文章编号: 0258-7106 (2019) 02-0439-10

Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2019. 02. 014

新疆东戈壁地区高光谱遥感蚀变特征及找矿分析*

王永军,王瑞军,孙永彬,王 洗

(核工业航测遥感中心,河北石家庄 050002)

摘 要 针对新疆东戈壁地区还未开展高光谱遥感方面的相关研究问题,提出利用地面和航空高光谱遥感蚀 变异常特征,进行蚀变异常带分析及找矿应用的工作思路,系统剖析蚀变矿物异常特征,圈定蚀变带,野外查证新 发现多金属矿化线索,取得较好的找矿应用效果。东戈壁地区周边分布有较多的铁及多金属矿床、矿点,成矿地质 条件优越,且属准平原状的丘陵地貌,植被覆盖少,基岩裸露好,围岩蚀变发育,具备开展地面和航空高光谱测量的 地质和自然地理条件,可获取高质量的高光谱遥感数据并为找矿勘查服务。文章选择新疆东天山成矿带的东戈壁 地区,利用 FieldSpec Pro FR 地面波谱数据和 HyMap 航空高光谱遥感数据,解析地面各地质体所反映的蚀变矿物 异常特征,系统剖析褐铁矿+赤铁矿、绢云母、绿泥石、角闪石等蚀变矿物的异常分布规律和反映的地质意义,综合 区域地质特征和成矿规律,圈定高光谱遥感蚀变带,开展蚀变带的野外查证,新发现赋存于石英岩化(含)铁碧玉岩、变细碧岩、石英脉体中的铁、钼等多金属矿化,结合地质、蚀变矿物特征,初步预测东戈壁地区具有形成火山-沉 积-后期热液改造型铁矿床、石英脉型钼矿床的成矿潜力,后期应开展以钼、铁矿为主的资源评价,重点开展石英岩 化(含)铁碧玉岩、变细碧岩、石英脉体与褐铁矿+赤铁矿、绢云母、绿泥石、角闪石等蚀变矿物叠加地段的地质找矿。高光谱遥感技术可以快速获取异常信息和精确定位矿化异常信息部位,可发现较好的多金属矿化线索,为东戈壁 地区下一阶段地质找矿和资源评价提供依据。

关键词 地质学;高光谱遥感;蚀变特征;蚀变带;找矿分析;东戈壁地区中图分类号: P627文献标志码:A

Characteristics of hyperspectral remote sensing alteration anomaly and oreprospecting analysis in Donggebi area of Xinjiang

WANG YongJun, WANG RuiJun, SUN YongBin and WANG Shen (Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, Hebei, China)

Abstract

Donggebi area has the geological and natural geographic conditions to carry out surface and aerial hyperspectral surveys, from which high-quality hyperspectral remote sensing data can be obtained to serve prospecting and exploration, because there are many iron and polymetallic deposits and ore spots around the area., the metallogenic geological conditions are favorable and belong to the quasi-plain hilly landform with less vegetation coverage, along with good exposed bedrock and well developed wall rock alteration. Based on FieldSpec Pro FR ground spectrum data and HyMap aerial hyperspectral remote sensing data, Donggebi area of the East Tianshan metallogenic belt in Xinjiang was selected, and delineation of hyperspectral remote sensing alteration zone was carried out through the process that anomaly characteristics of altered minerals reflected by geological bodies on the ground were analyzed, and the abnormal distribution rules and geological significance of altered minerals such as limonite+hematite, sericite, chlorite and amphibole, as well as metallogenic regularity

^{*} 本文得到中国地质调查局项目(编号:12120114036501、12120113099700)资助

第一作者简介 王永军,男,1978年生,高级工程师,从事地质矿产勘查及环境地质研究工作。Email:ruijun123wang@126.com 收稿日期 2018-10-07;改回日期 2019-02-21。秦思婷编辑。

were systematically analyzed. Iron and molybdenum polymetallic mineralization occurring in quartzite (including) jasperite, metaspilite and quartz veins were found in the field verification of alteration zone. Based on the geological and altered mineral characteristics, it is preliminarily predicted that the Donggebi area has the metallogenic potential of forming volcanic-sedimentary-late hydrothermal modified iron deposits and quartz vein type molybdenum deposits. In the late stage, the evaluation of resources mainly consisting of molybdenum and iron ore should be carried out, with the emphasis placed on on the geological prospecting in the superimposed areas of quartzitized jasperite, metaspilite, quartz vein and limonite + hematite, sericite, chlorite, amphibole and other altered minerals. Hyperspectral remote sensing technology can efficiently acquire anomaly information, accurately find the location of mineralization anomaly information, and find better polymetallic mineralization clues, thus providing a basis for geological prospecting and resource evaluation in the next step of exploration in the Donggebi area.

Key words: geology hyperspectral remote, alteration anomaly characteristics, erosion belt, ore prospecting analysis, Donggebi area

东戈壁地区地处新疆哈密市翠岭地区,位于东 天山成矿带(东经93°15′~93°30′,北纬41°40′~41° 50′),其周边区域分布有较多的铁多金属矿床、矿 点,成矿地质条件优越。前人在该区开展了较多的 区域地质、矿产地质、矿床地质、多光谱遥感地质研 究,以及针对专题的其他科研工作(李厚明等,2014; 王兴保,2005;Berger et al.,1992;Bilotti et al.,2000)。 但针对高光谱遥感方面的工作仅中国地质调查局航 空物探遥感中心在相邻区北侧开展过HyMap数据 的采集和蚀变矿物填图,而东戈壁地区的高光谱遥 感调查研究和找矿还未开展。

东戈壁地区属准平原状的丘陵地貌,植被覆盖 少,基岩裸露好,地形起伏较小,切割弱,围岩蚀变发 育,具备开展地面和航空高光谱测量的地质和自然 地理条件,获取高质量的高光谱遥感数据,有利于发 挥高光谱遥感的技术优势为找矿勘查服务。

本次在新疆东天山成矿带东段航空高光谱遥感 调查研究基础上,选取东戈壁地区,利用FieldSpec Pro FR地面波谱仪和HyMap航空成像光谱仪,获取 地面和航空高光谱遥感数据,开展蚀变矿物特征综 合研究,解析地面和航空各地质体所反映的蚀变矿 物异常特征,圈定高光谱遥感蚀变带,开展蚀变带的 找矿分析,旨在为国内高光谱遥感技术应用研究和 找矿应用提供新的认识和依据。

1 地质特征

东戈壁地区横跨哈萨克斯坦一准噶尔板块与塔 里木板块2个 I级构造单元,位处阿奇山早石炭世 裂谷带Ⅲ级构造单元(主京彬等,2006;涂良权等, 2011;夏林圻等,2008)。

该区出露中元古界、古生界和新生界,各地层主构 造线方向呈近东西向展布。中元古界长城系星星峡群 岩性主要为黑云母斜长片麻岩、混合岩、石英岩、大理 岩等;中元古界蓟县系卡瓦布拉克群岩性主要为石英 岩、石英片岩、黑云母斜云片麻岩、花岗片麻岩;下石炭 统雅满苏组岩性主要为陆源细碎屑岩、碳酸盐岩夹凝 灰质碎屑岩、火山碎屑岩;上石炭统底坎尔组岩性为基 性玢岩、石英角斑岩及灰岩等喷发-沉积岩;石炭系岩性 为黑云母硅质岩、硅质岩与黑云母千枚岩夹泥岩、变辉 橄岩等;下二叠统阿其克布拉克组岩性主要为钠长斑 岩、霏细岩、霏细斑岩和石英角斑岩不均匀互层,夹石 英角斑凝灰岩和灰岩;中二叠统大热泉子组岩性为钙 质细砂岩、中-粗粒砂岩、玄武岩、玄武玢岩、安山玢岩及 凝灰砂岩;新近系岩性主要为泥岩、粉砂岩(王京彬等, 2006;涂良权等,2011;夏林圻等,2008;Clark et al., 2003; Cooper et al., 2002; Crouvi et al., 2006).

区内的断裂构造可见近东西向、北东东向、北西 西向、北东向、北西向5组,且以近东西向、北东东 向、北西西向断裂为主。

区内侵入岩较发育,可见泥盆纪英云闪长岩和片 麻状花岗岩,石炭纪闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩,二叠 纪石英闪长玢岩等。岩脉可见辉绿玢岩、石英斑岩等。

2 高光谱测量仪器参数及数据处理

2.1 地面高光谱数据获取与处理

地面高光谱测试使用的仪器为 FieldSpec Pro

FR地面波谱仪,主要技术指标:① 350~1000 nm范 围内光谱分辨率为3 nm,1000~2500 nm范围内光 谱分辨率为10 nm;② 最快采集速度为10次/s,约 17 ms;③ 波长精度为±1 nm;④ 重复性能优于 0.3%;⑤ 杂散光:350~1000 nm范围内优于 0.02%, 1000~2500 nm范围内优于 0.1%;⑥ 标准噪声水平 在 10~8以下;⑦ 1、5、8、25 度视场角可选;⑧ 仪器 重量小于 8 kg。

本次研究采取室内和野外相结合的波谱测量 方法,采用手臂-波谱仪探头-测试地物三者垂直 的测试方式。室内光谱测量的光源、探测器与样 品距离为40 cm,探测器视场完全落入样品测试面 内,光源天顶角小于45°,探测器天顶角0°。野外 光谱测量的探头离地面为1.2 m,视场角选择5°, 视场范围0.96 m²,与航空高光谱空间分辨率较 一致。

东戈壁地区地面波谱测试每个波谱测试点获取 10条波谱曲线数据,同时,取10条波谱测试数据的 平均值作为各地质体的地面波谱数据。

地面波谱曲线数据处理和解释采用 ViewSpec Pro Version5.6软件进行处理(汪冰等,2014;甘甫平 等,2003)。波谱数据预处理技术主要包括反射率计 算、噪声去除、光谱数据库构建等。地面蚀变矿物光 谱特征诊断和提取为利用包络线消除技术,将典型 岩矿实测光谱反射率值进行归一化,利用计算机软 件,提取光谱吸收峰的特征参数,进而与典型矿物特 征参数对比研究,结合野外实地情况,提取相对应的 蚀变矿物。

2.2 航空高光谱数据获取与处理

航空高光谱遥感测量使用 HyMap 成像光谱仪 进行数据获取。

HyMap航空成像光谱仪具高空间和高光谱分辨 率,具极大视场角和极高信噪比。HyMap系统总视 场角达60°~70°,同等飞行条件下具较大的航带幅宽 和高效的数据采集速率,每天最高采集800~2500 km²;可见光一近红外谱段信噪比大于1000:1,短波 红外大于500:1。数据获取时间为2014年7~8月,飞 行时间为北京时间10:30时至15:30时;获取数据时 天气晴朗,云量低,能见度>20 km;飞行高度相对地 面航高2000~2200 m,单条航带覆盖带宽2356 m;旁 向重叠率18%。

HyMap成像光谱系统获取的各航带原始数据为 DN值,采用HyMap自带的高光谱数据处理软件HyCorr以及ENVI软件进行系统的辐射定标、大气校正处理,生成单航带辐亮度数据和反射率数据产品,利用GPS数据和IMU姿态数据,基于DEM数据,生成单航带系统几何校正文件.glt文件,开展几何校正和地理编码工作。

采用基于大气传输理论模型、基于统计分析 模型以及基于地面同步观测经验回归模型进行大 气校正。几何校正进行系统几何校正处理、航带 间无缝拼接研究和处理、精校正处理(刘德长等, 2015)。

高光谱矿物填图采用的处理方法包括像元光 谱与矿物标准光谱曲线的匹配识别、量化目标矿 物和提取矿物光谱吸收波段参数识别。矿物信息 提取主要利用 ENVI 软件,以 HyMap 航空成像光 谱数据为源数据,运用 ENVI 的自动浏览功能从遥 感影像上检查存在的坏波段,剔除信噪比较低的 波段。进而运用傅里叶变换和傅里叶逆变换去除 条带噪声。同时,运用实测的地面波谱数据对影 像进行辐射定标。综合考虑飞行参数和地理参数 进行大气校正,通过不断改变大气校正模式的方 法,选择与地面波谱最为接近的大气校正结果,综 合使用"基于光谱相似性"和"基于光谱特征参数" 2种矿物填图方法进行矿物填图工作,2种方法相 互补充,已达最佳矿物识别效果(Gan et al., 2002; 2004; Yang et al., 2011)。

本次利用"基于光谱相似性"和"基于光谱特征 参数"矿物填图方法蚀变的蚀变矿物为褐铁矿+赤铁 矿、绿泥石、绢云母、角闪石等。

3 高光谱遥感蚀变特征

3.1 地面高光谱遥感蚀变特征

东戈壁地区地面波谱测试的地质体包括下石炭 统雅满苏组安山岩、砂岩、凝灰岩、灰岩、凝灰熔岩, 英安玢岩等(图1)。

安山岩波谱曲线整体反射率值11%。480 nm处存在较弱吸收峰,880 nm处存在较强、较宽的吸收峰,为岩石发育弱褐铁矿化所致;2210 nm处存在弱吸收峰,为岩石发育弱绢云母化所致。

砂岩波谱曲线整体反射率值 33%。480 nm、 500 nm 处存在较弱吸收峰,880 nm、900 nm 处存 在较强、较宽吸收峰,为岩石发育褐铁矿化所致; 2210 nm 处存在较强吸收峰,为发育绢云母化所



图 1 东戈壁地区各地质体地面波谱测试曲线图 a. 安山岩和砂岩地面波谱测试曲线图;b. 灰岩地面波谱 测试曲线图;c. 凝灰岩地面波谱测试曲线图; d. 英安玢岩地面波谱测试曲线图 Fig. 1 Ground spectrum test curve diagrams of various

geological bodies in Donggebi area a. Andesite and sandstone ground spectrum test curve diagram; b. Limestone ground spectrum test curve diagram; c. Tuff ground spectrum test curve diagram; d. Dacite porphyry ground spectrum test curve diagram

致;2330 nm 处存在较强吸收峰,为发育碳酸盐化所 致;2350 nm 处存在较强的主吸收峰,左肩 2250 nm 处 存在较弱的次级吸收峰,为发育绿泥石化所致。

凝灰岩波谱曲线整体反射率值25%。480 nm处存在较弱吸收峰,900 nm处存在较弱、较宽的吸收峰,为岩石发育弱褐铁矿化所致;2210 nm处存在弱吸收峰,为岩石发育绢云母化所致;2210 nm处存在较强的主吸收峰,右肩2225 nm处存在较弱的次级吸收峰,为岩石发育明矾石化所致;2330 nm处存在较强的吸收峰,为岩石发育碳酸盐化所

致;2350 nm 处存在较强的主吸收峰,左肩2250 nm 处存在较弱的次级吸收峰,为岩石发育绿泥石 化所致。

灰岩波谱曲线整体反射率值 25%。480 nm、 530 nm 处存在较弱吸收峰,900 nm 处存在较弱、较 宽的吸收峰,为岩石发育弱褐铁矿化所致;2330 nm 处存在较强的主吸收峰,1860 nm、2000 nm、2160 nm、2310 nm 存在较弱的次级吸收峰,为发育碳酸 盐化所致;2350 nm 处存在较强的主吸收峰,左肩 2250 nm 处存在较弱的次级吸收峰,为发育绿泥石 化所致。

凝灰熔岩波谱曲线整体反射率值在 22%~30% 之间。在 480 nm、530 nm 处存在较弱的吸收峰, 900 nm 处存在较强、较宽、较深的吸收峰,为岩石 发育褐铁矿化所致; 2210 nm 处存在强的吸收峰, 为岩石发育绢云母化所致; 2210 nm 处存在较强的 主吸收峰,右肩 2225 nm 处存在较弱的次级吸收 峰,为岩石发育明矾石化所致; 2265 nm 处存在较 弱的吸收峰,为岩石发育弱黄钾铁矾化所致; 2330 nm 处存在较强的主吸收峰, 1860 nm、2000 nm、 2160 nm、2310 nm 存在较弱的次级吸收峰,为发育 碳酸盐化所致; 2350 nm 处存在较强主吸收峰, 左 肩 2250 nm 处存在较弱次级吸收峰, 为发育绿泥 石化所致。

英安玢岩波谱曲线整体反射率值34%。480 nm 处存在较弱吸收峰,900 nm处存在较弱、较宽的吸收 峰,为岩石发育褐铁矿化所致;2210 nm处存在弱的 吸收峰,为岩石发育弱绢云母化所致;2350 nm处存 在较强的主吸收峰,左肩2250 nm处存在较弱的次 级吸收峰,1310 nm、1560 nm、1830 nm处存在弱的 吸收峰,为岩石发育绿帘石化所致。

下石炭统雅满苏组安山岩分布的地面光谱蚀 变矿物为褐铁矿、绢云母等;砂岩分布的地面光谱 蚀变矿物为褐铁矿、绢云母、方解石、绿泥石等;凝 灰岩分布的地面光谱蚀变矿物为褐铁矿、绢云母、 明矾石、方解石、绿泥石等;灰岩分布的地面光谱 蚀变矿物为褐铁矿、方解石、绿泥石等;凝灰熔岩 分布的地面光谱蚀变矿物为褐铁矿、绿泥石、伊利 石、方解石、高岭石、石膏、绢云母、明矾石、黄钾铁 矾等。英安玢岩分布的地面光谱蚀变矿物为褐铁 矿、绢云母、绿帘石等(图2)。

3.2 航空高光谱遥感蚀变特征

东戈壁地区分布航空高光谱蚀变矿物信息为

褐铁矿+赤铁矿、绿泥石、绢云母、角闪石等,整体 呈近东西向、北东东向、北西西向展布,局部地段呈 北东向展布。蚀变矿物主要分布在下石炭统雅满 苏组、石炭系区,中酸性斑岩体、岩脉,以及韧性剪 切带、其他断裂构造带等成矿有利地质单元分布 地段。

褐铁矿+赤铁矿等蚀变矿物呈近东西向、北东东 向、北西西向展布,形态主要呈条带状、条块状、团块 状等,局部呈斑块状、星点状等,主要由近东西向、北 东东向、北西西向、北西向、北东向断裂构造,韧性剪 切带、花岗岩体、中酸性岩脉引起,局部地段由花岗 岩体与雅满苏组接触带、雅满苏组各岩性引起。

绿泥石等蚀变矿物多呈近东西向、北东东向、 北西西向展布,分布形态主要为片状、块状、团块 状、条块状等,主要由下石炭统雅满苏组各岩性引 起,局部地段由近东西向、北东东向、北东向断裂构 造,韧性剪切带、花岗岩体与下石炭统雅满苏组接 触带引起。

绢云母等蚀变矿物主要呈北东东向、近东西向、 北东向展布,分布形态多为片状、团块状、块状,局部 地段呈条带状、条块状,主要由下石炭统雅满苏组各 岩性引起,局部地段由近东西向、北东东向、北东向 断裂构造,韧性剪切带、基性岩脉,以及下石炭统雅 满苏组与花岗闪长岩体接触带和花岗闪长岩体 引起。

角闪石等高光谱蚀变主要呈近东西向、北东东 向展布,分布形态多为条带状、条块状、团块状分布, 局部地段呈斑点状、斑块状,整体呈北东东向展布。 主要由下石炭统雅满苏组、中二叠统阿尔巴萨依组、 北东东向断裂、北西西向断裂、韧性剪切带和闪长岩 体、基性岩脉等引起。

4 高光谱蚀变带圈定

4.1 圈定原则

高光谱遥感蚀变带圈定的原则为主要运用地面 和航空高光谱蚀变矿物和蚀变矿物组合分布信息、 高光谱遥感影像、多金属矿化线索,以及典型矿床高 光谱遥感找矿模型,并结合成矿地质理论、成矿地质 条件和各种找矿信息,开展高光谱遥感异常蚀变带 信息筛选,优选出最有可能形成和发现矿床的地区 或地段。

在高光谱遥感蚀变筛选、找矿有利地段优选和

野外查证的基础上,对优选的蚀变异常带进行进一步的圈定,其圈定的要点为:①最小风险、最大含 矿率准则,即蚀变带面积最小,含矿率最高;②优 化评价准则,即对蚀变矿物和蚀变矿物组合分布信 息,地、物、化、遥、矿化等各类成矿有利信息进行综 合优选,突出有效和关键信息;③综合评价准则, 即共生、伴生成矿信息综合评价和综合方法使用。

4.2 蚀变带圈定

高光谱遥感异常蚀变带圈定主要依据褐铁矿+ 赤铁矿等蚀变矿物信息,同时结合东戈壁地区地质 特征,在褐铁矿+赤铁矿等蚀变矿物分布区,或者叠 加绿泥石、绢云母、角闪石等其中一类、两类、三类的 蚀变矿物分布区,进行蚀变带圈定。高光谱遥感异 常蚀变带以叠加分布的各蚀变矿物信息最外边界为 蚀变带界线进行圈定。

东戈壁地区共计圈定高光谱遥感异常蚀变带6 条,编号依次为S1-1、S1-2、S1-3、S1-4、S1-5、S1-6(图 3、表1)。

S1-1蚀变带呈北东向带状展布,延伸长度3km, 宽度260m。该带分布的蚀变矿物为褐铁矿+赤铁 矿、绢云母、绿泥石等,褐铁矿+赤铁矿蚀变矿物信息 丰度较高,绢云母、绿泥石蚀变矿物信息丰度较低, 各蚀变矿物叠加程度较差,绢云母与褐铁矿+赤铁 矿、绿泥石均有重叠,褐铁矿+赤铁矿、绿泥石无重 叠。该带由北东向断裂和花岗岩脉引起。

S1-2 蚀变带呈近东西向条带状展布,延伸长度 约1.4 km,宽度在160~470 m之间。该带分布的蚀 变矿物为褐铁矿+赤铁矿、绿泥石、绢云母、角闪石 等,褐铁矿+赤铁矿、绿泥石蚀变矿物信息丰度较高, 绢云母、角闪石蚀变矿物信息丰度较低。各蚀变矿 物叠加程度好,绢云母、褐铁矿+赤铁矿、绿泥石、角 闪石蚀变矿物信息均有不同程度的叠加,绢云母、角 闪石蚀变矿物信息与其他蚀变矿物均有叠加,绿泥 石、褐铁矿+赤铁矿蚀变矿物信息两者互不叠加。该 蚀变带主要由北东东向断裂和下石炭统雅满苏组 引起。

S1-3 蚀变带呈近东西向条带状展布,延伸长度 约3.3 km,宽度约300 m。该带分布的蚀变矿物为绢 云母、绿泥石、褐铁矿+赤铁矿等,绢云母蚀变矿物信 息丰度低,绿泥石蚀变矿物信息丰度较低,褐铁矿+ 赤铁矿蚀变矿物信息丰度较高,各蚀变矿物叠加程 度较好,绢云母与绿泥石、褐铁矿+赤铁矿均有叠加。 该蚀变带主要由近东西向断裂和下石炭统雅满苏组



图2 东戈壁地区地质剖面及高光谱测量结果图

1一雅满苏组;2一英安玢岩脉;3一凝灰熔岩;4一凝灰质砂岩;5一砂岩;6一灰岩;7一英安玢岩;8一断层;9一地面光谱样采样点;

10一地面光谱测试点编号(1代表光谱编号为DZL02GP1);11一褐铁矿;12一黄钾铁矾;13-绿泥石;

14一绿帘石;15一绢云母;16一方解石;17一明矾石;18一伊利石

Fig. 2 The ground hyperspectral alteration mineral distribution diagram of Donggebi area

1-Yamansu Formation; 2-Dacite porphyry veins; 3-Tuff lava; 4-Tuff sandstone; 5-Sandstone; 6-Limestone; 7-Dacite porphyry; 8-Fault;

9-Ground spectroscopic sampling point; 10-Ground spectroscopic sampling point number (1 stands for spectral number DZL02GP1);

11-Limonite; 12-Yellow potassium iron; 13-Chlorite; 14-Epidote; 15-Sericite; 16-Calcite; 17-Alum; 18-Illite



图3 东戈壁地区高光谱遥感异常蚀变带分布图

 1—褐铁矿+赤铁矿;2—绿泥石;3—绢云母;4—角闪石;5—高光谱遥感异常蚀变带;6—高光谱异常蚀变带编号;7—东戈壁地区 Fig. 3 Distribution of abnormal alteration belt of hyperspectral remote sensing in the Donggebi area
1—Limonite and jarosite; 2—Chlorite; 3—Sericite; 4—Hornblende; 5—Hyperspectral remote sensing abnormal alteration zone area; 6—Hyperspectral remote sensing abnormal alteration number; 7—Donggebi area

引起。

S1-4 蚀变带呈北东东向条带状展布, 延伸长度约2 km, 宽度在 220~490 m之间。该蚀变带分布的 蚀变矿物为绢云母、绿泥石、褐铁矿+赤铁矿等, 褐铁

矿+赤铁矿蚀变矿物信息丰度较高,绢云母、绿泥石 蚀变矿物信息丰度低,各蚀变矿物叠加程度较差,绢 云母、褐铁矿+赤铁矿、绿泥石均有不同程度的叠加, 褐铁矿+赤铁矿、绿泥石无重叠。该带由北东东向断

	Table 1 Characteristic table of abnormal alteration belt of Hyperspectral temote sensing in the Donggebl area					
序号	蚀变带编号	蚀变带走向	蚀变带规模(长×宽)	高光谱蚀变矿物种类	高光谱蚀变矿物类型	引起蚀变原因
1	S1-1	北东向	3 km×260 m	3种	褐铁矿+赤铁矿、绢云母、绿泥石	北东向断裂、花岗岩脉
2	S1-2	近东西向	1.4 km×(160~470)m	4种	褐铁矿+赤铁矿、绢云母、绿泥石、 角闪石	北东东向断裂、统雅满苏组
3	S1-3	近东西向	3.3 km×300 m	3种	褐铁矿+赤铁矿、绢云母、绿泥石	近东西向断裂、统雅满苏组
4	S1-4	北东东向	2 km×(220~490)m	3种	褐铁矿+赤铁矿、绢云母、绿泥石	北东向断裂、雅满苏组
5	S1-5	近东西向	7.8 km×(200~1450)m	4种	褐铁矿+赤铁矿、绢云母、绿泥石、 角闪石	北东东向断裂、北东向断裂、韧性 剪切带和雅满苏组
6	S1-6	北东东向	3.8 km×(130~320)m	4种	褐铁矿+赤铁矿、绢云母、绿泥石、 角闪石	北东东向断裂构造、北东向断裂 构造

表1 东戈壁地区高光谱遥感异常蚀变带特征表

裂和雅满苏组引起。

S1-5蚀变带呈近东西向条块状展布,延伸长度 约7.8 km, 宽度在200~850 m之间。该带分布的蚀 变矿物为褐铁矿+赤铁矿、绢云母、绿泥石、角闪石 等,褐铁矿+赤铁矿蚀变矿物信息丰度较高,绢云母、 绿泥石、角闪石蚀变矿物信息丰度较低,不同地段各 蚀变矿物叠加程度不同,蚀变带西段的叠加程度较 好,东段的叠加程度较低,褐铁矿+赤铁矿、绿泥石与 其他蚀变矿物均有叠加,绢云母、角闪石与其他蚀变 矿物均有叠加,但两者无叠加。该蚀变带主要由北 东东向断裂、北东向断裂、韧性剪切带和下石炭统雅 满苏组引起。

S1-6蚀变带呈北东东向条带状展布,延伸长 度约3.8 km,宽度在130~320 m之间。该带分布的 蚀变矿物为绢云母、褐铁矿+赤铁矿、绿泥石等, 绢云母、绿泥石蚀变矿物信息丰度低,褐铁矿+赤 铁矿蚀变矿物信息丰度较高,各蚀变矿物叠加程 度较差,绢云母、绿泥石、褐铁矿+赤铁矿有不同 程度的叠加,褐铁矿+赤铁矿与绢云母叠加程度 较好。该蚀变带主要由北东东向和北东向断裂构 造引起。

高光谱蚀变提取信息野外验证 5

经对东戈壁地区高光谱遥感异常蚀变带进行野 外查证,在S1-1、S1-2、S1-3、S1-4、S1-5、S1-6蚀变带 均发现有铁、钼、钒等多金属矿化线索,其中在S1-5 蚀变带新发现铁、钼多金属矿化。

S1-5高光谱遥感异常蚀变带分布区出露下石炭 统雅满苏组(图4),岩性为陆源细碎屑岩、碳酸盐岩 夹凝灰质碎屑岩、火山碎屑岩及少量基、中、酸性熔 岩。蚀变带南侧可见规模较大的北东向断裂分布。 该蚀变带西侧有花岗岩体出露。

S1-2蚀变带内蚀变矿物主要由雅满苏组变细碧 岩、石英岩化(含)铁碧玉岩和石英脉引起,其中褐铁 矿+赤铁矿主要由雅满苏组石英岩化(含)铁碧玉岩 和石英脉引起,绢云母、绿泥石、角闪石蚀变矿物主 要由雅满苏组变细碧岩引起。

石英岩化(含)铁碧玉岩呈层状、透镜状分布于 下石炭统雅满苏组变细碧岩中。地表断续延伸长度 约200 m,宽度变化较大,在20~100 m之间。产状基 本与围岩一致。走向近东西向,倾向南,倾角85°~ 90°。石英岩化(含)铁碧玉岩呈黑紫红色、紫红色、 暗紫色等,呈显微花岗变晶结构,块状构造。岩石致 密坚硬。石英岩化(含)铁碧玉岩主要由石英、磁铁 矿、赤铁矿组成,含少量绢云母、绿帘石及碳酸盐,其 中,石英含量约65%、磁铁矿约含量15%、赤铁矿约 含量10%、其他矿物含量约5%。岩石中磁铁矿多呈 稠密浸染状、团状或呈粗条带状、网状,上述多种形 态磁铁矿集中分布时即形成铁矿石,胶结物大多为 硅质物(图6)。经化学分析测试,铁元素含量值高, w(Fe)在17.3%~20.5%之间。

石英脉体呈脉状、网脉状、细小条带状穿插在雅 满苏组变细碧岩和石英岩化(含)铁碧玉岩地层中, 石英脉体整体呈北西西向(275°)—近东西向(85°) 展布,地表延伸长度在5~30m之间,出露宽度在1~ 10 cm之间,最宽者达30 cm。脉体中蚀变发育,多见 褐铁矿化、赤铁矿化,局部地段发育黄钾铁钒化、孔 雀石化等,蚀变多呈浸染状、团状、片状分布,局部地 段分布在岩石表面及裂隙面上(图5)。经化学分析 测试,w(Mo)较高(301.20×10⁻⁶~316.80×10⁻⁶),还叠 加有w(Cu)(208.30×10⁻⁶~348.50×10⁻⁶)。



图4 S1-5高光谱遥感异常蚀变带综合剖析图

a. 褐铁矿+赤铁矿蚀变矿物分布图;b. 绢云母蚀变矿物分布图;c 绿泥石蚀变矿物分布图;d. 角闪石蚀变矿物分布图; e. 蚀变矿物组合分布图;f. 蚀变矿物分布透视图;g. S1-5地质图指北针

1-第四系砂、砾石沉积层;2-中新统桃树沟组。泥岩、砂质泥岩;3-石炭系雅满苏组:砂岩、泥岩、灰岩、凝灰岩;4-华力西中期花岗岩;5-花 岗岩脉;6-地质界线;7-不整合接触界线;8-区域性大断裂及一般断裂;9-实测及推测断层;10-韧性剪切带;11-褐铁矿+赤铁矿蚀变矿 物分布区;12-绿泥石蚀变矿物分布区;13-绢云母蚀变矿物分布区;14-角闪石蚀变矿物分布区;15-褐铁矿+赤铁矿蚀变矿物外边界线; 16-绿泥石蚀变矿物外边界线;17-绢云母蚀变矿物外边界线;18-角闪石蚀变矿物外边界线;19-高光谱遥感蚀变带;20-东戈壁地区 Fig. 4 S1-5 Hyperspectral remote sensing abnormal alteration zone area comprehensive profile

a. Limonite and jarosite alteration mineral distribution diagram;
b. Sericite alteration mineral distribution diagram;
c. Chlorite alteration mineral distribution diagram;
e. Hyperspectral alteration mineral distribution diagram;
f. Hyperspectral alteration mineral distribution perspective;
g. Geological map

1—Quaternary sand and gravel deposits; 2—Miocene series Taoshugou Formation mudstone, sandy mudstone; 3—Carboniferous Yamansu Formation sandstone, mudstone, limestone, tuff; 4—Middle Variscan granite; 5—Granite dike; 6—The geological boundary; 7—Unconformity contact line; 8—Regional major fault and fracture in general; 9—The measured and inferred fault; 10—Ductile shear zone; 11—Limonite and jarosite alteration mineral distribution area; 12—Chlorite and epidote alteration mineral distribution area; 13—Sericite alteration mineral distribution area; 14—Hornblende distribution area; 15—Limonite and jarosite alteration mineral distribution outside line; 16—Chlorite alteration mineral distribution outside line; 17—Sericite alteration mineral distribution outside line; 18—Hornblende distribution outside line; 19—Hyperspectral remote sensing abnormal alteration zone area; 20—Donggebi area

雅满苏组变细碧岩与石英岩化(含)铁碧玉岩呈 整合接触关系,石英岩化(含)铁碧玉岩系变细碧岩 喷发间歇期的正常沉积产物,与上覆变细碧岩接触 地段具穿插、贯入等现象,显示后期喷溢的变细碧岩 可能对其具有热液作用特征。石英岩化(含)铁碧玉 岩、石英脉体为铁矿、钼矿赋矿层位,变细碧岩可能



图 5 石英岩化(含)铁碧玉岩野外实地照片(左)及镜下正交偏光照片(右) Fig. 5 Photos of quartzied (including) Tieduyuyan field (left) and crossed nicols photos (right)

为铁矿矿源层,也可能为铁矿赋矿层位。

东戈壁地区地层、岩体、构造、蚀变等成矿地质 条件优越,蚀变矿物组合分布集中,良好分带特征, 地表新发现钼、铁等多金属矿化线索,有形成火山-沉积-后期热液改造型铁矿床、石英脉型钼矿床的成 矿潜力。后期应开展以钼、铁矿为主的资源评价工 作,铁钒矿可能与石英岩化(含)铁碧玉岩和变细碧 岩关系密切,钼矿可能与石英脉体关系密切,以新发 现的钼、铁矿化线索为中心,重点开展石英岩化(含) 铁碧玉岩、变细碧岩、石英脉体与褐铁矿+赤铁矿、绢 云母、绿泥石、角闪石等蚀变矿物叠加地段的地质找 矿工作。

6 结 论

(1)依据由褐铁矿+赤铁矿、绿泥石、绢云母、角 闪石等蚀变矿物组成的高光谱遥感蚀变带,逐步揭 示蚀变矿物和异常所表达的成矿地质环境,野外查 证近东西向、北东东向、北西西向线型蚀变矿物组合 异常,新发现赋存于石英岩化(含)铁碧玉岩、变细碧 岩、石英脉体中的铁、钼等多金属矿化,多金属矿化 与高光谱蚀变带吻合程度较好。初步预测东戈壁地 区具有形成火山-沉积-后期热液改造型铁矿床、石英 脉型钼矿床的成矿潜力。

(2)高光谱遥感技术可以快速获取异常信息和 精确定位矿化异常信息部位。东戈壁地区分布较多 的多金属矿化,利用标志性蚀变矿物组合和蚀变带 在该区发现多金属矿化,同时,认为呈近东西向展布 的高光谱遥感蚀变带具有进一步的找矿潜力。高光 谱遥感蚀变带对于快速勘探薄弱地区的找矿工作具 有较好的指示意义。

致 谢 在论文修改过程中两位审稿专家提出 了宝贵的意见和建设性的修改建议,在此一并深表 感谢!

References

- Berger Z, Williams T H L and Anderson D W. 1992. Geilogic stereo mapping of geologic structures with SPOT satellite data[J]. AAPG Bulletin, 76(1):101-120.
- Bilotti F, Shaw J H and Brennan P A. 2000. Quantitative structural alalysis with stereocopic remote sensing imagery[J]. AAPG Bulletin, 84(6):727-740.
- Clark R N , Swayze G A and Eric K. 2003. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS tetracorder and expert systems J[J]. Geophysical Research, 108(E12):5131.
- Cooper B L, Salisbury J W, Killen R M and Potter A E. 2002.Midinfrared spectral features of rocks and their powers[J]. JGR, 107(E4): 5017.
- Crouvi O, Ben E D, Beyth M et al. 2006. Quantitative mapping of Arid Alluvial Fan surface using field spectrometer and hyperspectral remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 80:103-117.
- Gan F P , Wang R S and Yang S M. 2002. Research on the alteration mapping using hyperion data[J]. Land Resource and Re-mote Sensing, 54(4): 44-50(in Chinese with English Abstract).
- Gan F P, Wang R S and Ma A N. 2003. Spectral identification of highspectral remote sensing minerals based on characteristic band[J]. Earth Science Frontiers, 10(2):445-453(in Chinese).

- Gan F P and Wang R S. 2004. Technology and methods of remote sensing alteration mapping[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-123(in Chinese).
- Li H M, Ding J H, Li L X and Yao T. 2014. The genesis of the skarn and the genetic type of the yamansu iron deposit, eastern Tianshan, Xinjian[J]. Acta Ggologica Sinica,12(12):2477-2489(in Chinese).
- Liu D C, Ye F W, Zhao Y J, Tian F and Qiu J T. 2015. Airborne hyperspectral remote sensing for gold prospecting around Liuyuan-Fangshankou area, Gansu Province, China[J]. Journal of Geoinformation Science, 17(12):1545-1553(in Chinese).
- Tu L Q, Ma Y F, Shi S R, Yin J F and Tu J F. 2011. Metallogenic characteristics and surrounding rock alteration of Hami East Gobi Molybdenum deposit[J]. Xinjiang Geology, 29(4): 433-436(in Chinese).
- Wang B, Wang R J, Li M S, Dong S F, Niu H W and Sun Y B. 2014. Analysis of ground hyperspectral alteration minerals in the favorable mineralization unit and prospecting application in the East Gobi region, Xinjiang[J]. Mineral Exploration, 6(5): 577-585(in Chinese).
- Wang J B, Wang Y W and He Z J. 2006. The metallogenic indication of tectonic evolution of Dongtianshan[J]. Geology in China, 33(3): 461-469 (in Chinese).
- Wang X B. 2005. Geological characteristics and genesis of Yaman-Su iron deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 20(Supp.):125-128(in Chinese).
- Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, Li X M and Ma Z P. 2008. Petrogenesis of caboniferous-Early Permian rift-related volcanic rocks in the Tran-

attip.

shan and its neighboring areas, northwestern China[J]. Northwestern Ggology,41(4):1-68(in Chinese).

Yang Y J and Zhao Y J. 2011. Research on the alteration mapping using airborne hyper-spectrum remote sensing[J]. Science and Technology Herald , 29(23) :57-61(in Chinese with English Ab-stract).

附中文参考文献

- 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):445-453.
- 李厚民,丁建华,李立兴,姚通.2014.东天山雅满苏铁矿床砂卡岩成因 及矿床成因类型[J].地质学报,12(12):2477-2489.
- 刘德长,叶发旺,赵英俊,田丰,邱骏挺.2015.航空高光谱遥感金矿床定 位模型及找矿应用——以甘肃北山柳园-方山口地区为例[J].地 球信息科学学报,17(12):1545-1553.
- 涂良权,马雁飞,师书冉,殷建锋,涂金飞.2011.哈密东戈壁钼矿成矿 特征及围岩蚀变[J].新疆地质,29(4):433-436.
- 汪冰,王瑞军,李名松,董双发,牛海威,孙永彬.2014.新疆东戈壁地区 成矿有利地质单元地面高光谱蚀变矿物分析及找矿应用[J].矿 产勘查,6(5):577-585.
- 王京彬,王玉往,何志军.2006.东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. 中国地质,33(3):461-469.
- 王兴保.2005.雅满苏铁矿床地质特征及成因浅析[J].地质找矿论丛, 20(增刊):125-128.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,李向民,马中平.2008.天山及邻区石炭纪一早 二叠世裂谷火山岩岩石成因[J].西北地质,41(4):1-68.