遥感地质

混合矿物组合光谱在蚀变矿物填图中的应用—以云南香格里拉地区 Hyperion 数据蚀变矿物填图为例

田 丰[1],董丽娜[2],杨苏明[2],王润生[2]

(1. 中国地质大学(北京),北京 100083;2. 中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

[摘 要]由于自然界中矿物的共生组合具有一定的规律性,因此,在地质找矿和蚀变矿物填图中,蚀变矿物组合和分带往往比单一的蚀变矿物更具有指导和决策意义。根据矿物在岩石、矿石或蚀变带中的共生和伴生组合规律及工作的地质目标,将某些不易区分且又不必要区分的矿物作为一个矿物组合进行识别,在混合光谱分解中亦作为一个端元进行计算,是解决矿物混合光谱的另一种有效途径。本文使用云南香格里拉地区的 hyperion 高光谱数据,以提取褐铁矿+绢云母的识别矿物组合作为矿物填图研究的组合端元矿物目标,对云南高海拔地区的岩石蚀变信息进行了提取和分析,制作了遥感蚀变异常图,并在图中蚀变提取异常的研究区实地考察并与提取信息作了比较。识别结果表明:研究区山头海拔高度基本都在 4000 m 以上,原始植被较少,岩石露头较多,虽然受各种干扰较大,但提取出了比较满意的效果,进而可以其它知识的辅助下,可以实现对成矿远景区以及靶区的圈定。

[关键词]饰变矿物 高光谱 FLAASH MNF 变换 MTMF

[中图分类号]P627 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2010)02-0331-07

Tian Feng, Dong Li-na, Yang Su-ming, Wang Run-sheng. Application of combined spectra of mixed minerals to mapping altered minerals: A case study in the Yunnan region based on Hyperion data[J]. Geology and Exploration,2010,46(2):0331-0337.

0 引言

矿化蚀变是金属矿床普遍存在的现象,而且矿物蚀变范围多大于矿体分布的范围而易识别。所以,蚀变带岩矿光谱特征信息是寻找矿床的有利指示信息。由于蚀变矿物其特有的光谱特性在现今的多种多光谱以及高光谱遥感传感器中可敏锐的识别到,因此蚀变矿物填图是高光谱遥感最能发挥其优势的应用领域,

由于自然界中矿物的共生组合具有一定的规律性,因此,在地质找矿中,蚀变矿物组合和分带往往比单一的蚀变矿物更具有指导和决策意义。很多情况下,并不需要逐一识别出各种单一的矿物成分,更需要的是识别出矿物的共生组合及其分带。根据矿物在岩石、矿石或蚀变带中的共生和伴生组合规律及工作的地质目标,将某些不易区分且又不必要区分的矿物作为一个矿物组合进行识别,在混合光谱分解中亦作为一个端元进行计算,是解决矿物混合光谱的另一种有效途径。

国外一些学者和研究所也已开始注意这一问题,并开展了相应的研究工作(甘甫平等,2003;章革等,2004)。在澳大利亚皮尔巴拉铁矿区,以叶蜡石和富铝白云母为指示矿物,用航空高光谱寻找太古界脉状金矿床。以贫铝白云母为指示矿物,寻找低温热液金矿床。澳大利亚地质调查局利用航空成像光谱矿物填图技术,在西澳 Panorama 地区通过填制和研究相互叠加的绿泥石化和绢云母化的分布,找出相对富铝绢云母和贫铝绢云母在空间分布的规律性,在贫铝绢云母分布区所指示的热液上升带发现新矿化。加拿大的 Noranda 矿业公司在南美的斑

[收稿日期]2009-10-18;[修订日期]2010-03-24;[责任编辑]陈喜峰。

[基金项目]大调查项目:中国地质调查局地质大调查项目“中热红外多/高光谱矿物填图及遥感异常信息提取技术应用研究”(1212010660601)。

[第一作者简介]田丰(1975-),男,2005 年毕业于太原理工大学(最高学历),获硕士学位,在读博士生,地图制图学与地理信息系统专业,主要从事高光谱遥感信息提取与地学应用,E-mail:tianf9602@163.com。

岩铜矿带上(500 km 长、50 km 宽)确定勘探目标时,从成像光谱技术获得的矿物图上,确定了明矾石+高岭石类组合是找矿的首选目标。澳洲 CSIRO 公司在美国内华达州 Comstock 金矿及其相邻地区进行了成像光谱技术矿物填图,加拿大温哥华 Gitennes 勘探公司对秘鲁 Virgen Property 金远景区对钻孔岩心、手标本和公路边的露头样品进行了光谱矿物测量,测量中观察到的蚀变矿物有明矾石、地开石、叶腊石、水铝石、高岭石、蒙脱石、伊利石和石英。结果发现,在与金矿化相关的地区,地开石含量增加,认为地开石是发现金矿化区的直接指示矿物。依据这一规律,加大了钻孔的钻进深度,结果发现了与地开石、明矾石和 VAGGY 状石英有关的另一处金矿化。

云南三江地区地域辽阔,区内地质构造复杂,成矿条件优越,是中国重要的多金属成矿带,极具成矿远景,目前发现的重要成矿带包括普朗斑岩型铜矿床成矿带等。由于高寒山区气候寒冷、沟谷发育、表面覆盖物多样,找矿难度大,地勘成本高,地质矿产勘查工作程度很低,相关的化探和物探数据较缺乏。本次研究使用 2003 年 12 月 12 日香格里拉地区的 Hyperion 高光谱影像数据和云南 1:20 万地形图数据,针对普朗区域地质背景缺乏及其区内典型矿床—普朗斑岩型铜矿床特征的基础上,结合斑岩型铜矿的蚀变岩石矿物特点,分析研了究区蚀变矿物光谱特征,提出以褐铁矿+绢云母的识别矿物组合作为此次找矿研究的首选矿物端元。最后以此端元矿物组合的平均像元光谱作为端元光谱,对研究区进行了成像光谱技术在典型蚀变矿物识别和填图,划定远景找矿靶区,将来再与化探、物探以及地面工作相结合,可增加找矿信息的可靠性,浓缩找矿目标地,能使进一步矿产勘查评价工作更有针对性,提高工作效率,加快矿产资源勘查与评价的速度,迅速扩大找矿成果。

1 研究区地质背景

研究区位于云南省的香格里拉县,属于热带高原地带,位于青藏雪域高原南缘部分向云贵高原过渡的过渡带中,其中中甸雪山高原,地势北高南低,东高西低,主体为大小中甸坝,呈现南北走向,四周为山地所环绕,属云岭支脉,东北部主要有大雪山、小雪山、哈巴雪山等。区内河流主要属金沙江水系,水力资源丰富。中甸高原坝区分布有多个高原湖泊。海拔高度从 3100 m ~ 5600 m。该地区典型垂直生态景观分布,既有典型植物覆盖区(松树林),又有平原牧区的杂草和灌木。

实地勘察的普朗铜矿矿床位于云南三叠纪义顿火山岛弧带南端的中甸弧内。位于此次遥感图像提取得到的的主要成矿蚀变带的重要位置,可作为当地的典型矿床和提取效果验证点来讨论。普朗铜矿矿区位于普朗-红山铜多金属矿亚带南缘,红山复式背斜南段东翼的次级黑水塘-牙树背斜中,出露地层主要为上三叠统图姆沟组二、三段(T3t2-3)的砂板岩夹安山岩及曲嘎寺组三段(T3q3)的灰岩、大理岩夹砂板岩。北西向的普朗河断裂和北东东向的力中全达主干断裂控制了普朗岩体的展布。

普朗复式岩体呈不规则状出露地表,面积约 9 km^2,岩体出露以石英闪长玢岩为主,之中有后期石英二长斑岩及花岗斑岩侵入,更晚期有脉状闪长玢岩,组成一复式岩体。图 1 为典型的斑岩铜矿蚀变变化模式(陈光远等,1988;龙宝林等,2001)。图中的虚线为可能的剥蚀分离带,从平面图上看,中心是钾蚀变带或钾的硅酸盐蚀变带,典型矿物有交代石英或脉石英、正长岩、黑云母和硬石膏。以钾蚀变带为核心向两侧,依次呈同心圆状分布着绢英化蚀变带、泥化蚀变带和青磐岩蚀变带。绢英化蚀变带又称石英—绢云母蚀变带或绢云母蚀变带,代表矿物有石英、绢云母、黄铁矿和少量绿泥石。原岩结构受到强烈改造。泥化带含有序性很差的白云母、高岭石、蒙脱石和绿泥石。青磐岩化蚀变带由绿帘石、绿泥石、钠长石和碳酸盐组成。铜硫化物的矿石壳层一般位于钾蚀变带边界附近,向外,铜硫化物矿石壳层与石英-绢云母-黄铁矿壳层或黄铁矿晕紧密相连。

2 遥感蚀变信息提取原理

成像光谱矿物识别的基本原理是成像光谱数据的重建光谱与矿物标准光谱或实测光谱进行定量对比分析。光谱曲线上的吸收谱带是矿物光谱中最具有诊断意义的特征。主要谱带的位置和波形可作为识别和区分蚀变矿物大类的主要标志。

在可见-反射红外光谱区间(Clark 等,1990;Dark 等,1984,1999;Gaffey,1986;甘甫平等,2003),根据光谱主要谱带的谱带特征及其成因,可将可识别的矿物分为含 Fe^{2+} 矿物、含 Fe^{3+} 矿物、含 Mn^{2+} 矿物、含 $Al^{-}OH$ 键矿物、含 $Mg^{-}OH$ 键矿物、碳酸盐矿物、水合硫酸盐矿物等 7 类。在每一个类中,根据谱带的组合特征(主要谱带、次要谱带、伴随谱带的主次序列关系)又分为若干矿物族,如表 1 为常见的一些蚀变矿物的标准光谱曲线。

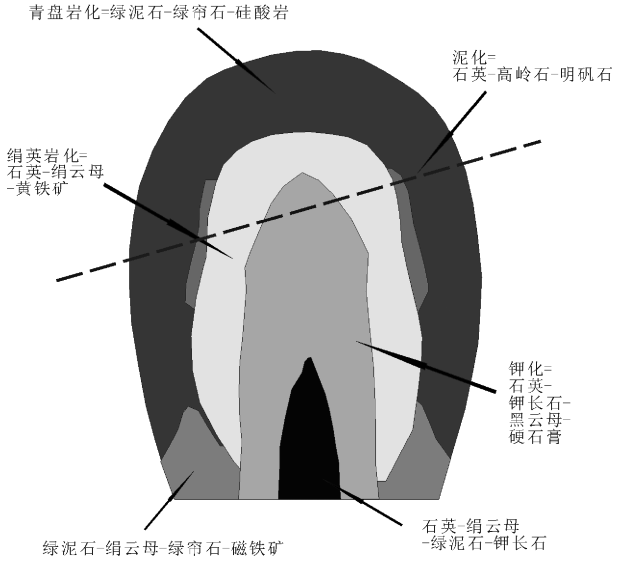


图 1　典型斑岩铜矿主要蚀变分带

Fig. 1　Major zones of alteration minerals in the porphyry copper mine

表 1　部分蚀变矿物的主要谱带分布

Table 1　Main spectrum classification of partial alteration minerals

矿类	矿族	主要吸收谱带(nm)	次级吸收谱带(nm)
Al-OH 键矿物	明矾石族	2175,2325	
	蒙脱石族	2215	2440
	白云母-伊利石族	2205	2355,2440,2115
	高岭石族	2200	2160
碳酸盐矿物	方解石族	2330	
	白云石族	2310	2230
	菱铁矿族	1000,2300	
Mg-OH 键矿物	绿泥石族	2330	2386,2224
	绿帘石族	2330	2225
	蛇纹石族	2320	2110

3　数据处理

Hyperion 是美国地球观察卫星 EO-1(Earth Observing-1) 搭载的高光谱成像仪。该卫星是美国 NASA 面向下一世纪为接替 Landsat7 而研制的一新型地球观测卫星,于 2000 年 11 月发射升空。太阳同步轨道,轨道高度 705 km,倾角 98.7°,仅以1 min 之差对同一地区重复成像. Hyperion 光谱区间为 400~2500 nm,220 波段,光谱分辨率 10 nm,空间分辨率 30 m,其谱特征适合于地物信息提取(聂爱秀等,2007)。

本次接收到的遥感原始图像是由目标特征信息与各种干扰信息叠加而成。因此,蚀变遥感信息的提取事实上是通过多层次地从遥感图像中剔除干扰信息,一次次分离出蚀变信息(即目标特征信息),最后得到包含目标特征信息的估计图像。

由于 Hyperion 仪器自身原因以及 L0 到 L1 数据校正过程等因素,坏像元、条带等误差仍然存在,因此,在进行数据应用之前,需要对数据进行逐波段检测,本次实验数据在 1~9 和 225~242 波段范围的像元值均为零,所以直接去掉。

3.1　光谱重建与 FLAASH 大气纠正

高光谱遥感数据中,光谱范围 1356~1417 nm 的波段受水汽的影响较大,在这些波段中,极少包含地面信息。因此,需把它们对应的波段剔除。剔除受水汽影响的波段后,剩下 192 个波段,即:10~54 和 78~224 波段。

遥感数据定标是大气校正的前提。Hyperion 影像数据提供给用户前已经系统校正和辐射定标处理,因此只需做大气校正和几何纠正。研究中采用利用 ENVI 软件中的 FLAASH 软件作大气校正。FLAASH 中对于本次大气校正实验数据的输人参数见表 2。

表 2　FLAASH 大气校正的基本输入参数

Table 2 Input parameters of FLAASH code atmospheric correction

成像日期	2003-12-12	成像时间	04:53:16	传感器类型	HYPERION
传感器高度	705 km	太阳高度角	50.33	太阳方位角	145.85
海拔高程	3000 m	能见度	16 km	大气模式	中纬度夏天
气溶胶类型	乡村类型	中心经度	99.97917175	中心纬度	27.89916992

FLAASH 模块中,在输入辐射能量(Radiation energy)数据时,同时要求输入尺度转换因子(Scale conversion factor)。尺度因子有两种输入方式① 当各波段尺度转换因子不同时,选择每一种的输入方式,即事先把尺度因子输入到记事本文件(factor)中,然后,从记事本文件中直接读取;记事本文件中的前 49 个是 400,以后的是 800。数目由波段的数目决定。(此文件有卫星数据提供商提供)② 当尺度转换因子相同时,选择第二种输入方式。

采用 FLAASH 模块对图像纠正结束后,发现大气纠正过程中引入的光谱噪声比较明显,特别是欲识别矿物特征光谱所处的 SWIR 波段。本文首先采用最小噪音分量(MNF) 变换进行了光谱降维和压缩。接着利用像元纯度指数(Pixel Purity Index, PPI)进行端元选择。端元一旦被提取出来, 利用混合谐调匹配滤波(mixture tuned matched filtering,

MTMF)方法可以实现对其赋存及丰度基于单个像素的填图。

3.2 最少噪声分量 MNF 变换

最大噪声组分变换(MNF:Maximum Noise Fraction Transformation)是一种正交变换,它类似多光谱遥感数据的主成分(PCA)分析方法。该正交变换能够将信号与噪声分离,变换后的前数个波段的特征值远远大于以后波段的特征值,且这些波段数据显示的地物影像清晰,集中地物的绝大部分光谱信息,随后的波段所包含的地物光谱信息依次减小,噪声增大。图 2 为工作区的 MNF 变换的特征值曲线(刘圣伟等,2006)。

从图 2 中 MNF 变换特征值曲线上看,1 ~ 12 分量的特征值很大,下降梯度也很快;12 ~ 20 分量的特征值较小,下降梯度缓慢,20 分量以后,特征值都很小且变化量也非常小,特征值曲线已基本保持平稳。可以认为,本次获取的 Hypersion 图像数据的内在维数应为 12 左右,即选择前 12 个 MNF 波段进行下一步的 PPI 处理。

3.3 像元纯度指数(PPI)

像元纯度指数(PPI)是在高光谱图像中寻找"光谱上最纯的"或极端像元的一种工具,纯净像元指数法对图像中的像素点进行反复迭代,图 2 为图像波段的反复迭代趋势图。如果图 3 中黑色迭代曲线有向图中黑色虚折线(ppi 迭代的理想曲线)的上升趋势,则调整迭代的波段数。因为云南地区的植被覆盖多,噪声大,因此白色迭代曲线不可能达到理想的红色折线状态。因此当图 2 中的白色迭代曲线只有向右延伸,而没有向上延升的趋势时,此时的迭代的波段数即为理想的波段数。

下一步,将 PPI 的处理结果输入到 N 维可视化(n-Dimensional Visualization)工具中,通过旋转将备选像元的 n 维散点图相继向低维空间投影,交互式选择分布于数据云主体的外围或末端的像元则为最终的端元像元。

3.4 N 维可视化中进行端元识别

N 维可视化(n-Dimensional Visualization) 中,光谱可视为 n 维散点图中的一个点,n 是波段数。对于给定的像元, n 维空间中点的坐标是每个波段对应像元的光谱反射率。像元越明亮表示该像元就越"纯",即在表面上仅为一种物质,如图 4 所示。

本研究区地理地质条件复杂,无暴露明显的目标蚀变矿物、缺少大面积的地表光谱测量和化探数据支持的情况下,很难确定影像端元,且有些矿物微弱的光谱特征用 Hyperion 影像无法探测得到,若直

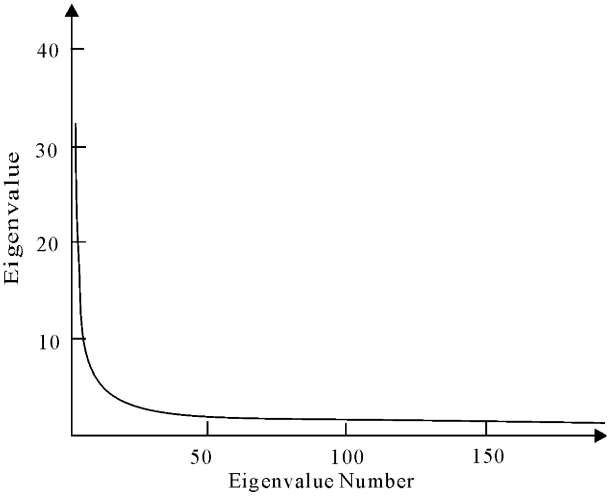


图 2 MNF 特征值曲线

Fig. 2 Eigenvalue curve of MNF

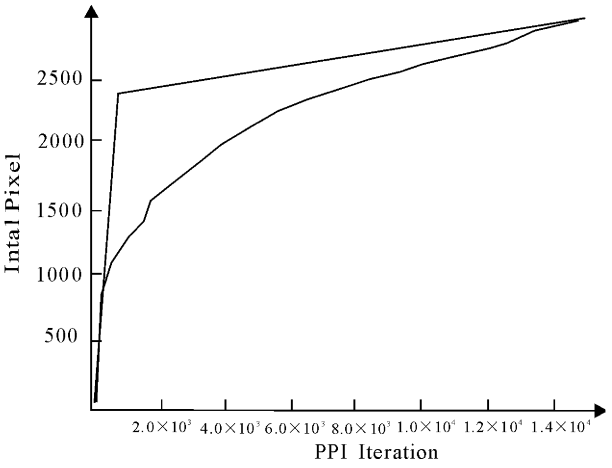


图 3 图像波段的反复迭代趋势图

Fig. 3 Iterative chart of image bands

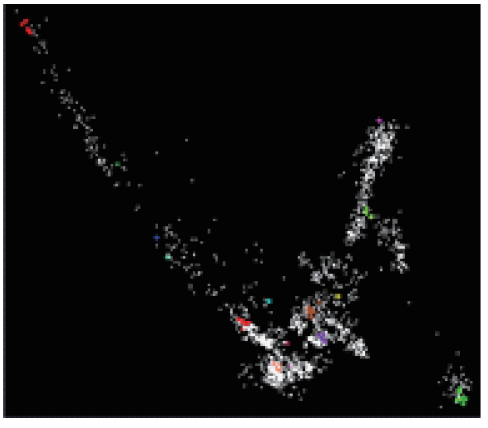


图 4 n-D 可视化效果图

Fig. 4 Effect of n-D visualization

接通过参考光谱(野外实测光谱或光谱库)对 Hyperion 影像进行识别,会出现混乱而影响识别效果。因此选择 MNF 结果的前三个主成分作为分析数据,结果图像中最亮的像元是最纯净的像元。把它们定义为感兴趣区(ROIS)。这些 ROIS 是用于识别 PPI 影像中那些分别代表不同地物的纯像元。

此次高光谱遥感图像上提取了褐铁矿、白云母、绿泥石和方解石等蚀变矿物信息。但是,这些蚀变信息明显地集中在海拔 4200 m 以上,植被覆盖相对较少;其它区域识别效果不好,特别是植被影响严重的区域。本地多雨,地表的黄铁矿一般都氧化为了褐铁矿。将提取的典型地物(矿物)的像元光谱与 JPL、USGS 等波谱库中的同类光谱作比较。分析认为:使用实验室环境下标准矿物光谱作为参考光谱进行识别存在缺陷,根源在于在野外混合光谱中矿物端元光谱表现复杂。如图 5 所示,提取的端元光谱在 2.210μm、2.355μm 和 2.440μm 的吸收峰位置与绢云母的特征吸收峰位置及形态基本一致,可断定端元中有绢云母。在 0.550μm、0.700μm 和 1.000μm 左右的吸收峰位置与褐铁矿的特征吸收峰位置及形态基本一致,可断定端元中有褐铁矿。此次提取绿泥石和方解石的光谱信息各只有一个像元的微弱反应,暂不作为端元光谱考虑,待下一步实地勘探后再做处理。因此确定了此次提取的端元矿物为褐铁矿+绢云母的识别矿物组合是此次找矿研究的首选目标。最后以此提取的端元矿物组合的平均像元光谱作为端元光谱,作为下一步的 MTMF 的标准光谱。

3.5　混合谐调匹配滤波(MTMF)

混合调制匹配滤波(MTMF)是将线性混合分解与匹配滤波相结合而形成的一种复合方法。它综合了匹配滤波不需要其它背景端元光谱的优点和线性混合分解中像元中各端元的含量为正且总和为 1 的约束条件。本次图像的解译利用褐铁矿+绢云母的识别矿物组合作为端元光谱进行混合谐调匹配滤波(MTMF),可以以此对矿物的相对丰度进行估计(量度值高的像素代表较高的矿物含量)。图 6 是利用该处理流程得到的云南香格里拉地区 hyperion 蚀变矿物分布图。

4　效果评述

为了验证本次蚀变提取的效果,将遥感图像提取的蚀变信息与研究区的地形图截图(图 6)以及矿点图作了叠和处理,选出一些可供查证的蚀变异常,2009 年 10 月,对研究区中蚀变提取强烈的普朗铜矿矿点周围和卓玛地区进行了野外观察验证。从野外验证与图像光谱特征分析,此次提取的结果比较可靠。从提取的蚀变矿物组合分布可知,普朗地区矿化蚀变强烈带位于一条北西—南东向的蚀变带之

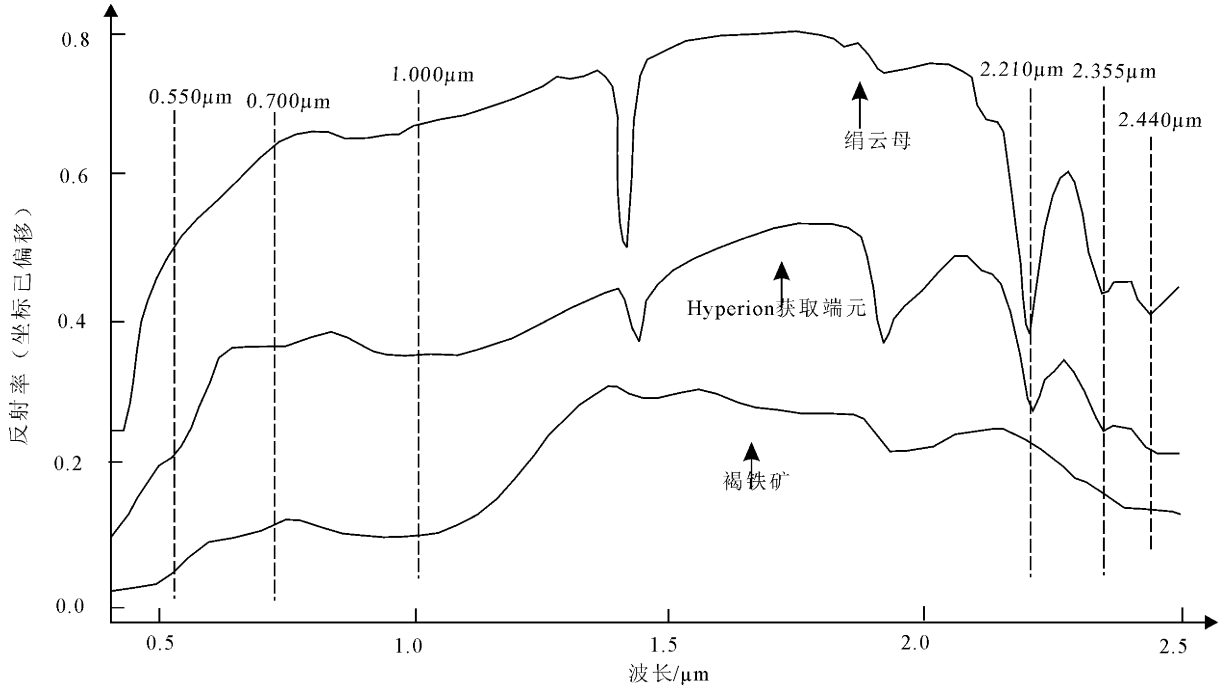


图 5　Hyperion 数据光谱端元

Fig. 5　Spectral mineral endmembers of Hyperion data

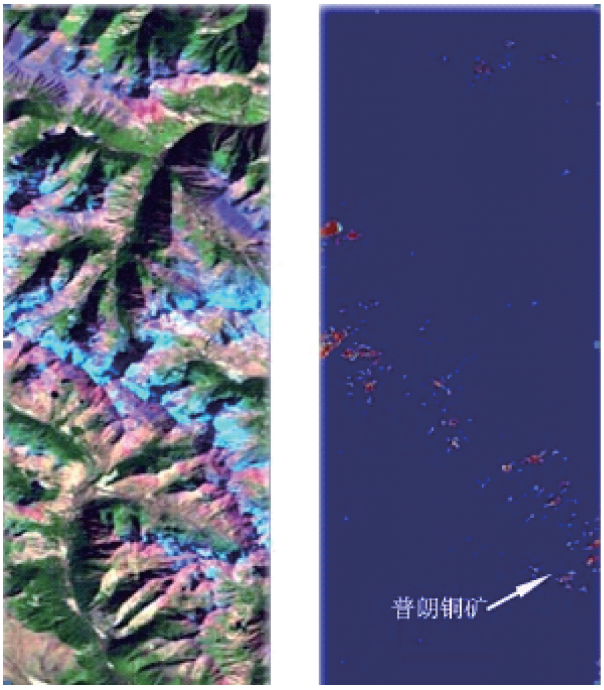


图 6 云南香格里拉地区 hyperion 影像截图(左)
与蚀变矿物分布信息提取(右)

Fig. 6 Image of hyperion (left) and altered mineral mapping in the Xianggelila area

上。现场勘查时(图 7),提取的蚀变异常强烈的部分研究区地表见到了绢云母化、褐铁矿化、绿泥石化和碳酸盐化等矿化蚀变,主要以褐铁矿化和绢云母化为主,表明此次提取以此两种组合为端元光谱的思路是准确和可行的。



图 7 蚀变矿物提取异常现场图

Fig. 7 Site for extraction of altered mineral anomalies

研究区山头海拔高度基本都在 4000 m 以上,现场考察发现:海拔 4300 m 以上山头绿色植物较少,岩石露头较多,同时该地区雨水丰富,长年累月的风吹雨淋,蚀变岩石风化严重,往往成片状铺盖于山坡上,如图 7 中右下角所示,面积远远大于实际的蚀变露头,利用高光谱数据可以提取出比较满意的效果,但蚀变露头的准确位置需要实地勘查标定,这也是与干旱荒漠化地区蚀变矿物填图不同的特点之一。但此区域易受雪的覆盖影响,要注意卫星的过境时间,尽量避开冬季获取数据。

5 结论

借鉴前人在干旱地区的蚀变信息的提取经验,对热带高寒高海拔研究区进行了成像光谱技术在典型蚀变矿物识别和填图中的应用。由于自然界中矿物的共生组合具有一定的规律性,针对研究地区的地质条件和背景,根据不同类型的具有相关性共处的矿物组合,对于识别很困难的矿物或密切共生、区分意义不太大的矿物采用混合光谱,利用矿物集合体的混合谱带特征进行矿物组合识别,从而可以避免光谱细微差异对信息提取的干扰。本次研究直接利用 hyperion 高光谱遥感数据,通过有效的大气纠正和光谱降维方法来减少 Hyperion 低信噪比给矿物识别带来的不利影响,并通过确定褐铁矿+绢云母的蚀变矿物组合来作为高光谱遥感探测斑岩铜矿的端元光谱。进行矿化蚀变带的识别、定量提取并圈定蚀变带,提取过程中剔除了人为的主观影响,取得了较好的效果。

不足之处和下一步需要改进的工作:

(1) 需要将蚀变矿物提取的资料与本地的物探和化探资料相结合,探索三者与成矿之间的联系和变化。

(2) 岩石矿物成矿与本地的地质构造变化往往有着密切的成因关系,将提取到的蚀变矿物带与当地的地质构造特点的结合解译是下一步的工作重心。

(3) 此次提取过程中也提取出了多类型的单矿物光谱,如绢云母、褐铁矿和绿泥石等,但基本都受植物光谱干扰较大,如利用不同的识别方法和模型进行蚀变矿物的填图和比较可以提高识别的可信度和准确度。

[References]

Clark R N, King TVV, Klejwa M. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals[J]. J. Geophys Res, 95: 12653-12680

Chen Wen-ming. 2002. The origins of porphyry copper deposits[J]. Geoscience, 16(1):1-8

Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Huian. 1988. Genetic mineralogy and prospecting mineralogy [M]. Chongqing: Chongqing Press (in Chinese)

Dark N R. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, http; //speclab. cr. usgs. gov (last revised June 25, 1999)

Dark R N, Roush T L. 1984. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications[J]. Journal of Geophysical Research, 89(B7): 6329-6340

Earth Observing-1 EO-1, http://eo1. gsfc. nasa. gov

Gan Fu-ping, Wang Run-sheng, Ma Ai-nai. 2003. Spectral identification tree (sit) for mineral extraction based on spectral characteristics of minerals [J]. Earth Science Frontiers, 10(2): 445-454

Gaffey S J. 1986. Spectral reflectance of carbonates minerals in the visible and near infrared (0.35 - 2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite[J]. American Mineralogist, 71:151-162

Long Baolin, Xue Yingxi, Feng Jing. 2001. Prospecting model of porphyry copper deposits of East Tienshan, Xinjiang[J]. Geology in China (Chinese Geology), 28 (3): 35-38 (in Chinese)

Liu Sheng-wei, Gan Fu-ping, Yan Bo-kun, Yang Su-ming. 2006. Application of the imaging spectroscopic technique in mineral identification and mapping [J]. Geology in China, 2:178-186

Nie Aixiu, Zhang Li-ting, Chen Zhu-an. 2007. A practical atmospheric correction method and its application in the hyper ion image[J]. Journal of east ch ina institute of technology, 6: 157-160

Roger N. 1999. Clark. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, derived from chapter 1 in: manual of remote sensing [A]. Rencz, Editor, John Wiley and Sons, Inc, New York, http:// speclab. cr. usgs. gov

Rui Zongyao, Wang Futong, Li Henghai2001. Advance of the porphyry copper belt of the East Tienshan mountain Xinjiang [J]. Geology in China (Chinese Geology), 28 (2): 11-16 (in Chinese)

Thompson A J B, Hauff P L, Robitaille A J. 1999. Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy [J]. Society of Economic Geologists Newsletter, 39(1): 16-27

Yang H, Meer F V D, Zhang J. 2000. Direct detection of onshore hydrocarbon micro see pages by remote sensing techniques[J]. Re2 mote Sens. Reviews, 18:1-18

Zhang Ge. 2004. Applications study of swir mineral mapping at the tuwu, qulong and pulang copper prospeets, China[D]. Beijing: China University Of Geosciences

Zhang Yu-jun, Zeng Zhao-ming, Chen Wei. 2003. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM (TM) data their application: method selection and technological flow chart[J]. Remote sensing for land & Resources, 2: 44-50

Zhang Zong-gui, Wang Run-sheng, Guo Xiao-fang. 2003. Mineral recognition method by spectrometry remote sensing based on material spectral characteristics [J]. Earth Science Frontiers, (2):435 一 443

Zou Lin, Yang Zi-an, Zhu Gu-chang, Wu De-Wen, Xiang Ai-qin. 2006. New method of alteration information extraction from multl- spectrum remote sensing data[J]. Geology and prospecting, 42(6):71-76

[附中文参考文献]

陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1988. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆:重庆出版社

甘甫平,王润生,马蔼乃. 2003. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J]. 地学前缘, 10(2): 445-454

龙宝林, 薛迎喜, 冯　京. 2001. 新疆东天山斑岩铜矿的找矿模式试探[J]. 中国地质, 28(5): 35-38

刘圣伟,甘甫平,闫柏琨,杨苏明. 2006. 成像光谱技术在典型蚀变矿物识别和填图中的应用[J]. 中国地质, 2:178-186

聂爱秀,张立亭,陈竹安. 2007. 大气校正方法及其在高光谱影像 Hyperion 中的应用[J]. 东华理工学院学报, 6: 157-160

芮宗瑶, 王福同, 李恒海. 2001. 新疆东天山斑岩铜矿带的新进展[J]. 中国地质, 28(2): 11-16

章　革. 2004. 高光谱短波红外技术在矿区矿物填图中的应用研究[D]. 北京:中国地质大学

张玉君,曾朝铭,陈摇薇. 2003. 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, 2:44-50

张宗贵,王润生,郭小方. 2003. 基于地物光谱特征的成像光谱遥感特征的识别方法[J]. 地学前缘. (2):435 一 443

邹　林,杨自安,朱谷昌,吴德文,相爱芹. 2006. 多光谱遥感蚀变信息提取新方法研究[J]. 地质与勘探, 42(6):71-76

Application of Combined Spectra of Mixed Minerals to Mapping Altered Minerals: A Case Study in the Yunnan Region Based on Hyperion Data

TIAN Feng[1], DONG Li-na[2], YANG Su-ming[2], WANG Run-sheng[2]

(1. *China University Of Geosciences, Beijing*　100083; 2. *China Areo Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing*　100083)

Abstract: In nature, coexistence and combination of minerals have definite rules. Thus the combination and subdivision of altered minerals are more important than single ones in geological mapping and survey. Based on such rules and geological purposes, some minerals, that are not easy or necessary to distinguish, can be identified as one set of minerals. And they are calculated as an end member in decomposition of mixed spectra. This is another approach to solve mixed spectra of minerals. In this work we use the Hyperion spectral data in the Xiangelila area, Yunnan province to identify the mineral combination of limonite and sericite. Then we obtain and analyze the data of altered rocks in high-elevation areas of Yunnan and prepare maps of remote sensing alternation. And we conducted field investigations at the sites where alternation anomalies were extracted from the map. The identification result shows that the study area has mountains over 4000 m, little vegetation and many outcrops. Although the interferences are large, information extraction has attained satisfactory results. With help of other data, this method can be used to delineate prospective mineralization and target areas.

Key words: Alteration rock anomaly, hyperspectral data, FLAASH, MNF Transformation, MTMF