



遥感蚀变信息提取研究综述

王生礼, 李志军

成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059

摘要: 矿物蚀变信息是地质找矿的重要依据和手段, 利用遥感数据提取蚀变信息是遥感应用领域研究的热点. 通过对近年来蚀变信息提取涉及的遥感数据、矿物类别、常用方法等进行梳理, 对比分析不同遥感蚀变信息提取方法的效果, 总结了遥感蚀变信息提取的发展方向. 结果表明, 遥感数据朝着高空间分辨率发展, 蚀变信息的地面精度随之提高; 光谱分辨率的提高使得可提取矿物越来越多; 数学方法和人工智能的发展提升了蚀变信息提取方法的应用空间.

关键词: 蚀变信息; 遥感数据; 方法模型; 地质勘察; 人工智能

A REVIEW OF REMOTE SENSING ALTERATION INFORMATION EXTRACTION TECHNIQUES

WANG Sheng-li, LI Zhi-jun

College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The use of remote sensing data to extract mineral alteration information, which serves as important basis and means for geological prospecting, is a research focus in the field of remote sensing application. By studying the remote sensing data, mineral types and common methods involved in alteration information extraction in recent years, the paper makes a comparison analysis of the effects of different remote sensing methods to extract alteration information, and summarizes its development trends. The results show that the ground accuracy of alteration information is improving accordingly with the development of remote sensing data towards high spatial resolution. More and more minerals can be extracted due to the improvement of spectral resolution. The development of mathematical methods and artificial intelligence has improved the application space of alteration information extraction.

Key words: alteration information; remote sensing data; method model; geological exploration; artificial intelligence

0 引言

遥感技术在地质调查和找矿勘查中, 既能发挥宏观高效的优点, 又能揭示构造、地层、岩浆岩和矿化蚀变等信息^[1], 提高了地质勘查的效率^[2]. 矿物蚀变信息

往往与成矿作用相生相伴, 它是成矿流体移动所形成的特殊地质记录, 对于找矿具有十分重要的意义^[3-4].

矿床围岩蚀变多种多样, 常见的围岩蚀变种类有硅化、绢云母化、褐铁矿化、方解石化、绿泥石化等. 通

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-05-09. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“西藏狮泉河中生代增生杂岩地质记录: 对班公湖-怒江特提斯洋西段演化的结束”(42172118).

作者简介: 王生礼(1997—), 男, 硕士研究生, 资源环境遥感研究方向, 通信地址 四川省成都市成华区东三路1号, E-mail//1178812870@qq.com

通信作者: 李志军(1974—), 男, 副教授, 从事遥感地质学教学与研究, 通信地址 四川省成都市成华区东三路1号, E-mail//lizhijun@cdu.edu.cn

常情况下,在遥感获得的地表信息中,只要有一定强度的蚀变岩石出露,就可以在遥感影像上有所反映^[5].利用遥感影像提取矿物蚀变信息的主要原理是基于矿物的波谱特性,不同矿物的组分、结构以及各种离子基团使不同矿物具有不同的波谱曲线^[6].在选取地区的影像中难免会有植被、云、雪、阴影等地物干扰因素,对于蚀变信息的提取影响较大,需要在提取过程中将其掩膜^[7-8].

早在 20 世纪 80 年代,国外学者对于遥感蚀变信息提取就开展了大量的研究,常用方法包括假彩色合成、主成分分析(PCA)、小波变换、快速傅里叶变换等^[9].国内对于遥感蚀变信息提取的研究工作起始于 20 世纪末期,将比值法与 PCA 进行结合,在地质找矿工作中取得了丰富成果.随着近年来遥感技术的迅猛发展,遥感蚀变信息提取所用的数据源在不断丰富,提取方法不断优化,能够识别的矿物种类越来越多.从多光谱到高光谱、从卫星到航空再到无人机,利用比值法、PCA、支持向量机(SVM),混合像元分解、尺度分割、神经网络以及遗传算法等^[10-13]不同方法的结合,对矿化蚀变信息的提取有了新的进展.因此,本文就蚀变信息提取使用的遥感数据、识别的矿物种类及提取方法日新月异的发展进行总结.

1 蚀变信息提取数据源的发展

1.1 多光谱数据

不同空间分辨率对蚀变信息提取精度不同,空间分辨率相对较高的影像源,对蚀变信息提取效果较好^[14].因此,对多光谱遥感空间分辨率的研究不断发展,从低空间分辨率(>10 m)到中空间分辨率(1~10 m)再到高空间分辨率(<1 m)仅仅花费了半个世纪,这也代表了多光谱卫星遥感的崛起.

1972 年至今 Landsat 已经发射到了 9 号(2021 年 9 月发射),光谱波段数目与空间分辨率数目逐渐增加.自专题制图仪(TM)传感器增加了地质应用的短波红外波段,Landsat TM 数据就成了蚀变信息提取的主要数据源.后来发展到了 ETM+、OLI-1 和 OLI-2,其中 OLI-1 与 OLI-2 相比于 ETM+仅增加了对云层和水的特定波段.

Terra 卫星的星载热辐射与反射辐射计(ASTER)数据相较于 Landsat 数据增加了短波红外与热红外的波段数,并提高了可见光—近红外波段范围的空间分辨率(15 m),这对于遥感地质信息提取给予了很大帮助.用于矿物蚀变信息提取的多光谱数据很多,如 TM、ETM+^[15]、Landsat 8 OLI^[16-20]、ASTER^[6, 21-23]、Sentinel-L2A^[24-25]、WorldView^[26]等(图 1),为地质找

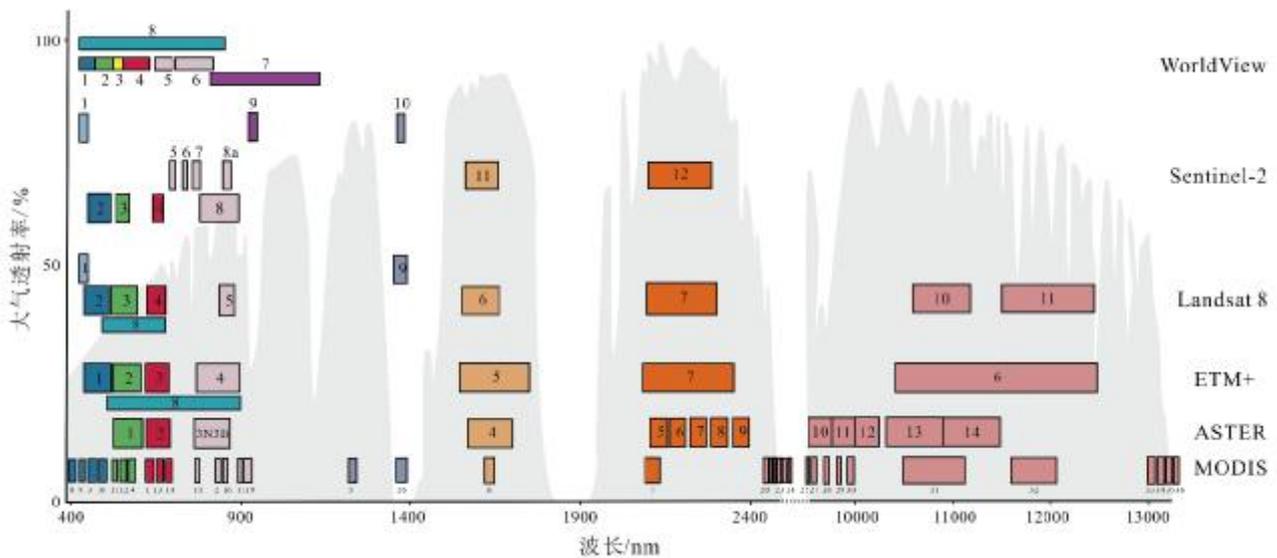


图 1 不同数据源各波段空间分辨率、光谱分辨率比较

(据 NASA 官网)

Fig. 1 Comparison of spatial resolution and spectral resolution of each band between different data sources

(<https://landsat.gsfc.nasa.gov>)

矿作出了巨大贡献.但由于波谱分辨率低的原因,多光谱数据提取的矿物类别有限,不能对矿物进行细分.

1.2 高光谱数据

高光谱分辨率遥感技术从20世纪80年代就开始投入使用,其电磁波谱可以记录紫外到短波红外的连续光谱,是目前遥感技术发展最前沿并且在地质行业应用最成功的技术.

星载高光谱遥感典型的数据有MODIS数据,其工作波段0.4~14 μm ,共36个通道;EO-1搭载的成像光谱仪所获取的Hyperion数据,通道数220个,光谱分辨率10 nm,空间分辨率为30 m^[30].除此之外中国GF-5数据共有318个通道,且光谱分辨率在VNIR是5 nm,在SWIR波段是10 nm;HJ-1数据工作波段在0.45~0.95 μm ,平均光谱分辨率5 nm,地面分辨率为100 m.

航空高光谱遥感的典型数据有澳大利亚HyMap数据,总通道数有158个,其中在0.4~2.5 μm 通道有128个,红外波段有30个,光谱分辨率10~20 nm;加拿大的CASI/SASI,波段范围分别是380~1 050 nm与950~2 450 nm,通道数分别是288与100,光谱分辨率分别是2.3和15 nm.中国在“七五”时期由中国科学院上海技术物理研究所研制的MAIS、OMIS、PHI和WHI其性能达到了国际先进水平,其中OMIS波段数共128个,其可见光范围内光谱分辨率达10 nm;2015年,我国用于矿物勘查的推扫式机载高光谱成像仪WHPI面市,工作波段位于0.4~2.4 μm ,其中,VNIR光谱范围为400~1 000 nm,光谱分辨率为5 nm^[28].

高光谱数据波段多,波段窄,能有效分辨不同矿物的波谱特征,在矿物填图与精细识别中发挥了重要作用.空间分辨率不高一直是卫星高光谱数据的弱点;航空高光谱空间分辨率较高,但高昂的成本限制了它的应用.随着无人机技术的发展,无人机高光谱以其方便、快捷、双高分辨率的优势正迅速在遥感大比例尺应用领域占据重要地位.

2 遥感数据提取的主要蚀变信息

2.1 蚀变信息光谱特征

铁化蚀变的光谱在0.4~1.3 μm 处具有明显光谱变化特征,其中在蓝波段和近红外波段有明显吸收谷,

在红波段有明显的反射峰.0.85~1.3 μm 反射率迅速攀升,且在1.3 μm 附近达到最高,在短波红外波段变化较小,不具有诊断波谱特征.泥化蚀变的谱段区域一般选择2~2.5 μm 处,可以识别含有 CO_3^{2-} 、 OH^- 等阴离子基团的矿物.具体的吸收谱带的位置还与它们多连接的金属离子有关^[29].如Al-OH的吸收带在2.22 μm 处,Mg-OH的吸收带在2.3 μm 处,Si-OH的吸收带在2.23 μm 处. CO_3^{2-} 吸收带中心波长在1.9、2.0、2.16、2.35、2.55 μm 处(表1).

表1 离子光谱吸收位置及代表矿物
Table 1 Ion spectra absorption positions and representative minerals

离子	吸收峰位置/ μm	代表矿物
Fe^{2+}	0.43, 0.45, 0.51, 0.55, 1.0~1.1, 1.8~1.9	菱铁矿、黄铁矿
Fe^{3+}	0.4, 0.45, 0.49, 0.52, 0.7, 0.87	赤铁矿、褐铁矿
Cu^{2+}	0.80	蓝铜矿、孔雀石
Mn^{2+}	0.34, 0.37, 0.41, 0.55	菱锰矿、水锰矿
OH^-	1.4, 2.2 (Al-OH); 2.30 (Mg-OH)	绿泥石、蒙脱石、白云母、绿帘石
CO_3^{2-}	1.9, 2.0, 2.16, 2.35, 2.55	方解石、菱铁矿、白云石
H_2O	主要在1.4和1.9	石英、石膏、蒙脱石

2.2 铁染蚀变信息提取

铁化蚀变是Fe的氧化物、Fe的氢氧化物、Fe的硫化物,代表矿物有针铁矿、黄钾铁矾、赤铁矿、磁铁矿等(图2).用波段比值法提取铁染蚀变信息方法如TM5/1、ETM3/1,但ASTER2/1和ASTER(4/3)+(2/1)对铁染蚀变信息提取相比TM、ETM更好,主要体现在对植被影响的弱化^[30].

TM和ETM数据源做PCA方法选择b2、b4、b5、b6^[4, 17-18]进行提取;OLI数据选择b1、b3、b5/b4、b4来提取过铁染蚀变信息^[31];Sentinel-2A选择b3、b4、b8a、b11^[25];WorldView选择VNIR-3、VNIR-6、SWIR-1、SWIR-3^[26].

2.3 羟基蚀变信息提取

羟基是热液矿床形成过程矿物蚀变的主要组成,代表性蚀变矿物有明矾石、伊利石、蒙脱石、高岭石等^[32](图3).对于羟基信息提取从比值法到PCA,所采用的办法大致类似.

TM、ETM影像选择b5/b7,但是在植被覆盖情况

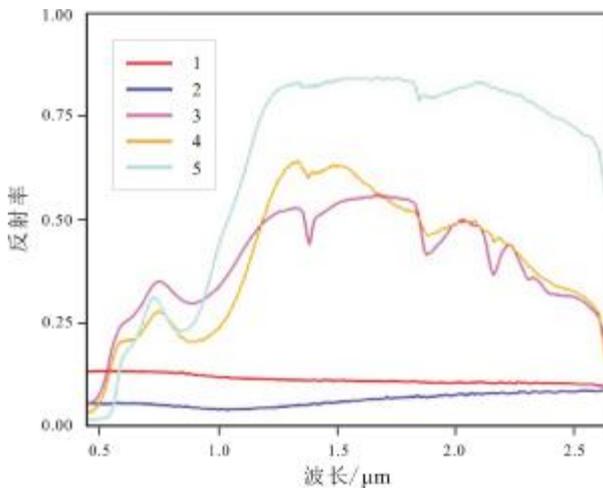


图2 典型铁染矿物光谱曲线图

Fig. 2 Spectral curves of typical iron-stained minerals

1—黄铁矿(pyrite); 2—磁铁矿(magnetite); 3—针铁矿(goethite); 4—褐铁矿(limonite); 5—赤铁矿(hematite)

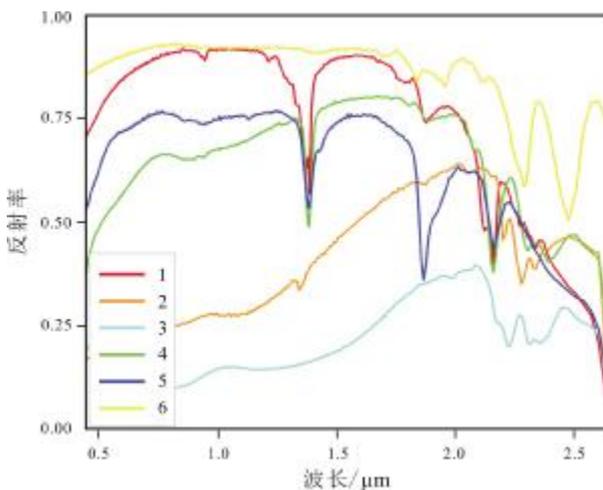


图3 典型羟基蚀变矿物光谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of typical hydroxyl-altered minerals

1—高岭石(kaolinite); 2—绿泥石(chlorite); 3—孔雀石(malachite); 4—白云母(muscovite); 5—蒙脱石(montmorillonite); 6—方解石(calcite)

下 ASTER(5+7)/6 和 ASTER(7/6)*(4/6)对于羟基蚀变效果良好^[30]. PCA 方法的波段选择主要看波谱特征的吸收谷和反射峰,如 OLI 选择 b2、b5、b6、b7^[4], b1、b4/b3、b5、b6^[31]; ASTER 通过 b3、b4、b6、b7 做主成分分析^[33]. 若与 -OH 所连接的金属离子不同,该物质的光谱特征就会发生变化^[29]. 如用 WorldView 数据做 PCA 主成分分析选择的波段有所差异,Al-OH 采用了 VNIR-1、VNIR-7、SWIR-3、SWIR-6, Mg-OH 采

用的波段是 VNIR-1、VNIR-7、SWIR-3、SWIR-8, Fe-OH 采用的是 VNIR-1、SWIR-1、SWIR-3、SWIR-7^[26].

2.4 碳酸盐蚀变信息提取

碳酸盐蚀变是比较常见的中温热液蚀变类型,主要见于基性、超基性岩中. 碳酸盐化典型矿物有方解石、菱铁矿、铁白云石等矿物. 该蚀变主要与 Cu、Au 矿床有关^[34].

Landsat 8 数据比值法选择 b6/b7 来提取蚀变信息^[18]; ASTER 利用(b7+b9)/8 或者 ASTER(b6/b8)*(b9/b8),对于碳酸盐化提取效果较好; Sentinel-2A 中选择用 b12/b8+b7/84 来进行提取^[25].

ASTER 做主成分分析选择 b1、b2、b8、b9; WorldView 主成分分析选择 VNIR-1、VNIR-7、SWIR-3、SWIR-5^[26].

2.5 硅化蚀变信息提取

硅化是控矿岩体中石英脉或隐晶质渗透到地表围岩的一种蚀变作用,蚀变强度与硅含量有关. 与硅化有关的矿床有金、锌、铅、钼、铜等金属矿床. Sentinel-2A 数据通过比值法 b11/b2 来提取硅化信息^[35];塔娜等^[36]利用 OLI 的 b6/b7 代替了原来 PCA (b1, b3, b6, b7)中的 b7,提取的硅化信息取得了良好效果;陈江等^[37]通过对波谱库中的数据重采样到波段后,并与矿物的波谱的氧化成分经过对数拟合来判别硅化: $SiO_2/\% = 2.76 \times \log [6.56 \times B13 \times B14 / (B10 \times B12)]$.

2.6 小结

阈值划分过程一般采用张玉君所提出的利用 $(\bar{x} + k\delta)$ 确定阈值,其中 δ 是标准差, \bar{x} 是均值. 对于羟基异常划分一、二、三级蚀变, k 分别取 2、2.5、3;对于铁染异常划分一、二、三级蚀变, k 取 1.5、2、2.5 进行划分^[20]. 吴德文等^[38]提出用像元灰度及其概率密度分布特征来确定阈值. 但是两者相比,张玉君的利用正态分布阈值划分方法普遍被大众接受.

用比值法凸显蚀变信息,虽然可以提取出有效信息,但是比值法破坏了原本波段的含义,且里面含有许多伪信息,因此光谱意义不清楚并且其数学模型相对简单,应对复杂情况能力欠佳.

3 蚀变信息提取方法

对于蚀变信息的提取主要分为 3 种类型,第一种

是利用多光谱数据进行单纯的比值分析法、PCA,或者是两者的结合进行提取;第二种是利用高光谱技术识别蚀变信息,其原理是高光谱数据的重建光谱与标准光谱的定量化对比分析^[39-40];第三种是通过不同算法优化分类器阈值和权重因子来提取蚀变信息,提取效果都有明显改进^[2,41-43]。

3.1 传统提取方法

传统的提取方法是采用比值法、主成分分析法等处理图像。处理后的遥感影像灰度值直方图呈正态分布^[44],通过阈值划分来确定异常等级。

比值法通过增强光谱信息差异来获取蚀变信息,但简单的波段运算无法获得良好的提取效果^[45]。比如利用 ETM_{5/7} 波段比值提取羟基蚀变信息,在植被覆盖度较低区域效果良好,但对于植被覆盖度大的地区效果较差^[30]。

Crosta 法是在 20 世纪末期国外科学家提出的一种经典的蚀变信息提取方法,其效果要比单纯的比值法好^[23,46-49],可以圈定铁染与泥化现象。例如有学者利用云南江城大团包铜矿的 ETM+遥感数据,采用 PCA 和最大似然法相结合的手段,获取了高植被覆盖区遥感影像上铜、铅等异常信息^[50]。路轩轩^[51]、赵元洪等^[52]分别在植被覆盖区和湿润亚热带,利用“比值+主成分变换”的方法成功从 TM、ETM 中提取矿化蚀变信息。

单纯运用 PCA 或简单的比值算法,往往无法获得理想的提取精度^[50]。有学者将两者结合起来应用,既消除了干扰信息,又增强专题特征信息,取得了很好的效果^[36]。

3.2 高光谱数据提取方法

随着高光谱传感器的发展,光谱角制图法(SAM)、光谱特征拟合法(SFF)、最小能量约束法(CEM)、混合调制匹配滤波(MTMF)等^[30]方法应运而生。

光谱角制图法是通过对比地物光谱与标准光谱之间的夹角,来识别地物。角度夹角在 $[0, \pi/2]$ 之间,角度越小相似程度越高^[53-54]。张洁^[55]通过 SAM 对玉龙斑岩铜矿带进行蚀变提取,获得效果与地质图相吻合。相比于 SAM 填图,田青林等^[56]提出基于权重的 SAM,并且实验结果验证要比传统 SAM 要好。

光谱特征拟合法是通过提取吸收峰/谷的强度和位置,利用最小二乘法拟合进行与标准波普库对比^[57]。

最小能量约束法既可以在抑制背景光谱又能突出

目标光谱。该方法以 MNF 变换文件作为输入文件,同时端元波谱也需要转换为 MNF 空间下的波谱,生成的结果是端元波谱对比每个像元得到的灰度图像,像元值越大表示越接近目标。通过高植被覆盖区研究发现,CEM 要比 SAM 效果好,敏感度高^[58]。

混合调制匹配滤波法是混合调制技术和匹配滤波技术方法的综合。它综合了两种方法的优点,匹配滤波时不需要其他背景端元光谱,像元各端元的含量为正且总和为 1,实现了在约束条件下提取信息^[59]。

3.3 基于算法与 SVM 的提取

支持向量机(SVM)是通过样本信息在模型复杂度和深度学习之间寻求最优解的机器学习方法。Vapnik 等^[60]发现 SVM 性能的优劣与核函数、惩罚因子有关,其中核函数参数和惩罚因子影响大于核函数类型。常用的几种核函数类型有:线性核、多项式核、RBF 核和 Sigmoid 核^[43]。模型参数通过不同算法取其最优。王东^[42]和陈尧东^[43]采用粒子群智能算法获得 SVM 参数,并在蚀变提取过程中得到了理想效果。薛云等^[61-62]利用蚁群算法对 SVM 参数进行搜索,实验表明其算法相较于网格搜索算法更快更优。吴一全等^[2]利用 PCA 和布谷鸟算法优化 SVM,实验表明其提取效果比 PCA 和粒子集群优化 SVM 提取效果好。

4 结论

(1)遥感蚀变信息提取为找矿提供依据,指明矿化蚀变地带与找矿方向,是地质找矿的重要方法。

(2)不同蚀变信息提取方法各有其优点和缺点,需要不断改进。如干扰因素的去除方面,传统植被提取用到 NDVI^[63],但是对于信号微弱的矿物蚀变信息,用 NDVI 效果并不明显,这主要体现在 NDVI 阈值的确定。后来有学者采用分解混合像元的方法^[64-65]来剔除植被信息,但这种方法同样存在局限性,原因是将地物之间的关系认为是线性的。而事实上每个像元中地物波谱之间的关系是非线性的。因此植被干扰因素的剔除是今后蚀变信息提取的关键点。

(3)随着机器学习力度的加深,优化算法提高搜索能力是进一步加深遥感地质研究的“助推器”,是加强地质信息识别解译提取的重点。遥感地质信息精细化识别是未来遥感蚀变信息提取发展的主要方向。随着识别技术的日趋完善,遥感技术的经济效益将日趋显著。

参考文献(References):

- [1]李根军,张焜,李善财,等. GF-1 数据在柴达木盆地北缘大柴旦地区找矿预测中的应用[J]. 矿产勘查, 2017, 8(4): 672-681.
Li G J, Zhang K, Li S C, et al. Application of GF-1 remote sensing data in prospecting prediction in the Dachaidan area, northern margin of Qaidam Basin[J]. Mineral Exploration, 2017, 8(4): 672-681.
- [2]吴一全,盛东慧,周杨. PCA 和布谷鸟算法优化 SVM 的遥感矿化蚀变信息提取[J]. 遥感学报, 2018, 22(5): 810-821.
Wu Y Q, Sheng D H, Zhou Y. Remote sensing mineralization alteration information extraction based on PCA and SVM optimized by cuckoo algorithm[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2018, 22(5): 810-821.
- [3]唐淑兰,曹建农,王凯. 结合 PCA、多尺度分割及 SVM 的 ASTER 遥感蚀变信息提取[J]. 遥感学报, 2021, 25(2): 653-664.
Tang S L, Cao J N, Wang K. Remote sensing mineralization alteration information extraction based on PCA, multilevel segment method, and SVM[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(2): 653-664.
- [4]董丽芳. 基于遗传算法的遥感矿化蚀变信息提取——以青海拉陵灶火地区为例[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
Dong L F. Extracting mineral alteration information from remote sensing images based on genetic algorithm in Qinghai Lalingzaohuo region[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [5]陈三明,钱建平,陈宏毅. 桂东南植被覆盖区的抗干扰遥感蚀变信息优化提取与找矿预测[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(1): 33-40.
Chen S M, Qian J P, Chen H Y. Remote sensing alteration information optimization extraction in vegetation coverage area and prospects forecasting in southeast Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2010, 30(1): 33-40.
- [6]赵芝玲,王萍,荆林海,等. 用 ASTER 数据提取植被覆盖区遥感铁矿化蚀变信息[J]. 金属矿山, 2016(10): 109-115.
Zhao Z L, Wang P, Jing L H, et al. Extraction method of iron mineralized alteration information in vegetation covered areas based on remote sensing ASTER data[J]. Metal Mine, 2016(10): 109-115.
- [7]贺婷,王成楠,李建国,等. ASTER 遥感数据蚀变异常信息提取研究——以赞比亚 15973 矿权区铜多金属矿为例[C]//江西遥感. 南昌: 江西省遥感应用协会, 2017(2): 23-28, 34.
He T, Wang C N, Li J G, et al. Extraction of alteration anomaly information from ASTER remote sensing data: A case study of the 15973 copper polymetallic deposit in Zambia [C]// Jiangxi Remote Sensing. Nanchang: Jiangxi Remote Sensing Application Association, 2017(2): 23-28, 34. (in Chinese)
- [8]连琛芹,姚佛军,杨建民,等. 半裸露区遥感蚀变信息提取研究——以甘肃玛曲地区为例[J]. 现代地质, 2019, 33(5): 1079-1085.
Lian C Q, Yao F J, Yang J M, et al. The extraction of alteration information with remote sensing image of semi-exposed area: A case study of the Maqu area in Gansu[J]. Geoscience, 2019, 33(5): 1079-1085.
- [9]Seifi A, Esmaily A, Mokhtari Z. A new hybrid method for epithermal gold exploration using multi-sensor satellite data in Sistan and Baluchestan Province (Iran)[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 138: 104357.
- [10]Huang X, Zhang L P. An SVM ensemble approach combining spectral, structural, and semantic features for the classification of high-resolution remotely sensed imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 257-272.
- [11]Amer R, Kusky T, Ghulam A. Lithological mapping in the central eastern desert of Egypt using ASTER data[J]. Journal of African Earth Sciences, 2010, 56(2/3): 75-82.
- [12]Jiang Y T. Research on road extraction of remote sensing image based on convolutional neural network[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2019(1): 31.
- [13]荆凤,陈建平. 矿化蚀变信息的遥感提取方法综述[J]. 遥感信息, 2005, 20(2): 62-65, 57.
Jing F, Chen J P. The review of the alteration information extraction with remote sensing[J]. Remote Sensing Information, 2005, 20(2): 62-65, 57.
- [14]梁丹迪,周可法,王珊珊,等. 不同空间分辨率高光谱遥感数据对蚀变矿物信息提取的影响[J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 282-289.
Liang D D, Zhou K F, Wang S S, et al. Effects of different spatial resolution hyperspectral remote sensing data on the extraction of alteration minerals information[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(3): 282-289.
- [15]Sabins F F. Remote sensing for mineral exploration[J]. Ore Geology Reviews, 1999, 14(3/4): 157-183.
- [16]于晓. TM/ETM+遥感影像蚀变异常提取与筛选系统开发[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
Yu X. TM/ETM+ remote sensing image alteration anomaly extraction and filter system development [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [17]张胜龙,刘林,耿海军,等. 基于 Landsat 8 OLI 数据甘肃陇南赵家庄地区遥感蚀变信息提取[J]. 铀矿地质, 2020, 36(6): 535-540.
Zhang S L, Liu L, Geng H J, et al. Remote sensing alteration extraction based on Landsat 8 OLI data in Zhaojiashuang area, Longnan, Gansu Province[J]. Uranium Geology, 2020, 36(6): 535-540.
- [18]宋坤,王恩德,付建飞,等. 基于 Landsat 8 数据的弓长岭矿区遥感蚀变异常信息提取[J]. 金属矿山, 2022, 37(4): 149-157.
Song K, Wang E D, Fu J F, et al. Extraction of remote sensing alteration anomaly information based on Landsat 8 data in Gongchangling mining area[J]. Metal Mine, 2022, 37(4): 149-157.

- [19]陈刚, 陈金群, 王进寿. 基于 ETM+ 的遥感蚀变信息提取研究——以青海省拉陵灶火地区为例[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(4): 293-298.
- Chen G, Chen J Q, Wang J S. Study on remote sensing alteration information extraction based on ETM+ data: Taking Lalingzaohuo area of Qinghai Province as an example[J]. Resources Survey and Environment, 2014, 35(4): 293-298.
- [20]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, 16(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, 16(2): 44-49.
- [21]刘建宇, 陈玲, 李伟, 等. 基于 ASTER 数据韧性剪切带型金矿蚀变信息提取方法优化[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 229-236.
- Liu J Y, Chen L, Li W, et al. An improved method for extracting alteration related to the ductile shear zone type gold deposits using ASTER data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(1): 229-236.
- [22]刘磊, 周军, 尹芳, 等. 基于 ASTER 数据的巴里坤地区蚀变矿物填图及找矿[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(4): 556-561.
- Liu L, Zhou J, Yin F, et al. Alteration mineral mapping and ore prospecting based on ASTER data in Balikun, Xinjing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(4): 556-561.
- [23]付翰泽, 刘得磊, 窦海鹏, 等. ASTER 数据在萨热克铜矿地区蚀变信息提取中的应用[J]. 矿山测量, 2017, 45(6): 69-72.
- Fu H Z, Liu D L, Dou H P, et al. Application of ASTER in alternation extraction in Sareke copper mine region[J]. Mine Surveying, 2017, 45(6): 69-72.
- [24]李星喆. 基于 Sentinel-2A 卫星数据蚀变信息提取的研究——以北衙金矿为例[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Li X Z. Research on alteration information extraction based on Sentinel-2A satellite data: Taking the Beiya Gold Mine as an example [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [25]王磊, 杨斌, 李丹, 等. 基于 Sentinel-2A 的矿化蚀变异常信息提取应用[J]. 西南科技大学学报, 2018, 33(1): 55-61, 74.
- Wang L, Yang B, Li D, et al. Abnormal information extraction and application of mineralization alteration based on Sentinel-2A [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2018, 33(1): 55-61, 74.
- [26]孙娅琴. WorldView-3 数据处理与蚀变信息提取方法研究——以新疆坡北地区为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- Sun Y Q. Method research of WorldView-3 data on data processing and alteration information extraction: A case study of Pobei district in Xinjiang Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [27]牛璐璐. 航空高光谱遥感影像自动拼接技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- Niu L L. Research on automatic image mosaic techniques of aerial hyperspectral remote sensing images[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [28]付严宇, 杨桃, 关世豪. 航空航天高光谱成像仪研究现状及发展趋势[J]. 红外, 2020, 41(8): 1-8, 14.
- Fu Y Y, Yang G, Guan S H. Research status and development trend of hyperspectral imagers onboard airborne and spaceborne platforms [J]. Infrared, 2020, 41(8): 1-8, 14.
- [29]Laukamp C, Rodger A, Legras M, et al. Mineral physicochemistry underlying feature-based extraction of mineral abundance and composition from shortwave, mid and thermal infrared reflectance spectra[J]. Minerals, 2021, 11(4): 347.
- [30]朱骏. 植被干扰区蚀变信息遥感提取方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Zhu J. A study on remote sensing alteration information extraction in vegetation area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [31]梁昊, 李程, 李佳奇. 基于 Landsat 8 遥感影像的矿化信息提取——以内蒙古额济纳为例[J]. 南方国土资源, 2016(11): 30-32, 36.
- Liang H, Li C, Li J Q. Extraction of mineralization information based on Landsat 8 remote sensing images[J]. Southern Land and Resources, 2016(11): 30-32, 36. (in Chinese)
- [32]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.
- [33]姜天. 辽宁省弓长岭区遥感蚀变信息提取[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- Jiang T. Extraction of alteration information from remote sensing data in the Gongchangling district, Liaoning Province [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [34]高少锋. 江西德兴斑岩型铜多金属矿集区遥感蚀变异常信息提取[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- Gao S F. Remote sensing alteration extraction in Dexing porphyry copper deposits area of Jiangxi Province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [35]王磊. 基于 Sentinel-2A 的矿化蚀变异常信息提取分析与应用[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- Wang L. Extraction and analysis of mineralized alteration anomaly information based on Sentinel-2A [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [36]塔娜, 鲍甜甜, 冯一鸣, 等. 湖南长城岭-凤凰山地区遥感蚀变信息提取与成矿预测[J]. 地质找矿论丛, 2021, 36(3): 328-341.

- Ta N, Bao T T, Feng Y M, et al. Remote sensing alteration information extraction from Changchengling-Fenghuangshan area, Hunan Province and the metallogenic prediction[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2021, 36(3): 328-341.
- [37] 陈江, 王安建. 利用 ASTER 热红外遥感数据开展岩石化学成分填图的初步研究[J]. *遥感学报*, 2007, 11(4): 601-608.
- Chen J, Wang A J. The pilot study on petrochemistry components mapping with ASTER thermal infrared remote sensing data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4): 601-608.
- [38] 吴德文, 张远飞, 朱谷昌. 遥感图像岩石信息提取的最优密度分割方法[J]. *国土资源遥感*, 2002, 14(4): 51-54, 66.
- Wu D W, Zhang Y F, Zhu G C. The best density separation method for extracting rock information from remote sensing image[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2002, 14(4): 51-54, 66.
- [39] 甘甫平, 王润生, 郭小方, 等. 高光谱遥感信息提取与地质应用前景——以青藏高原为试验区[J]. *国土资源遥感*, 2000, 12(3): 38-44.
- Gan F P, Wang R S, Guo X F, et al. Extraction for rock and ore deposits information and prospects for application of geology using hyperspectral remote sensing: Tibet Plateau as test sample [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2000, 12(3): 38-44.
- [40] 甘甫平, 王润生, 杨苏明. 西藏 Hyperion 数据蚀变矿物识别初步研究[J]. *国土资源遥感*, 2002, 14(4): 44-50.
- Gan F P, Wang R S, Yang S M. Studying on the alteration minerals identification using hyperion data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2002, 14(4): 44-50.
- [41] 龙明周, 李伟, 岳小军. 广西罗维铅锌银多金属矿区围岩蚀变与矿化关系研究——基于 SVM 遥感矿化蚀变信息提取方法[J]. *矿产与地质*, 2021, 35(3): 580-585, 602.
- Long M Z, Li W, Yue X J. Study on the relationship between surrounding rock alteration and mineralization of Luowei Pb-Zn-Ag polymetallic mining area: Extraction method of mineralization alteration information based on SVM remote sensing [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2021, 35(3): 580-585, 602.
- [42] 王东. 基于粒子群智能的遥感找矿方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- Wang D. Research of remote sensing ore-finding method based on particle swarm intelligence[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [43] 陈尧东. 基于支持向量机的遥感矿化蚀变信息提取方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- Chen Y D. Research on an approach of extracting remote sensing altered rock's information by support vector machine[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [44] 邓捷, 白亚辉, 吕凤军. 比值法遥感蚀变信息提取及阈值确定[J]. *地质学刊*, 2017, 41(3): 504-510.
- Deng J, Bai Y H, Lyu F J. Remote sensing alteration information extraction and threshold determination by band ratio method [J]. *Journal of Geology*, 2017, 41(3): 504-510.
- [45] 何凯涛, 甘甫平, 王永江. 高空间分辨率卫星遥感地质微构造及蚀变信息识别[J]. *国土资源遥感*, 2009, 21(1): 97-99.
- He K T, Gan F P, Wang Y J. The extraction of geological micro-structure and altered rock information with high-resolution satellite images in a small range[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2009, 21(1): 97-99.
- [46] 李玉琴, 苏程, 王习之, 等. 菲律宾吕宋岛斑岩铜金矿遥感找矿模型[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(6): 1151-1160.
- Li Y Q, Su C, Wang X Z, et al. Extraction of alteration information and establishment of prospecting model for porphyry copper-gold deposits in Luzon[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(6): 1151-1160.
- [47] 韩琦. 湖南花垣铅锌矿遥感信息提取与成矿预测研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- Han Q. The study of the remote sensing technology on information extraction and prognosis in Huayuan lead-zinc deposits, Hunan [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [48] 彭光雄, 王明艳, 何皎. 基于局部可变窗口的 Crosta 蚀变信息提取技术——以莫海拉亨为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(3): 553-560.
- Peng G X, Wang M Y, He J. An improved Crosta technique based on local variable window for alteration information extraction: A case study of the Mohailaheng area [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(3): 553-560.
- [49] 宿虎, 陈美媛, 张丹青, 等. 高植被覆盖区遥感矿化蚀变信息提取方法研究——以甘肃省西和县大桥石峡地区为例[J]. *西北地质*, 2020, 53(1): 146-161.
- Su H, Chen M Y, Zhang D Q, et al. Study on the method of extracting information of mineralization alteration by using remote sensing in high vegetation coverage area: Taking Daqiao-Shixia area of Xihe County, Gansu Province for example [J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(1): 146-161.
- [50] 赵小星, 钱建平, 覃顺桥, 等. 云南江城大团包铜矿及外围高植被区遥感找矿预测[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(5): 879-889.
- Zhao X X, Qian J P, Qin S Q, et al. Remote sensing prospecting in high vegetation coverage area: A case study of the in Datuanbao copper ore deposit and its environs, Jiangcheng, Yunnan Province [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(5): 879-889.
- [51] 路轩轩. 植被覆盖区的遥感蚀变信息提取研究及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- Lu X X. The research and application of remote sensing alteration information extraction of vegetation coverage area [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [52] 赵元洪, 张福祥, 陈南峰. 波段比值的主成份复合在热液蚀变信息

- 提取中的应用[J]. 国土资源遥感, 1991, 3(3): 12-17.
- Zhao Y H, Zhang F X, Chen N F. The application of principal component integration of band ratios to extracting hydrothermal alteration information [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1991, 3(3): 12-17.
- [53] 姚佛军, 杨建民, 张玉君, 等. 光谱角制图法与谱线平行分类法若干问题的探讨——以 ETM 数据为例[J]. 遥感信息, 2009, 24(1): 20-22, 31.
- Yao F J, Yang J M, Zhang Y J, et al. The analysis about SAM and parallel spectra classification[J]. Remote Sensing Information, 2009, 24(1): 20-22, 31.
- [54] 张玉君, 曾朝铭, 姚佛军. 利用光谱角填图(SAM)优化多光谱遥感异常[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 985.
- Zhang Y J, Zeng Z M, Yao F J. Using spectral angle mapping (SAM) to optimize multi-spectral remote sensing anomalies[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(S1): 985. (in Chinese)
- [55] 张洁. 玉龙斑岩铜矿带遥感蚀变信息提取技术方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- Zhang J. Study on extraction method of remote sensing alteration information in Yulong porphyry copper belt[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [56] 田青林, 潘蔚, 李瑶, 等. 基于小波包变换和权重光谱角制图的岩心高光谱蚀变信息提取[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 41-46.
- Tian Q L, Pan W, Li Y, et al. Extraction of alteration information from hyperspectral core imaging based on wavelet packet transform and weight spectral angle mapper[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(4): 41-46.
- [57] 刘汉湖. 岩矿波谱数据分析与信息提取方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- Liu H H. Research on the analysis of the spectrum data and extraction methods of minerals[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [58] 何政伟, 胡滨, 赵银兵, 等. 基于图像自身特征的绢云母化蚀变信息提取方法: 中国, 201510496890.4 [P]. 2015-12-02.
- He Z W, Hu B, Zhao Y B, et al. Extraction method of sericitization alteration information based on image characteristics: CN, 201510496890.4 [P]. 2015-12-02. (in Chinese)
- [59] 林娜, 杨武年, 刘汉湖. 基于高光谱遥感的岩矿端元识别及信息提取研究[J]. 遥感信息, 2011, 26(5): 114-117, 99.
- Lin N, Yang W N, Liu H H. Mineral end member identification and information extraction based on hyperspectral remote sensing [J]. Remote Sensing Information, 2011, 26(5): 114-117, 99.
- [60] Vapnik V, Vashist A. A new learning paradigm: Learning using privileged information[J]. Neural Networks, 2009, 22(5/6): 544-557.
- [61] 薛云, 戴塔根, 邓会娟, 等. 基于蚁群算法的羟基蚀变信息的提取——以青海省同仁县阿哇地区为例[J]. 地质通报, 2008, 27(5): 657-661.
- Xue Y, Dai T G, Deng H J, et al. Extraction of hydroxyl alteration information based on the ant colony algorithm: A case study of the Awa area, Tongren County, Qinghai, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(5): 657-661.
- [62] 薛云. 基于蚁群算法和支持向量机的矿化蚀变信息提取研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- Xue Y. Extraction of mineral alteration information based on ant colony optimization algorithm and support vector machine [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [63] 陈江, 王安建, 黄妙芬. 多种植被覆盖地区 ASTER 影像岩石、土壤信息提取方法研究[J]. 地球学报, 2007, 28(1): 86-91.
- Chen J, Wang A J, Huang M F. The aster imaging rock and soil information extraction method in multiple vegetations covered areas [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(1): 86-91.
- [64] 程潭武, 陈建国, 徐梦扬. 混合像元分解法在植被覆盖区矿化蚀变信息提取中的应用——以江西大浩山金矿区为例[J]. 地质学刊, 2017, 41(3): 492-498.
- Cheng T W, Chen J G, Xu M Y. Application of mixed pixel decomposition in mineralization and alteration information extraction in vegetation-covered area: A case study of the Dashaoshan gold deposit in Jiangxi Province [J]. Journal of Geology, 2017, 41(3): 492-498.
- [65] 熊勤学, 胡佩敏. 基于 HJ 卫星混合像元分解法的湖北省四湖地区夏收作物种植信息提取[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 869-874.
- Xiong Q X, Hu P M. Extracting planting information of summer harvesting crops in Shihu region from HJ CCD data using unmixing algorithm data[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6): 869-874.