

高分五号高光谱影像矿物精细识别

董新丰^{1,2}, 甘甫平^{1,2}, 李娜^{1,2}, 闫柏琨^{1,2}, 张磊³, 赵佳琪³,
于峻川^{1,2}, 刘镨源^{1,2}, 马燕妮^{1,2}

1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083;

2. 自然资源部 航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 矿物识别是高光谱遥感技术优势之一, 已在地质矿产领域取得了显著应用效果。随着光谱分辨率的不断提高, 高光谱遥感矿物识别逐渐从识别矿物种类向矿物亚类、矿物成分等精细信息识别发展, 且随着应用实践的不断深入, 对矿物精细信息的需求也越来越大。而光谱分辨率和矿物识别方法是制约高光谱矿物精细识别的主要因素。高分五号(GF-5)超高的光谱分辨率为矿物精细识别提供了可能。首先在分析总结已有高光谱矿物识别方法优缺点的基础上, 提出了综合光谱特征增强匹配度和特征参量的矿物识别方法; 其次, 选取甘肃柳园和美国Cuprite两个研究较多的地区为研究对象, 基于GF-5卫星数据开展了矿物精细识别, 在完成矿物种类、亚类识别的基础上, 进一步对绢云母成分信息进行了反演; 最后, 结合上述地区已有机载高光谱数据及填图结果开展对比分析。结果表明: GF-5矿物识别信息分布与机载HyMap、AVIRIS一致性很好, 相较机载数据GF-5矿物识别平均正确率优于90%, 说明本研究提出的矿物识别方法能够满足GF-5矿物精细识别, 可为后续业务化应用提供技术支撑, 同时认为超高的光谱分辨率使得GF-5在矿物成分信息识别上更具优势。

关键词: 高分五号, 高光谱, 短波红外, 矿物填图, 遥感地质

引用格式: 董新丰, 甘甫平, 李娜, 闫柏琨, 张磊, 赵佳琪, 于峻川, 刘镨源, 马燕妮. 2020. 高分五号高光谱影像矿物精细识别. 遥感学报, 24(4): 454-464

Dong X F, Gan F P, Li N, Yan B K, Zhang L, Zhao J Q, Yu J C, Liu R Y and Ma Y N. 2020. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(4): 454-464[DOI:10.11834/jrs.20209194]

1 引言

高光谱遥感技术具备从空间大尺度上精细探测和分析地表岩石矿物成分的能力。其不仅能提供地面宏观影像, 也可在像元级别的细节上确定地质体中矿物种类和丰度, 甚至某些矿物的化学成分等信息(王润生等, 2010)。近年来, 高光谱遥感技术在矿物识别、地质填图、蚀变异常分带和找矿预测等领域都发挥了重要作用(Bierwirth等, 2002; Kruse等, 2006; Rockwell等, 2006; 闫柏琨等, 2016; 刘德长等, 2018; 董新丰等, 2018)。但受高光谱数据源的限制, 严重制约了其在地质领域的推广应用。当前, 针对地质应用的

数据获取仍以HyMap(van der Meer等, 2012)、AVIRIS(Goetz, 2009)、CASI/SASI(叶发旺等, 2011)等机载传感器为主, 其获取成本大、周期较长。在地质领域应用效果较好的航天高光谱数据有Hyperion、TG-1数据(甘甫平等, 2002; 林健等, 2014), 但其幅宽较窄, 数据获取能力有限, 多用于科学研究、应用试验、或在重点地段有限地使用, 且目前已无新数据获取。

2018年5月国产GF-5卫星成功发射, 其具有光谱分辨率高、幅宽大的优势, 在地质领域应用潜力很大。但矿物识别的精细程度决定了其在地质领域的应用广度和深度。矿物精细识别也是高光谱遥感的一种技术优势表现, 主要是体现在可

收稿日期: 2019-06-10; 预印本: 2019-10-11

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2017YFC0602104, 2016YFB0500505-2); 民用航天项目(编号: D040104); 高分国土资源遥感应用示范系统(二期)(编号: 04-Y30601-9001-18120); 中国地震局基本科研业务专项(编号: EDJ2018-18)

第一作者简介: 董新丰, 1986年生, 男, 工程师, 研究方向为高光谱遥感地质应用。E-mail: dongxinfeng229@163.com

通信作者简介: 甘甫平, 1971年生, 男, 研究员, 研究方向为遥感地质应用。E-mail: fpgan@aliyun.com

实现矿物种类、亚类，乃至光谱特征相似度较高的矿物区分，以及矿物成分信息反演等方面。

目前国内外发展的高光谱矿物识别物理方法主要有两大类，分别是以重建光谱与标准光谱相似性度量为基础的光谱匹配方法和以光谱吸收谱带参量为基础的模式识别方法。常用的光谱匹配方法有距离法（Fenstermaker 和 Miller, 1994）、光谱角（Yuhua 等, 1992）、匹配滤波、光谱信息散度（Chang, 2000; van der Meer, 2006）、混合调制匹配滤波（Boardman, 1998）等方法。光谱匹配对矿物光谱的微小差异不够敏感，容易受地形、背景等外界干扰，无法突出光谱吸收谷谱形在相似性计算中重要性，且受图像的信噪比、光谱定标和光谱重建精度等因素的影响较大（王润生等, 2007）。基于光谱特征参量代表性的方法有光谱特征拟合 SFF（Spectral Feature Fitting）、光谱吸收指数 SAI（Spectral Absorption Index）和吸收谱带定位分析 AABP（Analysis of Absorption Band Positioning）等。基于光谱特征参量法相对光谱匹配法，增强了对地物的区分能力，但在实际应用中，易受光谱信噪比、矿物混合影响，且对矿物特征吸收谱形考虑不充分（王润生等, 2007）。甘甫平等（2018）在总结分析常见光谱匹配法的矿物识别能力基础上，提出了一种光谱特征增强的匹配度算法，该算法较其他方法识别矿物信息的检出限更低、正确率更高。但其主要还是对矿物大类或光谱特征具有唯一性时，应用效果较好。对光谱相似矿物，还需要进一步借助相关特征参量来区分。因此，本文依据矿物分层谱系识别思想（甘甫平等, 2003），采用综合光谱特征增强匹配度和特征参量开展了 GF-5 矿物精细识别应用研究。

本文利用 GF-5 数据，结合已有的机载 HyMap、AVIRIS 高光谱数据，分别选取国内外研究较多的两个研究区开展矿物精细识别和对比分析工作，国内选取甘肃柳园地区，国外选取美国内华达州 Cuprite 地区。旨在评价 GF-5 高光谱数据矿物精细识别的应用效果，并为今后开展大区域业务化应用提供技术支撑。

2 研究区概况

选取国内外研究较多的两个研究区开展工作：（1）为了评价 GF-5 卫星高光谱数据在境内外矿物识别应用能力；（2）两研究区内蚀变矿物种类信

息互补，可拓展其识别矿物广度，更好评价其矿物精细识别程度；（3）两区域内均有机载高光谱数据，且相关结果均经过地面验证。

甘肃柳园地区位于北山成矿带中，区内基岩裸露好，地层主要为震旦系和古生代地层，主要发育变质碎屑岩和碳酸盐建造、中基性火山碎屑岩建造。区内岩浆—热液活动强烈，侵入岩发育，以中酸性为主，呈岩基、岩株和岩脉状产出。区内成矿作用发育，以 Au、Cu、Fe、Ni、Pb、Zn、W 等矿化为主，与成矿关系密切的蚀变矿物主要有褐铁矿、绢云母、透闪石、方解石、白云石、绿泥石、绿帘石等。该区域有机载 HyMap 高光谱数据。

Cuprite 地区位于美国内华达州东南部，区内岩石露头出露良好，矿物组合多样，从 20 世纪 70 年代起，就成为美国遥感地质研究的重要试验基地，许多遥感地质研究和矿物波谱研究项目都以该区为试验区，如蚀变矿物波谱研究、多光谱岩性识别和蚀变矿物识别研究、蚀变和非蚀变矿物区分技术研究等（Hook 和 Rastm, 1990）。该区主要出露岩层有古生代沉积岩和变沉积岩、新生代火山岩和冲积层。其中新生代的火山岩热液蚀变广泛发育，在 95 号公路两边形成两个南北向拉长的蚀变区（Swayze 等, 1998），主要发育蚀变矿物有明矾石、地开石、高岭石、绢云母等（Ashley 和 Abram, 1980）。该区域有机载 AVIRIS 高光谱数据。

3 研究方法

3.1 数据及预处理

3.1.1 高光谱数据

研究数据源为 GF-5 高光谱数据，同时选取机载高光谱数据进行对比分析。甘肃柳园地区选取了机载 HyMap 数据，Cuprite 地区选取 AVIRIS 数据，数据参量见表 1。

GF-5 可见短波红外高光谱数据波段数 330 个，光谱范围覆盖 400—2500 nm，其中可见近红外（VNIR）光谱范围 390—1029 nm，光谱分辨率为 5 nm；短波红外（SWIR）光谱范围为 1005—2513 nm，光谱分辨率为 10 nm（孙允珠等, 2018），空间分辨率 30 m，幅宽 60 km。本研究柳园地区和 Cuprite 地区 GF-5 卫星高光谱数据分别为 2018-09-27 和 2018-11-01 获取。

表 1 GF-5、HyMap 与 AVIRIS 数据特征
Table 1 Specifications of the GF-5, HyMap and AVIRIS data

参数	GF-5	HyMap	AVIRIS
谱段范围/nm	VNIR: 390—1029 SWIR: 1005—2513	450—2491	400—2500
光谱采样间隔/nm	VNIR: 3.67—4.80 SWIR: 7.60—8.89	11.8—19.2	10.0
有效波段数/个	VNIR: 180 SWIR: 150	139	224
空间分辨率/m	30	4	20

机载 HyMap 高光谱数据获取时间为 2016 年 8 月，光谱范围 450—2500 nm，139 个波段，光谱分辨率为 15 nm，空间分辨率为 4 m。

机载 AVIRIS 数据为 ENVI 上自带的 1995 年在 Cuprite 地区获得地表反射率数据。AVIRIS 包含 224 个波段，光谱范围 400—2500 nm，光谱分辨率近似为 10 nm，空间分辨率为 20 m。

为了与 GF-5 高光谱数据对比分析，本次研究中将机载高光谱数据空间分辨率重采样至 30 m，便于影像同名点对比。由于 GF-5 数据的光谱分辨率最高，且光谱重采样会人为造成光谱吸收特征位置变化，因此为不改变地物本身光谱特征，本研究中未将 3 者光谱分辨率重采样一致，其光谱分辨率的差异不影响结果对比分析。

3.1.2 GF-5 数据预处理

高光谱遥感影像的像元光谱是地物光谱反射辐射信息与地形效应、大气辐射传输效应和传感器扫描系统等多种因素相互影响、相互作用的综合反映，其成像过程是地表反射太阳光至传感器（辐射源—大气—地表—大气—传感器）；成像光谱数据对地物的识别主要依赖于地物的光谱特征，为了从图像中反演地物真实的反射光谱，相关数据的定标与大气校正必须进行。

主要的数据预处理流程为：波段合成—辐射校正—大气校正。首先将 VNIR 和 SWIR 数据波段进行合成，剔除近红外 6 个重合波段，生成 324 个波段文件，光谱覆盖范围为 390—2513 nm。其次，根据每个波段对应的辐射定标系数进行辐射校正。经检查高光谱辐射校正后数据部分波段存在条纹现象（图 1（a）），采用“全局去条纹”的方法对数据进行条纹修复（谭炳香等，2005），从图 1 中可见条纹去除的效果较好（图 1（b））。

使用 FLAASH 软件实现大气校正。FLAASH 是一个从高光谱亮度影像提取波谱反射率的大气校正模拟工具，可精确补偿大气影响，它嵌入了

MODTRAN4 辐射传输计算方法，可以为影像选择标准 MODTRAN 模型大气和气溶胶类型进行大气校正。根据研究区影像获取时间、地理信息等信息，最后经 FLAASH 大气校正软件生成了高光谱反射率数据（Cui 等，2014）。FLAASH 大气校正主要参数见表 2。

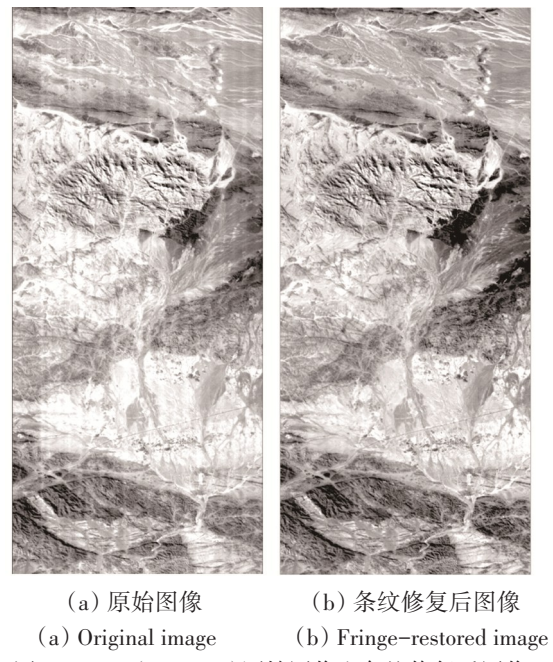


图 1 SWIR (2344 nm) 原始图像和条纹修复后图像

Fig.1 SWIR (2344 nm) original image and fringe-restored image

为检验大气校正效果，选取研究区已知典型地物进行光谱对比。在柳园选择已知碳酸盐岩地质体进行光谱对比。如图 2 所示，经 GF-5 反射率光谱与同名点 HyMap 对比发现，两者谱形特征基本一致，在碳酸盐岩特征谱带范围内谱形吻合度高，且特征吸收位置一致（2330 nm 附近吸收峰）。Cuprite 地区选择高岭石地物进行对比，由图 3 可见，两者谱形特征一致性好，在高岭石特征谱带范围内谱形吻合度高，且主次吸收特征位置一致（2210 nm、2160 nm）。综上，认为 GF-5 大气校正后数据可用于下一步的矿物识别和填图工作。

表2 FLAASH大气校正主要参数表
Table 2 Main parameters of FLAASH atmospheric correction

选项	参数	参数
成像日期(flight data)	2018-09-27	2018-10-31
成像时间(flight time)	6:40:30(格林威治时间)	3:54:20(格林威治时间)
图像中心经纬度(scene center location)	41.17°N, 95.67°E	37.73°N ,117.26°W
传感器飞行高度(sensor altitude/ km)	705	705
图像区域平均海拔(ground elevation /km)	2.0	1.8
图像像素大小(pixel size /m)	30.0	30.0
大气模式(atmospheric model)	Mid-Arctic Summer	Mid-Latitude Summer
气溶胶模式(aerosol model)	Rural	Rural
气溶胶反演(aerosol retrieval)	2-Band(K-T)	2-Band(K-T)
水汽吸收光谱特征(water absorption feature)	1135 nm	1135 nm
初始能见度(initial visibility /km)	40.00	40.00
Modtran 模型的光谱分辨率(modtran resolution)	5 cm ⁻¹	5 cm ⁻¹
Modtran 多散射模型(modtran multiscatter model)	Scaled DISORT	Scaled DISORT
DISORT Streams 数(number of DISORT streams)	16	16
输出反射率缩放系数(output reflectance scale factor)	10000	10000

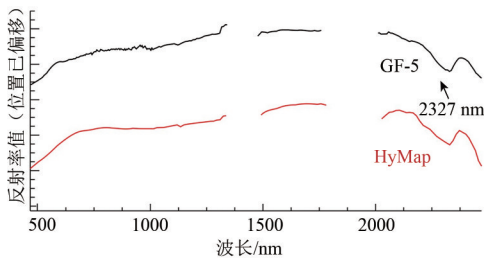


图2 碳酸盐岩 GF-5 反射率曲线与同名点 HyMap 对比图
Fig.2 Comparison of GF-5 reflectivity of carbonate rocks with HyMap

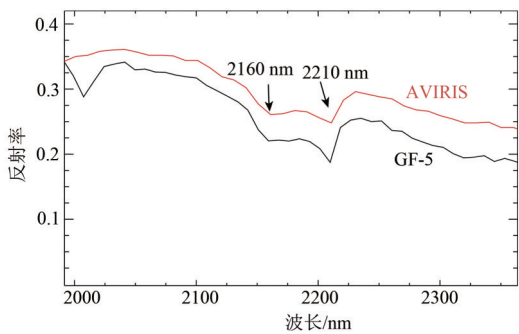


图3 高岭石 GF-5 反射率曲线与同名点 AVIRIS 对比图
Fig.3 Comparison of GF-5 reflectivity of kaolinite with AVIRIS

3.2 矿物精细识别方法

光谱特征增强匹配算法主要是将参考光谱与影像光谱均应首先去连续统，然后再对影像光谱进行增强之后计算匹配度。基于光谱特征增强的

匹配度算法较常用匹配滤波等算法具有矿物信息检出限更低、正确率更高等优势，可消除由矿物含量差异引起的影像光谱与参考光谱匹配度结果变化影响，同时可突出矿物信息，抑制背景噪音(甘甫平等，2018)。该方法虽然提高了矿物识别的正确性，但主要针对矿物大类或光谱特征具有唯一性时，应用效果较好。自然界中很多矿物具有相似的光谱特征，而不同类质同象矿物其光谱特征相似度更高(图4)，这为矿物精细识别带来了较大困难。如地开石和高岭石矿物，其主要特征吸收谱带均在2200 nm附近，主吸收特征位置均在2209 nm，两者的光谱特征差异主要表现在次级吸收的位置(图4)。

甘甫平等(2003)分析了矿物光谱的变化规律，评价了光谱参量的敏感性与稳定性，提出了建立矿物识别谱系的思想，参照或借鉴矿物学的分类方法，在可见—短波红外光谱区间，分别以主要吸收谱带、谱带组合特征、谱带精细特征和谱带变异特征为基础，对矿物进行“类—族—种—亚种”逐层识别，构成判别决策过程的树状结构。

依据该矿物分层谱系识别思想，采用综合光谱特征增强匹配度和特征参量信息提取方法，将有助于在矿物大类识别的基础上，进一步实现矿物的精细识别。本研究首先利用光谱特征增强的

匹配算法实现矿物大类、族识别, 然后结合不同矿物种类或亚类的局部光谱特征差异, 计算相关特征参量, 用于实现相似矿物或类质同象矿物的精细区分, 信息识别技术流程见图5。例如, 对于明矾石类矿物识别, 先利用其在2210—2350 nm波段特征, 进行大类提取, 然后根据不同明矾石在2210 nm附近的次级光谱特征差异, 计算相应特征参量, 比如吸收位置, 斜率、对称度等参量, 进而将不同明矾石进行精细区分。

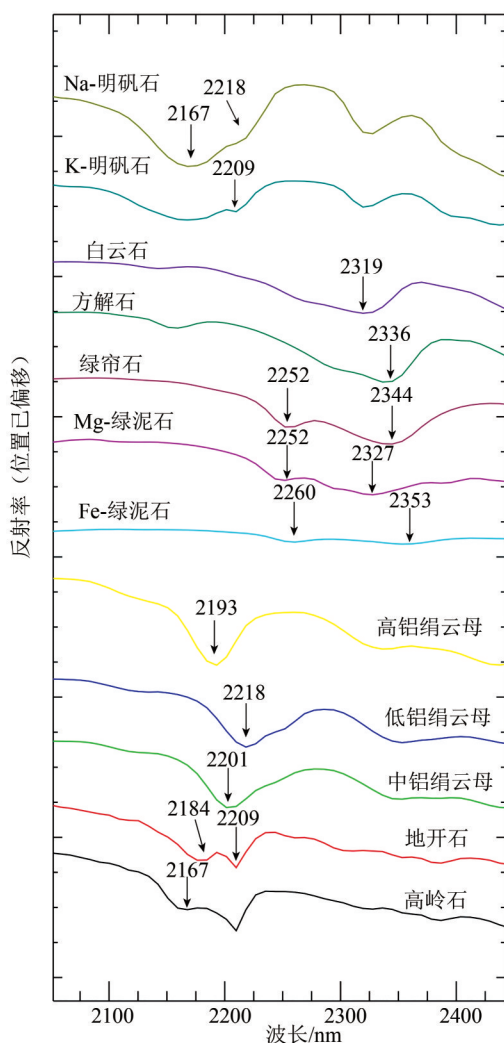


图4 典型矿物光谱曲线图

Fig.4 Spectral curves of typical minerals

4 结果分析

4.1 GF-5矿物填图结果

通过上述填图方法, 在甘肃柳园地区识别出了白云石、方解石、高铝绢云母、中铝绢云母和

低铝绢云母、镁绿泥石、绿帘石/镁铁绿泥石、铁绿泥石、高岭石、闪石、褐铁矿等11种矿物信息(图6)。根据绢云母Al含量的不同, 在2210 nm附近的特征吸收位置会随着Al含量的增加, 向短波方向漂移, 反之, 则向长波漂移(梁树能等, 2012)。因GF-5光谱分辨率更高, 本文在实现传统的高、中、低铝绢云母区分的同时, 进一步对绢云母成分信息进行了精细反演(图7)。本研究中高铝绢云母向低铝绢云母的成分变化, 在光谱上表现为其特征吸收位置由2193 nm→2201 nm→2209 nm→2218 nm→2226 nm逐渐变化。从图7中可见绢云母成分信息被识别出5种, 突破了传统高光谱的三端元分法, 进而实现了矿物成分信息的精细刻画, 为进一步地质应用研究分析提供了重要参考。

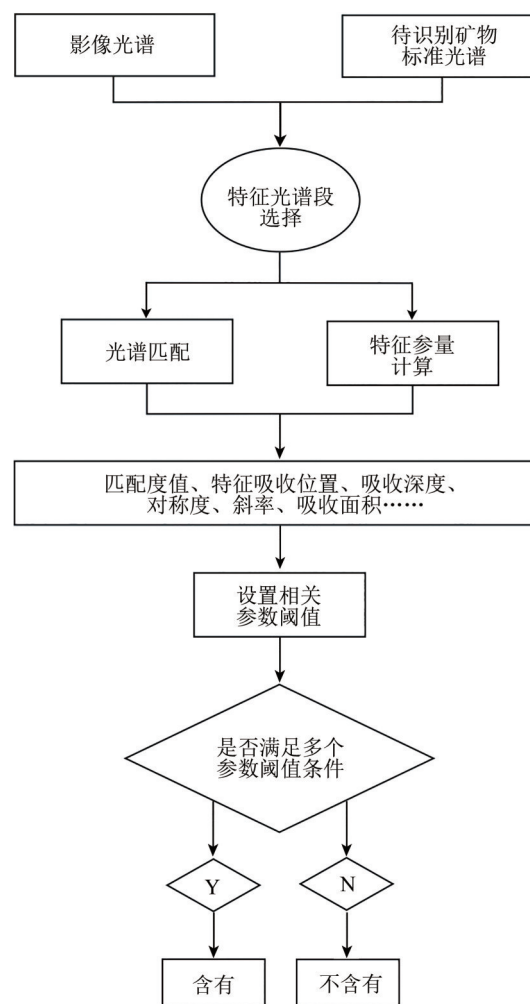


图5 本研究矿物精细识别流程

Fig.5 Flow chart of Mineral Extraction

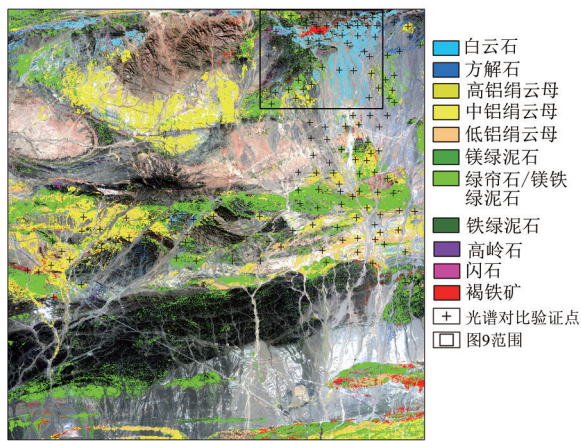


图6 柳园地区GF-5卫星高光谱矿物分布图
Fig.6 Hyperspectral mineral distribution map of GF-5 of Liuyuan area

从图6可见，该地区绢云母信息分布最广，其中又以中铝绢云母最多，且中铝绢云母多分布在低铝绢云母周边，显示出两者具有一定的成因关系，高铝绢云母在区内分布较少。绿帘石/绿帘石信息主要分布在区内绿帘石/绿帘石化基性火山岩中，以绿帘石/镁铁绿帘石为主，铁、镁绿帘石分布较少。方解石和白云石主要分布在北部，与区内碳酸盐岩地层分布范围一致。在区内识别出少量的闪石信息，其主要分布在区内基性火山岩中和碳酸盐岩地层周边，前者闪石信息代表着地层中角闪石信息，而后者多与碳酸盐岩矽卡岩化关系密切，且区内闪石多与白云石空间分布关系密切，这对在区内开展寻找矽卡岩型矿床提供了重要信息。呈面状和带状分布的褐铁矿信息多发育在区内中酸性岩体/脉中，而零星分布的褐铁矿信息则与区内已知矿床/点空间分布一致，由此可见褐铁矿在区内具有重要的找矿指示作用。高岭石在区内分布较少，呈一条小脉状分布，为花岗岩脉高岭石化形成。

在 Cuprite 地区，主要是对其广泛发育，且柳园地区不发育的明矾石、高岭石、地开石矿物进行了有针对性的识别。而且这3种矿物在找矿预测中是比较重要的蚀变矿物。明矾石根据K-Na元素置换，其又有K-明矾石、Na-明矾石端元之分。在Cuprite地区对K-明矾石、Na-明矾石、高岭石、地开石4种矿物进行了识别。从图8填图结果中可见，区内主要发育K-明矾石和高岭石，Na-明矾石和地开石相对较少，这与区内地质背景一致。明矾石、高岭石、地开石蚀变矿物的组合存在表

明其形成于酸性环境中，同时这些矿物组合也显示出高级泥化蚀变特征，特别是明矾石矿物是低—高硫型矿床中高级泥化蚀变的重要组成部分 (Hedenquist 等，2000)，它们的分布和组成反映了成矿热液条件的位置和强度 (Deyell 和 Dipple, 2005)。通常Na-明矾石相较K-明矾石更多发育在高温环境 (Chang 等，2011)，从该地区明矾石识别结果上看，大量发育的K-明矾石，可能指示出其形成时的热液温度相对较低。

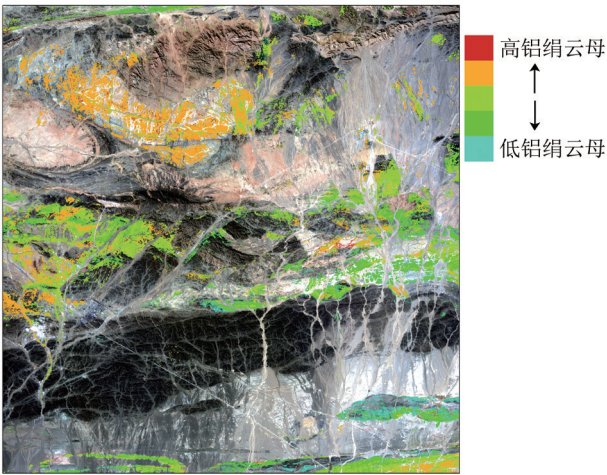


图7 柳园地区GF-5卫星高光谱绢云母成分图
Fig.7 Composition map of Sericite of GF-5 of Liuyuan area

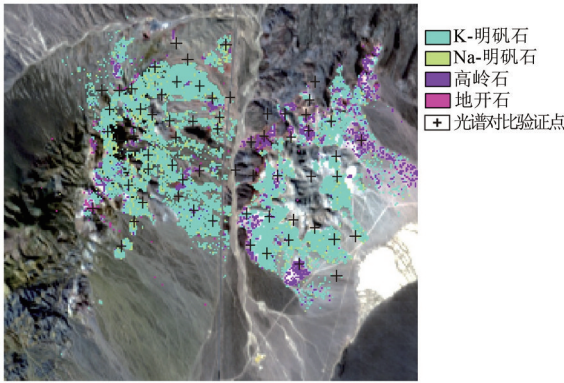


图8 Cuprite地区GF-5卫星高光谱矿物分布图
Fig.8 Hyperspectral mineral distribution map of GF-5 of Cuprite area

4.2 对比分析

为验证GF-5数据矿物识别效果，首先将其填图结果与机载高光谱数据填图结果进行了对比分析。在柳园地区，将相同范围的GF-5和HyMap矿物识别结果进行了对比分析，从图9可见，两者识别出的矿物种类一致，且每种矿物信息对应的分布趋势一致性很好。图9中HyMap填图结果较GF-5

的稀疏,是由原始空间分辨率差异造成的。将HyMap空间分辨率由原始的4 m重采样至30 m,其过程是将原始数据按一定的间距抽稀,然后再将每个像元空间分辨率重采样至30 m,像元的光谱特征未改变,像元间未发生光谱混合,重采样后的像元光谱(30 m)为抽稀后保留的像元光谱(4 m)。而GF-5原始空间分辨率就是30 m,地物混合现象较HyMap更加明显,因此其填图结果较HyMap更加稠密。

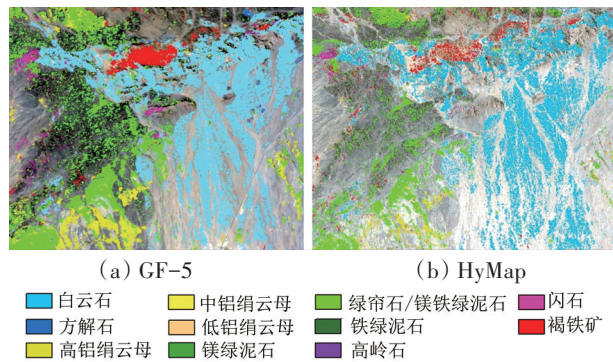
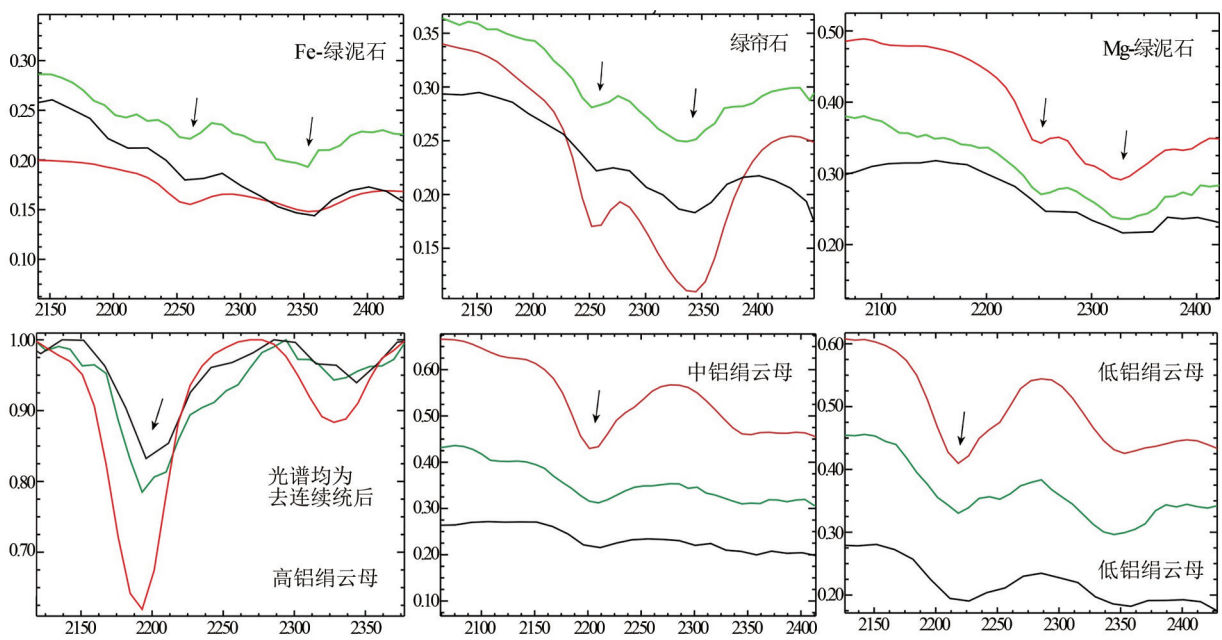


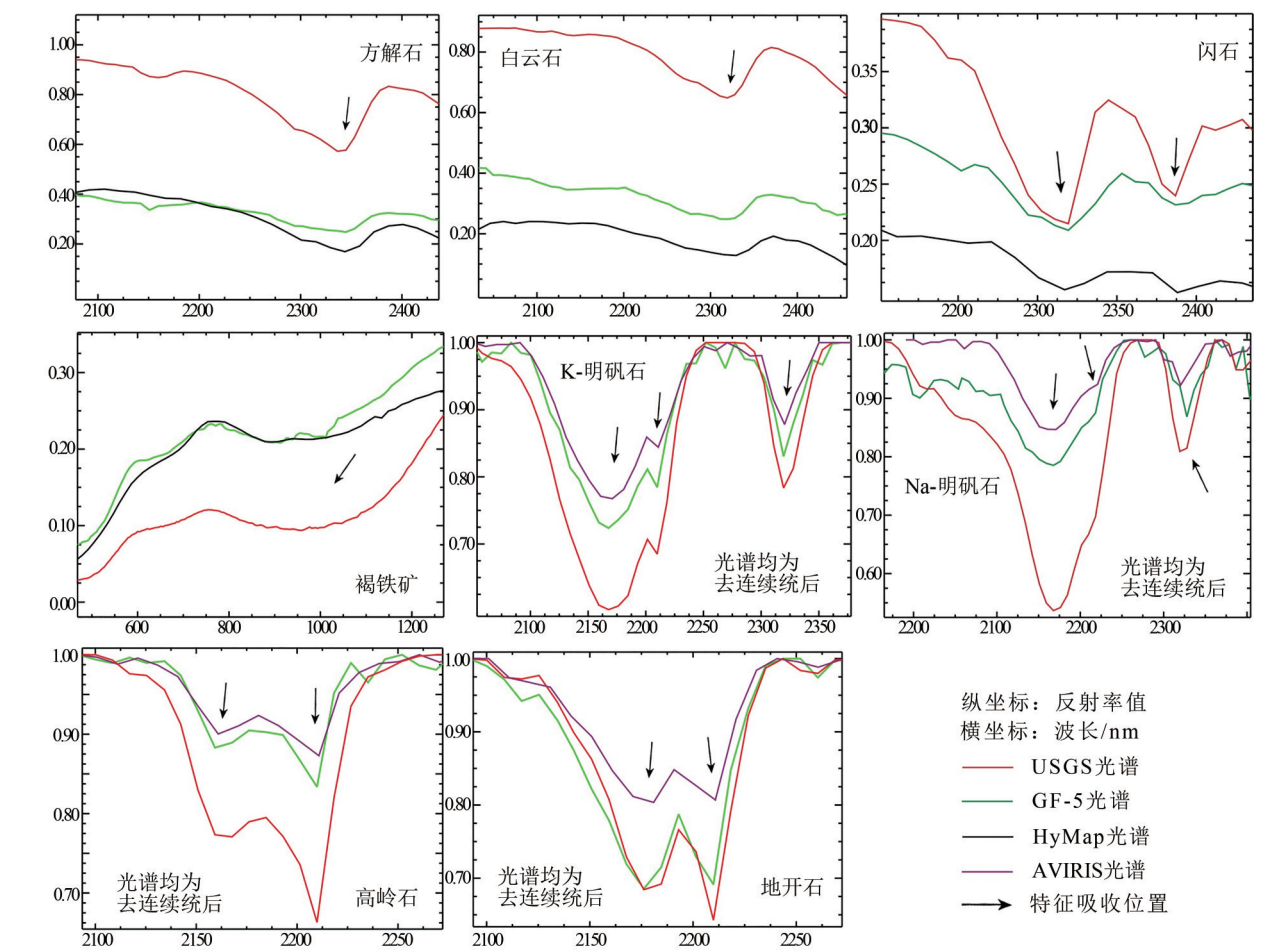
图9 GF-5与HyMap矿物填图结果对比
Fig.9 Comparison of mineral mapping results between GF-5 and HyMap

为进一步验证分析GF-5矿物识别结果,将GF-5影像光谱与同名点的HyMap、AVIRIS影像光谱,以及USGS标准光谱进行对比分析(图10),为避免由于原始空间分辨率的不同造成的矿物信息不对应,光谱验证点多选择具有一定分布面积,且为均一地物上(图6和图8)。从图10中可看出,

GF-5和HyMap、AVIRIS不同矿物对应的同名点影像光谱曲线一致性较好,对应矿物吸收特征位置基本一致。与USGS标准矿物光谱对比,三者整体谱形特征相似度高,特征吸收位置一致性好。由此可见,GF-5矿物精细识别结果准确性较好。

为定量分析评价GF-5数据矿物填图效果,在柳园和Cuprite地区共选择了208个光谱对比验证点,验证点也涵盖无矿物分布区(图6和图8)。因部分验证点同时存在两种矿物,所以最终矿物验证点数为217个(表3)。将这些验证点的光谱与同名点的HyMap和AVIRIS光谱进行对比。由于研究区内不同的矿物分布范围不同,验证点数量也不同,因此为客观评价GF-5填图结果,统计了所有矿物的整体正确率,经计算GF-5相较HyMap和AVIRIS机载数据矿物识别平均正确率为90.32%。从表3中可见GF-5矿物识别整体正确率高,误识别多发生在矿物亚类的区分上,这可能与3者原始空间分辨率不同造成,空间分辨率越低,光谱混合也明显,地物精细区分程度也相对较差。另外,从表3中可看出,因卫星传感器较机载获得的反射能量低,使得GF-5相较机载数据对含量相对较低的矿物信息有一定漏识别。本次研究中光谱验证点相对较少,且矿物种类有限,同时三者原始空间分辨率的不同等因素,因此该定量评价结果仅作参考。





	HyMap										AVIRIS				
	LI	DO	CA	HM	MM	LM	MC	EP	FC	SS	KA	NA	GL	DI	NONE
LI	10														
DO		16	1												
CA		1	7												
HM				6	1										
MM				1	20	2									2
LM						16									1
MC							7	2							
EP							2	26	1						
FC									5						
SS										4					
KA											25	1			1
NA											1	7			
GL													12		
DI														4	1
NONE	1											1	1		31

平均正确率=196/217=90.32%

注：褐铁矿—LI；白云石—DO；方解石—CA；高铝绢云母—HM；中铝绢云母—MM；低铝绢云母—LM；镁绿泥石—MC；绿帘石/镁铁绿泥石—EP；铁绿泥石—FC；闪石—AM；K-明矾石—KA；Na-明矾石—NA；高岭石—KL；地开石—DI；无矿物特征光谱目标—NONE。

5 结 论

GF-5 高光谱数据是目前在 350—2500 nm 谱段范围内光谱分辨率最高的, 其在矿物识别上具有独特的技术优势。本文在总结分析常用光谱匹配和光谱特征参量高光谱矿物识别方法优缺点的基础上, 结合各矿物光谱特征, 提出了一种综合光谱特征增强匹配度和特征参量的高光谱矿物识别方法, 旨在提高高光谱数据矿物精细识别能力。选取中国甘肃柳园和美国内华达州 Cuprite 两个典型区域, 利用 GF-5 数据进行了矿物精细识别应用研究。结合已有机载 HyMap 和 AVIRIS 填图结果对比表明, 本文采用的矿物识别方法能够实现 GF-5 数据矿物精细识别, 不仅矿物识别正确性高, 而且对矿物成分信息反演更加精细。为今后在境内外重要成矿区带或重点地区开展 GF-5 矿物填图提供了技术支撑。

由于 GF-5 空间分辨率较机载 HyMap、AVIRIS 低, 其地物光谱混合现象更加明显, 在一定程度上影响了其矿物识别精度评价。针对 GF-5 光谱混合现象, 今后还需进一步结合 GF-5 影像光谱特征和地物分布情况, 开展相应的野外光谱测试, 提高对 GF-5 光谱特征理解, 进而实现亚像元、弱信息识别。

参考文献 (References)

- Ashley R P and Abrams M J. 1980. Alteration mapping using Multi-spectral Images-Cuprite Mining District, Esmeralda County, Nevada. US Geological Survey Open File Report 80-367
- Bierwirth P, Huston D and Blewett R. 2002. Hyperspectral mapping of mineral assemblages associated with gold mineralization in the Central Pilbara, Western Australia. *Economic Geology*, 97(4): 819-826 [DOI: 10.2113/gsecongeo.97.4.819]
- Boardman J W. 1998. Leveraging the high dimensionality of AVIRIS data for improved sub-pixel target unmixing and rejection of false positives: mixture tuned matched filtering//Summaries of the Seventh JPL Airborne Geoscience Workshop. Pasadena, CA: JPL Publication
- Chang C I. 2000. An information-theoretic approach to spectral variability, similarity, and discrimination for hyperspectral image analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(5): 1927-1932 [DOI: 10.1109/18.857802]
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Garcia Jr J, Gemmel J B, McKnight S and Cuisson L A. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 106(8): 1365-1398 [DOI: 10.2113/econgeo.106.8.1365]
- Cui J, Yan B K, Wang R S, Tian F, Zhao Y J, Liu D C, Yang S M and Shen W. 2014. Regional-scale mineral mapping using ASTER VNIR/SWIR data and validation of reflectance and mineral map products using airborne hyperspectral CASI/SASI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33: 127-141 [DOI: 10.1016/j.jag.2014.04.014]
- Deyell C L and Dipple G M. 2005. Equilibrium mineral-fluid calculations and their application to the solid solution between alunite and natroalunite in the El Indio-Pascua belt of Chile and Argentina. *Chemical Geology*, 215(1/4): 219-234 [DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.039]
- Dong X F, Yan B K, Li N, Zhao Z, Liu G Y, Liu R Y and Chen Y W. 2018. Prospecting prediction of sedimentary metamorphic type iron deposits based on airborne hyperspectral remote sensing: a case study of the Jingtieshan area in the northern Qilian Mountains. *Geology and Exploration*, 54(5): 1013-1023 (董新丰, 闫柏琨, 李娜, 赵哲, 刘根源, 刘镭源, 陈耀文. 等. 2018. 基于航空高光谱遥感的沉积变质型铁矿找矿预测—以北祁连镜铁山地区为例. *地质与勘探*, 54(5): 1013-1023) [DOI: 10.3969/j.issn.0495-5331.2018.05.012]
- Fenstermaker L K and Miller J R. 1994. Identification of fluvially re-distributed mill tailings using high spectral resolution aircraft data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(8): 989-995
- Gan F P, Dong X F, Yan B K and Liang S N. 2018. Research progress of spectrometry geological remote sensing. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 10(1): 44-62 (甘甫平, 董新丰, 闫柏琨, 梁树能. 2018. 光谱地质遥感研究进展. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 10(1): 44-62) [DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2018.01.005]
- Gan F P, Wang R S and Ma A N. 2003. Spectral identification tree(sit) for mineral extraction based on spectral characteristics of minerals. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 445-454 (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. *地学前缘*, 10(2): 445-454) [DOI: 10.3321/j.issn:1005-2321.2003.02.024]
- Gan F P, Wang R S and Yang S M. 2002. Studying on the alteration minerals identification using Hyperion data. *Remote Sensing for Land and Resources*, 14(4): 44-50 (甘甫平, 王润生, 杨苏明. 2002. 西藏 Hyperion 数据蚀变矿物识别初步研究. *国土资源遥感*, 14(4): 44-50) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-070X.2002.04.010]
- Goetz A F H. 2009. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: a personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113 (S1): S5-S16 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.12.014]
- Hedenquist J W, Arribas A R and Gonzalez-Urien E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits//Hagemann S G and Brown P E, eds. *Reviews in Economic Geology*. Society of Economic Geologists: 245-277 [DOI: 10.5382/Rev.13.07]
- Hook S J and Rast M. 1990. Mineralogic mapping using airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) shortwave infrared

- (SWIR) data acquired over cuprite, NV//Proceedings of the 2nd Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. Pasadena, CA: JPL Published: 199-207.
- Kruse F A, Perry S L and Caballero A. 2006. District-level mineral survey using airborne hyperspectral data, Los Menucos, Argentina. *Annals of Geophysics*, 49(1): 83-92 [DOI: 10.4401/ag-3154]
- Liang S N, Gan F P, Yan B K, Wang R S, Yang S M and Zhang Z J. 2012. Relationship between composition and spectral feature of muscovite. *Remote Sensing for Land and Resources*, 24(3): 111-115 (梁树能, 甘甫平, 闫柏琨, 王润生, 杨苏明, 张志军. 2012. 白云母矿物成分与光谱特征的关系研究. *国土资源遥感*, 24(3): 111-115) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2012.03.20]
- Lin J, Yan B K, Dong X F, Yang S M, Yang R H, Cui J, Guo D and Wang R S. 2014. Evaluating of Tiangong-1 imaging spectrometer data oriented to geological applications. *Journal of Remote Sensing*, 18(S1): 74-83 (林健, 闫柏琨, 董新丰, 杨苏明, 杨日红, 崔静, 郭鼎, 王润生. 2014. 面向地质应用的天宫一号成像光谱数据评价. *遥感学报*, 18(S1): 74-83) [DOI: 10.11834/jrs.2014z12]
- Liu D C, Tian F, Qiu J T, Ye F W, Yan B K, Sun Y and Wang Z T. 2017. Application of hyperspectral remote sensing in solid ore exploration in the Liuyuan-Fangshankou Area. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2781-2795 (刘德长, 田丰, 邱峻挺, 叶发旺, 闫柏琨, 孙雨, 王子涛. 2017. 柳园-方山口地区航空高光谱遥感固体矿产探测及找矿效果. *地质学报*, 91(12): 2781-2795) [DOI: 10.3969/j.issn.0001-5717.2017.12.014]
- Rockwell B W, Cunningham C G, Breit G N and Rye R O. 2006. Spectroscopic mapping of the white horse alunite deposit, Marysville Volcanic Field, Utah: evidence of a magmatic component. *Economic Geology*, 101(7): 1377-1395 [DOI: 10.2113/gsecongeo.101.7.1377]
- Sun Y Z, Jiang G W, Li Y D, Yang Y, Dai H S, He J, Ye Q H, Cao Q, Dong C Z, Zhao S H and Wang W H. 2018. GF-5 satellite: overview and application prospects. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(3): 1-13 (孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 杨勇, 代海山, 何军, 叶擎昊, 曹琼, 董长哲, 赵少华, 王维和. 2018. “高分五号”卫星概况及应用前景展望. *航天返回与遥感*, 39(3): 1-13) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.03.001]
- Swayze G A, Clark R N, Goetz A F H, Livo K E and Sutley S S. 1998. Using imaging spectroscopy to better understand the hydrothermal and tectonic history of the cuprite mining District, Nevada//Summaries of the 7th JPL Airborne Earth Science Workshop. Pasadena, CA: JPL Publication: 383-384
- Tan B X, Li Z Y, Chen E X and Pang Y. 2005. Preprocessing of EO-1 Hyperion hyperspectral data. *Remote Sensing Information*, (6): 36-41 (谭炳香, 李增元, 陈尔学, 庞勇. 2005. EO-1 Hyperion 高光谱数据的预处理. *遥感信息*, (6): 36-41) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2005.06.010]
- van der Meer F. 2006. The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(1): 3-17 [DOI: 10.1016/j.jag.2005.06.001]
- van der Meer F D, van der Werff H M A, van Ruitenbeek F J A, Hecker C A, Bakker W H, Noomen M F, van der Meijde M, Carranza E J M, de Smeth J B and Woldai T. 2012. Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: a review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1): 112-128 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.08.002]
- Wang R S, Gan F P, Yan B K, Yang S M and Wang Q H. 2010. Hyperspectral mineral mapping and its application. *Remote Sensing for Land and Resources*, 22(1): 1-13 (王润生, 甘甫平, 闫柏琨, 杨苏明, 王清华. 2010. 高光谱矿物填图技术与应用研究. *国土资源遥感*, 22(1): 1-13) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2010.01.01]
- Wang R S, Yang S M and Yan B K. 2007. A review of mineral spectral identification methods and models with imaging spectrometer. *Remote Sensing for Land and Resources*, 19(1): 1-9 (王润生, 杨苏明, 闫柏琨. 2007. 成像光谱矿物识别方法与识别模型评述. *国土资源遥感*, 19(1): 1-9) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2007.01.01]
- Yan B K, Dong X F, Wang Z, Yang S M, Yu J C, Li N and Gan F P. 2016. Mineral information extraction technology by airborne hyperspectral remote sensing and its application progress: an example of mineralization belts of western China. *Geological Survey of China*, 3(4): 55-62 (闫柏琨, 董新丰, 王喆, 杨苏明, 于峻川, 李娜, 甘甫平. 2016. 航空高光谱遥感矿物信息提取技术及其应用进展——以中国西部成矿带调查为例. *中国地质调查*, 3(4): 55-62)
- Ye F W, Liu D C and Zhao Y J. 2011. Airborne hyper-spectral survey system CASI/SASI and its preliminary application in uranium exploration. *World Nuclear Geoscience*, 28(4): 231-236 (叶发旺, 刘德长, 赵英俊. 2011. CASI/SASI 航空高光谱遥感测量系统及其在铀矿勘查中的初步应用. *世界核地质科学*, 28(4): 231-236) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0636.2011.04.008]
- Yuhas R H, Goetz F H A and Boardman J W. 1992. Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the Spectral Angle Mapper (SAM) algorithm//Summaries of the 3rd Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Pasadena, CA: JPL Publication: 147-149

Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image

DONG Xinfeng^{1,2}, GAN Fuping^{1,2}, LI Na^{1,2}, YAN Bokun^{1,2}, ZHANG Lei³, ZHAO Jiaqi³, YU Junchuan^{1,2}, LIU Rongyuan^{1,2}, MA Yanni^{1,2}

1.China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resource, Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory of Aero Geophysics and Remote Sensing Geology of China Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;

3.China University of Geosciences, Beijing School of the Earth Sciences and Resources, Beijing 100083, China

Abstract: Mineral identification, which is a feature of hyperspectral remote sensing technology, has been widely applied in geoscience and has achieved remarkable application results in geological and mineral fields. With the improvement of spectral resolution, mineral identification has gradually developed from the identification of mineral species to the identification of fine information, such as mineral subclasses and mineral components. Fine mineral information is extremely important in applications, such as the prediction and evaluation of mineral resources and geological environment indication. It directly affects the breadth and depth of hyperspectral remote sensing geological application. Spectral resolution and mineral identification methods are the main factors in fine mineral identification. GF-5 has 330 bands at the spectral range of 350—2500 nm, and its spectral resolution is higher than 10 nm. Its ultrahigh spectral resolution provides the possibility for fine mineral identification.

In this study, a mineral identification method was presented on the basis of spectral characteristic enhancement matching degree and characteristic parameters by summarizing and analyzing the advantages and disadvantages of two commonly used mineral identification methods, namely, spectral matching and characteristic parameters, and combining the characteristics of GF-5 hyperspectral data. The proposed method was applied to conduct mineral identification in Liuyuan, Gansu, and Cuprite, USA. The mineral types and subclasses were first identified, and then the information on sericite composition was reversed. The airborne hyperspectral data were compared with the mapping results of GF-5.

The results show that the GF-5 mineral identification information distribution has a good consistency with airborne HyMap and AVIRIS, and the average accuracy of GF-5 mineral identification is 90% higher compared with the airborne data. The accuracy rate, as a holistic evaluation, only serves as a reference because of the relatively limited statistical data, uneven distribution of mineral information, and the difference in original spatial resolution. The comparison results show that the proposed mineral identification method can meet the requirements of GF-5 mineral fine identification.

Ultrahigh spectral resolution makes GF-5 advantageous in the identification of mineral composition information and distinguishing minerals with high spectral similarity. The proposed mineral identification method based on spectral characteristic enhancement matching degree and characteristic parameters can provide technical support for subsequent operational applications.

Key words: GF-5, hyperspectral, shortwave infrared, mineral mapping, remote sensing geology

Supported by National Key Technologies R&D program (No. 2017YFC0602104, 2016YFB0500505-2)