



植被覆盖区老旧矿山边部遥感蚀变信息提取技术探讨

尹 展¹, 张建国¹, 陈星霖¹, 张利军²

1. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012; 2. 湖南省遥感地质调查监测所, 湖南 长沙 410083

摘 要: 植被覆盖区基岩裸露少, 围岩蚀变信息微弱。为在老旧矿山边部开展找矿工作, 通过不同方法实验, 最后采用植被抑制+岩土体光谱测试组合技术完成蚀变信息提取。该方法首先运用强迫不变植被抑制技术降低植被干扰, 其次采集已有矿山蚀变围岩及蚀变带岩土体光谱信息并建立研究区光谱样本库, 最后采用 CART 决策树分类技术完成蚀变信息提取。实验证明, 基于植被抑制技术的 CART 决策树分类蚀变信息提取方法在植被覆盖区老旧矿山边部遥感蚀变信息提取效果较好。

关键词: 遥感; 蚀变信息; 光谱曲线; 植被抑制; CART 决策树; 老旧矿山

ALTERATION INFORMATION EXTRACTION BY REMOTE SENSING TECHNOLOGY AROUND OLD MINES IN VEGETATION-COVERED AREAS

YIN Zhan¹, ZHANG Jian-guo¹, CHEN Xing-lin¹, ZHANG Li-jun²

1. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China;

2. Hunan Remote Sensing Geological Survey and Monitoring Institute, Changsha 410083, China

Abstract: The wall rock alteration information in vegetation-covered areas is weak due to less exposed bedrock. To carry out prospecting work in the surroundings of old mines, after a series of experiments by different methods, the combined technology of vegetation suppression and rock-soil mass spectrum test is finally chosen for alteration information extraction. Firstly, the forcing invariant vegetation suppression technique is used to reduce vegetation interference, then the spectral information of altered wall rock and rock mass in altered zone of the existing mine is collected to establish a spectral sample library in the study area, and finally the extraction of alteration information is completed by CART (classification and regression tree) technique. The experiment results show that the CART alteration information extraction method based on vegetation suppression technique is effective in the extraction of remote sensing alteration information around old mines in vegetation-covered areas.

Key words: remote sensing; alteration information; spectral curve; vegetation suppression; CART; old mine

0 引言

遥感蚀变信息提取作为找矿预测新方法, 在基岩裸露区开展了大量卓有成效的试验研究, 其快速、有

效、经济的特点为业内专家所认同^[1-4]。植被区蚀变信息提取也有较多有益探索, 取得了一些进展^[5-6]。目前蚀变信息提取方法主要有主成分分析^[7]、波段比值

收稿日期: 2022-12-14; 修回日期: 2023-02-24。编辑: 张哲。

基金项目: 湖南省自然资源厅地质勘查项目“湖南省雪峰弧形成矿带转折段遥感信息提取及找矿靶区优选”(20200806)。

作者简介: 尹展(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事遥感地质方面的研究工作, 通信地址 北京市朝阳区安外北苑五号院四区, E-mail/202yz@163.com

法^[8]、光谱角法^[9],各有特点:主成分分析采用降维方式,将图像中各个波段高度相关的信息集中到少数的几个波段;光谱角法实质上是一种光谱匹配技术,通过评估对象像元光谱与样本像元光谱相似性来区分蚀变矿物;波段比值利用波段对矿物的吸收反射特征作比值运算,达到突出特征信息的目的.从前人研究成果看,主成分分析法完成变量间的去相关,减少了数据重复和冗余,且实现简单、效果稳健,优于一般的比值法和光谱角法.在已知矿点附近提取信息中,光谱角法可以充分利用已知矿点光谱信息,减少主成分分析中非矿异常^[10],但光谱角法仅考虑谱形,很难区分“同谱

异物”现象.限于单一蚀变信息提取方法无法满足提取要求,有研究人员利用主成分分析、比值法、光谱角法识别等多重方法综合提取遥感蚀变异常^[11].

不同的蚀变信息提取方法都绕不开一个技术难题,即干扰信息去除.遥感蚀变异常中往往夹杂大量干扰信息(也称为假异常),主要由植被、第四系、阴影、河流、云雾等因素干扰引起.干扰因素去除目前较为常用的有 MPH 技术(掩膜+主成分变换+彩色空间变换)^[12]、多层次分离技术^[13]、分形和多重分形理论^[14].MPH 技术具有简单、快速、实效的特点;多层次分离技术通过设计不同分离模型,选择出最优波段和最佳干

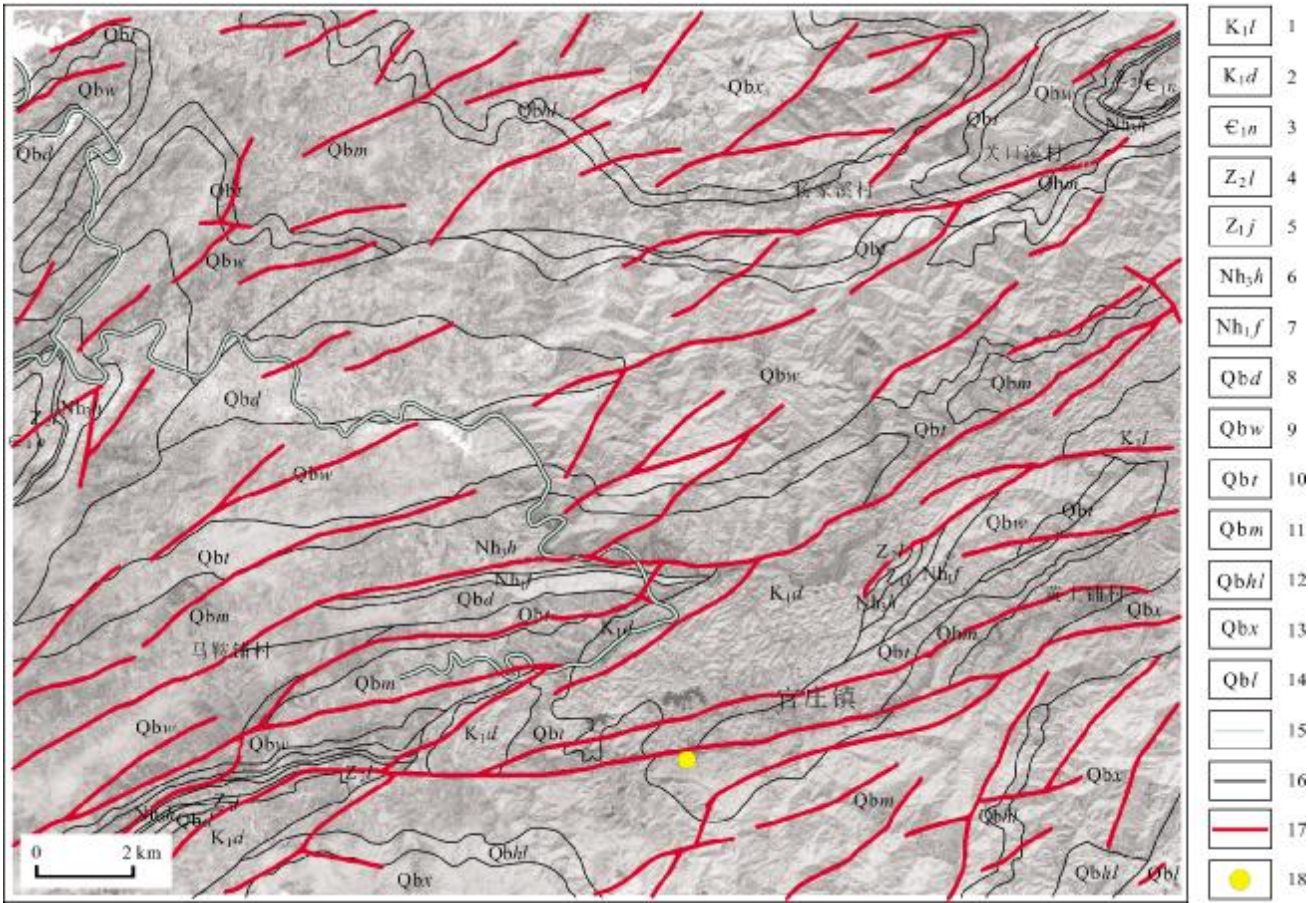


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1—下白垩统栏陇组 (Lower Cretaceous Lanlong fm.); 2—下白垩统东井组 (Lower Cretaceous Dongjing fm.); 3—寒武系组芬兰统牛蹄塘组 (Cambrian Terreneuvian Niutitang fm.); 4—上震旦统留茶坡组 (Upper Sinian Liuchapo fm.); 5—下震旦统金家洞组 (Lower Sinian Jinjiadong fm.); 6—上南华统洪江组 (Upper Nanhua ser. Hongjiang fm.); 7—下南华统富禄组 (Lower Nanhua ser. Fulu fm.); 8—青白口系板溪群多益塘组 (Duoyitang fm. of Banxi gr., Qingbaikou sys.); 9—板溪群五强溪组 (Wuqiangxi fm. of Banxi gr.); 10—板溪群通塔湾组 (Tongtawan fm. of Banxi gr.); 11—板溪群马底驿组 (Madiyi fm. of Banxi gr.); 12—板溪群横路冲组 (Hengluchong fm. of Banxi gr.); 13—青白口系冷家溪群小木坪组 (Xiaomuping fm. of Lengjiaksi gr., Qingbaikou sys.); 14—冷家溪群雷神庙组 (Leishenmiao fm. of Lengjiaksi gr.); 15—河流 (river); 16—地质界线 (geological boundary); 17—线性构造解译 (RS interpreted linear structure); 18—沃溪金矿位置 (location of Woxi gold deposit)

扰分离方法;分形理论能较好地表征复杂地质背景下的地质异常。由于“同物异谱”现象存在,不同地理位置的同一类矿物也会出现不同光谱形态,而已有去干扰实验较少结合研究区实测光谱进行分析。针对植被覆盖区蚀变信息提取的难点,本文在参考前人研究成果的基础上,通过大量光谱实验和蚀变信息提取方法对比研究,提出老旧矿山边部遥感蚀变信息提取的思路,以期为今后加快地质找矿工作提供一条可供参考的途径。

1 研究区概况与遥感数据

沃溪金矿位于湖南省沅陵县官庄镇,已有百年开采历史,在雪峰弧形成矿带中具有代表性。据官庄幅区域资料(1:5万),区内出露地层主要有青白口系、南华系和震旦系,矿体赋存于新元古界板溪群马底驿组紫红色含钙绢云母板岩中。多期次的构造变形使得该区域构造痕迹明显。通过目视解译及验证,区内主要有有 NEE 向和 NE 向两组构造。其中,官庄-黄土铺断裂呈 NEE 向弧形展布,延伸约 30 km,最具代表性(图 1)。矿区围岩蚀变发育,包括褪色化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化等,最为典型的是褪色化蚀变,且后期黄铁矿化、绢云母化等蚀变都表现为褪色化。褪色化外在表现形态为围岩由紫红色褪色为黄白色、黄褐色、浅肉红色等,褪色化蚀变与矿化密切相关^[15-16]。

影像数据为 2010 年 8 月拍摄的 ASTER 遥感数据,研究范围 450 km²,图像质量良好,无云雾。由于 ASTER 数据在短波红外区间有 6 个波段设置,各类蚀变围岩在各波段上具有较明显的吸收带,因而对蚀变矿物识别能力大大增强,是国内外应用较多效果较好的一种蚀变信息提取数据源^[17-18]。

分析研究区内蚀变矿物光谱特征,褐铁矿、黄铁矿等铁染类矿物在 0.5 μm 和 0.9 μm 存在较强吸收光谱诊断特征,对应于 ASTER 的第 1、3 波段;绢云母、高岭石、绿泥石等羟基类矿物在 2.2 μm 附近具有强吸收光谱诊断特征,对应于 ASTER 的第 5、6 波段(图 2)。

2 蚀变信息提取

2.1 原理思路

在地质找矿工作中,“就矿找矿”作为一种实用性方法理论,在 20 世纪 50 年代被提出后取得很大成功^[19]。

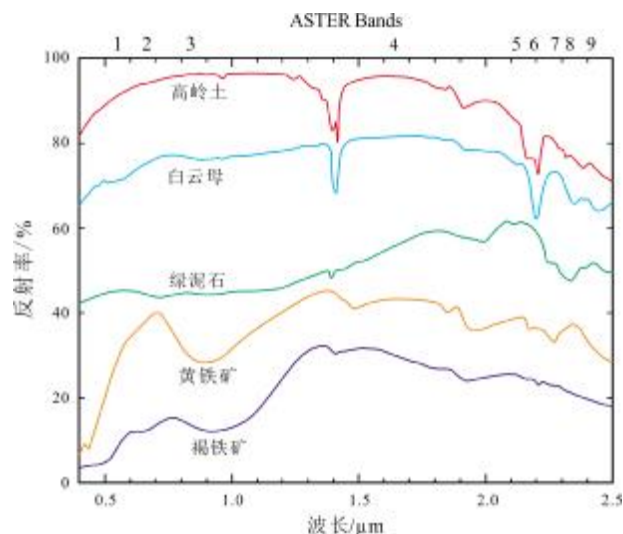


图 2 研究区蚀变矿物 USGS 光谱库光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves of altered minerals in the study area from USGS Spectral Library

大量地质勘查也表明,矿床的存在绝非是一种孤立的地质现象,而是与其周围地质环境有一定的内在联系,通常在空间上有一定的延续性。遥感作为一门新兴地质勘查技术手段,也应及时引入“就矿找矿”理论以便指导工作。

得益于遥感技术手段快速、省时、简便的优势,在发挥遥感先行战略^[20]时,可以先做一些常规性探索,包括常用的影像处理、常规的信息提取方法。同时,应充分重视已有矿山岩石光谱特征分析,通过野外光谱测试获取实地有代表性的岩石(矿物)的光谱数据,反复对比实验,找出区域内围岩蚀变光谱诊断特征,以便有效提取遥感蚀变信息。

2.2 技术路线

图 3 为植被覆盖区老旧矿山边部蚀变信息提取技术路线图。具体步骤为:①直接开展影像的常规蚀变信息提取;②对主要干扰因素“植被”进行抑制处理再提取蚀变信息;③开展光谱测试实验,多点采集矿山蚀变围岩及蚀变带岩土体光谱信息并建立研究区光谱样本库;④建立基于 CART(Classification and Regression Tree)决策树分类的蚀变信息提取方法。通过不断对比实验,最后完成研究区蚀变信息提取。

2.3 对比研究

2.3.1 原始影像蚀变信息提取

如前文所述,常规蚀变信息提取方法有波段比值

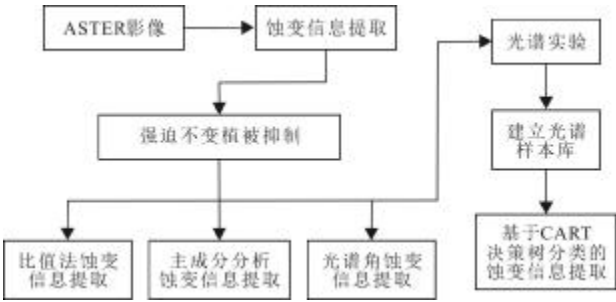


图 3 研究区蚀变信息提取流程图
Fig. 3 Flow chart of alteration information extraction in the study area

法、主成分分析和光谱角法。比值法采用 Band 2/Band 1 提取铁染蚀变信息, Band (5+7)/Band 6 提取绢云母、白云母和伊利石等羟基类蚀变信息。主成分分析采取 Band 1、3、4、5 提取铁染蚀变信息, Band 1、3、4、8 提取羟基类蚀变信息。光谱角法通过计算输入标准光谱与像元光谱之间矢量的夹角来确定光谱间相似性,以达到信息提取目的。

采用常规方法直接提取研究区蚀变信息,实验得出,3 种方法所提蚀变信息均呈分布散、不连贯、信息弱等特点。比较而言,主成分分析法所提取信息与已知矿点吻合程度稍高,优于其他两种方法。

2.3.2 影像植被抑制

植被抑制是植被覆盖区遥感影像处理的重要步骤。在植被区提取蚀变信息前,大多研究人员都会选择一种或多种手段进行植被抑制^[21-23]。综合比较,作者选用改进型强迫不变植被抑制技术,该技术主要步

骤为:①计算植被指数;②计算影像数据各波段与植被指数散点图及拟合曲线;③依据植被指数对地物分段并求出分段平化值;④分段曲线平化,完成植被抑制。

对比植被抑制处理前后影像(图 4),处理后影像中非植被区信息保存完好,植被区植被信息得到较好抑制,下伏基岩岩土体光谱信息增强,效果较好。

2.3.3 植被抑制后影像蚀变信息提取

对影像进行植被抑制后,运用 3 种常规蚀变信息提取方法开展蚀变信息提取(图 5)。简要分析各类方法效果:原始影像提取的蚀变信息(图 5a),信息量微弱、分布散、连续性差;植被抑制后主成分分析提取的蚀变信息(图 5b),信息量增多,连续性增强,对指导找矿有一定意义,但植被区信息仍较弱;波段比值法(图 5c)和光谱角法(图 5d)所提取蚀变信息与主成分分析所提取信息大同小异,显示常规方法在植被抑制后均有所改善,但植被区异常信息不突出、异常层次不明显,效果仍不理想,达不到指导找矿目的。

2.3.4 蚀变围岩光谱实验

造成信息量繁杂、信息量散乱、假异常等现象的一个重要原因是“异物同谱”现象的存在,这些异常主分量还包含着非蚀变的地质因素,有待用其他计算方法乃至借助地质知识经目视解译加以区分^[10]。众所周知,矿物的标准光谱具有一定的普遍性,但在不同的自然景观条件下,其光谱存在一定的差异,会影响蚀变矿物的精细特征分析。因此,有必要进行野外光谱测试,以获取实地有代表性的岩石(矿物)的光谱数据。本次

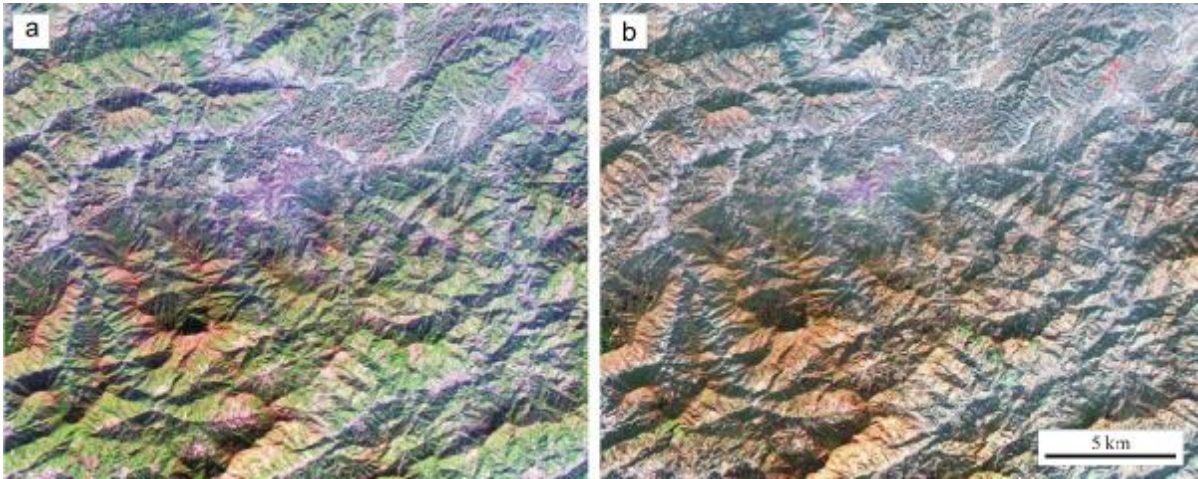


图 4 ASTER 影像植被抑制处理前后对比
Fig. 4 Comparison of ASTER images before and after vegetation suppression
a—处理前(before processing); b—处理后(after processing)

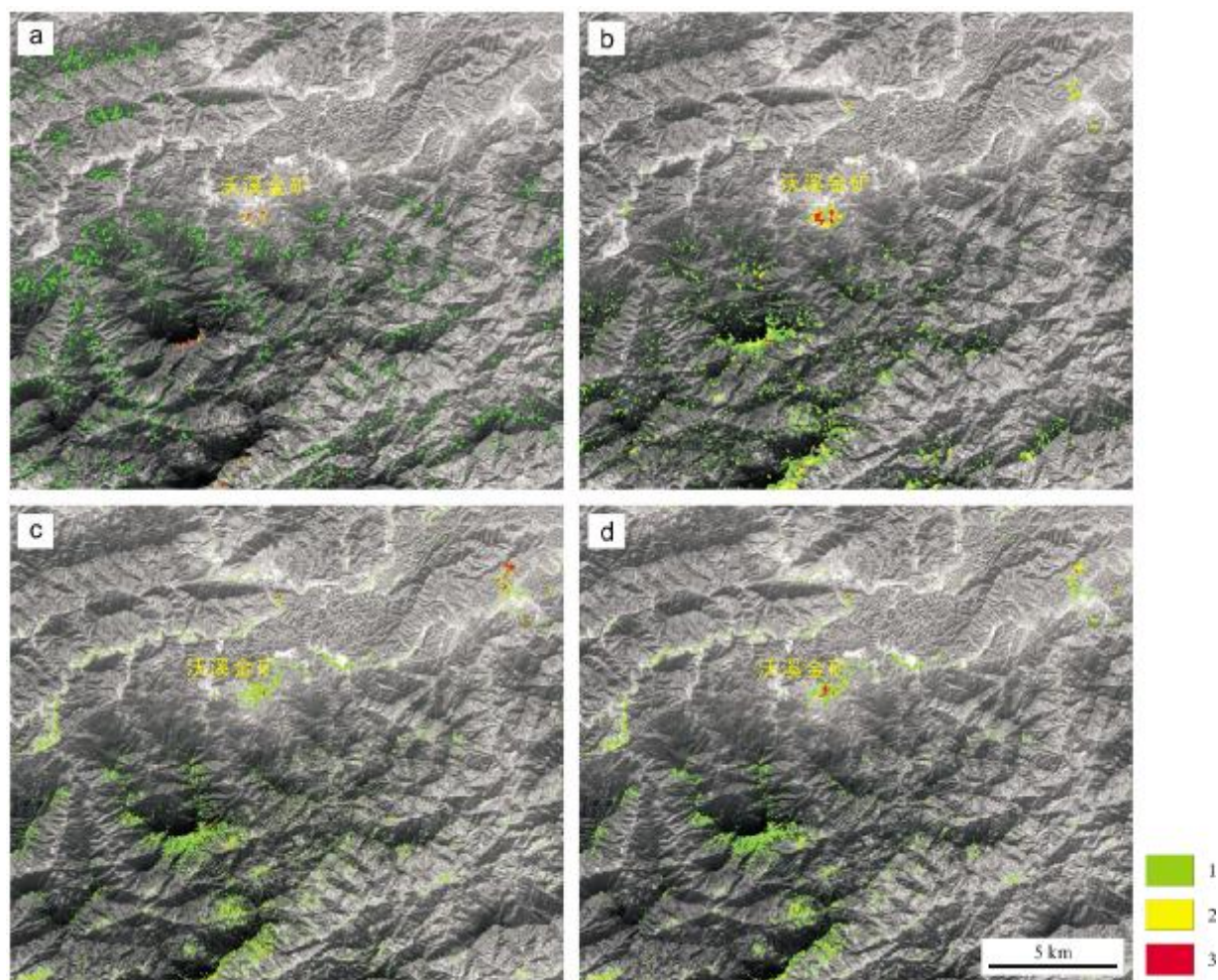


图5 植被抑制前后影像蚀变信息提取对比

Fig. 5 Comparison of image alteration information extraction before and after vegetation suppression

a—原始影像羟基异常(主成分分析)(original image of hydroxyl anomaly by principal component analysis); b—植被抑制后羟基蚀变异常(主成分分析)(hydroxyl anomaly after vegetation suppression by principal component analysis); c—植被抑制后羟基蚀变异常(波段比值)(hydroxyl anomaly after vegetation suppression by band ratio method); d—植被抑制后羟基蚀变异常(光谱角)(hydroxyl anomaly after vegetation suppression by spectral angle mapping); 1—低级异常(low-level anomaly); 2—中等异常(intermediate anomaly); 3—高级异常(high-level anomaly)

野外采集沃溪矿区坑道内围岩蚀变样本、地表围岩蚀变样本和地表普通围岩样本,测试其光谱曲线(图6)。

从遥感蚀变信息提取角度将蚀变围岩分为:铁染类蚀变围岩,代表矿物为黄铁矿、褐铁矿;羟基类蚀变围岩,代表矿物为绢云母、高岭石;碳酸盐类蚀变围岩,代表矿物为白云石、菱铁矿。对比 ASETR 标准光谱库(图7—9),研究区主要蚀变类型为铁染类蚀变与羟基类蚀变,这与前人研究成果基本一致。同时,矿区常见的褪色化蚀变中既有铁染类蚀变矿物,也有羟基类蚀变矿物。根据光谱曲线的形态分析,羟基类蚀变信息更为突出。

此外,从图6中可知研究区各类岩石光谱特征:坑道内蚀变围岩光谱曲线整体反射率高,曲线形态复杂,同时存在蚀变矿物的特征吸收谱带,具体为 $1.4\ \mu\text{m}$ 、 $1.9\ \mu\text{m}$ 、 $2.2\ \mu\text{m}$ 附近存在明显的吸收谱带,这与标准矿物光谱曲线基本一致;地表蚀变围岩却存在差异,虽然在特征点也具有吸收谱带,但吸收谷较浅,表明地表蚀变强度减弱。

2.3.5 围岩蚀变带风化土层蚀变信息

针对典型蚀变矿物的常规蚀变信息方法效果欠佳,表明影像所记录围岩蚀变矿物信息有限,仅从影像中提取围岩蚀变信息较难实现目标信息提取。野外调

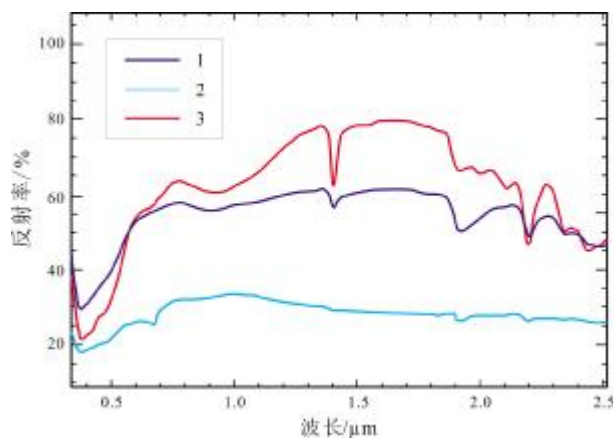


图6 不同位置岩石光谱曲线

Fig. 6 Spectral curves of rocks at different positions

1—坑道围岩蚀变样本 (wall rock alteration sample from tunnel); 2—地表围岩蚀变样本 (wall rock alteration sample on surface); 3—普通围岩蚀变样本 (normal wall rock alteration sample)

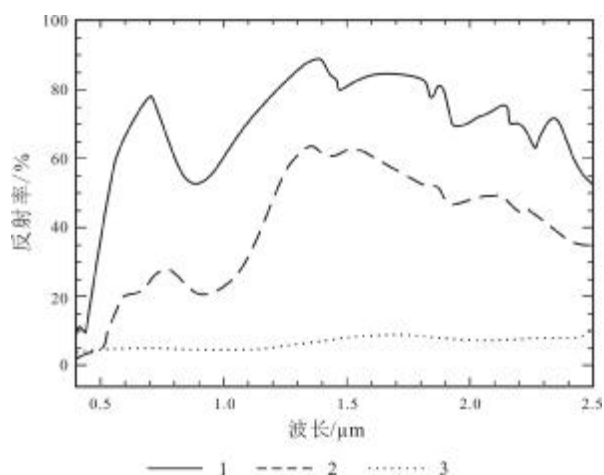


图7 铁染类蚀变矿物光谱曲线

(据 USGS 光谱库)

Fig. 7 Spectral curves of iron-stained alteration

(From USGS Spectral Library)

1—黄钾铁矾(jarosite); 2—褐铁矿(limonite); 3—黄铁矿(pyrite)

查发现,区内地表基岩裸露少,仅沃溪金矿周边、土岭冲以及白果树垭部分基岩裸露,其他部分均为茂密植被覆盖或第四系土层覆盖。根据研究区基岩裸露少、植被茂密、土壤厚的特点,实验分析土壤特征,多为原岩风化堆积。通过多点采集地表围岩蚀变带风化土层样本并测得其光谱曲线(图10),发现该类风化土层在1.4 μm、1.9 μm、2.2 μm附近具有围岩蚀变矿物光谱响应特征。

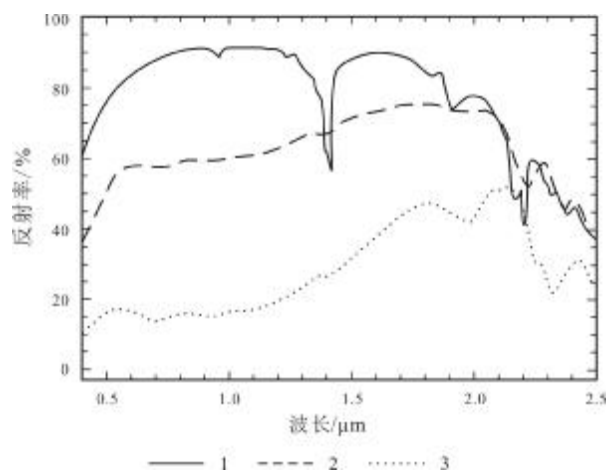


图8 羟基类蚀变矿物光谱曲线

(据 USGS 光谱库)

Fig. 8 Spectral curves of hydroxyl mineral alteration

(From USGS Spectral Library)

1—高岭石(kaolinite); 2—绢云母(sericite); 3—绿泥石(chlorite)

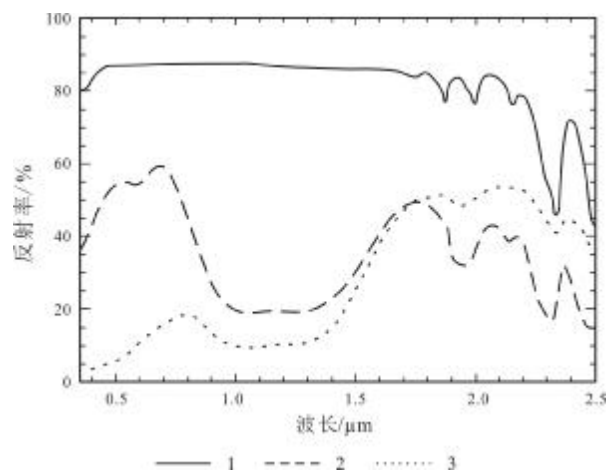


图9 碳酸盐类蚀变矿物光谱曲线

(据 USGS 光谱库)

Fig. 9 Spectral curves of carbonate mineral alteration

(From USGS Spectral Library)

1—方解石(calcite); 2—白云石(dolomite); 3—菱铁矿(siderite)

综合研究认为,研究区蚀变信息提取不仅包括蚀变围岩的蚀变信息,还应包括地表围岩蚀变带风化土层的蚀变信息。

2.4 基于 CART 决策树分类的蚀变信息提取

基于机器学习的图像识别与分类是遥感影像处理的一个重要研究方向,其中 CART 决策树分类方法不仅能充分利用影像的光谱特征信息,同时还能利用其他辅助信息,在影像分类和信息提取应用中取得比较

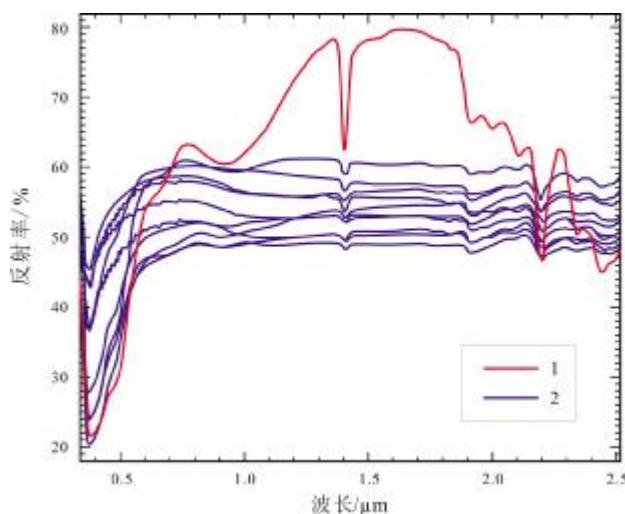


图 10 地表蚀变带风化土层光谱曲线

Fig. 10 Spectral curves of weathered soil in surface alteration zone

1—坑道围岩蚀变样本 (wall rock alteration sample from tunnel); 2—地表围岩蚀变带风化土层样本 (sample of weathered soil layer in the surface wall rock alteration zone)

满意的结果^[24], 分析图 10 地表蚀变带风化土层光谱曲线, 虽然具有吸收特征谱带, 但特征光谱诊断吸收谷深度较浅, 信息量微弱, 常规方法容易忽略. 而 CART 决策树分类方法采用贪心算法, 从无规律分布的复杂数据中寻找最佳分类体系, 只要输入足够详细均匀的训练样本, 就会较好解决影像中“同物异谱”和“异物同谱”现象, 搜索出与样本匹配的目标信息.

本研究尝试采用 CART 决策树分类法开展蚀变信息提取, 以采集蚀变围岩和地表蚀变带风化土层光谱信息为样本库, 以沃溪金矿主要含矿地层、地质构造特征等为辅助信息. CART 决策树分类在 ENVI5.3 软件平台完成, 信息提取效果如图 11.

2.5 效果分析

分析各类蚀变信息提取结果, 植被抑制前蚀变信息量最为微弱, 且分布散、连续性差, 漏提取信息较多; 植被抑制后常规蚀变信息提取一定程度上还原了植被覆盖区蚀变信息, 信息量增多, 但植被区异常信息不突出、异常层次不明显, 效果仍不理想; 采集样本制作光谱库后的基于 CART 决策树分类的蚀变信息提取效果明显提升, 信息量更为丰富、异常层次感增强, 部分村庄、道路、河流等裸地假异常得到抑制. 经过野外验证, 已有矿山的几处废弃裸采面、矿渣点以及已知矿点

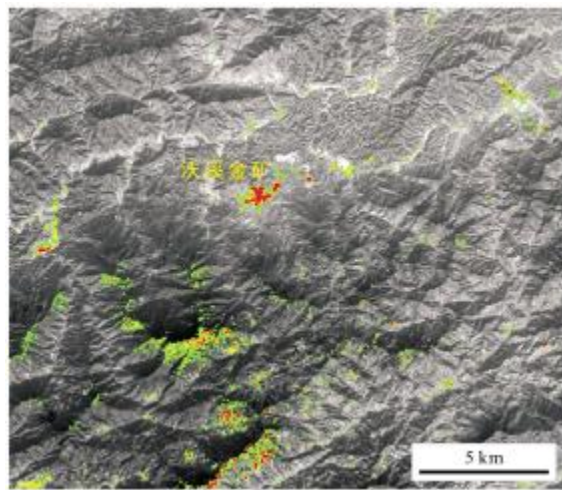


图 11 基于 CART 决策树分类的蚀变信息提取

Fig. 11 Alteration information extraction based on CART decision tree classification

均在已提取信息内; 此外, 在研究区东边龚家湾、三渡水南以及南边柳林附近见矿化, 与蚀变信息吻合度高, 表明本研究的组合技术提取蚀变信息效果较好, 对下一步边部找矿具有指导意义.

3 结语

(1) 植被抑制是植被覆盖区蚀变信息提取的重要步骤, 本研究的改进型强迫不变植被抑制技术能有效降低植被干扰, 处理后影像所提取蚀变信息强度增加、准确度提高.

(2) 通过常规蚀变信息提取、植被抑制后蚀变信息提取、植被抑制+岩土体光谱测试组合技术蚀变信息提取等不同方法实验对比, 得出后者所提取的蚀变信息准确度高、信息量丰富、异常层次感增强, 假异常减少, 效果最优.

(3) 在地质找矿中, “就矿找矿”已普遍应用于找矿实践中, 在遥感蚀变信息提取过程中同样可以借鉴该理论. 本研究通过测试已有矿山岩石光谱并分析其波谱特征和遥感蚀变信息提取地质依据, 设计了植被覆盖区老旧矿山边部遥感蚀变信息提取技术路线, 可为今后推广遥感技术找矿提供一条可供参考的途径.

(4) 植被覆盖区植被茂盛、土壤厚实, 基岩裸露少, 围岩蚀变光谱响应弱, 单一的提取围岩蚀变信息效果不佳, 会漏提取大量弱信息, 不能如实反映实际情况. 结合植被覆盖区地理特征和区内地质情况, 同时提取

蚀变围岩蚀变信息和蚀变带风化土层蚀变信息,充分利用了影像中蚀变弱信息,效果较好,可为植被覆盖区蚀变信息提取提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 张玉君, 杨建民, 陈薇. ETM⁺(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——地质依据和波谱前提[J]. 国土资源遥感, 2002, 14(4): 30–36.
Zhang Y J, Yang J M, Chen W. A study of the method for extraction of alteration anomalies from the ETM⁺(TM) data and its application: Geologic basis and spectral precondition[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2002, 14(4): 30–36.
- [2] 姚伟, 刘亮明. 遥感技术在北非努比亚地盾 Wadi Halfa 地区金矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2014, 50(1): 167–172.
Yao W, Liu L M. Application of the remote sensing technique to the gold exploration in Wadi Halfa district, Nubia shield of North Africa [J]. Geology and Exploration, 2014, 50(1): 167–172.
- [3] 王曦, 程三友, 林海星, 等. 基于 Aster 和 Landsat 8 数据在青海赛什腾地区蚀变信息提取研究[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 262–280.
Wang X, Cheng S Y, Lin H X, et al. Research on alteration information extraction in Saishiteng area of Qinghai based on aster and Landsat 8 data[J]. Geological Review, 2022, 68(1): 262–280.
- [4] 王生礼, 李志军. 遥感蚀变信息提取研究综述[J]. 地质与资源, 2023, 32(4): 462–470.
Wang S L, Li Z J. A review of remote sensing alteration information extraction techniques[J]. Geology and Resources, 2023, 32(4): 462–470.
- [5] 陈一江, 祝民强. 诸广岩体南部高植被覆盖区遥感蚀变信息提取[J]. 铀矿地质, 2015, 31(3): 395–400.
Chen Y J, Zhu M Q. The extraction of remote sensing alteration anomaly in high vegetation coverage area, South Zhuguang pluton[J]. Uranium Geology, 2015, 31(3): 395–400.
- [6] 曹会, 张廷秀, 李雨柯, 等. 基于中、高分辨率遥感影像的羟基和铁染蚀变信息提取与成矿预测——以吉林市等六幅为例[J]. 地质与资源, 2021, 30(6): 710–715, 706.
Cao H, Zhang T X, Li Y K, et al. Hydroxyl and iron-stained alteration information extraction and metallogenic prediction based on medium-high-resolution remote sensing images: A case study of six map sheets in Jilin City[J]. Geology and Resources, 2021, 30(6): 710–715, 706.
- [7] 吴志春, 叶发旺, 郭福生, 等. 主成分分析技术在遥感蚀变信息提取中的应用研究综述[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(11): 1644–1656.
Wu Z C, Ye F W, Guo F S, et al. A review on application of techniques of principle component analysis on extracting alteration information of remote sensing[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(11): 1644–1656.
- [8] Pour A B, Hashim M. Identifying areas of high economic-potential copper mineralization using ASTER data in the Urumieh-Dokhtar volcanic belt, Iran[J]. Advances in Space Research, 2012, 49(4): 753–769.
- [9] 丛利民, 李国志, 王登科, 等. 光谱角技术在多光谱遥感蚀变异常提取工作中的应用[J]. 化工矿产地质, 2009, 31(4): 242–246.
Cong L M, Li G Z, Wang D K, et al. The application of SAM technique on extracting alteration abnormalities from multispectral RS data[J]. Geology of Chemical Minerals, 2009, 31(4): 242–246.
- [10] 张玉君, 曾朝铭, 陈薇. ETM⁺(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程[J]. 国土资源遥感, 2003, 15(2): 44–49.
Zhang Y J, Zeng Z M, Chen W. The methods for extraction of alteration anomalies from The ETM⁺(TM) data and their application: Method selection and technological flow chart[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003, 15(2): 44–49.
- [11] 杨金中, 方洪宾, 张玉君, 等. 中国西部重要成矿带遥感找矿异常提取的方法研究[J]. 国土资源遥感, 2003, 15(3): 50–53.
Yang J Z, Fang H B, Zhang Y J, et al. Remote sensing anomaly extraction in important metallogenic belts of Western China [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003, 15(3): 50–53.
- [12] 马建文. 利用 TM 数据快速提取含矿蚀变带方法研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 208–213.
Ma J W. Methodology study of quickly identifying mineral bearing alterations from TM data[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(3): 208–213.
- [13] 张远飞, 吴德文, 袁继明, 等. 遥感蚀变信息多层次分离技术模型与应用研究[J]. 国土资源遥感, 2011, 23(4): 6–13.
Zhang Y F, Wu D W, Yuan J M, et al. The model and application of multi-level detaching technique of remote sensing alteration information [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2011, 23(4): 6–13.
- [14] 郑桂香, 池天河, 蔺启忠. 分形在岩性分类及蚀变信息提取中的应用[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(2): 110–115.
Zheng G X, Chi T H, Lin Q Z. Fractal application in lithological classification and alteration extraction[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2012, 24(2): 110–115.
- [15] 彭南海, 黄德志, 辛宇佳, 等. 湘西沃溪金锑钨矿床流体包裹体特征及矿床成因[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2605–2612.
Peng N H, Huang D Z, Xin Y J, et al. Characteristics of fluid inclusions and genesis of Woxi Au-Sb-W deposit in western Hunan, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2605–2612.
- [16] 孙玉珍. 沃溪金锑钨矿床围岩退色化蚀变的指示意义[J]. 采矿技术, 2013, 13(6): 143–144.
Sun Y Z. Indication significance of decolorization and alteration of

- the host rock of Woxi Au-Sb-W deposit [J]. Mining Technology, 2013, 13(6): 143-144. (in Chinese)
- [17] Pour A B, Hashim M. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 42(6): 1309-1323.
- [18] 杨佳佳, 冯雨林, 徐英奎, 等. 基于多源遥感数据的成矿远景区圈定——以内蒙古东乌珠穆沁-满都地区为例 [J]. 地质与资源, 2015, 24(1): 51-56.
- Yang J J, Feng Y L, Xu Y K, et al. Delineation of metallogenic prospects based on multi-source remote sensing data: A case study of Dong Ujimqin-Mandu region, Inner Mongolia [J]. Geology and Resources, 2015, 24(1): 51-56.
- [19] 曹晓明, 周贤旭, 钟浩. “就矿找矿”的认识与实践 [J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2011, 34(1): 51-56.
- Cao X M, Zhou X X, Zhong H. The cognition and the practice of ore-prospecting nearby the existing deposits [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2011, 34(1): 51-56.
- [20] 李志忠, 穆华一, 刘德长, 等. “遥感先行”服务自然资源调查技术变革与调整 [J]. 地质与资源, 2021, 30(2): 153-160.
- Li Z Z, Mu H Y, Liu D C, et al. Remote sensing first: Service for the technological revolution and innovation in natural resources survey. Geology and Resources, 2021, 30(2): 153-160.
- [21] 陈勇敢, 韩先菊, 张慧玉, 等. 基于混合像元分解提取多种类覆盖区遥感蚀变信息——以甘肃省岷县寨上金矿区为例 [J]. 地质与勘
- 探, 2011, 47(6): 1171-1176.
- Chen Y G, Han X J, Zhang H Y, et al. Extracting remote sensing alteration information from areas with various covers based on decomposition of mixed pixels: An example of the Zhaishang gold mine in Min County of Gansu Province [J]. Geology and Exploration, 2011, 47(6): 1171-1176.
- [22] 路轩轩, 朱谷昌, 邹林, 等. 植被覆盖区的遥感蚀变信息提取研究——以老挝南部某金矿区为例 [J]. 遥感信息, 2014, 29(5): 85-89.
- Lu X X, Zhu G C, Zou L, et al. The extraction of alteration information with remote sensing image of vegetation coverage area: A case study of the gold mine in southern Laos [J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(5): 85-89.
- [23] 尹展, 张利军, 段建良, 等. 南方植被区强迫不变植被抑制技术改进与应用 [J]. 国土资源遥感, 2019, 31(2): 82-88.
- Yin Z, Zhang L J, Duan J L, et al. Improvement and application of forced invariance vegetation suppression in southern vegetation area [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(2): 82-88.
- [24] 吕利利, 颜耀文, 黄晓君, 等. 基于 CART 决策树分类的沙漠化信息提取方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(3): 499-506.
- Lv L L, Xie Y W, Huang X J, et al. Desertification information extraction method research based on the CART decision tree classification [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(3): 499-506.

(上接第 253 页/Continued from Page 253)

- [18] 孙岐发, 田辉, 张扩. 下辽河平原地区历史地面沉降情况研究 [J]. 地质与资源, 2014, 23(5): 450-452.
- Sun Q F, Tian H, Zhang K. Study on the history of land subsidence in Lower Liaohe River Plain [J]. Geology and Resources, 2014, 23(5): 450-452.
- [19] 廖秋凤. 土工试验中应注意的问题及试验成果综合分析 [J]. 四川建材, 2020, 46(12): 80-81.
- Liao Q F. Issues that should be paid attention to in geotechnical tests and comprehensive analysis of test results [J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46(12): 80-81. (in Chinese)
- [20] 姚仁, 杜立志, 吕守航, 等. 长春地区粉质黏土导热系数与其物性参数相关性研究 [J]. 世界地质, 2018, 37(3): 976-981.
- Yao R, Du L Z, Lyu S H, et al. Correlation between thermal conductivity and physical properties of silty clay in Changchun area [J]. Global Geology, 2018, 37(3): 976-981.
- [21] 唐军平, 何国东, 付旭, 等. 佛山地基软土物理力学指标间的相关性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S2): 645-653, 659.
- Tang J P, He G D, Fu X, et al. Study on the relevance between the physico-mechanical parameters of foundation soft clay of Foshan [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S2): 645-653, 659.