基于光谱知识的高光谱图像自动识别方法

牛志宇 赵慧洁

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对传统高光谱图像矿物识别方法未能充分利用矿物光谱诊断吸收特征与矿物光谱知识、识别过程人为干预多等问题,提出了一种基于光谱知识的高光谱图像自动识别方法. 该方法引入了基于光谱吸收特征与波形特征的光谱知识作为自动识别的标准,利用连续统去除操作增强光谱吸收特征,采取基于光谱主次吸收特征的识别决策策略,建立多级约束准则以提高识别精度及避免误识别,通过利用模拟数据进行算法精度评价并应用航空高光谱成像仪 AVIRIS(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer)数据进行应用分析与验证. 结果表明:当图像信噪比大于 200 时,识别准确率可以达到 80.3%,能够得到良好的识别结果以及较高的精度,并实现了基于高光谱图像的矿物自动识别.

关 键 词: 高光谱遥感; 自动识别; 光谱吸收特征

中图分类号: TP 751.1 **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)02-0280-05

Automatic recognition of hyperspectral image based on spectral knowledge

Niu Zhiyu Zhao Huijie

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to solve the problems of current methods for mineral recognition from hyperspectral data, such as the requirement for prior information, the failure to make full use of absorption features and the lack of the automation of recognition process, an automatic recognition approach based on the spectral knowledge was proposed. The spectral knowledge library including the spectral information and absorption features was generated as the recognition standard, in which the absorption features were enhanced by removing the continuum of image spectra and library spectra as well. The decision method was proposed based on the major and minor absorption features, and a multi-constraint criterion was established to improve the recognition accuracy and avoid the false recognition. The accuracy evaluation of the proposed approach was performed on the simulated data and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) data as well. Experimental results show that the recognition accuracy reaches 80.3% when the signal-to-noise of image is higher than 200. Fine results with the high accuracy are obtained by the proposed approach, and the mineral automatic recognition from hyperspectral data is achieved simultaneously.

Key words: hyperspectral remote sensing; automatic recognition; spectral absorption feature

高光谱遥感是 20 世纪 80 年代发展起来的新型遥感探测技术,它将成像与光谱技术相结合,主要特点是光谱连续、分辨率高,并在获取地表空间图像的同时得到地物的连续光谱信息,从而为地物的精确识别提供了强有力的探测手段. 矿物识别是高光谱遥感应用最成功的,也是最能发挥其优势的应用领域[1],高光谱数据矿物识别技术不仅在矿产资源勘查和评价中发挥重要作用,而且

收稿日期: 2010-11-03; **网络出版时间**: 2012-02-21 11:47; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120221.1147.023

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120221.1147.023.html

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2008AA121102,2008AA12A201); 国家自然科学基金资助项目(61008047); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0705)

作者简介: 牛志宇(1985 -),男,河北唐山人,硕士生,niuzhiyu0916@126.com.

对月球和行星地质学研究都具有重要意义.

传统高光谱图像矿物识别方法主要包括基于数据统计信息的识别方法[2]以及基于光谱匹配的识别方法[3].基于图像统计信息的识别方法仅是利用图像特征空间统计特性得到不同的类别,并利用先验信息进行解译,该类方法没有充分利用光谱维信息.光谱角制图、光谱相关填图等光谱匹配[4]方法需要利用先验光谱信息与图像光谱进行匹配,以某种测度函数得到识别结果.这种方法在识别过程中需要用到图像先验信息,并且仅仅利用单一光谱特征,特征的不稳定性直接影响识别效果,且识别过程中需要人机交互.针对上述传统方法存在的问题,发展了基于决策的识别方法,它以专家系统为基础,建立识别规则进行地物识别,最具代表性的是美国地调局提出和发展的专家系统智能识别模型[5],该类方法的准确度取决于专家系统库建立是否完善以及识别规则的建立是否完备.为了提高矿物识别准确性与可靠性,针对基于决策方法存在的问题,本文提出了光谱波形与光谱特征参量相结合,并建立改进多级知识约束准则的高光谱矿物自动识别方法.

1　方法实现

本文方法通过研究标准光谱库中参考光谱的内在吸收特征,对矿物参考光谱诊断吸收特征参数进行计算,作为识别的标准;并对被处理高光谱图像的像元光谱以及库中标准光谱进行连续统去除操作,以突出光谱诊断吸收特征;采用基于光谱主次吸收特征的最小二乘拟合法作为决策方法得到初级识别结果;通过对矿物光谱吸收特征进行知识化表达从而建立多级约束准则,对初级识别结果进行约束,以此避免错误识别和提高识别精度,实现高光谱图像专题信息识别的智能化以及自动化.本文提出方法的实现流程如图 1 所示.

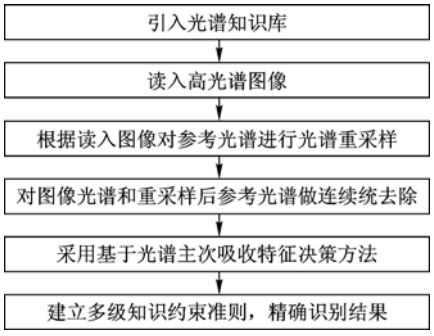


图 1　本文方法实现流程

1.1　光谱知识库的引入

光谱知识库的准确性和完备性决定了应用系统的性能,合理建立知识库并保证知识库的准确和完备性是应用系统设计的重要前提.

针对现有矿物识别方法中知识库建立不完善的问题,本文方法从两方面构建光谱知识库,即包含了光谱库和特征库,其中光谱库包括标准光谱库中常见矿物的整条光谱曲线,特征库则包含光谱库中标准矿物光谱的诊断吸收特征个数以及各个吸收特征的起止点波长位置等信息.

本文方法中使用的光谱库是美国地调局光谱库,覆盖波谱范围为 0.395 ~ 2.56 μm;选取了 60 种常见矿物,其中包括明矾石、高岭石、蒙脱石、白云母、方解石和伊利石等矿物的标准光谱[6].

特征谱带在矿物中具有较稳定的波长位置和较稳定的独特波形,能够指示矿物的存在,因此可将矿物的这些“指纹特征”作为识别的标准.通过分析所使用光谱库中的标准光谱,计算并记录光谱诊断吸收特征的相关参数,包括吸收特征的个数及其特征位置,从而形成特征库.为了抑制单一光谱特征不稳定以及噪声等对识别结果的影响,本文选取了矿物光谱的主次吸收特征.如图 2 所示,明矾石主次吸收特征分别位于 2.065 ~ 2.235 μm与 2.295 ~ 2.355 μm;高岭石具有双吸收特征,位于 2.115 ~ 2.245 μm.

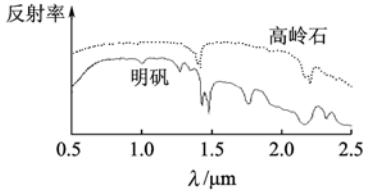


图 2　典型矿物吸收特征比较(光谱已平移)

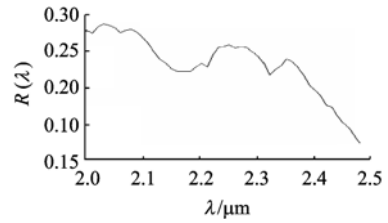
1.2　基于光谱主次吸收特征的决策方法

图像光谱与标准光谱由于以下因素影响存在一定的差异:图像中矿物光谱为混合矿物光谱,标准光谱库中为实验室测量纯矿物光谱;传感器参数、大气条件和成矿条件等外界因素影响造成的光谱特征漂移或变浅等;因此有必要对光谱曲线进行预处理以增强光谱吸收特征.为了解决上述问题,本文方法对图像光谱及知识库中参考光谱进行连续统去除[7],其计算公式为

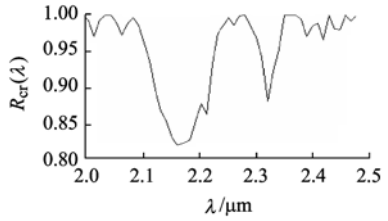
$$R_{cr}(\lambda) = R(\lambda)/C(\lambda) \qquad (1)$$

其中,λ 为波长,$R_{cr}(\lambda)$为连续统去除后的反射率值;$R(\lambda)$为连续光谱的反射率值;$C(\lambda)$为连续统的值.连续统处理前后的光谱如图 3 所示,处理后光谱曲线的吸收特征得到了明显地增强.

现有光谱特征拟合[8]等识别方法是利用全波段吸收特征进行匹配拟合,其中的部分较小特



a 连续统去除前光谱



b 连续统去除后光谱

图3 连续统去除前后矿物光谱对比

征可能为图像噪声. 针对上述问题以及光谱吸收特征波形比较稳定这一特性,本文改进了现有的光谱相似性测度,提出了基于光谱主次吸收特征的最小二乘拟合法作为决策方法,将图像光谱与光谱知识库中各个标准光谱在主吸收特征及次级吸收特征波段进行加权比较,忽略掉较小特征的干扰影响,从而得到最初的识别结果. 计算公式为

$$F_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{2} C_i \cdot \frac{\sum O_i L_i - \left(\sum O_i \sum L_i\right)/n_i}{\sqrt{\left(\sum L_i^2 - \frac{\left(\sum L_i\right)^2}{n_i}\right)\left(\sum O_i^2 - \frac{\left(\sum O_i\right)^2}{n_i}\right)}} \tag{2}$$

其中,n_i 为第 i 个吸收特征所含的波段数;O_i 为第 i 个吸收特征连续统去除后的图像像元光谱;L_i 为第 i 个吸收特征连续统去除后的光谱库参考光谱;C_i 为第 i 个光谱吸收特征所占的权系数,可利用该吸收特征的面积在整个波段主次两个特征的面积之和中所占的比例来得到;F_{total} 为连续统去除后的图像像元光谱与参考光谱在主次吸收特征区间的加权匹配值,作为最初的图像识别结果.

1.3 多级约束准则的建立

本文提出的方法通过最小二乘拟合决策方法对连续统去除后的图像像元光谱和参考光谱进行拟合处理. 由于存在不同种矿物连续统去除后特征区间波形相似的情况,即出现“异物同谱”. 因此需要对连续统去除前的图像像元光谱与参考光谱进行约束. 本文方法中多级知识约束准则的建立即是用来排除异物同谱的情况,从而得到高光谱图像的最终识别结果. 通过研究知识库中参考光谱间的区别和联系,对矿物光谱吸收特征进行知识化表达,建立合适的多级知识约束准则,用来精确识别结果并避免误识别. 其约束处理流程如图4所示. 通过对图像像元光谱及其可能属于的候选参考光谱进行以下多级决策处理,以最终确定其所属类别.

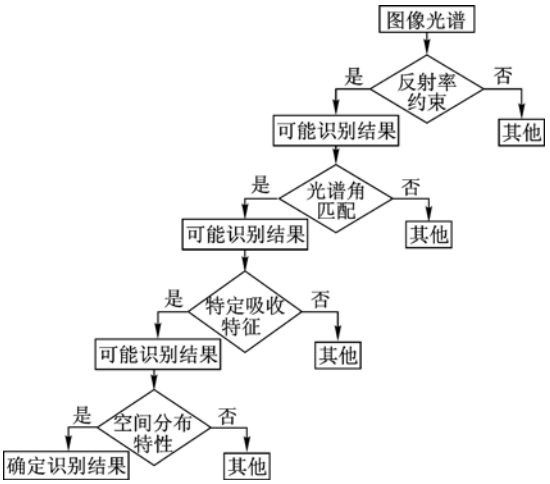


图4 多级知识约束准则的树状处理流程

现有识别方法中采用的约束规则可能导致识别误差:采用连续光谱幅值作为约束会由于光照等因素引起的幅值差异导致识别误差[9];由于数据本身的坏点、杂点噪声可能会干扰识别结果. 基于以上问题本文方法中提出了新的约束准则并且对已有的规则进行了改进,避免了异物同谱情况造成的误识别,提高了识别结果的准确度. 本文方法选取了4个约束条件建立多级约束准则:

1)特征波段光谱角匹配约束. 由于光照等因素影响,地物光谱的幅值可能与库标准光谱的幅值存在差异,本文方法改进了现有约束准则,即采用了特征波段光谱角匹配[10](SAM, Spectral Angle Mapper),光谱特征波段区间光谱角为

$$\theta = \arccos \frac{t \cdot r}{\| t \| \cdot \| r \|} \tag{3}$$

其中,t 为岩矿参考光谱;r 为图像像元光谱. 通过该约束条件,可避免不同种地物连续统去除后形状类似而造成的误识别.

2)矿物空间分布连续性. 为了去除数据获取过程中产生的散点、杂点噪声对图像识别效果的影响,本文方法提出了矿物空间分布连续的约束准则,即采用矿物空间分布连续的特性,认为矿物几乎不会以散点的形式存在于图像中,绝大多数矿区的矿物会以聚集形式存在. 该空间相关性在初步识别结果图像中可表示为某一像素周围8个方向相邻的匹配值像素之和,若小于某一阈值则排除该点. 利用这一特性,通过高光谱图像的空间

维相关信息可以进一步提高本文方法的精确性.

3）特征波段反射率阈值设定. 当进行连续统去除操作以后,图像中反射率很低的小随机噪声可能会产生波谷曲线,在识别过程中被作为吸收特征,从而造成错误的识别. 为了去除该影响,可以设定连续统去除前,图像像元光谱在与其匹配的参考光谱的特征波段区间的最小反射率阈值来进行约束. 若图像连续光谱在特征波段区间的最大反射率仍小于该阈值,则认为其为小随机噪声,利用该约束条件可以消除这一影响.

4）是否存在特定吸收特征. 由于不同种矿物会在某一波段区间存在相似特征,但不会在所有波段区间都具有相似特征,因此可以根据一种矿物在与之具有相似特征的另一种矿物的其它特征波段区间不具有吸收特征,来区分具有相似吸收特征的两种矿物.

通过以上建立的多级约束准则,综合利用高光谱图像的光谱维信息和空间维信息,即运用连续光谱的特征参数和矿物空间分布特点,对初步识别结果进行约束处理,从而使识别精度进一步增强,得到最终的识别结果.

2　精度评价及实验结果分析

为了分析和评价本文提出方法的性能,对不同信噪比的模拟数据采用识别准确率进行定量化精度评价. 为了验证本文方法,采用 AVIRIS 高光谱数据进行矿物自动识别应用分析.

2.1　精度分析

利用标准光谱库参考光谱合成不同信噪比的模拟数据,通过采用识别准确率的方法,对本文方法的识别效果进行评价. 识别准确率计算公式为

$$a = \frac{N_{\mathrm{reg}}}{N_{\mathrm{total}}} \times 100\% \tag{4}$$

其中,a 为识别准确率;N_{reg} 为图像中被准确识别的各类地物的像素总数;N_{total} 为图像中总像素数.

模拟图像由明矾石和高岭石两种端元光谱按不同含量混合而成,端元光谱采用美国地调局光谱库中明矾石和高岭石,在模拟图像中按明矾石含量逐行递增的方式混合,并且规定混合像元中矿物的含量为 20% ~80% 时应识别为混合物.

运用本文方法处理模拟图像数据来进行定量化精度评价. 同时为了研究噪声对算法性能的影响,在混合光谱中加入随机噪声. 噪声加入方式如下所示:

$$r'_{\mathrm{b}} = r_{\mathrm{b}} + \left[M \frac{q(0,1)}{\sigma_{\mathrm{SNR}}} \right] \tag{5}$$

其中,r'_{b} 为加噪声后的光谱;r_{b} 为无噪声光谱;$q(0,1)$ 为均值为 0,方差为 1 的随机噪声;σ_{SNR} 为信噪比;M 为噪声的反射率,本文设为 0. 5. 在精度分析过程中,σ_{SNR} 分别取 200,100,50,评价结果如表 1 所示.

表 1　不同信噪比图像的精度评价结果

σ_{SNR}	a/%
理想图像	81. 2
200	80. 3
100	79. 4
50	75. 9

通过对理想图像以及不同信噪比图像运用该方法进行自动识别,并对识别结果进行精度评价,可以发现本识别方法在 $\sigma_{\mathrm{SNR}} > 200$ 时 a 可达 80. 3%,能够取得良好的识别效果,满足应用精度要求.

2.2　算法应用与验证

实验数据采用美国 Cuprite 矿区 AVIRIS 机载高光谱数据,λ 范围为:1. 990 8 ~ 2. 479 μm,空间分辨率为 20 m,光谱分辨率为 10 nm,数据大小为 400 × 350 × 50. 该数据单波段图像如图 5.

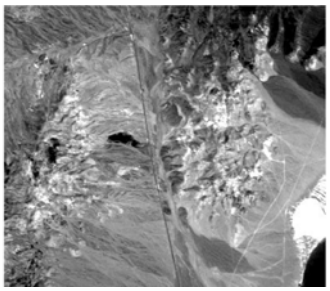


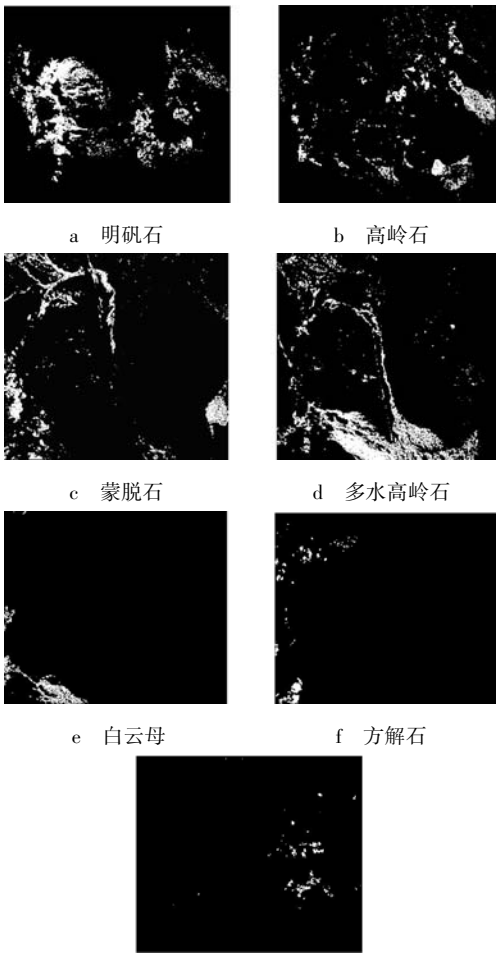
图 5　本文方法应用数据(1. 990 8 μm)

运用本文方法,对实测高光谱图像进行矿物自动识别,得到的识别结果如图 6 所示.

通过矿物识别结果分析以及与前人研究结果、地质资料比较,本文方法可以很好地实现该地区主要蚀变矿物的自动识别,并且基本排除了数据获取过程中产生的杂点噪声等干扰.

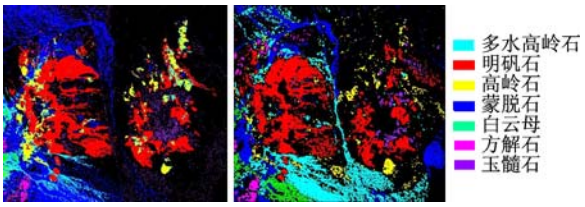
采用基于 SAM 的矿物光谱匹配识别方法对图 5 所示数据进行应用,并从标准库中选取该区域主要蚀变矿物光谱作为先验信息,得到的填图结果与本文方法应用结果进行比较如图 7 所示.

通过与 SAM 识别方法的填图结果进行比较,并结合该矿区的实际矿物分布情况,可以发现利用本文方法的识别效果要更好,其中白云母、多水高岭石以及蒙脱石的识别在 SAM 方法的结果中存在明显的误识别;同时本文方法更具优越性,整个实现过程不需要人为干预,实现了矿物信息的自动识别.



a 明矾石　b 高岭石　c 蒙脱石　d 多水高岭石　e 白云母　f 方解石　g 玉髓石

图 6 本文方法自动识别结果



a SAM 填图　b 本文方法填图

图 7 不同方法填图比较

3 结 论

本文提出了一种应用于高光谱图像的基于矿物光谱波形与矿物光谱特征知识的自动识别方法. 本文方法中光谱知识库包含了光谱波形库和光谱特征库,有效地减少了由于光谱知识不完备等造成的矿物误识别;利用光谱主次吸收特征作为决策准则,通过建立多级约束准则降低异物同谱等因素对识别结果的影响. 通过模拟数据进行本文方法识别精度分析与评价,当图像信噪比大于 200 时矿物识别准确率可达到 80.3%;Cuprite 矿区矿物识别结果与前人研究结果、地质资料一致性较好,并识别效果明显优于基于光谱匹配的 SAM 方法识别结果.

参考文献(References)

[1] 王润生,杨苏明,阎柏琨. 成像光谱矿物识别方法与识别模型评述[J]. 国土资源遥感,2007,71(1):1-9
Wang Runsheng, Yang Suming, Yan Baikun. A review of mineral spectral identification methods and models with imaging spectrometer[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007, 71(1):1-9(in Chinese)

[2] 赵慧洁,李娜,贾国瑞,等. 改进独立成分分析在高光谱图像分类中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(11):1333-1336
Zhao Huijie, Li Na, Jia Guorui, et al. Improved independent component analysis applied to classification hyperspectral imagery[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11):1333-1336(in Chinese)

[3] 黄光玉,沈占锋,赵欣梅. 高光谱遥感矿物识别方法研究[J]. 资源环境与工程,2007,21(1):50-54
Huang Guangyu, Shen Zhanfeng, Zhao Xinmei. Discussion for discrimination method of mineral using hyperspectral remote sensing[J]. Resources Environment & Engineering, 2007, 21(1):50-54(in Chinese)

[4] 白继伟. 基于高光谱数据库的光谱匹配技术研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,2002
Bai Jiwei. The study on the spectral mapping technique based on the hyperspectral database[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application, China Academy of Sciences, 2002(in Chinese)

[5] Clark R N, Swayze G A, Livo K E, et al. Imaging spectroscopy: earth and planetary remote sensing with the USGS tetracorder and expert systems[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(12):1-44

[6] 李兴. 高光谱数据库及数据挖掘研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,2006
Li Xing. Research on hyperspectral database and hyperspectral data mining[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application, China Academy of Sciences, 2006(in Chinese)

[7] Du Peijun. Feature extraction for target identification and image classification of OMIS hyperspetral image[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(6):835-841

[8] 燕守勋,张兵. 高光谱遥感岩矿识别填图的技术流程与主要技术方法综述[J]. 遥感技术与应用,2004,19(1):52-63
Yan Shouxun, Zhang Bing. Summarizing the technical flow and main approaches for discrimination and mapping of rocks and minerals using hyperspectral remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(1):52-63(in Chinese)

[9] Swayze G A, Clark R N, Goetz A F H, et al. Effects of spectrometer band pass, sampling, and signalto-noise ratio on spectral identification using the Tetracorder algorithm[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(E9):5105-5134

[10] 梁继,王建,王建华. 基于光谱角分类器遥感影像的自动分类和精度分析研究[J]. 遥感技术与应用,2002,17(6):299-303
Liang Ji, Wang Jian, Wang Jianhua. Study on automatic classification and accuracy analysis of remote sensing image based on SAM[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(6):299-303(in Chinese)

(编 辑:刘登敏)