

doi: 10.6046/zrzyg.2021036

引用格式: 王茜,任广利. 高光谱遥感异常信息在阿尔金索拉克地区铜金矿找矿工作中的应用[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 277–285. (Wang Q, Ren G L. Application of hyperspectral remote sensing data – based anomaly extraction in copper – gold prospecting in the Solake area in the Altyn metallogenic belt, Xinjiang[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 277–285.)

高光谱遥感异常信息在阿尔金索拉克地区铜金矿找矿工作中的应用

王茜¹, 任广利²

(1. 中铁干部管理培训学院, 咸阳 712000; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054)

摘要: 利用 CASI/SASI 机载高光谱遥感数据, 对新疆阿尔金成矿带索拉克一带的蚀变矿物异常信息进行提取和分析, 在此基础上总结区内蚀变矿物异常的分布规律及成因, 结合典型岩石、矿物的地面光谱测量对不同地质体蚀变矿物的光谱曲线特征进行分析和总结, 并选取索拉克铜金矿床的矿化蚀变地质剖面开展光谱测量分析, 构建该区标志性蚀变矿物组合, 建立了基于区内金矿床的高光谱遥感找矿模型。综合成矿地质背景及地球化学异常特征, 探索高光谱异常在成矿预测中的应用, 验证表明圈定的高光谱异常区域金矿化较好, 说明高光谱遥感能为找矿提供准确且可靠的信息。

关键词: 高光谱遥感; 蚀变矿物; 成矿预测; 金矿床; 阿尔金

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0277-09

0 引言

高光谱遥感技术以其丰富的光谱波段、较高的空间分辨率的特点相继被应用于地质矿产、农业、生态及环境调查等领域^[1-2]。高光谱遥感在地质矿产领域应用主要包括以下几个方面: 矿物识别与填图、岩性填图、矿业环境监测、矿山生态恢复和评价等^[3-5], 尤其是近年来该技术体系在高寒山区的地质调查和找矿勘探方面发挥了重要作用和取得良好的效果^[6-12]。

阿尔金造山带位于青藏高原北缘, 是我国重要的 Au, Cu, Pb, Zn 多金属成矿带, 目前已经形成多个大、中型矿床发育的矿集区。阿尔金成矿带内许多重要矿床与岩浆作用关系密切, 已发现的 Au, Cu, Fe, Pb, Zn 等矿床多为岩浆作用、热液作用的产物, 其围岩蚀变发育较好。然而, 由于阿尔金地区为高寒山区, 严重制约了区域地质找矿工作。前人在该区通过高光谱遥感技术已取得较好的找矿效果^[10-13]。本文以阿尔金索拉克地区金铜矿为研究区, 利用 CASI/SASI 机载高光谱遥感数据和地面光

谱测量对其蚀变信息进行了详细剖析, 构建高光谱标志性蚀变矿物组合及遥感找矿模型, 以期为该区快速识别找矿有利地区提供支撑。

1 研究区地质背景和矿区地质特征

前人综合区域地质特征、地层学、岩石学、地球化学及年代学的研究结果, 将阿尔金造山带从北至南划分为阿北地块、红柳沟—拉配泉蛇绿混杂岩带、阿中地块 (也称米兰河—金雁山地块) 和南阿尔金俯冲碰撞杂岩带等 4 个构造单元^[14-18]。阿北地块主要由太古宙麻粒岩相变质的中酸性—基性火山岩系、具孔兹岩系特征的变质岩系组成, 包括斜长角闪岩、基性麻粒岩和长英质片麻岩等^[19], 其上不整合覆以中—新元古界蓟县系—青白口系地层^[20]或南华系地层^[21]。红柳沟—拉配泉蛇绿混杂岩带为早古生代蛇绿构造混杂岩^[16-18], 索拉克地区位于阿北地块和红柳沟—拉配泉蛇绿混杂岩带结合部位。

索拉克地区出露地层为南华系索拉克组 (Nhs), 为一套浅变质火山碎屑岩、火山岩、碎屑岩夹碳酸盐岩建造, 次为第四系 (Q)。索拉克组地层

收稿日期: 2021-02-07; 修订日期: 2021-05-20

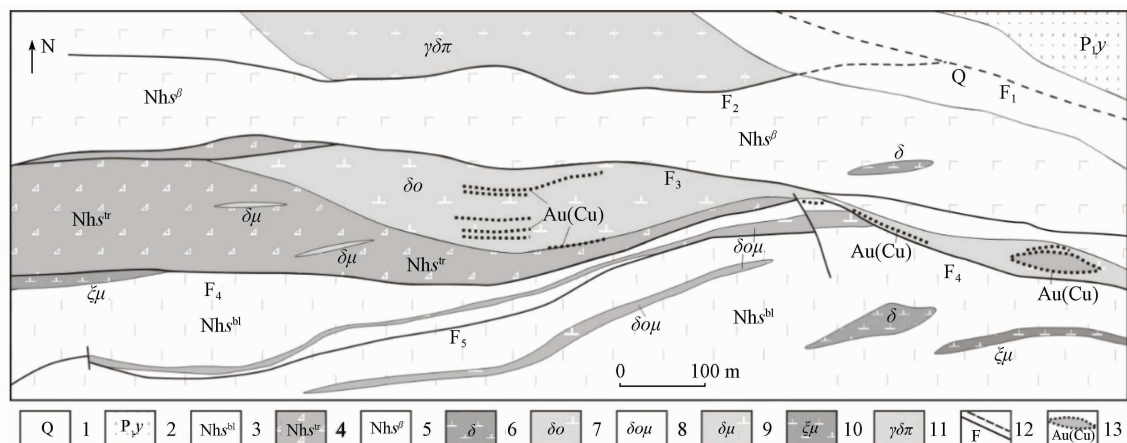
基金项目: 中国地质调查局项目“新疆重点地区航空高光谱调查与找矿预测技术研究”(编号: 12120114036501) 和“航空高光谱遥感调查”(编号: 12120113073200) 共同资助。

第一作者: 王茜 (1979-), 女, 讲师, 主要从事测绘学的教学研究工作。Email: 798345809@qq.com。

通信作者: 任广利 (1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿床地质及成矿预测研究工作。Email: renguangli9977@163.com。

普遍发生区域变质,其变质程度以浅变质为主,达到绿片岩相。变质矿物组合有绿泥石-方解石-绿帘石-黄铁矿-钠长石或绢云母-绿泥石-方解石-石英等组合。火山岩主要以南华系索拉克组(Nhs)为主,可分为3个岩性段:基性角砾熔岩段、破碎蚀变岩段和基性火山熔岩夹角砾熔岩段。侵入岩以中性及中酸性为主,有斜长花岗岩、闪长岩、石英闪长(玢)岩等。其中,石英闪长岩体蚀变发育,见黄铁矿化,少量孔雀石及黄铜矿^[11, 22]。区域内断裂构造

以压性或压扭性逆断层为主,均形成碎裂岩带,走向呈负地貌,断裂两侧发育片理化现象,其中 F_3 , F_4 和 F_5 是主要控矿断层,对区内铜金矿化及与铜金矿化有关的蚀变有明显的控制作用。次级断裂十分发育,产状与主断裂基本一致,长度数十米至数百米,形成宽 0.1~0.5 m 的破碎蚀变带,沿断层及节理裂隙黄铁矿化蚀变强烈发育,并伴有铜矿化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化等,为主要赋矿构造。矿区地质图如图 1 所示。



1. 第四系; 2. 下二叠统英格布拉克组; 3. 南华系索拉克组角砾熔岩; 4. 南华系索拉克组破碎蚀变带; 5. 南华系索拉克组玄武岩; 6. 闪长岩; 7. 石英闪长岩; 8. 石英闪长玢岩脉; 9. 闪长玢岩脉; 10. 英安玢岩脉; 11. 花岗闪长斑岩; 12. 断层(虚线为推测断层); 13. 铜矿化蚀变带

图 1 索拉克铜金矿矿区地质图(据文献[11]修改)

Fig. 1 Geological map of Solak copper-gold deposit (modified by reference [11])

地球化学异常显示 Au, Ag, As, Sb, Cu, Pb, Zn, Mo, Sn 元素含量高值区总体呈线状分布在矿区中部 F_3 , F_4 和 F_5 断层带上,或分布于次一级小断层上,远离断层出现低值区,含量高低起伏,近于平行线状排列。Au, As, Cu, Mo 异常沿破碎蚀变带分布,且 Cu, Mo 元素高值与石英闪长(玢)岩分布吻合; Pb, Zn, Ag 在蚀变带内相对较富集,局部有较大面积高值区出现。元素组合以 Au, As, Mo, Cu, Au, As, Zn, Ag 元素较明显,蚀变带内与成矿相关的中-高温热液活动具有与低温热液活动多次叠加的地球化学特征。

矿区铜金矿化蚀变破碎带控制长度 1.6 km,宽 100~200 m,走向近 EW 向,倾向南,倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$,主体受 F_3 , F_4 和 F_5 断层控制。蚀变带以黄铁矿化、黄铜矿化(孔雀石化)为主,伴有金矿化。由 3 条矿脉(带)组成。

矿石矿物见黄铁矿、黄铜矿。氧化矿物以褐铁矿为主,次为孔雀石、蓝铜矿,呈微粒状、似细脉状、薄膜状分布。黄铁矿呈半自形-他形粒状,以细脉状分布为主。黄铜矿呈它形粒状,局部呈团块状、脉状,多与黄铁矿共生。围岩蚀变发育绿泥石化、硅化、绢云母化、碳酸盐化(方解石化)、绿帘石化、石膏化,局部见有钠长石化、阳起石化、闪石化等。矿

区内金矿化产于蚀变石英闪长岩、破碎带、碎裂蚀变安山质角砾熔岩中,说明矿区的火山活动及后期的岩浆侵入活动,为矿区内铜、金成矿提供物质来源。索拉克铜金矿中金的含矿母岩为石英闪长岩,铜的含矿岩性为闪长玢岩。其金和铜平均含量分别为 281 g/t 和 693.82 g/t,远高于区域背景值,石英闪长岩中局部地段单独形成铜金矿化体。铜金矿化属于次火山岩中的热液型矿床。

2 数据源及其预处理

本次使用的 CASI/SASI 机载成像光谱仪和地面光谱测量采用 Field Spec Pro FR 光谱仪,详细参数见参考文献[6],通过机载成像光谱和地面光谱测量相结合的方法目的是为航空高光谱遥感数据解译工作提供一定的光谱地面控制,并为高光谱数据异常提取成果的质量评价提供依据。

CASI/SASI 机载成像光谱数据获取时间为 2013 年 6—7 月,飞行时间为北京时间 10:00—15:00;考虑获取数据的信噪比,要求天气晴朗,云量低,能见度大于 20 km;飞行高度相对地面航高为 1 500~2 000 m;旁向重叠率为 10%~15%。影像采用定

位定向系统(positioning and orientation system, POS) + 后差分全球定位系统(global positioning system, GPS)数据进行初步几何纠正,采用高精度激光雷达数据进行正射校正(数字高程模型(digital elevation model, DEM)精度达厘米级),误差控制在2像元以内。野外实地光谱测量,探头离地面约1.2 m,视场角选择5°探头,视场范围约0.96 m²,与CASI/SASI数据的观测尺度(空间分布率)大致相当。

航空高光谱影像数据获取后经过数据预处理(包括几何纠正、辐射校正、大气校正、噪声及坏波段去除)、航带和跨航带照度调整和光谱重建,通过ENVI平台采用基于波谱沙漏工具的矿物识别方法进行分航带矿物异常信息提取^[22],而后经过图像分析及

图像镶嵌与地理编码等过程,最终形成蚀变矿物分布图。本次研究对绢云母、绿帘石、褐铁矿、赤铁矿和透闪石等多种蚀变矿物进行了异常信息的提取。

3 索拉克铜金矿矿石光谱特征

3.1 索拉克铜金矿光谱特征

CASI影像上索拉克矿区呈灰黑色色调,影纹较粗糙,线性构造发育,以NW向、近EW向、NE向为主。蚀变矿物异常有褐铁矿、透闪石、绿帘石、高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母(图2)。异常多呈团块状、带状产出。受断裂控制作用明显,沿断裂分布区域发育强高铝绢云母、绿帘石异常等。

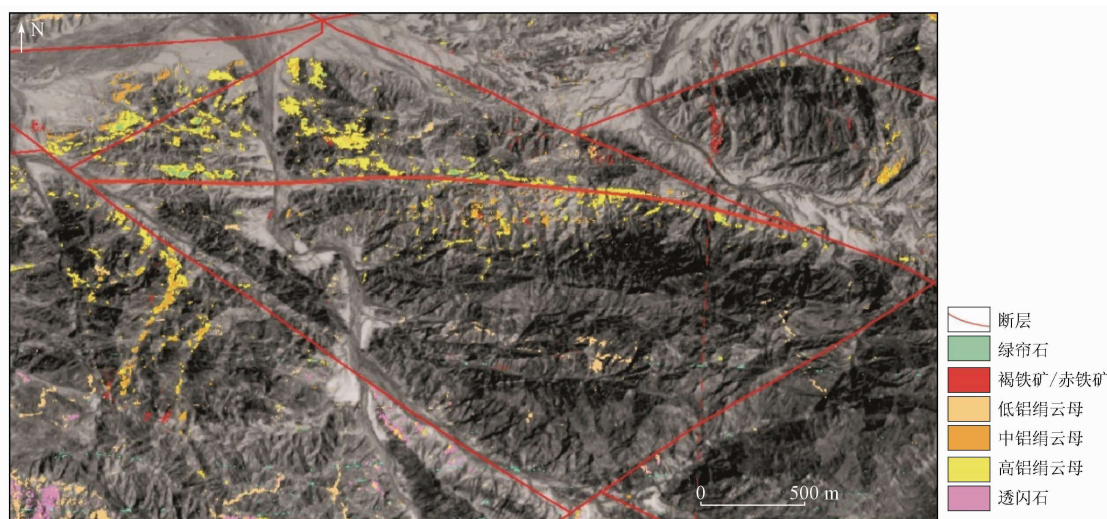


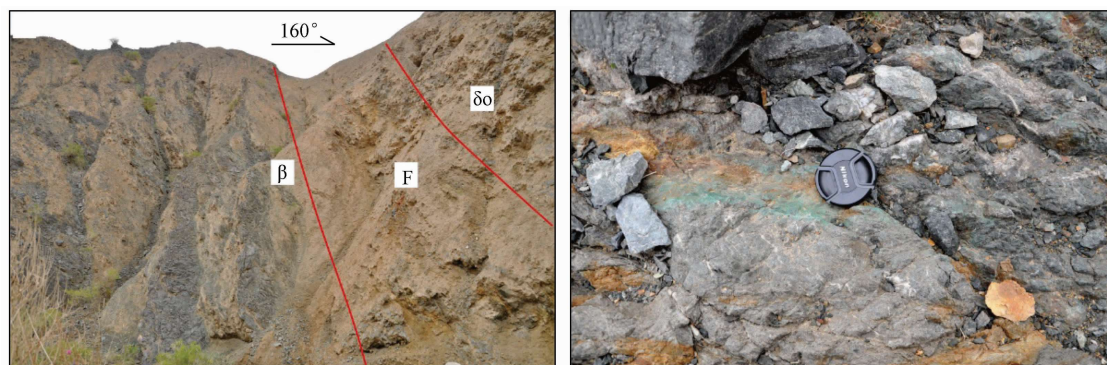
图2 索拉克金铜矿区蚀变矿物分布

(底图为650 nm(R), 550 nm(G), 450 nm(B)真彩色合成影像)

Fig. 2 Distribution of the hyperspectral altered mineral in Solak copper – gold deposit area

区内铜矿化见于闪长玢岩的裂隙、破碎蚀变带中(图3(a)),光谱测量显示含孔雀石化石英闪长岩具较低光谱反射率特征(图3(b)),具有600 ~ 1 000 nm处平坦的孔雀石Cu²⁺离子吸收峰、Fe³⁺吸收峰,2 350 nm处弱Al – OH, – OH和Mg – OH吸收峰等(图4(a))。区内中基性火山岩有玄武岩、

安山岩、英安质凝灰岩等,其表现出较为一致的特征峰,主要有600 ~ 800 nm, 800 ~ 1 000 nm, 1 000 ~ 1 200 nm处的Fe²⁺离子吸收峰,并在2 250 nm处和2 345 nm处具有Fe – OH和Mg – OH吸收峰,具有绿泥石化特征(图4(b))。金铜矿化多位于石英闪长岩的硅化蚀变破碎带中,其反射率较高,具有明显



(a) 索拉克矿区破碎蚀变带

(b) 孔雀石化石英闪长岩

图3 索拉克金铜矿化蚀变特征

Fig. 3 Alteration characteristics of Solak gold – copper mineralization

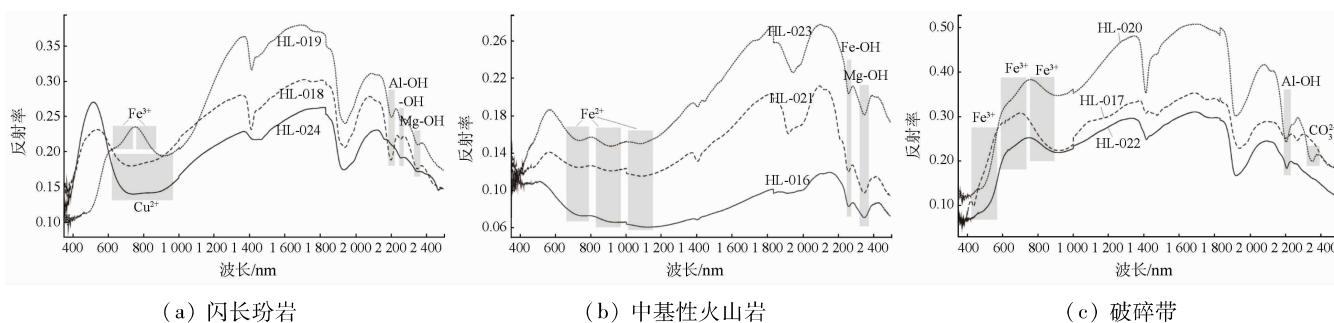


图4 索拉克金铜矿区典型岩石及破碎带光谱曲线

Fig.4 Spectra of typical rocks and broken alteration zone in the Solak copper - gold deposit area

的 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 吸收峰,黄钾铁矾吸收峰、蒙脱石类泥化吸收峰(图4(c)),个别样品见 $\text{Al}-\text{OH}$ 吸收峰,具绢云母化。区内蚀变破碎带 Au 平均品位为 0.39 g/t (HL-017),褐铁矿化石英闪长岩 Au 品位为 0.34 g/t (HL-019)。对比围岩样品具有明显的 $600 \sim 800 \text{ nm}$, $800 \sim 1\,000 \text{ nm}$ 处 Fe^{3+} 吸收峰,以及 $2\,220 \text{ nm}$ 处的 $\text{Al}-\text{OH}$ 吸收峰。

分析对比矿区内不同地质体的光谱曲线特征,矿物含量光谱解算结果,X射线衍射分析以及金矿化情况(表1),含金矿化样品中发育有 Fe^{3+} 特征峰, $\text{Al}-\text{OH}$ 特征峰和 $-\text{OH}$ 特征峰,光谱解算显示主要

由褐铁矿、黄钾铁矾、石膏、伊利石、蒙脱石、绿泥石等组成。X射线衍射矿物成分分析显示具有石英、斜长石、黄铁矿、黄钾铁矾、石膏、蒙脱石、伊利石、绿泥石等组成。区内围岩样品其矿物成分除了继承原岩的矿物成分(石英、斜长石等)外,主要还有方解石、绿泥石、伊利石、石膏等蚀变矿物。对比金矿化样品、围岩样品,认为金铜矿化样品内褐铁矿、黄钾铁矾、含 $\text{Al}-\text{OH}$ 矿物(伊利石)相对含量较高,可以作为金铜矿化的有利找矿标志。因此,在异常查证过程中,褐铁矿化(黄钾铁矾、钠铁矾)+绢云母化(伊利石化)可以作为金矿化找矿的标志性蚀变。

表1 索拉克铜金矿区不同地质体矿物组成特征

Tab.1 Mineral composition characteristics of different geological bodies in the Solak copper - gold deposit area

样号	岩性	光谱特征峰	解算结果/%	矿物组成(X射线衍射分析)/%	Au 品位/ ($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)
HL-016	绿泥石化玄武岩	$\text{Fe}-\text{OH}$ (2 250 nm), $\text{Mg}-\text{OH}$ (2 345 nm), Fe^{3+} , Fe^{2+}	方解石 34.42、绿泥石 65.58	石英 7.8、斜长石 39.4、方解石 5.4、角闪石 1.4、伊利石 2.5、绿泥石 43.5	—
HL-017	蚀变破碎带	$-\text{OH}$ (2 250 nm), $\text{Al}-\text{OH}$ (2 210 nm), Fe^{3+}	石膏 20.07、黄钾铁矾 79.93	石英 56.8、斜长石 5.4、钠铁矾 18、石膏 11.8、伊利石 8	0.39
HL-018	孔雀石化石英闪长岩	$-\text{OH}$ (2 250 nm), $\text{Al}-\text{OH}$ (2 210 nm), Cu^{2+}	伊利石 50.21、绿泥石 18.68、硅孔雀石 31.12	石英 53.7、斜长石 33.1、方解石 1、石膏 2.2、伊利石 5、绿泥石 5	<0.05
HL-019	褐铁矿化石英闪长岩	$-\text{OH}$ (2 352 nm), $\text{Al}-\text{OH}$ (2 201 nm), $\text{Fe}-\text{OH}$ (2 257 nm), Fe^{3+}	褐铁矿 59.35、蒙脱石 27.82、伊利石 8.21、绿泥石 9.62	石英 49.2、斜长石 30.7、黄铁矿 2.7、石膏 4.4、蒙脱石 2、伊利石 5、绿泥石 6	0.34
HL-020	花岗岩脉	$-\text{OH}$ (2 352 nm), $\text{Al}-\text{OH}$ (2 204 nm), $\text{Fe}-\text{OH}$ (2 248 nm), Fe^{3+}	褐铁矿 49.92、绢云母 50.08	石英 48.5、斜长石 46.1、白云石 0.7、石膏 3.7、绿泥石 1	<0.05
HL-021	安山岩	$\text{Fe}-\text{OH}$ (2 253 nm), $\text{Mg}-\text{OH}$ (2 342 nm), Fe^{3+} , Fe^{2+}	绿泥石 89.26、绢云母 10.74	—	—
HL-022	红褐色蚀变带	$\text{Al}-\text{OH}$ (2 207 nm), Fe^{3+}	褐铁矿 46.93、蒙脱石 53.07	石英 10.9、斜长石 37、黄钾铁矾 8、纤铁矾 10、石膏 19.1、伊利石 9.5、绿泥石 5.5	<0.05
HL-023	英安质凝灰岩	$\text{Fe}-\text{OH}$ (2 254 nm), $\text{Mg}-\text{OH}$ (2 344 nm), Fe^{3+} , Fe^{2+}	方解石 5.67、绿泥石 47.45、伊利石 46.87	石英 7.8、斜长石 38.7、方解石 2.5、伊利石 2、绿泥石 49	—
HL-024	孔雀石化石英闪长岩	Cu^{2+} (520 nm), CO_3^{2-} (2 342 nm)	蓝铜矿 46.55、孔雀石 31.09、方解石 22.36	石英 15.9、斜长石 31.2、方解石 0.7、石膏 0.2、伊利石 2、绿泥石 50	<0.05

3.2 研究区高光谱异常找矿标志

研究区隶属于阿尔金北缘铜-铁-金成矿带,位于阿尔金北缘断裂以南的早古生代火山-沉积岩区。其矿床类型以火山-沉积改造型、岩浆热液型矿床为主^[23]。在红柳沟等地的蛇绿岩底部超镁铁

岩中发现有铬矿,在红柳沟附近发现贝壳滩镍矿,以及索拉克岩浆热液型铜金矿。阿北地块南部边缘发育韧性剪切带,已发现破碎蚀变岩-石英脉型金矿。本次典型矿床剖析索拉克热液蚀变型金(铜)矿床。结合其高光谱蚀变矿物分布特征、地面光谱特

征测量分析,以及蚀变矿物类型分析,总结其高光谱遥感找矿标志如表 2 所示。

表 2 研究区铜金矿床高光谱遥感找矿标志
Tab.2 Prospecting marks of hyperspectral remote sensing for the copper – gold deposit in study area

标志类型	具体描述
矿床特征	成矿类型 热液蚀变型金（铜）矿
	赋矿岩石 南华系索拉克组
	矿化蚀变 褐铁矿化、黄铁矿化、硅化、孔雀石化
	围岩蚀变 绿泥石化、硅化、绢云母化、碳酸盐化、绿帘石化,石膏化
	矿体形态 脉状、透镜状
控矿构造	控矿构造 压性或压扭性逆断层形成的碎裂岩带,影像上线性构造交错发育
	成矿部位 破碎蚀变带,影像上呈线性负地形
岩浆岩	次火山岩,斜长花岗岩,闪长岩,石英闪长(玢)岩
化探异常	元素组合以 Au,As,Mo,Cu 及 Au,As,Zn,Ag 元素较明显
标志性蚀变矿物组合	高铝绢云母化、褐铁矿化、伊利石化
蚀变组合	绿泥石、绿帘石、方解石
典型矿床	索拉克金铜矿

4 找矿预测区查证和圈定

4.1 马特克萨依沟口西查证区

该区断裂构造发育,蚀变矿物异常类型多样,绢云母 + 褐铁矿蚀变矿物组合发育。典型矿床剖析显示该异常组合为金矿化的标志性蚀变矿物组合,且位于断层交汇部位。岩性为索拉克组杏仁状玄武岩,火山角砾岩、中酸性凝灰岩为主,其次为因格布拉克组灰岩、岩屑砂岩、石英砂岩等。北部见有强糜棱岩化的长城系其盖布拉克岩群细砂岩、含碳质粉砂岩夹薄层大理岩等。区内断裂构造发育包括 NWW 向、近 EW 向,以及后期 NE 向等（图 5）。异常提取显示该区发育有绿泥石、白云石、绿帘石、褐铁矿、中铝绢云母、低铝绢云母、高铝绢云母、透闪石、蛇纹石等,异常分布不均（图 5）。绿泥石 + 绿帘石 + 透闪石 + 蛇纹石异常组合分布在南部索拉克组地层中硅质岩及火山角砾岩中。中 - 高铝绢云母 + 褐铁矿异常组合主要分布在查证区北部,呈带状产出,明显受断层控制,且该区位于金化

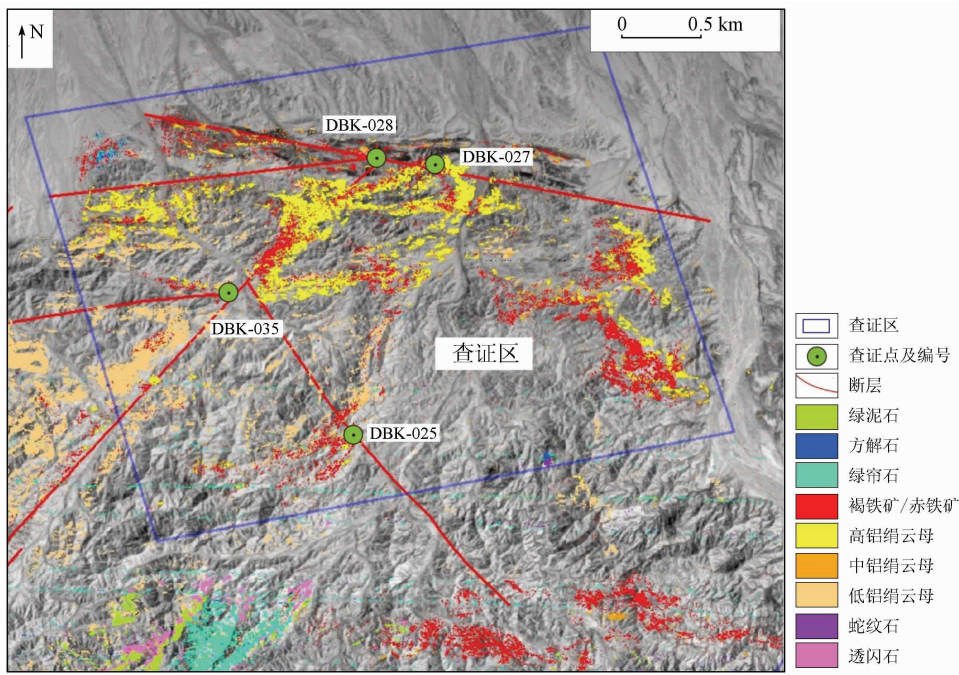


图 5 马特克萨依沟口西查证区高光谱蚀变矿物异常分布

Fig.5 Anomalous distribution of hyperspectral altered minerals in western of Matekesayigou verify area

探异常区范围。因此,在该区异常组合发育地段主要进行金矿化的查证工作。查证结果如下：

1) 查证点 DBK - 025 处分布有绢云母、褐铁矿蚀变矿物异常。高铝绢云母 - 低铝绢云母具分带特征。褐铁矿异常与中 - 高铝绢云母异常有较好的叠合性。查证显示该点位于因格布拉克组碎屑岩与索拉克组硅质岩的接触部位,二者断层接触。异常形态呈 NE 向与该区硅质碎裂岩相吻合。硅质碎裂岩

光谱曲线测量显示,具有 2 205 nm 处 Al - OH 吸收峰,以及 800 ~ 1 000 nm 处的 Fe³⁺ 吸收峰,与褐铁矿化、中 - 高铝绢云母异常相吻合,可见其褐铁矿化和绢云母化异常由碎裂硅质岩引起。

2) 查证点 DBK - 027 查证点异常类型为褐铁矿 + 中 - 高铝绢云母组合,近 EW 向线状构造发育,查证显示该处为褐铁矿化硅化破碎带,宽 3 ~ 5 m,走向约 50°,围岩为灰绿色绿泥石化、碳酸盐化凝灰岩,

受断层作用影响,岩石破碎强烈。褐铁矿化硅质碎裂岩光谱曲线发育 Fe^{3+} 吸收峰和 $\text{Al}-\text{OH}$ 吸收峰,表现出褐铁矿化、绢云母化特征,与该处异常提取类型相吻合。硅化蚀变带分析显示其具有较好的 Au 元素异常,Au 品位为 0.22 g/t 。褐铁矿化硅化蚀变带延伸较远,出露较宽,具有较好的金找矿前景。

4.2 马特克萨依沟查证区

区内蚀变矿物异常发育,有方解石、绿泥石、白

云石、绿帘石、褐铁矿、低铝绢云母、中铝绢云母、高铝绢云母、蛇纹石、透闪石(图6)。异常组合主要沿河沟两侧分布。呈 NNE 向、NE 向产出,受区内 NE 向构造控制,其地层为索拉克组火山岩地层。河道南部异常组合呈 NWW 向,与区内构造向方位一致,该区地层为石炭系—二叠系因格布拉克组碎屑岩地层。区内分布的透闪石、蛇纹石异常,主要为大理岩、超基性岩,验证显示此类高光谱异常提取准确度较低。

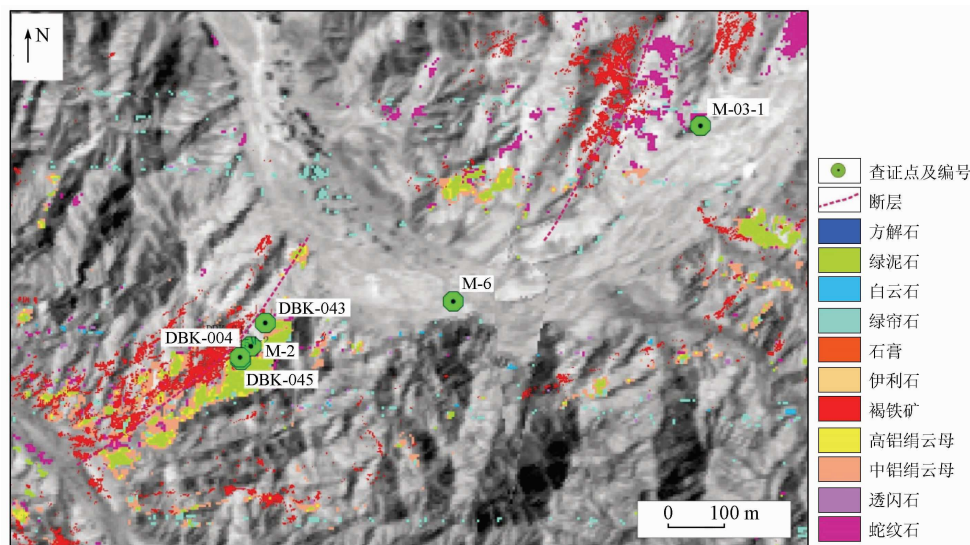
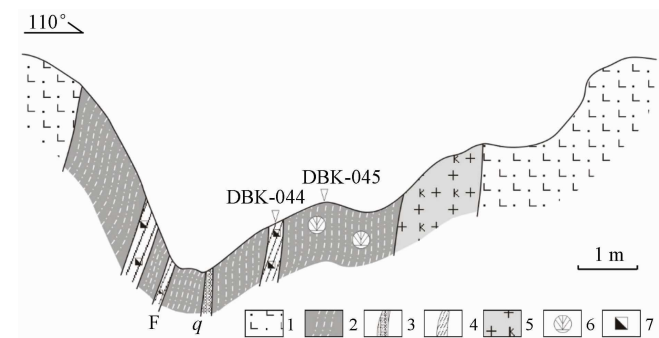


图6 马特克萨依沟查证区异常分布

Fig. 6 Anomalous distribution of hyperspectral altered minerals in Matekesayigou verify area

该区南部发育 NE 向褐铁矿化 + 绿帘石 + 绿泥石 + 低 - 中 - 高绢云母 + 透闪石异常组合,受 NE 向断层控制,分带明显,以断层为界,西北侧为褐铁矿 + 中铝绢云母异常组合,东南侧为绿泥石 + 绿帘石 + 低铝绢云母 + 高铝绢云母异常组合(图6)。查证显示其岩性为灰红色片理化、糜棱岩化凝灰岩。两侧见灰绿色凝灰岩、玄武岩(图7)。



1. 凝灰岩; 2. 糜棱岩带; 3. 石英脉; 4. 黄钾铁矾化蚀变带; 5. 钾长花岗岩; 6. 孔雀石化; 7. 褐铁矿化

图7 破碎蚀变带实地剖面

Fig. 7 Field profile of broken alteration zone

查证显示灰红色糜棱岩化凝灰岩中发育孔雀石化,孔雀石断续出露,露头延伸大于 40 m ; 并见有 3 条黄褐色黄钾铁矾化破碎蚀变带(图8),蚀变带宽

约 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$,破碎强烈,近 NS 向展布。化学分析显示,孔雀石化样品中发育较好的铜金矿化,Cu 拣块样品品位为 3.21% ,Au 刻槽样品品位为 0.07 g/t 。破碎蚀变带样品光谱曲线普遍具有 2207 nm 和 2250 nm 处 $\text{Al}-\text{OH}$ 、 $\text{Fe}-\text{OH}$ 吸收峰,表现出绢云母化(伊利石化)、黄钾铁矾化蚀变特征,这与 X 射线衍射矿物分析结果中含黄钾铁矾、伊利石、高岭土一致(表3)。在 $500 \sim 1000 \text{ nm}$ 范围内具有 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 吸收峰,表现明显的褐铁矿化蚀变特征(图9(a)),衍射分析表明其石膏含量也较高,异常结果未显示。而该区的凝灰岩则变化较大,具有 2210 nm 处 $\text{Al}-\text{OH}$ 吸收峰,表现高岭土化(BK-33),其中的石英脉见有碳酸盐化(BK-40),另在 BK-39 糜棱岩化凝灰岩样品见有 2270 nm 孔雀石吸收峰,并见有 2210 nm 处 $\text{Al}-\text{OH}$ 吸收峰(图9(b))。该区绢云母 $\text{Al}-\text{OH}$ 吸收峰表现不同特征,可能与后期花岗岩的侵入有关^[24-25]。查证点 M-6 位于查证区中部(图6),位于 NS 向断裂的延伸部位。位于灰绿色细粒闪长岩接触带上的一褐铁矿化、硅化蚀变带。发育强烈的褐铁矿化蚀变、硅化蚀变,带宽 $3 \sim 4 \text{ m}$,NS 向延伸。对其褐铁矿化石英脉取样显示其 Au 品位为 0.14 g/t ,该处受地表覆盖的影响高光



图 8 DBK -044 查证点破碎蚀变带及铜矿化照片

Fig.8 Photos of broken alteration zone and copper mineralization in verify point of DBK -044

表 3 查证区样品 X 射线衍射矿物组分分析

Tab.3 Analysis of mineral components by X – diffraction of samples in the verified area											(%)
样号	石英	斜长石	钾长石	方解石	铁白云石	黄钾铁矾	针铁矿	赤铁矿	石膏	伊利石	高岭石
BK – 30	36.6		0.8	32.3			14.4		6.4	4.0	5.5
BK – 34	64.8	4.5		7.2			1.4		2.1	8.5	11.5
BK – 37	74.3				1.1		3.7		2.4	8.5	10.0
BK – 38	46.6					12.0		0.8	18.1	9.0	13.5

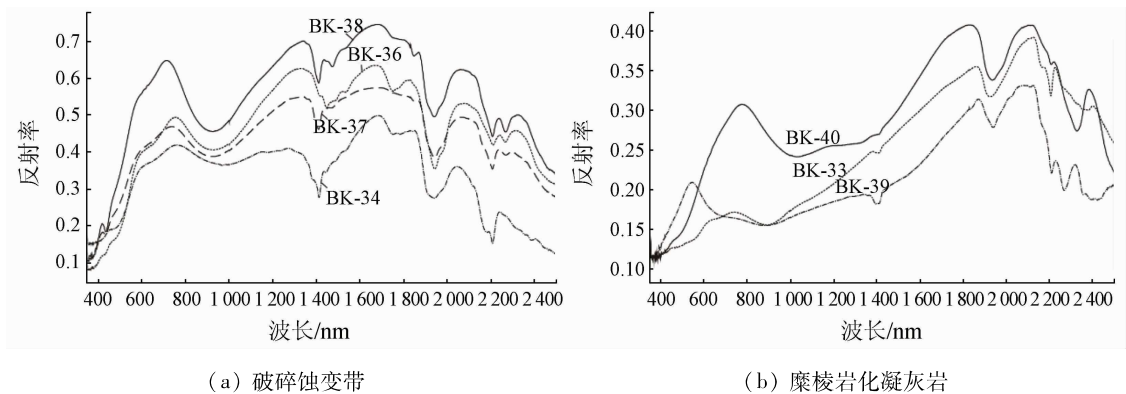


图 9 破碎蚀变带和糜棱岩化凝灰岩光谱曲线特征

Fig.9 Characteristics of spectral curve for broken alteration zone and mylonitic tuff

谱蚀变异常不发育。M -6 查证点北部线性构造发育、褐铁矿 + 绢云母化发育,见有含黄铁矿花岗岩,其内部硅化强烈,见网脉状褐铁矿化石英脉,见有弱的金矿化。通过上述查证结果,区内主要的蚀变矿物绢云母、褐铁矿、绿泥石、绿帘石、白云石、方解石、伊利石的正确率较高,均达到了 75% 以上,蛇纹石、透闪石的识别效果相对较低。

5 结论

1)通过索拉克铜金矿床的高光谱和蚀变矿物光谱测量,建立北阿尔金地区铜金矿床的高光谱遥感金矿找矿标志: 矿化体以发育褐铁矿化 + 中(高)铝绢云母化 + 伊利石化为特征,向外发育绿帘石化或绿泥石化,中心矿化部位受断裂控制,线性构造发育。地表多见硅化、黄铁矿化、孔雀石化、黄钾铁矾化、绢云母化等找矿标志。

2)综合区域地质矿产条件及高光谱遥感信息,北阿尔金地区碎裂花岗岩、闪长岩中的断层破碎带

及接触带是成矿条件有利部位。

参考文献 (References) :

[1] 周可法,孙 莉,张楠楠. 中亚地区高光谱遥感地物蚀变信息识别与提取[M]. 北京:地质出版社,2008:1 - 16.
Zhou K F, Sun L, Zhang N N. Identification and extraction of ground object alteration information by hyperspectral remote sensing in Central Asia area [M]. Beijing: Geological Publishing House,2008 :1 - 16.

[2] 张宗贵,王润生. 基于谱学的成像光谱遥感技术发展与应用[J]. 国土资源遥感,2000,12(3):16 - 37. doi:10. 6046/gtzyyg. 2000. 03. 03.
Zhang Z G, Wang R S. Imaging spectrometer remote sensing methodological technology and it's application based on spectroscopy [J]. Remote Sensing for Land and Resources,2000,12(3):16 - 37. doi:10. 6046/gtzyyg. 2000. 03. 03.

[3] 李志忠,杨日红,党福星,等. 高光谱遥感卫星技术及其地质应用[J]. 地质通报,2009,28(2 - 3):270 - 277.
Li Z Z, Yang R H, Dang F X, et al. The hyperspectral remote sensing technology and its application[J]. Geological Bulletin of China,2009,28(2 - 3):270 - 277.

- [4] 王润生,甘甫平,闫柏琨,等. 光谱矿物填图技术与应用研究[J]. 国土资源遥感,2010,22(1):1-13. doi:10.6046/gtzyyg.2010.01.01.
Wang R S, Gan P P, Yan B K, et al. hyperspectral mineral mapping and its application[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010, 22(1):1-13. doi:10.6046/gtzyyg.2010.01.01.
- [5] 辜平阳,陈瑞明,查显峰,等. 高山峡谷区 1:50 000 地质填图技术方法探索与实践——以新疆乌什北山为例[J]. 地质力学学报,2016,22(4):837-855.
Gu P Y, Chen R M, Cha X F, et al. Exploration and practice of 1:50 000 geological mapping techniques for alpine - gorge area: A case study in Beishan area of Wushi, Xinjiang[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(4):837-855.
- [6] 任广利,杨军录,杨敏,等. 高光谱遥感异常提取在甘肃北山金滩子—明金沟地区成矿预测中的应用[J]. 大地构造与成矿学,2013,37(4):765-776.
Ren G L, Yang J L, Yang M, et al. Application of hyperspectral remote sensing anomaly information on metallogenic prediction in the Jintanzi - Mingjingou area of Beishan, Gansu[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4):765-776.
- [7] 任广利,杨敏,李健强,等. 高光谱蚀变信息在金矿找矿预测中的应用研究——以北山方山口金矿线索为例[J]. 国土资源遥感,2017,29(3):182-190. doi:10.6046/gtzyyg.2017.03.27.
Ren G L, Yang M, Li J Q, et al. Application of hyperspectral alteration information to gold prospecting: A case study of Fangshankou area, Beishan[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(3):182-190. doi:10.6046/gtzyyg.2017.03.27.
- [8] 刘德长,闫柏琨,邱骏挺. 航空高光谱遥感固体矿产预测方法与示范应用[J]. 地球学报,2016,37(3):349-358.
Liu D C, Yan B K, Qiu J T, et al. The application of airborne hyperspectral remote sensing technology to mineral resources exploration[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(3):349-358.
- [9] 孙雨,赵英俊,秦凯,等. 基于航空成像高光谱数据的玉石矿找矿要素识别和找矿预测——以青海省纳赤台地区为例[J]. 地质论评,2017,63(s1):203-204.
Sun Y, Zhao Y J, Qin K, et al. Ore - forming factors and prospecting of jade ore using airborne hyperspectral data: Taken the Nachitai area in Qinghai Province as an example[J]. Geological Review, 2017, 63(s1):203-204.
- [10] 易欢,李健强,韩海辉,等. 遥感技术在阿尔金贝壳滩地区矿产资源综合调查中的应用[J]. 中国地质调查,2016,3(4):1-5.
Yi H, Li J Q, Han H H, et al. Application of remote sensing in integrated survey on mineral exploration in Beketan, Altyn[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4):1-5.
- [11] 王瑞军,董双发,孙永彬,等. 新疆索拉克地区成矿信息要素遥感解译研究及应用[J]. 矿产与地质,2016,30(6):972-979.
Wang R J, Dong S F, Sun Y B, et al. A study on remote sensing interpretation of metallogenic information elements and its application in Suolake area of Xinjiang[J]. Mineral Resources and Geology, 2016, 30(6):972-979.
- [12] 王瑞军,孙永彬,李名松,等. 新疆阿尔金盘龙沟金矿高光谱蚀变矿物找矿标志研究[J]. 地质找矿论丛,2017,32(2):300-311.
Wang R J, Sun Y B, Li M S, et al. Hyperspectral alteration mineral prospecting marks of Panlonggou gold deposit, Aejin, Xinjiang[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2017, 32(2):300-311.
- [13] 闫柏琨,董新丰,王喆,等. 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[J]. 中国地质调查,2016,3(4):55-62.
Yan B K, Dong X F, Wang Z, et al. Mineral information extraction technology by airborne hyperspectral remote sensing and its application progress: An example of mineralization belts of western China[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4):55-62.
- [14] Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogite from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China[J]. Lithos, 2001, 56:187-206.
- [15] 许志琴,杨经绥,张建新,等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪机制[J]. 地质学报,1999(3):193-205.
Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X, et al. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altyn sinistral strike - slip fault and the mechanism of lithospheric shearing[J]. Acta Geological Sinica, 1999(3):193-205.
- [16] Gao X F, Xiao P X, Guo L, et al. Opening of an early Paleozoic limited oceanic basin in the northern Altyn area: Constraints from plagiogranites in the Hongliugou - Lapeiquan ophiolitic mélange[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54:1871-1879.
- [17] Gao X F, Xiao P X, Kang L, et al. Late Ordovician back - arc extension in the southeastern margin of the Tarim Craton, NW China: Elemental and Sr - Nd isotopic constraints from the Hongliugou basalts[J]. Geochemical Journal, 2019, 53:359-378.
- [18] 车自成,刘良,罗金海. 中国及其邻区区域大地构造学[M]. 北京:科学出版社,2002:207-369.
Che Z C, Liu L, Luo J H. Tectonics of China and adjacent region[M]. Beijing: Science Press, 2002:207-369.
- [19] 孙勇,刘池阳,车自成. 阿尔金拉配泉地区元古界裂谷火山岩系及其构造意义[J]. 地质论评,1997,43(1):17-24.
Sun Y, Liu C Y, Che Z C. The Proterozoic rift volcanic series in the Lapeiquan area, the Altun mountains and its tectonic significance[J]. Geological Review, 1997, 43(1):17-24.
- [20] 胡云绪,校培喜,高晓峰,等. 东昆仑西段 - 阿尔金地区区域地层划分及地层时空格架建立[J]. 西北地质,2010,43(4):152-158.
Hu Y X, Xiao P X, Gao X F, et al. Division and space - time frame foundation of regional stratum in the western sector of east Kunlun and the Altun region[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4):152-158.
- [21] Lu S N, Li H K, Zhang C L, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments[J]. Precambrian Research, 2008, 160:94-107.
- [22] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京:科学出版社,2010:361-373.
Deng S B. The method of ENVI remote sensing image processing[M]. Beijing: Science Press, 2010:361-373.
- [23] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1993.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Au-

- onomous Region. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [24] Bierwirth P, Huston D, Blewett R. Hyperspectral mapping of mineral assemblages associated with gold mineralization in the central Pilbara, Western Australia[J]. *Economic Geology*, 2002, 97: 819 – 826.
- [25] van Ruitenbeek F J A, Debba P, van der Meer F D, et al. Mapping white micas and their absorption wavelengths using hyperspectral band ratios[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102: 211 – 222.

Application of hyperspectral remote sensing data – based anomaly extraction in copper – gold prospecting in the Solake area in the Altyn metallogenic belt, Xinjiang

WANG Qian¹, REN Guangli²

(1. *China Railway Cadre Management Training Academy, Xianyang 712000, China*; 2. *Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an, 710054, China*)

Abstract: This study extracted and analyzed the altered mineral anomalies in the Suolake area in the Altyn metallogenic belt, Xinjiang using the airborne hyperspectral remote sensing data (CASI/SASI). Based on this, the distribution pattern and genesis of the altered mineral anomalies in the area were summarized. Then, the spectral curve characteristics of altered minerals from different geologic bodies were analyzed and summarized according to the ground spectrum measurement of typical rocks and minerals. Meanwhile, the spectral measurement and analysis of the geologic profiles of altered minerals in the Suolake copper – gold deposit were conducted. Then, representative altered mineral assemblages were determined, and the hyperspectral remote sensing prospecting model based on gold deposits in this area was established. Base on metallogenic geological setting and geochemical anomaly characteristics, this study explored the application of hyperspectral remote sensing data – based anomaly extraction in metallogenic prediction. The results verified that the anomaly areas delineated using hyperspectral remote sensing data have favorable gold mineralization, suggesting that hyperspectral remote sensing can provide accurate and reliable information for ore prospecting.

Keywords: hyperspectral remote sensing; altered minerals; prospecting model; gold deposits; Altyn

(责任编辑: 张 仙)