

# 比较研究目标探测算法在地质小目标探测上的性能

魏欣欣, 燕守勋

(中国科学院遥感应用研究所高光谱实验室, 北京 100101)

**摘要:**受图像分辨率的影响,一些蚀变矿物信息在遥感影像上以亚像元的形式存在,在整个场景中为低概率存在目标,需要从蚀变矿物与背景物的光谱差异上来寻找目标物。将目标算法用于探测地质小目标——蚀变矿物。通过比较各种目标探测算法对试验区内绢云母的探测效果,初步评估和优选适合于探测地质小目标的目标探测算法。

**关 键 词:**目标探测;蚀变信息;ROC;信杂比

**中图分类号:**TP 79      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-0323(2010)01-0077-07

## 1 引 言

围岩蚀变是重要的找矿标志。如何从遥感图像中提取出蚀变信息一直是矿产资源遥感应用与评价研究的重点<sup>[1]</sup>。当感兴趣的目标只出现在少数像元与亚像元中,其形态和结构等空间特性都不能进行图像上直接确定,对于这类目标不能进行基于空间特征的数据处理,而是要通过目标与背景之间存在的光谱特征差异来探测。

目标探测技术是寻找图像中有一定形态特征或光谱特性的少数目标<sup>[2]</sup>。不同植被类型覆盖背景下低概率出露蚀变岩及其相关地质体的野外发现困难,以往的基于空间特性统计的方法不能满足对这类目标的遥感探测。基于光谱特性的目标探测技术在探测地质小目标上具有应用潜力。本文所研究的蚀变目标主要是低概率目标和亚像元级目标,是在植被覆盖下的低出露的蚀变围岩,被其它地物所遮挡,仅有少量表面暴露。

本文首先介绍目标探测算法的分类,然后针对陕西秦岭镇安丁马金矿区一带的 HYPERION 影像,利用相应的目标探测算法进行矿物探测,从而对各种探测算法进行评估和优选。

## 2 目标探测技术

高光谱面向特定感兴趣低概率出露目标的应用主要为:异常探测和目标识别<sup>[3]</sup>。异常探测:从一景盲图像中定位和识别预先不知、但是感兴趣的低概率目标。目标识别:根据图像的先验知识,从图像中提取的目标端元光谱或者从光谱库中获得的光谱数据进行目标的准确识别。两者都属于目标探测,就是寻找图像中有一定光谱特征的少数像元,回答目标对于像元是“有”还是“无”的问题。

### 2.1 目标探测算法

根据对目标信息的了解情况可以将目标探测算法分为 3 类<sup>[4]</sup>:监督亚像元探测、非监督亚像元探测、自动亚像元探测,如图 1 所示。

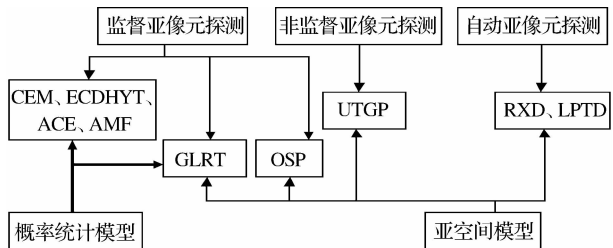


图 1 目标探测算法的分类

Fig. 1 The classification of target detection algorithms

监督亚像元探测需要已知欲探测目标物的信息,包括要探测的目标物的光谱信息或者丰度信息,例如:只需要已知目标物光谱信息的算法:ACE(自适应一致光谱角估计器)、AMF(自适应一致匹配滤波器)、CEM(约束最小能量算子)、ECDHYT(基于双曲线门限的椭圆轮廓背景的探测器);同时需要知道目标物和背景物光谱信息的算法:OSP(正交亚空间投影探测)、GLRT(无显著特性的似然比探测)。非监督亚像元探测不需要已知目标物信息,该算法直接从图像中提取所需要的目标物信息,这样的信息被称为后验目标物信息,例如:UTGP(非监督目标生成处理)。自动亚像元探测不需要任何目标物信息,直接从图像中探测异常信息,例如 RXD(异常探测算法)、LPD(低概率探测算法)。

根据建立算法所采用的数学模型,目标探测算法可以分为:基于概率统计模型的探测算法和基于亚空间模型的探测算法。基于同一种模型建立的算法之间存在一定的相关性。ACE、AMF 是基于似然比法则的算法<sup>[5]</sup>,ACE 是对白化空间中目标向量与样本像元光谱角度度量;AMF 则是两者在白化空间中距离的度量,CEM 是基于 fisher 判别准则的算法<sup>[5]</sup>,能够突出目标物,压制背景信息干扰;前面的算法都是假设场景满足高斯分布时建立的,ECD 基于椭圆轮廓模型<sup>[9]</sup>的算法,用非高斯模型更合理地描述场景分布,凸显目标;RXD 是对白化空间中样本向量自身的内积的计算,内积越大越有可能是异常;OSP 是基于亚空间模型建立的算法<sup>[6]</sup>,将样本向量和目标向量投影到背景子空间后做的内积,使得信噪比最大。GLRT 两种模型的思想都有。

由于算法之间存在相似性,本文主要分析 CEM、ACE、AMF、ECDHYT、RXD、OSP、GLRT 在地质小目标上的探测效果。

## 2.2 算法性能的初步评估

对探测的结果分别计算信杂比和绘制 ROC<sup>[5]</sup>(Receiver Operating Characteristic)曲线来对算法性能进行评估。

ROC 曲线是由许多探测率 PD 和虚警率 PFA 对应点构成的曲线,PD=正确判断为目标的像元数/目标像元总数,PFA=错判为目标的像元数/背景像元总数。通过变化门限值,得到该探测算法相应的虚警概率和探测概率。门限值越高,探测率与虚警率越低。如图 2 所示:决策者需要通过 ROC 曲线选择一个阈值使得探测结果获得尽可能大的探测率和尽可能小的虚警率,对于同一幅场景,探测算法

获得的 ROC 曲线越往左上角翘,此探测算法的性能越优越。

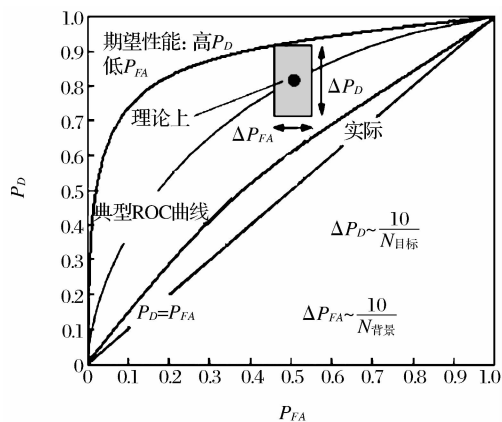


图 2 ROC 曲线<sup>[5]</sup>

Fig. 2 ROC curve

探测的结果可以看作是一幅具有浮点精度的决策统计量,信杂比(SINR)=感兴趣信号方差/(不感兴趣信号+噪声)方差,反映的是感兴趣的目标与背景的分度,分离程度越大,说明算法的探测效果越好。因为目标低概率存在,相对于整个图像而言,强度可以忽略,所以信杂比近似等于感兴趣信号方差/全图方差。

$$\text{SINR} = E\{(y_d - u)(y_d - u)^T\} / D\{y\} \quad (1)$$

其中: $D\{\}$ 表示求方差<sup>[4]</sup>, $y_d$ 为目标物的决策统计量, $u$ 为目标物的决策统计量均值。信杂比是衡量探测算法优劣的一个重要指标,在图像质量相同的情况下,获得更高信杂比决策统计量的探测算法往往获得更好的探测效果。

## 3 实验验证

### 3.1 研究区与数据

研究使用的数据为美国 NASA 发射的 EO-1 上搭载的 HYPERION 高光谱数据。研究采用的是 2007 年 11 月 4 日过境的一级产品,共有 242 谱段,光谱范围为 400~2 500 nm,光谱分辨率达到 10 nm,地面分辨率为 30 m。

研究区位于秦岭南坡陕西省镇安县卡林型丁一马金矿区,地表覆盖物以植被和岩石为主,植被的覆盖达到 50%以上。影像获取时常绿的松树还保持生长,白桦树和一些灌木已经枯萎。实验区内的容矿岩石为泥盆系碳酸盐和泥岩,具有碳酸盐化、绢云母化和褐铁矿化蚀变,出露范围小。这次试验探测的目标物就是绢云母化和褐铁矿化蚀变,主要背景物是松树、白桦树、枯草。

3.2 图像处理

对 HYPERION 的 LIR 级的数据进行坏线修复,去除条带,去除坏波段,然后将 DN 值转换成辐射值。最后通过 FLAASH 软件进行大气校正,这个处理结果是参与各种探测算法运算的数据。为了将探测结果与当地的地质图进行对照,将 HYPE-  
RION 影像进行几何校正。

大气吸收造成影像像元在 1.4  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  的光谱质量很差,进行目标探测之前首先进行波段选择,考虑到各个波段的信噪比和提高运算效率,截取行列为  $100 \times 254$  大小的图像,选择信噪比较高的 150 个波段参与运算。

3.3 地面实际情况分布

通过当地地质图和野外实地考察,以及对像元光谱的吸收特征、光谱波形的分析、圈出试验区内的绢云母区和褐铁矿区。

图 3 是试验区 HYPERION 的真彩色合成的遥感影像与该地区 1 : 5 万地质图的叠合显示,地质图上清晰地显示了这个地区的地层分布和岩性,图上绿色的标记为铁矿区,黄色的标记为金矿区,红色的点是实地考察的地方:这些地方就是典型的低出露绢云母化和褐铁矿化蚀变区。

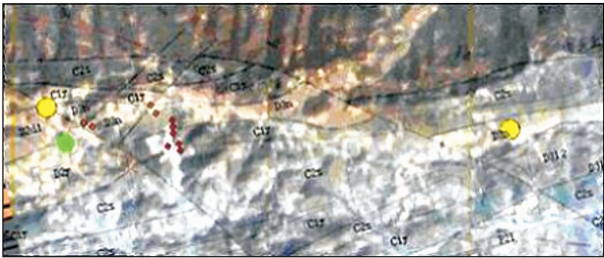


图 3 真彩色合成的遥感影像图与该区 1 : 5 万地质图叠合显示  
Fig. 3 True color composite image of the remote sensing and 1 : 5 million geological map of the area shows superimposed

图 5 为 USGS 矿物光谱库中绢云母和褐铁矿的光谱曲线,作为该区目标探测的目标物。为了准确评价探测结果,需要一个相对准确的定量化的参照标准,结合蚀变矿物的吸收特征和整体波形进一步确定影像上像元的属性。图 4 是目标像元的确定过程。

以绢云母矿物为例:先通过植被指数将试验区内大部分植被掩膜,然后将反射率极低的阴影部分掩膜,再通过绢云母在 2.165~2.205  $\mu\text{m}$  处的主吸收特征和 2.355  $\mu\text{m}$ 、2.115  $\mu\text{m}$  的次吸收特征<sup>[7]</sup>,将不具备这些光谱特征的像元掩膜掉,最后以 USGS 矿物光谱库中的绢云母光谱为参考光谱,计算每个

图像像元与参考光谱的相关系数和光谱角。最后选择相关系数大同时光谱角小且在地质图上满足地质分布要求的像元作为目标探测的目标像元。图 6 中红色像元为最终确定的试验区内“含有”绢云母的像元。

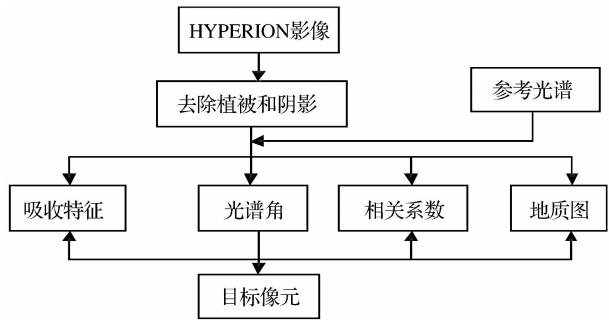


图 4 目标像元的确定过程

Fig. 4 The process of finding target pixels

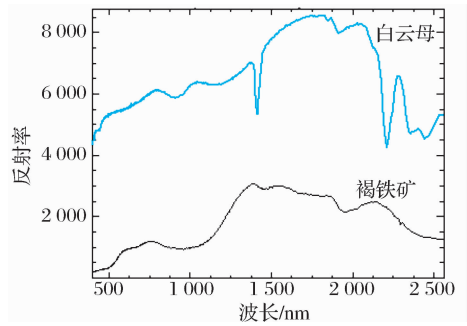


图 5 目标物的光谱曲线

Fig. 5 The spectrums of target object

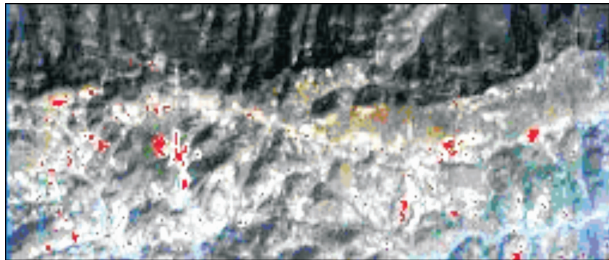


图 6 红色像元为绢云母所对应的目标像元

Fig. 6 Red pixels are the target pixels of Sericite

3.4 探测结果评价

以绢云母的探测为例来分析各种探测算法的性能。因为绢云母的主要光谱特征是 Al-OH 吸收,识别谱带主要位于 2.165~2.215  $\mu\text{m}$  之间,所以将 USGS 矿物光谱库中绢云母光谱和试验区反射率数据分别重采样为 150 个波段和 2.0  $\mu\text{m}$  之后的 31 个波段作为探测的目标物光谱和待探测数据。

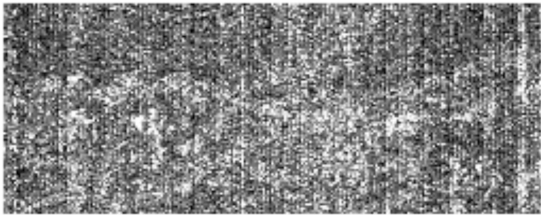
将各个算法的决策统计量量化成 1 000 个等级,分别按照每个等级设置门限值  $\eta$ ,得到该门限值

$\eta$  下的虚警概率 PFA 和检测概率 PD。将不同  $\eta$  值获得的 PFA 和 PD 作为横坐标和纵坐标连成曲线, 为 ROC 曲线。

3. 4. 1 自动亚像元探测

自动亚像元探测不需要已知任何目标物和背景物的信息。分别选择 HYPERION 影像后 31 个波段和全部的 150 个波段对试验区进行 RXD 探测, 探

测结果如图 7 所示:RXD 不能分辨图像噪声和信息异常,所以无法抑制图像的条带噪声。图 8 是两种 RXD 探测的 ROC 曲线。分析 ROC 曲线和信杂比, RXD 的探测性能和分离目标与背景的能力差,但是作为不知道目标物的前提下进行盲探测有一定的优势。后 31 个波段的 RXD 探测比全波段的探测效果略好。



(a) 31个波段的RXD探测结果



(b) 150个波段的RXD探测结果

图 7 RXD 探测结果 2%线性拉伸

Fig. 7 The detecting result image with 2% liner stretching for the RXD algorithm

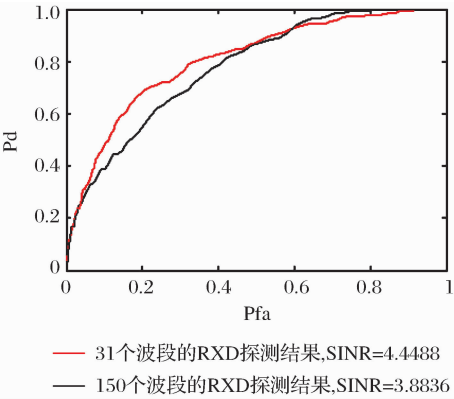


图 8 2 种 RXD 探测的 ROC 曲线

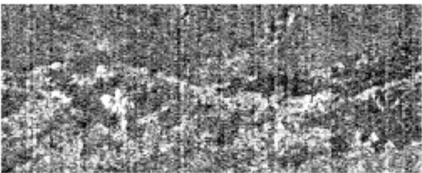
Fig. 8 ROC curves for the RXD algorithm with different band number of data

3. 4. 2 基于概率统计模型的探测算法

选用 CEM、ACE、AMF、ECDHYT 对试验区监

督亚像元进行探测。图 9 是数据为后 31 个波段时 4 种算法探测的结果图。从目视效果和信杂比上看,ACE 和 AMF 的探测效果更好,目标物更突出,能抑制图像本身的条带噪声。分析图 10 的 ROC 曲线:ACE 和 AMF 的探测性能不如目视表现的好, ECDHYT 算法的 ROC 曲线更加往左上角翘,性能更优;ECDHYT 的探测性能和 CEM 的相似,比 ACE 和 AMF 的效果要好。从信杂比和 ROC 两方面看,ECDHYT 的探测效果最佳。

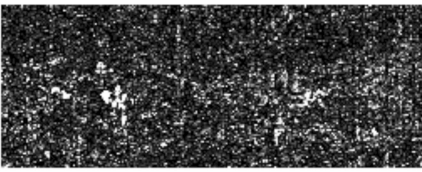
图 11 是数据为 150 个波段时 4 种算法探测结果的 ROC 曲线。对比图 10 和图 11 的 ROC 曲线:当选择 150 个波段时,CEM、AMF、ACE 的探测效果很不理想,ECDHYT 的优越性凸显出来。从算法原理上分析:该试验区数据在 150 个波段上的地物分布更多的服从 EC 分布,而不是正态分布。当减



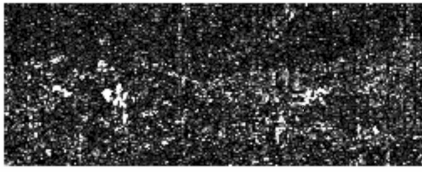
(a) CEM探测结果,SINR=11.9789



(b) ECDHYT探测结果,SINR=12.8881



(c) ACE探测结果,SINR=20.9338



(d) AMF探测结果,SINR=45.7793

图 9 数据为后 31 个波段时 4 种算法的探测结果,2%线性拉伸

Fig. 9 Detecting result images with 2% liner stretching for the CEM,ECDHYT,ACE,and AMF algorithms



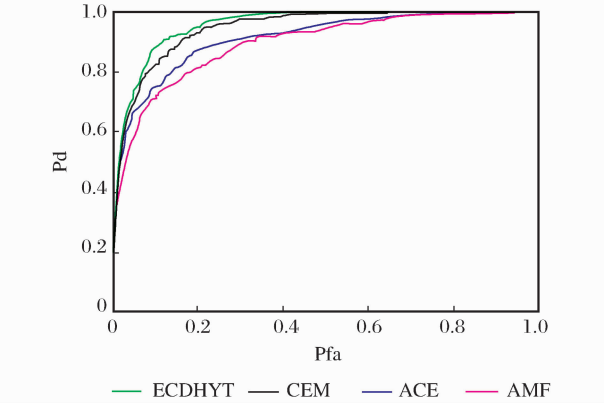


图 10 数据为后 31 个波段时 4 种算法 ROC 曲线  
Fig. 10 ROC curves for the ECDHYT,CEM,ACE, AMF algorithms when data contain the last 31 bands

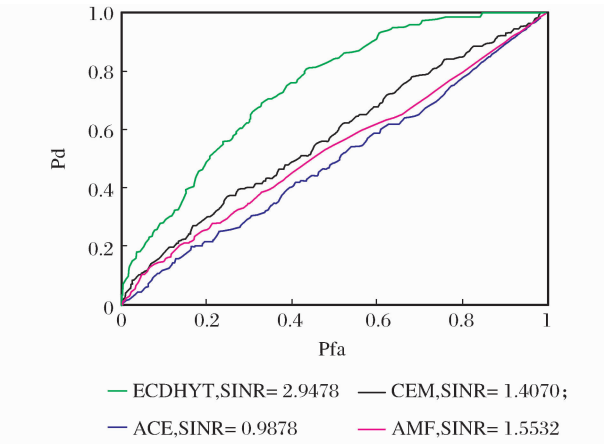


图 11 数据为 150 个波段时 4 种算法 ROC 曲线  
Fig. 11 ROC curves for the ECDHYT,CEM,ACE, AMF algorithms when data contain 150 bands

少到 31 个波段上地物分布的正态性增强,绢云母的蚀变特征在这些波段上更明显,具有 Al-OH 吸收特征的像元相比没有该特征的像元在光谱上差异更大,探测不会受到可见光和近红外波段非蚀变特征的干扰,4 种算法均能在此时发挥出色的探测性能。

3.4.3 基于亚空间模型的探测算法

OSP 和 GLRT 探测都需要已知目标物信息和背景物信息。这比前面的 4 种算法需要具备更多的先验知识。选择目标光谱矢量和 HYPERION 影像均为 150 个波段进行探测。

UTGP 能自动获取图像的背景端元,通过变换阈值,可以得到不同的端元数,图 12 是 UTGP 从图像中获取的 5 个背景端元的光谱曲线。分别用 UTGP 获得的 3 个端元、4 个端元、5 个端元光谱作为背景进行 OSP 探测,可以得到不同的探测结果,如图 13 所示:从 ROC 曲线和信杂比可以看出,对于

OSP 探测不是背景端元越详细越好,在背景端元数目为 4 时,探测的效果相对更好,这和该算法本身的机理有关,背景描述越完备,越可能包含目标信息,导致目标的投影不在这个描述范围内从而影响到探测效果。结合对该地区的实地调查情况,主要背景物有常绿松树、干枯白桦树叶、半干枯草,绿色曲线对应的 ROC 曲线是采用实地 ASD 光谱仪实地测量的这 3 种地物的光谱作为背景,无论是目标的探测率还是目标物和背景的分离程度,这种情况下的探测效果最好。对于 OSP 算法,背景地物光谱和地物数量的选择都会对探测结果产生很大的影响。

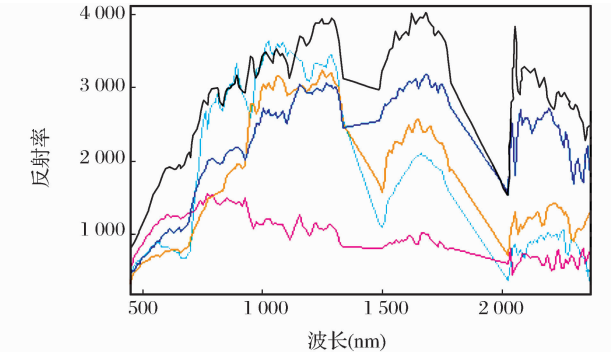


图 12 阈值设置为 0.1 时,UTGP 获得的 5 个端元的光谱曲线  
Fig. 12 The spectrums of five endmembers getting from UTGP algorithm with 0.1 threshold

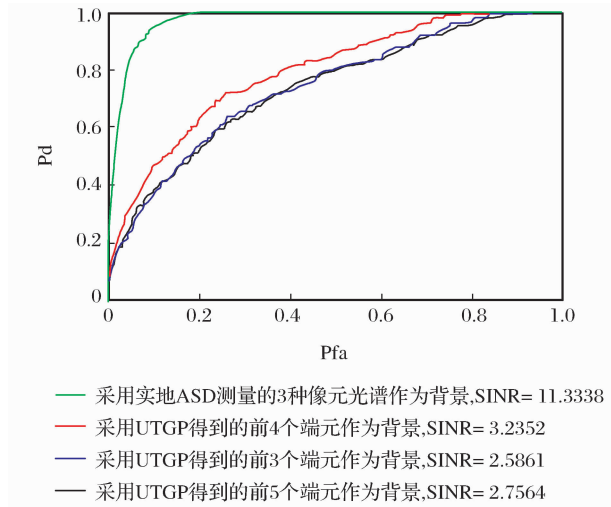


图 13 选择不同背景物的 OSP 探测的 ROC 曲线  
Fig. 13 ROC curves for the OSP algorithm when choosing different background object

分析 GLRT 在不同背景端元情况下的探测性能,分析图 14 中的 ROC 曲线:GLRT 用 UTGP 获得的背景端元进行探测的性能都不佳,因为 GLRT 本身是基于概率统计模型,而 UTGP 是根据亚空间投影获得的背景端元,所以两者结合的效果不如

UTGP 和 OSP 结合的探测效果好。对于 HYPE-RION 图像而言,背景物信息与实地信息有差异,因为影像在获取的时候存在噪声、阴影等,这些也是影像的背景信息,图 14 中的绿色曲线就是采用实际地物光谱和图像的阴影像元光谱共同作为背景,探测性能和分离目标物的能力都有了很大的提高,GL-RT 需要详尽的背景描述才能获得较好的探测效果。

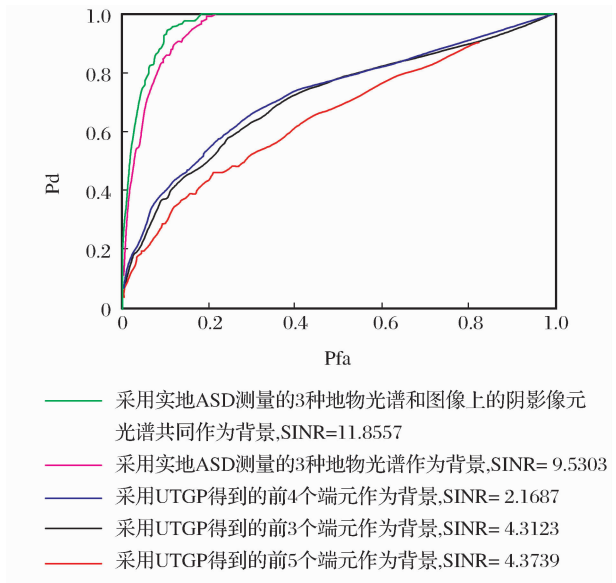


图 14 选择不同背景物的 GLRT 探测的 ROC 曲线  
Fig. 14 ROC curves for the GLRT algorithm when choosing different background object

最后对上述 6 种算法探测的最优结果进行纵向比较。图 15 是 6 种算法的 ROC 曲线局部放大,

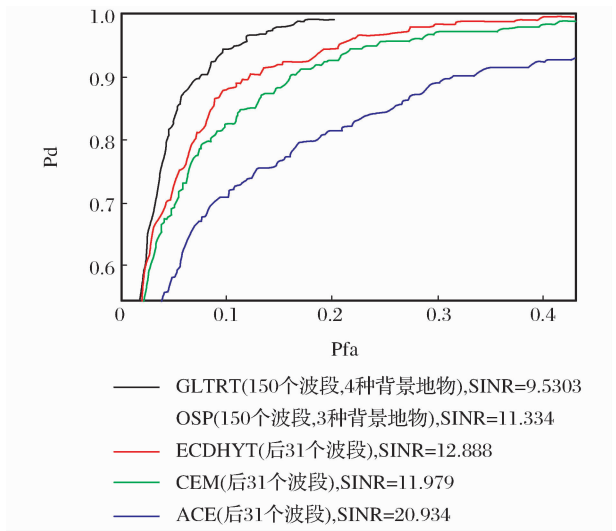


图 15 4 种算法的纵向比较  
Fig. 15 ROC curves for the GLRT,OSP,ECDHYT, CEM and ACE algorithms

OSP、GLRT 是对 150 个波段进行探测,CEM、ECDHYT、ACE、AMF 是对后 31 个波段进行探测。总体上亚空间模型算法因为加入了确切的背景信息,探测性能比将全图作为背景估计的概率统计模型好,但是要获得准确的背景信息是很困难的,而且选择背景端元不当会严重影像探测效果,这样概率统计模型的优势就显示出来,在只知道目标信息的情况下将小目标从背景覆盖程度很高的场景中分离出来,需要突出目标物的光谱特征,对于地质小目标就是要突出蚀变矿物的吸收特征所在的波段,这些波段能够加大“含有”目标物的像元与背景像元的光谱区别,为下一步的小目标探测做准备。各种算法建立的基础是对场景分布有自己的假设,从探测性上看 ECDHYT 对场景的椭圆轮廓分布的假设更合理,能更好地将目标信息从背景中分离出来。

4 结 语

目标探测算法应用在高光谱遥感上探测地质小目标主要是在匹配处理过程中,有机地融入矿物岩石的参考光谱,尽可能地将场景中的目标物从背景中分离出来<sup>[8]</sup>。对于参考光谱和实验数据的选择需要有一定的地质背景,结合蚀变特征来选择波段有助于获得更好的探测效果。从 OSP 和 GLRT 探测背景端元的选择可以看出:无论是基于亚空间模型的探测算法还是基于概率统计模型的探测算法,根据算法的原理合理选择探测所需要的条件是获得好的探测效果的前提。实际场景的分布、图像本身的噪声、目标物的信息特点等一系列因素都会影响到探测效果,因为椭圆轮廓分布比正态分布更好地描述了图像地物的分布,所以 ECDHYT 在探测中表现突出。至于影像本身的信噪比、背景的复杂程度、地质小目标的出露情况等对各种探测算法性能的影响和目标探测技术在岩性识别上的应用还在进一步研究。因此,本文对各算法的性能评估是初步的。

参考文献:

[1] Gan Fuping. Alteration Extracting Based on Spectral Match Filter [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(2): 147. [甘甫平. 基于光谱匹配滤波的蚀变信息提取[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(2): 147.]

[2] Gao Lianru. Spectra Enhancement and Feature Extraction for Target Detection in Hyperspectral Imagery [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences, 2007. [高连如. 高光谱遥感目标探测中的信息增强与特征提取研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2007.]

[3]

Stein D W J, Beaven S G, Hoff L E, *et al.* Anomaly Detection from Hyperspectral Imagery[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 1: 60-63.

[4]

Liu Xiang. Target Detection on Hyperspectral Imagery Based on Transformation of Spectral Dimensions [D] . Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Science, 2008. [刘翔. 基于光谱维变换的高光谱图像目标探测研究[D] . 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2008. ]

[5]

Manolakis D, Marden D. Hyperspectral Image Processing for Automatic Target Detection Applications[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2003, 14(1) : 85-105.

[6]

Chang C I. Automatic Subpixel Detection; Anomaly Detection in Hyperspectral Imaging Techniques for Spectral Detection and Classification[M]. New York, Boston: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.

[7]

Yan Shouxun. Summarizing the VIS-NIR Spectra of Minerals and Rocks [J]. Remote Sensing Techonoly and Application, 2003, 18(4): 191-198. [燕守勋. 矿物与岩石的可见—近红外光谱特性综述[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(4): 191-198. ]

[8]

Chang C I. Least Square Subspace Projection Approach to Mixed Pixel Classification for Hyperspectral Images[J]. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, 1998, 36(3) : 898-912.

[9]

Schaum A, Stocker A. Linear Chromodynamics Models for Hyperspectral Target Detection [C]//IEEE Aerospace Conference, February, 2003.

A Comparative Research on the Performance of  
Target Detection Algorithms for Small  
Geological Targets Exploitation

WEI Xin-xin, YAN Shou-xun

(*Hyperspectral Remote Sensing Laboratory, Institute of Remote Sensing Applications ,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

**Abstract:** Some alteration mineral information occurs in subpixel for imagery spatial resolution. Detection to this kind geological altered target has low probability. It's better to obtain the target pixels by comparing the spectrums of pixels. Because target detection algorithms are good at exploiting military objectives, these detectors have potential advantage in exploiting geological altered information. This article evaluates the performance of these algorithms applying in exploiting sericite in the test Zone.

**Key words:** Target diction; Geological altered information; ROC; SINR