

# 紫外诱导高光谱成像的海洋溢油及乳化探测方法

韩仲志<sup>1,2</sup> 万剑华<sup>1</sup> 刘永萍<sup>2</sup> 刘康炜<sup>1,3</sup> 刘杰<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>中国石油大学(华东)地球科学学院, 山东 青岛 266580

<sup>2</sup>青岛农业大学理学与信息科学学院, 山东 青岛 266109

<sup>3</sup>中国石化青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266071

**摘要** 针对夜间溢油探测问题,提出了一种通过紫外(UV)LED诱导并基于高光谱波段差辐射指数的探测方法。通过高光谱成像仪,同步采集了紫外LED和卤素灯两种照明方式下的原油、乳化油和本底海水的高光谱图像。基于33个波段(400~720 nm)辐射值构建了波段差指数作为溢油鉴别特征。特征优化方面,通过增L减R法、Fisher法进行了有效波长的选择,通过多维尺度分析、主成分分析(PCA)、独立分量分析进行了波段特征提取,通过径向基函数-支持向量机模型对结果进行识别。结果表明,基于紫外LED的高光谱波段差指数的溢油探测模式,比卤素灯的波段均值识别率分别提高了6.01%和8.17%,因此紫外LED光源更适合夜间溢油及乳化的准确探测。并且,通过Fisher有效波长选择和通过PCA得到的特征组合两种方法识别效果相当,优选的3波段特征的紫外识别率分别达到了85.89%和87.02%,12特征的溢油准确率均达到了100%,通过Fisher法提取的有效波长(400~420 nm),更适合于实际在线溢油探测。紫外诱导下高光谱的成像的海洋溢油鉴别模型,为夜间海洋溢油探测提供了一种快速鉴别方法。

**关键词** 光谱学; 海洋溢油; 高光谱成像; 波段差指数; 紫外诱导; 溢油乳化

中图分类号 TP75

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0130002

## Detection Method of Marine Oil Spilling and Emulsified Oil Based on Hyperspectral Imaging under UV Induction

Han Zhongzhi<sup>1,2</sup> Wan Jianhua<sup>1</sup> Liu Yongping<sup>2</sup> Liu Kangwei<sup>1,3</sup> Liu Jie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China

<sup>2</sup>Science and Information College, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China

<sup>3</sup>Sinopec Safety Engineering Institute, Qingdao, Shandong 266071, China

**Abstract** For the problem of oil spilling detection at night, a detection method based on band difference index of high spectral and ultraviolet(UV) LED induction is proposed. Through hyperspectral imaging collector, hyperspectral images of crude oil, emulsion oil and seawater obtained under UV LED and halogen lamp are collected synchronously. The band difference index is extracted based on radiation values of 33 bands (400~720 nm) to act as the identification feature of oil spilling. In the respect of feature optimization, effective wavelengths are chosen by methods of plus L reduce R and Fisher. The band features are extracted by multidimensional scaling, principal component analysis (PCA) and independent component analysis. An radial basis function support vector machine model is established to recognize the results. The results show that the band mean recognition rates of oil spilling detection method based on UV-LED and hyperspectral band difference index are higher than halogen lamps by 6.01% and 8.17%. Therefore, UV-LED light source is more suitable for accurate detection of oil spilling and emulsified oil testing at night. The optimized method by Fisher as an effective wavelength selection and through the PCA feature combination effect have almost same recognition rate. Recognition rates of 3 bands characteristics under UV light attain to 85.89% and 87.02%, while the accuracy of oil spilling reaches 100% by 12 characteristics. Effective

收稿日期: 2015-06-24; 收到修改稿日期: 2015-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(31201133)、青岛市民生科技计划(14-2-3-52-nsh)

作者简介: 韩仲志(1981—),男,博士研究生,副教授,主要从事高光谱探测方面的研究。E-mail: hanzhongzhi@qau.edu.cn

导师简介: 万剑华(1963—),男,博士,教授,主要从事数字海洋方面的研究。E-mail: wjh66310@163.com

\*通信联系人。E-mail: qdjieliu@126.com

wavelengths (400~420 nm) extracted by Fisher are more suitable for actual online oil spill detection. The model of the UV induced by hyperspectral imaging sea spilling identification built provides a rapid identification method for the sea oil spills detection at night.

**Key words** spectroscopy; marine oil spill; hyperspectral imaging; band differential index; UV induced; oil emulsion  
**OCIS codes** 330.5000; 100.3008; 280.4788

## 1 引 言

近年来海洋溢油事故频发,及时准确地对海洋溢油分析和鉴别,是一项复杂而具挑战性的工作。海洋溢油往往是突发事件,通过遥感手段进行海洋溢油的快速原位探测是快速响应的重要组成部分。现行的溢油鉴别标准<sup>[1]</sup>,多以相色谱/质谱分析为代表的实验室化学鉴别手段为代表,虽然能够对溢油进行精确解析,但是检测速度慢、代价高。并且传统的光学卫星遥感手段,在夜间模式下不能正常工作<sup>[2]</sup>。但溢油事故往往发生在夜间,在风浪和海洋破碎波的影响下还会发生乳化现象。

近几年来高光谱技术<sup>[3-4]</sup>成为溢油鉴别的新兴手段,受到普遍关注。具有代表性的是美国的MODIS在墨西哥湾溢油事件探测中发挥了积极作用<sup>[3-5]</sup>。Kessle等<sup>[6]</sup>提出夜间模式下油品在紫外激发下具有荧光现象,可根据这一特性进行溢油及乳化探测。实验室情况下,王春艳等<sup>[7]</sup>提出使用基于浓度参量同步荧光光谱技术,可以实现实验室不同溢油类型及不同油源原油的准确分类。尹晓楠<sup>[8]</sup>利用小波分析方法分析三维荧光光谱,并对油品种类进行识别研究,三维荧光技术也是现行水上溢油快速鉴别规程<sup>[9]</sup>的可选技术。然而本质上上述文献技术手段均不能做到现场、快速的原位探测。由于荧光很微弱,所以国内外<sup>[10-12]</sup>开展了激光诱导荧光的探测方法,可以同时实现面积和油种的探测。但是该仪器较重(200 kg),需要搭载海监的飞机,费用太高。目前光谱技术已成功应用于遥感探测、遥感图像的感兴趣区域(ROI)<sup>[13]</sup>、海洋浮游藻类荧光识别<sup>[14]</sup>、城市典型植被的分类<sup>[15]</sup>中。通过紫外LED阵列<sup>[16]</sup>和成像光谱探测技术<sup>[17]</sup>可搭建实用的探测装置。

考虑到油品的紫外荧光特性,并结合高光谱分析技术在溢油探测上的优势,本文使用大功率紫外LED作为诱导光源,通过高光谱成像技术,模拟溢油环境,在实验室环境下仿真获取了海洋溢油原油、乳化油和本底海水的高光谱图像。并提出了采用波段差指数构建识别特征库,通过有效的特征选择和提取方法进行特征组合优化,通过支持向量机(SVM)进行溢油的识别探测。以期获取一种能有效应用于夜间模式的溢油快速探测方法。

## 2 材料与方 法

### 2.1 研究思路

前人的研究中,通常只研究了白天可见光照明方式下的溢油检测问题,然而在夜间对溢油检测往往要加入辅助光源,考虑到油品的荧光特性,选用了两种光源:卤素灯和紫外(UV)灯。通常情况下,卤素灯主要应用于反射光谱的研究,紫外灯主要用来考察样本的荧光现象,研究中同时用这两种光源,以便考察光源对识别的贡献。

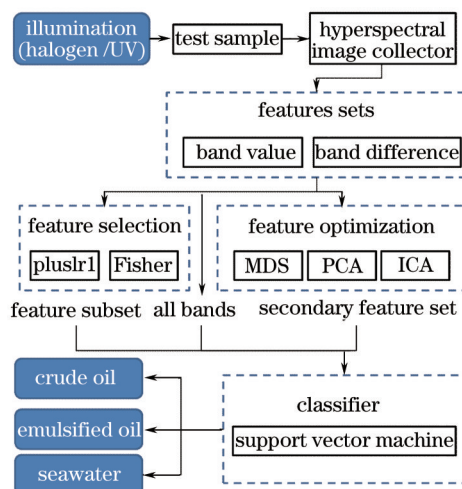


图1 溢油检测流程图

Fig.1 Flow chart of oil spilling detection

图1是溢油检测的流程图。在可见光和紫外光两种照明方式下,使用高光谱成像仪分别获取待检测样本的高光谱图像,并构建波段均值和波段差均值作为识别特征集,然后进行特征优化(包括特征选择和特征提取),特征选择方法包括增 $L$ 减 $R$ 法、Fisher法,特征提取方法包括多维度分析(MDS)、主成分分析(PCA)和独立分量分析(ICA)方法。基于SVM识别模型进行识别。识别时选用三种特征:全波段特征、经特征选择后的特征子集特征、经特征优化后的组合特征,识别的结果为溢油、乳化油和海水,采用识别率作为性能指标进行结果分析。

### 2.2 高光谱图像与软件

实验仪器为可见便携式高光谱成像仪,该成像仪主要由液晶可调式滤波器(LCTF)和一台电荷耦合器件(CCD)相机组成,谱段范围为400~720 nm,光谱带宽为10 nm,选用一台365 nm大功率LED紫外灯(美国陆阳LUYOR-3404台式紫外灯,样品处照度7000 lm),为比较可见光下效果同时选择了一台100 W卤素灯光源,单个样品获得的图像立方体为1392 pixel×1040 pixel×33,其中1392 pixel×1040 pixel为图像大小,共33个波段。图2为实验中使用的采集设备,高光谱图像的分析采用Matlab 2012b软件完成。

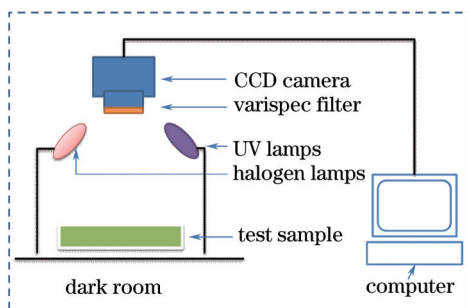


图2 图像采集设备图

Fig.2 Image collecting devices

### 2.3 样本采集

实验室共配置3种溢油样本,包括标准原油样本、乳化原油样本和本底海水样本。其中原油与乳化剂来源于山东胜利油田海上应急中心,海水样本取自青岛近海。实验时间是2015年2月10日,实验地点是中国科学院青岛光电研究所。

为模拟夜间海洋溢油情况,图像采集在暗室水槽中进行。在水槽中倒入一定量的海水,分别取一定量的原油油样和乳化油油样倾倒在海水面上,形成一定厚度的油膜,其中乳化原油是原油和乳化剂等比例混合搅匀得到。

图像采集时,分别打开卤素灯和紫外灯下采集样本的高光谱图像,得到每个样本1392 pixel×1040 pixel×33的高光谱图像数据块。原油、乳化原油和本底海水在卤素灯和紫外灯下分别采集高光谱图像6组。另外采集了油样在两种光源都开启下的2组高光谱数据,数据量大小共364 M。图3是采集到的原油、乳化油和海水在不同照明方式下三个波段的图像。

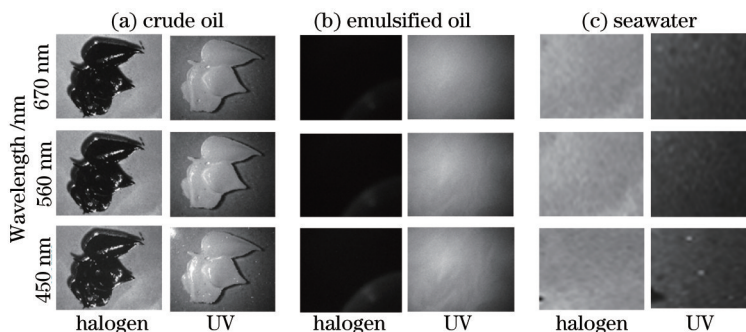


图3 溢油数据部分波段的图像

Fig.3 Subband Images of the oil spilling data

### 2.4 样本预处理

高光谱成像仪配套采集软件可根据图像整体亮度情况自动调整每个波长下的曝光时间,从而避免过饱

和欠饱和现象。为了使得采集光谱具有可比性,需要对采集时间进行归一化。需要指出,归一化会使得部分像素值过高或过低,超出0~255的范围,还需进一步调整,使其归一化到0~255之间。

为实现识别,需要构建一定数量的样本库,由于每个波段采集的图像像素比较大,为1392 pixel×1040 pixel,先将其横纵坐标平均分为8份,这样就将图像分成64 ROI,由于不同ROI代表不同区域的溢油情况,在溢油类型识别时,可将每个ROI作为溢油样本。图像预处理主要是对油样的有效光斑信息进行提取,并对ROI进行常规的辐射校正。

## 2.5 实验方法

从图像理解上,在卤素灯下,每个像素体现的是辐射亮度,对于紫外图像主要体现的是荧光亮度,图像量化以后可称为图像的像素灰度值。假设在第 $k$ 个波段,坐标点 $(x,y)$ 处像素的灰度值定义为 $I_k(x,y)$ 。那么对单个波段的辐射指数(RI)即平均灰度值为

$$R_{RI_k} = \sum_x \sum_y I_k(x,y) / (x \times y), \quad (1)$$

式中 $k=1,2,\dots,32$ 为32个波段。以此为基础,相邻两个波段的差定义为相邻波段差辐射指数(DRI),即

$$D_{DRI_k} = \sum_x \sum_y I_{k+1}(x,y) - I_k(x,y) / (x \times y), \quad (2)$$

式中 $k=1,2,\dots,32$ 为32个波段差,为了对特征数据有一个直观的印象,图4(a)是33个波段灰度均值盒图,图4(b)给出了32个波段差灰度均值的盒图。直观上可以看出某些波段具有更大的变异性。

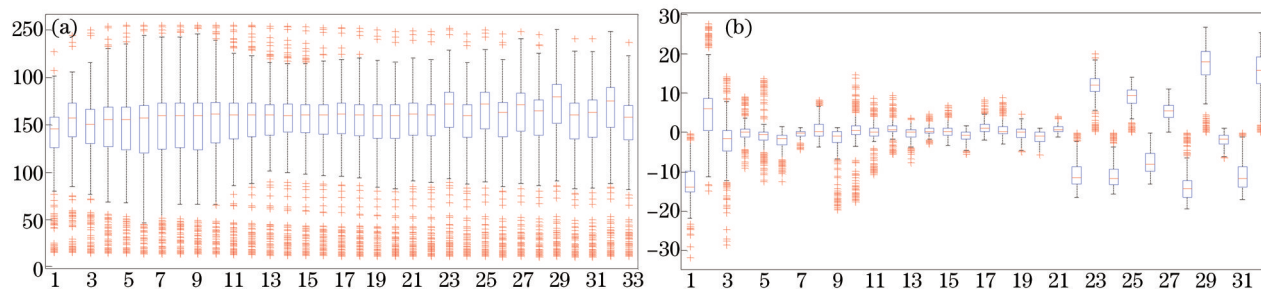


图4 波段均值与波段差均值的盒图。(a) 33个波段灰度均值盒图;(b) 32个灰度差均值的盒图

Fig.4 Box plot of band mean values and band different mean values. (a) Box plot of 33 band gray mean values; (b) box plot of 32 gray difference mean values

特征优化包括特征选择和特征提取两类方法,所谓特征选择就是从 $n$ 个度量值集合 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 中,按照某种选取规则选取分类有用的子集作为降维( $m$ 维, $m < n$ )的分类特征。从所有波段灰度值寻找若干个有效波段,来描述溢油的主要信息。选用两种方法来进行波段选择:增 $L$ 减 $R$ 法和Fisher选择法。增 $L$ 减 $R$ 法中 $L$ 和 $R$ 分别选4和1。

所谓的特征提取,就是使得特征集 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 通过某种变换产生 $m$ 个特征 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ , $m < n$ ,作为新的分类特征(或称为二次特征)。选用三种方法,分别是:PCA, MDS和ICA。

ICA<sup>[18]</sup>是一种基于数据高阶统计量(四阶统计量)的非高斯信号处理方法,用于特征的优化,可以从中找到最为独立的特征,这样就从一定程度上减少了数据之间的冗余,提高了数据的可分性。核独立分量分析(K-ICA)算法是在特征优化过程中利用了核函数的思想。

使用SVM作为分类器,SVM是Chang等<sup>[19]</sup>首先提出的,在解决小样本、非线性及高维模式识别中表现出许多特有的优势,并能够推广应用到函数拟合等其他机器学习问题中。SVM的关键在于核函数,因此选用径向基(RBF)核函数。低维空间向量集通常难以划分,解决的方法是将它们映射到高维空间。但这个办法带来的困难就是计算复杂度的增加,而核函数正好巧妙地解决了这个问题。

## 3 结果与分析

分别采用卤素灯和紫外灯模拟可见光光源和紫外光源两种照明方式,使用(1)式和(2)式提取的波段灰度均值和波段差均值作为识别特征,构建了SVM模型进行溢油识别,并比较分析了全波段、单波段特征和特征优化后特征的效果。



### 3.1 光源差异与特征差异分析

为对比不同照明方式对溢油识别的影响,表1分别比较了三种照明方式下识别的效果,其中两光源是紫外LED和卤素灯同时开启对溢油及乳化的识别效果,识别时采用五折交叉验证法和SVM模型,基于全波段的波段均值和波段差进行。

从识别结果上看,可见光的平均识别率为91.02%,紫外光下平均识别率为97.03%,两种光源同时打开其识别率略有提高,为97.32%。紫外光源较普通的卤素光源能使识别率提高6.01%,另外,两种光源都打开并没有显著提高识别率。这一结论可以说明在夜间进行溢油检测可以使用紫外灯光源作为溢油检测光源,可以大幅提高溢油检测的识别结果。

特征的选择对识别结果的影响较大,选用波段的均值和波段差作为识别特征库,采用波段均值平均识别率为91.04%,采用波段差平均识别率为99.21%,可以明显看出,波段差的识别能力更强,波段差特征比波段均值识别率提高了8.17%。

进行全波段识别时是综合采用33个波段进行识别,所有波段都使用,全波段简单平均识别率达到了95.12%,如表1所示,总体识别率较高。

表1 光源与特征集  
Table 1 Lights and feature sets

Illumination	Class	Dataset	Band energy	Band difference	Average
Halogen	3	calibration	97.39	100.0	91.02
		prediction	71.43	95.24	
UV	3	calibration	100.0	100.0	97.03
		prediction	88.10	100.0	
Tow lights	2	calibration	100.0	100.0	97.32
		prediction	89.29	100.0	
Average			91.04	99.21	95.12

### 3.2 基于全波段和单波段鉴别力分析

单波段识别是分别使用独立波段进行识别,每次只使用一个波段。单波段的识别结果如图5所示,可以看出部分波段识别率较高,其中紫外光的400、410、420、700 nm是识别率较高的波段,单波段识别率分别达到了平均76%以上,可见光下除了440 nm识别率均达到70%以上,其他波段的识别率均较低,绝大部分识别率33%左右,由于进行的是3类识别,说明仅靠单个波段不能准确识别,从单波长识别率来看,总体上可见光的单波段识别能力较强。

从图5单波段识别效果来看,紫外单波段具有比可见光单波段更强的识别能力,但从全波段识别效果来看,表1中紫外光的综合识别能力更强。

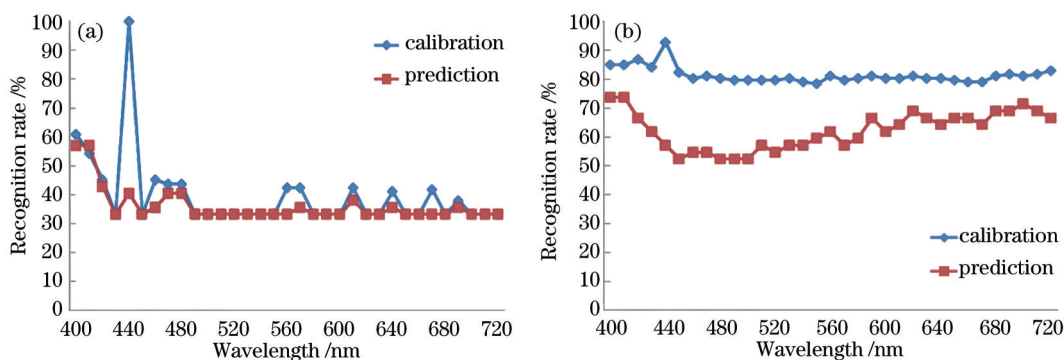


图5 单波段识别效果。(a) 卤素灯; (b) 紫外灯

Fig.5 Recognition results of single band. (a) Halogen lamp; (b) UV lamp

进行全波段识别需要依次采集各个波段的图像,当波段较多时需要耗费大量的时间,这对实时探测并不实用。单波段识别只拍摄一幅图像,速度快,但识别率较低。因此进行有效的波长选择与优化是必要的,

在全波段与单波段寻找理想的折中,用有限个特征进行识别是制造实时探测器的必要条件。

### 3.3 有效波长选择与特征组合

对有效波长进行选择是研制可在线检测实用器件的前提条件之一。分别采用增L减R法和Fisher两种方法进行有效波长选择,这里选择的3个波长,分别是两种方法在两个光照模式下得到的最优波长,并比较说明了两种方法的最优分类能力,之所以选择3个波长是因为通过三个波长较容易合成RGB伪彩色图像,有利于研制实用的在线检测器件。两种选择模型的平均识别率分别为80%左右,紫外光下Fisher探测方法使用三个波长识别率最高,达到了87%的正确识别率,选择的波长主要集中在400~420 nm波段。选择的波长如表3所示。

表2 三个有效波长选择结果

Table 2 Selection results of three effective wavelengths

Algorithm	Illumination	Accuracy rate /%	Selected bands /nm
Pluslr1	halogen	81.25	690 660 670
	UV	85.89	430 670 440
Fisher	halogen	66.06	400 410 420
	UV	87.02	410 400 420

图6是使用代表性的Fisher和PCA方法得到的波段贡献率,可以发现对识别贡献大的波段主要集中在400~420 nm左右,这与上述波长选择效果结论相符。

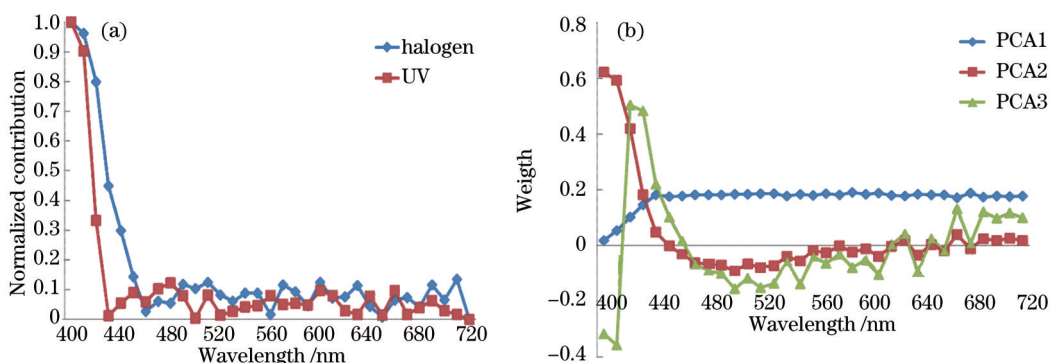


图6 Fisher和PCA法选择各波长的贡献率。(a) Fisher; (b) PCA

Fig.6 Rate of contribution to choose each wavelength of Fisher and PCA methods. (a) Fisher; (b) PCA

为了比较特征选择与特征提取两类特征优化方法,获得公平的比较效果,将特征数量定为12个,选择的方法为增L减R法、Fisher、MDS、PCA和K-ICA。统一使用基于网格寻优的RBF-SVM。特征选择是寻找最佳特征子集,使得到最佳子集有利于分类;特征提取本质上是一种变换,将原始特征变换到一个新的特征空间。从表3中可以看出,特征选择和特征提取方法中Fisher和PCA的效果最佳。

表3 12个特征波长选择与特征提取性能表

Table 3 Performance table of 12 characteristic wavelengths selection and characters extraction

Illumination	Feature set	Band selected		Feature extraction		
		Pluslr1	Fisher	MDS	PCA	K-ICA
Halogen	band energy	99.35	100.0	87.58	100.0	100.0
		85.71	83.33	54.76	90.48	38.10
	band difference	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		90.48	83.33	90.48	95.24	38.10
UV	band energy	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		97.62	97.62	95.24	97.62	40.48
	band difference	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		97.62	100.0	97.62	100.0	92.86

由表3特征选择和特征提取可知,两类最佳特征模型为基于紫外波段差的Fisher和PCA模型,在紫外波段差情况下12个特征的总体识别率均达到了100%。可有效应用于夜间溢油及其乳化的探测。

## 4 结 论

基于溢油的紫外荧光特性,提出了一种夜间溢油探测的组合模式。使用紫外诱导高光谱波段差特征可以进行有效的溢油识别,特征选择方面通过Fisher法为代表的特征选择方法优化得到了三个有效波长,与基于PCA为代表的特征提取方法相比,有效波长的选择方法更具有实际意义。通过有效波长可制作特定波长的滤波片,设计合适的光路,制作实用的光学器件,可快速应用于夜间溢油探测中。虽然此方法是基于高光谱成像ROI区域平均光谱进行的,但同样适用于小面积区域乃至单个像素的溢油探测中。目前研究只针对原油及乳化原油进行相关实验,进一步的研究可集中在乳化程度的精确探测上,对基于单像素的高光谱成像溢油及乳化区域的圈定及溢油乳化程度的精确分级将是下一步研究的方向。

## 参 考 文 献

- 1 National Standardization Technical Committee. Specifications for Identification System of Spilled Oils on the Sea GB/T 21247-2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.  
国家标准化技术委员会. 海面溢油鉴别系统规范 GB/T 21247-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- 2 Lu Y, Li X, Tian Q, *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.
- 2 M Cococcioni, L Corucci, A Masini, *et al.*. SVM: An ensemble of support vector machines for detecting oil spills from full resolution MODIS images[J]. *Ocean Dynamics*, 2012, 62(3): 449 - 467
- 4 Liu Bingxin, Zhang Zhida, Li Ying, *et al.*. Extraction method of oil spill information using airborne hyper-spectral remote sensing data [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2014, 40(1): 89-92.  
刘丙新, 张志达, 李 颖, 等. 基于机载高光谱遥感数据的溢油信息提取方法[J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(1): 89-92.
- 5 H Srivastava, T P Singh. Assessment and development of algorithms to detection of oil spills using MODIS data[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2010, 38(1): 161 - 167.
- 6 J D Kessler, D L Valentine, M C Redmond, *et al.*. A persistent oxygen anomaly reveals the fate of spilled methane in the deep Gulf of Mexico[J]. *Science*, 2011, 331(6015): 312-315.
- 7 Wang Chunyan, Shi Xiaofeng, Li Wendong, *et al.*. Concentration dependent synchronous fluorescence oil spill fingerprinting identification based on principal component analysis and support vector machine[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2014, 33(3): 289-295.  
王春艳, 史晓凤, 李文东, 等. 基于主成分和支持向量机浓度参量同步荧光光谱油种鉴别[J]. 分析测试学报, 2014, 33(3): 289-295.
- 8 Yin Xiaonan. Studies on the Identification of Oil Types Base on 3D Fluorescence Spectroscopy and Wavelet Analysis[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.  
尹晓楠. 基于三维荧光光谱和小波分析的油品种类识别技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- 9 Water Oil Spill Rapid Identification Procedure JT/T 862-2013[S]. Beijing: China Standard Press, 2013.  
水上溢油快速鉴别规程 JT/T 862-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- 10 M Lennon, S Babichenko, N Thomas, *et al.*. Detection and mapping of oil slicks in the sea by combined use of hyperspectral imagery and laser induced fluorescence[J]. *Earsel Eproceedings*, 2006, 5(1): 120-128.
- 11 M N Jha. Development of Laser Fluorosensor Data Processing System and GIS Tools for Oil Spill Response[D]. Calgary: University of Calgary, 2009.
- 12 Zhao Chaofang, Li Xiaolong, Ma Youjun. Multi-channel ocean fluorescence lidar system for oil spill monitoring[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1263-1269.  
赵朝方, 李晓龙, 马佑军. 多通道海洋荧光激光雷达溢油监测系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1263-1269.
- 13 Wu Zhenzhen, Yao Peng, Su Rongguo, *et al.*. Algae chemotaxonomy technology by fluorescence based on alternating trilinear decomposition analysis[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0515003.  
吴珍珍, 姚 鹏, 苏荣国, 等. 基于交替三线分解的浮游藻荧光识别分析技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0515003.
- 14 Lü Xinran, Chen Jie, Zhang Libao, *et al.*. Region of interest detection based on salient features clustering for remote sensing images[J].

- Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s110001.
- 吕欣然, 陈 洁, 张立保, 等. 基于显著特征聚类的遥感图像感兴趣区域检测[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s110001.
- 15 Fu Yuanyan, Zhao Yunsheng, Zhao Wenli, *et al.*. Studies of typical urban vegetation classification based on brightness temperature from multiple sources[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 072801.
- 浮媛媛, 赵云升, 赵文利, 等. 基于多源亮度温度的城市典型植被分类研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 7072801.
- 16 Wang Shaoshui, Sun Quanshe, Zhao Facai, *et al.*. Generation and application technology of modulated light based on ultraviolet LED array[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s114009.
- 王少水, 孙权社, 赵发财, 等. 基于紫外LED阵列的调制光产生及应用技术[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s114009.
- 17 Chen Jianpei, Xie Liheng, Ma Hongjian, *et al.*. Selectable imaging spectrum detection and system design[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 073007.
- 陈健沛, 谢立恒, 马鸿键, 等. 选择式成像光谱探测技术及系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 073007.
- 18 F R Bach, M I Jordan. Kernel independent component analysis[J]. The Journal of Machine Learning Research Archive, 2003, 3(3): 1-48.
- 19 C C Chang, C J Lin. LIBSVM: A library for support vector machines[J]. ACM TIST, 2011, 2(3): 27.

栏目编辑: 苏 岑