解离水辐亮度的关键。影响天空光反射率的因素较多, 包括太阳位置、观测角、方位角、以及风速和风向引起的水面粗糙度等, 因此, 对天空光反射率的取值争议较大。根据水在近红外光谱段具有强吸收的特性, Mueller 等^[20]假定波长为 750 nm 处离水辐亮度为 0, 计算得到海-气界面天空光的反射率为 0.02878。唐军武将 800~900 nm 之间的水体测量数据看作是天空光反射的信号, 依此推算水面的反射率^[18]。本文通过分析水面浮油膜光谱, 发现它在近红外波谱段的离水辐亮度不为 0, 所以不能采用零值波段的方法计算油-气界面天空光反射率。

本文在光谱测量过程中天气状况良好, 漂浮的油膜对水面的毛细波有较大的阻尼作用, 同时利用实验装置将油膜水面和周围水面隔离, 进一步减小了风速、风向等对水面的影响。因此, 可将光谱仪视域内的水面近似视为平静水面, 考虑采用菲涅耳定律计算油-气界面天空光的反射率。按照波动光学理论, 两种介质形成的界面对光波的能量反射率可以根据菲涅耳公式计算^[21]。如下所示:

$$r = 0.5 \left[\frac{\sin^2(\theta_0 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_0 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_0 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_0 + \theta_1)} \right] \quad (5)$$

当光线从空气中入射到油膜时, 根据折射定律, 入射角和折射角的关系如下:

$$N_0 \sin \theta_0 = N_1 \sin \theta_1 \quad (6)$$

上两式中, θ_0 和 θ_1 分别为入射角和折射角。光谱测量采用的观测主轴天顶角为 40° , 也即 $\theta_0=40^\circ$ 。 $N_0=1.0003$, 为空气折射率; $N_1=1.4650$, 为柴油折射率, 利用精密型单色光折光仪按照液体烃的折射率测定法(SH/T0724-2002)测得。联合式(5)、(6), 计算得到 r 为 0.0410, 代入式(4), 可得到水面油膜的离水辐亮度, 则油膜表面的离水反射率可以通过比值计算得到, 即:

$$R_w = \frac{L_w}{L_t} R_r \quad (7)$$

式中, R_w 为水面油膜离水反射率, 是待求量, R_r 为参考板的反射率, 是经过计量部门标定的已知值, L_r 为参考板反射光的辐亮度。

2 结果与分析

2.1 水面浮油膜光谱特征分析

本文采集了背景水体和 14 个不同厚度柴油膜的光谱, 共有 15 个数据, 为便于分辨不同油膜厚度光谱曲线特征, 按照油膜厚度大小分成 4 组, 如图 2 所示。

可以看出, 背景水体光谱曲线由水中物质成分对光辐射的吸收和散射性质决定^[22]。在 350~500 nm 范围内的反射率较低是因为叶绿素和有色可溶性有机质的吸收产生的。560 nm 附近的反射高峰主要由叶绿素的弱吸收和悬浮颗粒物的散射共同作用而成。由于叶绿素的弱吸收, 660 nm 处形成了反射谷。同时也观测到了 700 nm 附近由叶绿素的荧光作用引起的反射次峰。700 nm 以后的近红外波段, 水体的吸收作用导致光谱反射率快速下降, 但由于悬浮物的影响, 810 nm 附近又形成了一个小的反射峰值, 随后反射率逐步降至最低。

水面滴入柴油后, 相对于背景水体, 观测到 4 个明显的特征: (1)水面油膜与背景水体的光谱曲线形态基本类似, 主要反射峰值对应波长位置也几乎一致。这与文献[14]中海水与薄油膜的研究结果一致。(2)水面油膜光谱曲线在 360~420 nm 波谱范围内出现了新的反射峰, 光谱反射率抬升幅度较大, 甚至掩盖了叶绿素在此波段的吸收作用。(3)在可见光波段, 水面油膜的光谱反射率高于背景水体, 即水体加入柴油后光谱产生了抬升现象, 随着油膜厚度逐渐增大, 同一波长处的油膜光谱反射率呈现逐渐增加的趋势。这一特征与文献[11-12]中不同厚度轻柴油与海水的光谱曲线规律一致。文献[10]的研究结果表明, 对于轻柴油、重柴油和原油, 厚度越薄, 反射率越大, 随着油膜厚度的增加反射率降低, 这一结论与本文研究结果不同。究其原因, 可能与所用的光谱仪及光谱数据处理方法不同有关。文献[9, 13]指出在可见光-近红外谱段范围内, 油膜光谱反射率随着油膜厚度的增加而逐步降低, 但这些研究都是以原油为材料设计的油膜光谱响应室内实验, 而本文采用柴油, 在自然水体环境下进行实验。(4)近红外波段水面油膜光谱与背景水体差异不明显。

2.2 水面浮油膜光谱与油膜厚度相关性分析

水面油膜光谱在不同波长位置对油膜厚度的响应程度是不同的, 为识别敏感波段, 对水面油膜光谱反射率与油膜厚度做相关性分析, 计算各个波长的光谱与油膜厚度的相关系数, 结果如图 3 所示。可

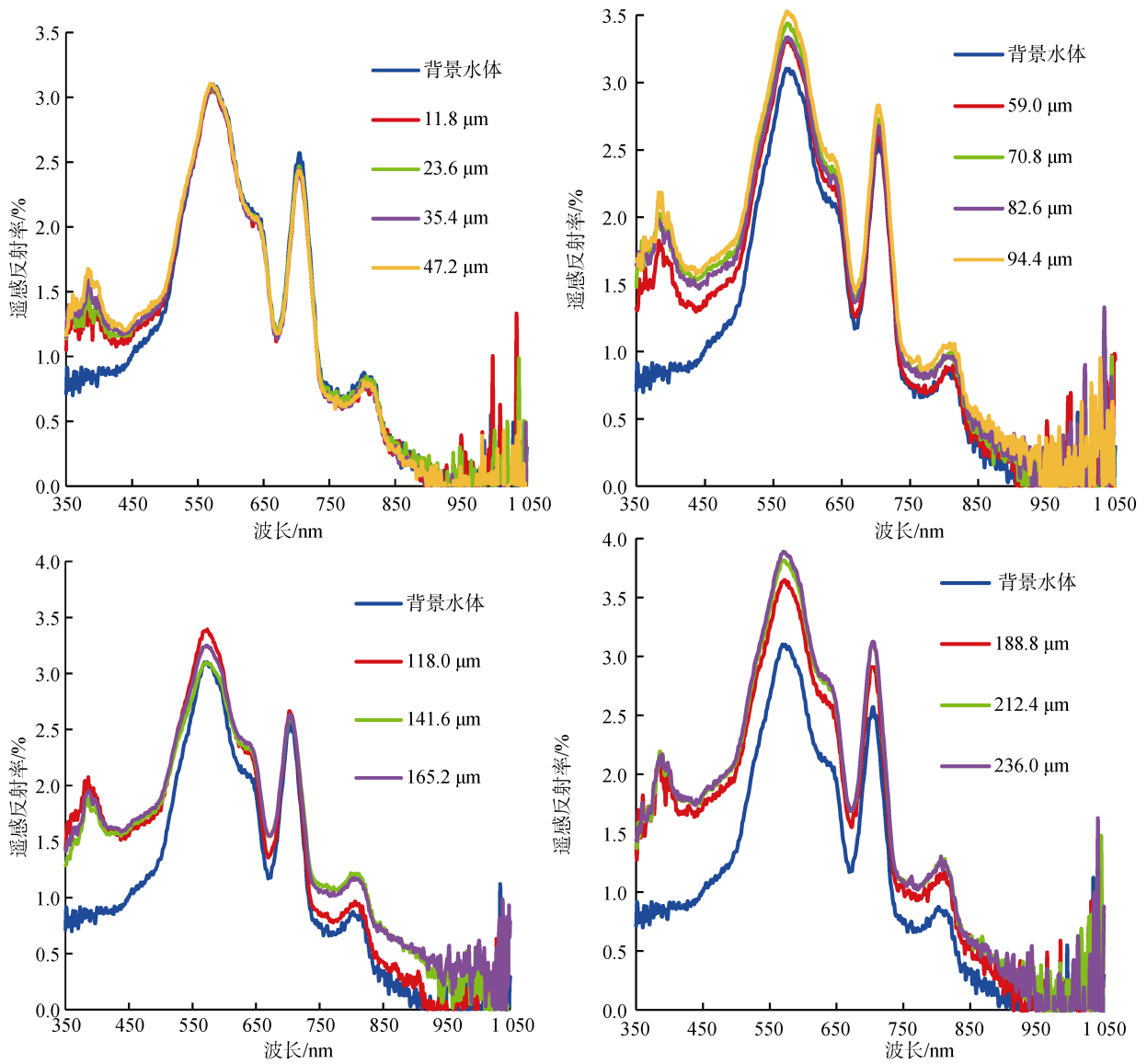


图 2 背景水体和不同厚度水面油膜离水反射率

Fig. 2 Spectral reflectances of water and oil film with different thickness

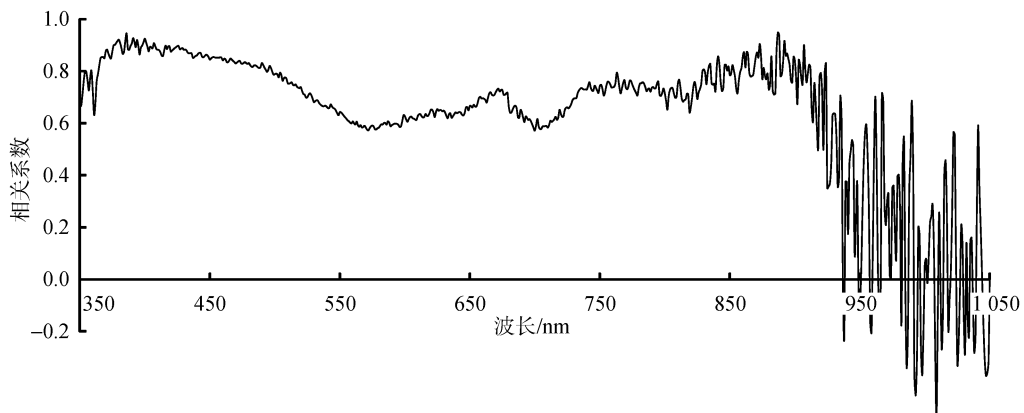


图 3 油膜厚度与光谱反射率相关关系

Fig. 3 Relationship between oil-film thickness and spectral reflectance

以看出,油膜的光谱反射率与油膜厚度之间存在比较明显的相关性,相关系数均大于0.58(900 nm以后受到仪器噪声和水汽的影响,波动性比较大,不予考虑)。在360~500 nm之间相关性最强,相关系数大于0.8,其中在386 nm处具有最大的相关系数0.95,此后相关性有所降低。因此可知,360~500 nm是柴油膜的特征谱带区间,具有估算油膜厚度的潜力,尤其以蓝、紫光波段敏感性最强,是表现油膜厚度的最佳波段。

2.3 太阳直射光与天空光对水面油膜光谱的影响分析

太阳直射光与天空光两部分的反射光是影响浮油膜离水反射率准确性的重要影响因素,本文通过调整观测视角和选取光谱低值曲线的方法降低太阳直射光的影响,通过扣除菲涅尔反射作用减少天空光的影响。图4为实验中水面漂浮厚度为11.8 μm的油膜时光谱仪接收到的总的信号的遥感反射率,以及消除太阳直射光与天空光的影响后的油膜离水反

射率,可以看出,如果不扣除太阳直射光和天空光的反射光的影响作用,所得浮油膜的离水反射率偏高,最多能高出50%。

2.4 水面浮油膜光谱形成机理分析

通过对水面柴油膜光谱的特征分析可知,水面柴油膜光谱对背景水体光谱具有增反性和依赖性。为了解析水面柴油膜光谱的形成机理,本文引入光学薄膜中增反膜的工作原理。柴油为清澈的透明液体,当水面上漂浮的油膜很薄时,油膜主要表现出透光性,因此水面油膜可以看作是以水体为基底的一单层介质薄膜^[23-24],根据增反膜的光学特性可知,当薄膜材料的折射率大于基底折射率时,会出现增加反射率的效果,即膜层上表面得到的反射率比覆盖薄膜的反射率要高。本文已测得柴油的折射率 $N_{油}=1.4650$,水的折射率 $N_{水}=1.3333$,满足单层介质膜增反条件,因此,水面滴入柴油后出现增加反射率的效果。在不考虑其他因素的影响的情况下,增反效果最好时的反射率表达式为:

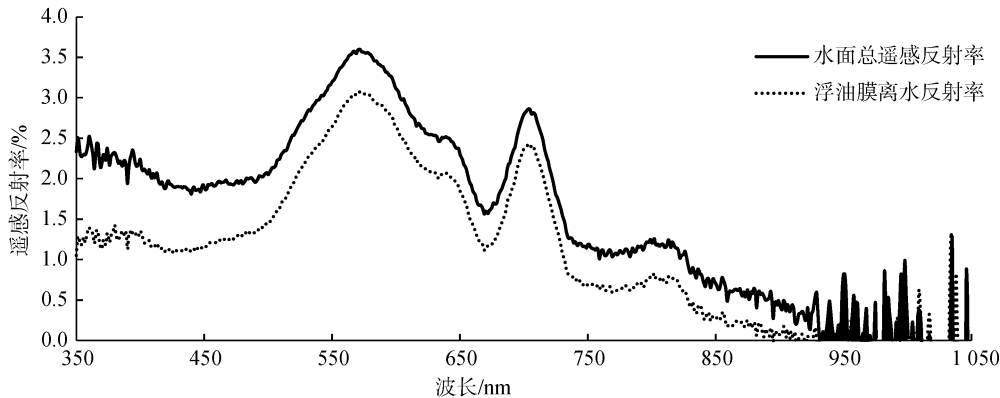


图4 太阳直射反射与天空光对油膜离水反射率的影响

Fig. 4 Influence of direct sunlight reflection and light the sky

$$R_{max} = \left(\frac{N_{气}N_{水} - N_{油}^2}{N_{气}N_{水} + N_{油}^2} \right)^2 \quad (8)$$

将空气、柴油和水体的折射率代入式(8),可得最大反射率为 $R_{max}=0.0567$,即入射的光强最多有5.67%被反射,大部分的光经油膜层进入水体,因此虽然柴油膜相对背景水体反射率增加了,但是在油膜较薄的情况下,背景水体的组成和浓度大小是影响水面油膜光谱形态的主要因素,从而导致水面油膜的光谱特征和水体光谱非常相似。随着油膜厚度的增加,油膜层对光辐射的吸收和散射作用增强,反射率呈现不断增大的趋势。

水面油膜光谱曲线在蓝、紫光波段出现了新的小反射峰,这可用石油类物质的荧光特性解释。石油类物质以碳氢化合物生成的烃类为主要成分,具有一定的荧光性,含有的非烃类组分如芳烃族也具有很高的荧光效率。根据物质分子吸收光谱和荧光产生机制,当石油类物质被光线照射时,物质分子吸收了和它所具有的特征频率相一致的能量,由原来的能级跃迁至高能级,由于处于高能级不稳定,就会从高能级跃迁到低能级,当从激发态再回复到基态时,过剩的能量可以电磁辐射的形式释放,从而发出荧光。不论激发荧光谱还是发射荧光谱都直接同物质的分子结构相关。研究发现,紫外区域是石油类

物质的激发效率较高的区域, 柴油的荧光峰值在 410 nm 附近^[25]。本文实验时段为正午前后, 紫外线照射强烈, 因此, 可认为滴入柴油后在蓝、紫光波段出现的反射峰是柴油荧光光谱叠加在柴油膜表面反射光谱上引起的。随着水中滴入油量的增多, 荧光强度也逐渐增大, 荧光峰呈现不断升高的趋势。

3 结论

自然水体环境下水面浮油膜光谱测量是一个易受多因素影响的复杂过程, 本文通过设计珠江口近海水域的水面油膜光谱实验, 获得了柴油油膜的光谱曲线。光谱特征分析表明, 柴油油膜光谱受背景水体的影响较大, 背景水体的组成和浓度大小是影响油膜光谱形态的重要因素。可见, 在构建油膜厚度估算模型时, 应该融入背景水体的光学特征。由于柴油的折射率高于水体的折射率, 水面浮油膜类似于光学薄膜中的增反膜, 具有增反效应, 油膜的存在使水面离水反射率增加。水面油膜光谱在 360~420 nm 区域内出现的反射峰, 跟柴油的荧光性有关。通过对柴油油膜光谱反射率和油膜厚度的相关分析表明, 360~500 nm 是柴油膜的特征谱带区间, 可用于溢油污染遥感探测, 其中蓝、紫光波段敏感性最强, 是表现油膜厚度的最佳波段。

下一步的研究重点是对水面油膜光谱响应机理进行更深入的分析, 探寻光学辐射在不同厚度油膜中以及在水下光场中的吸收、散射等固有光学特性, 构建油膜厚度定量估算模型。

参考文献:

- [1] Brekke C, Solberg A. Oil spill detection by satellite remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(1): 1-13.
- [2] 魏鹏, 黄良民, 冯佳和, 等. 珠江口广州海域石油烃的分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(3): 473-476. Wei Peng, Huang Liangmin, Feng Jiahe, et al. Distributions characteristics of petroleum hydrocarbons in Guangzhou sea area of Pearl River Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(3): 473-476.
- [3] Ghust G, Sagarminagar Y. The multi-angle view of MISR detects oil slicks under sun glitter conditions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107: 232-239.
- [4] 李颖, 刘丙新, 陈澎. 高光谱遥感技术在水上溢油监测中的研究进展[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(3): 460-464. Li Ying, Liu Bingxin, Chen Peng. Study advancement in oil spill monitoring using hyper-spectral remote sensing[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(3): 460-464.
- [5] 杨红, 杭君. 基于 MODIS 与 HJ-1 多源卫星的上海海域溢油事故诊断[J]. *海洋科学*, 2014, 38(10): 90-97. Yang Hong, Hang Jun. Diagnosis of oil spills in Shanghai coastal area based on multi-source satellite MODIS and HJ-1[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(10): 90-97.
- [6] Jha M N, Levy J, Gao Y. Advances in remote sensing for oil spill disaster management: State of art sensor technology for oil spill surveillance[J]. *Sensor*, 2008, 8(1): 236-255.
- [7] Palmer D, Boasted G A, Boxall S R. Airborne multispectral remote sensing of the January 1993 Shetlands oil spill[C]//ERIM .Proceedings of the Second Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments: Needs, Solutions and Applications (vol. II). Michigan: ERIM, 1994: 546-558.
- [8] Foudan M F S. Hyperspectral remote sensing: A new approach for oil spill detection and analysis[D]. Fairfax: George Mason University, 2003.
- [9] Wettle M, Daniel P J, Logan G A, et al. Assessing the effect of hydrocarbon oil type and thickness on a remote sensing signal: A sensitivity study based on the optical properties of two different oil types and the HYMAP and Quickbird sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 2000-2010.
- [10] 张永宁, 丁倩, 高超, 等. 油膜波谱特征分析与遥感监测溢油[J]. *海洋环境科学*, 2000, 19(3): 5-10. Zhang Yongning, Ding Qian, Gao Chao, et al. Analysis of oil film spectrum and monitoring oil spilled by remote sensing[J]. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(3): 5-10.
- [11] 赵冬至, 丛丕福. 海面溢油的可见光波段地物光谱特征研究[J]. *遥感技术与应用*, 2000, 15(3): 160-164. Zhao Dongzhi, Cong Pifu. The research of visual light wave-band feature spectrum of sea-surface oil spill[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2000, 15(3): 160-164.
- [12] 付玉慧, 李栖筠, 张宝茹. 海洋溢油光谱分析与卫星信息提取[J]. *遥感学报*, 2008, 12(6): 1010-1016. Fu Yuhui, Li Qijun, Zhang Baoru. Spectroscopic analysis of oil spill at sea and satellite information distilling[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(6): 1010-1016.
- [13] 陆应诚, 田庆久, 王晶晶, 等. 海面油膜光谱响应实验研究[J]. *科学通报*, 2008, 53(9): 1085-1088. Lu Yingcheng, Tian Qingjiu, Wang Jingjing, et al. Experimental study on spectral response of offshore oil film[J]. *Science Bulletin*, 2008, 53(9): 1085-1088.
- [14] 刘丙新, 李颖, 韩亮, 等. 近岸水上油膜高光谱遥感特征分析[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(6): 904-908. Liu Bingxin, Li Ying, Han Liang, et al. Analysis of hy-

- per-spectral remote sensing features of oil film on nearshore waters[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(6): 904-908.
- [15] Fingas M, Brown C. Review of oil spill remote sensing[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014 (83): 9-23.
- [16] 汪小勇, 唐军武, 李铜基, 等. 水面之上法测量水体光谱的关键技术[J]. *海洋技术*, 2012, 31(1): 72-76.
Wang Xiaoyong, Tang Junwu, Li Tongji, et al. Key technologies of water spectra measurements with above-water method[J]. *Ocean Technology*, 2012, 31(1): 72-76.
- [17] 张民伟, 董庆, 唐军武, 等. 基于表观光谱反演黄东海水体固有光学量研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(5): 1403-1408.
Zhang Minwei, Dong Qing, Tang Junwu, et al. Study on using apparent spectrum to retrieve the inherent optical properties of ocean water[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(5): 1403-1408.
- [18] 唐军武, 田国良, 汪小勇. 水体光谱测量与分析 : 水面以上测量法[J]. *遥感学报*, 2004, 8(1): 37-44.
Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong. The methods of water spectra measurement and analysis : Above-water method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(1): 37-44.
- [19] Pravin J D, Palanisamy S. A new theory and its application to remove the effect of surface-reflected light in above-surface radiance data from clear and turbid waters[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2014, 142: 75-92.
- [20] Mueller J L, Fargion G S, McClain C R. *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation*[R]. USA: National Aeronautical and Space Administration, 2003.
- [21] 李铜基, 陈清莲, 韩冰. 海面之上法中海面反射率和观测几何模拟研究[J]. *海洋技术*, 2005, 24(4): 112-117.
Li Tongji, Chen Qinglian, Han Bing. The modeling studies on sea surface reflection and view geometry of above-water method[J]. *Ocean Technology*, 2005, 24(4): 112-117.
- [22] 汪小勇, 李铜基, 周虹丽, 等. 中国近海海洋光学特性及其分布[J]. *中国海洋大学学报*, 2014, 44(1): 104-111.
Wang Xiaoyong, Li Tongji, Zhou Hongli, et al. Discussion on ocean optics properties of Chinese offshore and its distribution characteristics[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(1): 104-111.
- [23] 曹建章, 徐平, 李景镇. *薄膜光学与薄膜技术基础*[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Cao Jianzhang, Xu Ping, Li Jingzhen. *Thin film optics and thin film technology*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [24] 陆应诚, 田庆久, 李想. 基于浮油膜双光束干涉模型的油膜厚度遥感反演理论[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 4: 541-548.
Lu Yingcheng, Tian Qingjiu, Li Xiang. The remote sensing inversion theory of offshore oil slick thickness based on a two-beam interference model[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 4: 541-548.
- [25] 潘钊. 基于荧光光谱分析的石油类污染物识别测量方法及其实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
Pan Zhao. Method and experimental study on identification and measurement of petroleum pollutant based on fluorescence spectroscopy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.

Spectral measurement and characteristic analysis of an oil film floating above water

LIU Xu-long^{1, 2}, DENG Ru-ru¹, QIN Yan¹, LIANG Ye-heng¹, LIU Yong-ming¹

(1. Guangdong Engineering Research Center of Water Environment Remote Sensing, Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Key Laboratory of Guangdong for Utilization of Remote Sensing and Geographical Information System, Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510075, China)

Received: Jan.18, 2016

Key words: oil film; spectral characteristics; remote sensing reflectance

Abstract: Spectral characteristics of oil films are essential for remote sensing technology to identify oil pollution on the surface of water. Therefore, we designed and performed a water-surface reflectance measurement for a diesel oil film with various thicknesses of diesel at the Pearl River Estuary. The response characteristics and mechanisms of the surface reflectance spectra of the diesel oil films were then analyzed. Results showed that the diesel oil films had spectral curves similar to that of water; however, the formers' reflectance spectra were higher than that of the latter. Moreover, a reflectance peak was observed in the blue and purple regions. Furthermore, wavelengths in the range of 360—500 nm can be taken as sensitive wavelengths because significant correlations between the thickness of the diesel oil film were obtained at these wavelengths. Therefore, from our result, we identify the diesel oil film as a single reflection-increased layer of a diaphragm, thus providing a higher spectral reflectance than water. Moreover, the reflectance peak in the in the 360—420 nm wavelengths channels was related to the fluorescence of petroleum substances. The results of this study provide a theoretical basis and technical support for monitoring oil pollution on the surface of water using remote sensing technology.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)