

矿物光谱特征谱段识别方法与应用

车永飞, 赵英俊

核工业北京地质研究院; 遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029

摘要 矿物光谱识别所使用的光谱参量在不同影响因素下的稳定性对矿物识别效果影响很大。基于特征谱段峰谷相关系数法, 提出了高光谱矿物识别的新算法, 建立了提取稳定光谱参量(峰谷位置)的数学模型和操作流程。该算法通过提取矿物参考光谱峰谷的位置, 计算矿物特征谱段的峰和谷与待测矿物光谱相应谱段的相关系数, 并以此作为比较矿物光谱相似程度的主要依据。以甘肃北山方山口地区拾金坡金矿床为例, 研究并比较新算法与典型算法的蚀变矿物识别。结果表明, 本文算法的正确识别率为 85%, 较典型算法有更好的识别效果。

关键词 高光谱遥感; 特征谱段; 峰谷相关系数; 矿物识别

蚀变岩是成矿成岩过程中不同类型的热液与周围岩石相互作用的产物, 因其遥感信息特征与成矿的密切关联而成为一种重要的找矿线索^[1-2]。由于蚀变矿物独特的诊断性吸收特征谱带具有指示离子类矿物存在的特点, 高光谱技术成为矿物识别的有效技术之一^[3], 并在国内外得到广泛的应用^[4-8]。目前, 光谱吸收特征参量(谱带宽度、形态、深度、位置)是岩石矿物光谱识别中主要的特征参量^[9], 以往研究分别从颗粒度、风化效应、岩矿表面颜色和不同阳离子结合的阴离子基团作用等因素着手, 对比引起岩石光谱变异的规律和特征^[1], 分析相同影响因素下特征参量的不稳定性及其对提取矿物的影响, 研究指出, 光谱稳定特征参量的分析和评价是高光谱图像中所有可量化信息提取的基础。

高光谱矿物识别方法从本质上可归纳为两大类: 基于光谱特征的识别和基于数据统计特征的识别^[10]。其中, 基于光谱特征的识别方法主要包括光谱反射率匹配法^[11-12]、基于特定矿物光谱的特征参数识别法^[13]、混合像元分解法^[14]、矿物智能识别模型法^[15]等。虽然这些方法充分利用了图像中丰富的光谱维信息, 并根据光谱曲线间的差异对像元进行了识别, 然而实际矿物会受大气及蚀变条件等环境因素的影响及混合光谱的存在, 导致获取的纯净端元精度较低, 并且单一光谱特征的不稳定性直接影响不同类型矿物的识别效果^[13], 进而影响其识别的准确性。因此, 开展基于光谱稳定特征参量的提高矿物识别精度的算法模型, 值得进一步探索研究。

矿物光谱曲线典型特征谱带峰谷位置(波长)是光谱相对稳定的特征参量, 可作为诊断性光谱吸收特征的矿物鉴定依据。基于这一认识, 本文提出了基于特征谱段峰谷相关系

数的高光谱矿物识别新算法。以甘肃北山方山口地区拾金坡金矿床为研究区为例, 利用野外实测光谱及部分来自于美国地调局光谱库(USGS)的光谱为参考光谱, 对获取的 CASI/SASI 航空高光谱数据进行矿物识别实验研究, 以期验证该方法的有效性。

1 矿物峰谷相关系数法识别原理

不同矿物的晶体结构、化学成分等物化属性可导致光谱谱形上吸收波段的差异^[16], 也就是说, 不同矿物光谱的峰、谷有不同的特点。在矿物光谱峰、谷的诸多特征中, 存在位置是最主要、最稳定的特征, 可以利用此特征对矿物进行鉴定。在光谱特征谱段范围内, 通过判断图像端元光谱图 1(a) 与光谱库光谱图 1(b) 相应处峰、谷特征(位置、形状)的相似程度达到识别矿物的目的。这也是本文提出的峰谷相关系数法的思想基础。

峰谷相关系数法的原理是, 首先将参考光谱、待测光谱包络线消除归一化后, 提取参考光谱峰和谷的位置, 然后计算待测光谱与其相对应谱段处与参考光谱的相关系数 r , 经过统计分析和对比, 设定合适的阈值, 比较 r 值与阈值, 以此判断待测光谱与参考光谱的相似性程度, 快速识别待测光谱。

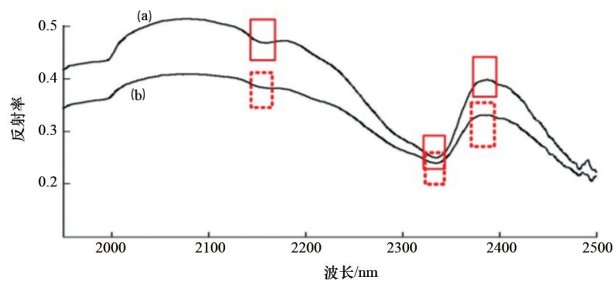
该算法体现了矿物光谱特征中最主要、最稳定的特征——光谱峰、谷位置表征矿物识别特征的优势, 是对传统光谱相关系数方法依据距离度量未知光谱和参考光谱相似性的改进, 实现了光谱峰谷特征相关系数作为比较光谱相似度的依据, 是一种简单易行的光谱比较方法。

收稿日期: 2016-08-24; 修回日期: 2016-11-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA061801)

作者简介: 车永飞, 博士研究生, 研究方向为高光谱遥感, 电子信箱: cheyongfei@163.com

引用格式: 车永飞, 赵英俊. 矿物光谱特征谱段识别方法与应用[J]. 科技导报, 2017, 35(4): 90-93; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.04.016



注:虚线方框标记的是图像端元光谱的峰和谷,实线方框标记的是光谱库光谱的峰和谷

图1 图像端元光谱(a)与光谱库光谱(b)比较

Fig. 1 Comparison of image end element spectra (a) and spectral library spectra (b)

相关系数 r 是指待测定光谱与参考光谱相应谱段处的相关系数,计算公式为

$$r = \text{Cov}(y_1(k), y_2(k)) / (\sigma_{y_1} \cdot \sigma_{y_2}) \quad (1)$$

式中, $y_1(k)$ 为待测光谱; $y_2(k)$ 为参考光谱, Cov 为两光谱相应谱段处峰谷位置的协方差; σ_{y_1} 为待测光谱标准偏差; σ_{y_2} 为参考光谱标准偏差。

r 的取值范围为-1(相异光谱)到+1(相同光谱),用百分比表示,-1 $\leq r \leq 0$ 时,表示两光谱完全不同;当 $0 < r \leq 1$,表示两光谱的对应为0~100%; $r=1$ 时,表示两个光谱完全相同。

2 矿物峰谷相关系数法的技术流程

2.1 端元光谱提取

本文采用目前较为成熟的技术流程——基于图像的端元提取方法,即沙漏模型。将经过绝对辐射率转换的高光谱图像进行特征选择时,采用MNF变换方法,利用纯净像元指数(PPI)将图像中的相对“纯”像元提取并输入三维可视化空间进行人机交互式端元选择,最终确定端元光谱。

2.2 光谱分段处理及归一化

根据研究区内实测矿物光谱曲线特征分析研究,本文将380~2450 nm光谱区间划分为大于2000 nm和小于1000 nm的2个特征光谱区间:大于2000 nm区域为络阴离子振动的合频或倍频,用于识别OH⁻和CO₃²⁻矿物类;小于1000 nm区域为电子跃迁吸收谱带,用于识别含Fe²⁺、Fe³⁺和Mn²⁺的矿物类。研究区实测蚀变矿物光谱特征谱段归纳见表1。

表1 研究区蚀变矿物光谱特征谱段范围

Table 1 Spectral characteristic spectral range of altered minerals in the study area

蚀变矿物识别谱系	矿物名称	英文名称	特征谱段/nm
氧化物	褐铁矿	limonite	800~1000, ±50(宽弱)
含Al-OH	绢云母	sericite	2195~2215, ±20(宽强)
键矿物	绿泥石	chlorite	2250~2260(宽强)
碳酸盐矿物	方解石	calcite	2330~2340, ±10(宽强)

本文选取的典型矿物参考光谱共30条,其中,野外实测光谱20条,美国地调局光谱库光谱10条。将参考光谱与图像端元光谱分别进行一阶导数化和包络线去除归一化处理,突出光谱曲线的吸收和反射特征,将其归一至相同的光谱背景,通过参考光谱与待测光谱的特征值比较,提取特征谱段的峰谷位置,比较分析相关系数。

2.3 峰谷位置的提取

在提取光谱峰谷位置时,首先需要确定光谱的峰和谷。实验表明,当光谱分辨率为5 nm时,以点密度10、间隔数2提取的光谱峰、谷效果最好。在特征谱段范围内,如果某个位置 i 的反射率 $p(i)$ 左、右均有10个点的反射率值大于 $p(i)$ 值,且分别依次递减和递增,则判定为一个谷;反之,则判断为一个峰(图2)。

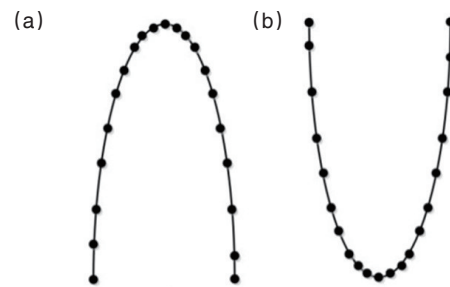


图2 光谱峰(a)和谷(b)的确定方式

Fig. 2 Determination of the spectral peak (a) and valley (b)

2.4 相关性因子阈值设定

参考光谱峰谷位置提取后会得到若干个峰谷。首先,计算待测光谱与野外参考光谱在其每一峰、谷处的相关系数 r ,统计平均值 r_1 ;同理,计算待测光谱与USGS参考光谱在其每一个峰、谷处的相关系数,统计计算其平均值 r_2 ,最终得到该算法模型的阈值 $TV=(r_1+r_2)/2$ 。通常,可将这一阈值作为某特定矿物相关系数模型的初始阈值,但在实际使用过程中,可根据实测数据的统计结果逐步调整阈值,使其更加合理。

2.5 待测光谱识别流程

将参考光谱、待测光谱包络线消除归一化后,计算参考光谱在其每一个峰、谷与待测光谱相应谱段处的相关系数 r ;若同种矿物所有参考光谱与待测光谱的相应谱段相关系数 $r >$ 阈值 TV ,认为待测光谱与参考光谱一致,待测光谱判定为“通过”;反之则为“未通过”,即待测光谱与参考光谱不一致。

3 应用与评价

3.1 算法应用

本文选取甘肃北山方山山口地区典型矿床拾金坡金矿区为研究区,该矿床位于北山南带柳园矿床集中区的北部,坐标范围:东经94°59'30"E~95°2'30"E,北纬41°10'N~41°11'40"N。该金矿床规模较大、品位较富。实验数据来自2010年8月17日—10月16日采集的北山方山山口地区CASI/SASI航空

高光谱数据,识别前对该数据进行去除噪声、坏波段、大气校正、辐射校正等一系列预处理。

基于峰谷位置的提取算法提取的参考光谱特征峰谷位置见表2。采用光谱峰谷相关系数法,将航空高光谱图像端元光谱与参考光谱的相关系数进行统计分析,计算得到的阈值为93.45%,其矿物识别结果见图3。

3.2 精度评价

分析研究区的矿物识别结果,结合野外地面验证,发现采用光谱峰谷相关系数法能够识别研究区多数地段的蚀变矿物(图3中彩色填充区域),而且提取的蚀变矿物准确性和吻合度较高,识别精度达到85%。

为计算光谱峰谷相关系数法的准确率,将其与已有典型算法(光谱特征拟合、光谱信息散度、光谱角匹配)的识别结

表2 研究区蚀变矿物参考光谱特征峰谷位置诊断标志

Table 2 Study area alteration mineral reference spectrum characteristic peak valley position

矿物名称 氧化物	特征峰谷位置/nm	
	反射峰	吸收谷
绢云母1	2065, 2278	2110, 2343, 2445
绢云母2	2075, 2275	2125, 2345, 2440
绢云母3	2070, 2280	2120, 2340, 2444
绢云母4	2072, 2276	2111, 2335, 2438
绢云母5	2068, 2270	2115, 2336, 2435
绢云母6	2066, 2275	2110, 2338, 2437
绢云母7	2063, 2272	2112, 2339, 2430
绢云母8	2060, 2274	2105, 2330, 2436
绿泥石1	2275, 2407	2115, 2325, 2386
绿泥石2	2275, 2355	2105, 2325, 2386
绿泥石3	2085, 2400	2055, 2245, 2325
绿泥石4	2095, 2418	2065, 2255, 2325
绿泥石5	2085, 2418	2065, 2245, 2325
绿泥石6	2095, 2418	2085, 2255, 2325
绿泥石7	2142, 2274	2118, 2253, 2338
绿泥石8	2139, 2273	2116, 2253, 2340
方解石1	2180, 2383	2157, 2335
方解石2	2057, 2385	2165, 2334
方解石3	2080, 2387	2160, 2335
方解石4	2066, 2382	2158, 2334
方解石5	2091, 2386	2158, 2337
方解石6	2097, 2385	2157, 2335
方解石7	2085, 2400	2165, 2335
方解石8	2075, 2400	2155, 2335
褐铁矿1	750	500, 700, 850
褐铁矿2	760	500, 670, 830
褐铁矿3	750	480, 660, 800
褐铁矿4	720	490, 660, 820
褐铁矿5	770	485, 665, 820
褐铁矿6	760	495, 680, 825

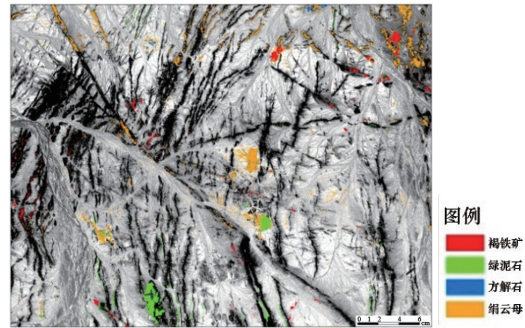


图3 研究区航空高光谱蚀变矿物分布图

Fig. 3 Airborne hyperspectral alteration mineral distribution map in the study area

果进行了对比,通过混淆矩阵对各算法蚀变矿物进行统计分析。评价各算法的矿物分类结果精度见表3。

表3 各算法的综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation table of various algorithms

算法类型	CASI/SASI 数据	
	精度/%	运算速度
光谱特征拟合	78	较快
光谱信息散度	67	较慢
光谱角匹配	78	较快
峰谷相关系数法	85	快

4 结论

1) 矿物光谱曲线典型特征谱带峰谷位置(波长)是光谱相对稳定的特征参量,光谱峰谷位置的提取,可实现矿物识别从不稳定性参量向稳定性参量的转变,从而提高矿物识别的精度。

2) 相关系数法可作为判别和比对光谱曲线相关性的有效数学方法。峰谷相关系数法建立了光谱稳定参量(峰谷位置)的算法模型,实现了峰谷相关系数法的高光谱矿物识别的技术流程。

3) 以甘肃北山方山口地区采集的CASI/SASI航空高光谱数据为例,应用光谱峰谷相关系数法研究该地区的高光谱遥感矿物识别,其识别结果与野外地面验证结果、地质资料一致性较好,识别准确率明显优于已有典型算法。

参考文献(References)

[1] 王润生,甘甫平,闫柏琨,等.高光谱矿物填图技术与应用研究[J].国土资源遥感,2010(1):1-13.
Wang Runsheng, Gan Fuping, Yan Bokun, et al. Hyperspectral mineral mapping and its application[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010(1): 1-13.

[2] 李浩杰,常晓珂.敦煌白山地区遥感蚀变信息提取与分析[J].资源环境与工程,2016,30(1):114-118.
Li Haojie, Chang Xiaoke. Extraction and analysis of information of remote sensing alteration of Dunhuang Baishan area[J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(1): 114-118.

- [3] 唐攀科, 李永丽, 李国斌, 等. 成像光谱遥感技术及其在地质中的应用[J]. 矿产与地质, 2006, 20(2): 160-165.
Tang Panke, Li Yongli, Li Guobin, et al. Imaging spectrometry remote sensing technology and its applications in geology[J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(2): 160-165.
- [4] 田丰. 全波段(0.35~25 μm)高光谱遥感矿物识别和量化反演技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
Tian Feng. Identification and quantitative retrieval of minerals information integrating VIS-NIR-MIR-TIR(0.35~25 μm) hyperspectral data[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [5] 李楠, 肖克炎, 陈析缪, 等. 基于Hyperion高光谱数据的矿物蚀变提取—以内蒙古西部狼山地区炭窑口矿床为例[J]. 地质通报, 2010, 29(10): 1558-1563.
Li Na, Xiao Keyan, Chen Xiqiu, et al. Mineralizing alteration extraction based on hyperion hyper-spectral data-taking Tanyaokou deposit, Inner Mongolia, China as an example[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(10): 1558-1563.
- [6] Bo D, Yu X Z, Liang P Z, et al. A hypothesis independent subpixel target detector for hyperspectral images[J]. Signal Processing, 2015, 110: 244-249.
- [7] 昊浩, 徐元进, 高冉. 基于光谱相关角和光谱信息散度的高光谱蚀变信息提取[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(1): 44-48.
Wu Hao, Xu Yuanjin, Gao Ran. Extraction of alteration information from hyperspectral imagery based on SCA and SID[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(1): 44-48.
- [8] 杨燕杰, 赵英俊. 航空成像光谱的蚀变信息提取技术[J]. 科技导报, 2011, 29(23): 57-61.
Yang Yanjie, Zhao Yingjun. Extraction of alteration information based on airborne hyperspectral image[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(23): 57-61.
- [9] 周强, 甘甫平, 王润生, 等. 高光谱遥感影像矿物自动识别与应用[J]. 国土资源遥感, 2005(4): 28-31.
Zhou Qiang, Gan Fuping, Wang Runsheng, et al. Mineral auto-identification based on hyperspectral imaging data and its application[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2005(4): 28-31.
- [10] 牛志宇, 赵慧洁. 基于光谱知识的高光谱图像自动识别方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(2): 280-284.
Niu Zhiyu, Zhao Huijie. Automatic recognition of hyperspectral image based on spectral knowledge[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(2): 280-284.
- [11] Van der Meer F. The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006, 8(1): 3-17.
- [12] Baugh W M, Kruse F A, Atkinson W W. Quantitative geochemical mapping of ammonium minerals in the southern cedar mountains, Nevada, using the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 292-308.
- [13] 甘甫平, 王润生, 马蔼乃. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J]. 地学前缘, 2003, 10(2): 445-454.
Gan Fuping, Wang Runsheng, Ma Ainai. Spectral identification tree (sit) for mineral extraction based on spectral characteristics of minerals [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(2): 445-454.
- [14] 余先川, 熊利平, 徐金东, 等. 基于二次散射非线性混合模型的矿物填图方法[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 60-68.
Yu Xianchuan, Xiong Liping, Xu Jindong, et al. Mineral mapping based on secondary scattering mixture model[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(2): 60-68.
- [15] 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(1): 1-9.
Wang Runsheng, Yang Suming, Yan Bokun. A review of mineral spectral identification methods and models with imaging spectrometer[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007(1): 1-9.
- [16] 甘甫平, 王润生, 江思宏, 等. 基于完全谱形特征的成像光谱遥感岩矿识别技术及其应用[J]. 地质科学, 2000, 35(3): 376-384.
Gan Fuping, Wang Runsheng, Jiang Sihong, et al. Discrimination technique for rocks or ore deposits based on the feature of full spectral shape using hyperspectral remote sensing and its application[J]. Science Geologica, 2000, 35(3): 376-384.

Study on hyperspectral mineral identification based on characteristic spectrum peak-valley correlation coefficient method

CHE Yongfei, ZHAO Yingjun

National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Imagery Analyzing Technology; Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

Abstract The stability of the spectrum parameters (width, depth and shape) in a mineral spectrum identification under different influencing factors is greatly influenced by the identification effects. It is shown that the positions of the peak and the valley of different minerals in the characteristic spectrum are more stable, and they are relatively stable characteristic parameters of the spectrum. This paper proposes a hyperspectral mineral identification algorithm based on the characteristic spectrum peak-valley correlation coefficient method, and the mathematical model and the operation flowchart of extracting the spectral stability parameters (the locations of the peak and the valley) are established. The algorithm is based on the extraction of the reference spectra peak-valley positions, and the calculations of the peaks and the valleys of minerals characteristic spectrum and the correlation coefficient of the corresponding measured mineral spectrum, to determine whether they exceed the thresholds, as the main basis of comparison of the similarity degree of mineral spectra. Gansu Beishan Shijinpo gold mining is taken as the study area, using the CAIS/SASI airborne hyperspectral data, and the algorithm is used to identify the regions of alteration minerals, and the results are compared with those obtained with the existing typical algorithms (SFF, SID, SAM). It is shown that the correct recognition rate of the algorithm is higher, and the accuracy of the algorithm can reach 85%.

Keywords hyperspectral remote sensing; characteristic spectrum; peak-valley correlation coefficient method; mineral information identification

(编辑 韩丹岫)