

成像光谱技术在典型蚀变矿物识别和填图中的应用

刘圣伟¹ 甘甫平¹ 闫柏琨² 杨苏明¹
王润生¹ 王青华¹ 唐攀科²

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

摘要: 成像光谱矿物识别和填图技术是中国国土资源调查和监测重点发展的高新技术之一。笔者以国土资源调查应用为主要目标, 研究了成像光谱矿物识别和矿物填图技术实用化中的一些关键技术问题。分析了白云母和绿泥石两种重要蚀变矿物的光谱特征及光谱变异特征; 以新疆东天山黄山地区的 HyMap 数据为例, 对目前已较为系统化的成像光谱识别技术(如 MNF 变换、像元纯度指数 PPI 和 N 维可视化端元识别 NDVI)在典型蚀变矿物识别和填图中的应用进行介绍。

关键词: 成像光谱; 矿物填图; 矿物光谱; HyMAP; 黄山

中图分类号: P623.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)01-0178-09

随着目前人类对矿产资源需求和开发程度的加大, 矿产勘查的难度也变得越来越大, 对于生态脆弱区和偏远地区来说尤其如此。现在, 利用遥感和先进的光谱技术能够提供地表地物的详细物理化学特性(包括岩石形态、类型、矿物成分和岩石化学特征), 从而有助于填绘和查明潜伏的基岩、蚀变矿物组合以及地表风化层特征。与传统的低光谱分辨率系统不同, 新一代的成像光谱系统(又称高光谱)是利用实验室精度的波谱原理, 能够直接识别地表的矿物类型, 特别是识别与成矿作用密切相关的蚀变矿物, 定量或半定量估计蚀变矿物相对丰度, 甚至还可以探测某些蚀变矿物和造岩矿物的成分和结构变异特征。成像光谱矿物识别和填图技术已成为中国国土资源调查和监测重点发展的高新技术之一^①。

新疆地域辽阔, 区内地质构造复杂, 成矿条件优越。东天山是新疆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土屋斑岩型铜矿床、黄山铜镍硫化物矿床成矿带^[1-4]。东天山地区多为丘陵和戈壁裸露地貌, 植被覆盖极为稀疏, 具有得天独厚的矿产资源遥感调查优势。开展航空成像光谱地质调查不仅可以对该区的成矿潜力进行深入评

价, 而且可为以后航天成像光谱数据的广泛应用做好技术准备。在此笔者以黄山铜镍矿(黄山岩体)地区为例, 对成像光谱技术在典型蚀变矿物识别和填图中的应用进行介绍。

1 黄山铜镍矿概况

新疆哈密地区黄山铜镍矿带是一个与基性—超基性岩体有关的铜镍硫化物矿床成矿带, 位于新疆哈密市东南, 长 270 km, 宽 20~35 km, 呈北东东向展布, 面积 5 600 km², 是近 20 年来发现的又一大型铜镍矿基地, 现已查明黄山、黄山东两处大型矿床和土墩、香山、葫芦等多处中小型矿床(图 1)。

黄山岩体位于新疆哈密黄山铜镍矿地区, 是土墩—黄山—镜儿泉超基性岩带的一部分。区内出露的地层除第四系冲—洪积砂、砾石夹少量沙土外, 均属中石炭统干墩组(C_{2g}), 总体呈近东西向分布, 依其岩性特征和岩石组合自下而上划分为 5 个岩性段, 主要岩性组合为砂岩、粉砂岩、灰岩、火山碎屑岩等。黄山基性—超基性岩体侵位于其中。矿区出露有 3 个基性—超基性岩体(图 2), III 号岩体出露于矿区东南部, 呈近东西向分布, 东西长约 590 m, 最大宽度 60 m, 已

收稿日期: 2005-03-02; 改回日期: 2005-09-20

基金项目: 国家 863 计划(2002AA130010-3)、中国地质调查局地质大调查项目(200115100004)、国家自然科学基金(40201034)以及“国土资源部百名优秀青年科技人才计划”资助。

作者简介: 刘圣伟, 男, 1972 年生, 博士, 主要从事遥感技术应用和方法研究工作; E-mail: lsw9012@163.com。

① 王润生, 甘甫平, 等. 成像光谱矿物填图技术与应用示范, 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题技术报告, 2003.

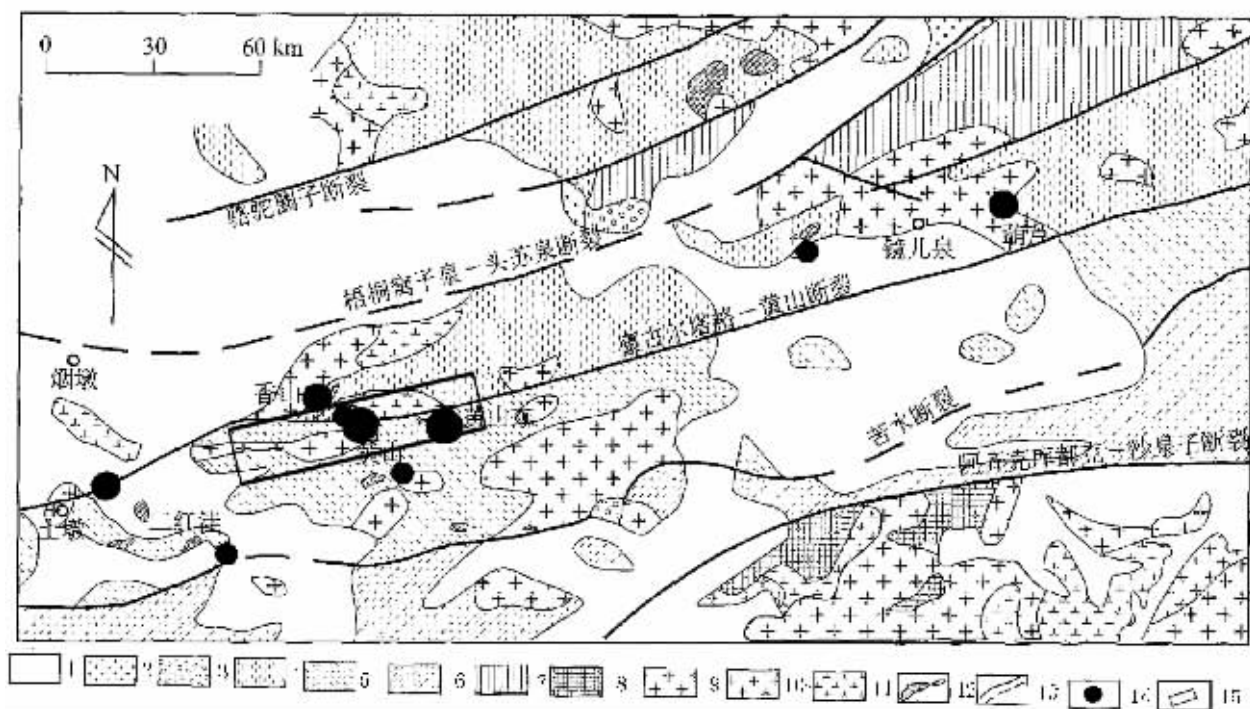


图 1 新疆哈密地区黄山铜镍矿带地质图(据王玉往等^[4])

- 1—新生界盖层沉积; 2—侏罗纪沉积盆地; 3—二叠纪沉积盆地; 4—下石炭统梧桐窝子组; 5—下石炭统干墩群; 6—下石炭统雅满苏组;
- 7—中石炭统头苏泉组; 8—中新元古界结晶基底; 9—海西期花岗岩; 10—海西期花岗闪长岩; 11—海西期闪长岩; 12—海西期基性—超基性岩;
- 13—断裂及推测断裂; 14—铜镍硫化物矿床、矿点; 15—研究区 Hymap 飞行范围

Fig.1 Geological map of the Huangshan copper-nickel ore belt, Hami, Xinjiang (after Y Wang, et al. ^[5])

- 1—Cenozoic cover; 2—Jurassic sedimentary basin; 3—Permian sedimentary basin; 4—Lower Carboniferous Wutongwozi Formation;
- 5—Lower Carboniferous Gandun Group; 6—Lower Carboniferous Yamansu Formation; 7—Middle Carboniferous Tousuquan Formation;
- 8—Meso- and Neoproterozoic crystalline basement; 9—Hercynian granite; 10—Hercynian granodiorite; 11—Hercynian diorite;
- 12—Hercynian mafic-ultramafic rocks; 13—Fault and inferred fault; 14—Copper-nickel sulfide deposit and occurrence; 15—HyMap surveying area

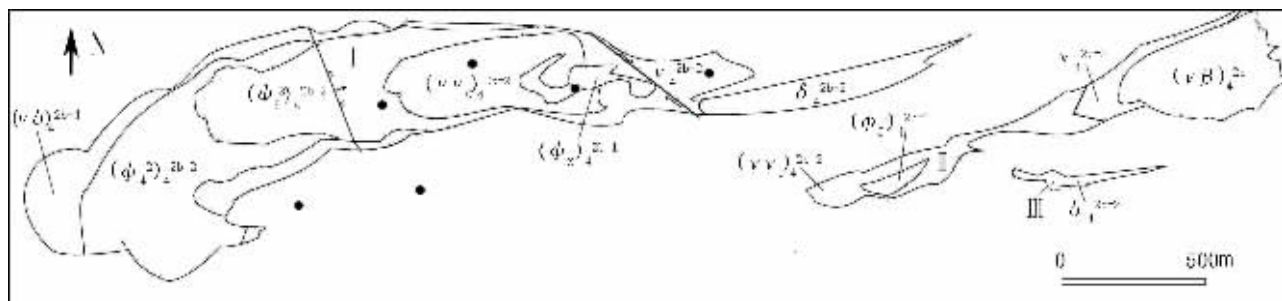


图 2 黄山铜镍矿岩体平面简图(据王崇义等^[6]改编)

- $(\nu\delta)_4^{2b-1}$ —辉长闪长岩; $(\phi_4)_4^{2b-2}$ —二辉橄榄岩; $(\phi_5)_4^{2b-2}$ —辉石岩; $(\nu\nu)_4^{2b-2}$ —辉长苏长岩;
- $(\phi_3)_4^{2b-1}$ —橄榄岩; ν_4^{2b-2} —辉长岩; δ_4^{2b-2} —闪长岩; $(\nu\beta)_4^{2b}$ —黑云母花岗岩;
- I, II, III—基性超基性岩体编号; ●—采样点; \—断层

Fig.2 Sketch of mafic-ultramafic complex in the Huangshan metallogenic belt

- $(\nu\delta)_{4Mafic}^{2b-1}$ —Gabbrodiorite; $(\phi_4)_4^{2b-2}$ —Lherzolite; $(\phi_5)_4^{2b-2}$ —Pyroxenite; $(\nu\nu)_4^{2b-2}$ —Gabbro.norite;
- $(\phi_3)_4^{2b-1}$ —Peridotite; ν_4^{2b-2} —Gabbro; δ_4^{2b-2} —Diorite; $(\nu\beta)_4^{2b}$ —Biotite granite;
- I, II, III—Mafic-ultramafic complex number; ●—Sampling site; \—Fault

有研究表明其是一个不含矿的闪长岩体; II号岩体出露于矿区东部,呈北东东向分布,长约 1.8 km,最大出露宽度 170 m,最小为 20~30 m,其东端被后期黑云母花岗岩穿插,岩性为辉长岩—辉长苏长岩—二辉辉石岩组合,当地地质研究单位的钻探分析表明,局部孔段虽见有硫化物,但总体来看矿化很弱。黄山 I号岩体出露规模最大,分异较好,是黄山铜镍矿的成矿岩体,岩体地表形态呈近东西向的“蝌蚪状”,东西长约 3.95 km,西部最宽 840 m,向东逐渐变窄,东端仅有 55 m,岩体属闪长岩—辉长岩—辉长苏长岩—辉石岩—橄辉岩—橄辉岩—辉橄岩组合,镁铁比值(m/f)为 2.93~5.21,属铁质超基性岩。

在变质作用方面,黄山铜镍矿地区的地层以区域性浅变质为主,在构造活动强烈部位及岩体与地层接触带附近,地层才出现较为明显的动力变质、热液变质和接触变质现象。就杂岩体本身而言,动力和热液变质也较强,主要表现在超基性岩石蚀变,如橄榄石矿物的透闪石化、蛇纹石化等,辉石矿物的绿泥石化、滑石化,角闪石和斜长石矿物的绿泥石化、黝帘石化等。正是这些与矿化密切相关的蚀变矿物及其特征组合的存在,使利用成像光谱等遥感技术快速圈定找矿靶区成为可能。

2 白云母、绿泥石的矿物光谱和研究区样品的岩石光谱特征分析

在短波红外光谱区域,白云母、绿泥石等粘土和碳酸盐岩矿物具有可以识别的诊断性光谱吸收特征,特征吸收波段的深度与岩石中这些矿物的含量密切相关。成像光谱矿物识别技术就是通过发现矿物特征吸收的波长位置和吸收深度等光谱参数的存在和变异,定量地研究岩矿的光谱特征与其类型、成分、结构等的内在联系。

绢云母和绿泥石化是热液蚀变带中重要的蚀变作用类型,它们对于研究中低温热液蚀变机制、与温压有关的地质环境变化过程以及成岩成矿条件等均具有重要意义,下面对白云母和绿泥石的矿物光谱以及研究区样品的岩石光谱特征进行分析。

2.1 白云母和绿泥石的矿物光谱特征

特定的分子键在短波红外反射光谱的某些波长位置产生诊断性吸收特征,白云母的诊断性光谱特征是 Al—OH 键在 2180~2228 nm 之间的尖锐而深的单一吸收特征,以及在 2340 nm 和 2440 nm 附近的较弱 Al—OH 特征。Clark 等^[7]在高光谱分辨率下,检测到白云母矿物在 2200 nm 附近的吸收波段随 Al 含量的增加向长波方向的移动;Post 等^[8]进一步研究认为,矿物结构中的八面体 Al 所占比例影响 Al—OH 特征吸收的波长位置。Herrmann 等^[9]认为,最普遍的情况是具有较小 Al—OH 波长(2180~2195 nm)的白云母在成分上为含钠质,而由较长 Al—OH 波长(2216~2228 nm)白云母为多硅白云母。笔者对新疆东天山地区蚀变岩石光谱中的绢云母

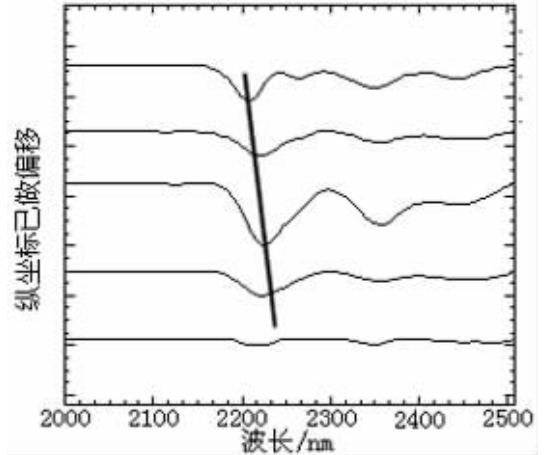


图3 绢云母 $\text{Si}/\text{Al}^{\text{IV}}$ 比值对 Al—OH 吸收波长的影响 (去除连续统后的光谱曲线,由上至下 $\text{Si}/\text{Al}^{\text{IV}}$ 值逐渐增大)
Fig.3 Effect of $\text{Si}/\text{Al}^{\text{IV}}$ of sericite on Al—OH absorption wavelengths (the $\text{Si}/\text{Al}^{\text{IV}}$ ratio increases progressively from above downward after the continuous spectral curve is removed)

Al—OH 波长位置与其成分的关系进行过研究,证实了指示多硅绢云母含量的参数(如 $\text{Si}/\text{Al}^{\text{IV}}$ 比值)与 Al—OH 吸收特征的波长位置高度相关(图 3)。

绿泥石的光谱具有 Fe—OH 和 Mg—OH 的诊断性吸收特征,波长位置分别为 2235~2255 nm 和 2320~2360 nm。这些吸收特征的波长随着绿泥石中铁离子含量的增加而增大。McLeod 等人^[10]在研究火山成因的大规模硫化物矿化作用中,发现绿泥石光谱特征变化对于热液矿化具有近似的指示意义。King 和 Clark^[11]在研究不同类型的绿泥石的反射光谱时发现,绿泥石结构类型的变化(二八面体与三八面体)与等结构绿泥石中铁含量变化相比,引起的光谱特征的变化要显著。根据不同光谱吸收特征的相对幅度,还可以估计可识别矿物在混合矿物或岩石中的相对含量和一些层状硅酸盐矿物的结晶程度^[12]。

2.2 研究区样品的岩石光谱特征分析

与航空遥感调查相结合,笔者在黄山铜镍矿区采集了野外样品并进行光谱分析,目的是确定可以进行光谱区分的矿物种类以及分析岩石光谱与岩性的关系,为 HyMap 数据的解译提供一定的光谱地面控制。样品岩石类型包括蚀变基性、超基性岩,以及岩体与地层接触带附近的变质板岩,覆盖了矿区出露的主要岩石组合。所有样品均用国土资源航空物探遥感中心配备的 GER—IRIS—III 型红外智能光谱仪进行了实验室光谱测试,光谱测试范围为 400~2500 nm;光谱分辨率:可见光为 2 nm,近红外到短波红外为 4 nm。岩石样品的薄片镜下鉴定结果表明,蚀变基性、超基性岩中的橄榄石蚀变为透闪石和滑石,辉石蚀变为绿泥石;变质板岩中蚀变矿

物主要为绢云母和绿泥石。

由于岩石样品中其他矿物成分或水分光谱吸收的影响,岩石光谱与矿物光谱相比(图 4),反射率相对较低,在 1400 nm 和 1900 nm 波长附近的水吸收强度也有所差异,但蚀变矿物的特征光谱吸收都得到了明显的表现。例如,透闪石矿物特征吸收是在 1000 nm 处有一个由二价铁离子引起的十分显著的宽谱带,特别是在 2200 nm 和 2500 nm 之间由羟基振动产生的两个尖锐谱带;绿泥石的光谱具有在 700 nm 和 1100 nm 之间铁离子引起的宽缓吸收谱带,以及 Fe—OH 和 Mg—OH 的诊断性吸收特征,波长位置分别为 2325~2360 nm 和 2320~2360 nm;白云母的诊断性光谱特征是 Al—OH 键在 2180~2228 nm 之间的尖锐而深的单一吸收特征,以及在 2340 nm 和 2440 nm 附近的较弱 Al—OH 特征。以上结果充分说明当岩石中含有足够的蚀变矿物成分时,利用 HyMap 成像光谱数据应足以辨别出不同矿物的光谱差异从而对其进行有效的识别。

4 HyMap 成像光谱数据处理与矿物填图

4.1 数据获取

中国国土资源航空物探遥感中心在 2002 年 10 月,使用澳大利亚 HyVista 公司研制的 HyMap 成像光谱仪,获取了黄山铜镍成矿带及其附近区域的航空成像光谱信息,光谱范围为 0.40~2.50 μm ,包括了可见光、近红外(VNIR)至短波红外(SWIR)区,波段 128 个,光谱分辨率 15 nm,空间分辨率 6 m。该光谱仪以其高信噪比、高空间和高光谱分辨率的能力,使利用航空数据通过识别其特征吸收光谱来区分一系列地表与矿化有关的蚀变矿物种类成为可能。

HyMap 航空遥感飞行时的主要技术参数:飞行平台为国产运十二,作业飞行地速 230~270 km/h;飞行高度为相对航高 2400 m;波段数目为 128(光谱范围:0.40~2.50 μm);空间分辨率为 6 m,512 pixel/row;航带覆盖宽度为 3070 m。

4.2 数据预处理

成像光谱镜头数据(即原始数据)是地物光谱反射辐射信息与大气辐射传输效应、地形效应、传感器扫描系统等多种因素影响的结果,其像元光谱是这些因素相互作用的综合反映。成像光谱对地物的识别依赖于地物精细的光谱特征,为了从图像中获取地物真实的光谱特征,必须进行相关数据的定标与大气校正等预处理,以消除与地物光谱辐射特征无关的因素。首先根据光谱仪内部的暗电流图像对原始数据进行辐射定标,消除仪器噪声等因素导致的系统误差。在本次成像光谱数据的预处理过程中,仅考虑大气的影响而未涉及地形对地物光谱的干扰。大气校正采用了澳大利亚针对 HyMap 仪器所开发的、基于 6S 模型的专用模块“HyCorr for HyMap Atmospheric Correction”(6S 是 Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar 的缩写,6S 模型是一种大气校正模型,描述了不同遥感器、不同地面状况下,太阳光在太

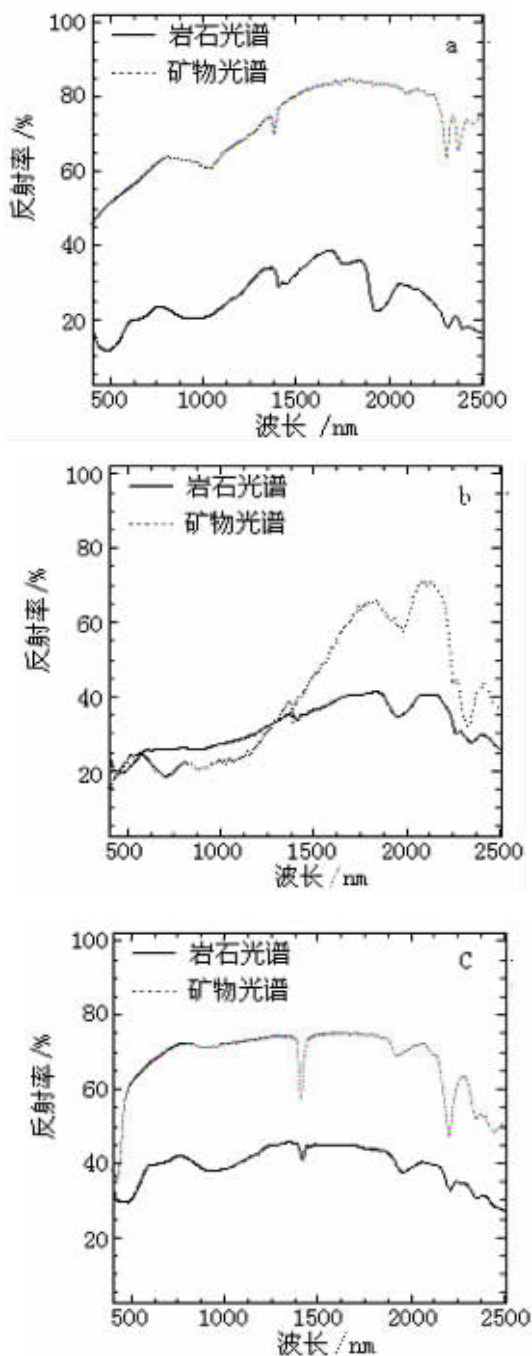


图 4 岩石光谱与光谱库(USGS)中矿物光谱对比图
a—蚀变橄榄岩(主要成分是透闪石)和透闪石矿物光谱;
b—蚀变辉长岩(主要成分是绿泥石)和绿泥石矿物光谱;
c—绢云母板岩(主要成分为绢云母)和白云母的矿物光谱

Fig.4 Comparison between spectra of rocks and mineral spectra of the USGS spectral library

a—Spectra of altered peridotite (consisting mainly of tremolite) and tremolite;b—Spectra of altered gabbro (consisting mainly of chlorite) and chlorite;c—Spectra of sericite slate (consisting mainly of sericite) and muscovite

阳—地面目标—传感器整个传输路径中所受的大气影响),该模块是基于水汽如 940 nm、1 140 nm 以及氧气 820 nm 波段的吸收特征,逐像元进行大气消减,重建地物的光谱特征。该模块还需要输入获取数据地区的海拔、飞行航高、气候类型、数据获取的时间和中心点的经纬度以及大气气溶胶类型和大气能见度等参数。

利用经过辐射定标和大气校正处理后的数据,模拟 LANDSAT TM 741 波段组合 (2 200 nm,760 nm,450 nm; RGB)的假彩色图像(图 5)。图像中色调偏向红色(或黄色)区域推测为蚀变矿物(绢云母、绿泥石、碳酸盐等)的分布区,这主要是通过些矿物在短波红外波段整体的反射光谱特征得以区分的。但是对矿物种类和丰度进行精确的识别,则需要对光谱数据进一步处理和分析。

4.3 成像光谱数据处理

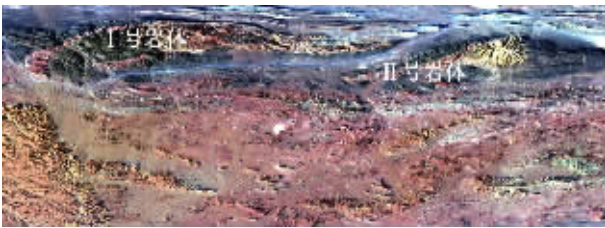


图 5 黄山矿区 HyMap 数据模拟 TM741 波段组合图像 (2200 nm,760 nm,450nm;RGB)

Fig.5 HyMap image of the Huangshan copper-nickel district simulating the TM741 band (2200nm,760nm and 450 nm;RGB)

由于成像光谱数据的复杂性和海量性,因此需要特殊的计算方法对其进行分析处理。光谱变换技术对于减少冗余信息含量十分必要。主成分分析常被用于减少通道数目并压缩信息,传统的利用训练样区进行识别分析的图像分类方法有

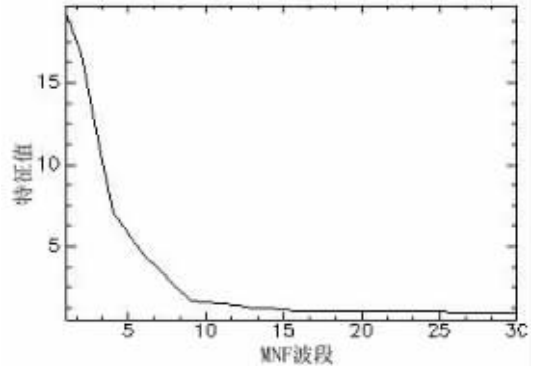


图 6 MNF 波段及其相应特征值

Fig.6 MNF bands and their eigenvalues

时可以产生较好的结果,但人为主观因素较强^[13]。目前更为普遍的方法是利用光谱端元和神经网络进行光谱分离分析。光谱数据可以通过最小噪音分量(MNF)变换进行降维和压缩。基于 MNF 变换,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,混合谐波匹配滤波(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^[12]。

4.3.1 最小噪音分量(MNF)变换

最小噪音分量(MNF)变换是一种光谱数据减维技术,可以用以确定图像数据内在的维数,分离数据中的噪声,减小进一步处理所需的运算量^[14]。MNF 变换实质上是通过两个阶梯式的主组分变换,将数据空间分为两部分,前者与大特征值和相关特征图像有关,后者为补充部分,具有近于均一的特征值和噪声优势图像。通过观察最终特征值和 MNF 图像(特征图像)来确定数据的固有维数,即只利用其中的相关部分将数据中的噪声分离,改善光谱处理的结果。选择了 HyMap 数据中的短波红外波段(2.0~2.5 μm,30 个波段)范围

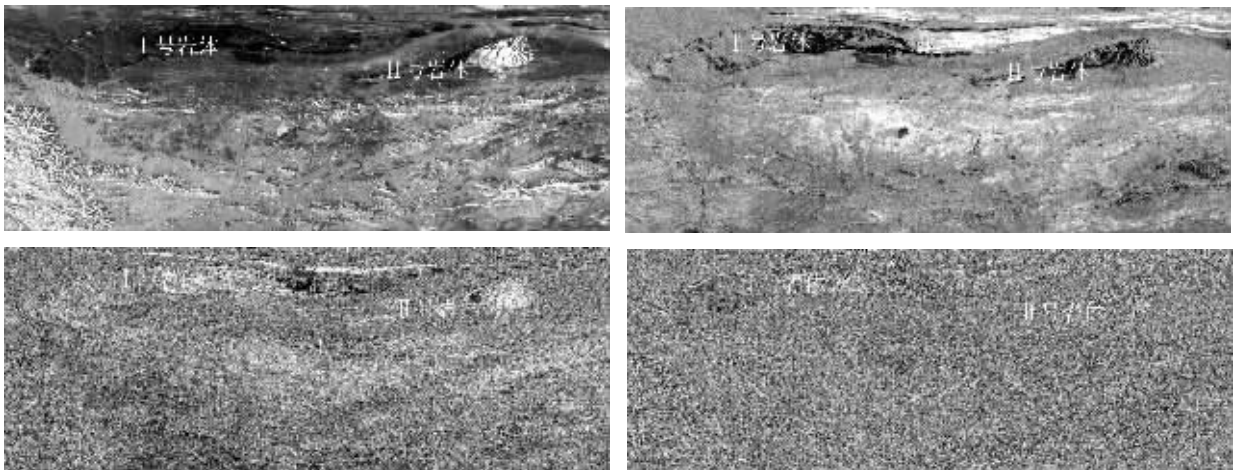


图 7 黄山铜镍矿地区的 MNF 图像

Fig.7 MNF images of the Huangshan copper-nickel district

进行 MNF 变换,得到的特征值与相应 MNF 波段数图(图 6)显示特征值在 1 到 10 波段之间迅速减小,由于通常较大的特征值代表较高的信息含量,表明图像信息主要包含在前 10 个 MNF 波段中。然而数据维数的确定还要结合 MNF 图像的比较(图 7),那些包含信息的波段所具有的特征值大于仅包含噪声的波段,而且其对应的图像空间上具有相关性,例如 MNF1~18 波段图像中的空间信息量逐渐减少,MNF18 波段仅在图像上部隐约可见少量信息,噪声图像则应不包含任何空间信息。最后将 HyMap 数据的维数确定为 18,即选择前 18 个 MNF 波段进行下一步的 PPI 处理。

4.3.2 像元纯度指数(PPI)

像元纯度指数(PPI)是在多光谱或成像光谱图像中寻找“光谱上最纯的”或极端像元的一种工具^[15],它用于从混合像元中提取较纯像元,从而减少确定端元所要分析的像元数目并使分离和识别端元较为容易。基于上述 MNF 变换,排序低的 MNF 波段被暂时忽略,仅选择高特征值波段进一步处理。通过反复投影 n 维散点图到随机单元矢量,记录每次投影的极值像元,最后注记每个像元被标定为极值的总次数,最终产生 PPI 图像,图像中像元的 DN 值代表像元被记录为极值的次数,图像直方图显示被 PPI“击中”(hit)的频次分布,从直方图中选择阈值,仅选择最纯的像元以保证被分析的像元数最小,这些像元被输入到分离特定光谱端元的交互式可视化算法中。

4.3.3 N 维可视化(n -Dimensional Visualization)中进行端元识别

N 维可视化(n -Dimensional Visualization)中,光谱可视作为 n 维散点图中的一个点, n 是波段数^[16]。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。利用这些点在 n 维空间的分布可以估计光谱端元数和它们的纯光谱特征。在二维空间,如果只有两个端元混合,混合光谱将落入平面坐标系的线中,纯端元将落入混合线的两端;如果三个端元混合,混合像元将落入三角形中;四个端元混合,混合光谱将落入四面体中;余以此类推。混合的端元落在纯端元之间,处在纯端元勾画的多面体中,这种混合光谱的凸面几何特征,可用于确定端元光谱数并估算它们的光谱特征,经过 PPI 选择出的潜在端元光谱输入 n 维散点图中进行反复旋转以识别出纯端元。根据前面的分析,较好的端元通常会出现在 n 维散点图的顶点和拐角处,当一系列的端元点被确定后,就可以将其输入到图像中的感兴趣区(ROI),从图像中提取每个感兴趣区平均反射率光谱曲线作为成像光谱矿物填图的端元(图 8)。

4.3.4 混合谐波匹配滤波(MTMF)

混合谐波匹配滤波(MTMF)是将已得到公认的各种信号处理方法与线性混合理论相结合,在此基础上形成的一种复合方法^[17]。匹配滤波方法(Matched filtering)的优势是不需要所有端元已知的条件,混合谐波匹配滤波方法将这一优势与混合理论所要求的实际约束(即任一给定像元的信号特征

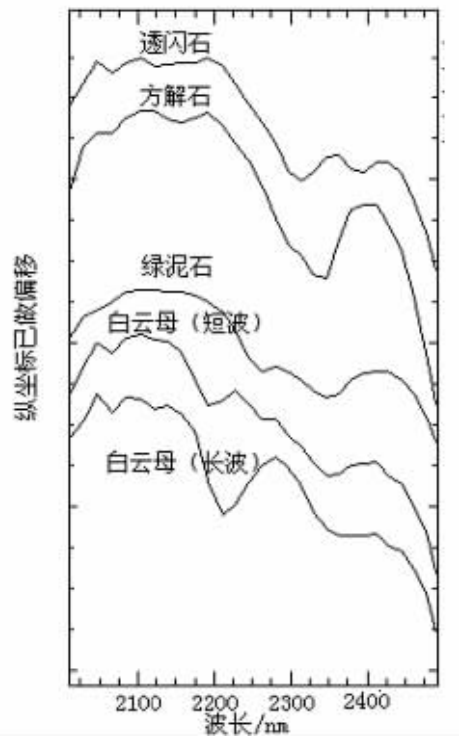


图 8 黄山铜镍矿区 HyMAP 数据光谱端元(均值)

Fig.8 Spectral mineral end-members of HyMap data in the Huangshan copper-nickel district

是包含在这个像元中各单个组分的线性组合)结合起来,对具有合理性的混合结果进行约束并减小“假警告率”。匹配滤波技术具有突出目标、压制背景的作用,而线性光谱分解具有单元相加和正值的特征,MTMF 模型融合线性光谱分解和匹配滤波的技术优势,因此,混合谐波匹配滤波方法能探测其他技术不能探测到的微细矿物成分。

利用最终确定的端元光谱进行混合谐波匹配滤波(MTMF)(它使用端元的 MNF 光谱而非反射率光谱)的结果将是一系列值为 0~1 的灰度图像,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 9 是利用该处理流程(图 10)得到的黄山岩体区域的矿物分布图。

5 结果与分析

用 1991 年新疆地质矿产局第六地质大队填绘的矿区 1:1 万比例尺的地形地质图对上述填图结果进行比较检验,分析结果相当吻合。在岩体区域,绿泥石主要分布在一号和二号岩体与地层的接触带附近的岩体上,为中基性岩(辉长岩、苏长岩)中的辉石、角闪石等暗色矿物蚀变而来;透闪石分布在一号和二号岩体中部更偏基性的辉石岩、橄辉岩以及橄榄岩中,由其中的橄榄石或辉石矿物蚀变产生;在研究区识别出的两种白云母:短波云母(Al—OH 波长位于 2192 nm 附近)

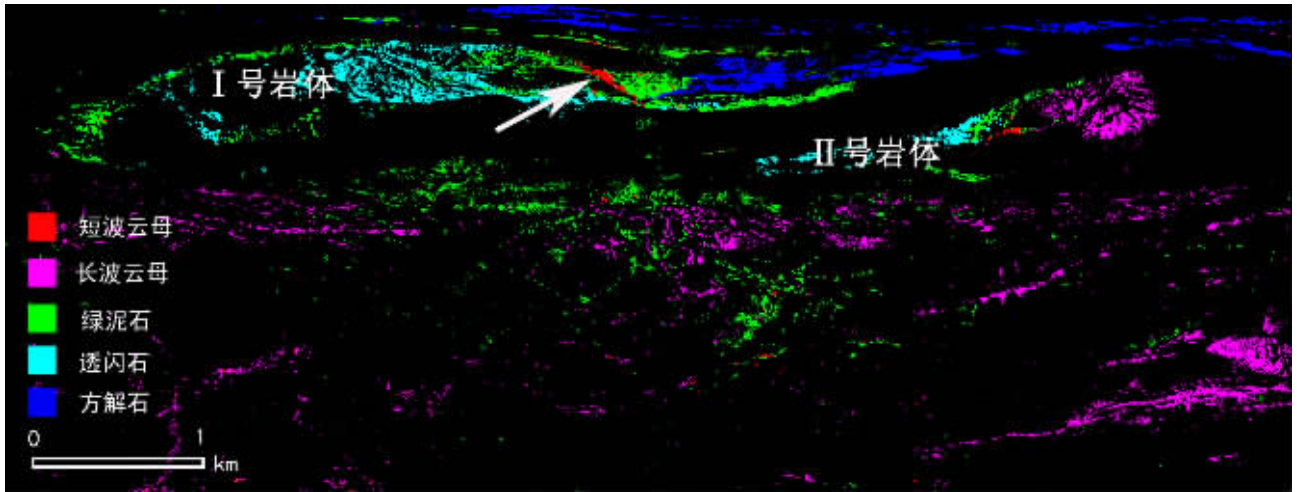


图9 黄山铜镍矿区的成像光谱矿物填图结果

Fig.9 Results of imaging spectroscopic mineral mapping in the Huangshan copper-nickel district

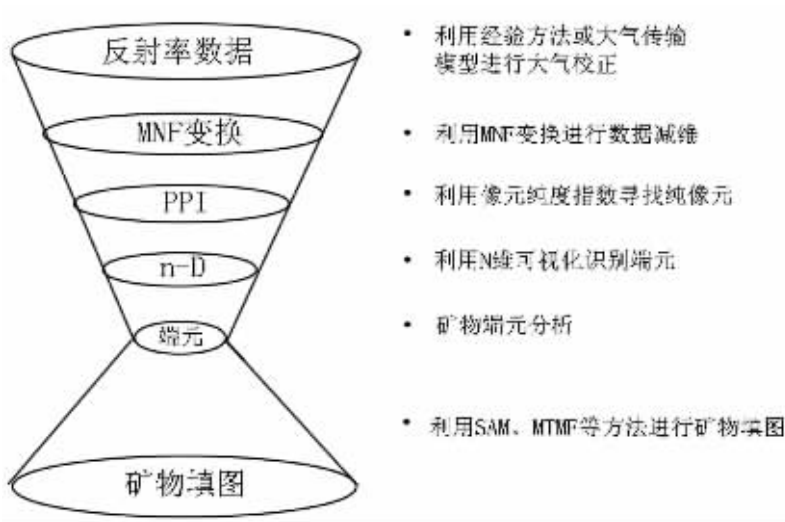


图10 成像光谱数据处理系统化流程图

Fig.10 Flow chart of imaging spectroscopic data processing

和长波云母(Al—OH 波长位于 2210nm 附近),这两种云母的空间分布具有很强的规律性,长波云母(紫色色斑)分布在岩体以南的干墩组(C_{2g})地层以及二号岩体东端穿插的黑云母花岗岩体中,为其中的长石矿物蚀变产生,短波云母则主要分布在黄山一号岩体的东部,沿岩体内部的北西向派生断裂呈条带状分布(图9中白色箭头所指的红色色斑);识别出

的碳酸盐矿物的位置与地质图的情况也相当吻合,主要出现在一号岩体东端以及二号岩体北边与之接触的中石炭统干墩组(C_{2g})的灰岩地层中。其空间分布特征与地层走向相当一致,呈东西向展布。

在与黄山岩体地质图(图2)进一步对比后发现,岩体侵入期次以及岩浆侵位后内部分异造成岩石主要矿物组合、岩

石结构、构造特征的变化,而这些变化与矿物蚀变带在空间上的分布密切相关。例如图透闪石蚀变的区域对应第一亚次侵入体(橄榄岩相)和第二亚次主岩体(辉石岩相),空间上位于岩体的中部,岩性上更偏向超基性;而绿泥石蚀变的对应区域则主要为第二亚次和第四亚次侵入的闪长岩相和辉长闪长岩相的岩体,空间上位于岩体边缘与地层接触带,岩性上偏向中—基性。因此,根据这种岩浆侵入期次和侵位后分异造成的蚀变矿物分带特征,利用成像光谱矿物识别技术有可能进行相关信息的提取。

不仅如此,成像光谱技术还可能提取成岩成矿温压条件等相关的矿物成因学信息。成因矿物学中的研究^[8]表明,Al的配位对于温压关系具有重要的标型意义,低压高温条件有利于Al在四次配位中代替Si,而高压低温条件下,有利于Al在六次配位中代替其他阳离子。即低压高温对Al^{IV}有利,高压低温对Al^{VI}有利。在地质上,岩浆岩的蚀变、退变质作用、岩石的风化以及岩浆的结晶分异过程都是Al^{VI}增加的过程^[9]。对于绢云母光谱吸收特征的变异来说,绢云母(和白云母)光谱的Al—OH吸收特征的波长位置向长波方向漂移说明云母中Al^{VI}含量的减少,反映了相对低压高温的形成环境;而向短波方向漂移说明Al^{VI}含量的增多,代表了相对高压低温的成因条件。因此黄山岩体内部蚀变生成的短波云母代表的相对高压低温条件可能与其所处的断裂环境有密切关系;而岩石中的长石矿物变质生成的长波云母则反映了相对低压高温条件,与区内地层的温压条件和较为复杂的区域变质作用环境相对应。

这里对上述信息的提取仅是初步的探讨,要进一步分析研究,还需要野外查证取样、综合分析多源地质资料以及扩大试验区范围。

6 结 论

笔者运用光谱端元的方法对黄山铜镍矿地区的HyMap航空成像光谱数据进行光谱分离分析,采用了目前已经较为成熟且系统化的MNF变换、PPI以及MTMF等方法实现了对该地区典型蚀变矿物的识别和填图,并得出如下结论:

(1)利用HyMap航空成像光谱数据对黄山铜镍矿区内分布的透闪石、绿泥石、方解石、白云母(包括短波云母和长波云母)矿物进行了精确填图,结果与相关资料吻合。

(2)利用成像光谱技术不仅可以识别与成矿作用密切相关的蚀变矿物,估计蚀变矿物相对丰度,而且根据岩浆侵入期次和侵位后分异造成的蚀变矿物分带特征,以及矿物光谱变异对其成分变化和成岩成矿温压条件的指示意义,有可能进行相关信息的提取。

(3)HyMap航空成像光谱数据具有较好的质量,尤其在对于矿物识别尤为关键的短波红外光谱范围,信噪比较高,而且空间分辨率较高,是进行成像光谱矿物识别和填图研究较为理想的数据源。

致谢:野外工作期间,新疆地质六队有关领导及郭新河工程师给予了大力支持和诸多帮助,在此深表感谢。

参考文献(References):

- [1] 王福同,冯京,胡建伟,等.新疆土屋大型斑岩铜矿床特征[J].中国地质,2001,28(1):36~39.
Wang Futong, Feng Jing, Hu Jianwei, et al. Characteristics and significance of the Tuwu porphyry copper deposit, Xinjiang [J]. *Geology in China (Chinese Geology)*, 2001, 28 (1): 36~39 (in Chinese).
- [2] 芮宗瑶,王福同,李恒海,等.新疆东天山斑岩铜矿带的新进展[J].中国地质,2001,28(2):11~16.
Rui Zongyao, Wang Futong, Li Henghai, et al. Advance of the porphyry copper belt of the East Tianshan mountain Xinjiang [J]. *Geology in China (Chinese Geology)*, 2001, 28 (2): 11~16 (in Chinese).
- [3] 王福同,庄道泽,胡建伟,等.物探在新疆土屋地区铜矿找矿中的应用——兼谈斑岩铜矿藏分“三位一体”的找矿模式[J].中国地质,2002,28(3):40~46.
Wang Futong, Zhuang Daoze, Hu Jianwei, et al. Application of geophysical exploration method in the Tuwu area, Xinjiang—On the prospecting model of porphyry copper deposit [J]. *Geology in China (Chinese Geology)*, 2001, 28 (3): 40~46 (in Chinese).
- [4] 龙宝林,薛迎喜,冯京,等.新疆东天山斑岩铜矿的找矿模式试探[J].中国地质,2001,28(5):35~38.
Long Baolin, Xue Yingxi, Feng Jing, et al. Prospecting model of porphyry copper deposits of East Tianshan, Xinjiang [J]. *Geology in China (Chinese Geology)*, 2001, 28 (3): 35~38 (in Chinese).
- [5] 王玉往,王京彬,王莉娟,等.新疆哈密黄山地区铜镍硫化物矿床的稀土元素特征及意义[J].岩石学报,2004,20(4):935~948.
Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, et al. REE characteristics of Cu—Ni sulfide deposits in the Hami area, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20 (4): 935~948 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王崇义,石长运,王晓亭.黄山基—超基性岩体成岩机制及其含矿性初步探讨[J].新疆地质,1986,4(1):1~11.
Wang Chongyi, Shi Changyun, Wang Xiaoting. Primary study of Petrogenetic process of Huangshan basic—ultrabasic rock body and its ore-bearing characters [J]. *Xinjiang Geology*, 1986, 4(1): 1~11 (in Chinese).
- [7] Clark R N, King T V V, Klejwa M, et al. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95: 12653~12680.
- [8] Post J L, Noble P N. The near-infrared combination and frequencies of dioctahedral smectites, micas, and illites [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1993, 41(6): 639~644.
- [9] Herrmann W, Blake M, Doyle M, et al. Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway—Reward, Queensland [J]. *Economic Geology*

- gy, 2001, 96:939~955.
- [10] McLeod R L, Gabell A R, Green A A, et al. Chlorite infrared spectral data as proximity indicators of volcanogenic massive sulphide mineralization[A]. In: Pacific Rim Congress '87, Gold Coast, Queensland, August 26-29, Proceedings[C]. 1987, 321~324.
- [11] King T V V, Clark R N. Spectral characteristics of chlorites and Mg-Serpentines using high-resolution reflectance spectroscopy [J]. J. Geophys. Res., 1989, 13997~14008.
- [12] Thompson A J B, Hauff P L, Robitaille A J. Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy[J]. Society of Economic Geologists Newsletter, 1999, 39 (1):16~27.
- [13] Zhao G, Maclean A L. A comparison of canonical discriminant analysis and principal component analysis for spectral transformation [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66 (7):841~847.
- [14] Kruse F A. The effects of spatial resolution, spectral resolution, and SNR on geologic mapping using hyperspectral data, northern Grapevine Mountains, Nevada [A]. In: Proceedings of the 9th JPL Airborne Earth Science Workshop [C]. Jet Propulsion Laboratory Publication, 2000, 1~9.
- [15] Boardman J W, Kruse F A. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, North Grapevine Mountains, Nevada[A]. In: Proceedings of the Tenth Thematic Conference on Geological Remote Sensing[C]. Environmental Research Institute of Michigan, San Antonio, TX, 1994, 407~418.
- [16] Boardman J W, Kruse K A, Green R O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data[A]. In: Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop[C]. Pasadena, C A. 1995, 1.
- [17] Boardman Joseph. Leveraging the high dimensionality of AVIRIS data for improved sub-pixel target unmixing and rejection of false positives; mixture tuned matched filtering[A]. In: Summaries of the Seventh Annual JPL Airborne Geoscience Workshop[C]. Pasadena, CA. 1998, 6.
- [18] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Huian. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1988(in Chinese).

Application of the imaging spectroscopic technique in mineral identification and mapping

LIU Sheng-wei¹, GAN Fu-ping¹, YAN Bo-kun², YANG Su-ming¹,
WANG Run-sheng¹, WANG Qing-hua¹, TANG Pan-ke²

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

Abstract: The imaging spectroscopic identifying and mapping technique is one of the advanced new techniques that are now mainly developed in land and resource survey and monitoring. The main purpose of this study is to apply this technique in land and resource survey. For this purpose, the authors have studied some key technical problems arising in the utilization of the imaging spectroscopic technique for mineral identifying and mapping. The spectral features and variations of two important alteration minerals—muscovite and chlorite—are analyzed. Taking for example HyMap data from the Huangshan area, East Tianshan Mountains, Xinjiang, this paper introduces the application of some systematized imaging spectroscopic data processing techniques such as MNF transformation, pixel purity index (PPI) and n-dimensional visualized identification (NDVI) of endmembers in the identification and mapping of typical alteration minerals.

Key words: imaging spectroscopy; mineral mapping; mineral spectra; HyMap; Huangshan

About the first author: LIU Sheng-wei, male, born in 1972, Ph.D, specializes in remote sensing; E-mail: lsw9012@163.com.