

引用格式: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.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180195

主成分分析技术在遥感蚀变信息提取中的应用研究综述

吴志春^{1,2,3}, 叶发旺⁴, 郭福生^{1,2}, 刘文恒³, 李华亮^{2,3}, 杨 羿²

1. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 南昌 330013; 2. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013;
3. 东华理工大学江西省数字国土重点实验室, 南昌 330013; 4. 核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029

A Review on Application of Techniques of Principle Component Analysis on Extracting Alteration Information of Remote Sensing

WU Zhichun^{1,2*}, YE Fawang³, GUO Fusheng¹, LIU Wenheng², LI Hualiang^{1,2}, YANG Yi¹

1. Key Laboratory for Radioactive Geology and Exploration Technology, Fundamental Science for National Defense, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 4. National Key Lab of Remote Sensing Information and Imagery Analysis, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

Abstract: The principle component analysis (PCA) technique, as one of the common method of extracting alteration information of remote sensing, is characterized by undemanding quality of atmospheric correction images, easily realization, effective, and steadily i.e., and is widely used by geologists. Based on the number and type of the input images and times of the PCA, this paper subdivided the PCA analysis into the standard principle component analysis (SPCA), feature oriented principal components selection (FPCS), directed principal component analysis (DPCA), the secondary principle component analysis and the principle component analysis of different images, of which the FPCS comprise four bands and three bands principle component analysis. Based on the above mentioned, every PCA and selection criteria have been systematically introduced, especially for the Crosta technique of the FPCS and the software defoliant technique of the DPCA. Images of TM/ETM+、ASTER are selected as examples to analyze the part of application techniques of PCA on extracting alteration information of remote sensing. The results indicate that different PCA all are in favor of extracting information of iron and clay alteration. The methods of SPCA, Crosta technique, modified Crosta technique, software defoliant technique and mask or inhibition of interference information+PCA have been effectively

收稿日期:2018-04-18;修回日期:2018-09-04.

基金项目:国家自然科学基金(41802247、41603031);江西省教育厅科技项目(GJJ160584);放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室开放基金项目(RGET1305);江西省数字国土重点实验室开放基金项目(DLLJ201614)。[**Foundation items:** National Science Foundation of China, No.41802247, 41603031; The Scientific Research Fund of Jiangxi Provincial Education Department, No.GJJ160584; Key Laboratory for Radioactive Geology and Exploration Technology, Fundamental Science for National Defense, No.RGET1305; Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, No.DLLJ201614.]

作者简介:吴志春(1986-),男,江西石城人,硕士,讲师,主要从事遥感地质解译、三维地质建模方面的教学与研究。

E-mail: wuzhch_ecit@163.com

applied in the medium-low vegetated-covered area. In contrast, in the high vegetated-cover area, the principle component of alteration information derived from PCA was adopted to conduct color composite. The resulted color images were then visual interpreted to estimate the type and extent of alteration. Among these techniques, the "Mask and Crosta technique", the "Mask and software defoliant technique" and the secondary principle component analysis also can achieve good results in the high vegetated-cover area. For areas characterized by numerous kinds of interference information and complex lithology, firstly, it is practicable to divide the area into several sub- areas based on kinds of interference information and lithology; secondly, different methods of extracting alteration information should be proposed according to the features of every sub- areas; lastly, synthesizing alteration information extracted from every sub-areas.

Key words: Principal Component Analysis (PCA); Standard Principle Component Analysis (SPCA); Feature Oriented Principal Components Selection (FPCS); Directed Principal Component Analysis (DPCA); Crosta technique; software defoliant technique

***Corresponding author:** WU Zhichun, E-mail: wuzhch_ecit@163.com

摘要:主成分分析是目前遥感蚀变异常信息提取常用方法之一,该方法具有对影像大气校正质量要求不高、实现简单、提取效果好、效果稳健等优点,广受地质工作者的青睐。根据输入影像的数量及类型、主成分分析的次数等,本文将主成分分析分为标准主成分分析、特征向量主成分分析、定向主成分分析、二次主成分分析、不同影像间的主成分分析等5种类型。其中,特征向量主成分分析又可细分为4个波段特征向量主成分分析和3个波段特征向量主成分分析。在上述分类的基础上,系统介绍了各种主成分分析及蚀变信息主分量的选择,尤其是对特征向量主成分分析的Crosta技术和定向主成分分析的软落叶技术进行了详细阐述。并以TM/ETM+、ASTER影像为例,对部分应用主成分分析提取蚀变异常信息的实例进行了分析,认为:在基岩裸露区,不同主成分分析都可以很好地提取铁化、泥化蚀变信息;在中、低植被覆盖区,采用标准主成分分析、Crosta技术、改进的Crosta技术、软落叶技术、“掩膜/抑制干扰信息+主成分分析”等方法可以有效地提取蚀变异常信息;高植被覆盖区多采用主成分分析生成的蚀变信息主分量进行彩色合成,再通过对彩色影像进行目视解译的方式判断蚀变的类型和范围。其中,“掩膜+Crosta技术”、“掩膜+软落叶技术”、二次主成分分析等方法在高植被覆盖区也可以取得较好的应用效果;对于干扰信息种类繁多、岩性复杂的地区,可根据干扰信息、岩性种类划分成若干小区,再根据每个小区实际情况采用不同的蚀变提取方法,最后将每个小区内提取的蚀变信息进行合并。

关键词:主成分分析;标准主成分分析;特征向量主成分分析;定向主成分分析;Crosta技术;软落叶技术

1 前言

遥感技术具有宏观性好、速度快、成本低等优势,在矿产勘查过程中得到广泛应用。美国于1972年发射了首颗陆地卫星(Landsat 1),迄今为止共发射了8个系列的陆地卫星(Landsat 1- Landsat 8),获得了海量地球表面影像数据。这些数据免费供各国学者使用,从而在矿产资源、海洋资源、水资源的调查及各类专题图件(如地质图、地貌图、水文图)的绘制等方面得到广泛应用^[1]。该类影像数据具有空间分辨率适中、波段多、波段光谱范围设置合理等特点,适用于矿产资源勘查中的岩性解译、构造解译和蚀变信息提取,尤其是在中等尺度下大面积快速提取铁化、泥化蚀变异常信息方面具有独特的优势。

绝大部分内生矿床都伴随着相应的围岩蚀变,这些蚀变通常是重要的找矿标志。随着遥感技术

的发展,矿产勘查中遥感蚀变异常跟地球化学异常和地球物理异常一样成为一种具有独立性找矿标志的参数^[2-3]。Landsat卫星影像数据是遥感蚀变异常提取中应用最为广泛的数据源之一,已有40多年的应用历史,取得了丰硕的研究成果。通常运用目视解译、图像处理可以有效、快速地提取遥感影像中的蚀变异常信息,常用的遥感蚀变提取图像处理方法主要有波段彩色合成、波段比值、主成分分析、光谱角、像元分解等。在这些方法中,主成分分析具有实现简单、速度快、效果好、稳健等优点^[4-6],且处理过程中对影像数据大气校正质量要求不高,即使不进行大气校正直接应用都可取得较好的效果。因此,该技术广受地质工作者的青睐^[7-12]。

随着主成分分析在矿产资源勘查中应用的不断深入,逐渐衍生出了许多细分方法,如标准主成分分析、特征向量主成分分析、定向主成分分析、不

同影像间的主成分分析、二次主成分分析等。这些方法被广泛应用到不同地区和不同条件下遥感蚀变异常信息的提取上,但绝大多数仅在特定区域采用了1~2种方法,目前尚未见到有关于上述5种方法综合运用、系统总结的文献报道。鉴于主成分分析方法在遥感蚀变异常信息提取中的重要作用,有必要对上述5种方法进行系统归纳、总结。本文主要包括以下3个研究内容:①对主成分分析技术方法进行归纳与分类;②不同类型主成分分析的蚀变信息主分量的选择原则;③对不同类型主成分分析的应用效果进行总结,同时探讨针对复杂环境条件下遥感蚀变信息提取中所存问题的有效解决方法。

2 蚀变矿物反射光谱特征

目标蚀变矿物具有特征反射波谱是遥感蚀变异常信息提取的前提与基础。可见光-近红外区(0.4~1.3 μm)诊断性波谱由Fe、Cu、Mn、Ni、Cr等过渡性元素电子跃迁产生,短波红外区(1.3~2.5 μm)诊断性波谱主要由 CO_3^{2-} 、 OH^- 等阴离子基团和水分子的振动产生。造岩矿物中的Si、Al、Mg、O等元素在可见光-短波红外区不具有诊断性波谱,这些元素的诊断性波谱主要集中在热红外区^[13-15]。

根据Landsat卫星所携带的传感器的不同,获取的影像数据可以分为MSS、TM、ETM+、OLI共4类(图1)。MSS数据只可以提取铁化蚀变,而TM、ETM+和OLI数据则可以提取铁化、泥化蚀变,其中TM、ETM+数据在铁化、泥化蚀变信息提取方面更

有效。在可见光-短波红外区间内,ETM+数据比TM数据仅多了一个全色波段,其他波段完全一致。下文将用TM代替ETM+。

铁化蚀变矿物包括铁的氧化物、铁的氢氧化物和铁的硫化物,如赤铁矿(Fe_2O_3)、针铁矿($\text{FeO}(\text{OH})$)、黄钾铁矾($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)等。在可见光-近红外区(0.4~1.3 μm),反射率具有明显的吸收谷和反射峰,在0.5 μm 和0.9 μm 处附近表现为吸收谷,分别对应于TM1和TM4,TM3则表现为相对反射峰(图2)。0.9~1.3 μm ,随波长的增加铁化蚀变矿物反射率急剧上升,到1.3 μm 达到最高值。在短波红外区,铁化蚀变矿物反射率基本呈高值平稳状态,变化较小,不具有诊断性波谱特征。根据铁化蚀变矿物的波谱特征,可运用反射峰对应的波段除以吸收谷对应的波段的方式来增强铁化蚀变信息^[16-20],如TM3/1,TM5/1,TM5/4等。

泥化蚀变是指 OH^- 、 CO_3^{2-} 等基团振动产生的蚀变异常,蚀变矿物主要有明矾石、伊利石、蒙脱石、高岭石、方解石等。泥化蚀变矿物在1.5~2.5 μm 范围内,随波长的增加反射率快速减低,并在2.150~2.450 μm 范围内产生系列特征吸收谱带(图3)。 $-\text{OH}$ 、 $-\text{CO}_3$ 在短波红外区产生的特征吸收谱带的位置与 $-\text{OH}$ 、 $-\text{CO}_3$ 连接的金属离子类型有密切关系,如Al-OH(2.22 μm)、Si-OH(2.23 μm)、Fe-OH(2.25 μm)、Mg-OH(2.33 μm)和X- CO_3 (2.33~2.35 μm)类蚀变矿物诊断性吸收谷位置各不相同^[21-22]。TM影像在短波红外区光谱分辨率较低,无法有效区分泥化蚀变矿物的具体类型,只能作为大类进行提取。泥

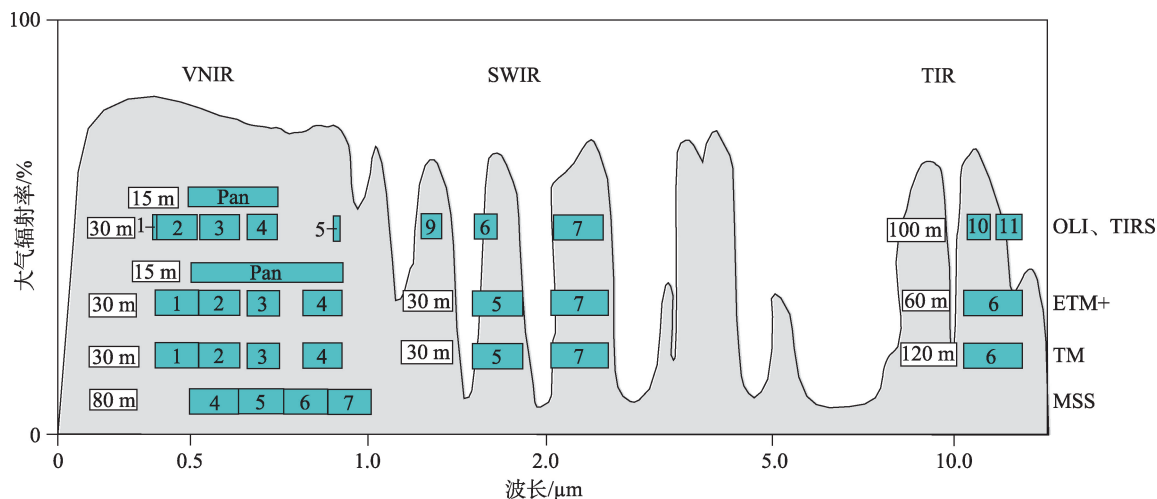


图1 MSS、TM、ETM+和OLI各波段空间分辨率、光谱分辨率比较

Fig. 1 Comparison of spatial resolution and spectral resolution of each band of MSS, TM, ETM+ and OLI images

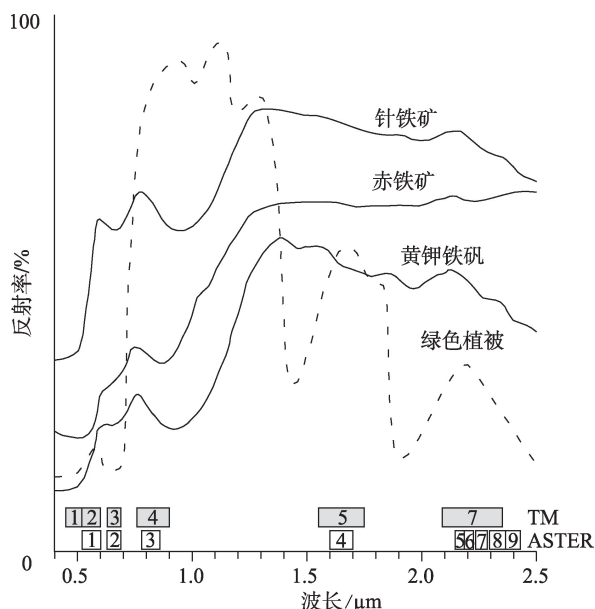


图2 铁化蚀变矿物光谱曲线

Fig. 2 Mineral spectral curves of iron alteration

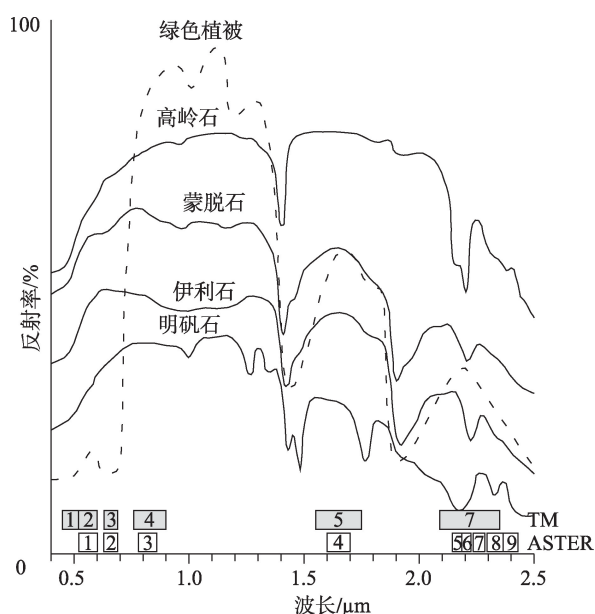


图3 泥化蚀变矿物光谱曲线

Fig. 3 Mineral spectral curves of clay alteration

化蚀变在TM5波谱范围表现为强反射,在TM7波谱范围表现为强吸收,常用TM5和TM7的差异来识别泥化蚀变异常。

3 主成分分析的分类及其应用

在前人研究基础上,本文依据主成分分析时输入影像的数量及类型、主成分分析的次数等将主成

分分析细分为:标准主成分分析、特征向量主成分分析、定向主成分分析、二次主成分分析、不同影像间的主成分分析5种类型。

3.1 标准主成分分析

标准主成分分析(Standard Principal Component Analysis, SPCA)遥感蚀变异常信息提取,是对多光谱影像在可见光-短波红外区的所有波段(或包含热红外波段)一同进行主成分分析,生成一系列主分量,然后根据目标蚀变波谱特征和特征向量矩阵确定蚀变信息所在主分量,最后运用彩色合成、密度分割、非监督分类、C-A分形、主分量门限化等处理方法凸显主分量中的蚀变异常信息^[23-24]。

主成分分析过程遵循能量守恒定律,变换前后的信息总量相等,且变换后各主分量之间互不相关。单个主分量的信息量取决于对应的特征值的大小,特征值越大,主分量信息量越大。主分量按特征值的大小依次排列,信息主要集中在前几个主分量影像中。例如,对TM影像进行标准主成分分析,生成的主分量影像中,PC1、PC2和PC3信息量之和一般超过85%,最后一个主分量中大部分为噪声,有用信息较少。主成分分析将具有相关性的波段转换成完全独立的主分量影像,变换后的主分量影像更易于地质解译和解释^[25-26]。各主分量与原始波段的相关性则由特征向量载荷因子决定,载荷因子的符号指示主分量与对应波段的正、负相关性,载荷因子数值的大小则表示主分量与对应波段相关性大小。载荷因子为正值时,主分量与对应波段呈正相关,为负值时,则呈负相关;载荷因子数值越大,表明主分量与该波段相关性越大,数值越小,则相关性越小。

标准主成分分析生成的主分量中,PC1与所有波段呈正相关,为各波段的总体特征,主要为各波段的反射率大小。除PC1之外的主分量总是以一部分波段特征为主^[27]。可见光波段与近红外-短波红外波段在PC2对应的特征向量载荷因子符号总是相反,PC2主要反映的是这2个光谱范围波段的反射率差,即光谱曲线的斜率变化^[28-29]。PC3一般与TM4波段相关系数较高,主要呈现的是植被信息。与原始波段彩色合成相比较,运用PC1、PC2、PC3进行彩色合成的图像,具有信息量大、色彩丰富等特征,更有利于岩性、构造、蚀变的解译和地物的识别。朱谷昌等^[30]在湖南大坊红土型金矿区利用RGB(PC1, PC2, PC3)影像成功解译出铁化、泥

化蚀变区,在该彩色影像中铁化蚀变区呈红色色调,泥化蚀变区呈黄褐色色调,金矿有利找矿区呈“黄褐色+红色”色调,成功圈定了金矿有利找矿区。陈松岭等^[31]在乌拉山哈达门沟金矿和内蒙古麦汉山常山壕金矿区运用PC1/PC2增强钾化、褐铁矿化等蚀变信息,运用PC1/PC4增强碳酸盐化、绿泥石化、绢云母化等蚀变信息,识别出了与金矿化有关的蚀变异常信息。

泥化蚀变矿物在TM5为反射峰, TM7为吸收谷(图3)。泥化蚀变信息主分量与TM5和TM7对应的特征向量载荷因子符号应相反^[32]。当TM5对应的特征向量载荷因子符号为正, TM7对应的符号为负时,泥化蚀变对应于蚀变信息主分量影像亮值区,否则对应于暗值区。由于标准主成分分析生成的主分量较多,可能同时存在多个主分量满足这一条件。该种情况下,就需要对蚀变信息主分量进行确定,通常有以下3种方法:①多个主分量对应的蚀变都位于亮值区或暗值区时,可将多个蚀变信息主分量影像做加法运算,生成一个新的影像,将该影像作为蚀变信息主分量;②既有蚀变位于亮值区的主分量,又有蚀变位于暗值区的主分量,运用蚀变位于亮值区的主分量影像与蚀变位于暗值区的主分量影像做减法运算,生成的影像中蚀变位于亮值区。③多个满足条件的主分量中,仅有一个主分量与TM5、TM7对应的特征向量载荷因子数值较大,其余主分量对应的特征向量载荷因子数值都很小,这时可直接选择特征向量载荷因子数值较大的主分量作为蚀变信息主分量,其他主分量中包含的蚀变信息可忽略不计。铁化蚀变信息主分量的选择与泥化蚀变信息主分量的选择方法相同,在此不再赘述。

TM影像标准主成分分析,蚀变异常信息往往处于信息量较少的PC4和PC5中。利用这2个主分量与其他的主分量进行彩色合成,生成的彩色影像可以有效呈现综合蚀变异常信息^[33-35]。马建文和Slaney^[25]通过对RGB(PC5, PC4, PC3)影像进行目视解译及监督分类、非监督分类等处理,在环境复杂的加拿大北部地区提取了含金硅化、绢云母化蚀变带,指导了地质勘查工作,并将该方法成功运用于辽宁二道沟、新疆、内蒙古等地的蚀变异常信息提取^[26,36]。邓素贞等^[37]利用RGB(PC4, PC5, PC2)影像解译出了河北张家口东部下双台金矿区与铁矿、金矿有关的蚀变信息,在该彩色影像中与铁矿相关的铁氧化物蚀变呈浅白色斑块,与金矿有关的蚀变

呈淡紫色-粉红色团块,这有效指导了该地区矿山外围找矿。也有研究人员运用蚀变信息主分量与蚀变吸收谷波段、反射峰波段合成的彩色图像解译出了干旱基岩裸露区的蚀变异常信息^[38-39]。

3.2 特征向量主成分分析

根据目标蚀变矿物波谱特征,选择3~4个诊断性波谱对应的波段进行主成分分析,提取目标蚀变异常信息,该方法称之为特征向量主成分分析(Feature Oriented Principal Components Selection, FPCS)。根据主成分分析输入波段数量的不同,笔者进一步将该方法细分为4个波段特征向量主成分分析和3个波段特征向量主成分分析。

3.2.1 4个波段特征向量主成分分析

1989年Crosta和Moore首次运用PCA(TM1, TM3, TM4, TM5)和PCA(TM1, TM4, TM5, TM7)对巴西米纳斯吉拉斯州西部的亚热带地区残积土壤进行铁化、泥化蚀变信息填图^[40]。此后,英国国家遥感中心Loughlin教授运用Crosta和Moore提出的蚀变信息提取技术在美国西南部大盆地(Great Basin)地区提取矿化蚀变信息,取得很好的应用效果,并将该技术称之为Crosta技术^[41-42]。此后,Crosta技术广泛应用于TM/ETM+影像的铁化、泥化蚀变信息的提取^[27,43-52]。

进行PCA(TM1, TM3, TM4, TM5)、PCA(TM1, TM4, TM5, TM7)处理,可分别生成4个主分量。根据目标蚀变光谱特征,可以确定蚀变信息主分量。当铁化蚀变信息主分量与TM3、TM5对应的特征向量载荷因子符号为正,与TM1、TM4对应符号为负时,铁化蚀变异常位于主分量亮值区,否则位于暗值区。当泥化蚀变信息主分量与TM1、TM5对应的特征向量载荷因子符号为正,与TM4、TM7对应符号为负时,泥化蚀变异常位于亮值区,否则处于暗值区^[7,53]。蚀变信息主分量通常为PC4,有时候也有可能为PC3^[54]。对蚀变信息主分量进行非监督分类、C-A分形、主分量门限化等处理进行量化分级,不同强度的蚀变信息赋予不同的颜色,使蚀变分布范围、蚀变强弱一目了然^[5,12,45,55-59]。

吴志春等^[60]在青海玉树干旱基岩裸露区利用Crosta技术提取的蚀变信息与已知的84个矿床(点)吻合率高达88%。铁化蚀变与泥化蚀变重叠部位,与矿床(点)吻合度更高,且这些矿床(点)多为多种蚀变类型共生的多金属矿床(点)。赵小星^[61]

在西藏桑木岗地区利用 Crosta 技术提取的铁化、泥化蚀变信息与矿床(点)、水系沉积物异常、自然重砂异常高度吻合。以多元数据为依据,圈定了 I 级找矿远景区 5 个, II 级、III 级找矿远景区各 1 个,指导了该地区的铅锌、铜等多金属找矿。

除了对蚀变主分量进行量化分级之外,运用蚀变信息主分量与其他主分量进行彩色合成,也是一种有效呈现蚀变强度、分布范围的有效方法。如朱谷昌等^[30]在湖北蛇屋山红土型金矿区运用 RGB(PC1, PC2, PC4)影像解译出了与金成矿有关的蚀变信息。将铁化蚀变信息主分量、泥化蚀变信息主分量、铁化蚀变信息主分量和泥化蚀变信息主分量的算术平均值生成的影像分别赋给红、绿、蓝通道,生成 Crosta 彩色图^[62-65]。在该彩色图中,强铁化蚀变区呈红色色调,强泥化蚀变区呈绿色色调,强铁化蚀变与强泥化蚀变叠合区呈白色色调。Crosta 彩色图,不仅能够同时显示铁化、泥化蚀变及 2 种蚀变叠合区的范围,还能够从颜色和色调上区分出这 2 种蚀变的强度。燕守勋等^[63]通过青海东昆仑、内蒙赤峰、新疆东天山、西昆仑、东非等地的 700 多个矿床(点)与 Crosta 彩色图叠合显示,发现矿床(点)与 Crosta 彩色图中的蚀变区吻合度高,铁、铅锌、金、铜、钼矿多位于强铁化蚀变的暗红色色调区,内生铜矿位于 2 种蚀变叠合部位。

在影像中,植被、第四系、水体、云、阴影等属于强信息,岩石围岩蚀变属于微弱信息,微弱的蚀变信息往往会被强信息所掩盖,因此遥感蚀变信息提取过程中易受这些强信息的干扰或抑制。Crosta 技

术是对整幅影像进行统计分析,提取的蚀变信息中也就掺杂了些干扰信息,一定程度上会降低蚀变信息的精度。采用“掩膜+主成分分析”的方法,可以一定程度上降低干扰信息对蚀变信息提取的影响^[20,66-67],但是掩膜会丢失掩膜区内的一切影像信息。当干扰信息覆盖面积较大,且干扰信息不强时,可用“抑制干扰信息+主成分分析”的方法代替“掩膜+主成分分析”法。根据干扰信息和蚀变信息的波谱特征,采用避开干扰信息诊断性波谱所在波段、抑制干扰信息、增强蚀变信息等方法,改进 Crosta 技术(表 1)。若研究区内干扰信息种类多、岩性复杂,可根据干扰信息、岩性种类将研究区划分成若干小区^[66-69],针对每个小区内的地物光谱特征选用合适的 Crosta 技术,可以在很大程度上提高蚀变信息提取的精度。

3.2.2 3 个波段特征向量主成分分析

3 个波段特征向量主成分分析多用于具体蚀变类型的提取,如 Al-OH 类、Fe-OH 类、Mg-OH 类、X-CO₃ 类蚀变等^[75-76]。针对某一蚀变诊断性吸收谷,选择吸收谷、吸收谷两肩对应的波段进行主成分分析的一种方法。该方法需要影像具有较高的光谱分辨率,如 ASTER 影像的短波红外区。高岭石、蒙脱石、明矾石、伊利石等 Al-OH 类蚀变矿物在 2.2 μm 附近处具有强的诊断性吸收谷,吸收谷位置与 ASTER6 相对应,两肩对应的波段分别为 ASTER5 和 ASTER7,运用 PCA(ASTER5, ASTER6, ASTER7)提取 Al-OH 类蚀变矿物信息。黄钾铁矾、皂石等 Fe-OH 类蚀变矿物在 2.25 μm 处附近具

表 1 改进的 Crosta 技术
Tab. 1 Modified Crosta technique

技术方法	提取的蚀变类型及应用效果
PCA(TM2, TM4, TM5, TM7)	提取泥化蚀变和碳酸盐化蚀变 ^[70]
PCA(TM1, TM4/3, TM5, TM7)	RGB(PC1, PC3, PC4)影像合成,图像中含钾长石斑晶花岗岩和含金钾化硅化蚀变带呈鲜红色,可清楚辨别。通过对 PC1 和 PC4 二维散点投图,可将含钾长石斑晶花岗岩、含金钾化硅化蚀变带进一步分离 ^[71] 。该方法在加拿大北部冰川、森林覆盖区,中国河北等金矿区得到较好应用 ^[26]
PCA(TM1+TM2, TM4/3, TM5, TM7)	干旱基岩裸露区,可以同时提取铁化、泥化蚀变信息,提取的蚀变信息与已知矿床、矿(化)点吻合度高 ^[55,72-73] 。在北祁连山西段疏勒河以东约 9000 km ² 范围内,提取的蚀变异常与已知的 103 个矿床(点)吻合度高达 83.5% ^[55] 。在东天山戈壁地区的石英滩至赤湖地区约 33 000 km ² 范围内,提取的蚀变异常与已知的 122 个矿床(点)吻合度达 86% ^[72]
PCA(TM1, TM4, TM5/7, TM7)	在基岩裸露区,运用 TM5/7 代替 TM5,增强了泥化蚀变信息,扩大了泥化蚀变与植被之间的光谱差异 ^[59,74] 。吴浩等 ^[59] 有效提取了青海省五龙沟金矿区的泥化蚀变信息,提取的蚀变信息在野外得到验证
PCA(TM1, TM3/1, TM4, TM5)	在基岩裸露区,运用 TM3/1 代替 TM3,增强了铁化蚀变信息,扩大了铁化蚀变与植被之间的光谱差异。在青海省五龙沟金矿区提取的铁化蚀变,受断裂构造控制明显,与成矿物质来源和运移通道相吻合,提取的蚀变信息可作为该区的金矿找矿标志 ^[59]
PCA(TM2, TM3, TM4, TM5/1)	提取褐铁矿化蚀变异常。提取的蚀变异常信息与金矿体、水系沉积物 Au 和 Cu 异常相吻合 ^[70]

有诊断性吸收谷,吸收谷位置与 ASTER7 相对应,两肩对应的波段分别为 ASTER6 和 ASTER7,运用 PCA (ASTER6, ASTER7, ASTER8) 可以提取该类蚀变。绿泥石、绿帘石、滑石等 Mg-OH 类蚀变矿物和方解石、白云石等 X-CO₃ 类蚀变矿物诊断性吸收谷位置处于 2.35 μm 附近,与 ASTER8 光谱范围相对应,两肩对应的波段分别为 ASTER7 和 ASTER9,可用 PCA (ASTER7, ASTER8, ASTER9) 提取这些蚀变信息。

3 个波段特征向量主成分分析,PC3 为蚀变信息主分量。PC3 对应的特征向量载荷因子符号中,与左肩波段、右肩波段对应的符号相同,并与吸收谷波段对应的符号相反。当吸收谷波段的特征向量符号为负时,蚀变位于亮值区,否则蚀变位于暗值区。运用该方法能够简单、快速、有效地提取不同蚀变类型,这为矿床蚀变分带、蚀变定量研究提供了新的手段。

3.3 定向主成分分析

当对多个影像进行主成分分析时,影像的波谱信息常存在于排序靠前的主分量中,但是主分量中的特征波谱信息常会被噪声干扰。当参与主成分分析的影像较多时,生成的主分量也较多,蚀变信息主分量的选择和结果的解释也更困难。根据目标蚀变特征波谱差异,仅选择 2 个最能代表目标特征波谱信息的波段进行主成分分析,该方法称为定向主成分分析(Directed Principal Component Analysis, DPCA)。定向主成分分析是基于 2 个输入影像的相关性统计,当 2 个影像相关性较大时,2 个影像中相关的信息位于 PC1 中,因此,PC1 包含了 2 个影像的绝大部分信息,主要是 2 个影像的空间信息。PC2 为 2 个影像相关性差的信息,更多的是波谱信息。输入的 2 个影像相关性越强,PC1 包含的信息量越大,PC2 所含信息量就越少。定向主成分分析是对 2 个输入影像的线性变换,蚀变信息主分量更易于判别,结果更容易解释。

定向主成分分析波段的选择,一方面要避免背景信息、干扰信息与目标蚀变信息波谱差异过小,另一方面要尽可能凸显目标蚀变信息波谱差异,体现目标蚀变信息的波谱特征。2 个波段中,通常一个为目标蚀变反射峰对应的波段,另一个为吸收谷对应的波段,这样目标蚀变的波谱差异能够达到最大。对于具有诊断性吸收谷或反射峰的蚀变异常信息,定向主成分分析较标准主成分分析、选择主

成分分析更能够增强波段间的光谱差异^[8,77]。生成的主分量中,PC1 与 2 个波段都呈正相关,该主分量为 2 个波段共有的信息。PC2 与 2 个波段的相关性相反,为蚀变信息主分量。当 PC2 与目标蚀变反射峰波段呈正相关时,蚀变信息位于 PC2 中的亮值区,否则位于暗值区。

根据铁化蚀变和泥化蚀变光谱特征,在基岩裸露区可用 PCA (TM3, TM1)、PCA (TM5, TM1)、PCA (TM5, TM4) 提取铁化蚀变信息,PCA (TM5, TM7) 提取泥化蚀变^[63,78],但对于植被覆盖区的蚀变提取效果不佳。针铁矿、赤铁矿、黄钾铁矾等铁化蚀变矿物与绿色植被在 TM1 和 TM5 波段处的反射率基本相似,在 TM3 处铁化蚀变矿物的反射率稍强于绿色植被(图 1),因此运用 PCA (TM3, TM1)、PCA (TM5, TM1) 要从植被信息中分离出铁化蚀变信息难度较大。在短波红外区,绿色植被和泥化蚀变矿物反射率都是呈下降趋势,波谱形态基本相似(图 2)。在短波红外区,虽然不同的泥化蚀变矿物在不同位置具有典型的诊断性吸收谷,但对于 TM7 的波谱范围而言,无法对其进行有效区别。因此,运用 PCA (TM5, TM7) 也难以准确区分泥化蚀变和绿色植被。

针对植被覆盖区定向主成分分析无法有效提取蚀变异常信息的问题,Frazer 和 Green^[79]对定向主成分分析进行了改进,提出一种“波段比值+主成分分析”的组合方法,即用波段比值获取的目标蚀变影像和植被指数影像代替原始波段进行主成分分析。该方法常用于植被覆盖区的蚀变信息提取,因此该方法被称为软落叶技术(Software Defoliant Technique)。TM5/7 亮值区为植被信息,次亮值区为泥化蚀变信息,但两者一定程度上能够区分。TM4/3 为植被指数,植被在该比值影像中的亮度值远大于泥化蚀变的亮度值。进行 PCA (TM5/7, TM4/3) 处理,PC1 与 TM5/7、TM4/3 呈正相关,主要为植被信息,PC2 与 TM5/7、TM4/3 对应的 2 个特征向量符号相反,主要为泥化蚀变信息^[2,80]。同理,PCA (TM3/1, TM4/3)、PCA (TM5/1, TM4/3)、PCA (TM5/4, TM4/3) 可用于提取中、低植被覆盖区的铁化蚀变异常信息^[81]。高植被覆盖区的蚀变信息提取难度较大,将掩膜技术与软落叶技术结合使用效果会更好^[8,82-84]。

3.4 二次主成分分析

从主成分分析生成的主分量中选择部分主分

量与其他影像再次进行主成分分析,从第二次主成分分析获得的主分量中选取蚀变信息主分量,该方法称之为二次主成分分析。一景影像中包含了岩石、土壤、植被、水体、蚀变等众多信息,很多情况下直接运用标准主成分分析、特征向量主成分分析、定性主成分分析等方法提取蚀变异常信息效果并不理想。虽然“掩膜+主成分分析”的方法能在一定程度上降低了干扰因素对蚀变信息提取的影响,可以准确提取非掩膜区的蚀变异常信息,但是当影像中干扰信息种类多、覆盖面积大时,大面积掩膜处理,丧失了蚀变信息提取的目的。在此种情况下,一次单一方法的使用难以奏效,需要多种方法组合使用或一种方法多次使用,蚀变信息才能从众多信息中“剥离”出来。

韩先菊等^[85]对波段比值、Crosta法、二次主成分分析、彩色合成等方法组合应用,提取了新疆西准噶尔托里金成矿带与金成矿密切相关的热液蚀变,并得到野外实地验证。陈勇敢等^[86]对(TM5+TM3)/(TM7+TM4+TM1)、TM3/1、TM5/7、PCA(TM1, TM3, TM4, TM5)处理获得的铁化蚀变信息主分量、PCA(TM1, TM4, TM5, TM7)处理获得的泥化蚀变信息主分量5个影像进行二次主成分分析,提取了甘肃省陇南阳山金矿区与金成矿相关的蚀变异常信息。杨波等^[87]运用(TM5+TM3+TM2)-(TM7+TM4+TM1)、TM3/1、TM5/4、TM5/7、PCA(TM1, TM4, TM5, TM7)提取的泥化蚀变信息主分量、PCA(TM1, TM3, TM4, TM5)提取的铁化蚀变信息主分量进行二次主成分分析,有效降低了各种干扰因素的影响,增强了弱蚀变信息,余凤鸣和王磊^[88]运用该方法在湖北武当地区提取的蚀变信息也得到较好验证,提取的蚀变信息与已知矿化蚀变带吻合度高达80%。

3.5 不同影像间的主成分分析

ASTER影像在2.150~2.450 μm 范围内有5个波段,具有较高的光谱分辨率,能够区分Al-OH(2.17~2.21 μm)、Fe-OH(2.21~2.30 μm)、Mg-OH(2.30~2.40 μm)、X-CO₃(2.30~2.350 μm)等蚀变类型,而TM、ETM+影像在该范围内仅有1个波段,只能识别泥化蚀变大类。ASTER影像在可见光光谱范围内,仅有绿光波段(ASTER1)和红光波段(AS-TER2),缺少蓝光波段,而蓝光波段正是铁化蚀变诊断性吸收谷对应的重要波段。TM1为蓝光波段,

正好可以弥补ASTER影像的不足。Honarmand等^[75]运用PCA(TM1, TM3, ASTER6, ASTER7)、PCA(TM1, TM3, ASTER4, ASTER5)、PCA(TM1, TM3, ASTER8, ASTER9)很好识别出了不同铁化蚀变类型组合。

在同一景影像内提取蚀变信息时,主成分分析对影像大气校正和辐射校正要求不高,仅对原始影像稍作拉伸处理即可。对涉及多景影像、多种影像类型提取蚀变信息时,需要对影像进行辐射校正,即将影像的灰度值转换成辐亮度值或反射率值。

4 结论

综上所述,主成分分析提取遥感蚀变异常信息,具有对影像大气校正质量要求不高、实现简单、速度快、效果好、应用稳健等优点,该技术广受地质工作者的青睐。本文对该方法进行了详细的种类划分,并对不同地质条件下的蚀变信息提取方法进行了总结,具体结论如下:

(1)主成分分析根据输入影像的数量及类型、主成分分析的次数等,本文将其分为5种类型:标准主成分分析、特征向量主成分分析、定向主成分分析、二次主成分分析、不同影像间的主成分分析。其中,又将特征向量主成分分析细分为2种类型:3个波段特征向量主成分分析和4个波段特征向量主成分分析。

(2)在基岩裸露区,不同主成分分析都可以很好地提取铁化、泥化蚀变信息。在中、低植被覆盖区,采用Crosta技术、改进的Crosta技术、软落叶技术、“掩膜/抑制干扰信息+主成分分析”等方法可以更有效地提取蚀变异常信息。高植被覆盖区的蚀变信息提取难度较大,多采用主成分分析生成的蚀变信息主分量进行彩色合成,再通过对彩色影像进行目视解译的方式判断蚀变的类型和范围。另外,“掩膜+Crosta技术”、“掩膜+软落叶技术”、二次主成分分析等方法在高植被覆盖区也能较好地提取蚀变信息。

(3)当研究区内干扰信息种类众多、岩性复杂时,可根据干扰信息、岩性种类将研究区划分成若干个小区。根据每个小区实际情况采用不同的方法,再将每个小区内提取的蚀变信息进行合并。该种处理方法可在一定程度上提高复杂区的遥感蚀变提取的可靠性和准确性。

参考文献(References):

- [1] 梅安新,彭望球,秦其明,等.遥感导论[M].北京:高等教育出版社,2001. [Mei A X, Peng W L, Qin Q M, et al. An introduction to remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.]
- [2] 王彪,陈利燕,王核,等.遥感蚀变信息定量提取方法在成矿预测中的应用——以西昆仑塔什库尔干地区为例[J].大地构造与成矿学,2011,35(3):372-377. [Wang B, Chen L Y, Wang H, et al. Ore prospecting for the Taxkorgan area of west Kunlun using quantitative extraction of mineralized alteration information[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011,35(3):372-377.]
- [3] 彭光雄,高光明.新疆阿祖拜矿田伟晶岩型矿床遥感找矿综合信息研究[J].大地构造与成矿学,2013,37(1):109-117. [Peng G X, Gao G M. Remote sensing prospecting of pegmatite deposits in the Azubai region, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013,37(1):109-117.]
- [4] 张满朗.金矿蚀变信息提取中的主成分分析[J].遥感技术与应用,1996,11(3):1-6. [Zhang M L. Principal component analysis used in gold alteration extraction[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1996,11(3):1-6.]
- [5] 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,2003,56(2):44-49. [Zhang Y J, Zeng C 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 and Resources, 2003,56(2):44-49.]
- [6] 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,2013,66(2):57-62. [Zhang Y F, Yuan J M, Yang Z A, 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 and Resources, 2013,66(2):57-62.]
- [7] 陈伟荣,郭德方,兰玉琦.比值合成和特征主成分选择技术在提取油区信息中的应用[J].遥感技术与应用,1995,10(3):33-39. [Chen W R, Guo D F, Lan Y Q. The application of band ratio composite and feature-oriented principal component selection in the extraction of oil-gas signature[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1995,10(3):33-39.]
- [8] Carranza E J M, Hale M. Mineral imaging with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002,23(22):4827-4852.
- [9] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2003. [Zhao Y S. The principle and method of analysis of remote sensing application[M]. Beijing: Science Press, 2003.]
- [10] Van der Meer F D, Van der Werff H M A, et al. Multi and hyperspectral geologic remote sensing: A review[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012,14(1):112-128.
- [11] 姚佛军,张玉君,杨建民,等.利用ASTER提取德兴斑岩铜矿遥感蚀变分带信息[J].矿床地质,2012,31(4):881-890. [Yao F J, Zhang Y J, Yang J M, et al. Application of ASTER remote sensing data to extraction of alteration zoning information from Dexing porphyry copper deposit[J]. Mineral Deposits, 2012,31(4):881-890.]
- [12] Ahmadfaraj M, Mirmohammadi M, Afzal P. Application of fractal modeling and PCA method for hydrothermal alteration mapping in the Saveh area (Central Iran) based on ASTER multispectral data[J]. International Journal of Mining and Geo-engineering, 2016,50(1):37-48.
- [13] Hunt G R, Ashley R P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared[J]. Economic Geology, 1979,74(7):1613-1629.
- [14] 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,2002,55(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 and Resources, 2002,55(4):30-36.]
- [15] Mars J C, Rowan L C. Regional mapping of phyllic-argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms [J]. Geosphere, 2006,2(3):161-186.
- [16] 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(3):522-535.
- [17] Abrams M J. Landsat-4 Thematic Mapper and Thematic Mapper simulator data for a porphyry copper deposit[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1984, 50(8):1171-1173.
- [18] Podwysocki M H, Power M S, Jones O D. Preliminary evaluation of the Landsat-4 Thematic Mapper data for mineral exploration[J]. Advances in Space Research, 1985,5(5):13-20.
- [19] Ramadan T M, Abdelsalam M G, Stern R J. Mapping gold-bearing massive sulfide deposits in the Neoproterozoic Allaqi Suture, Southeast Egypt with Landsat TM and SIR-C/X SAR images[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001,67(4):491-497.
- [20] 程洋,童立强.基于背景多层次分离的遥感矿化蚀变信息提取模型及应用实例[J].遥感技术与应用,2015,30(3):586-591. [Chen Y, Tong L Q. The research on model of

- the alteration mineral mapping base on multilevel separate background and an application examples[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015,30(3):586-591.]
- [21] 修连存,郑志忠,俞正奎,等.近红外光谱分析技术在蚀变矿物鉴定中的应用[J].地质学报,2007,81(11):1584-1590. [Xiu L C, Zheng Z Z, Yu Z K, et al. Mineral analysis technology application with near infrared spectroscopy in identifying alteration mineral[J]. Acta Geologica Sinica, 2007,81(11):1584-1590.]
- [22] 田淑芳,詹蓁.遥感地质学[M].北京:地质出版社,2013. [Tian S F, Zhan J. Remote sensing geology[M]. Beijing: Geology press, 2013.]
- [23] 马建文,Slaney V. R. 陆地卫星 TM 数字图像提取热液蚀变信息——加拿大 BC 省“金三角”找矿实例[J].遥感技术与应用,1992,7(4):10-15. [Ma J W, Slaney V R. Landsat TM used to detect hydrothermal alteration information: an example from British Columbia's Golden Triangle [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1992,7(4):10-15.]
- [24] 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.]
- [25] 党安荣,王晓栋,陈晓峰,等. ERDAS imagine 遥感图像处理方法[M].北京:清华大学出版社,2003. [Dang A R, Wang X D, Chen X F, et al. ERDAS imagine remote sensing image processing methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.]
- [26] Honarmand M, Ranjbar H, Shahabpour J. Application of spectral analysis in mapping hydrothermal alteration of the northwestern part of the Kerman Cenozoic Magmatic arc, Iran[J]. Journal of Science, Islamic Republic of Iran, 2011,22(3):221-238.
- [27] 陈建平,王倩,董庆吉,等.青海沱沱河地区遥感蚀变信息提取[J].地球科学:中国地质大学学报,2009,34(2):314-318. [Chen J P, Wang Q, Dong Q J, et al. Extraction of remote sensing alteration information in Tuotuohe, Qinghai Province[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2009,34(2):314-318.]
- [28] 耿新霞,杨建民,张玉君,等.ASTER 数据在浅覆盖区蚀变遥感异常信息提取中的应用——以新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿岩体为例[J].地质论评,2008,54(2):184-190. [Geng X X, Yang J M, Zhang Y J, et al. The application of ASTER remote sensing data for extraction of alteration anomalies information in shallow overburden area: A case study of the Baoguto porphyry copper deposit intrusion in western Junggar, Xinjiang[J]. Geological Review, 2008,54(2):184-190.]
- [29] 陈晔,何政伟,邓辉,等.利用 ASTER 影像识别和提取矿化蚀变信息[J].桂林理工大学学报,2014,34(1):51-57. [Chen Y, He Z W, Deng H, et al. Identification and extraction of mineralized alteration information by ASTER remote sensing data[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014,34(1):51-57.]
- [30] 朱谷昌,吴健生,吴德文,等.利用 TM 数据快速提取红土型金矿地表特征标志[J].国土资源遥感,1998,51(4):29-32. [Zhu G C, Wu J S, Wu D W, et al. Using TM data to gain quickly the surface characteristics and symbols of lateritic gold deposits[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 1998,51(4):29-32.]
- [31] 陈松岭,卢福宏,高光明,等.华北地台北缘内蒙古段金矿围岩蚀变的遥感识别[J].国土资源遥感,2001,54(2):13-18. [Chen S L, Lu F H, Gao G M, et al. Remote sensing extraction of altered information related to gold mineralization, Inner Mongolia section, north margin of north China plate[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2001,54(2):13-18.]
- [32] 刘刚.东昆仑五龙沟金矿围岩蚀变的遥感识别[J].国土资源遥感,2002,55(4):60-61. [Liu G. Remote sensing extraction of alteration information related to the Wulonggou gold deposit, east Kunlun mountains[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2002,55(4):60-61.]
- [33] Ranjbar H, Honarmand M, Moezifar Z. Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004(24):237-243.
- [34] Mokhtari Z, Boomeri M, Bagheri S. Digital image processing and analysis techniques for detection of hydrothermal alteration zones: A case study in Siah-Jangal area, north of Taftan volcano, southeastern Iran[J]. J Indian Soc Remote Sens, 2015,43(2):363-377.
- [35] Masoumi F, Eslamkish T, Honarmand M, et al. A comparative study of Landsat-7 and Landsat-8 data using image processing methods for hydrothermal alteration mapping [J]. Resource Geology, 2016,67(1):72-88.
- [36] 马建文.利用 TM 数据识别二道沟金矿地表地质特征[J].国土资源遥感,1994,47(4):20-22. [Ma J W. Using TM data to identify surficial geological feature of the gold deposit[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1994,47(4): 20-22.]
- [37] 邓素贞,贺佳惠,王永军. ETM 数据在金矿化蚀变信息提取中的应用研究——以张家口下双台地区为例[J].国土资源遥感,2010,54(4):56-59. [Deng S Z, He J H, Wang Y J. The application of ETM data to the extraction of gold mineralization and alteration information: A case study of Xiashuangtai area in Zhangjiakou[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010,54(4):56-59.]
- [38] 何国金,胡德永,陈志军,等.从 TM 图像中直接提取金矿

- 化信息[J].遥感技术与应用,1995,10(3):51-54. [He G J, Hu D Y, Chen Z J, et al. Extraction gold mineralized information directly from TM image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1995,10(3):51-54.]
- [39] 施炜,刘建民,王润生.内蒙古东部喀喇沁旗地区金矿围岩蚀变遥感信息提取及成矿预测[J].地球学报,2007,28(3):291-298. [Shi W, Liu J M, Wang R S. The extraction of wall rock alteration information related to gold deposits in Harqin Banner area of eastern Inner Mongolia by using ETM+ remote sensing technique[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007,28(3):291-298.]
- [40] Crosta A P, 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[C]. Proceedings of the 7th (ERIM) Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology, 1989:1173-1187.
- [41] Loughlin W P. Geological exploration in the western United States by use of airborne scanner imagery[C]. IMM Conference: Remote Sensing, an Operational Technology for the Mining and Petroleum Industries, London, 1990: 223-241.
- [42] Loughlin W P. Principal component analysis for alteration mapping[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1991,57(9):1163-1169.
- [43] Aydal D, Ardal E, Dumanlilar O. Application of the Crosta technique for alteration mapping of granitoidic rocks using ETM+ data: Case study from eastern Tauride belt (SE Turkey)[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007,28(17):3895-3913.
- [44] 韩玲,谢秋昌.利用遥感技术对新疆西天山地区矿化蚀变信息的提取[J].遥感信息,2007,6:49-51. [Han L, Xie Q C. Remote sensing for extracting mineralizing alteration information in Chagannur areas of west Tianshan, Xinjiang[J]. Remote Sensing Information, 2007,6:49-51.]
- [45] 高景刚,薛春纪,吴淦国,等.基于知识的蚀变遥感异常信息快速提取及找矿应用实践[J].遥感学报,2008,12(1): 186-192. [Gao J G, Xue C J, Wu G G, et al. Method of fast extracting alteration remote sensing abnormal information based on knowledge and prospecting application [J]. Journal of Remote Sensing, 2008,12(1):186-192.]
- [46] Kalelioglu O, Zorlu K, Kurt M A, et al. Delineating compositionally different dykes in the Uluksla basin (Central Anatolia, Turkey) using computer-enhanced multi-spectral remote sensing data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009,30(11):2997-3011.
- [47] 张佩民,张建国,杨自安,等.滇东罗平县雄武镇地区遥感蚀变信息提取及成矿预测[J].地质通报,2009,28(6):769-775. [Zhang P M, Zhang J G, Yang Z A, et al. Remote sensing alteration information extraction and metallogenetic prognosis of Xiongwu Town area, Luoping County, eastern Yunnan Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009,28(6):769-775.]
- [48] 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, R S, Xiong S Q, Nie H F, et al. Remote sensing technology and its application in geological exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2011,85(11):1699-1743.]
- [49] 钱建平,张渊,赵小星,等.内蒙古东乌旗遥感构造和蚀变信息提取与找矿预测[J].国土资源遥感,2013,25(3):109-117. [Qian J P, Zhang Y, Zhao X X, et al. Extraction of linear structure and alteration information based on remote sensing image and ore-prospecting prognosis for Dongwu Banner, Inner Mongolia[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013,25(3):109-117.]
- [50] 夏清,杨武年,赵妮.青藏高原北缘喷山耦合带库斯拉甫地区遥感蚀变信息提取[J].国土资源遥感,2014,26(1): 127-131. [Xia Q, Yang W N, Zhao N. Extraction of remote sensing alteration information of Kosrap area in northern basin-mountain coupling zone of Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014,26(1): 127-131.]
- [51] 吴小娟,温静,肖晨超,等.基于多源遥感数据的矿物蚀变信息提取——以西藏甲玛铜多金属矿为例[J].地质力学学报,2015,21(2):228-240. [Wu X J, Wen J, Xiao C C, et al. Extraction of altered mineral information based on multi-source remote sensing data: A case study of Jiamia Copper polymetallic deposit[J]. Journal of Geomechanics, 2015,21(2):228-240.]
- [52] Sojdehee M, Rasa I, Nezafati N, et al. Application of spectral analysis to discriminate hydrothermal alteration zones at Daralu copper deposit, SE Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016,9(1):1-12.
- [53] Pazand K, Sarvestani J F, Ravasan M R S. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data for reconnaissance porphyry copper mineralization in the Ahar area, NW Iran[J]. Indian Society of Remote Sensing, 2013,41(2):379-389.
- [54] 毛晓长,刘文灿,杜建国,等.ETM+和ASTER数据在遥感矿化蚀变信息提取应用中的比较——以安徽铜陵凤凰山矿田为例[J].现代地质,2005,19(2):309-314. [Mao X C, Liu W C, Du J G, et al. Comparison between ETM+ and ASTER data for extraction of alteration information: A case study of Fengshuangshan ore field, Tongling, Anhui Province[J]. Geoscience, 2005,19(2):309-314.]
- [55] 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,1998,51(2):46-53. [Zhang Y J, Yang J M. The method of abstracting remote sensing information of altered rocks in the uncovered bedrocks area[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 1998,51(2):46-53.]
- [56] 马文征,王铁军.内蒙古西乌珠穆沁旗地区围岩蚀变的遥

- 感信息提取[J].地质找矿论丛,2010,25(3):265-270. [Ma W Z, Wang T J. Remote sensing information extraction of wall rock alteration in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2010,25(3):265-270.]
- [57] 段宗恩,朱谷昌,张思颖,等.哈密黑山口地区遥感蚀变信息提取特征波段优选研究[J].地质与勘探,2012,48(4):823-828. [Duan Z E, Zhu G C, Zhang S Y, et al. Selection of characteristic bands in alteration information extraction from remote sensing images for the Heishankou area, Hami, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(4):823-828.]
- [58] Asl R A, Afzal P, Adib A, et al. Application of multifractal modeling for the identification of alteration zones and major faults based on ETM+ multispectral data[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015(8):2997-3006.
- [59] 吴浩,徐元进,范高晶,等.奇异值分解在ETM+遥感蚀变信息提取中的应用——以青海省五龙沟金矿勘查区为例[J].地理与地理信息科学,2016,32(2):40-45. [Wu H, Xu Y J, Fan G J, et al. Using ETM+ data for extraction of alteration information based on singular value decomposition: A case study of Wulonggou gold deposit, Qinghai [J]. Geography and Geo-information Science, 2016,32(2): 40-45.]
- [60] 吴志春,郭福生,刘林清,等.青海玉树地区遥感找矿蚀变异常提取与成矿预测[J].东华理工大学学报(自然科学版),2011,34(3):271-277. [Wu Z C, Guo F S, Liu L Q, et al. Alterations anomaly abstraction of mineral survey with remote sensing and metallogenic prognosis in Yushu, Qinghai[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2011,34(3):271-277.]
- [61] 赵小星.西藏桑木岗地区遥感线性构造和蚀变信息提取与找矿预测[J].现代地质,2017,31(4):851-859. [Zhao X X. Extraction of linear structure and alteration information based on remote sensing images and ore-prospecting prognosis for Sangmugang in Tibet[J]. Geoscience, 2017, 31(4):851-859.]
- [62] Tangestani M H, Moore F. Iron oxide and hydroxyl enhancement using the Crosta method: A case study from the Zagros belt, Fars Province, Iran[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2000,2(2):140-146.
- [63] 燕守勋,武晓波,周朝宪,等.遥感和光谱地质进展及其对矿产勘查的实践应用[J].地球科学进展,2011,26(1):13-29. [Yan S X, Wu X B, Zhou C X, et al. Remote sensing and spectral geology and their applications to mineral exploration[J]. Advances in Earth Science, 2011,26(1):13-29.]
- [64] Mia M B, Fujimitsu Y. Mapping hydrothermal altered mineral deposits using Landsat 7 ETM+ image in and around Kuju volcano, Kyushu, Japan[J]. Journal of Earth System Science, 2012(4):1049-1057.
- [65] Eldosouky A M, Abdelkareem M. Elkhateeb S O. Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, south eastern desert of Egypt[J]. Journal of African Earth Science, 2017(130):28-37.
- [66] 张国荣,芦青山,费一清. ETM+数据在甘肃省肃北县黑刺沟一带蚀变遥感异常信息提取中的应用[J].大地构造与成矿学,2010,34(3):386-390. [Zhang G R, Lu Q S, Fei Y Q. Application of ETM+ data to alteration remote sensing anomaly extraction in the Heicigou area of Subei County, Gansu[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010,34 (3):386-390.]
- [67] 费一清,李永庆.基于ETM数据的蚀变遥感异常信息提取及成矿区预测研究[J].遥感技术与应用,2011,26(4):482-488. [Fei Y Q, Li Y Q. Extraction of remote sensing alteration information and analysis of metallogenic prognosis based on ETM: A case study of Danghe-Nanshan area in Gansu[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011,26(4):482-488.]
- [68] 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.]
- [69] 于岩,李建国,陈圣波,等.基于不同岩性背景的遥感影像蚀变矿物信息提取[J].地球科学——中国地质大学学报,2015,40(8):1391-1395. [Yu Y, Li J G, Chen S B, et al. ASTER image alteration minerals information extraction based on different lithology background[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2015,40(8): 1391-1395.]
- [70] 丛丽娟,胡凤翔,杨俊才,等.内蒙古朱拉扎嘎金矿ETM+数据提取蚀变异常方法研究[J].现代地质,2007,21(4):725-732. [Cong L J, Hu F X, Yang J C, et al. Study on abnormal extracting of altered rocks using ETM+ data in Zhulazhaga gold deposit, Alashan region, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2007,21(4):725-732.]
- [71] 马建文,张齐道.利用TM数据提取含金蚀变带的方法研究——以冀北东卯地区为例[J].国土资源遥感,1994(2):41-45. [Ma J W, Zhang Q D. Study on the method of identifying hydrothermally altered rocks using TM data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1994(2):41-45.]
- [72] 杨建民,张玉君,陈薇,等.ETM+(TM)蚀变遥感异常技术方法在东天山戈壁地区的应用[J].矿床地质,2003,22(3):278-286. [Yang J M, Zhang Y J, Chen W, et al. Application of ETM+(TM) remote sensing alteration anomaly extraction technique to Gobi area, east Tianshan mountains

- [J]. Mineral Deposits, 2003,22(3):278-286.]
- [73] 张楠楠,周可法,孙莉,等.遥感蚀变地质特征提取研究——以新疆康古尔地区为例[J].新疆地质,2008,26(1):39-42. [Zhang N N, Zhou K F, Sun L, et al. Feature extraction altered geological remote sensing research: Example for Xinjiang Kangguer area[J]. Xinjiang Geology, 2008,26(1):39-42.]
- [74] 郭娇,朱谷昌,邹林,等.贵州省道真地区遥感蚀变信息提取研究[J].矿床地质,2014,33(增刊):675-676. [Guo J, Zhu G C, Zou L, et al. The study of extracting remote sensing alteration information in Daozhen area, Guizhou Province[J]. Mineral Deposits, 2014,33(Sup.):675-676.]
- [75] Honarmand M, Ranjbar H, Shahabpour J. Application of principal component analysis and spectral angle mapper in the mapping of hydrothermal alteration in the Jebal-Barez area, southeastern Iran[J]. Resource Geology, 2012, 62(2):119-139.
- [76] Ghosh U K, Naik K K, Kesari M P. Digital image processing of multispectral ASTER imagery for delineation of alteration and related clay minerals in Sakoli Belt: A case study of Maharashtra[J]. Journal Geological Society of India, 2016(88):464-470.
- [77] Chavez P S, Kwarteng A Y. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1989,55(3):339-348.
- [78] 张晋开,崔承禹,支毅乔.基于主成分分析的植被掩模与模式滤波方法在中等植被覆盖区蚀变信息提取中的应用[J].中国图象图形学报,1996,1(2):108-113. [Zhang J K, Cui C Y, Zhi Y Q. A new method for alteration extraction in mid-vegetated areas using TM data—combined technique of vegetation masking and mode filtering based on principal component analysis[J]. Journal of Image and Graphics, 1996,1(2):108-113.]
- [79] Fraser S J, Green A A. A software defoliant for geological analysis of band ratios[J]. International Journal of Remote Sensing, 1987,8(3):525-532.
- [80] 赵元洪,张福祥,陈南峰.波段比值的主成分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 and Resources, 1991,3(3):12-17.]
- [81] 罗一英,高光明,于信芳,等.基于ETM+的几内亚铝土矿蚀变信息提取方法研究[J].遥感技术与应用,2013,28(2):330-337. [Luo Y Y, Gao G M, Yu X F, et al. A study on extraction of Bauxite alteration information of Guinea based on ETM+ remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013,28(2):330-337.]
- [82] 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 L X, Liu L P, Su X X, et al. Study on identification of altered wall-rock in areas of different vegetation coverages based on remote sensing[J]. Geoscience, 2008,22(2):293-298.]
- [83] 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 Z C, Guo F S, Liu L Q, 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.]
- [84] 吴志春,胡荣泉,郭福生,等.江西省相山铀矿田植被覆盖区遥感蚀变异常提取[J].铀矿地质,2013,29(2):112-118. [Wu Z C, Hu R Q, Guo F S, et al. The extraction of alteration anomaly with remote sensing image of vegetation covered area in Xiangshan uranium field, Jiangxi Province[J]. Uranium Geology, 2013,29(2):112-118.]
- [85] 韩先菊,葛良胜,张惠玉,等.新疆托里金矿带矿化蚀变体系及遥感混合蚀变信息分解-复合提取研究[J].地质找矿论丛,2006,21(增刊):99-106. [Han X J, Ge L S, Zhang H Y, et al. Study on the mineralization alteration systems and decomposing and compounding extraction of the mixed remote sensing alteration information in Tuoli gold ore belt, Xinjiang, China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2006,21(Sup.):99-106.]
- [86] 陈勇敢,刘桂阁,路彦明,等.甘肃陇南阳山金矿区金矿遥感蚀变信息提取探讨[J].矿床地质,2008,27(增刊):85-90. [Chen Y G, Liu G G, Lu Y M, et al. The extraction of remote sensing alteration information from the Yangshan gold deposit in Longnan county, Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2008,27(Sup.):85-90.]
- [87] 杨波,吴德文,陈云浩,等.矿化信息提取的混合蚀变遥感模型——以鹰嘴山金矿区为例[J].国土资源遥感,2005(1):20-25. [Yang B, Wu D W, Chen Y H, et al. A mixed alteration remote sensing model for extracting mineralization information: A case study of the Yingzuishan gold deposit[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2005(1):20-25.]
- [88] 余凤鸣,王磊.武当地区矿化蚀变的遥感信息提取与应用[J].矿床地质,2010,29(增刊):699-700. [Yu F M, Wang L. Remote sensing alteration information extraction and application in Wudan area[J]. Mineral Deposits, 2010,29(Sup.):699-700.]