

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.01.013

高植被覆盖区遥感矿化蚀变信息提取方法研究

——以甘肃省西河县大桥—石峡地区为例

宿虎,陈美媛,张丹青,靳仲娥,杨菁

(甘肃省地质调查院,甘肃 兰州 730000)

摘要:高植被覆盖区遥感矿化蚀变信息提取结果会受植被覆盖影响其效果。笔者基于西秦岭大桥—石峡地区,利用 ETM 和 Aster 影像数据,进行高植被覆盖区遥感矿化蚀变信息提取研究,探讨抑制植被干扰和提取遥感矿化蚀变信息的方法,提出了多元数据叠加分析法。采用“混合像元法剔除干扰十多层次分离技术分析波段相关关系十多元数据叠加分析法增强蚀变信息十正态分布阈值分割法分级提取”等系列方法,提取了研究区遥感铁染和羟基异常,其中铁染异常区占研究区面积 1.63%,羟基异常区占研究区面积 1.26%。矿床点与遥感异常相关比率为 45.5%,说明该方法在高植被覆盖区提取遥感矿化蚀变信息效果较好,具有一定示矿意义。

关键词:高植被覆盖区;遥感矿化蚀变信息;提取方法

中图分类号:P627

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2020)01-0146-16

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

SU Hu, CHEN Meiyuan, ZHANG Danqing, JIN Zhonghe, YANG Jing

(Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 73000, China)

Abstract: Vegetation coverage can affect the results of remote sensing mineralization alteration information extraction in high vegetation areas. Using ETM and Aster image data in Daqiao-Shixia area in West Qinling, this study discusses the method of extracting information of remote sensing mineralization alteration while suppressing the interference of vegetation, and puts forward the a method of multi-data superposition analysis. Such methods as “mixed pixel method to eliminate interference”, “multi-level separation technology to analyze band correlation”, “multivariate data superposition analysis method to enhance alteration information” and “normal distribution threshold segmentation method for graded extraction” were used to extract iron staining and hydroxyl anomaly in remote sensing of the study area. The iron staining anomaly area accounts for 1.63% and the hydroxyl anomaly area accounts for 1.26%. the correlation ratio between mineral deposits and remote sensing anomalies is 45.5%. It indicates that this method is effective in extracting remote sensing mineralization alteration information in areas with high vegetation cover-

收稿日期:2019-04-01;修回日期:2019-10-30

基金项目:中国地质调查局“甘肃石峡幅综合地质调查与找矿预测”项目(0747-1861SITCN150-66)

作者简介:宿虎(1986-),男,工程师,主要从事区域地质、遥感地质、矿产地质等工作。E-mail:Suhu2009@126.com

age, and has certain significance of ore demonstration.

Keywords: high vegetation cover area; remote sensing mineralization alteration information; extraction method

0 引言

遥感矿化蚀变信息是指在有利于成矿作用发生的空间实体中,蚀变围岩在遥感影像上反映出来的包含各种背景光谱信息在内的综合光谱信息(吕凤军等,2008)。国内外遥感地质工作者在遥感矿化蚀变信息提取方面开展了大量的研究,如比值法、主分量阈值分析法、光谱角法、混合像元分解法等(ROWAN, 1977; 张玉君等, 1998; 刘成等, 2003; BEIRANVND, 2011; 田淑芬等, 2013; 张玉君等, 2014; 程潭武等, 2017; 孙永彬等, 2018; 高猛等, 2019)。随着研究深入,适用于地表覆盖类型不同,尤其是高植被覆盖区矿化蚀变遥感异常信息提取、异常识别理论及方法的不断更新,对遥感地质找矿工作起到了重要的影响作用。同时,这些理论和方法还不成熟,仍需进一步研究。

受植被覆盖影响,在遥感矿化蚀变信息提取中,微弱的蚀变信息常常淹没于背景信息中,单纯利用主成分分析、比值法、光谱角法等很难取得成功,提取结果与实际偏离较大(朱骏,2012)。近十几年,国内外学者对植被干扰处理技术和矿化蚀变信息提取技术进行研究,对传统方法进行改进与创新,在高植被覆盖区成功提取了矿化蚀变信息,取得了很好的理论和实践效果(BOARDMAN, 1989; 马超飞等, 1999; 查显杰, 2005; 陈江等, 2007; 张玉君等, 2014; 路轩轩等, 2014; POURNAMDARI, 2014; 杨正萌等, 2015; 张志, 2017)。最常用的植被干扰处理方法是根据植被覆盖指数(NDVI),采用密度分割,将高植被区进行掩膜删除(陈江等, 2007)。该方法难以避免在去干扰时可能去除掉一些有用的信息,造成植被覆盖下的地质信息的遗漏,因此笔者不做讨论。抑制植被干扰即为不完全剔除植被干扰,尽可能的保留原始信息。即根据蚀变围岩的光谱特征,基于遥感成像理论及遥感数字图像处理理论,通过图像增强技术,运用比值法、主成分分析法、光谱角制图法、多层次分离技术及混合像元分解法等方法或多种方法结合的方法,对需要提取的矿物蚀变信息进

行增强处理,进而提取目标信息。笔者将在参考前人研究较成熟的主成分分析法等方法的基础上,以西秦岭大桥—石峡地区为研究区域,通过实验和对比研究,进行高植被覆盖区遥感矿化蚀变信息提取研究,探讨抑制植被干扰和提取遥感矿化蚀变信息的方法,进而达到最佳提取效果。

1 研究区自然地理、地质及遥感特征

1.1 研究区位置与自然地理概况

研究区位于西秦岭山区腹地西和县大桥镇—石峡镇一带,坐标:东经 $105^{\circ}15' \sim 105^{\circ}30'$,北纬 $33^{\circ}40' \sim 33^{\circ}50'$,面积约为 428 km^2 (图1)。区内地形由地垒式山地、丘陵、山间洼地和高原组成,地貌形态复杂多样,以高原型地貌为主。境内水系为长江水系,西汉水从区西南部穿过,沟壑林立,水系发育。研究区属中温带半湿润气候,土壤类型主要为黄褐土,质地粘重,有机质含量高,植被发育,主要以绿洲阔叶、落叶阔叶混交林带为主,山坡多次生灌木和草本,植被覆盖率高。



图1 研究区地理位置示意图

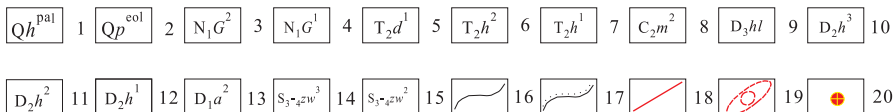
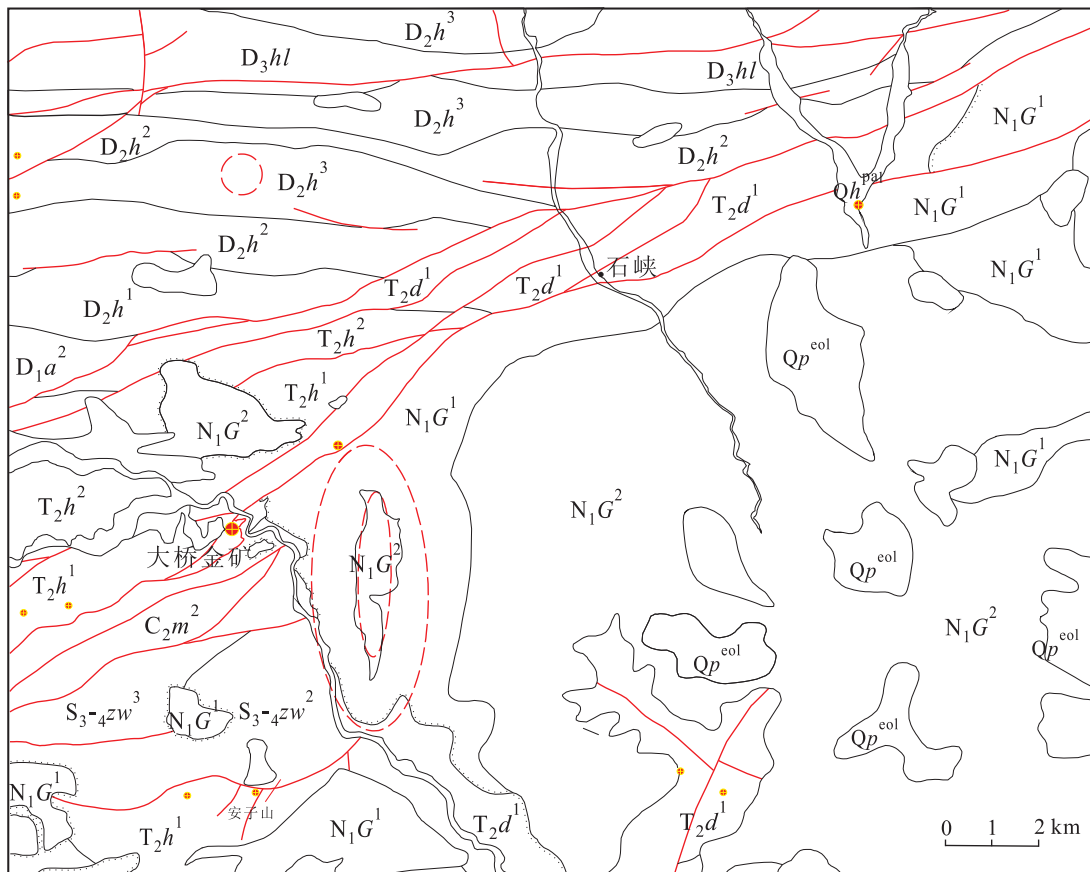
Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 区域成矿地质背景

研究区位于西秦岭造山带东段,属合作—岷县—两当金汞锑成矿带(张新虎等,2013),金、汞、锑、铅、

锌、钨、钼、铜等金属成矿条件良好,已发现有大桥金矿床、人头山铅锌矿床、饮马河金矿床、安子山金矿点、朱家河金矿点等。其中大桥金矿床位于研究区西南部,矿床规模已达超大型,其赋矿地层主要为三叠纪滑石关组硅质角砾岩层,其次为石炭系、泥盆系。地层展布方向为NEE向或近EW向,与区域构造线一致。区域内侵入岩较不发育,且出露规模较小,岩石类型主要为花岗闪长岩,多以岩脉状侵位于矿化层附近,与金成矿关系密切。区域构造活动强烈,斜穿研究区中部的合作-临潭-两当区域性断裂带,为中秦岭和南秦岭构造带的分界断裂,呈SW—NE—NEE向,总体并向南凸起呈弧形展布,

其与后期构造运动形成的NW向及近SN向构造遗迹构成了本区基本的构造格架。矿体受断裂构造控制,主要分布于主断裂带北侧的次级断裂带两侧,呈NE向展布(图2)。大桥金矿矿石类型为硅质角砾岩型,金矿成矿作用与硅质岩的形成密切相关(腾飞等,2018),张新虎等(2015)认为大桥金矿成矿过程主要与中-低温热液活动引起的改造作用有关,矿床成因可能属于初始沉积-热液改造类型。围岩矿化蚀变类型主要有黄铁矿化、褐铁矿化、赤铁矿化、方解石化、硅化、绢云母化、萤石化、碳化等,黄铁矿化、硅化与金成矿关系最为密切(张翔等,2017)。



1. 全新统;2. 更新统;3. 新近纪甘肃群二段;4. 新近纪甘肃群一段;5. 中三叠世大河坝组一段;6. 中三叠世滑石关组二段;7. 中三叠世滑石关组一段;8. 晚石炭世岷河组二段;9. 晚泥盆世红岭山组;10. 中泥盆世黄家沟组三段;11. 中泥盆世黄家沟组二段;12. 中泥盆世黄家沟组一段;13. 早泥盆世安家岔组二段;14. 晚一末志留世卓吾阔组三段;15. 晚一末志留世卓吾阔组二段;16. 整合地质界线;17. 不整合地质界线;18. 断层;19. 环形构造;20. 金矿床(点)

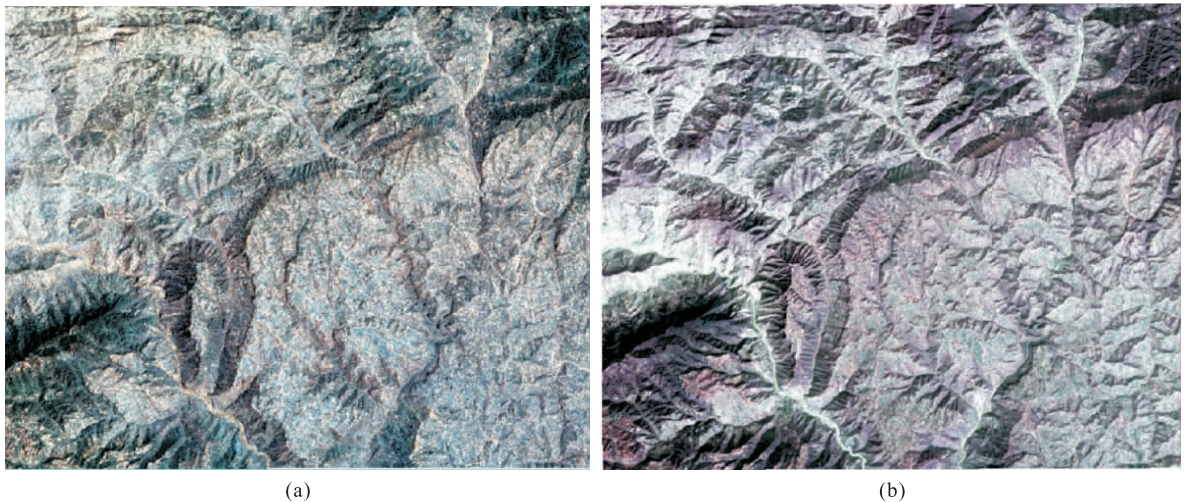
图2 研究区地质构造略图

Fig. 2 The Tectonic sketch of the study area

1.3 遥感地质特征

根据遥感图像色彩(调)、影纹、水系、地貌等特性,解译判别各类地物的存在、属性、分布等特征,是遥感工作的基础。本次研究收集到的遥感数据有GF1、Landsat7 ETM+、Aster等卫星影像数据(图3)。研究区GF1影像整体无扫描坏线,云层覆盖面积较少,影像清晰,层次丰富,色调均匀,反差适中,分辨率较高,质量良好。区内高山林立,河谷陡峭,植被覆盖较多,整体影像呈绿-深绿色;河道及河流冲沟发育,在沟谷两侧及低洼区域土壤较为发育,影像呈灰白-灰绿色调,表面平滑,无纹理结构;山区基岩零星出露,影纹细碎、呈灰绿-暗

绿色调,次尖棱山脊,冲沟较发育,部分纹理不清,内部界线识别困难,地质构造的影像特征不明显。区内线性构造较为发育,SWW-NEE向断裂构造规模较大,其余断裂多为小规模层间断裂,在影像上可见连续的沟谷或近直线状水系、冲沟、断续或连续的陡崖等特征。总之,研究区植被覆盖度较高,影像色调偏绿偏暗,对比度较差,通过目视解译影像影纹特征和色带差异来识别含矿地质体、矿化蚀变及异常带极为困难,因此研究遥感数据的内在信息,通过多元遥感数据波段运算、叠加分析提取遥感矿化蚀变信息,将有重要的理论和现实意义。



(a) ETM - R; b3, G; b2, B; b1; (b) Aster - R; b2, G; b1, B; (b1 * 3 + b3) / 4

图3 研究区ETM和Aster数据模拟真彩色影像图

Fig. 3 ETM and Aster data simulation true color image of the study area

2 矿化蚀变遥感信息提取机理和方法

近年来,国内外遥感地质工作者都在不断的研究和创新地质矿化蚀变异常信息提取的方法。围岩蚀变是矿化的一个主要特征,也是找矿的一个重要标志(王润生等,2011)。遥感探测的是地表物质的光谱信息,只要有一定面积的蚀变岩石出露,即便是矿体隐伏,在遥感图像上都会有一定的反应。这即为应用遥感技术提取蚀变异常信息、辅助地质找矿的理论依据(张玉君等,2014)。

2.1 研究区蚀变遥感信息提取机理

前已表述,大桥等岩浆中低温热液型金多金属矿床具有黄铁矿化、硅化、褐铁矿化、碳酸盐化、萤石化和高岭土化等围岩蚀变,其中以硅化、黄铁矿化与

金矿化最密切。遥感光谱学证明,这些蚀变矿物均在可见光、近红外、短波红外及热红外区域产生显著的吸收光谱带,并具有各自的诊断性特征光谱,这些特征光谱与周围的岩石反射光谱特征存在着较大的差异,即蚀变岩石在某些特定的光谱波段形成了特定的光谱异常(田淑芳等,2013)。同时,遥感获得的是地表信息,只要有一定面积的蚀变岩石或矿物出露,就可能被遥感检测,也就是说即或矿体隐伏,只要有足够面积的强蚀变岩或蚀变矿物出露也是有可能利用遥感技术发现的。通过研究高植被覆盖区的遥感数据的波谱特征,按蚀变矿物的特征光谱属性提取出区域内特定的光谱信息,进而挑选和圈定出具有某种蚀变的岩石和矿物,该类方法值得研究和探讨。

当前,遥感图像获取技术越来越成熟,可选择使用的多光谱遥感数据有Landsat-ETM和Aster等

数据,前者具有7个波段,后者为14个波段,空间分辨率皆可融合为15m。30多年来国内外遥感工作者已证实了这2类遥感数据对应的矿化蚀变信息与多数金属矿床有着非常好的相关性,所提取出的找矿遥感异常可作为一种找矿标志的参数。

(1)ETM数据。张玉君等(2014)研究了蚀变矿物及所对应的离子或离子团特征,认为与铁染相关的褐铁矿、黄钾铁矾、黄铁矿等几种蚀变矿物在ETM的第3波段(B3)处有强反射峰;与青磐岩化(绿泥石化等)相关的绿泥石、绿帘石、方解石、绢云母等蚀变矿物,其波谱特征具有一致性,在B4和B7处都有强吸收谷,在B5波段处由强反射峰。ETM影像与蚀变矿物相关的这种特征是提取蚀变信息的物理基础。

(2)Aster数据。Aster数据拥有14个波段,波长范围宽,波段多,可为开展大范围、更详细的矿化蚀变信息提取与地表岩性识别提供了重要遥感数据源,是对ETM+数据的一种有力补充。根据张玉君等(2014)利用ASTER数据提取蚀变信息的波谱依据表,蚀变矿物在Aster数据中显示的波谱信息大致可分为5组:第1组是褐铁矿、黄钾铁矾、赤铁矿等,其在1和3波段存在吸收峰,这个吸收峰是 Fe^{3+} 离子的波谱特征,上述矿物在2波段,具有明显的反射峰;第2组是高岭石、伊利石、绢云母等富含Al-OH基团的蚀变矿物,其在5波段和6波段均具有明显的吸收峰特征;第3组是蛇纹石、绿泥石、绿帘石等富含Mg-OH基团的蚀变矿物,在7和8波段($2.3\mu m$)具有一个明显的吸收峰;第4组是方解石、滑石等富含 CO_3^{2-} 离子团的蚀变矿物,在8和9波段有强吸收;第5组是石英等富 SiO_2 矿物,其在

12波段形成一个微小的吸收峰,且12波段的发射率小于14波段。根据以上蚀变矿物与遥感波谱对应表,可利用Aster遥感数据提取 Fe^{3+} 离子(铁染)、Al-OH基团(铝羟基)、Mg-OH基团(镁羟基)、 CO_3^{2-} 离子团(碳酸盐化)、富 SiO_2 矿物(硅化)等相应矿化蚀变信息。

总之,根据ETM、Aster遥感数据的光谱特征进行波谱特征总结和蚀变信息分类,建立研究区主要蚀变类型对应的矿物组合在Aster、ETM遥感数据中的波谱曲线。采用恰当的遥感图像变换和信息增强处理的方法,可提取硅化、铁染、碳酸盐化、镁羟基、铝羟基等遥感蚀变信息。

2.2 研究区植被干扰剔除机理

植被是矿致遥感异常提取过程中的常见干扰因素。可见光中的大部分绿光波段被植被吸收,但仍有一部分被反射,所以叶子呈绿色;而近红外波段可以穿透叶绿素,被多孔薄壁细胞组织所反射,因此在近红外波段上形成强反射。所以,对绿色植被来讲,它们在可见光蓝、绿、红及近红外波段出的反射率是不同的。本次研究区地物(植被、岩矿标本等)光谱测量采用的是美国SEI公司的PSR-3500超轻便便携式地物光谱仪,地面波谱采集时间为2018年6月1日~6月10日,天气状况良好,无云,风力较小,测量时间为10:00至14:00。在研究区中部、南部共采集花椒树、椿树、茅草、核桃树等植被和角砾岩、泥灰岩等岩石样本共8组进行了波谱测定,获得80个光谱数据(图4)。由于实际测量受到光照、风、温度等周围环境及人为因素的影响,测量结果与标准波谱库有一定差异。同时,遥感影像上读取了植被的DN值信息(图5),进而分析植被波谱特性。

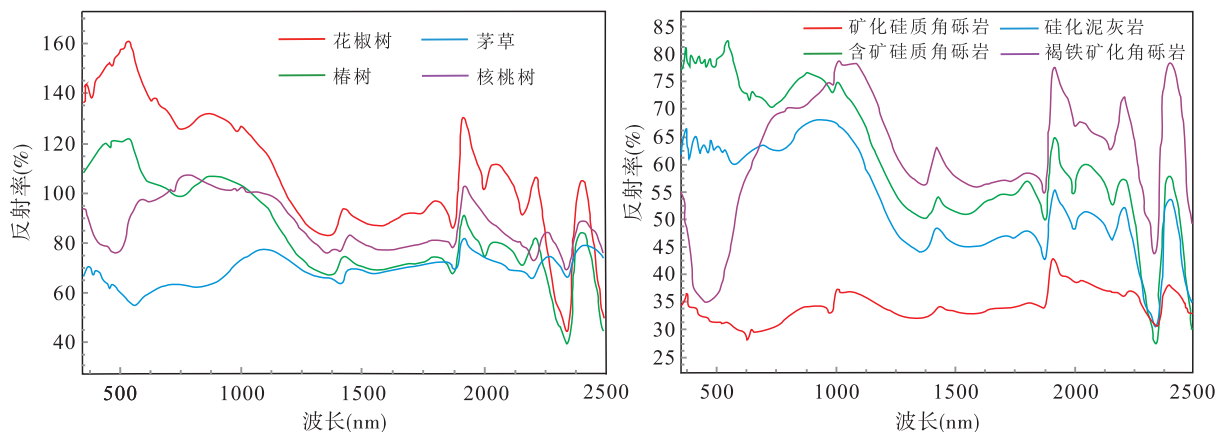


图4 研究区部分植被和岩石光谱曲线特征图

Fig. 4 Spectral characteristics of some vegetation and rocks in the study area

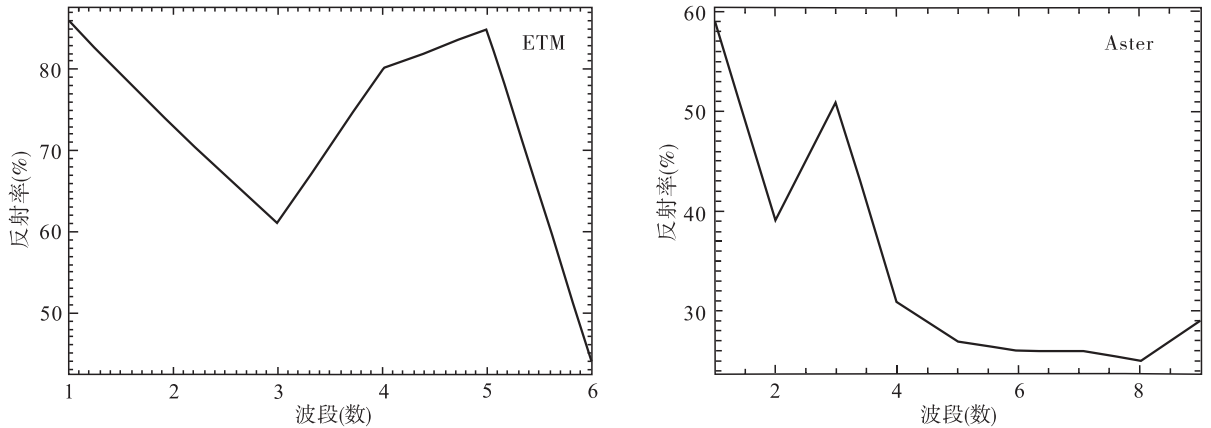


图 5 研究区 ETM+ 和 Aster 数据植被波谱特征图

Fig. 5 Vegetation spectral characteristics of ETM+ and Aster data in the study area

从图 4、图 5 可看出,研究区的植被在 ETM+ 数据的 3 波段和 Aster 数据的 2 波段有吸收谷,这对应的是红色波段;在 ETM - B4 和 ASTER - B3 是强反射,这对应的是近红外波段。而在绿色波段对应的 ETM - B2 波段和 ASTER - B1 都有微弱反射峰;在短波红外谱段内没有明显的光谱特征,总的特点是 ETM - B5 > B7, ASTER - B3 > B4 > B5 > B6 > B7 > B8。通过植被光谱曲线和岩石光谱曲线对比,可看到在可见光的绿色波段和短波红外谱段内,植被的光谱特性与一些蚀变矿物的光谱特性有相同之处,因此植被对蚀变信息的提取构成了一定的干扰,必须剔除。

2.3 植被覆盖区遥感蚀变信息提取方法

遥感信息增强方法是一类用于增强图像中的地质信息、抑制非地质信息的方法,起到提高解译精度、准确区分地质体的作用。基于遥感成像理论及遥感数字图像处理理论,根据蚀变围岩的光谱特征,通过图像增强技术,对需要提取的矿物蚀变信息进行增强处理,进而提取目标信息。如何用比较通用的方法进行植被覆盖区蚀变信息增强处理,并直观的显示植被抑制后的色彩丰富的结果图以便于后续的单波段数据处理(有用信息提取),是当前图像增强领域的难点之一(俞乐,2010)。

常用的蚀变信息提取方法有波段比值法和主成分分析法,这 2 种方法都是在分析了蚀变信息在影像数据上表现出的光谱特性,有针对地对波段数据进行运算处理以达到增强突显蚀变信息的目的(韩玲等,2017)。比值法是采用同一幅多光谱影像的不同波段进行相除运算,增大地物的反射差,以突显所

要表达的内容。但该方法在突显蚀变信息的同时,破坏了原波段的光谱意义,使比值结果光谱意义不清楚(李森森等,2011)。主成分分析(PCA)法是数理统计学上处理多元数据时常用的一种重要方法,它将原有的数据信息重新调整,压缩到了几个互不相关的分量中,在新风量中,第一主分量 PC1 所含的信息量最多,其他的分量含有的信息依次递减(田淑芬等,2013)。由于主成分分析能对一些不同量纲的数据信息进行很好的重新调整,这使得原有分散的蚀变信息可能被汇集起来得到增强。但是,运用单一的比值法或主成分分析法虽能取得一定的效果,但方法过于简单化,干扰信息没能彻底的去除,蚀变信息提取的效果也十分有限(张玉君等,2014)。

地表物质复杂多变,植被往往是地物的一个重要组成部分,植被信息抑制和矿化蚀变信息提取并不是 2 个独立的环节,在植被信息抑制的同时,矿化蚀变信息将必然增强。为了从植被、基岩或土壤混合信息中有效剥离、突出蚀变“弱”信息,很多学者对植被覆盖区的蚀变矿物信息提取做了有效的探索研究。如“TM 波段比值+主成分变换”法(马建文,1997;沈利霞等,2008)、“主成分变换+特定因子求反”法(CROSTA,1989)、“多元数据分析+比值+主成分变换+掩膜+密度分割”法(遥感蚀变信息多层次分离技术)(张远飞等,1999)、“植被抑制+抗干扰主成分分析”法(陈三明等,2010)、“无损线性拉伸+消除和抑制干扰因素+波段比值/主成分分析+密度分割”法(吴志春等,2013)、“掩膜高植被区+抑制中低植被区+比值+主成分变换+密度分割”法(路轩轩等,2014)、“线性分离混合波谱-抑制

植被信息”(马超飞等,2002;陈江等,2007)、“生物地球化学+植物遥感找矿”法(魏俊超等,1990)、“最大噪声分量变换(MNF)+矿物标识”法(王爱云等,2011)、混合像元分解法(刘成等,2003;汪新庆等,2014)等。总之,国内外学者多是基于比值法、主成分分析法、光谱角制图法、混合像元分解法等方法,对传统方法进行改进与创新,效果不错。但是,图像增强效果的好坏,除与算法本身的优劣有一定关系外,还与图像的数据特征有直接关系。目前各类方法和技术大多属于试探式和面向特征问题而设计,以致对某类图像效果较好的增强方法未必一定适用于另一类图像。由于实际计算的复杂或受波谱分辨率的限制,所取得的成果很难在实践中被广泛应用。

3 研究区蚀变信息综合提取

抑制或删除影像中的植被等干扰因素对增强蚀变信息非常有利(朱骏,2012)。通过各种算法处理,使“淹没”在众多遥感信息中的微弱蚀变信息能够被突显和分离出来。根据研究区矿产地质和矿化蚀变特点,结合其高山地形和高植被覆盖地貌、遥感影像类型等特征,选择合适的方法进行矿化蚀变遥感信息提取。参考前人多种遥感蚀变信息提取方法,经多次试验和改进,本次在研究区采用“混合像元法+多层次分离技术+多元数据叠加分析法+正态分布阈值分割法”等一系列方法进行遥感蚀变信息提取,并对其结果进行对比分析,提高遥感矿致异常的准确性,以达到快速、有效的遥感地质找矿目的。

3.1 混合像元分解法

(1)混合像元分解理论基础。在遥感图像中,由于空间分辨率的限制以及地物的复杂多样性,一个像元中所包含的地物种类往往不是单一的,而是含有多种地物的光谱信号,这类像元即为混合像元。任一像元在某波段的灰度值是由本像元中各种地物在此波段的共同反射作用构成,作用的大小与地物面积具有函数关系(张玉君等,2014)。若一个像元仅包含一种地物类型,则为纯像元,它所记录的正是该类型的光谱响应特征或光谱信号。混合像元普遍存在于遥感图像中,地物分布比较复杂的区域尤其如此。对以遥感技术进行岩矿蚀变信息提取的问题而言,混合像元是影响其精度的主要原因之一,特别

是在中高植被覆盖区较为突出。如何将一个包含多种地物光谱信息的像元分解成仅记录特征矿物等信息的纯像元,成为当前遥感光谱学研究的重点和难点。因此,混合像元的问题若得不到很好的解决,将会给遥感的后续应用研究带来较大的误差。学者们给出线性混合像元分解模型(张远飞等,1999),即利用混合像元各地物所占面积的函数关系,重构了遥感数据,去除了任一像元中植被光谱信息,再使用补偿置换方法,提取出矿化蚀变信息。该方法在植被覆盖较多、种类比较单一的冀东地区提取矿化信息取得较好的效果。

(2)基于混合像元分解的地物干扰处理。要进行混合像元分解首先要选出地物端元,而地物端元光谱获取有参考端元和图像端元2种方式(邓书斌等,2010)。前者是通过光谱仪野外实地测量或者实验室测量得到,由于实际测量易受到光照、风、温度等周围环境及人为因素的影响,测量结果与标准波谱库有一定差异。图像端元是基于相关算法,从遥感影像上读取的地物端元。比较常用的算法有基于几何顶点的端元提取、基于纯净像元指数(PPI)的端元提取以及基于连续最大角凸锥(SMACC)的端元提取。本研究采用的是基于PPI的端元提取。主要步骤包括:最小噪声分离(MNF)变换、端元波谱提取、线性混合像元分解、光谱重建。

①最小噪声分离(MNF)变换。MNF变换常用于高光谱影像降维处理,将其用在本研究也可以去除遥感影像噪声。MNF变换事实上是2次连续的主成分(PCA)变换,变换后的MNF波段按信息量大小排序。研究区Aster遥感数据可见光-近红外-短波红的9个波段经过MNF变换后的贡献权重值见图6。

由图6可知,研究区Aster遥感数据的信息量集中在前6个波段,之后的波段信息量变换不大,故选取前6个波段进行纯净像元提取。

②端元波谱提取。在遥感数据多维空间中,每个混合像元可看做是由顶点(端元)构成的凸多面体内部或面上的点,将数据量庞大的各个方向的点的单位向量与遥感图像上的每个像元波谱向量做求内积运算,统计下各个像元其与单位向量的内积,即称为极值(包括极大值和极小值)的次数,这个次数即为PPI(宋义刚等,2014)。这也就是根据凸面积几何学分析方法得到的纯净像元指数(PPI)算法。纯

净像元指数(PPI)值越大,表明该像元纯度越高(刘汉湖等,2013)。运用 ENVI5.3 软件,选取 MNF 变换结果的前 6 个波段进行 PPI 计算,设置合理的迭代次数和阈值,经多次运算(图 7),PPI 值接近 250 000 后趋向水平,即该结果接近纯净的单一地物像元。

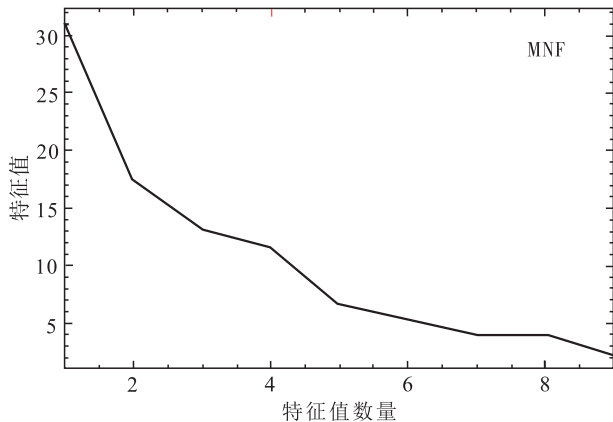


图 6 研究区 Aster 数据 MNF 变换结果

Fig. 6 MNF transformation results of Aster data in the study area

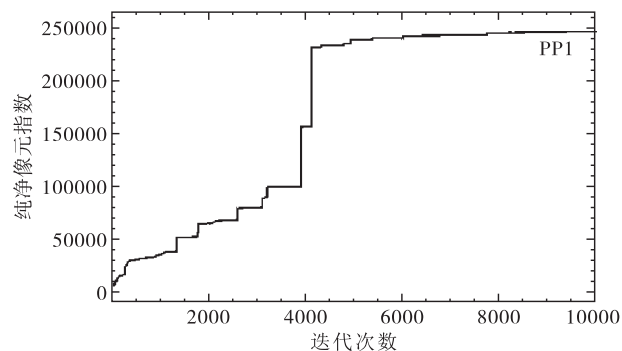


图 7 研究区 Aster 数据 PPI 统计图

Fig. 7 PPI statistical chart of Aster data in the study area

运用 N 维可视化工具,观察 PPI 运算结果,其定点处聚集在一起的端元群可作为一种地物端元(图 8)。本研究共圈出了 3 种地物端元,提取的地物端元波谱如图 9,各端元在 Aster 可见光-近红外和短波红外各波段的反射率值差异较大。

③线性混合像元分解。线性混合像元分解的结果就是地物端元在各个像元中的比例,是端元地物的丰度图(刘汉湖等,2013)。通过分析图 8、图 9 中红绿蓝 3 种类型的像元分布即波谱特征,可看出在研究区内红色端元群分布最广,其 DN 值较低,且从

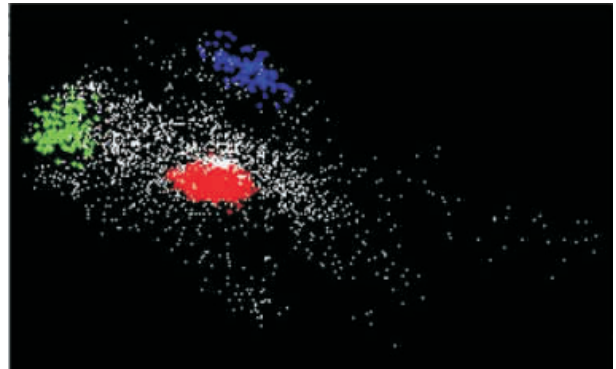


图 8 研究区 Aster 数据 N 维可视化窗口

Fig. 8 N-dimension visualization window of Aster data in the study area

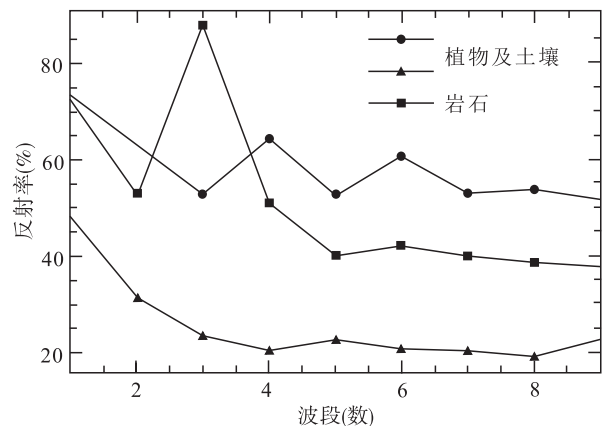


图 9 研究区 Aster 数据地物端元波谱

Fig. 9 Surface element spectrum of Aster data in the study area

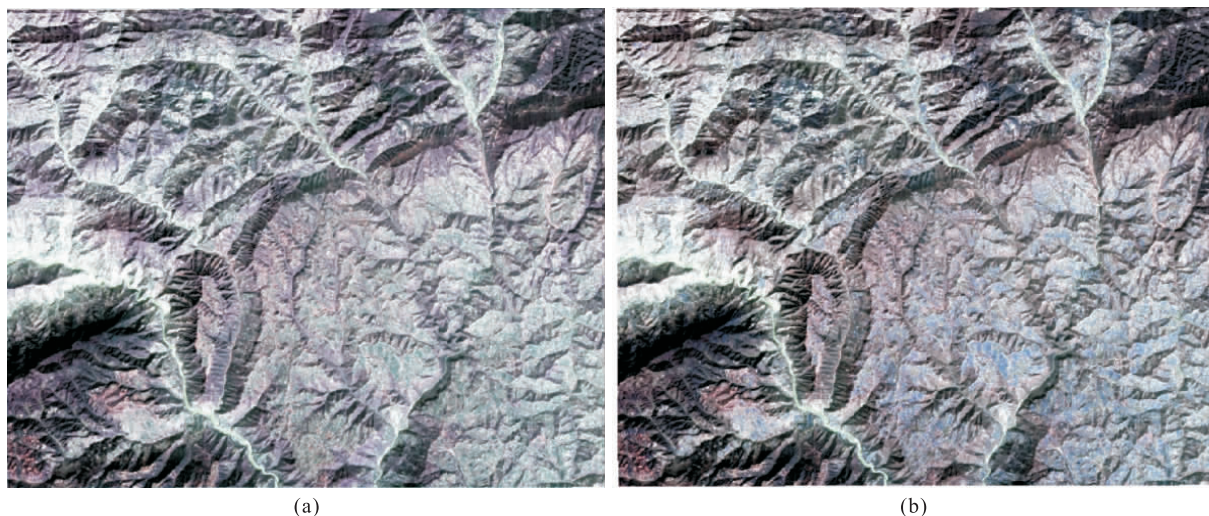
第 1 波段到第 9 波段 DN 值减小;绿色端元群在第 2 波段 DN 值显示为低谷,在第 3 波段为高峰值;蓝色端元群规模较小,在第 3、5、7 波段 DN 值为低谷,在第 4、6 波段为高峰。结合野外采集的植被和岩石光谱信息,以及地物端元在 Aster 真彩色合成遥感图像上的 ROI,进行光谱曲线对比,得到如下结论:红色端元和蓝色端元为 2 种植物(或植被与土壤),为提取遥感蚀变信息时的干扰信息,而绿色端元为岩石端元信息。由于研究区内不可能只有这 3 种端元地物,存在未穷尽的地物端元,故在做线性像元分解时会出现丰度值大于 1 或是小于 0 等异常值出现。运用 ENVI 中的线性波谱分离工具,设置约束条件使用总和限制,将丰度值限制在 0 到 1 之间。

④光谱重建。消除混合像元中的植被端元,剩余端元反射值不能代替整体反射值,需要利用岩石、土壤端元反射值弥补消除的植被端元反射值,即光

谱重建。光谱重建后各像元的反射值消除了植被端元的影响,只代表岩石、土壤的反射值,在此基础上提取矿化蚀变信息受植被的影响会小(腾飞等,2018;张新虎等,2015)。

以 Aster 第一个波段为例,使用第一波段的反射率值(DN1)减去各个干扰地物端元在该波段的反射率值,得到非干扰地物信息在像元中的反射率值,用该结果除以非干扰地物信息在该像元中所占的比

重(1减去各干扰地物端元丰度),即得到除去干扰信息的新波段。以此类推,可以获得 Aster 全部波段的新波段反射率 DN。具体实现使用 ENVI 5.3 软件的波段运算 Band Math 工具,去除结果见图 10。从图 10 中可看出,剔除主要植被干扰信息后,影像色调、纹理皆有变化,减少了绿色信息,影像整体偏灰白。对比去干扰前影像图(图 3),认为去除植被干扰的效果较不明显。



a. 未去干扰;b. 混合像元分解去干扰

图 10 影像去干扰效果对比图

Fig. 10 Contrast of image interference effect(a. uninterference; b. mixed pixel decomposition to interference)

3.2 多层次分离技术

(1)多层次分离技术理论基础。通过对遥感图像的“背景”和“干扰”的多层次分离,凸显出遥感矿化蚀变“弱”信息,实现信息的增强与提取,这即为遥感蚀变信息多层次分离技术(张远飞等,1999)。首先是梳理与归纳,把遥感蚀变信息提取转化成对遥感图像的“背景”、“干扰”与“蚀变异常”3个主要对象的研究;再把遥感数据的图像空间变换成光谱数据的点阵空间去研究;运用概率理论以二维散点图方式进行分析研究(张远飞等;2011)。而后,张远飞等(2013)提出了波段序偶的概念,即为遥感图像中2个低相关且在其生成的二维散点图上能使某类蚀变矿物偏离背景的波段组合。波段序偶更好的诠释了遥感蚀变信息多层次分离技术中二维散点图的物理意义、统计意义和地质意义。其将二维散点图的空间结构划分了5个类型,并逐一分析并作出了相应地质解释。该方法对于高植被覆盖区的遥感矿化蚀变信息

提取有一定的优势(杨正萌等,2015)。

(2)研究区多层次分离的地物干扰处理。①主成分分析。选取覆盖研究区的 Landsat7 ETM+ 数据,景位号:129/037,时间:2001-05-13,尽可能减少植被和冰雪的干扰。经正射校正、融合或重采样等预处理后,对6个波段进行 PCA 主成分分析,获得6个主成分的特征向量值(表1)。

从表1分析可知,第一主成分代表6个波段全部信息的92.324%;第二、三主成分贡献率分别为4.9203%和2.0067%,均较高,三者之和占全部信息的99.251%,其代表的信息基本可以作为背景信息;而第六主成分贡献率低,仅占0.0714%,不具实际意义。因此,该地区的矿化信息主要集中在第四和第五主成分中。从特征向量矩阵可看出,在第四主成分中,四波段(B5)和七波段(B7)存在序偶关系;第五主成分中三波段(B3)和一波段(B1)存在序偶关系。

表 1 研究区 ETM+数据蚀变信息主成分分析表

Tab. 1 Principal component analysis of ETM+ data alteration information in the study area

特征向量	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band7	特征值	贡献率(%)	百分比和(%)
PC1	0.333 702	0.364 104	0.429 626	0.358 496	0.471 982	0.469 261	2 963.916 5	92.324	92.32
PC2	0.331 417	0.254 623	-0.051 097	0.656 358	-0.446 603	-0.438 701	157.958 5	4.920 3	97.24
PC3	0.175 25	0.288 328	0.551 644	-0.484 919	-0.580 155	0.100 586	64.412 2	2.006 7	99.25
PC4	-0.270 801	-0.004 285	-0.297 267	0.280 828	-0.474 602	0.730 869	11.507 2	0.358 4	99.61
PC5	0.591 858	0.320 575	-0.635 542	-0.351 467	0.050 159	0.130 298	10.241 9	0.319	99.93
PC6	-0.569 618	0.785 287	-0.127 352	-0.055 984	0.115 914	-0.161 465	2.291 5	0.071 4	100

②二维散点图。波段序偶是遥感图像中 2 个低相关且偏离背景的波段组合,二维散点图是表达波段序偶光谱空间结构信息的最佳图示方式。该图不仅

能够定位出遥感图像的背景、干扰与蚀变信息,而且可以帮助实现遥感蚀变信息提取方法的选择。笔者利用 B5 和 B7、B3 和 B1 分别形成二维散点图(图 11)。

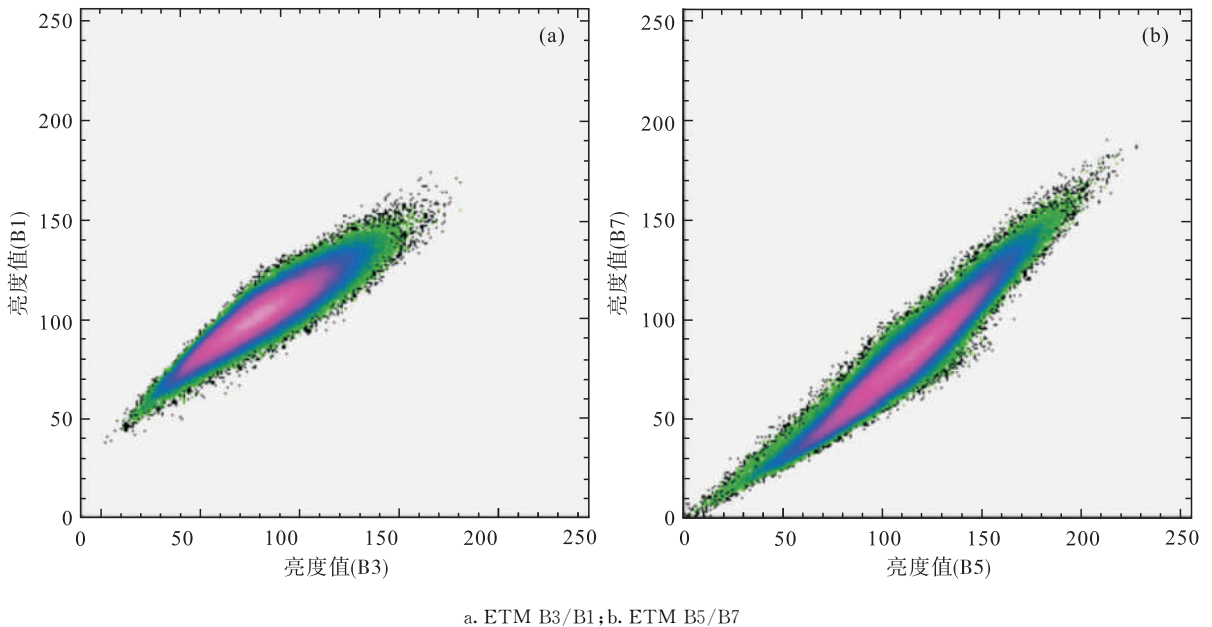


图 11 研究区 ETM+数据波段二维散点图

Fig. 11 Two-dimensional scatter diagram of ETM+ data band in the study area

从图 11 可看出,光谱数据点阵呈高斯分布,即二维的椭圆形态,主椭圆可以看做是该区的背景值,小椭圆则对应于岩石区、暗区、植被与蚀变区等子类地物,矿化异常必须满足 $B5/B7$ (或 $B3/B1$) 大于 1,也就是图中 $Y=X$ 线上方的点阵,从中再分离出蚀变区。

因此,通过研究,认为研究区 ETM 数据可进行“最优波段(变量)组合”和“最佳分离(提取)方法”的优化选择,选用最佳 PC 主成分和波段合成假彩色图像,采用“分割”技术对蚀变信息做进一步的分离,

进而提取出铁染、羟基等多光谱找矿标志参数。

3.3 多元数据综合分析法

基于蚀变矿物在 ETM、Aster 等多光谱遥感影像上显示的光谱特征具有相似性的特点,可以将不同数据和不同方法提取的某种矿化信息做叠合分析。即以 ETM 和 Aster 为数据源,运用比值法、主成分分析法,分别提取铁染、羟基等遥感异常,再将各种数据源和各类方法提取的铁染(或羟基)异常组合而做主成分分析,探讨其特征向量属性,选取信息量最合适的主分量作为铁染(或羟基)异常图像。该

方法是针对性地选择了特定的原始信息进行2次波段运算,以达到增强蚀变信息的目的。

(1)多元数据铁染异常提取。针对ETM遥感数据,含 Fe^{3+} 离子矿物在第3波段(B3)处有强反射峰,可采用ETM1345波段做主成分分析来提取铁染异常信息,亦可以选用ETM3和ETM1进行波段比值运算提取该异常信息;针对Aster遥感数据,含 Fe^{3+} 离子矿物在第2波段(B2)处有强反射峰,可采用Aster1234波段做主成分分析或选用Aster和Aster1进行波段比值运算来提取铁染异常信息。表2和表3分别为研究区ETM1345和Aster1234两组组合分析所得的特征向量矩阵。

从表2可看出,采用ETM1345波段组合经主成分分析法所得到的第一主分量PC1含有的信息量最大,全部来自于4个波段的加信息,而第四主分量PC4,信息量最低,且ETM1系数值最小、ETM3值最大,这与含铁染矿物的光谱特性相符。因此,ETM1345-PC4主分量可选作增强铁染异常后的图像。同样,从表3可看出,采用Aster1234波段组合经主成分分析法所得到的第四主分量PC4,信息量最低,且Aster5系数值为正且最大,符合含铁染蚀变矿物的光谱特性。因此Aster1234-PC4可作为增强铁染异常后的图像。

为研究和提取研究区的全部铁染蚀变矿物的混合蚀变信息,在前面ETM1345和Aster1234主成分得到的铁染异常的基础上,又选择了波段比值运算ETM3/ETM1和Aster2/Aster1,将这4幅图像作为输入数据再进行主成分分析,以得到研究区蚀变矿物混合异常增强信息图像。即C1:ETM3/ETM1;C2:AST2/AST1;C3:ETM1345-PC4;C4:AST1234-PC4。经2次主成分分析后,统计的特征向量矩阵见表4。

表2 ETM1345波段组合主成分分析的特征向量矩阵表
Tab.2 Eigenvector matrix of ETM1345 band combined principal component analysis

类别	Band1	Band3	Band4	Band5	信息量(%)
PC1	-0.416	-0.529	-0.454 5	-0.583 5	91.35
PC2	-0.306 8	0.158 4	-0.702 5	0.622 3	5.53
PC3	-0.265 9	-0.707	0.409 7	0.511 4	2.69
PC4	-0.813 7	0.441 7	0.363 4	-0.103 4	0.44

表3 Aster1234波段组合主成分分析的特征向量矩阵表
Tab.3 Eigenvector matrix of Aster1234 band combined principal component analysis

类别	Band1	Band2	Band3	Band4	信息量(%)
PC1	-0.469 4	-0.518 2	-0.515 3	-0.495 6	96.37
PC2	-0.334 1	-0.555 7	0.752 6	0.115	2.01
PC3	-0.257	-0.199 4	-0.392 7	0.860 2	1.44
PC4	-0.775 9	0.618 8	0.117 7	-0.034 6	0.18

表4 关于铁染的混合数据组合主成分分析的特征向量矩阵表
Tab.4 Eigenvector matrix of composite principal component analysis of mixed data

类别	ETM3/ ETM1	AST2/ AST1	ETM1345 -PC4	AST1234 -PC4	信息量 (%)
PC1	0.0055	0.0125	0.9826	0.1854	76.14
PC2	-0.0206	-0.0007	0.1855	-0.9824	23.77
PC3	-0.4378	-0.8989	0.0116	0.012	0.07
PC4	-0.898 8	0.437 9	-0.003 9	0.017 8	0.02

从表4中可以看出,关于铁染的混合数据组合主成分分析得到的各主分量都有对蚀变异常信息有所增强,但只有第一主分量PC1是包含了多种蚀变异常信息的加信息。虽然这一分量中来自比值波段C2的蚀变信息较少,但是来自第一主成分分析的异常信息C3和C4是最多的。因此,第一主分量PC1被选作为研究区铁染信息的异常提取图像。

(2)多元数据羟基异常提取。针对ETM遥感数据,含 OH^{-} 离子团矿物在B4和B7处都有强吸收谷,在B5波段处由强反射峰,可采用ETM1457波段做主成分分析来提取羟基异常信息,亦可以选用ETM5和ETM7进行波段比值运算提取该异常信息;针对Aster遥感数据,含 OH^{-} 离子团矿物在第8波段(B8)处有吸收谷,在Aster5或Aster4波段呈现相对反射峰,可采用Aster1358、Aster1348做主成分分析或选用Aster4/Aster8和Aster5/Aster8进行波段比值运算来提取羟基异常信息。表5、表6和表7分别为研究区ETM1457、Aster1358、Aster1348等组合主成分分析所得的特征向量矩阵。

从表5可看出,采用ETM1457波段组合经主成分分析法所得到的第四主分量PC4,信息量最低,且ETM5系数值为正,ETM4和ETM7为负,符合

含羟基蚀变矿物的光谱特性,因此 ETM1457 - PC4 可作为增强羟基后的图像。表 6 中,Aster1358 组合主成分分析得到的第四主分量 PC4 中,Aster8 和 Aster3 系数符号相同,而 Aster1 和 Aster5 系数符号相同,这符合研究区中羟基蚀变异常的光谱特性,但要将 PC4 取反,即 Aster1358 - PC4 可作为增强后的羟基异常图像。同表 6 类似,表 7 中,Aster1348 组合主成分分析得到的第四主分量 PC4 中,Aster8 和 Aster3 系数符号相同,且与 Aster1 和 Aster4 系数符号相反,这符合研究区中羟基蚀变异常的光谱特性,即 Aster1348 - PC4 可作为强后的羟基异常图像。

表 5 ETM1457 波段组合主成分分析的特征向量矩阵表
Tab. 5 Eigenvector matrix of ETM1457 band combined principal component analysis

类别	Band1	Band4	Band5	Band7	信息量(%)
PC1	0.397	0.432 7	0.577 9	0.566 7	91.47
PC2	0.361 6	0.736 6	-0.391 4	-0.416 5	6.60
PC3	0.552 7	-0.323 4	-0.603 5	0.475 1	1.44
PC4	0.637 3	-0.407	0.385 5	-0.528 8	0.49

表 6 Aster1358 波段组合主成分分析的特征向量矩阵表
Tab. 6 Eigenvector matrix of Aster1358 band combined principal component analysis

类别	Band1	Band3	Band5	Band8	信息量(%)
PC1	0.472 6	0.521 8	0.491 5	0.512 7	96.34
PC2	0.140 8	0.750 3	-0.473 3	-0.439 6	2.48
PC3	-0.861 4	0.405 2	0.287 1	0.106 5	1.04
PC4	-0.121 5	0.026 3	-0.672 3	0.729 7	0.13

表 7 Aster1348 波段组合主成分分析的特征向量矩阵表
Tab. 7 Eigenvector matrix of Aster1348 band combined principal component analysis

类别	Band1	Band3	Band4	Band8	信息量(%)
PC1	0.468 1	0.518 2	0.504 5	0.507 7	96.55
PC2	-0.133 9	-0.758	0.412 8	0.486 9	2.23
PC3	0.857 2	-0.378 6	-0.343 3	-0.062 7	1.09
PC4	0.167 7	-0.116 1	0.676 2	-0.707 9	0.13

对于增强和提取含羟基异常的混合蚀变异常信息,选择 C1:ETM5/ETM7;C2:ETM1457 - PC4;C3:Aster1358 - PC4;C4:Aster1348 - PC4 等 4 组

羟基异常信息图,进行主成分分析后,获得的特征向量矩阵见表 8。

表 8 关于羟基的混合数据组合主成分分析的特征向量矩阵表
Tab. 8 Eigenvector matrix of composite principal component analysis of mixed data about hydroxyl groups

类别	ETM5/ ETM7	ETM1457 - PC4	AST1358 - PC4	AST1348 - PC4	信息量 (%)
PC1	0.000 5	0.995 1	0.005 7	0.099 2	70.98
PC2	0.024 8	-0.067 2	0.772 7	0.630 7	17.05
PC3	-0.026 7	-0.073 1	-0.633 7	0.769 7	11.96
PC4	0.999 3	-0.000 8	-0.036 1	0.004 8	0.01

表 8 中,第一主分量 PC1 包含了各种羟基异常信息的加信息,增强了各种蚀变异常信息,因此,可被选择为增强后的羟基异常图像。

3.4 蚀变信息分级提取方法

自然界中蚀变矿物在各种地质内外应力的作用下,种类各异、强度不同,且有规律的产生和分布。针对遥感蚀变信息提取,只有按照蚀变异常的客观规律来进行,才能使所提取的遥感异常作为一种示矿信息,更好地服务于地质找矿。因此,对遥感蚀变异常合理的分级提取,是遥感地质找矿的必要步骤(张守林等,2006)。

在遥感蚀变信息的分级提取中,非监督分类法使用的较多。其包括正态分布阈值分割法和最优密度分割法,前者是将遥感影像或者是由其只做过线性变换后所得影像的像元看作服从或近似正态分布的变量,利用 $X(\text{平均值}) \pm k(\text{异常系数}) \times \delta(\text{标准差})$ 作为尺度来切割蚀变异常(张玉君等,2014);最优密度分割法是根据像元灰度值和其概率密度分布特征来选择分割点(吴德文等,2002)。两者各有利弊,前者获取切割点较容易,对于正态分布数据更合理。结合上节多元数据异常提取研究成果,即以铁染、羟基第一主成分为数据源,采用正态分布阈值分割法来分级提取研究区遥感矿化蚀变信息,提取结果见图 12、图 13。

3.5 提取结果分析

提取结果显示,研究区遥感铁染、羟基异常较分散,三级异常套合一般,规模较小,以不规则状、条带状、星点状分布于大桥金矿区西南侧、安子山北、朱家河一带,其余地区零星分布。铁染异常面积为 6.97 km^2 ,占研究区总面积为 1.63% ;羟基异常面

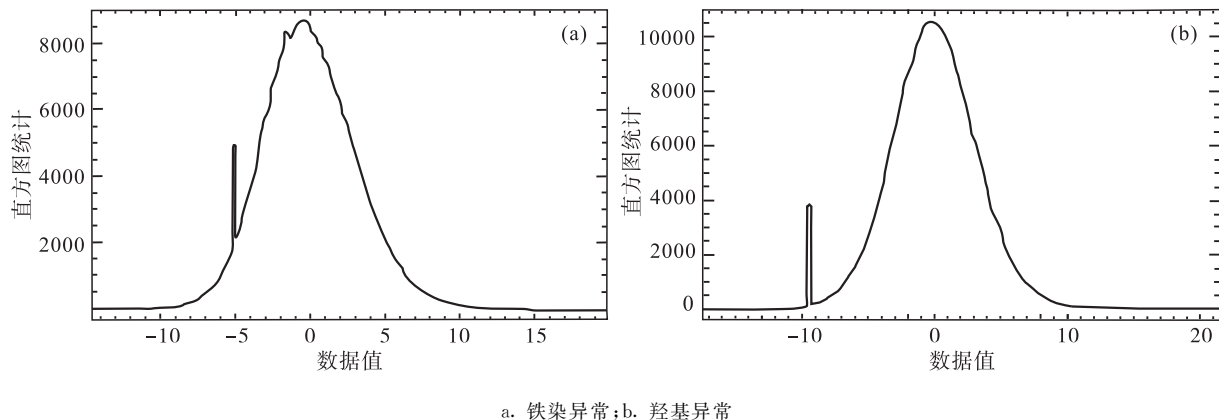


图 12 研究区遥感异常数据统计直方图

Fig. 12 Statistical histogram of remote sensing anomaly data in the study area

(a. Iron-staining anomaly; b. Hydroxyl anomaly)

积为 5.38 km^2 , 占研究区总面积为 1.26% 。矿床点与遥感异常相关比率为 45.5% 。结合地质矿产及遥感影像解译获取的多种资料,对遥感异常进行分析和筛选,逐一分析各异常区域的成矿地质条件,为研究区地质找矿提高有价值的线索。通过分析,认为研究区遥感异常与三叠系赋矿岩层空间套合较好,多处于不同地层接触地带及区域性断裂影响部位,羟基异常与已知大桥金矿床、安子山金矿点、朱家河金等矿点、矿化带或矿化蚀变有较好的对应关系,遥感矿化蚀变信息等找矿标志较丰富,有较好的找矿潜力。因而在研究区开展遥感异常提取工作可为该地区的地质找矿提供重要依据。

分析认为,当遥感混合像素中植被成分较高时,运用混合像元分解、多层次分离技术以及多元数据叠加分析法等方法都很难解决植被干扰问题了,这一结果与张玉君等“植被干扰容限问题模型实验结果”是一致的。但是,单个混合像元不能代表全区,在高植被覆盖地区总有一些局部裸露或植被被砍伐了的地段,植被少于 50% 。对其像素信息提取不构成严重丢失。也就是说,尽管在高植被覆盖区提取的遥感矿化蚀变信息效果一般,但仍具有价值。因此在高植被覆盖区运用“多元数据叠加分析法”提取的遥感矿化蚀变信息,具有一定示矿意义。



图 13 研究区遥感异常提取结果图

Fig. 13 Extraction results of remote sensing anomalies in the study area

4 结论

(1) 笔者运用“混合像元法剔除干扰+多层次分离技术分析波段相关关系+多元数据叠加分析法增强蚀变信息(对 ETM 和 Aster 数据进行二次综合分析)+正态分布阈值分割法分级提取”,即“多元数据叠加分析”方法提取了甘肃省西河县大桥—石峡地区的遥感矿化蚀变信息,效果较好。

(2) 笔者运用“混合像元法”去除植被干扰的效果不明显;“多层次分离技术”在分析 ETM 波段相关关系起到了一定的作用;“多元数据叠加分析法”增强了蚀变信息,在高植被覆盖区遥感矿化蚀变信息提取过程中起到了主导性作用;“正态分布阈值分割法”决定了各级遥感异常的强弱和分布位置。

(3) 利用 ETM 和 Aster 影像数据,采用“多元数据叠加分析法”的方法对甘肃省西河县大桥—石峡地区进行蚀变信息提取。结果显示,铁染异常区占研究区面积为 1.63%;羟基异常区占研究区面积为 1.26%。遥感铁染、羟基异常分布区域与已知矿床点位置较吻合。矿床点与遥感异常相关比率为 45.5%。说明该方法在高植被覆盖区提取遥感矿化蚀变信息可行。

参考文献(References):

- 吕凤军,郝跃生,王娟,等. 多光谱蚀变遥感异常提取方法研究[J]. 遥感信息,2008,(4): 98-108.
- LU Fengjun, HAO Yuesheng, WANG Juan, et al. Review of Multi-spectral Alteration Remote Sensing Anomaly Extraction Methods[J]. Remote Sensing Information, 2008,(4): 98-108.
- 张玉君,杨建民. 基岩裸露区蚀变岩遥感信息的提取方法[J]. 国土资源遥感,1998,10(2): 46-53.
- ZHANG Yujun, YANG Jianmin. The Method Of Abstracting Remote Sensing Information Of Altered Rocks In The Uncovered Bedrocks Area[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1998,10(2): 46-53.
- 田淑芬,詹骞. 遥感地质学(第二版)[M],北京:地质出版社,2013.
- TIAN Shufen, ZHAN Qian. Remote Sensing Geology(2nd Edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House,2013.
- 张玉君,杨建民,姚佛军,等. 多光谱遥感找矿信息提取实用技术[M]. 北京:地质出版社,2014.
- ZHANG Yujun, YANG Jianmin, YAO Fojun, et al. Multi-

spectral remote sensing ore information extraction practical technology [M]. Beijing: Geological Publishing House,2014.

- 刘成,王丹丽,李笑梅. 用混合像元线性模型提取中等植被覆盖区的黏土蚀变信息[J]. 遥感技术与应用,2003,18(2):95-98.
- LIU Cheng, WANG Danli, LI Xiaomei. Extracting Clay Alteration Information of Medium Vegetation Covered Areas Based on Linear Model of Spectral Mixture Analysis[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003,18(2):95-98.
- 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):493-498.
- CHENG Tanwu, CHEN Jianguo, XU Mengyang. Application of mixed pixel decomposition in mineralization and alteration information extraction in vegetation-covered area: A case study of the Dahaoshan gold deposit in Jiangxi Province[J]. Journal of Geology, 2017,41(3): 493-498.
- 孙永彬,王瑞军,魏本赞,等. 高光谱遥感地空综合预测方法在新疆卡拉塔格地区铜金矿床找矿中的应用[J]. 中国地质,2018,45(1):178-191.
- SUN Yongbin, WANG Ruijun, WEI Benzan, et al. The application of hyperspectral remote sensing ground-air integrated prediction method to the copper gold deposit prospecting in Kalatag area, Xinjiang[J]. Geology in China, 2018,45(1):178-191.
- 高猛,付翰泽,陈川. 遥感技术在和田玉成矿要素识别与找矿预测中的应用——以南阿尔金塔什萨依一带为例[J]. 西北地质,2019,52(3):240-252.
- GAO Meng, FU Hanze, CHEN Chuan. Hetian Jade Metallogenic Factors Identification and Prospecting Prediction by Remote Sensing Technology: Example from Tashisayi Area in South Altyn[J]. Northwestern Geology, 2019,52(3):240-252.
- 马超飞,蔺启忠,马建文,等. 定量消除植被影响的补偿置换方法研究[J]. 中国图形图像学报,1999,4(7):553-556.
- MA Chaoifei, LIN Qizhong, MA Jianwen, et al. Methodology Study of Compensated Replacement for Quantitatively Removing Vegetation Effect[J]. Journal of Image and Graphics, 1999,4(7):553-556.
- 查显杰,戴志阳,傅容珊. 多维空间角度方法提取植被覆盖区蚀变信息[J]. 遥感信息,2005,(2):3-10.
- ZHA Xianjie, DAI Zhiyang, FU Rongshan. Alteration Information Abstraction at Vegetation Covered Area Using Multidimensional Space Angle Method[J]. Remote Sensing Information, 2005,(2):3-10.
- 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 Jiang, WANG Anjian, HUANG Miaofen. The AS-TER Imaging Rock and Soil Information Extraction Method in Multiple Vegetations Covered Areas[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(1): 86-91.
- 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 Xuanxuan, ZHU Guchang, ZOU Lin, 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.
- 杨正萌, 白卉, 孟嵩. 高植被覆盖区遥感矿化信息提取方法研究[J]. 吉林地质, 2015, 34(2): 100-103.
- YANG Zhengmeng, BAI Hui, MENG Song. The study of alteration information extraction with remote sensing in high vegetation coverage area[J]. Jilin Geology, 2015, 34(2): 100-103.
- 张志. 中高植被覆盖区斑岩型铜矿蚀变信息提取方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- ZHANG Zhi. Study on Method of Alteration Information of Porphyry Copper Deposit in Middle and High Vegetation Coverage Area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- 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 Jun. A Study on Remote Sensing Alteration Information Extraction in Vegetation Area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- 张新虎, 刘建宏, 梁明宏, 等. 甘肃省区域成矿及找矿[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- ZHANG Xihu, LIU Jianhong, LIANG Minghong, et al. Regional mineralization and prospecting in Gansu Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- 腾飞, 刘云华, 李中会, 等. 西秦岭大桥金矿硅质岩硅氧同位素特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2018, 51(1): 255-264.
- TENG Fei, LIU Yunhua, LI Zhonghui, et al. Si-O Isotopic Characteristics and Genesis of the Silicicous Rocks from the Daqiao Gold Deposit in West Qinling[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(1): 255-264.
- 张新虎, 任丰寿, 余超, 等. 甘肃成矿系列研究及矿产勘查新突破[J]. 矿床地质, 2015, 34(6): 1130-1142.
- ZHANG Xihu, REN Fengshou, YU Chao, et al. Break through in geological prospecting based on study of metallogenic regularity[J]. Mineral Deposits, 2015, 34(6): 1130-1142.
- 张翔, 戴霜, 刘建宏, 等. 甘肃西秦岭金矿成矿与找矿研究[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- ZHANG Xiang, NAI Shuang, LIU Jianhong, et al. Study on metallogenesis and prospecting of the West Qinling gold deposit, Gansu [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- 王润生, 熊盛青, 聂洪峰, 等. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1699-1743.
- WANG Runsheng, XIONG Shengqing, NIE Hongfeng, et al. Remote Sensing Technology and its Application in Geological Exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1699-1743.
- 俞乐. 多源遥感信息快速处理与岩性信息自动提取方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- YU Le. Towards Multi-source Remote Sensing Information Fast Processing and Automatic Lithological Information Extraction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- 韩玲, 杨军录, 陈劲松, 等. 遥感信息提取及地质解译[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- HAN Ling, YANG Junlu, CHEN Jinsong, et al. Remote sensing information extraction and geological interpretation[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- 李森森, 邢立新, 潘军, 等. 组合分析蚀变信息提取方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(3): 303-308.
- LI Miaomiao, XING Lixin, PAN Jun, et al. Research of Combinatory Analysis Method in Altered Information Extraction[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(3): 303-308.
- 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 Jianwen. Methodology Study of Quickly Identifying Mineral Bearing Alteration from TM Data[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(3): 208-213.
- 沈利霞, 刘丽萍, 苏新旭, 等. 不同植被覆盖率地区遥感矿化蚀变提取研究[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 293-298.
- SHEN Lixia, LIU Liping, SU Xinxu, et al. Study on Identification of Altered Walk-rock in Areas of Different Vegetation on Coverages Based on Remote Sensing[J]. Geoscience, 2008, 22(2): 293-298.
- 张远飞, 吴健生. 基于遥感图像提取矿化蚀变信息[J]. 有色金属矿产与勘查, 1999, 63(6): 604-606.
- ZHANG Yuanfei, WU Jiansheng. Extracting mineralization and alteration information based on remote sensing image[J]. Non-ferrous Metal Minerals and Exploration, 1999, 63(6): 604-606.
- 陈三明, 钱建平, 陈宏毅, 等. 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, 7(1): 33-40.
- CHEN Sanming, QIAN Jianping, CHEN Hongyi, et al. Sensing Alteration Information Optimization Extraction in Vegetation Coverage Area and Prospects Forecasting in Southeast Guangxi[J]. Journal of Guilin University

- of Technology, 2010, 7(1):33-40.
- 吴志春,郭福生,刘林清,等.基于TM/ETM影像的复合法遥感蚀变异常提取应用研究[J].地质与勘探,2013,49(3):511-522.
- WU Zhichun, GUO Fusheng, LIU Linqing, et al. Application of Remote Sensing Alteration Anomaly Extraction with the Method of Composite Algorithm Based on TM/ETM Images[J]. Geology and Exploration, 2013, 49(3):511-522.
- 马超飞,马建文,韩秀珍,等.应用多源数据提取高植被覆盖地区岩性信息——以湖南黔阳地区为例[J].地质科学,2002,37(3):365-371.
- MA Chaofei, MA Jianwen, HAN Xiuzhen, et al. Extraction of Lithological Information Using Multi-data in Densely Vegetated Area——An example from Qianyang, Hunan [J]. Scientia Geologica Sinica, 2002, 37(3):365-371.
- 魏俊超,傅碧宏.地植物遥感技术在找矿勘探中的应用[J].遥感技术动态,1990,(3):35-42.
- WEI Junchao, FU Bihong. Application of Remote Sensing Technology of Land Plants in Prospecting Exploration [J]. Remote Sensing Technology Developments, 1990, (3):35-42.
- 王爱云,王安建,李丽辉.基于最大噪声分量变换(MNF)和矿物标识的植被区蚀变信息提取[J].地质与勘探,2011,47(4):710-718.
- WANG Aiyun, WANG Anjian, LI Lihui. Mapping mineralogical alteration using MNF transform and mineral indicators in vegetated areas [J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4):710-718.
- 汪新庆,史超,王群.基于混合像元分解的高植被覆盖区蚀变信息提取——以福建上杭紫金山矿田为例[J].地质找矿论丛,2014,29(1):96-101.
- WANG Xingqing, SHI Chao, WANG Qun. Mixed pixel unmixing-based alteration information extraction from heavy vegetation areas: A Case of Zijinshan Mountain ore field Shanghang, Fujian [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2014, 29(1):96-101.
- 邓书斌,陈秋锦,杜会建,等. ENVI 遥感图像处理方法[M].北京:高等教育出版社,2010.
- DENG Shubin, CHEN Qiujin, DU Huijian, et al. ENVI remote sensing image processing method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- 宋义刚,叶舜,吴泽彬,等.基于GPU的高光谱遥感图像PPI并行优化[J].航天返回与遥感,2014,35(4):74-80.
- SONG Yigang, YE Shun, WU Zebin, et al. Parallel Optimization of Pixel Purity Index Algorithm Based on GPU for Hyperspectral Remote Sensing Image [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(4):74-80.
- 刘汉湖,杨武年,杨容浩.高光谱遥感岩矿端元提取与分析方法研究[J].岩石矿物学杂志,2013, 8(2):213-220.
- LIU Hanhu, YANG Wunian, YANG Ronghao. The end-member extraction and analysis method for rocks and minerals using hyperspectral remote sensing image [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2013, 8(2):213-220.
- 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,(2):7-13.
- ZHANG Yuanfei, WU Dewen, YUAN Jiming, et al. The Model and Application of Multi-level Detaching Technique of Remote Sensing Alteration Information [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2011, (2):7-13.
- 张远飞,袁继明,杨自安,等.基于物理意义的二维散点图类型划分与遥感蚀变信息提取[J].国土资源遥感,2013, 25(2):57-62.
- ZHANG Yuanfei, YUAN Jiming, YANG Zian, et al. Type classification of 2D scatter plot of remote sensing image based on the physical meaning and extraction of remote sensing alteration information [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2013, 25(2):57-62.
- 张守林.基于ETM数据矿化蚀变信息定量提取方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2006.
- ZHANG Shoulin. A study on methods used to quantitatively extract mineralized alteration information from ETM data [D]. Beijing: China university of Geosciences (Beijing), 2006.
- ROWAN L C, GOETZ A F H, ASHLEY R P. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near-infrared multispectral images [J]. Geophysics, 1977, 42:522-535.
- BEIRANVAND Pour, A., HASHIM, M., MARGHANY, M. Using spectral mapping techniques on short wave infrared bands of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran [J]. Physical Sciences, 2011, 6(4):917-929.
- BOARDMAN J W. Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition: in proceeding, IGARSS'89, [J]. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, 1989, 4:2069-2072.
- POURNAMDARI M, HASHIM M. Detection of chromite bearing mineralized zones in Abdasht ophiolite complex using ASTER and ETM+, remote sensing data [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(5):1973-1983.
- CROSTA A, MOORE J. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A prospecting case history in greenstone belt terrain [J]. In: Proceedings of the 7th ERIM Thematic Conference; Remote Sensing for Exploration Geology, 1987, 1173-1187.