

基于改进光谱特征拟合算法的高光谱数据矿物信息提取

许宁^{1,2}, 胡玉新^{1,2}, 雷斌^{1,2}, 洪友堂³, 党福星⁴

1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080
2. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100080
3. 中国地质大学(北京)土地科学与技术学院, 北京 100083
4. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

摘要 根据光谱特征拟合算法在实际应用中存在的问题, 介绍一种改进光谱特征拟合算法, 该算法综合常规的特征拟合处理和地物光谱吸收特征参量约束为一体, 能更细致地进行高光谱数据地物信息提取。实验基于不同空间分辨率和信噪比的高光谱数据, 编程实现改进光谱特征拟合算法对实验区的白云母、方解石、绿泥石等蚀变矿物信息提取, 与常规光谱特征拟合和光谱角制图处理结果的比较分析发现改进算法在矿物混淆区分、信息提取精细度上均得到提高, 有较强的实用性。

关键词 高光谱遥感; 光谱特征拟合; 光谱角制图; 矿物信息提取

中图分类号: TP75 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)061639-05

引言

高光谱遥感是空间信息获取领域的一个重要发展方向, 其特点是同时获得地物空间域图像和光谱域连续光谱特征, 可以定量地分析地表地物的组成成分^[1,2]。常用的高光谱数据信息提取技术包括基于光谱空间的光谱特征分析技术和基于特征空间的像元向量分析技术, 前者常用的算法有光谱特征拟合^[3] (spectral feature fitting, SFF)、光谱吸收指数^[4] (spectral absorption index, SAI)、包络线去除^[5,6]、光谱导数分析^[1]等, 而后者较成熟的算法有光谱角制图^[7,8] (spectral angle mapping, SAM)、单形体分析^[9,10]、纯净像元指数^[11,12] (pixel purity index, PPI)、正交子空间投影^[13,14] (orthogonal subspace projection, OSP)等。其中SFF, SAM和PPI等算法已集成到常用的商业软件中(如ENVI)并得到广泛应用。

目前, 高光谱遥感技术已经在地质勘探、国土资源调查、城市监测和规划、植被分析、海洋监测、环境污染^[15]、油气探测^[16]等领域发挥了巨大的作用^[1,2]。本文基于地质领域一些蚀变矿物在短波红外区域的光谱吸收特征, 针对高光谱遥感数据不同信噪比条件下的光谱特征差异以及常规SFF算法存在的问题, 引入一种改进的光谱特征拟合算法来进行影像光谱与目标参考光谱的匹配计算, 以此提取试验区矿物

信息, 并与常规的SAM和SFF方法以及国内外已有的研究成果进行分析比较, 结果表明该方法具有较强的可行性和实用性。

1 常用的光谱特征分析技术

光谱特征分析方法已经在遥感领域得到了广泛应用。从早期多光谱到现在的高光谱遥感, 光谱分辨率得到很大提高, 地表地物光谱特征的测度更加细致, 对地物特性的描述更准确, 这促使在地球化学领域常用的光谱分析技术在高光谱遥感研究中得到充分应用, 并研究发展了许多新的算法, 其中光谱特征参量分析^[1]、包络线去除处理和光谱吸收指数是比较常用的高光谱遥感数据光谱特征分析技术。

2 光谱特征拟合算法

2.1 SFF算法原理

为了突出某个波长范围的光谱吸收特征, 在进行SFF处理之前会对像元光谱和参考光谱进行包络线消除处理^[3,17], 由于去包络线后的像元光谱和参考光谱在特征吸收深度上存在差异, 可以通过增加一个常量 k 来调整参考光谱的曲线形状, 以最好地和像元光谱进行拟合匹配, 计算公式如下

$$\hat{\rho} = (\rho + k) / (1.0 + k) \quad (1)$$

收稿日期: 2010-08-13, 修订日期: 2010-11-12

基金项目: 国家(863计划)重点项目(2008AA121103)和中国地质大调查项目(1212010816033)资助

作者简介: 许宁, 1982年生, 中国科学院电子学研究所研究实习生, e-mail: x_ning520@yahoo.cn

其中 ρ' 为经过变换的参考光谱特征曲线, ρ 为参考光谱的原光谱特征曲线(在这里 ρ' 和 ρ 都经过包络线去除处理), k 为一常数且 $k \neq -1$ 。

上式可以变换为 $\rho' = a\rho + b$, 其中 $a = 1.0 / (1.0 + k)$, $b = k / (1.0 + k)$ 。现在已知一组光谱吸收特征范围内的参考光谱反射率 ρ_i 和像元光谱反射率 P_i (i 为波段号), 为获得它们的最佳拟合, 即经过变换的 $\rho'_i = a\rho_i + b$ 和 P_i 最佳拟合, 利用最小二乘原理, 需要

$$\sum (P_i - (a\rho_i + b))^2 = \min \quad (2)$$

由极值原理, 解式(2)得

$$a = \frac{n \sum P_i \rho_i - \sum P_i \cdot \sum \rho_i}{n \sum \rho_i^2 - \left(\sum \rho_i \right)^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum P_i}{n} - \frac{a \sum \rho_i}{n} \quad (4)$$

得到系数 a 和 b 为参考光谱和像元光谱的最小二乘拟合系数, 现通过计算 ρ 和 P 的相关系数 f 来表示两种光谱的拟合度,

$$f = \frac{\text{Cov}(P, \rho)}{\sqrt{D(P) \cdot D(\rho)}} = \sqrt{aa'} \quad (5)$$

其中:

$$a' = \frac{n \sum P_i \rho_i - \sum P_i \cdot \sum \rho_i}{n \sum P_i^2 - \left(\sum P_i \right)^2} \quad (6)$$

计算 f 的同时, 可以获得每个像元光谱和参考光谱的误差大小, 通常用均方根误差 (root mean square, RMS) 来表示。将式(3)和(4)代入式(2)并求得

$$\text{rms} = \sqrt{(1 - f^2) \cdot D(P)} \quad (7)$$

最后可设定阈值, 大于该阈值的像元光谱可判定为目标地物, 而小于该阈值的像元光谱滤过, 也可通过相关系数与均方根误差的比值来反映光谱特征匹配程度。

2.2 多参量综合处理

光谱特征拟合算法首先进行参考光谱和像元光谱特征波段的包络线处理, 有时会造成一些光谱吸收特征相差较大原始光谱在进行包络线去除后形状相近, 从而通过 SFF 计算得到拟合系数较大, 这显然是一种误判。如图 1 所示, (a) 为斧石和蛭石在波长在 2.32~2.48 μm 范围内 28 个波段的吸收光谱特征, 其中斧石 (Axinite) 反射率呈左低右高, 而蛭石 (Vermiculite) 呈左高右低; 在进行包络线去除处理之后, 利用最小二乘拟合处理得到两种矿物的光谱特征如图 1(b) 所示, 其中常数 k [式(1)] 为 2.59293, 其拟合度达到 0.932466。

为了解决类似问题, Clark 等^[17] 设计研发了一套专家系统, 考虑了多种因素和算法, 并通过加权的方式得到最后的综合拟合度, 处理过程相对比较复杂。在实际应用中可以根据所提取地物光谱特征进行光谱特征参量的筛选, 本文在 SFF 基础上针对地质应用特点考虑增加 (1) 多个光谱吸收特征; (2) 吸收谷波长位置; (3) 吸收深度等特征参量进行综合计算处理。

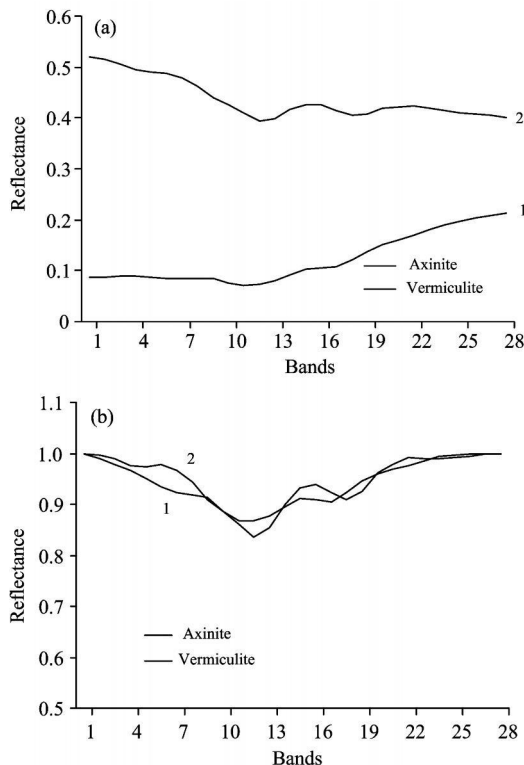


Fig 1 A drawback of spectral feature fitting (SFF)

(a): Spectra of vermiculite and axinite;

(b): SFF result of two spectra

1: Axinite; 2: Vermiculite

2.3 改进算法流程

为便于处理结果的验证, 本文根据先验知识选择试验区可能存在的矿物进行处理, 而光谱特征参量的选择可以根据矿物特点而定。下面是本次实验算法的处理流程:

(1) 针对特定目标光谱特征选择合适的光谱范围进行处理, 通常选择目标地物的光谱吸收特征波段。

(2) 逐像元对高光谱数据像元光谱和目标实验室光谱 (参考光谱) 分别进行包络线去除处理, 得到经过处理的像元诊断特征光谱 P 和参考诊断特征光谱 ρ 。

(3) 在选择的光谱范围内, 进行逐像元的 SFF 特征分析, 并同时计算两种光谱特征曲线的所选择的特征参量。

(4) 采用限制阈值条件计算每个像元的综合拟合值 [式(8)]。

$$sf f' = \begin{cases} f & \text{ref}_i \in \text{thr}_i \\ 0 & \text{ref}_i \notin \text{thr}_i \end{cases} \quad (8)$$

其中 f 为拟合度, ref_i 为所选光谱参量, thr_i 为阈值。

(5) 设置阈值进行判断。如果拟合度大于设定阈值, 所选光谱参量满足要求, 则认为某像元为所选目标, 否则滤过 (可选步骤)。

(6) 如果待处理像元数小于影像总像元数, 则进入(2)。

(7) 处理完成后, 选择另一种目标参考光谱进行处理, 进入(1)。

3 实验结果及分析

3.1 实验 1(机载 AVIRIS 数据)

实验 1 采用 ENVI 自带的美国 Cuprite 地区 1996 年机载 AVIRIS 高光谱数据为数据源, 其包括光谱范围为 $1.991 \sim 2.479 \mu\text{m}$ 的 50 个波段, 为经过大气校正处理数据。AVIRIS 数据具有光谱分辨率、信噪比和空间分辨率较高的特点, 在实际研究、生产中得到了广泛应用; 而美国 Cuprite 地区是遥感地质应用的典型示范区^[17-19], 其地质背景为大家所知。

根据该地区矿物的存在情况, 选择 USGS 光谱库中明矾石、方解石、白云母的实验光谱作为参考光谱(如图 2 所示)。选择明矾石(alunite)的特征光谱范围为 $1.99 \sim 2.36 \mu\text{m}$, 方解石(calcite)的特征范围为 $2.07 \sim 2.40 \mu\text{m}$, 白云母(muscovite)的特征范围为 $2.07 \sim 2.39 \mu\text{m}$ 。实验首先基于 ENVI 软件的 SFF 模块进行处理, 处理过程中选择相应的吸收特征范围, 以得到更好的拟合精度。而在 SFF 改进算法中通过 IDL 编程选择吸收谷波长和吸收深度作为特征参量进行综合处理。为检验该方法的正确性, 本次实验还采用常规的 SAM 方法对实验区进行了相关矿物信息的提取, 为便于对比分析, SAM 采用前两种方法相同的吸收特征区间, 光谱角阈值经优选设置为 0.07 弧度。

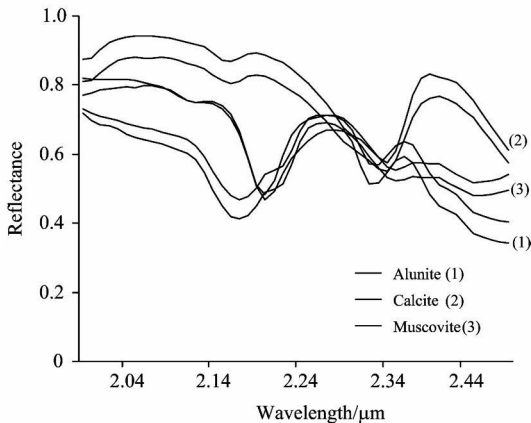


Fig 2 Laboratory spectra of three minerals

处理结果如图 3 所示, 其中图(a)是 AVIRIS 数据的彩色合成影像, 图(bi)为提取明矾石信息, 图(ci)为方解石, 图(di)为白云母。图(b1), (c1)和(d1)是 ENVI 软件 SFF 算法处理的结果, 图(b2), (c2)和(d2)是采用 SAM 处理的结果, 而图(b3), (c3)和(d3)是本次算法处理的结果。可以看出, SFF 法获取了整幅影像数据和参考光谱的拟合度, 该方法只计算一个拟合度指标, 处理结果只体现拟合程度, 还需要后续处理(如图 1); 经典 SAM 算法在本次试验中经过多次阈值尝试, 其局限性在于阈值的确定, 结果表达也稍显单一; 而改进算法在计算像元光谱和参考光谱拟合度同时, 对光谱特征参考进行了一定的约束, 使处理结果更可靠。从结果的对比看, 三种算法处理的结果相似, 与前人的研究成果一致, 本次算法不仅具有提取结果的“拟合丰度”, 还压制了一些干扰信息, 具有一定的实用性。

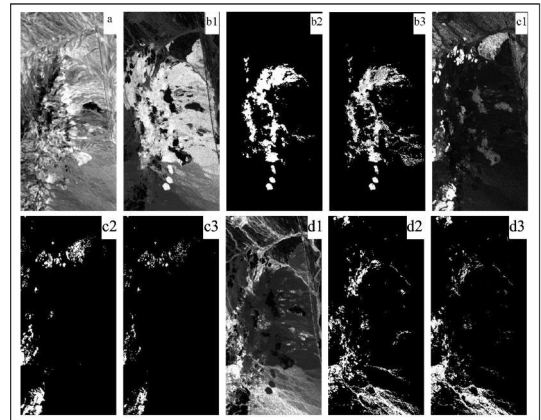


Fig 3 Mineral information extracted by SFF (1), SAM (2) and modified SFF (3) algorithm

(a): RGB image; (b): Alunite;

(c): Calcite; (d): Muscovite (AVIRIS)

3.2 实验 2(星载 Hyperion 数据)

为验证该方法的有效性, 实验 2 选择中国新疆东天山地区的 2003 年星载高光谱数据为数据源。首先对下载数据进行波段选择、坏线去除、条纹修复、大气校正等预处理^[20], 获得实验区的高光谱反射率数据。相对于 AVIRIS 遥感数据而言, Hyperion 数据在信噪比和空间分辨率上稍逊一筹, 并且波长大于 $2.395 \mu\text{m}$ 的波段数据缺失(未定标数据)。

根据前人在东天山地区的研究成果^[21, 22], 在该区主要分布着云母(Muscovite)、蛇纹石(Serpentine)、方解石(Calcite)、绿帘石(Epidote)及绿泥石(Chlorite)等蚀变矿物。本实验将基于云母、方解石和绿泥石(处理结果该区无绿帘石)这三种矿物的信息提取展开工作。首先选择 Hyperion 数据短波红外 $2.002 \sim 2.395 \mu\text{m}$ 范围波段[如图 4(a)所示], 在该波长范围存在这三种矿物的光谱吸收特征, 为便于对比, 试验 2 将基于试验 1 中三种方法进行处理。白云母选择光谱吸收光谱范围 $2.082 \sim 2.395 \mu\text{m}$, 方解石光谱吸收范围 $2.113 \sim 2.395 \mu\text{m}$, 绿泥石选择光谱吸收范围 $2.214 \sim 2.395 \mu\text{m}$, 图 4 为三种方法处理结果, 其中(bi)为白云母信息, (ci)为方解石信息, (di)为绿泥石信息, (b1), (c1)和(d1)为 SFF 法, (b2), (c2)和(d2)为 SAM 法, (b3), (c3)和(d3)为改进 SFF 法。

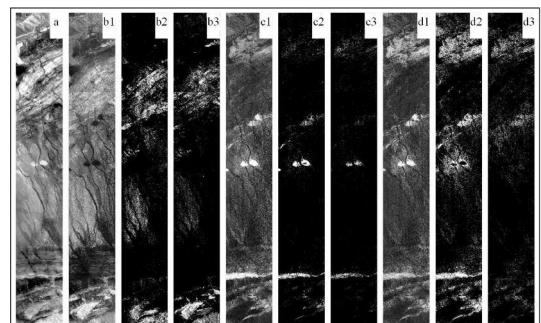


Fig 4 Mineral information extracted by SFF (1), SAM (2) and modified SFF (3) algorithm

(a): RGB image; (b): Alunite;

(c): Calcite; (d): Muscovite (Hyperion)

从处理结果可知, SFF 法提取结果相对较粗, 还需要进行后续处理, 并且在方解石和绿泥石的区分上存在较大误差; SAM 提取结果较细, 但阈值设置上需要多次实验; 而改进 SFF 法由于融入吸收波谷位置、吸收深度处理条件, 提取结果相对较少, 但结果不仅给出提取的矿物信息, 还反映矿物的拟合度(在影像上显示为明暗程度不同)。从处理结果精度上来看, 提取方解石和绿泥石 SFF 和 SAM 都出现混淆, 其中 SFF 混淆最大(图 c1 和 d1), SAM 法影像中下部混淆(图 c2 和 d2), 而改进 SFF 法中很好地对这两种矿物进行了区分(图 c3 和 d3)。通过这两种矿物光谱分析可知, 方解石和绿泥石在短波红外范围 2 325 μm 附近吸收谷相似, 但在 2 244 μm 附近的小吸收波谷及吸收深度的差异成为区分这两种矿物的有效方法。

4 小 结

本文首先介绍 SFF 算法原理, 指出 SFF 算法在实际应用中存在的问题, 并针对特定矿物在一定波长范围的光谱吸

收特征, 引入约束算法, 增加吸收谷波长值、光谱吸收深度等光谱参量作为限制条件, 以此来获取更为准确的矿物信息。

基于美国 Cuprite 地区的机载 AVIRIS 及中国新疆地区星载 Hyperion 高光谱遥感数据, 利用改进的 SFF 算法对这些地区的白云母、方解石、绿泥石等矿物进行信息提取, 并与 SFF 和 SAM 算法提取的结果进行对比分析, 发现改进 SFF 算法在矿物细节区分上更细致, 矿物信息的度量上也具有 SFF 的优点。对不同空间分辨率、不同信噪比高光谱数据的应用发现该方法具有较强的稳定性和实用性。

同 SAM 算法相似, 在使用改进 SFF 算法之前也需要进行高光谱遥感数据预处理, 其中大气校正的效果至关重要。并且处理过程中需要根据不同地物的光谱吸收特点, 对改进 SFF 算法设置一些光谱特征参量阈值, 这是该算法仍存在的问题。

致谢: 感谢美国 USGS 提供新疆东天山地区免费 Hyperion 遥感数据, 感谢评审专家为本文提出修改意见。

References

- [1] TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHENG Lar-fen (童庆禧, 张兵, 郑兰芬). Hyperspectral Remote Sensing: Principle, Technology and Application(高光谱遥感—原理、技术与应用). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2006. 206.
- [2] PU Ruiliang, GONG Peng(浦瑞良, 宫鹏). Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications(高光谱遥感及其应用). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2000. 1.
- [3] Clark R N, Swayze G, Gorelick G. Proceedings of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publication, 1991, 42: 2.
- [4] WANG Jir-nian, ZHENG Lar-fen, TONG Qing-xi(王晋年, 郑兰芬, 童庆禧). Remote Sensing of Environment China(环境遥感), 1996, 11(1): 20.
- [5] Clark R N, Roush T L. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 6329.
- [6] XU Yuan-jin, HU Guang-dao, ZHANG Zhen-fei(徐元进, 胡光道, 张振飞). Geography and Geo Information Science(地理与地理信息科学), 2005, 21(6): 11.
- [7] Yuhas R H, Goetz A F H, Boardman J W. Summaries of the 4th JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication, 1992, 92: 147.
- [8] Kruse F A, Boardman J W, Lefkoff A B, et al. Remote Sensing of Environment, 1993, 44: 145.
- [9] Boardman J W. 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Pub., 1993, 26(1): 11.
- [10] Chang G I, WU Cha-cheng, LIU Wei-min, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2804.
- [11] Boardman J W. Proc Int Geoscience and Remote Sensing Symp., 1994, 4: 2369.
- [12] Chang G I, Plaza A. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 63.
- [13] Harsanyi J C, Chang G I. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 779.
- [14] Chang G I. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(3): 502.
- [15] Choe E, van der Meer F, van Ruitenbeek F, et al. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 3222.
- [16] XU Da-qi, NI Guo-qiang, JIANG Li-li, et al. Advances in Space Research, 2008, 41: 1800.
- [17] Clark R N, Swayze G A, Livo K E, et al. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(E12): 5131.
- [18] Hook S J, Elvidge C D, Rast M, et al. Geophysics, 1991, 56(9): 1432.
- [19] Kruse F A, Boardman J W, Huntington J F. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1388.
- [20] TAN Bing-xiang, LI Zeng-yuan, CHEN Er-xue, et al(谭炳香, 李增元, 陈尔学, 等). Remote Sensing Information(遥感信息), 2005, 6: 35.
- [21] LONG Bao-lin, XUE Ying-xi, FENG Jing, et al(龙保林, 薛迎喜, 冯京, 等). Chinese Geology(中国地质), 2001, 28(5): 35.
- [22] YANG Jian-min, ZHANG Yu-jun, CHEN Wei, et al(杨建民, 张玉君, 陈薇, 等). Mineral Deposits(矿床地质), 2003, 22(3): 278.

Mineral Information Extraction for Hyperspectral Image Based on Modified Spectral Feature Fitting Algorithm

XU Ning^{1,2}, HU Yuxin^{1,2}, LEI Bin^{1,2}, HONG Youtang³, DANG Fuxing⁴

1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2. Key Laboratory of Technology in Geo Spatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

3. Department of Land Sciences and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

4. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China

Abstract Spectral feature fitting (SFF) algorithm has been frequently used since 1990s. A modified spectral feature fitting method is introduced here, which can solve some drawback of the general algorithm. The method mentioned here combines SFF with user defined constraints in spectral absorption feature to extract more accurate target information from hyperspectral image. Two experiments are presented herein, in which three algorithms are used to obtain mineral information from hyperspectral data with different space resolution and SNR. Muscovite, calcite and chlorite etc. are extracted by general SFF, modified SFF and spectral angle mapping (SAM) respectively, and the result indicates that modified SFF algorithm is more effective in differentiating subtle spectral feature and obtaining accurate mineral information. The experiments also demonstrate that the algorithm mentioned here is validated in mineral information extraction.

Keywords Hyperspectral remote sensing; Spectral feature fitting(SFF); Spectral angle mapping(SAM); Mineral information extraction

(Received Aug. 13, 2010; accepted Nov. 12, 2010)