

# 基于小波分析的快照式高光谱海面溢油厚度分析

薛庆生<sup>1\*</sup>, 田中天<sup>1</sup>, 郝锡杰<sup>1</sup>, 关奉伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

<sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 针对海面溢油厚度的探测需求,通过模拟海面环境,采用快照式高光谱相机对不同厚度油膜的反射光谱进行分析;首先根据快照式高光谱相机获得的高光谱图像,计算得到了不同厚度油膜的反射光谱;然后采用小波变换对反射光谱进行分析,再利用 Coif5 小波基进行离散小波变换得到第 9 层重构信号的细节系数,用其反映油膜厚度的差异。油膜厚度和细节系数具有良好的线性关系,据此可准确识别大范围溢油事故中不同位置油膜的厚度。快照式高光谱探测方式极大地提高了溢油分析的效率,对溢油灾害的快速发现和实时监测具有参考价值。

**关键词** 光谱学; 快照式高光谱相机; 溢油探测; 小波分析; 细节系数

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1730001

## Snapshot Hyperspectral Analysis of Spilled Oil Thickness Based on Wavelet Analysis

Xue Qingsheng<sup>1\*</sup>, Tian Zhongtian<sup>1</sup>, Hao Xijie<sup>1</sup>, Guan Fengwei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Herein, the sea surface environment was simulated and a snapshot hyperspectral camera was used to detect the reflection spectra of spilled oil films with different thicknesses at the sea surface. First, based on hyperspectral images obtained using the snapshot hyperspectral camera, the reflection spectra of oil films were obtained. Hereafter, the wavelet transform was used for analysis, and the Coif5 wavelet base was used as the discrete wavelet transform to obtain the detail coefficient of the 9th layer reconstructed signal to determine the difference in oil film thickness. The oil film thickness and detail coefficient exhibited a good linear relationship, thus enabling accurate identification of the oil film thickness at different locations in a large-scale spilled oil accident. The snapshot hyperspectral detection method used herein significantly improves the spilled oil analysis efficiency and provides references for the rapid detection and real-time monitoring of spilled oil disasters.

**Key words** spectroscopy; snapshot hyperspectral camera; spilled oil detection; wavelet analysis; detail coefficient

**OCIS codes** 300.6550; 100.7410; 100.4145

## 1 引 言

海洋溢油事故严重危害着全球海洋的生态环境。基于可见光多/高光谱的遥感观测手段可以实现大范围海面溢油的快速准确监测<sup>[1]</sup>。在溢油事故中,对海面溢油范围和溢油量的估计尤为重要,海面溢油厚度的识别是溢油量估计的重要依据,只有探测出溢油的

油膜厚度分布,才能结合溢油面积估计溢油总量,从而采取不同的事故处理方式<sup>[2]</sup>。此外,对溢油扩散的实时监测也是溢油事故发生后的重要工作。

已有人利用传统的高光谱成像仪对海面溢油种类和厚度进行了光谱分析,如:2013年,刘丙新<sup>[3]</sup>提出了一种基于高光谱影像的用于提取油膜相对厚度的方法,并研究了利用 Hyperion 影像识别不同厚度

收稿日期: 2020-03-20; 修回日期: 2020-04-10; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: 吉林省科技发展计划(20190302083GX)、中国科学院海洋大科学研究中心重点部署项目(COMS2019J04)、国家重点研发计划(2016YFB0500300, 2016YFB0500301, 2016YFB0500302, 2016YFB0500303, 2016YFB0500304, 2018YFF01011003, 2019YFC1408300, 2019YFC1408301)、国家自然科学基金(41575023)、中国工程院咨询研究项目(2020-XZ-5)

\* E-mail: xueqingsheng@ouc.edu.cn

油膜的方法;2012年,李颖等<sup>[4]</sup>通过对不同厚度油膜的光谱进行小波分析,证实了小波分析在油膜光谱特征位置与变化研究中的积极作用;2019年,任广波等<sup>[5]</sup>通过对不同波段的反射率进行识别分析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的估算模型。

目前,大多数研究是基于油膜的单一光谱波段特征对高光谱油膜进行识别和分析的,光谱数据的利用效率低,舍弃了大量的原始信息。非成像光谱不能获取大范围溢油海域的“光谱-图像”数据,所获取的光谱只是某一固定点的信息,无法用来识别油膜厚度的不均匀性以及油膜在海面上的分布特性。对于传统的高光谱成像仪来说,若要获取完整的三维数据立方体,就需要一定的空间推扫或时间推扫,探测的实时性差,难以在第一时间发现溢油事故,且无法捕捉溢油扩散图像;同时,推扫高光谱相机搭载的平台对稳定性的要求极高,一旦平台的稳定性无法达到要求,就会导致拼接形成的高光谱图像分辨率下降<sup>[6]</sup>。此外,推扫获得的数据还需要进行复杂的处理,无法实现海面溢油的实时监测,亦无法实时观测海面溢油的变化趋势。

近几年发展起来的快照式光谱成像技术只需一次曝光就能得到目标所有的光谱信息和空间信息,是国内外高光谱领域的研究热点,在海面溢油研究方面具有重要意义。

快照式高光谱成像的实现方式可以分为计算层析光谱成像、编码孔径光谱成像、分光束光谱成像。计算层析光谱成像技术的分辨率高,但因解调过程中存在信息丢失,目前还未得到实际应用<sup>[7]</sup>;编码孔径成像光谱成像技术突破了空间分辨率和光谱分辨率的相互制约,但其系统结构较为复杂,对图像细节的恢复具有局限性,复原数据量极大<sup>[8]</sup>。分光束高光谱成像仪的结构简单,帧频高,体积小,目前应用得最为广泛。分光束光谱成像技术可以通过分孔径成像、分通道成像、像素级滤光片镀膜等实现方式<sup>[9]</sup>。像素级镀膜滤光片高光谱相机可以实现最佳的成像效果<sup>[10]</sup>,但其镀膜难度较大,目前只有美国、比利时、荷兰等发达国家掌握了该镀膜技术。

综上,利用快照式高光谱成像技术对溢油厚度进行探测和分析具有良好的实时性,有利于对突发溢油事故的即时探测和发现;快照式高光谱成像技术的高时间分辨率特性使其能对溢油随时间演化的性质进行追踪和连续观测,具有极高的实用价值和应用意义。目前,国内利用快照式高光谱成像技术对溢油高

光谱信号进行探测的相关研究还未见公开报道。

## 2 快照式高光谱成像实验

### 2.1 海洋溢油环境的模拟

针对上述研究需求,本研究团队针对不同厚度原油油膜的反射特性差异展开研究,在中国海洋大学精密光学实验室进行了一系列高光谱成像实验。为了分析不同厚度油膜的反射光谱差异,采用快照式高光谱成像仪对600~1000 nm光谱范围内不同厚度原油的高光谱图像进行采集,然后将所得数据除以室内或外场标准白板的光谱曲线数据,得到不同厚度油膜的反射率曲线。

为了在实验室内模拟海洋环境,将装满天然海水并在底部铺有海岸泥沙的蓝色塑料箱作为实验水槽,如图1所示。实验过程中采用氙灯照明,在实验水槽内插入若干亚克力管,在各亚克力管内加入不同质量的原油。每次加入原油前利用高精度电子秤称量胶头滴管的质量,将原油挤出后再次称量胶头滴管的质量,从而确定滴入各亚克力管内原油的准确质量。此外,应使原油在亚克力管内充分扩散,布满液面,从而准确计算管内的油膜厚度。分别采用大庆油田和胜利油田出产的原油样品进行实验。



图1 实验模拟的海洋环境以及不同厚度海面溢油油膜  
Fig. 1 Simulated marine environment and sea-surface spilled oil with different thicknesses

### 2.2 高光谱成像系统

采用IMEC公司生产的MOSAIC型25波段像素级镀膜近红外快照式高光谱成像仪对溢油进行探测,探测系统如图2(a)所示,成像仪的技术参数如表1所示。图2(b)为探测器像素级镀膜结构示意图,探测器的每 $5 \times 5$ 个像元为一个成像单位,每个像素单元上分别镀有一种带通滤光膜,每个成像单位共有25种滤光膜,形成了高光谱成像仪的25个光谱通道<sup>[11]</sup>。将探测器靶面所有成像单元上同一颜色的滤光膜所拍摄到的图像进行拼凑,即可获取该波段的单色图像,从而实现一次拍摄就可获取25

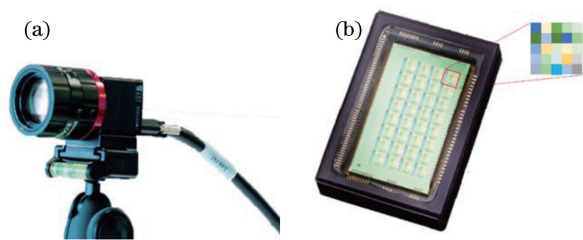


图 2 快照式高光谱系统。(a) MOSAIC 快照式高光谱成像仪；(b) 像素级镀膜探测器

Fig. 2 Snapshot hyperspectral system. (a) MOSAIC snapshot hyperspectral imager; (b) pixel-level coating detector

表 1 快照式高光谱成像仪的技术参数

Table 1 Specification of snapshot hyperspectral imager

Specification	Value
Detection band range /nm	600 to 1000
Spectral resolution /nm	< 15
Pixel size / $\mu\text{m}$	5.5
Resolution	2048 $\times$ 1536
Focal length /mm	27.5
Frame rate / (frame $\cdot$ s $^{-1}$ )	42
Dimension / (mm $\times$ mm $\times$ mm)	50 $\times$ 50 $\times$ 50
Weight /g	About 120

个波段的单色图片。MOSAIC 快照式高光谱成像仪结构简单, 体积小, 通过降低相机的空间分辨率

就可以实现空间信息和光谱信息的同时获取。

固定光源位置, 多次调整高光谱相机的方位角及俯仰角后采集反射光谱。对反射光谱进行分析后, 本文选取在 90°方位角、30°俯仰角、100 ms 积分时间下采集的大庆油田和胜利油田原油油膜反射率观测数据。因为在上述角度下, 氙灯光源发出的光经油膜表面反射后近似垂直入射进高光谱相机, 信号强度大, 能有效避免杂散光的干扰。在海面上进行实际探测时, 可以将探测平台以此角度对事发海域进行探测。

实验中采集的大庆原油的高光谱图像如图 3(a)所示, 可以直接选取相应厚度油膜上的点, 获得光谱曲线。实验中同时记录了高光谱相机暗电流强度和对应位置的白板反射率, 通过计算得到了不同厚度油膜的反射率曲线。选取厚度最薄的原油区域和海水区域绘制二者的反射率光谱图, 结果如图 3(b)所示, 可见, 溢油区域与海水区域的光谱具有明显差异, 探测信噪比较大。不同厚度大庆、胜利油田原油油膜的高光谱如图 3(c)、(d)所示, 可以看出, 在部分波段, 反射率和油膜厚度具有一定的相关性, 但规律性较差, 且探测器波段较少, 难以直接对比不同厚度油膜光谱的特征峰。可见, 仅根据反射率谱图还无法对油膜厚度进行分析和反演, 需要对原始光谱进行进一步处理。

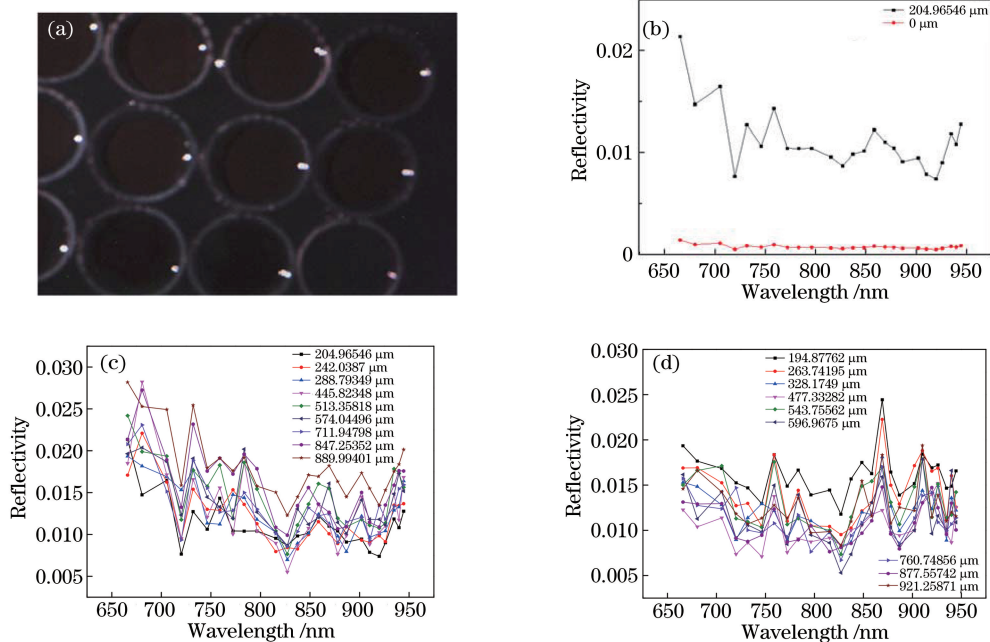


图 3 高光谱图像及各样品的反射率谱。(a) 快照式相机拍摄的高光谱图像；(b) 油膜反射率谱与海水反射率谱；

(c) 不同厚度大庆油田原油油膜的反射率谱；(d) 不同厚度胜利油田原油油膜的反射率谱

Fig. 3 Hyperspectral image and reflectivity spectrum of each sample. (a) Hyperspectral image from snapshot camera; (b) reflectivity spectra of oil film and seawater; (c) reflectivity spectra of crude oil film with different thicknesses of Daqing Oilfield; (d) reflectivity spectra of crude oil film with different thicknesses of Shengli Oilfield



### 3 利用小波分析识别油膜厚度

因滤光片阵列型高光谱成像仪的光谱通道数一般较少,光谱信号孤立,故难以从油膜的特征波长强度直接入手进行分析。离散小波变换是进行信号分析和处理的理想工具<sup>[12]</sup>,通过离散小波变换能够充分突出光谱信号特征,将信号分解成近似系数和细节系数两部分。通过选取合适的小波基,可以极大地减弱所提取的不同特征之间的相关性。离散小波变换是一种被广泛采用的进行信号处理和分析的方法<sup>[13]</sup>。

本文采取离散小波变换对不同厚度油膜的光谱信息进行分析。对反射光谱数据进行离散小波分析,将原始光谱信号分解为细节系数和近似系数。细节系数代表原始信号中的高频部分,是信号细节信息的反映。本文利用高频重构信号细节系数的差异来反映不同厚度油膜反射光谱特性的差异,区分

不同厚度的油膜信号。因实验中多次调整了相机的方位角和俯仰角,边缘侧的3组油膜在所选取的角度下未进入视场,故下文对其余9组油膜厚度数据进行小波分析。

首先导入不同厚度油膜的反射光谱数据。考虑到小波基的紧支性和正交性,选用 CoifN 小波基对整体数据进行离散小波变换,小波基的消失矩选取5。将原始信号进行分解,得到第1层信号的近似系数和细节系数,再对第1层信号的近似系数进行分解,得到第2层信号的近似系数和细节系数;以此类推,对原始反射光谱信号进行9层离散分解,得到第9层信号的近似系数与细节系数。

两种原油油膜的小波重构反射率谱图如图4所示,原始信号和重构信号的相关系数分别为0.9921和0.9969,重构效果较好。这说明原始信号在小波重构过程中光谱信号丢失较少,原始信号特征没有被改变。

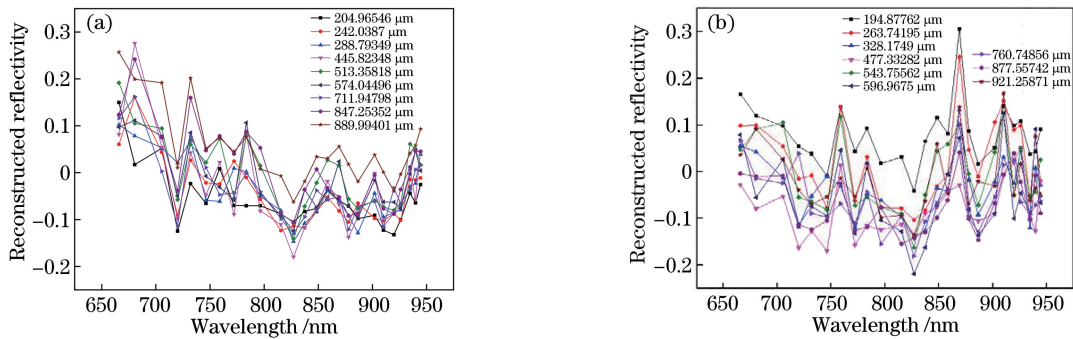


图4 不同厚度油膜的小波重构反射率谱图。(a)大庆油田原油油膜;(b)胜利油田原油油膜

Fig. 4 Wavelet reconstructed reflectivity spectra of oil film with different thicknesses. (a) Crude oil film of Daqing Oilfield; (b) crude oil film of Shengli Oilfield

提取大庆油田原油在离散小波变换过程中的第3~9层高频重构信号的细节系数,结果如图5所示。可以看出,几种厚度原油油膜的细节系数差异随层数增加而增大,利用第8层信号的细节系数基本可以区别出油膜厚度;在第9层信号的细节系数中,不同厚度油膜的反射率差异已经可以根据小波重构高频信号强度完全地分辨出来。

与上述信号处理过程类似,提取胜利油田原油油膜在离散小波变换过程中的第9层高频重构信号的细节系数,它同样可以分辨不同厚度油膜的信号差异,如图6所示。

将25个波段高频重构信号的细节系数分别提取出来,分析 Coif5 小波基第9层离散分解的细节系数随油膜厚度的变化。不同波段的油膜厚度-细节系数曲线均取得了良好的拟合结果,拟合系数均超过了

0.99,且不同波段之间的曲线形状基本一致。

两种原油油膜在各波段的高频重构信号的细节系数之和与油膜厚度的拟合曲线分别如图7(a)、(b)所示,拟合系数分别为0.99379和0.99887。可见,细节系数与厚度的线性关系较强,说明随着海面溢油油膜厚度增加,其反射光谱的小波重构细节系数呈线性增加的趋势。这一结果对海面溢油的可见光高光谱监测和分析具有参考价值。

最后,本文根据得到的小波变换细节系数-厚度定标直线,对拍摄到的高光谱图像进行溢油厚度的识别。在亚克力管内滴入加热熔融的原油,在原油未充分扩散前拍摄其高光谱图像,通过高光谱探测的优势识别每个位置的光谱,利用上述小波分析方法对光谱进行分析,得到亚克力管内各位置光谱的第9层小波变换细节系数之和,反演每个位置的溢



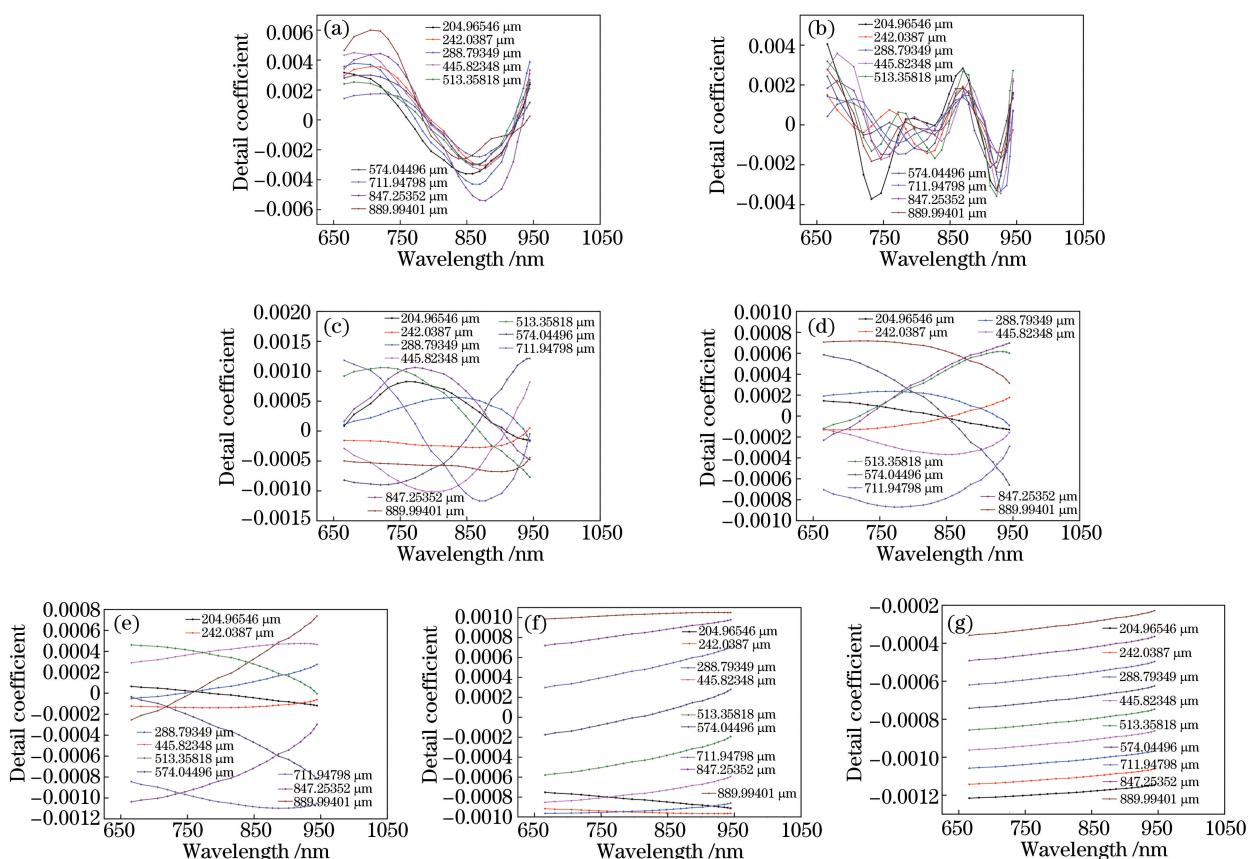


图 5 大庆油田原油油膜在离散小波变换过程中的高频重构信号的细节系数。(a)第 3 层高频重构信号的细节系数;(b)第 4 层高频重构信号的细节系数;(c)第 5 层高频重构信号的细节系数;(d)第 6 层高频重构信号的细节系数;(e)第 7 层高频重构信号的细节系数;(f)第 8 层高频重构信号的细节系数;(h)第 9 层高频重构信号的细节系数

Fig. 5 Detail coefficient of high-frequency reconstructed signal of crude oil film of Daqing Oilfield in discrete wavelet transform. (a) Detail coefficient of the third layer high-frequency reconstructed signal; (b)detail coefficient of the fourth layer high-frequency reconstructed signal; (c) detail coefficient of the fifth layer high-frequency reconstructed signal; (d) detail coefficient of the sixth layer high-frequency reconstructed signal; (e) detail coefficient of the seventh layer high-frequency reconstructed signal; (f) detail coefficient of the eighth layer high-frequency reconstructed signal; (g)detail coefficient of the ninth layer high-frequency reconstructed signal

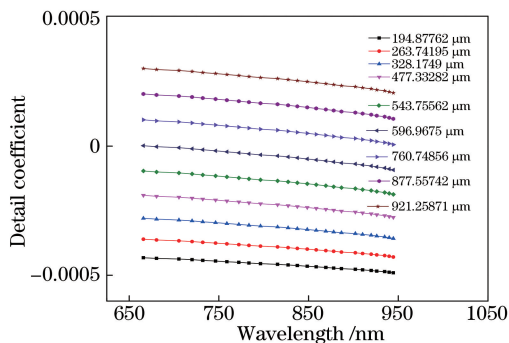


图 6 胜利油田原油油膜在离散小波变换过程中的第 9 层高频重构信号的细节系数

Fig. 6 Detail coefficient of the ninth layer high-frequency reconstructed signal of crude oil film of Shengli Oilfield in discrete wavelet transform

油厚度。假定  $1000\ \mu\text{m}$  厚度的油膜会对自然环境造成危害,将厚度超过  $1000\ \mu\text{m}$  的位置用白色标注,得到的溢油厚度分布图如图 8 所示。亚克力管

中心位置的白色标注部分为厚油膜位置,右侧白色标注位置是因亚克力管反光产生的亮斑。

综上,利用快照式高光谱可以准确识别溢油厚

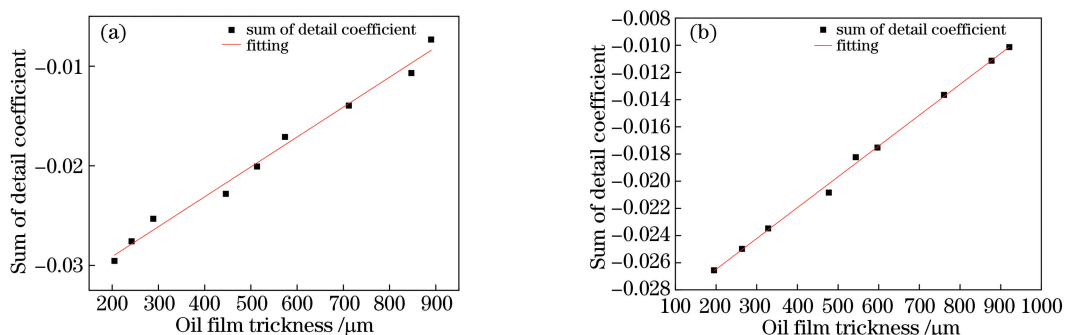


图 7 不同原油油膜各通道的细节系数之和随油膜厚度的变化曲线。(a)大庆油田原油油膜;(b)胜利油田原油油膜

Fig. 7 Variation of the sum of detail coefficients of each channel of different crude oil films.

(a) Crude oil film of Daqing Oilfield; (b) crude oil film of Shengli Oilfield

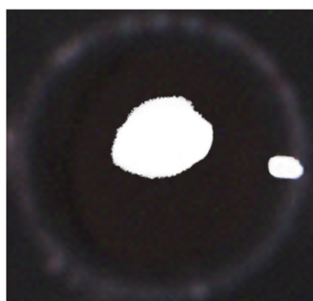


图 8 厚油膜的位置分布

Fig. 8 Thick oil film distribution

度的分布情况,从而估算溢油量,确定溢油事故的处理方式,体现了高光谱探测溢油的独特优势。

## 4 结 论

本文先在海面表面滴加不同质量的原油,用以模拟不同厚度的溢油油膜;然后利用快照式高光谱相机进行高光谱图像的采集,再通过小波分析提取不同厚度油膜的第 9 层高频重构信号的细节系数,利用不同厚度油膜反射信号的差异,建立了油膜厚度-细节系数回归曲线。实验采用的是快照式高光谱相机,无需扫描部件及高光谱数据处理,该相机的快照特性契合海面溢油的快速识别和监测需求。本文首次将小波变换处理方式和高光谱油膜厚度分析相结合,充分利用了各波段的海面溢油反射率光谱。本文的探测方法和数据处理方法快速准确,能在事故发生的第一时间对溢油进行准确探测和识别,并可根据采集到的高光谱数据快速分析油膜厚度,时效性高,具有一定应用价值,对海面溢油的厚度识别具有参考意义。

## 参 考 文 献

[1] Hu C M, Müller-Karger F E, Taylor C, et al. MODIS detects oil spills in Lake Maracaibo,

Venezuela [ J ]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2003, 84(33): 313-319.

[2] Chen Y N, Yang R F, Zhao N J, et al. Experimental study on quantitative detection of oil slick thickness based on laser-induced fluorescence[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(11): 3646-3652.

陈宇男, 杨瑞芳, 赵南京, 等. 基于激光诱导荧光的溢油厚度定量检测实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(11): 3646-3652.

[3] Liu B X. Extraction and analysis of oil film on water using hyperspectral characteristics [ D ]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013: 45-48.

刘丙新. 基于高光谱特征的水上油膜提取与分析研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013: 45-48.

[4] Li Y, Liu B X, Li B Y, et al. Analysis of spectral characteristics of oil film on water based on wavelet transform[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1923-1927.

李颖, 刘丙新, 李宝玉, 等. 基于小波变换的油膜光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1923-1927.

[5] Ren G B, Guo J, Ma Y, et al. Oil spill detection and slick thickness measurement via UAV hyperspectral imaging[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5): 146-158.

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.

[6] Hagen N A, Kudenov M W. Review of snapshot spectral imaging technologies [ J ]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 090901.

[7] Wang X Q, Huang Q M, Liao N F, et al. Image reconstruction for the computed-tomography imaging interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1600-1604.

王新全, 黄庆梅, 廖宁放, 等. 干涉型计算层析成像光谱仪的图像重建[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1600-1604.

- [8] Gehm M E, John R, Brady D J, et al. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J]. *Optics Express*, 2007, 15 (21): 14013-14027.
- [9] Li Y. Research on compact division-aperture snapshot spectral imaging system [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 37-39.  
李芸. 紧凑型分孔径快照式光谱成像系统研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2018: 37-39.
- [10] Interuniversity Microelectronics Centre. Hyperspectral snapshot mosaic imager [R]. Shanghai: Isuzu Optics Corporation, 2015.
- [11] Wang Y K, Han G C, Yao B, et al. The research on wide-field hyperspectral imaging technology with UAV [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(7): 876-880.  
王义坤, 韩贵丞, 姚波, 等. 面阵摆扫型无人机载大视场高光谱成像技术研究 [J]. *激光与红外*, 2019, 49(7): 876-880.
- [12] Meng X, Liu L, Jiang S, et al. Detection and revision of interference spectral signals based on wavelet transforms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (9): 0930007.  
孟鑫, 刘磊, 江升, 等. 基于小波变换的干涉光谱信号检测与校正方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0930007.
- [13] Caccamo M T, Magazù S. Variable mass pendulum behaviour processed by wavelet analysis [J]. *European Journal of Physics*, 2017, 38(1): 015804.