

任广波,过杰,马毅,等.海面溢油无人机高光谱遥感检测与厚度估算方法[J].海洋学报,2019,41(5):146-158,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.05.014

Ren Guangbo, Guo Jie, Ma Yi, et al. Oil spill detection and slick thickness measurement via UAV hyperspectral imaging[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5): 146-158, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.05.014

# 海面溢油无人机高光谱遥感检测 与厚度估算方法

任广波<sup>1</sup>,过杰<sup>2</sup>,马毅<sup>1</sup>,罗旭东<sup>3</sup>

(1.自然资源部第一海洋研究所,山东 青岛 266061;2.中国科学院烟台海岸带过程研究所,山东 烟台 264003;3.广州星博科仪有限公司,广东 广州 510070)

**摘要:**海上溢油是海洋国家所面临的共同问题,但至今仍没有一种可靠实用的海上溢油准确识别和油量遥感监测方法。为此,本文以无人机高光谱遥感为手段,开展了海面溢油检测与厚度估算方法研究。实验中,通过搭建室外大型水槽溢油实验装置,获取了模拟真实海洋环境条件下不同溢油量的遥感和现场光谱数据,在此基础上,分析并提取了海上溢油特征光谱波段,给出了海上溢油高光谱检测模型;针对现场实验条件下水面油膜厚度难以测定的问题,设计了3种利用总体溢油量的油膜厚度估算模型。得到如下主要结论:(1)675 nm和699 nm是海上溢油检测的有效特征波段,但对极薄的油膜没有检测能力;(2)提出了归一化溢油指数模型、反比例模型和吸收基线模型等3种海上溢油油膜厚度估算模型,其中对于薄油膜(厚度 $\leq 5 \mu\text{m}$ )和厚油膜(厚度 $> 50 \mu\text{m}$ ),反比例模型是溢油厚度反演的首选也是唯一选择。对于中厚度油膜,晴朗天气条件下,归一化溢油指数模型是油膜厚度反演的首选,同时反比例模型和溢油吸收基线模型也都有较好的反演能力,而在多云天气条件下,反比例模型效果最佳。

**关键词:**溢油检测;溢油厚度评估;无人机高光谱;溢油遥感

中图分类号:X87

文献标志码:A

文章编号:0253-4193(2019)05-0146-13

## 1 引言

因原油自然泄漏、管线漏油、原油运输船漏油和大型船舶恶意排油导致的海上溢油事件对海洋自然生态、生物栖息和沿海养殖业都造成了巨大的危害。据统计,1973—2006年底,我国沿海共发生船舶溢油事故3 000多起,其中50 t以上重大船舶溢油事故69起,总溢油量超3.7万 $\text{t}^{[1]}$ 。近年溢油危害呈愈演愈烈的态势,如2010年7月16日,大连新港原油泄漏事件中,1 500多吨原油对430多平方千米的海域造

成了严重的直接污染,导致直接经济损失近50亿元<sup>[2]</sup>。2018年1月6日满载约13万t凝析油的巴拿马籍油船“桑吉”号在长江口外海撞船沉没<sup>[3]</sup>,所造成的环境污染危害至今难以准确统计。

海上溢油事件的发生具有突发性强、发生后分布范围大、漂移扩散动态性高等特点,对溢油发生的准确检测、溢油范围和溢油量的精确估算以及对其动态分布的高效跟踪,是溢油灾害有效治理的前提条件,遥感是公认的最为有效的技术手段之一<sup>[4]</sup>。目前国内溢油检测监测业务应用和技术方法研究主要以

收稿日期:2018-05-06;修订日期:2018-06-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(61601133,61890964,41576032,41706208)。

作者简介:任广波(1983—),男,山东省济宁市人,副研究员,从事海岛海岸带高分辨率遥感监测技术与应用研究。E-mail:renguagbo@126.com

合成孔径雷达(SAR)遥感数据为主<sup>[5-9]</sup>,但 SAR 数据对于海上常见的无风区、生物油膜、厚云雨层等造成的“类油膜”干扰无法准确排除,同时,SAR 数据由于无法反演溢油厚度,对溢油量的估算尚无能为力。光学手段方面,紫外波段对海上溢油的敏感性较高,易于区分油和水体,对甚薄油膜(厚度 $< 0.01 \mu\text{m}$ )监测较为有效,但太阳耀斑、海洋生物等易形成难以去除的干扰信息,且因波长较短难以在远距离条件下实现高精度探测而制约了其在溢油监测中的应用<sup>[10-12]</sup>;热红外技术利用漂浮溢油对太阳光谱吸收后升温异于周边海水的特性而实现的对溢油的探测,但其对薄油膜探测性能因受环境变化条件和其他升温体的影响而不稳定,同时不能做到对薄油膜的有效探测,且只能对厚油膜的厚度做到大体的估算<sup>[13-19]</sup>;应用可见光/近红外遥感技术对海上溢油面积、种类和厚度的进行监测和反演是目前研究最多的监测技术,其中,高光谱手段表现出了更突出的应用潜力<sup>[20-27]</sup>,但目前的基础性研究多是在室内理想环境条件下开展的,且多是利用地物光谱仪获取的溢油光谱数据<sup>[28-31]</sup>,基于有限的机载或星载成像光谱数据,国内外相关学者也开展了溢油成像高光谱监测技术研究<sup>[32-33]</sup>,但由于现场数据获取困难,这些研究难以做到量化。

本文应用室外水槽可控实验获取的不同溢油量条件下无人机(UAV)高光谱遥感图像数据,开展了基于可见光和近红外高光谱的海上溢油检测和厚度估算方法研究。所发展方法可为海上溢油的准确检测、溢油量的高精度评估提供支撑和借鉴。

## 2 实验设计与高光谱数据获取

### 2.1 高光谱成像系统

所用高光谱成像仪为广州星博科仪有限公司提

供的 Nano-Hyperspec 成像系统,有效光谱范围 400~1 000 nm,光谱平均半高宽度 2.2 nm,共 270 个波段。成像方式为线推扫式,数据记录动态范围为 12 bit。成像条带宽度 640 dpi,在可选视场角为 33°时,单像素空间分辨率为 0.9 mrad,即在飞行高度 30 m 的条件下,其地面像元空间分辨率为约 2 cm。成像数据系统级产品为辐亮度,单位为  $\text{mW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。

拍摄时,无人机以设定的速高比匀速、固定高度通过水槽上方,每一个拍摄条带都要保证将标准反射板纳入视场。对于溢油这样的弱信号目标,实验中使用的是反射率为 30%(约值,不同波段位置反射率不同)的灰板。

### 2.2 溢油实验设计

溢油实验于 2017 年 8 月 24—26 日进行,实验地点在位于山东烟台牟平海岸的中国科学院海洋实验站,模拟海上溢油遥感监测的环境条件,将石油原油布放在位于室外开阔区域的大型水槽中,水槽呈长方形,内部水面尺寸为 600 cm $\times$ 200 cm(图 1),内盛从近海中直接抽取并过滤杂质的海水,水位高度 35 cm,水面距离水槽顶部 40 cm。

所使用的原油沥青含量约为 1.35%,测定密度为 0.993 g/mL(30°C 时),整个实验过程气温和水温保持在 28~33°C 之间,此时溢油不会发生凝固且呈现漂浮状态。

实验过程中,按照近似成倍增加油量的方式不断的递增水槽中的石油量,目的是研究不同厚度海面溢油的遥感光谱特征。在每次无人机拍摄之前,需要对加入的石油进行一定程度的人工搅拌,使其更快、更均匀的在池内平铺。每次在水槽内添加的石油油量、无人机飞行时刻、飞行高度、天气条件等无人机高光谱数据拍摄时的详细信息如表 1 所示。

表 1 无人机高光谱溢油监测实验详细参数

Tab.1 Details of the UAV hyperspectral oil spill monitoring experiment

日期	时刻	油量/g	飞行高度/m	天气情况	文件编号
2017 年 8 月 24 日	11:03	61	50	晴	3740
	15:51	61	30	晴	4641
	17:10	61	30	晴	340
2017 年 8 月 25 日	08:43	135	20	晴	7854
	09:05	220	30	多云	5593

续表 1

日期	时刻	油量/g	飞行高度/m	天气情况	文件编号
	10:38	220	30	多云	6528
	13:58	220	30	晴	8313
	14:20	220	30	晴	8823
	15:36	445	30	多云	5253
	15:59	445	30	晴	5168
	16:50	445	30	晴	5168-2
2017 年 8 月 26 日	08:26	445	30	晴	5202
	10:15	3 821	30	晴	5185
	11:14	3 821	30	晴	5304
	13:53	3 821	30	多云	5304-2
	16:45	3 821	30	多云	8958

### 2.3 现场光谱数据获取

应用 ASD (Analytical Spectral Devices) FieldSpec 4 Standard-Res Spectro-radiometer 现场获取实验水槽内不同厚度海面溢油的光谱曲线,其光谱范围为 350~2 500 nm,光谱采样间隔:350~1 000 nm 之间为 1.4 nm;1 001~2 500 nm 之间为 1.1 nm,光线传输使用的是一条 1.5 m 长的延长光纤,光纤探头视场角 25°,在距离水面约 50 cm 处进行光谱获取,其足印直径大小约为 20 cm。

利用 ASD 获取现场光谱数据,用以验证无人机载高光谱数据的光谱探测能力。同时,获取非溢油水体光谱数据,作为溢油高光谱遥感检测特征光谱分析的基础。

来自太阳的光谱穿透溢油-空气界面、油膜、油水界面、水体,经过油膜和水体的吸收以及两个界面的散射,通过底质吸收反射后再依次经过水体、油水界面、油膜和溢油-空气界面,最终被无人机高光谱成像仪和手持光谱仪探测,除太阳光线的变化外(可通过计算反射率光谱降低其影响),是否存在油膜以及油膜的厚度是整个实验过程中的唯一变量。基于以上原理分析,本文拟通过分析溢油反射率光谱提取溢油检测特征,并建立反射率光谱与油膜厚度之间的定量关系。

## 3 海面溢油高光谱图像检测方法

### 3.1 溢油高光谱图像数据分析

不同于在室内环境下完全可控的实验环境,在实

验所处的海岸环境中,加入水槽内的溢油形成油膜后极容易受风、云雾、太阳高角度等的自然环境条件的影响。图 1 所示为 16 次飞行实验其中 4 次拍摄得到的反射率图像(650 nm-R/550 nm-G/450 nm-B),所有图像中水槽中的溢油都受到了来自风、太阳高度角和云的干扰。图中 5 条横向分布的灰黑色横线为加固水槽所用的结构材料。

图 1 所示的 4 个不同溢油量的图像中,图 1a 中从加石油到溢油高光谱数据拍摄的时间段内,石油油膜并未均匀平铺,此时因表面张力等原因出现油滴聚集的现象;图 1b 和图 1d 受风的干扰使油膜在水槽中的厚度不均匀;图 1c 和图 1d 中云的影响使得溢油的光谱数据值得到了一定程度的整体提高。原则上,已知加入的油量和水面面积可间接计算水面油膜的厚度,然而由于受上述不可控环境因素的影响,高光谱图像场景内任意位置的厚度值无法得到。

图 2 所示的是图 1b 中自上而下不同厚度溢油油膜的光谱曲线数据,所属高光谱图像编号 8313,其中,左侧曲线图中的 0 g-ASD 为实验中利用 ASD 获取的未加石油条件下的光谱曲线。

图 2 中不同线型曲线为 8313 溢油高光谱图像水槽中溢油被风影响造成的池内油膜厚度不均匀时,不同厚度处的溢油水体光谱。其中  $D$  和  $dn$  为某个未知的厚度值,根据自北向南(图上为自上而下)风向造成的油膜颜色深浅判断,其厚度  $d_1 < d_2 < \dots < d_7$ 。随着油膜厚度的增加,其光谱反射率在可见光和近红

外波段呈现整体下降趋势。

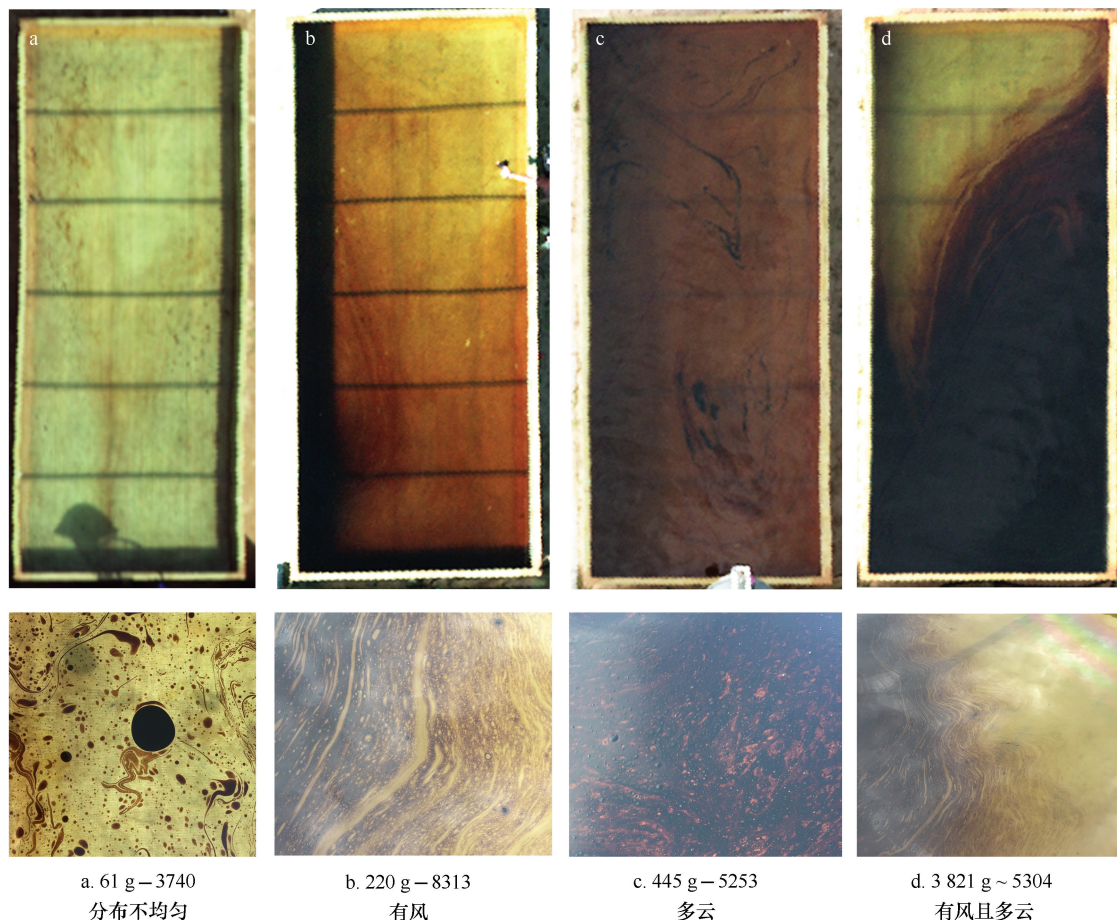


图1 不同溢油量、不同环境条件的溢油无人机高光谱图像和现场照片示例

Fig.1 Oil spill UAV hyperspectral images and field photos with different oil quantity under different environments

a图 61 g-3740 代表编号为 3740 的反射率图像,其分布油量为 61 g;b,c 和 d 图的意义同 a 图

61 g-3740 in a represents a reflectance image numbered 3740 of 61 g oil in the oil spill experiment tank; b, c and d have the same meaning as a

另外,在小于 460 nm 和大于 850 nm 的光谱波段,无人机高光谱图像中溢油水体光谱曲线重合在一起,由于该两处波段处于无人机高光谱传感器感知光谱的末端,可能由于传感器感光能力的差别存在系统的测量误差。

### 3.2 海面溢油高光谱特征提取

图 2 中部分光谱曲线相互重叠,为方便分析,将不同厚度溢油水体和非溢油水体光谱曲线在反射率方向上进行平移,依次平移 0.05,得到如图 3 的光谱曲线图。对于不同厚度的溢油水体光谱曲线和非溢油水体光谱曲线,在 760 nm 处有一致的吸收峰,同时在 820 nm 处有较为一致的反射峰,故不作为溢油水体的特征波段。剩余波段中,与非溢油水体相比,溢油水体光谱分别在 560 nm、650 nm、675 nm、699 nm

附近呈现出差别较大的吸收和反射峰值,作为备选特征波段。

传感器接收到的溢油水体光谱,是太阳光线穿透覆盖在水面的原油油膜、海水,经底质反射,再经过水体、原油油膜穿透出来的电磁波谱。携带了油膜、水体和底质三方面的信息。分析图 2 和图 3,随着油膜厚度的增加,相比于纯水体,一方面溢油水体的反射率整体降低,另一方面,这些降低在不同的波段其比例并不一致。

因此,对溢油水体光谱曲线和非溢油水体光谱曲线作比值处理并取对数处理,得到图 4 的比值光谱。综合分析图 2、图 3 和图 4 发现,在 675 nm 和 699 nm 处出现了两个曲线突变,突变位置对于不同厚度油膜光谱稳定,且突变程度即突变高度随油膜厚度的增加

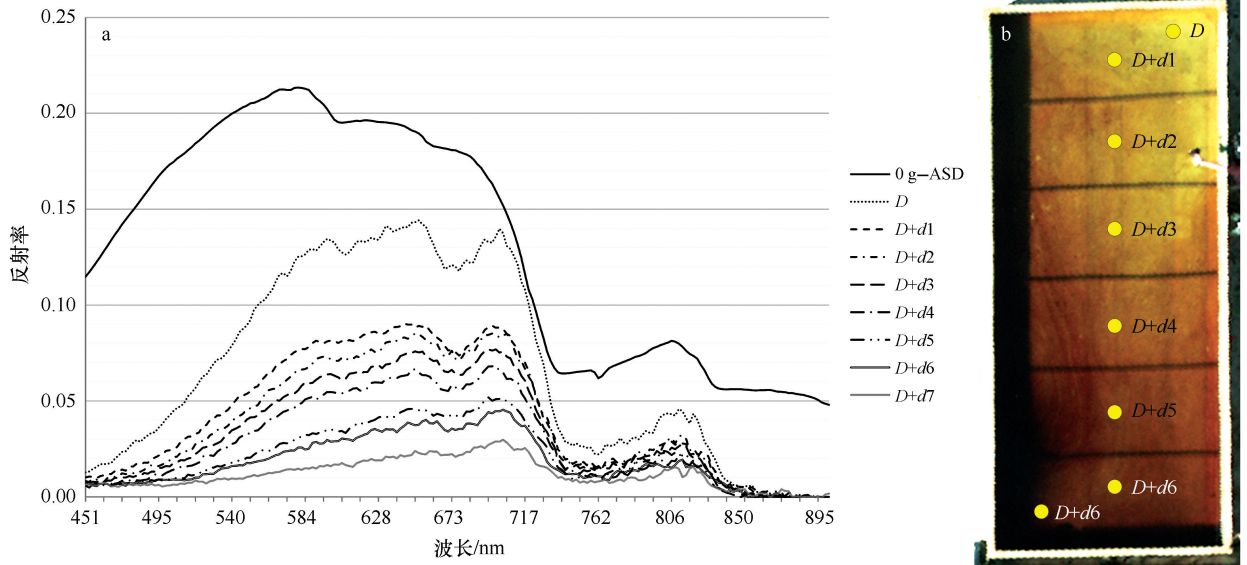


图 2 海水的 ASD 光谱曲线和不同厚度油膜的无人机高光谱图像光谱曲线

Fig.2 ASD spectral curves of seawater and unmanned aerial vehicle hyperspectral image spectral curves with different oil thicknesses

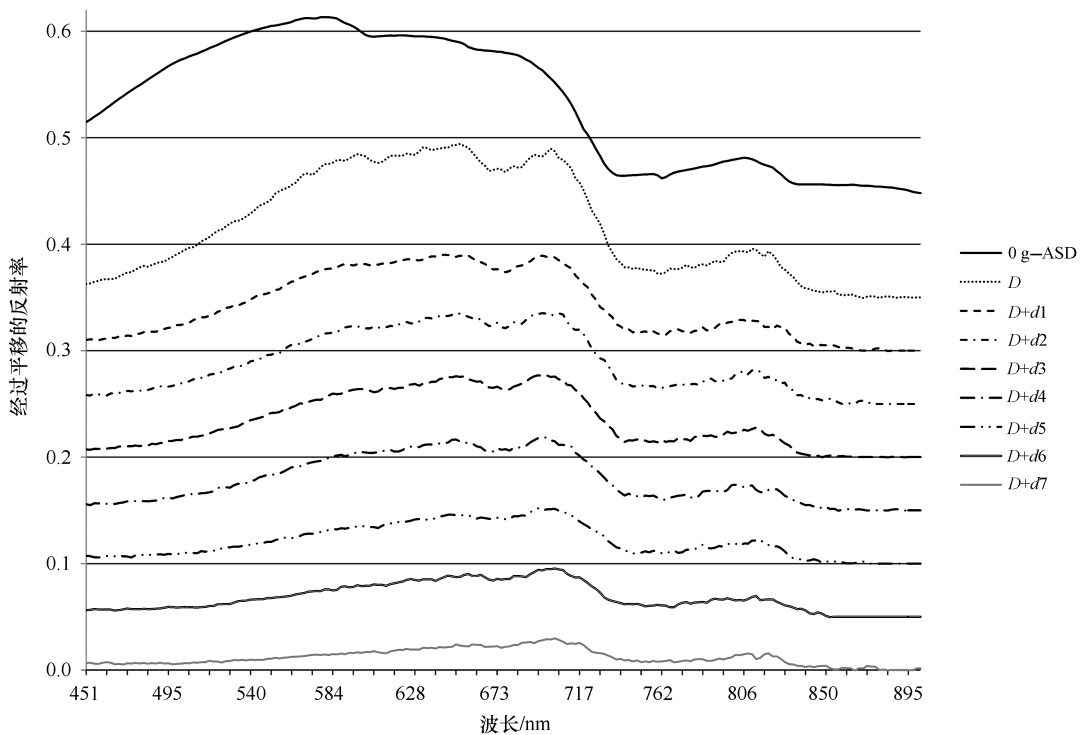


图 3 海水的 ASD 光谱曲线和不同厚度溢油的无人机高光谱图像像元光谱反射率平移示意图

Fig.3 Shift diagram of ASD spectral curves of seawater and unmanned aerial vehicle hyperspectral image spectral curves of with different oil thicknesses

而有所降低。同时,在其他光谱范围,二者光谱比值曲线较为平滑,可认为油膜的特征光谱应在 675 nm 和 699 nm。

### 3.3 高光谱遥感图像溢油检测模型

溢油的检测属于溢油水体和纯水体的区分问题,即根据其与纯水体光谱之间的差异特征波段,通过建

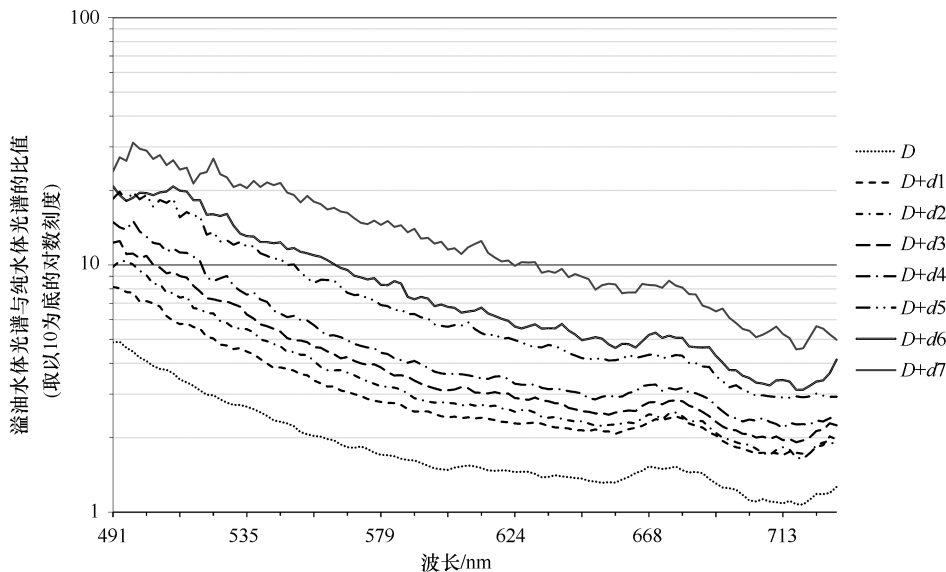


图4 不同厚度溢油光谱曲线与水体光谱曲线的比值

Fig.4 The ratio curves of oil spill with different thickness and pure ocean water

立检测模型,分析寻找合适的检测阈值,实现溢油水体的准确检测和提取。

基于以上分析,选择 675 nm 和 699 nm 为溢油检测特征波段。建立如下式的归一化溢油指数(Normalized Difference Oil Spill Index, NDOSI):

$$\text{NDOSI} = (R_{699} - R_{675}) / (R_{699} + R_{675}), \quad (1)$$

式中,  $R_{699}$  和  $R_{675}$  分别是光谱曲线在 699 nm 和 675 nm 处的反射率值。

## 4 高光谱遥感图像溢油厚度估算方法

海上油膜厚度监测,是溢油影响评估、生态损害评价、事件分等定级和依法开展生态损害赔偿的重要依据。

无论是海洋开阔环境还是实验室水槽内,油膜厚度都难以通过实验装置或手段准确探测。在实验室稳定状态下,通过溢油的体积和水槽的水面面积可间接得到溢油厚度。但在本实验中,稳定的条件却难以达到,针对该特点,提出以下 3 种溢油厚度估算方法。

### 4.1 归一化溢油指数模型

分析取自不同厚度油膜处的反射率光谱曲线(图 2,图 3),其在 675 nm 处的吸收峰和 699 nm 处的反射峰稳定且明显的存在于各条溢油水体光谱中。以提出的 NDOSI 作为模型自变量,设计出溢油厚度估算的一次线性模型和二次多项式模型。

#### (1)一次线性模型

对于高光谱遥感图像中溢油水槽中的某一个像

元  $i$ ,其厚度反演模型假设为:

$$T_i = a X_i + b, \quad (2)$$

式中,  $T_i$  为像元  $i$  位置的油膜厚度,  $X_i$  为相应位置的 NDOSI 指数值,  $a$  和  $b$  为待定参数。对于式(2),  $X_i$  已知,而  $T_i$  无法通过常规观测手段得到准确的值,但整个水槽中的总溢油量和像元数量是已知的。

故对于高光谱遥感图像中水槽内的  $N$  个像元,有  $i = 1, 2, \dots, N$ , 可得到

$$\sum_{i=1}^N T_i = a \sum_{i=1}^N X_i + b \sum_{i=1}^N 1, \quad (3)$$

式中,  $\sum_{i=1}^N (T_i \times \frac{S}{N}) = V$ ,  $V$  为水槽内溢油总体积,  $S$  为水槽水面的面积,则有

$$\sum_{i=1}^N T_i = a \sum_{i=1}^N X_i + b \sum_{i=1}^N 1 = \frac{N}{S} V. \quad (4)$$

#### (2)二次多项式模型

对于高光谱遥感图像中溢油水槽中的某一个像元  $i$ ,其厚度反演模型假设为:

$$T_i = a X_i^2 + b X_i + c, \quad (5)$$

则对于非线性的一元二次多项式模型,有

$$\sum_{i=1}^N T_i = a \sum_{i=1}^N X_i^2 + b \sum_{i=1}^N X_i + c \sum_{i=1}^N 1 = \frac{N}{S} V. \quad (6)$$

式(5)和式(6)中,  $a$ ,  $b$  和  $c$  为待定系数。

### 4.2 反比例模型

随着油膜厚度的增加,特征波段 675 nm 和

699 nm处的反射率值随光谱曲线逐渐降低,呈明显的反比例,且二者反射率之差也在逐渐缩小。这种关系可用以下反比例模型近似描述。

对于高光谱图像中水槽里的某一个像元  $i$ ,其厚度反演模型假设为:

$$T_i = \frac{a}{R_{i-675}} + \frac{b}{R_{i-699}}, \quad (7)$$

式中,  $R_{i-675}$  和  $R_{i-699}$  为像元  $i$  在 675 nm 和 699 nm 处的反射率值,  $a$  和  $b$  为待定系数。参照 4.1 节,式(7)变形为:

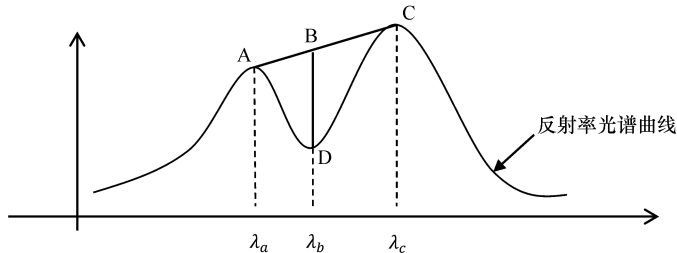


图5 吸收基线高度示意图

Fig.5 Absorption line height diagram

之间曲线为吸收峰的位置, BD 线段所代表的反射率高度即为吸收基线。

$$BD = \frac{\lambda_d - \lambda_a}{\lambda_c - \lambda_a} (R_{\lambda_c} - R_{\lambda_a}) + (R_{\lambda_a} - R_{\lambda_b}), \quad (9)$$

式中,  $\lambda_a$ 、 $\lambda_b$  和  $\lambda_c$  为特征峰值处的波长,相应的  $R_{\lambda_a}$ 、 $R_{\lambda_b}$  和  $R_{\lambda_c}$  为峰值波长对应的反射率。3 个特征峰值涉及的波长值分别为 650 nm、675 nm 和 699 nm, B 点近似为线段 AC 的中点,故式(9)可简化为:

$$BD = \frac{1}{2} (R_{\lambda_a} + R_{\lambda_c}) - R_{\lambda_b}. \quad (10)$$

对于高光谱遥感图像中溢油水槽中的某一个像元  $i$ ,其厚度反演模型假设为:

$$T_i = a BD_i + b, \quad (11)$$

相应的,反演模型为:

$$\sum_{i=1}^N T_i = a \sum_{i=1}^N BD_i + b \sum_{i=1}^N i = \frac{N}{S} V, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N T_i = a \sum_{i=1}^N BD_i^2 + b \sum_{i=1}^N BD_i + c \sum_{i=1}^N i = \frac{N}{S} V, \quad (13)$$

式中,  $a$ 、 $b$  和  $c$  为待定系数。

## 5 结果与分析

### 5.1 溢油高光谱检测结果

根据 NDOSI 溢油检测模型,以  $NDOSI > 0$  为检

$$\sum_{i=1}^N T_i = a \sum_{i=1}^N R_{i-675}^{-1} + b \sum_{i=1}^N R_{i-699}^{-1} = \frac{N}{S} V. \quad (8)$$

### 4.3 吸收基线高度法

水面溢油 675 nm 处的特征由该波长处的吸收峰和其两侧的反射峰组成,根据图 1 和图 3 所示的不同厚度溢油反射率曲线,经分析得到两侧的反射峰波长分别为 650 nm 和 699 nm。随着油膜厚度的增加,上述 3 个特征峰值组成的吸收峰深度逐渐减小。假设上述 3 个波段组成的吸收峰深度与溢油厚度相关,定义吸收峰深度为吸收基线深度,如图 5 所示, A、D、C

测阈值,对所有 16 组溢油高光谱图像进行了溢油检测,图 6 为部分溢油图像的检测结果。发现在油膜较薄的条件下,无法做到有效检测,如图 6a 所示的对除 3740 高光谱图像中溢油的薄油膜仅能做到部分检测,检测出的部分为未完全扩散的厚油滴,如图 6c 至图 6f 所示。而对于油膜较厚的其他溢油高光谱图像,都可实现完全准确检测,如图 6b 所示。

从图 6e,图 6f 可发现该指数未检测出溢油的区域为溢油尚未均匀扩散时刻油滴之间的水面空隙,而实际上此刻油滴之间的空隙水面是有一层极薄油膜存在的,这说明,对于这样的薄油膜,相比于底质和水体的反射率,其溢油光谱信息已极其微弱,几乎淹没在整个光谱背景中,此时本文发展的溢油检测模型不能发挥作用。而对于有油滴存在的区域,NDOSI 模型有效地识别出了油滴所在的位置,如图 6c 和图 6d 所示,3470 高光谱图像中色调较暗的区域为油滴存在的位置,而同样暗色调的水槽加固线并未被识别成溢油区域。

### 5.2 溢油厚度反演结果

#### 5.2.1 溢油厚度反演模型与溢油量评估

基于溢油无人机观测数据,对提出的 3 种溢油水体油膜厚度反演模型进行了拟合,拟合模型如表 2 所示。分析 3 种模型,不难发现,NDOSI 指数与溢油水

体油膜厚度之间是正比的关系,而吸收基线深度与溢油水体油膜厚度之间是反比关系。

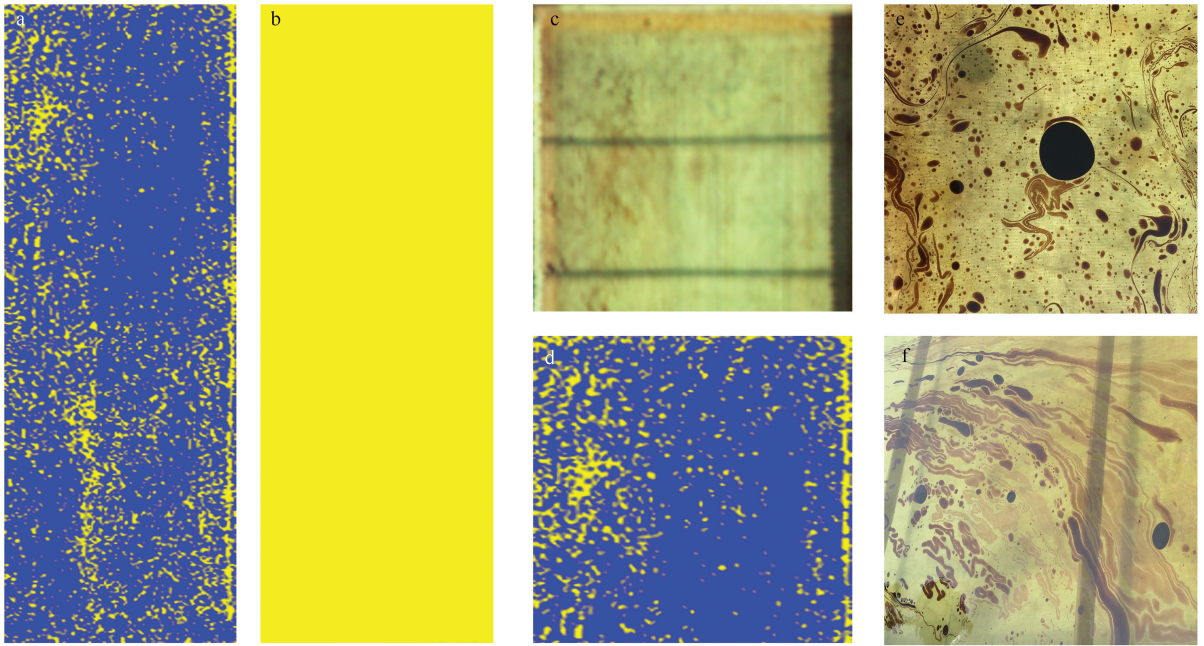


图6 基于NDOSI溢油检测指数的部分检测结果(黄色为溢油水体,蓝色为非溢油水体)

Fig.6 Oil spill detection results of NDOSI model (yellow and blue respect oil slick and pure water)

a. 61 g-3740 高光谱图像溢油检测结果; b. 220 g-6528 高光谱图像溢油检测结果; c, d. 3740 高光谱图像溢油检测局部区域与对应的图像; e, f. 3740 高光谱图像拍摄时刻对应的现场照片

a. Oil spill detection result of 61 g-3740 image; b. oil spill detection result of 220 g-6528 image; c, d. the 3740 image and its oil spill detection result (local); e, f. the related field photos of 3740 image

在此基础上,应用3种模型对16个无人机高光谱图像中的溢油量进行了反演估测,反演结果评估表如表3所示,其中,图7所示的是220 g-8313和445 g-5253高光谱图像溢油厚度反演结果。提出的3种溢油厚度估算模型均可有效地实现对溢油水体油膜厚度的估算,但适用范围却有差别。

(1)对于实验水槽中有61 g原油时的薄油膜(本文称油膜厚度 $\leq 5 \mu\text{m}$ 时水槽内形成的油膜为薄油膜,如61 g溢油时),和水槽中有3 821 g原油时的厚油膜的情况(本文称油膜厚度 $> 50 \mu\text{m}$ 时水槽内形成的油膜为厚油膜,如3 821 g溢油时,称油膜厚度在 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间为中厚度油膜),NDOSI模型和基线高度模型均出现了不适用的情况,无法得到合理的数值。原因是,在油膜厚度很薄的时候,石油油膜光谱在溢油、水体和底质三者叠加光谱中的比重很小,对于本实验中的浅水(35 cm)和强反射底质(类似于砾石、沙质或粉砂质海底底质),其石油的光谱特征难以明显表现,即675 nm处的吸收峰和699 nm处的反射峰并不明显(图8a),而上述两个石油特征位置处,对于水体和底质而言,在薄油膜条件下,其大小关系是

相反的,即此时NDOSI和BD是小于0的值,根据表2中所示的反演模型,得不到有效的厚度值。这同时也是4.1节得到的薄油膜难以做到有效检测的原因之一。而在油膜较厚时,来自太阳的光谱能量在两次经过油膜和水体之后,被吸收殆尽,传感器接受到的光谱能量较弱,反射率很低(图8b)。溢油在反射率光谱上呈现的油膜特征此时与因传感器高增益带来的噪声级别相当,若对高光谱图像开展噪声滤除处理则可能将油膜特征也一并滤除,反之,油膜特征波段处的随机噪声会被作为“特征信息”给估算结果带来不可控的误差。甚至,在油膜被风影响而在水槽一侧聚集时(如图1d),油膜光谱特征完全被传感器增益噪声所覆盖。

(2)对于有云覆盖时的高光谱图像,NDOSI模型和反比例模型均表现出了较高的油膜厚度估算误差,且都是低估。原因是,相比于晴朗天气条件,多云天气条件下,特别是夏季的海岸带区域,天空中不规则、不均匀分布的白色云朵在实验场景中起到了“多光源”的作用。无人机高光谱图像的获取过程中无法采取有效的措施避免“多光源”造成的镜面反射(或称海

表 2 溢油水体油膜厚度估算模型  
Tab.2 Oil slick thickness estimation models

模型类型	NDOSI 模型		吸收基线模型	
	线性	多项式	线性	多项式
拟合模型	$T_i = 395.31 \text{ NDOSI}_i - 18.89$	$T_i = -381.22 \text{ NDOSI}_i^2 + 488.72 \text{ NDOSI}_i - 23.91$	$T_i = \frac{2.63}{R_i - 675} - \frac{1.13}{R_i - 699}$	$T_i = 937.062.87 \text{ BD}_i^2 - 34.454.37 \text{ BD}_i + 248.91$
决定系数 ( $R^2$ )	0.79	0.81	0.77	0.83

注: 为便于区分, 将上述不同模型中的自变量按照各自代表的意义表达。

表 3 基于 3 种油膜厚度反演模型的溢油量估测结果  
Tab.3 Estimation results of 3 kinds of oil slick thickness estimation models

图像	实际油量/g (平均油膜厚度/ $\mu\text{m}$ )	NDOSI 模型评估油量		反比例模型		吸收基线模型评估油量		天气情况	
		一次模型/g	二次模型/g	相对误差/%	评估结果/g	一次模型/g	二次模型/g		相对误差/%
3740	61 (5)	-	-	-	69	13.1	-	-	晴
4641	61 (5)	-	-	-	63	3.3	-	-	晴
340	61 (5)	-	-	-	58	4.9	-	-	晴
7854	135 (11)	157	144	6.7	141	4.4	145	7.4	晴
5593	220 (18)	132	148	32.7	184	16.4	198	10.0	多云
6528	220 (18)	144	156	29.1	174	20.9	228	3.6	多云
8313	220 (18)	205	226	2.7	230	4.5	201	8.6	晴
8823	220 (18)	238	228	3.6	235	6.8	205	6.8	晴
5253	445 (37)	324	345	22.5	287	35.5	411	7.6	多云
5168	445 (37)	401	424	4.7	401	9.9	399	10.3	晴
5168-2	445 (37)	394	431	3.1	423	4.9	389	12.6	晴
5202	445 (37)	399	428	3.8	455	2.2	401	9.9	晴
5185	3 821 (318)	-	-	-	3 207	16.1	-	-	晴
5304	3 821 (318)	-	-	-	3 345	12.5	-	-	晴
5304-2	3 821 (318)	-	-	-	2 343	38.7	-	-	多云
8958	3 821 (318)	-	-	-	2 257	40.6	-	-	多云

注: - 表示模型不适用。

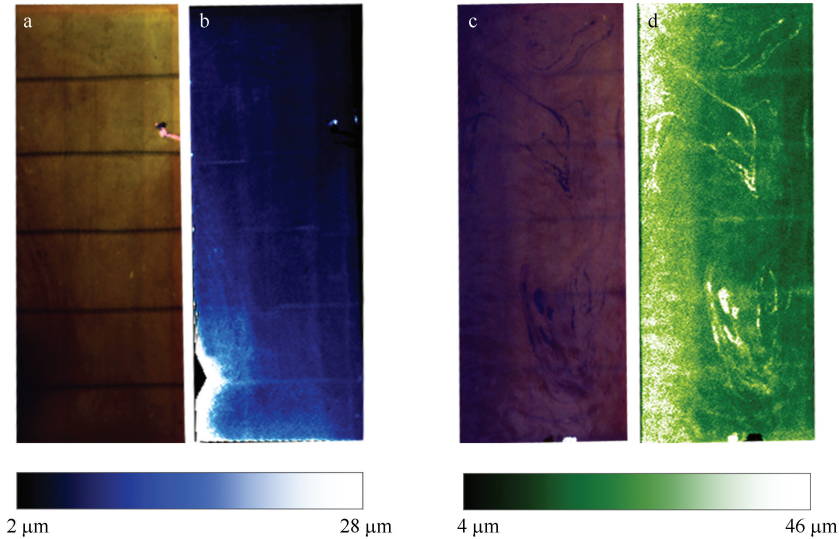


图7 溢油厚度估算结果

Fig.7 The estimation results of oil slick thickness

a和b为220 g—8313的反射率图像和NDOSI模型溢油厚度估算结果;c和d为445 g—5253反射率图像和吸收基线模型溢油厚度估算结果

a and b are reflectance image of 220 g—8313 and its oil thickness estimation result using NDOSI model; c and d are reflectance image of 445 g—5253 and its oil thickness estimation result using absorption line height polynomial model

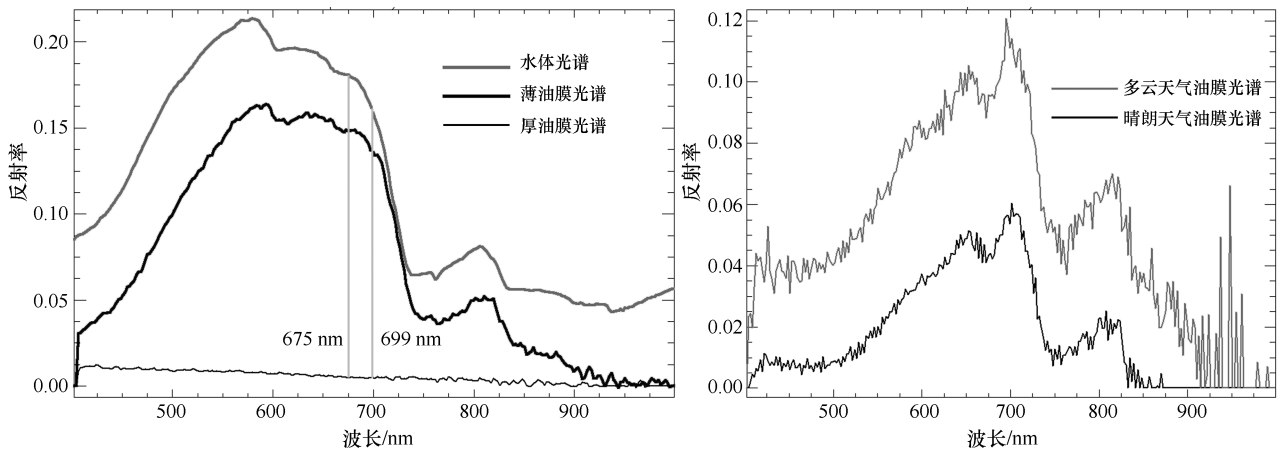


图8 不同厚度、不同天气条件的的光谱曲线

Fig.8 Spectrum curves of different oil quantity and weather condition

a. 非溢油水体、薄油膜和厚油膜光谱;b. 不同天气条件下油膜光谱

a. Spectrum curves of pure water, thin and thick oil slick; b. oil slick spectrum curves under different weather condition

洋耀斑)带来的影响。如图1c多云条件下获得的高光谱图像,其表现出了明显的表面反射亮度。这种镜面反射会给传感器接收到的溢油水体光谱反射率一个整体的提升,这种提升并不是成比例的,而是对所有波段都是一个近似常数的加和,如图8b所示的445 g溢油在晴朗和多云天气条件下,其多云情况下的反射率平均提高了约5%。这种光谱变化给NDOSI模

型和反比例模型都会带来严重的影响。

### 5.2.2 溢油厚度评估模型适用性分析

#### (1)NDOSI模型

有效利用了溢油水体的特征波段,NDOSI指数成功地描述了溢油水体油膜厚度对反射率光谱的影响,即随着油膜厚度的增加,该指数的值是上升的。相比线性模型,多项式模型对水体溢油厚度的反演准

确度更高。该模型对于吸收特征不明显的薄油膜没有检测能力,原因是较小的油膜厚度对传感器接收光谱信息的贡献不足以使溢油光谱特征明显的显现,以至于在溢油特征波段处,光谱表现的更多是海水水体和海底底质的信息。这种情况下,对于溢油信息的检测和油膜厚度的定量评估都是不利的。对于受多云条件影响而造成溢油水体反射率整体提升的情况,溢油量评估结果偏低;同时,对于厚油膜条件下的溢油厚度没有监测能力,原因在 5.2.1 节已作了详细阐述。

### (2) 反比例模型

利用的是溢油水体 675 nm 和 699 nm 处特征波段随着油膜厚度的增加其反射率以及二者之差相应同时减小的特点。该模型不直接比较和利用上述两个溢油特征波段之间的关系,有效解决了在油膜厚度较小和厚度较大时 NDOSI 模型、吸收基线模型出现负值的情况,同时也对晴朗条件下的中厚度溢油厚度有较好地反演能力。但对于厚油膜,由于随着油膜厚度的增加,其反射率降低到一定程度之后,溢油特征信息会淹没在传感器的系统增益噪声中,故其对厚油膜厚度的评估能力相应降低。

### (3) 溢油吸收基线模型

该模型直接利用了 675 nm 处溢油吸收特征的吸收深度,即以模型中定义的“基线高度”作为模型的自变量指标。溢油吸收基线模型有效地解决了在多云条件下对光谱曲线的整体抬升而导致的 NDOSI 模型和反比例模型无效的问题。

基于以上分析,结合表 3 中所示的对不同溢油情况的油量评估结果,本文设计的 3 个模型各有其适用范围。对于本文定义的薄油膜和厚油膜,反比例模型是溢油厚度反演的首选也是唯一选择;对于中厚度油膜,晴朗天气条件下,NDOSI 模型是油膜厚度反演的首选,同时反比例模型和溢油吸收基线模型也都有反演能力,而在多云天气条件下,反比例模型对中厚度反演的效果最佳。

## 6 讨论

实验中相关数据的获取力求模拟真实海洋溢油环境,但仍有许多不足之处,制约了利用上述实验数据分析得到的溢油检测方法和油膜厚度估算方法的有效性和对其他环境下溢油光谱图像的推广能力。可能会对所发展的基于高光谱遥感图像的溢油检测和厚度评估方法产生影响的因素包括:

(1) 底质类型环境考虑不全面。溢油的检测和厚

度估算无法避免底质环境条件的影响,不同的海域、不同的海水深度、不同的海洋底质类型和不同的水质条件,对反射率光谱,特别是溢油水体特征光谱的影响是不同的。本文以浅水条件下的玻璃钢水槽为容器开展光谱测量和高光谱图像获取,仅能近似的模拟沙质底质的浅水海洋环境,与其他大多数深水海洋环境差别较大。同时,实验用水槽的尺度所限,与真实的海洋边界环境条件还有较大差别,这些都是影响本文所发展的模型结果和真实海洋应用时的有效性的的重要因素。

(2) 没有考虑溢油的乳化过程。溢油接触海水之后,会因为波浪、风等的搅拌产生油水混合,进而随着时间、气温、水体杂质吸附等的因素,产生乳化,并同时伴随着烃类物质的挥发,其物理形态、成分结构也随着时间的推移发生着变化,这些都是影响溢油光谱的因素,需要更多实验数据的支撑。

(3) 没有分析太阳高度角、气温等是否对溢油厚度的评估都会造成影响。不同的太阳高度角直接影响在传感器光敏性能一定的情况下光谱数据的质量,气温对石油原油的挥发、凝固和亲水性、杂质包容性等都有影响,这些都可能对溢油高光谱监测带来影响。

(4) 高光谱成像仪光谱分辨率不够细致。所使用的高光谱成像仪其光谱分辨率为 2.2 nm,文中所分析提取的海面溢油特征光谱是基于该分辨率的图像得到的,若所使用光谱成像仪的光谱分辨率发生变化,相应的特征波段的位置也会发生移动。

(5) 实际应用中无人机高光谱仍有较大提升空间。无人机高光谱虽具有机动灵活、高效经济的优势,但目前其单条带拍摄幅宽受传感器视场角和飞行高度的限制而较为有限,且受其续航能力、机上存储与处理能力影响,其距离实际应用还有较大可提升的空间。

## 7 结论

利用无人机高光谱遥感手段,结合现场便携式光谱仪,获取了模拟真实海洋环境条件下不同溢油量的遥感和现场光谱数据,在此基础上,分析并提取了海上溢油特征光谱波段,给出了适用于中厚度油膜溢油检测的海上溢油高光谱检测模型;针对现场实验条件下水面油膜厚度难以测定的问题,设计了 3 种利用总体溢油量的油膜厚度估算模型。得到如下主要结论:

(1) 675 nm 和 699 nm 是海上溢油检测的有效特征波段,但对极薄的油膜没有检测能力;

(2) 提出了 3 种海上溢油油膜厚度估算模型,其

中对于薄油膜和厚油膜,以及对于非晴朗天气的溢油高光谱观测数据,反比例模型是厚度估算的首选;对于中厚度油膜,吸收基线溢油厚度反演模型是最佳选择,在晴朗天气条件下,NDOSI模型也是选择之一。

## 参考文献:

- [1] 许艳,王海潮.我国溢油应急综合实力显著提升[J].中国海事,2007(6):12-15.  
Xu Yan, Wang Haichao. China's actual capability for emergency response against marine oil spill remarkably rose[J]. China Maritime Safety, 2007(6): 12-15.
- [2] 顾磊,张善杰.我国油轮营运安全与防污染再思考[J].海运纵横,2010(10):38-39.  
Gu Lei, Zhang Shanjie. Rethinking of oil tanker operation safety and pollution prevention in China[J]. Maritime Review, 2010(10): 38-39.
- [3] 翟佳琦,王剑强,王雪滨.“桑吉”号爆燃沉没,处理不当或对海洋生态造成灾难性破坏[J].人生与伴侣:综合版,2018(2):4-7.  
Zhai Jiaqi, Wang Jianqiang, Wang Xuebin. Improper handling of “Sangji” sunk or catastrophic damage to marine ecosystem[J]. Life and Partner: A Comprehensive Edition, 2018(2): 4-7.
- [4] Lu Yingcheng, Li Xiang, Tian Qingjiu, et al. Progress in marine oil spill optical remote sensing: detected targets, spectral response characteristics, and theories[J]. Marine Geodesy, 2013, 36(3): 334-346.
- [5] Hodgins D O, Salvador S S, Tinis S E, et al. RADARSAT SAR for oil spill response[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1997, 3(4): 241-246.
- [6] Zheng Quanan, Yan Xiaohai, Liu W T, et al. Space shuttle observations of open ocean oil slicks[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(1): 49-56.
- [7] Brekke C, Solberg A H S. Oil spill detection by satellite remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(1): 1-13.
- [8] Keramitsoglou I, Cartalis C, Kiranoudis C T. Automatic identification of oil spills on satellite images[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(5): 640-652.
- [9] Garcia-Pineda O, Macdonald I, Hu Chuanmin, et al. Detection of floating oil anomalies from the deepwater horizon oil spill with synthetic aperture radar[J]. Oceanography, 2013, 26(2): 124-137.
- [10] Kepkay P E, Bugden J B C, Lee K, et al. Application of ultraviolet fluorescence spectroscopy to monitor oil-mineral aggregate formation[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2002, 8(1): 101-108.
- [11] 方西安,黄小仙,尹达一,等.海洋溢油模拟目标的紫外反射特性研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(3):738-742.  
Fang Xian, Huang Xiaoxian, Yin Dayi, et al. Research on the ultraviolet reflectivity characteristic of simulative targets of oil spill on the ocean[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 738-742.
- [12] 胡佳臣,王迪峰.基于遥感的海洋溢油监测方法[J].环境保护科学,2014,40(1):68-73.  
Hu Jiachen, Wang Difeng. Monitoring method of ocean oil spilling based on remote sensing[J]. Environmental Protection Science, 2014, 40(1): 68-73.
- [13] Asanuma I, Muneyama K, Sasaki Y, et al. Satellite thermal observation of oil slicks on the Persian Gulf[J]. Remote Sensing of Environment, 1986, 19(2): 171-186.
- [14] Cross A M. Monitoring marine oil pollution using AVHRR data: observations off the coast of Kuwait and Saudi Arabia during January 1991[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(4): 781-788.
- [15] Salisbury J W, DAria D M, Sabins F F Jr. Thermal infrared remote sensing of crude oil slicks[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 45(2): 225-231.
- [16] Tseng W Y, Chiu L S. AVHRR observations of Persian gulf oil spills[C]//Proceedings of IGARSS 94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena, CA, USA: IEEE, 1994.
- [17] Innman A, Easson G, Asper V L, et al. The effectiveness of using MODIS products to map sea surface oil[C]//Oceans 2010 MTS/IEEE Seattle. Seattle, WA, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [18] Leifer I, Lehr W J, Simecek-Beatty D, et al. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 185-209.
- [19] Lu Yingcheng, Zhan Wenfeng, Hu Chuanmin. Detecting and quantifying oil slick thickness by thermal remote sensing: A ground-based experiment[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 181: 207-217.
- [20] Giammona C P, Binkley K S, Engelhardt F R, et al. Aerial image processing technology for emergency response[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1995, 2(1): 47-54.
- [21] Sugioka S I, Kojima T, Nakata K, et al. A numerical simulation of an oil spill in Tokyo Bay[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1999, 5(1): 51-61.
- [22] Hu Chuanmin, Müller-Karger F E, Taylor C, et al. MODIS detects oil spills in Lake Maracaibo, Venezuela[J]. EOS, Transactions American Geophysical Union, 2013, 84(33): 313-319.
- [23] Hu Chuanmin, Li Xiaofeng, Pichel W G, et al. Detection of natural oil slicks in the NW Gulf of Mexico using MODIS imagery[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(1): L01604.
- [24] Chust G, Sagarminaga Y. The multi-angle view of MISR detects oil slicks under sun glitter conditions[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,

- 107(1/2): 232–239.
- [25] 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, 54(5): 678–685.
- [26] Lu Yingcheng, Tian Qingjiu, Wang Xinyuan, et al. Determining oil slick thickness using hyperspectral remote sensing in the Bohai Sea of China [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(1): 76–93.
- [27] Sun Shaojie, Hu Chuanmin, Lian Feng, et al. Oil slick morphology derived from AVIRIS measurements of the Deepwater Horizon oil spill: Implications for spatial resolution requirements of remote sensors [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 103(1/2): 276–285.
- [28] 陆应诚, 田庆久, 宋鹏飞, 等. 海面油膜高光谱遥感信息提取 [J]. *遥感学报*, 2009, 13(4): 686–695.  
Lu Yingcheng, Tian Qingjiu, Song Pengfei, et al. Study on extraction methods of offshore oil stick by hyperspectral remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 686–695.
- [29] 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 responses of offshore oil slick [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(24): 3937–3941.
- [30] 李颖, 刘丙新, 兰国新, 等. 有冰海区油膜光谱特征研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(4): 1018–1021.  
Li Ying, Liu Bingxin, Lan Xinguo, et al. Study on spectrum of oil film in ice-infested waters [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1018–1021.
- [31] 董士伟, 周子勇, 文百红. 基于 EMD 与神经网络的油膜高光谱数据特征提取 [J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(2): 221–226.  
Dong Shiwei, Zhou Ziyong, Wen Baihong. Feature extraction of offshore oil slick from hyperspectral data based on EMD and neural network [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(2): 221–226.
- [32] Plaza J, Pérez R, Plaza A, et al. Mapping oil spills on sea water using spectral mixture analysis of hyperspectral image data [C]// *Proceedings of SPIE 5995, Chemical and Biological Standoff Detection III*. Boston, MA, United States: SPIE, 2005: 79–86.
- [33] 陆应诚, 田庆久, 齐小平, 等. 海面甚薄油膜光谱响应研究与分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 986–989.  
Lu Yingcheng, Tian Qingjiu, Qi Xiaoping, et al. Spectral response analysis of offshore thin oil slicks [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 986–989.

## Oil spill detection and slick thickness measurement via UAV hyperspectral imaging

Ren Guangbo<sup>1</sup>, Guo Jie<sup>2</sup>, Ma Yi<sup>1</sup>, Luo Xudong<sup>3</sup>

(1. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China*; 2. *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China*; 3. *NBL Imaging System Ltd., Guangzhou 510070, China*)

**Abstract:** Oil spill is a common problem faced by marine countries, but there is still no reliable and practical method for oil slick accurate identification and quantity measurement via remote sensing technology. Based on the UAV hyperspectral imaging experiment, methods of oil spill detection and thickness estimation are studied. In the experiment, the UAV hyperspectral remote sensing and field spectral data of oil spill with different quantities are obtained in an oil spill experiment tank of large outdoor flume under the condition of simulating real marine environment. Then the feature spectral bands based oil spill detection and oil slick thickness estimation models are found. At last we get the following conclusions: (1) 675 nm and 699 nm are the effective characteristic bands of oil spill detection, however, they have no detection capability for the very thin oil slick (thickness  $\leq 5 \mu\text{m}$ ), (2) 3 kinds of oil slick thickness estimation models which are Normalized Difference Oil Spill Index (NDOSI) model, inverse proportion model and absorption line height model are proposed, in which the inverse ratio model is the only choice for thin and thick (thickness  $> 50 \mu\text{m}$ ) oil slick. For the medium thickness oil slick, the NDOSI model is the best choice, and the inverse scale model and the oil spill absorption baseline height model have better inversion ability, and in cloudy weather, the inverse scale model is the best.

**Key words:** oil spill detection; oil slick thickness estimation; UAV hyperspectral; oil spill remote sensing