

doi: 10.3788/gzxb20144305.0530002

# 高光谱溢油检测中云背景抑制方法研究

刘德连, 李昭慧, 张建奇

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

**摘 要:**针对高光谱图像溢油检测过程中云背景的干扰问题,提出一种高光谱场景云背景抑制方法.首先,分析了海面溢油的光谱反射率特性,根据海面溢油中 C-H 键的光谱特征,介绍了基于伪彩图像的溢油检测方法.其次,比较了高光谱场景中海水、溢油和云背景的辐射特性,依据云背景辐射特性的特点,设计了一种新的云背景辐射光谱特征提取模型,在此基础上,进一步考虑云、海面与溢油的差异,选取云辐射最大的波段图像,结合云背景辐射光谱特征生成云背景抑制图.最后,将云背景抑制图与溢油伪彩图像相乘,得到云背景抑制结果.将本文提出的方法应用于实际墨西哥湾 Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer 高光谱遥感影像的海面溢油的检测,结果表明本文提出的方法能够在不影响溢油检测条件下,有效地消除高光谱溢油检测过程中云背景的影响.

**关键词:**遥感;光谱;海洋污染;溢油;云;云背景抑制;反射特性

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0530002-5

## Study of Cloud Background Suppression for Oil Spill Detection from Hyperspectral Data

LIU De-lian, LI ZHAO-hui, ZHANG Jian-qi

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Hyperspectral sensors can acquire the radiance of a scene in a high resolution both in spatial and spectral dimensions, which produces good benefits for oil spill detection. Because the cloud background in hyperspectral scene severely interfere oil spill detection result, a new method is presented to reduce the cloud background in hyperspectral scenes. Firstly, the spectral reflectance characteristics of oil spill are analyzed. According to the spectral characteristics of the C-H bond of oil spill, the false color generation based oil spill detection method is introduced. Secondly, the radiance characteristics of seawater, oil spill and cloud is compared. Based on the radiation characteristics of cloud, a new model is build to extract the radiance features of cloud. On this basis, the difference of cloud and seawater, and oil spill are considered. And the band image which has maximum cloud radiance is selected. The cloud background suppression map is then generated by using the band image and the radiance feature of the cloud background. Finally, the background suppression result is obtained by multiplying the false color image by background suppression map. The proposed method is applied to the real Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer hyperspectral image captured during the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico for oil spill detection. The results show that the proposed method can effectively suppress the cloud background for oil spill detection from hyperspectral data, and does not affect the oil spill detection performance.

**Key words:** Remote sensing; Spectroscopy; Marine pollution; Oil spills; Clouds; Cloud background suppression; Reflectance spectra

**OCIS Codes:** 300.6340; 100.2980; 110.4234; 280.4788

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61301290), 中央高校基本科研业务费(No. K5051305009)资助

第一作者: 刘德连(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为遥感图像处理、目标与环境光学特性等. Email: dliu@xidian.edu.cn

收稿日期: 2013-07-14; 录用日期: 2013-01-28

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

近年来海面溢油呈增加态势,溢油在海洋环境下与海水相互作用,生成许多有毒物质,造成浮游生物大量死亡,海底珊瑚退化,鱼类减少,给海洋农业、渔业和旅游业造成极大的危害,因此,研究快速有效的溢油检测方法具有重要的理论意义和实用价值<sup>[1]</sup>.现阶段,海面溢油的检测手段主要有可见光,红外,合成孔径雷达,激光雷达和高光谱<sup>[2-3]</sup>.其中高光谱具有较高的空间分辨率和光谱分辨率,能够区分溢油的种类,确定溢油发生的时间等方面的优点,受到国内外的高度关注<sup>[4-5]</sup>.由于利用高光谱图像进行溢油检测只是近年来兴起的方法,相关研究还不完善,许多工作仍处于探索阶段.2004年,在法国海军主导下,开展了 CEPPOL (Commission d'Etudes Pratiques de lutte anti Pollution)项目,利用 CASI-2 (Compact Airborne Spectrographic Imager-2)高光谱成像仪估计溢油的溢出量,取得了较好的结果<sup>[6]</sup>.2005年,美国乔治梅森大学的 Slam 等人提出一种利用光谱投影图结合人工辅助的溢油检测方法<sup>[7]</sup>.近来,美国南佛罗里达大学的 Hu 等人提出一种利用中分辨率成像光谱影像结合合成孔径雷达图像的溢油检测方法,通过人工辅助统计溢油与海水的反射率光谱差异,检测溢油<sup>[8]</sup>.2010年,英国石油公司位于墨西哥湾的钻井平台发生泄漏,造成重大溢油事故.随后,美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration)下属的 AVIRIS (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer)项目组拍摄了大量的高光谱数据,并开展了卓有成效的工作,为后续的索赔工作做出了巨大贡献.他们提出了一种快速高效的溢油检测方法,通过提取溢油的光谱特征,生成伪彩合成图,进而利用人工判读检测溢油,但是,该方法会受到场景中云的干扰<sup>[9-10]</sup>.国内,近年来在这方面也开展了基础性的研究工作<sup>[11-12]</sup>.针对文献[9]中溢油检测算法受云背景干扰的问题,本文提出一种新的溢油检测方法,首先,依据云背景辐射特性的特点,设计了一种新的云背景辐射光谱特征提取模型.其次,考虑云背景与海面,云背景与溢油的差异,选取云辐射最大的波段图像,结合云背景辐射光谱特征生成云背景抑制图.最后,将云背景抑制图与溢油伪彩图像相乘,得到云背景抑制结果.将本文提出的方法应用于实际墨西哥湾 AVIRIS 高光谱遥感影像的海面溢油的检测,结果表明本文提出的方法能够在不影响溢油检测条件下,有效地消除高光谱溢油检测过程中云背景的影响.

## 1 海面溢油的伪彩图像检测方法

高光谱遥感具有很高的空间和光谱分辨能力,能够获取地物的光谱反射特性<sup>[13]</sup>,不同的地物具有不同

的反射特性,因此,可利用反射特性识别不同的地物类型<sup>[14-15]</sup>.

海洋石油是由古代的生物遗体经过数亿年的地质变化,通过一系列复杂的生物和化学作用转化而成.其主要成分是碳元素、氢元素和氧元素,其中的有机成分主要是烃类和烷类,是一种碳氢化合物,其中的 C-H 键在 1.2  $\mu\text{m}$ , 1.73  $\mu\text{m}$  和 2.3  $\mu\text{m}$  波段范围内具有明显的吸收带特征.因此,文献[9]中利用 C-H 键的这些吸收带特征提出一种溢油伪彩图像生成方法.海面溢油的反射率光谱如图 1 所示.

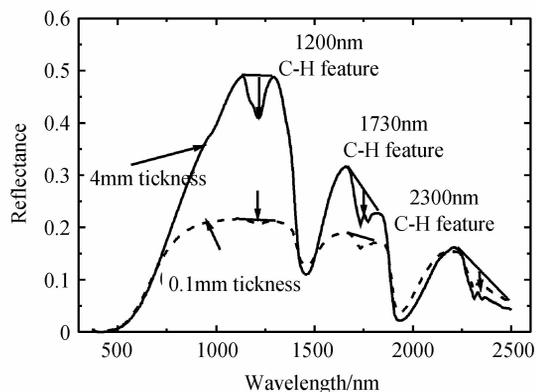


图 1 溢油的反射率光谱

Fig. 1 Reflectance spectrum of oil spill

图 1 是溢油发生后, AVIRIS 项目组于溢油海域现场采集的溢油样本,在实验室条件下测试的溢油反射率光谱.其中实线表示 4 mm 厚度的溢油,虚线表示 0.1 mm 厚度的溢油,从图 1 中可以看出,溢油的主要反射率特征位于 1.2  $\mu\text{m}$  处,此处具有明显的吸收带特征,其次是 1.73  $\mu\text{m}$  处,此外,在 2.3  $\mu\text{m}$  处也明显的吸收带特征.基于以上溢油光谱反射率特征,文献[9]中提出一种基于伪彩图像的溢油检测方法,定义归一化差异比为

$$ND_1(i, j) = (Ra_1 - Rb_1) / (Ra_1 + Rb_1) \quad (1)$$

$$ND_2(i, j) = (Ra_2 - Rb_2) / (Ra_2 + Rb_2) \quad (2)$$

$$ND_3(i, j) = (Ra_3 - Rb_3) / (Ra_3 + Rb_3) \quad (3)$$

式中,  $i, j$  表示空间位置,  $Ra_1, Rb_1, Ra_2, Rb_2, Ra_3, Rb_3$  的取值为相邻三个波段内辐射值的平均,相应的波段取值见文献[9].

然后,将计算得到的  $ND_1, ND_2$  和  $ND_3$  线性拉伸,量化到 0~255 之间.最后,将量化后的值分别赋值给可见光图像的红色、绿色和蓝色通道,便得到了溢油的伪彩合成图像.

## 2 云背景抑制方法

从以上介绍的基于伪彩合成的海面溢油检测方法中可以看出,该方法仅仅利用溢油光谱的归一化差异比进行溢油检测.由于大气效应的影响,降低了溢油光谱特征与云背景光谱特征的差异,而云背景在上述的

三个提取波段中也具有类似的特征, 使得文献[9]中的算法, 很容易受到高光谱场景中云背景的影响. 通常情况下, 遥感场景中都会受到云层的干扰, 云层的出现严重干扰了溢油信息的读取. 为此, 本文提出一种云背景抑制方法, 抑制高光谱图像溢油检测中云层的影响.

在高光谱图像的海面溢油场景中主要有溢油、海水和云, 其中海水占据场景中较大的部分, 云在有些场景中也会大量出现. 图 2 是 AVIRIS 高光谱遥感器拍摄获得的海水、溢油和云的辐射光谱.

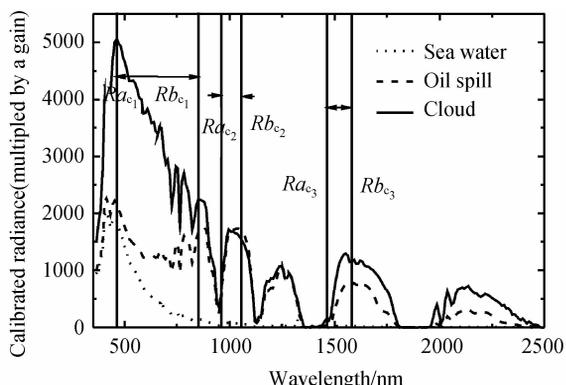


图 2 海水、溢油和云的辐射光谱

Fig. 2 Radiance spectrum of seawater, oil spill, and cloud

图 2 是人工提取的高光谱图像中的海水、溢油和云的辐射光谱. 从图中可以看出, 溢油和云的辐射光谱整体上高于海水的辐射光谱, 云的辐射光谱在  $1.0 \mu\text{m}$  之前明显高于溢油的光谱, 在  $1.0 \mu\text{m}$  至  $1.5 \mu\text{m}$  之间辐射光谱与溢油光谱相差不大, 在  $1.5 \mu\text{m}$  之后云的辐射光谱高于溢油光谱.

为了消除场景中云背景的影响, 需要根据云背景的光谱特征, 抑制场景中的云背景. 结合上一部分溢油的光谱特征和云的辐射特征, 本文提出一种新的云背景光谱特征的提取模型.

$$RF_{c_1}(i, j) = (Ra_{c_1} - Rb_{c_1})Ra_{c_1} \quad (4)$$

$$RF_{c_1}(i, j) = (Rb_{c_1} - Ra_{c_1})Rb_{c_1} \quad (5)$$

$$RF_{c_1}(i, j) = (Rb_{c_1} - Ra_{c_1})Rb_{c_1} \quad (6)$$

式中  $Ra_{c_1}$ ,  $Rb_{c_1}$ ,  $Ra_{c_2}$ ,  $Rb_{c_2}$ ,  $Ra_{c_3}$ ,  $Rb_{c_3}$  的取值为相邻三个波段内辐射值的平均, 相应的波段取值如表 1.

表 1 波段取值  
Table 1 Selected bands

Variable	AVIRIS channels	AVIRIS channels center wavelengths/nm
$Ra_{c_1}$	11, 12, 13	462, 472, 482
$Rb_{c_1}$	53, 54, 55	850, 860, 870
$Ra_{c_2}$	75, 76, 77	1 063, 1 072, 1 082
$Rb_{c_2}$	67, 68, 69	986, 995, 1005
$Ra_{c_3}$	117, 118, 119	1 453, 1 463, 1 473
$Rb_{c_3}$	134, 135, 136	1 622, 1 632, 1 642

以上提取了云背景光谱在三个波段的光谱特征, 这三个波段的光谱特征之间相互独立. 因此, 总的光谱

特征可以表示为

$$RF_s = \sqrt{RF_{c_1}^2 + RF_{c_2}^2 + RF_{c_3}^2} \quad (7)$$

为了进一步提取场景中云背景的信息, 分别用云背景的辐射光谱减去海水的辐射光谱, 结果如图 3.

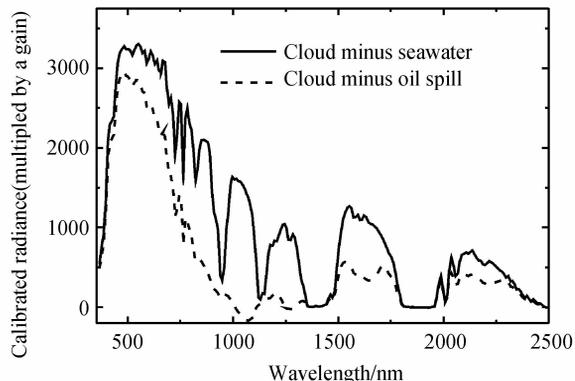


图 3 海水、溢油辐射光谱与云辐射光谱的差

Fig. 3 Difference radiance spectrum of cloud and seawater, cloud and oil spill

从图 3 中可以看出, 云背景在  $0.5 \mu\text{m}$  处的辐射与海水和溢油的差异最大. 因此, 选取该波段处的图像, 进一步增加云背景提取效果.

$$DF(i, j) = I(i, j, 10) \quad (8)$$

对于 AVIRIS 高光谱图像,  $0.5 \mu\text{m}$  处对应的波段索引值为 10.

分别对式(7)和式(8)的结果进行归一化处理, 即

$$RF_n(i, j) = \frac{RF_s(i, j) - RF_{smin}}{RF_{smax} - RF_{smin}} \quad (9)$$

$$DF_n(i, j) = \frac{DF(i, j) - DF_{min}}{DF_{max} - DF_{min}} \quad (10)$$

式中,  $RF_{smax}$  和  $RF_{smin}$  是  $RF_s(i, j)$  中的最大值和最小值,  $DF_{max}$  和  $DF_{min}$  是  $DF(i, j)$  中的最大值和最小值.

则云背景的光谱特征融合辐射特征的提取结果为

$$CF_n(i, j) = \sqrt{RF_n(i, j) + DF_n(i, j)} \quad (11)$$

为了抑制高光谱场景中的云背景, 而不影响场景中溢油结果, 计算纯海水像素的  $CF_n$  的平均值, 修正式(11)的值为

$$CF_s(i, j) = \begin{cases} 1 & CF_n(i, j) \geq CF_m \\ \frac{CF_n(i, j) - CF_{nmin}}{CF_m - CF_{nmin}} & CF_n(i, j) < CF_m \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $CF_{nmin}$  为  $CF_n(i, j)$  的最小值,  $CF_m$  为纯海水背景所计算得到  $CF_n$  的平均值.

为了计算上式, 需要分割提取纯海水背景, 海水的辐射光谱在  $0.8 \mu\text{m}$  至  $2.5 \mu\text{m}$  之间相对较小. 因此, 利用海水的这一特性, 分割提取海水背景. 计算该波段范围内所有像素点的光谱反射率的平均值, 采用简单的阈值分割方法即可得到海水区域. 对于 AVIRIS 图像, 本文的阈值取 100, 溢油和云的辐射值在这一波段范围内的平均值都远远高于该值, 因此可保证分割得到

的像素为海水像素。

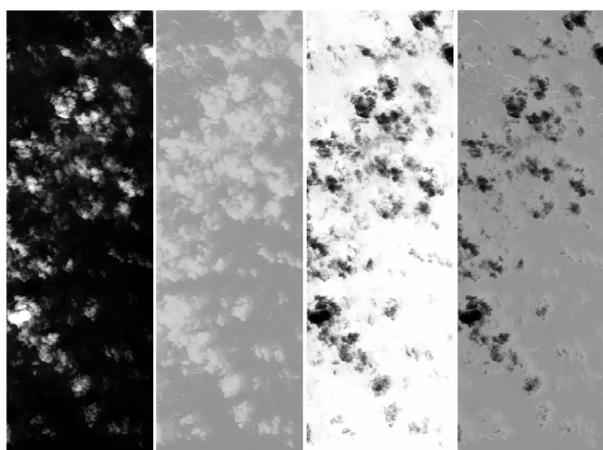
最终的云背景抑制图为

$$CF(i, j) = CF_3^3(i, j) \quad (13)$$

将第一部分得到的高光谱溢油伪彩合成图中的红、绿和蓝波段,分别乘以式(13),便得到了高光谱溢油伪彩合成图的云背景抑制结果。

### 3 实验结果和讨论

将本文提出的方法应用于实际的高光谱图像溢油检测中云背景的抑制,所采用的测试图像是2010年美国墨西哥湾原油泄漏过程中,AVIRIS项目组拍摄获取的高光谱图像(场景1),该图像拍摄于2010年5月18日。实验结果如图4。



(a) Hyperspectral scene 1; (b) Oil spill detection result in Ref.[9]; (c) Cloud suppression map; (d) Detection result after cloud suppression

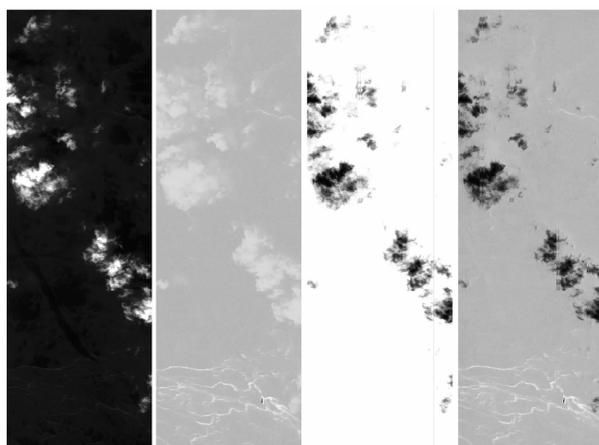
图4 场景1海面溢油检测结果

Fig.4 Result of oil spill detection of scene 1

图4(a)是高光谱场景的伪彩合成图,分别由其中的第5、第15和第38波段的图像作为蓝、绿和红色的合成图。从中可以看出,场景中云背景占据了较大的部分,其中的溢油并不明显。利用文献[9]中的伪彩图像合成法结果如图4(b),场景中的溢油位于场景的上部,场景中的溢油得到了一定的增强,但是其中的云背景对溢油的检测构成了严重的干扰。利用本文提出的云背景抑制方法,生成的云背景抑制图如图4(c),图中越亮的部分表示抑制越小,越暗的部分抑制越大。从中可以看出,本文给出的方法,对应于场景中的云,抑制都很大,而其中的溢油和海水部分抑制很小。最终的云抑制结果如图4(d),从中可以看出,云背景基本被抑制,其中的溢油部分并没有受到多少影响。

此外,还选取了另外一个架次的高光谱图像(场景2)进行试验,结果如图5。

图5(a)是高光谱场景的伪彩合成图。图5(b)为利用文献[9]中的伪彩图像合成法结果,场景中的溢油比上一幅更多,位于场景的下部,场景中的云背景也较



(a) Hyperspectral scene 2; (b) Oil spill detection result in Ref.[9]; (c) Cloud suppression map; (d) Detection result after cloud suppression

图5 场景2海面溢油检测结果

Fig.5 Result of oil spill detection of scene 2

多,对溢油的检测构成了严重的干扰。利用本文提出的云背景抑制方法,生成的云背景抑制图如图5(c)所示,最终的云抑制结果如图5(d)所示。从中可以看出,云背景基本被抑制,其中的溢油部分几乎没有受到影响。从这一结果可以看出,本文提出的方法,有效结合了云背景、海水和溢油辐射光谱特征,在不影响溢油检测的条件下,有效抑制海面溢油检测中云背景的影响。

### 4 结论

针对高光谱图像溢油检测过程中云背景的干扰问题,提出一种高光谱场景云背景抑制方法。首先,介绍了基于伪彩图像的溢油检测方法。其次,依据云背景辐射特性的特点,设计了一种新的云背景辐射光谱特征提取模型,并进一步考虑云背景与海面,云背景与溢油的差异,选取云辐射最大的波段图像,结合云背景辐射光谱特征生成云背景抑制图。将本文提出的方法应用于实际墨西哥湾 AVIRIS 高光谱遥感影像的海面溢油的检测,结果表明本文提出的方法能够在不影响溢油检测条件下,有效地消除高光谱溢油检测过程中云背景的影响。本文提出的云背景抑制方法充分利用了高光谱场景中云背景的物理特性,除应用于海面溢油检测的云背景抑制外,还可以用于其他需要抑制云背景的高光谱应用中。

#### 参考文献

- [1] BREKKEA C, SOLBERG A H S. Oil spill detection by satellite remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **95**(1):1-13.
- [2] SOLBERG A H S, STORVIK G, SOLBERG R *et al.* Automatic detection of oil spills in ERS SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(4): 1916-1924.
- [3] SHENS S, LEWIS P E. Deepwater horizon oil spill monitoring using airborne multispectral infrared imagery [C]. SPIE, 2011, **8048**: 80480H-1.

- [4] 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**(9): 185-209.
- [5] JHA M N, LEVY J, CAO Y. Advances in remote sensing for oil spill disaster management: state-of-the-art sensors technology for oil spill surveillance[J]. *Sensor*, 2008, **8**(1): 236-255.
- [6] LENNON M, BABICHENKO S, THOMAS N, *et al.* Detection and mapping of oil slicks in the sea by combined use of hyperspectral imagery and laser-induced fluorescence[C]. *EARSLe Proceedings*, 2006, **5**(1): 120-128.
- [7] SALEM F, KAFATOS M, EL-GHAZAWI T, *et al.* Hyperspectral image assessment of oil-contaminated wetland [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**(4): 811-821.
- [8] HU C, LI X, 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.
- [9] KOKALY R F, HOEFEN T M, LIVO K E, *et al.* A rapid method for creating qualitative images indicative of thick oil emulsion on the ocean's surface from imaging spectrometer data [R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2010-1107, 2010:1-9.
- [10] CLARK R N, SWAYZE G A, LEIFER I, *et al.* A method for qualitative mapping of thick oil spills using imaging spectroscopy[R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2010-1101, 2010: 1-4.
- [11] LI Ying, LIU Bing-xin, LI Bao-yu, *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.
- [12] LU Ying-cheng, TIAN Qing-jiu, QI Xiao-ping, *et al.* Spectral response analysis of offshore thin oil slicks [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(4): 986-989.  
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.
- [13] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感的多学科应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [14] HUANG Min, ZHU Xiao, ZHU Qi-bing, *et al.* Morphological characteristics of maize seed extraction and identification based on the hyperspectral image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 868-873.  
黄敏, 朱晓, 朱启兵, 等. 基于高光谱图像的玉米种子特征提取与识别[J]. *光子学报*, 2012, **41**(7):868-873.
- [15] WANG Yue-ming, ZHU Qian, WANG Jian-yu *et al.* Characterization of background radiation in SWIR hyperspectral imager[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, **30**(3): 279-283.  
王跃明, 祝倩, 王建宇, 等. 短波红外高光谱成像仪背景辐射特征研究. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(3):279-283.