

刘新星, 张弘, 张娟, 等. 基于红外光谱技术研究内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿蚀变和矿化特征[J]. 岩矿测试, 2021, 40(1): 121 – 133.

LIU Xin-xing, ZHANG Hong, ZHANG Juan, et al. A Study on Alteration Mineral Assemblages and Mineralization Characteristics of a Wunugetushan Porphyry Copper – Molybdenum Deposit in Inner Mongolia, China, Based on Infrared Spectroscopy[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(1): 121 – 133. 【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202005060010】

基于红外光谱技术研究内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿蚀变和矿化特征

刘新星¹, 张弘², 张娟^{1*}, 史维鑫², 张新乐¹, 成嘉伟¹, 卢克轩¹

(1. 河北地质大学, 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031;
2. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201)

摘要: 近年来, 红外光谱技术在矿物学研究、地质勘探与找矿等方面发挥了重要作用。本文通过测量与分析内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿 Z661 钻孔岩心短波红外和热红外波段的光谱, 快速厘定了该矿床的蚀变矿物类型及组合特征。结果表明: 乌奴格吐山斑岩铜钼矿床蚀变矿物主要有石英、钾长石、绢云母、伊利石、高岭石和蒙脱石等。蚀变矿物组合在空间上呈现出明显的分带性, 其中石英 + 伊利石 + 绢云母 + 钾长石与矿化关系最为密切, 可作为找矿的标型矿物组合; 结合钻孔 Cu、Mo 矿化分布特征, 发现绢(白云母) 2200nm 处吸收峰位置的波长偏移与成矿中心距离有关, 波长变小, 更趋向于成矿中心; 且伊利石结晶度(IC) 越大, 结晶度较高, 矿化程度强。因而, 该技术方法通过蚀变矿物波谱, 能够快速圈定斑岩铜钼矿蚀变矿物组合, 进而提高勘查效率。

关键词: 钻孔岩心; 红外光谱; 蚀变分带; 斑岩铜钼矿; 乌奴格吐山

要点:

- (1) 应用短波红外光谱和热红外光谱技术识别出乌奴格吐山铜钼矿的蚀变矿物。
- (2) 乌奴格吐山蚀变矿物具有明显的分带性, 且矿床矿化与蚀变分带具有明显的关联性, 矿化位置的蚀变组合主要是石英 + 伊利石 + 绢云母 + 钾长石组合。
- (3) 绢(白)云母 2204nm 吸收峰位置的长波偏移和成矿中心有很大关联, 矿化位置主要集中在吸收位置 2197 ~ 2206nm 处, 其波长的偏移能够帮助确定矿化中心位置。

中图分类号: P575.4 文献标识码: A

斑岩铜(钼)矿床作为世界上最重要的一种矿床类型, 提供了全球大约 75% 以上的铜和 50% 以上的钼^[1-4]。由于其经济价值巨大, 斑岩铜(钼)矿一直作为全球重要勘查目标倍受国内外矿业公司及地质学家重视^[5-6]。典型的斑岩铜矿模式具有面状蚀变分带特征, 且在用于指导找矿的过程中堪称典范^[2,6-7], 然而, 对于蚀变分带高度套合以及细粒蚀

变矿物占主导的矿床, 仅依据肉眼和传统野外工具很难对其进行有效识别和蚀变带的划分, 且难以有效识别具体蚀变矿物微弱变化所蕴含的有效信息^[8-9]。因此, 引入新的勘查技术方法对于建立这类矿床有效的找矿标志及勘查模型十分必要。

红外光谱矿物测量技术是近年来发展起来并逐步成熟的一种应用于矿物光谱测量的遥感技术,

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-10-16; 接受日期: 2020-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702352); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190411, DD20190379-91); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019144); 河北地质大学博士启动基金(BQ2017012)

作者简介: 刘新星, 博士, 副教授, 研究方向为遥感地质学。E-mail: liuxinxing963@163.com。

通讯作者: 张娟, 博士, 讲师, 研究方向为矿床学。E-mail: zhangjqtds@126.com。

具有使用简单方便、分析快速、不破坏样品等特点,短波红外波段(350~2500nm)能有效识别并提取含羟基、硫酸盐、碳酸盐类和含氨基矿物等低温蚀变矿物的光谱特征参数;热红外波段(6000~14500nm)能有效识别并提取长石、石英、辉石、橄榄石等相对高温的无水硅酸盐矿物;红外光谱技术在指导找矿方面具有较大优势^[10-11],短波红外技术被广泛应用于国内外矿床填图及勘查工作^[8,12-14],而短波红外和热红外结合可以发挥更大的作用。

乌奴格吐山矿床内发育大面积的硅化、绢云母化和泥化蚀变,三者对钾化带高度套合,仅利用传统方法难以进行区分。本文系统分析了内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床岩心的短波红外和热红外光谱特征,旨在确定热液蚀变矿物的种类、组合及其在空间上的分布规律,厘定其与矿化的关系,为乌奴格吐山斑岩铜钼矿下一步外围及深部矿产勘查提供技术支持。

1 地质概况

乌奴格吐山斑岩铜钼矿床位于大兴安岭北段西侧新巴尔虎右旗内蒙古满洲里一带。截至2016年,已探明铜金属量223.2万吨,钼金属量41.2万吨,属于大型铜钼矿床^[15]。区内地层从老到新为:上元古界一下寒武统佳疙瘩群绿片岩相及变质碳酸盐岩;中生界以火山岩为主,发育大面积粗面安山岩、粗面岩和流纹岩;下白垩统局部碎屑岩出露^[16-17]。该区构造主要有NE向和NW向两组断裂,其中NE向额尔古纳—呼伦贝尔深断裂控制着火山岩的分布,NW向断裂为主要控矿构造。岩浆活动频繁,主要有印支期、燕山早期和燕山晚期中酸性—碱性侵入岩,其中燕山早期最为发育,岩性主要为石英斑岩、二长斑岩、花岗闪长岩和斜长花岗斑岩等^[18-28](图1)。

乌奴格吐山矿床主要产于由酸性、中酸性火山—次火山杂岩体构成的火山机构内。成矿母岩为燕山早期侵入的二长花岗斑岩^[25-26],为过铝质钙碱性花岗岩,形成年龄为 $179 \pm 2\text{Ma}$ ^[15-17]。晚期岩浆活动形成英安质角砾熔岩以及一些中酸性岩脉,对矿体起破坏作用。这些火山杂岩体侵入于外围的黑云母花岗岩中。矿体主要分布在二长花岗斑岩和黑云母花岗岩内外接触带,具钼外铜特征,以细脉浸染型为主,品位较低,矿石主要为硫化矿石,氧化矿和混合矿石仅局部发育^[22]。矿石矿物主要为辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿、铜蓝、黝铜矿、辉铜矿和方铅矿等。

乌奴格吐山铜钼矿床以二长花岗斑岩为中心,由内向外主要蚀变组合类型为石英—钾长石化、石英—绢云母化和伊利石—水白云母化^[17](图2),缺失青磐岩化带,但可见到绿泥石化、绿帘石化和碳酸岩化等。钾长石化主要发育在二长花岗岩顶部,常被其他蚀变矿物叠加,往外岩体强烈绢英岩化(图2a,b),次为伊利石化、绿泥石化、绿帘石化、高岭石化、白云母化和碳酸盐化(图2c,d,e,f)等。

2 实验部分

本次样品测试采用澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)设计的HyLogeer-3系统,测试的对象是内蒙古自治区乌努格吐山铜矿的Z661钻孔岩心,波谱解译采用该系统配套的The Spectral Geologist软件(TSG8.0)。

2.1 测量仪器性能

HyLogger系统是由澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)设计,中科遥感在我国最先代理并进行推广。光谱范围为350~2500nm,6000~14500nm;光谱分辨为3nm(350~1100nm);约10nm(1100~2500nm);约25nm(6000~14500nm)。HyLogger-3系统基于反射光谱分析技术,采集和分析岩心、切片和粉末样品的矿物学信息,该系统得益于高光谱领域和遥感技术的发展,是多年大量研究的成果,为使用者提供了一种客观的获取矿物详细数据的方式,提高了地质解释的效率和生产力。

2.2 样品测试

本次测试的样品是乌奴格吐山铜钼矿床ZK661钻孔的岩心,该岩心中有明显铜钼矿化。野外样品经过清洗晾干之后,将装有钻孔岩心的托盘放置在Hylogger自动化平台上,然后系统自动将测试的波谱数据传递到控制主机。钻孔终孔深度为1300.2m,本次扫描从5m处开始,到1300.2m处结束,扫描间隔为2.5cm,共扫描出56182条波谱曲线,数据记录编号为“钻孔号—测试点序号”,例如ZK661-10652。其波谱数据用TSG8.0解译分析发现,主要蚀变矿物有绢云母、伊利石、钾长石、蒙脱石、绿泥石和硅化等。

2.3 数据分析软件

TSG软件全称“The Spectral Geologist”(光谱地质专家),是专门针对于光谱地质应用开发的软件,集合了各种地质光谱数据的分析算法及澳大利亚CSIRO专门测试的一套矿物光谱数据库,并以此为基准针对不同矿物的提取方法构建了各种模型^[29]。此次使用的是最新版本TSG8.0。

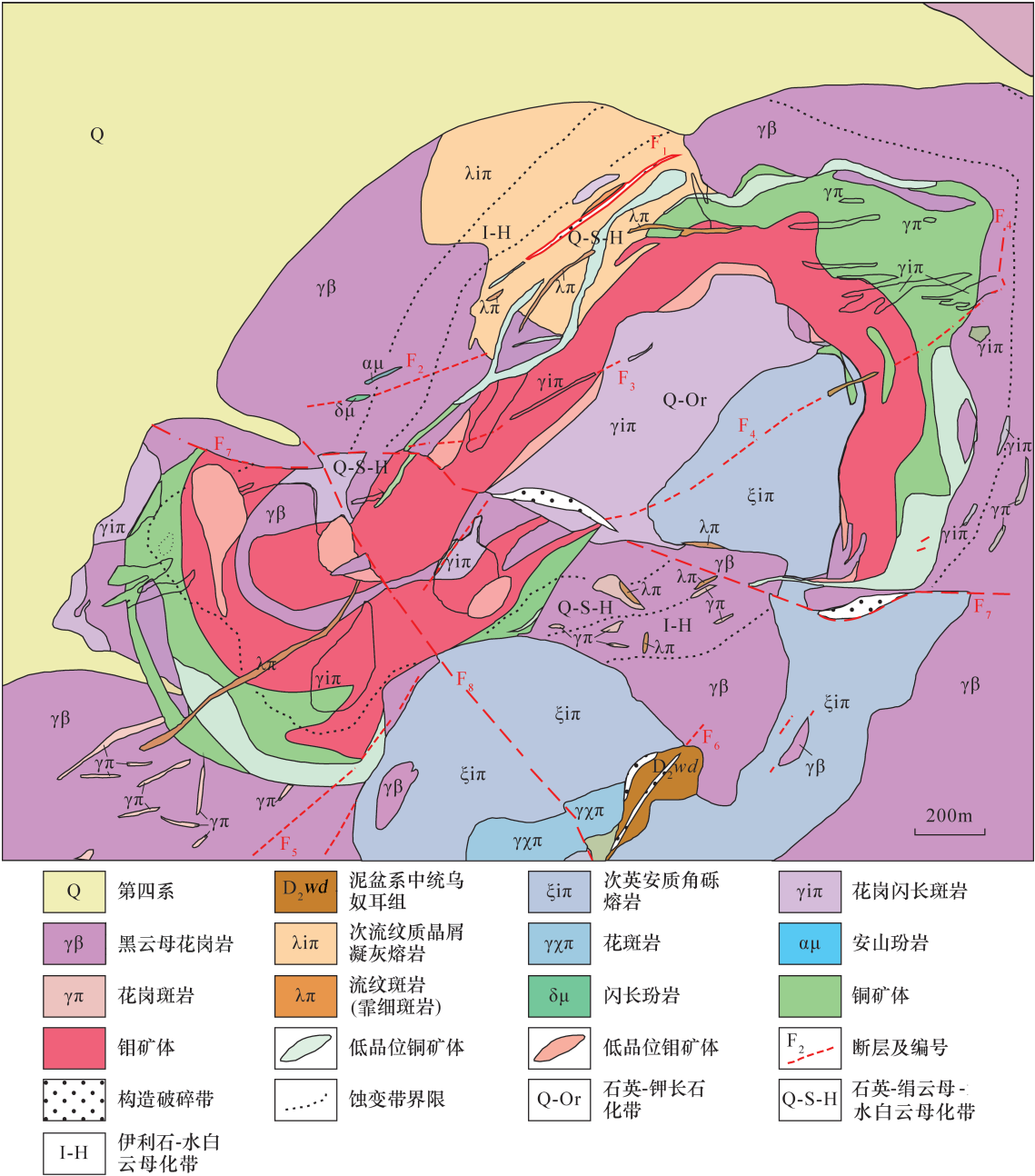


图 1 内蒙古乌奴格吐山斑岩型铜钼矿地质图^[20]

Fig.1 Geological map of porphyry type copper – molybdenum deposit in Wunugetushan, Inner Mongolia^[20]

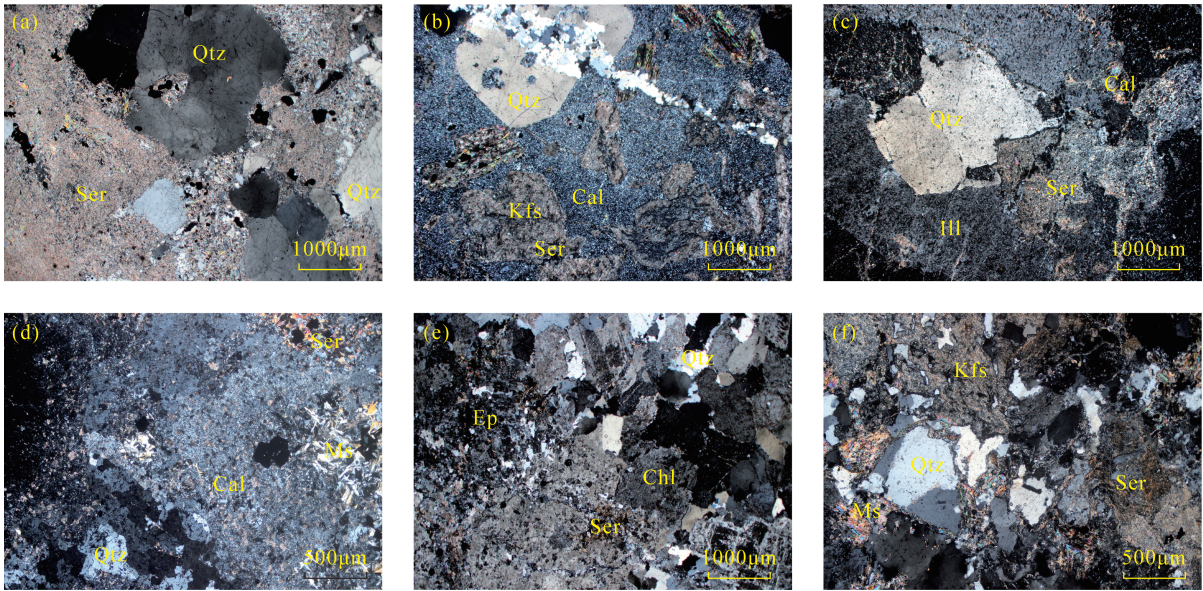
3 结果与讨论

3.1 样品光谱特征及分布

3.1.1 白云母族矿物

该组矿物常见矿物种类是白云母、钠云母、多硅白云母、伊利石。白云母(或者绢云母)分子式为 $(K,Na)_2(Al,Fe,Mg)_4(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4$ 的一组层状硅酸盐。该矿物在 1408nm、2200nm、2348nm 和 2442nm 处具非常明显的吸收特征。钠云母是一种富 Na 的白云母,分子式为 $Na_2Al_4(Si_6Al_2)O_{20}(OH)_4$,

其波谱特征与白云母近似,主要吸收特征位置在 1410nm、1910nm、2200nm、2345nm 及 2440nm,主要区别是 2200nm 处反射率最小值的波长位置在 2190nm 附近,比白云母值小。多硅白云母分子式为 $K_2(Al,Mg,Fe)_4(Si_{6+x},Al_{2-x})O_{20}(OH)_4$,四面体中 Si: Al 值大于 3: 1,常出现在岩浆岩的热液蚀变岩中,其波谱特征与白云母类似,吸收位置在 1410、1910、2200、2350、2445nm,其 2200nm 处的吸收谷位置在 2210 ~ 2225nm,较白云母值大^[30]。



a—绢英岩；b—钾长石斑晶被绢云母叠加，基质绢云母化、碳酸盐化；c—伊利石化二长花岗岩，钾长石被绢云母和碳酸盐叠加；d—二长花岗岩白云母化、绢云母化、硅化及碳酸盐化；e—二长花岗岩硅化、绿泥石化、绿帘石化及黏土化；f—二长花岗斑岩绢云母化、白云母化。
Kfs—钾长石；Ms—白云母；Cal—方解石；Chl—绿泥石；Ep—绿帘石；Qtz—石英；Ser—绢云母；Ill—伊利石。

图 2 内蒙古乌奴格吐山斑岩型铜钼矿床岩心标本镜下照片(正交偏光)

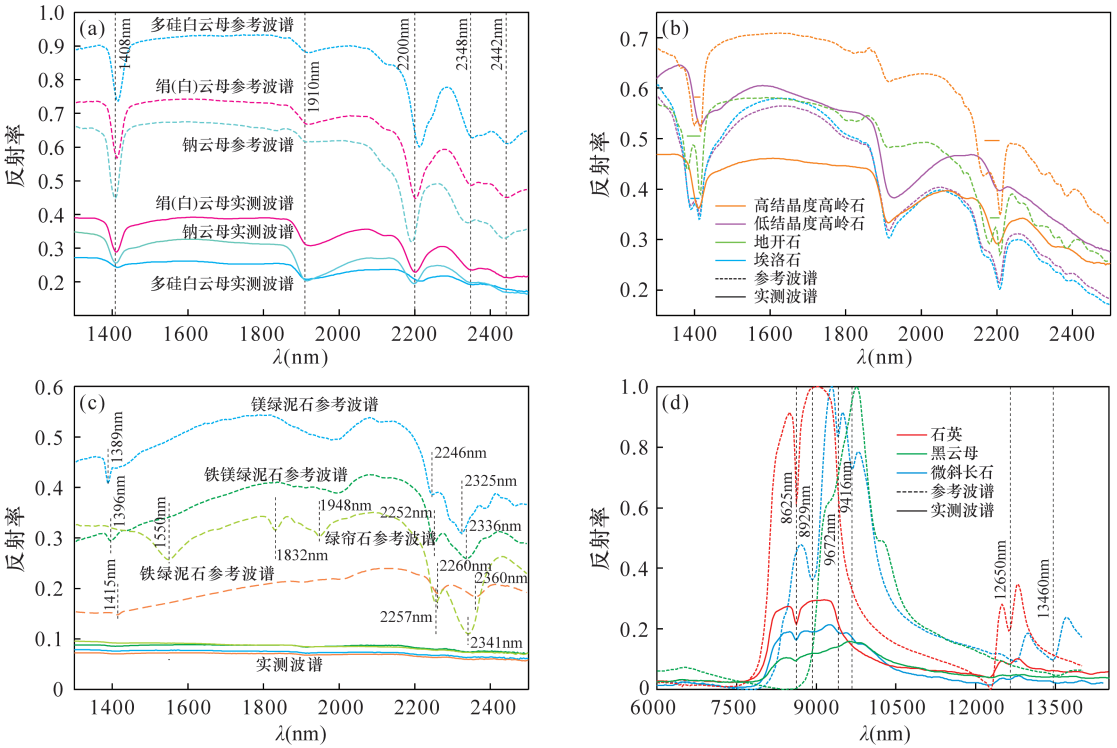
Fig. 2 Core samples microscopic photos of porphyry - type copper - molybdenum deposits in Wunugetushan, Inner Mongolia (orthogonal polarization)

白云母族矿物的 Al—OH 的波长范围从 2190nm 变化到 2225nm。白云母的成分从钠云母(富 Al、含 Na, Al—OH 位移)变化至白云母(富 K 和 Al), 再至多硅白云母(贫 Al、富 Mg 或 Fe), Al—OH 吸收峰位置从 2190nm 变化到 2200nm, 再到 2225nm 附近^[14]。文中短波红外光谱检测的绢云母与白云母属同类矿物, 同时也是该钻孔中含量最多的蚀变矿物, 几乎在整个钻孔内都有出现。以 ZK661 - 10652 测试点为例, 该处的主要蚀变矿物为绢云母, 与绢(白)云母的标准波谱曲线作对比, 可见该钻孔中绢云母的光谱吸收特征主要分布在 2200nm 附近, 且有明显的吸收峰, 在 2350nm 和 2440nm 附近有次级吸收峰(图 3a)。以钻孔深度为横坐标轴, 以绢(白)云母 Al—OH 在 2200nm 附近的吸收峰波长位置为纵坐标轴, 可见绢(白)云母随钻孔深度变化的空间分布情况(图 4)。可以发现, 绢(白)云母的吸收峰位置随深度有着显著的变化, 局部有升有降, 整体上可看出吸收位置随深度逐渐变大, 推测钻孔可能存在一个退蚀变的过程, 矿化位置主要集中在吸收位置 2197 ~ 2206nm 处。另外, 在钻孔 337m、590m、1014m 等处可见吸收位置有小范围内的异常高值, 推测可能与构造裂隙有关系。

伊利石(也称水云母)分子式为 $K_{2-x}Al_4(Si_{6+x}Al_{2-x})O_{20}(OH)_4$ 含水层状硅酸盐矿物, 其组成与白云

母不同, 其层间 K 略低, 四面体 Si 更高, 含更多的水, 为常见的一种低温热液蚀变矿物, 存在于绢英岩化或泥化区, 且可以形成于各种岩石类型和环境。伊利石波谱特征的主要吸收位置在 1408、2200、2348、2442nm, 在 2100nm 处有一个小吸收峰区。伊利石的波谱特征与白云母、绢云母非常类似, 主要区分于伊利石在 1910nm 和 1460nm 处有深的吸收带。其结晶度的变化会导致吸收谷深度的变化, 而且由于 K、Na、Al 等阳离子的替代会引起吸收位置的位移。研究表明, 往短波方向靠近 2190nm 可能含更多 Na; 往长波方向, 接近 2206nm, 则含更多的 K; 含 Fe 的伊利石在 2240nm 处有吸收特征^[30]。伊利石在整个钻孔中均有出露, 尤其在 400 ~ 1300m 较为发育, 其发育程度为仅次于绢云母的蚀变矿物。

在热液蚀变条件下, 相对高温区形成的伊利石, 结晶度较高; 相对低温区形成的伊利石, 结晶度低。利用短波红外技术可以测试并计算伊利石结晶度(IC), 其值等于 2200nm 处的吸收深度除以 1900nm 处的吸收深度^[31-32]。另外, 用峰形状值(A 值)也可以表征伊利石的另一个参数, 峰形值为吸收峰高除以半峰宽比值。伊利石生成时, 温度越高, 伊利石结晶越好, IC 和 A 值越大, 也即高温区形成的伊利石其红外光谱在 2200nm 波长位置的吸收峰较为尖锐^[32]。



a—云母族的短波红外反射波谱曲线；b—黏土矿物的短波红外波谱曲线；c—绿泥石与绿帘石的短波红外反射波谱曲线；d—石英、黑云母、微斜长石的热红外反射波谱曲线。

图 3 不同矿物的实测与参考反射率波谱曲线(参考波谱来自 TSG 软件)

Fig. 3 Measured and referenced reflectance spectral curves of different minerals (The reference spectrum is from TSG software manual)

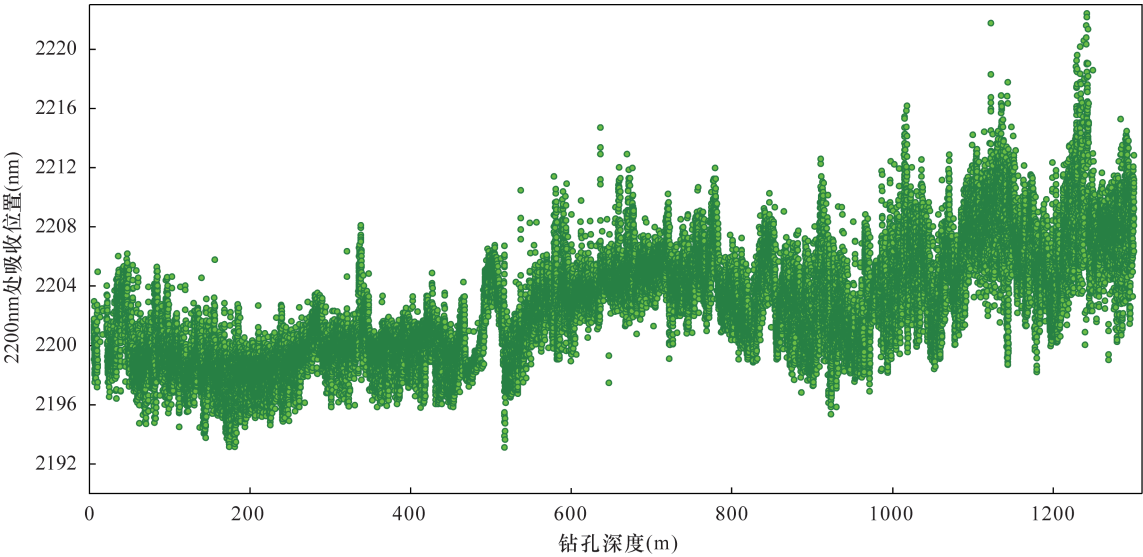


图 4 绢云母 2200nm 吸收位置随钻孔深度变化图

Fig. 4 Absorption position of sericite at 2200nm varied with the depth of the drillhole

3.1.2 蒙脱石

蒙脱石 $[(Ca, Na)_{0.67}Al_4(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O]$ 主要是在碱性条件下,由富铝、铁镁硅酸盐矿

物经热液蚀变作用形成。该矿物在 2208nm 附近表现出强烈的吸收特征,并且在 1410nm、1910nm 处有显著的不对称特征;相较于白云母,蒙脱石在

2345nm 与 2440nm 处没有显著的吸收特征。蒙脱石在该钻孔中零星分布于各个深度,整体含量偏低,主要与绢云母、伊利石形成蚀变矿物组合。

3.1.3 高岭石

高岭石 $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ 是长石等其他硅酸盐矿物蚀变所产生的含水铝硅酸盐。高岭石和地开石一样,主要形成于酸性环境下,但是在热液蚀变系统中,高岭石的形成温度略低于地开石。在短波红外光谱中,高岭石在 1400nm 和 2200nm 处出现双吸收峰,在 1400nm 处双吸收峰位置间的距离较地开石近($<15\text{nm}$),地开石通常在 25~35nm 处,埃洛石处于二者中间;而在 2200nm 处的双吸收峰距离高岭石明显大于地开石。另外,高岭石结晶度的差异会引起双吸收峰宽度和深度的差异,结晶度越差的高岭石的波谱特征在双吸收峰的左峰吸收深度逐渐变小(2170nm 附近),且直至呈现出肩部的形态(图 3b)。在该钻孔中高岭石主要分布在靠近地面部分,随着深度增加而快速减少至没有,极少出现在其他蚀变矿物组合中。陈华勇等^[11]在铜绿山铜铁金矿床短波红外勘查标识时指出,高岭石在 2170nm 的吸收峰的波长位置及吸收深度可以反映热液中心的位置,越近热液中心其吸收位置及深度值均有增大的趋势。

3.1.4 绿泥石和绿帘石

绿泥石 $[\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}]_{12}[(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16}]$ 是火山岩或者泥岩的中低级变质程度的主要矿物,在热液矿床的蚀变系统中,与绿帘石、方解石一起构成了青磐岩化带。富 Fe 绿泥石的波谱位置在 2260nm 和 2350nm,而富 Mg 绿泥石的波谱位置则在 2250nm、2330~2340nm(图 3c)。由于绿泥石八面体中 Fe 与 Mg 的二价离子含量的变化,导致绿泥石波谱吸收位置的变化。通常在大多数情况下,富铁绿泥石的吸收谷在 2260~2265nm,而富镁绿泥石的吸收谷在 2255~2260nm。2250nm、2330nm 处绿泥石最小反射峰波长位置与 Mg 的含量呈线性关系^[30]。从热液系统的边缘到中心,绿泥石的成分发生变化,其吸收谷的波长位置逐渐向长波方向位移^[13]。另外,绿泥石与黑云母的吸收特征比较接近,富镁黑云母在 2385nm 有一个次级吸收峰,可以作为区分绿泥石的标志^[33]。

绿帘石 $[\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})]$ 是斑岩铜金矿中青磐岩化蚀变带的一个重要组成部分,该蚀变带通常包含绿泥石、绿帘石和碳酸盐岩。其主要的短波红外特征是在 2340nm 有个吸收谷,在 2258nm 处

有一个尖锐且稍弱的吸收谷。其波谱特征容易与绿泥石相混淆,但是其有另外两个诊断波谱吸收特征,依次为 1550nm、1884nm,可以进行区分(图 3c)。

3.1.5 方解石

在热液系统中,方解石(CaCO_3)通常与绿泥石、绿帘石一起形成于最外侧的青磐岩化带。方解石的波谱在 2336~2340nm 处有一个吸收峰,呈现明显的不对称的特征,通常在 2300nm 处呈现一个肩部形状。白云石的吸收峰位置在 2325nm,比方解石的吸收峰波长位置 2340nm 值小。方解石主要在 500m 附近及 850~1000m 范围内局部出露。

3.1.6 石英

石英在 1400nm 与 1900nm 处有水的组合吸收特征,且在 8625nm、12650nm 处有比较尖的吸收峰,在 7400nm 有一宽的吸收峰(图 3d)。利用石英热红外波谱特征,本次解译了钻孔中的石英矿物(图 5),在该钻孔的各个蚀变带中均普遍发育石英;在 500m 以浅的位置,石英占比较大,推测应为硅化作用的结果。

3.1.7 钾长石

长石是钾、钠、钙等碱金属或碱土金属的铝硅酸盐矿物,也称长石族矿物。钾长石($\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$)也称正长石,属单斜晶系,通常呈肉红色、白色或灰色。钾长石系列主要是正长石、微斜长石、透长石等。钾长石是斑岩铜矿蚀变组合中钾化带的主要矿物成分之一。微斜长石的热红外波谱特征为 8929nm、9416nm、9672nm、13460nm 处有明显的吸收峰(图 3d)。在该钻孔中,微斜长石较为发育,与石英、黑云母等矿物共生,主要出露在 400~1200m 处,与矿化关系较为密切。

3.1.8 黑云母

黑云母 $[\text{K}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_6(\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20})(\text{OH})_4]$ 是一种常见的铁镁矿物。在热液矿床中,黑云母通常在高温钾带早期形成,这种黑云母一般比前期火成岩含有更多的镁。黑云母很容易风化成蒙脱石或高岭石。典型黑云母在短波红外波谱上有两个主要吸收特征,在 2255nm 附近及 2345nm,另外在 2345nm 处呈现肩形,为一个相对弱的特征。黑云母矿物中随着 Mg/Fe 比的增加,上述两个吸收特征会逐渐向短波方向位移,偏向于 2245nm 和 2330nm,且 2385nm 处的弱吸收会变得明显^[30]。黑云母的热红外波谱在 9775nm 处有一较强的发射峰,8600nm 处有一宽的反光谷(图 3d)。由于短波红外反射率低,难以识别出黑云母,热红外则可以识别;从热红外解译结果看出,该钻孔在 1240~1250m 孔深处有少量

黑云母出现,与石英共生,推测为黑云母花岗岩中的造岩矿物。

3.2 蚀变矿物组合及分带

蚀变矿物常与岩性之间存在着一定的相关关系,相同岩性中蚀变矿物的分布能够反演流体的活动期次,不同岩性中的蚀变矿物的周期性变化或突然转变也代表着岩性之间的依存关系或相关性^[16]。选取钻孔 ZK661 为研究对象,从岩性、蚀变矿物的分带可以得出以下特征。

(1)根据岩心编录结果,该钻孔从顶部到底部岩性分布为:第四系残坡积→霏细斑岩→黑云母花岗岩→次斜长花岗岩→黑云母花岗岩→石英闪长斑

岩→黑云母花岗岩→霏细斑岩→黑云母花岗岩→次斜长花岗斑岩→黑云母花岗岩→次斜长花岗斑岩→黑云母花岗岩→霏细斑岩→黑云母花岗岩→次斜长花岗斑岩→黑云母花岗岩→次斜长花岗斑岩→花岗斑岩→辉绿岩→次斜长花岗斑岩→黑云母花岗岩。岩性以黑云母花岗岩、次斜长花岗斑岩为主,霏细斑岩次之。其中,黑云母花岗岩和次斜长花岗斑岩与矿化关系最为密切。

(2)短波红外测量钻孔显示,蚀变矿物在空间上呈现出明显的分带性(图 5),从顶部到底部蚀变矿物组合划分为:石英+绢云母+高岭石→石英+绢云母+钠云母+蒙脱石→绢云母+伊利石+钾长石+

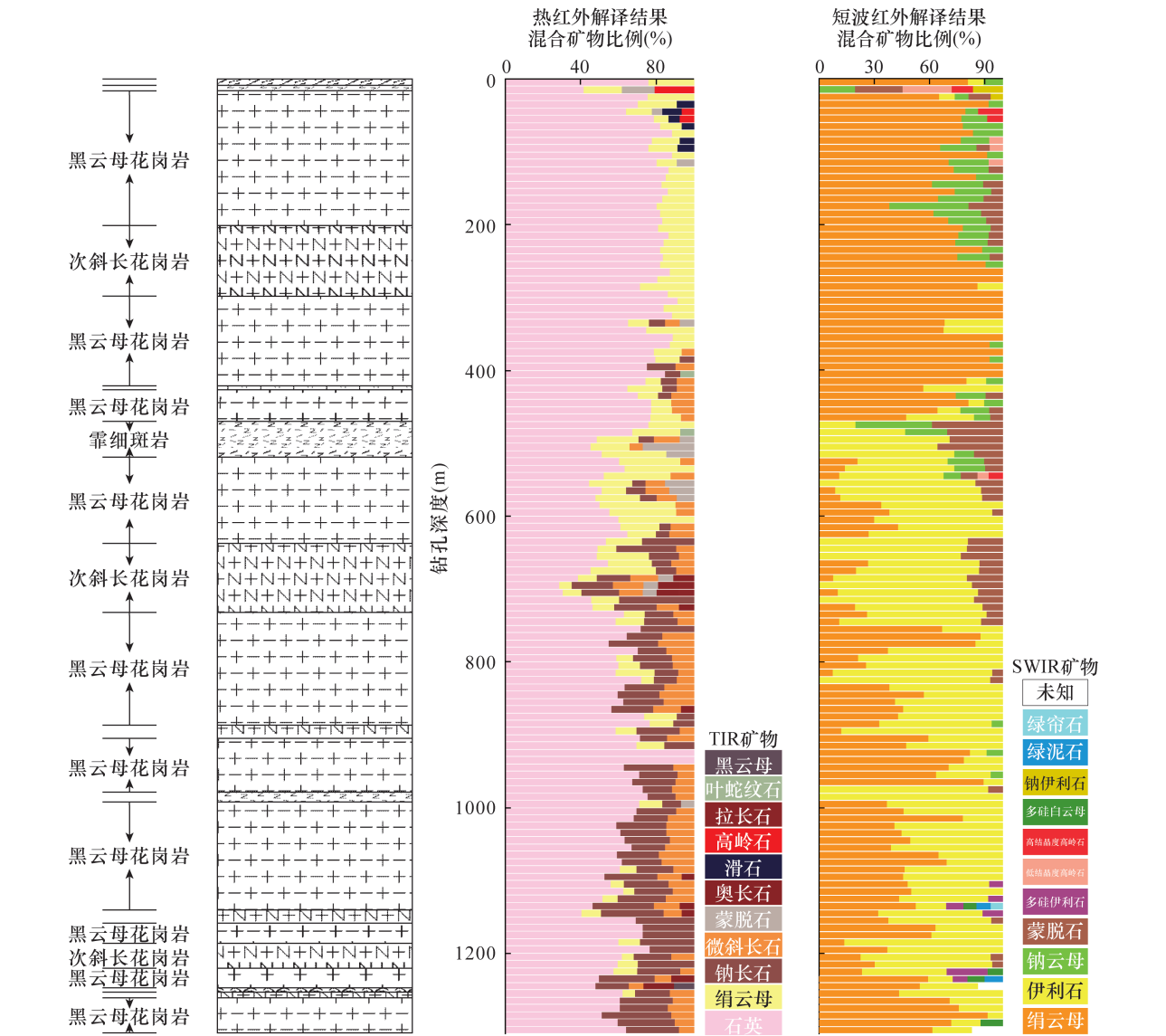


图 5 乌奴格吐山铜钼矿 ZK661 钻孔短波红外与热红外蚀变矿物及岩性分布柱状图
Fig. 5 Short wave infrared and thermal infrared altered mineral and lithologic distribution histograms in Wunugetushan copper molybdenum mine ZK661

蒙脱石→石英+伊利石+绢云母+钾长石+蒙脱石
→伊利石+绢云母→石英+绢云母+钾长石+伊利
石→绢云母+伊利石+多硅白云母。与矿化关系密
切的矿物组合为:石英+伊利石+绢云母+钾长石。

钻孔中的蚀变矿物主要有石英、钾长石、绢云
母、伊利石、蒙脱石和高岭石等,局部有黑云母和绿
泥石,解译的结果与前人的研究基本一致^[17]。通过
钻孔 ZK661 主要蚀变矿物与赋存岩性对比分析,发
现硅化为贯通性蚀变,但在 450m 以下硅化比例减
少,其他蚀变矿物比例增加。热红外蚀变矿物结果
显示 1050m 以下蚀变减弱,而短波红外蚀变矿物结
果仍显示有大量绢云母和伊利石发育,推测可能为
钻孔岩体周边有深大断裂存在,岩体总体上被不同
程度地风化蚀变。钾长石在钻孔从 400m 至底部均
有不同程度发育。短波红外蚀变矿物结果显示在
0~450m,绢云母蚀变占主导地位,而在 450m 至底
部,绢云母+伊利石占主导地位,但二者比例有变
化。结合热红外蚀变矿物结果,石英+绢云母+伊
利石+钾长石在 600~750m 最为发育,在 850~
960m 和 1080~1250m 出现小峰值,二者也对应了
最强的矿化和弱矿化。高岭石主要在浅地表部位发
育,蒙脱石在 500m、650m 出现了蚀变峰值,推测可
能是这些部位可能存在断裂,岩体泥化小规模发育。

钻孔编录显示矿化分带为上铜下钼,与蚀变矿
物组合关系如下:绢云母和伊利石主要赋存于黑云
母花岗岩和次斜长花岗斑岩中,高岭土主要分布在
钻孔顶部的第四系残坡积中。在 116.99~212.17m
星点状、细脉状黄铁矿分布普遍,偶见星点状黄铜
矿、细脉状辉钼矿,以石英-绢云母-水云母化、硅
化为主,次之为石英-伊利石化,可见绿泥石化、绿
帘石化,在裂隙面偶见青磐岩化;在 628.28~
631.88m 黄铜矿矿化较好,蚀变类型为伊利石+绢
云母;在 633.58~727.77m 矿化较好,黄铜矿呈星
点状分布为主,可见集密块状分布;辉钼矿呈星点
状、细脉状分布,局部呈浸染状分布,沿石英脉的
两侧均可见辉钼矿分布,蚀变以钾化、硅化为主,次
之为水云母-白云母化、伊利石化,青磐岩化在裂隙
面明显;在 899.76~972.00m 黄铜矿以星点状、细
脉状(细脉近似直立)分布为主,偶见集密块状;辉
钼矿多呈星点状、细脉状分布,可见浸染状,沿石
英脉的两侧有发育,蚀变以早期的钾化、硅化为主,
次之为石英-绢云母-水云母化、伊利石化,部分裂
隙面青磐岩化明显;在 1121.92~1238.62m 黄铜
矿、辉钼矿矿化有所变强,黄铜矿呈星点状、致密
块状分布,

而辉钼矿以星点状、细脉状分布为主,可见浸染
状,沿部分石英脉有较好的分布,蚀变以钾化、硅
化为主,次之为绢云母-水云母化,局部见伊利石
化。

综上所述,无论是蚀变矿物类型、组合、矿化
和矿化强弱及断裂、裂隙发育等,热红外和短波
红外蚀变矿物分析结果与钻孔编录显示的地质特
征基本对应,与矿化密切相关的蚀变矿物组合为:
石英+绢云母+钾长石+伊利石。

3.3 热液流体演化

Al—OH 在短波红外区间的特征波长位置变
化能够反映成矿环境的变化,同时波峰吸收深度
与成矿之间也存在一定关系^[34]。绢云母和伊
利石于成矿位置和矿石赋存有一定的关系。例如
Z661 中的绢云母在铜矿含量低时(深度<600m),
其 2200nm 处吸收峰的波长位置在 2197~2204nm
之间;在铜矿含量增高(深度 600~1300m)时,其
吸收位置在 2204~2208nm 之间。根据前人研究
结果,一般 Al—OH 在 2200nm 处吸收峰最小值的
波长位置在接近热液中心的值越高,当远离矿化
中心时,吸收位置值减小。另外,从图 5 短波红
外解译结果可以看出,该钻孔的浅部出现了钠云
母和绢云母,而深部逐渐转变为多硅白云母,说
明随着深度增加 Si 元素逐渐增多,Al 逐渐减少,
温度也呈现降低的趋势,可能为退蚀变作用的结
果。该矿经历一个多期成矿的过程,因而,其 Al—
OH 变化较为复杂。

相比于绢云母,伊利石的 IC 值对矿物的含量
有很大关系。从图 6 可以看出,伊利石的 IC 值影
响矿物的富集程度,而且伊利石的含量也随着铜
含量的增加而增加,在 600~800m 铜含量较高
的地方,伊利石的含量也有所增加,其吸收峰位
置在 2205~2210nm 之间,说明愈加接近热液活
动中心位置。Al—OH 在 2200nm 处的吸收深度,
一定程度上也可以反映伊利石的结晶程度及成
矿环境的温度。图 6 显示吸收深度与铜钼矿的
矿化程度呈现正相关,且随着吸收深度值增加,
更加靠近铜钼矿化中心位置。

伊利石属于绢云母系列,又称之为含水绢云
母,该矿物在 1910nm 及 2200nm 附近有两处特
别的吸收峰,本次利用伊利石在 2200nm 与 1910
nm 附近的吸收深度进行比值运算,推导出伊利
石的结晶度(IC),IC 值越大其结晶度越好。通
过图 6 可知,伊利石 IC 值的变化与铜矿赋存有
一定的关系,经分析得知,该钻孔伊利石的 IC 值
在 0.867~0.874 之间,且铜矿的品位随着 IC 值
的增加而增加。

通过这些研究,可以得出该钻孔铜矿的品位与

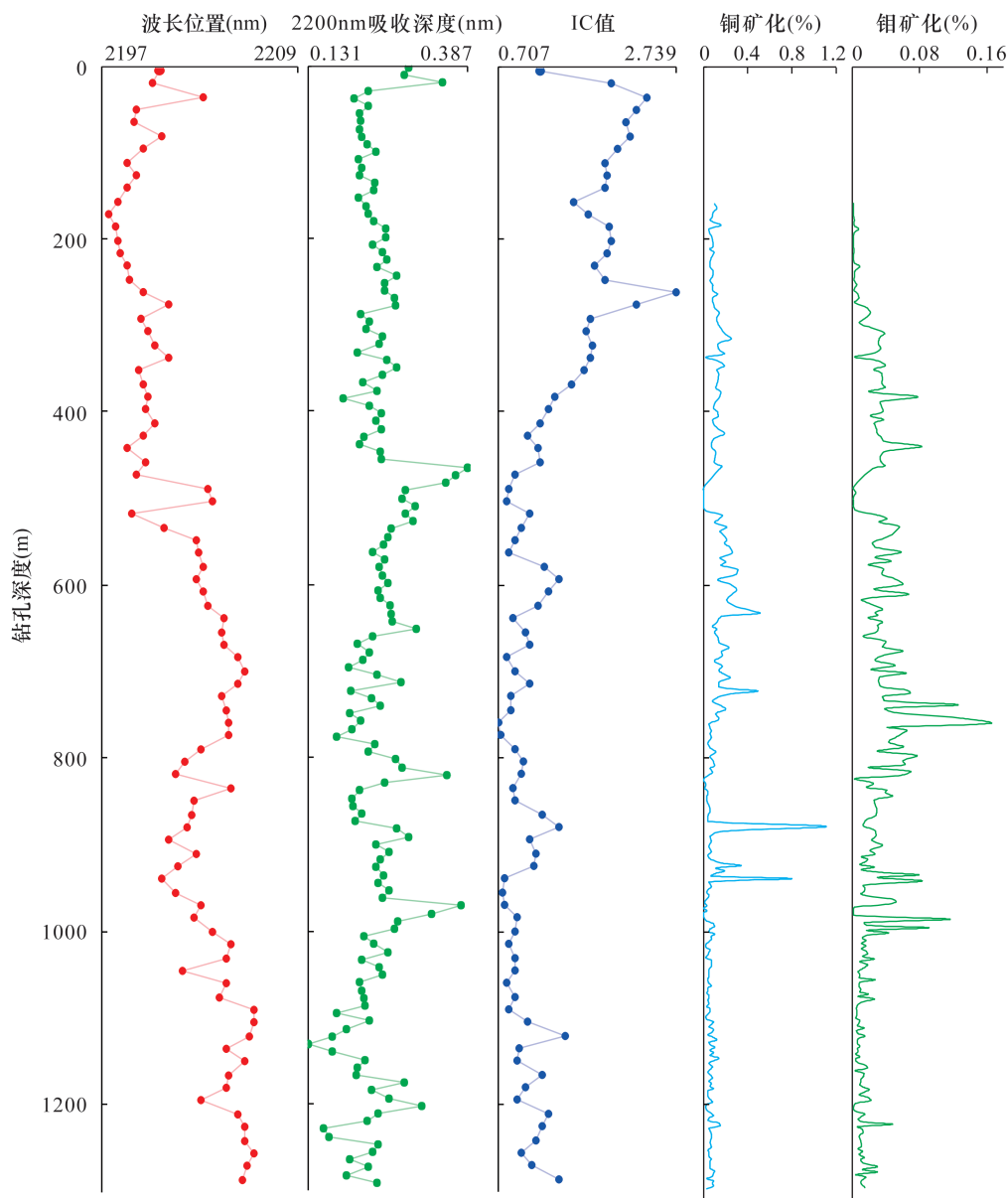


图 6 乌奴格吐山铜钼矿 Z661 钻孔波谱参数与铜钼矿化的关系

Fig. 6 Relationship between borehole spectrum parameters and copper - molybdenum mineralization in Wunugetushan copper molybdenum mine Z661

绢云母和伊利石的吸收位置有直接关系;在铜钼矿赋存时(600 ~ 1000m),绢云母的吸收位置主要集中在 2197 ~ 2206nm 处,即主要集中在短波 Al—OH,这对于确定热液中心提供了重要依据。

4 结论

本文应用短波红外技术对乌奴格吐山斑岩铜钼矿床的 ZK661 号钻孔进行蚀变分析,识别出绢云母、伊利石、蒙脱石、高岭石等蚀变矿物,蚀变矿物组

合在空间上呈现出明显的分带性;结合矿化特征,发现矿化与蚀变分带具有相关性,蚀变带中石英 + 伊利石 + 绢云母 + 钾长石与矿化关系最为密切,可作为找矿的标型矿物组合。绢(白云母)在 2200nm 处吸收峰位置的波长偏移与成矿中心距离有关,波长变小,更趋向于成矿中心;且伊利石结晶度(IC)越大,结晶度较高,矿化程度强。因而,该技术方法通过蚀变矿物波谱,能够快速圈定斑岩铜钼矿蚀变矿物组合,进而提高勘查效率。

5 参考文献

- [1] Sillitoe R H. Porphyry – copper systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 3 – 41.
- [2] Seedorff E, Dilles J H, Proffett J M, et al. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features [C]//*Proceedings of Economic Geology 100th Anniversary*. 2005: 251 – 298.
- [3] Sinclair W D. Porphyry deposits [C]//Goodfellow W D, ed. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit – types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2007: 223 – 243.
- [4] Cooke D R, Hollings P, Wilkinson J J, et al. Geochemistry of porphyry deposits [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 1(3): 357 – 381.
- [5] Holliday J R, Cooke D R. Advances in geological models and exploration methods for copper ± gold porphyry deposits [C]//Milkereit B, ed. *Proceedings of exploration 07: Fifth decennial international conference on mineral exploration*. Toronto: Prospectors and Developers Association of Canada, 2007: 791 – 809.
- [6] Richards J P. Tectono – magmatic precursors for porphyry Cu – (Mo – Au) deposit formation [J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 1515 – 1533.
- [7] Hedenquist J W, Richards J P. The influence of geo – chemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits [J]. *Reviews in Economic Geology*, 1998, 10: 235 – 256.
- [8] Thompson A J B, Hauff P L, Robitaille A J, et al. Alteration mapping in exploration: Application of short – wave infrared (SWIR) spectroscopy [J]. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 1999, 39: 1 – 13.
- [9] 田丰, 冷成彪, 张兴春, 等. 短波红外光谱技术在西藏尼木地区岗讲斑岩铜 – 钼矿床中的应用 [J]. *地球科学*, 2019, 44(6): 2143 – 2154.
Tian F, Leng C B, Zhang X C, et al. Application of short wavelength infrared technique in exploration of mineral deposits: A review [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2019, 44(6): 2143 – 2154.
- [10] Chang Z, Yang Z. Evaluation of inter – instrument variations among short wavelength infrared (SWIR) devices [J]. *Economic Geology*, 2012, 107 (7): 1479 – 1488.
- [11] 陈华勇, 张世涛, 初高彬, 等. 鄂东南矿集区典型矽卡岩 – 斑岩矿床蚀变矿物短波红外 (SWIR) 光谱研究与勘查应用 [J]. *岩石学报*, 2019, 35 (12): 3629 – 3643.
- Chen H Y, Zhang S T, Chu G B, et al. The short wave infrared (SWIR) spectral characteristics of alteration minerals and applications for ore exploration in the typical skarn – porphyry deposits, Edong ore district, eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35 (12): 3629 – 3643.
- [12] 章革, 连长云, 王润生, 等. 便携式短波红外矿物分析仪 (PIMA) 在西藏墨竹工卡县驱龙铜矿区矿物填图中的应用 [J]. *地质通报*, 2005, 24(5): 480 – 484.
Zhang G, Lian C Y, Wang R S, et al. Application of the portable infrared mineral analyser (PIMA) in mineral mapping in the Qulong copper prospect, Mozhugongka County, Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24 (5): 480 – 484.
- [13] 张世涛, 陈华勇, 张小波, 等. 短波红外光谱技术在矽卡岩型矿床中的应用——以鄂东南铜绿山铜铁金矿床为例 [J]. *矿床地质*, 2017, 36(6): 1263 – 1288.
Zhang S T, Chen H Y, Zhang X B, et al. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique to exploration of skarn deposit: A case study of Tonglvshan Cu – Fe – Au deposit, Edongnan (southeast Hubei) ore concentration area [J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(6): 1263 – 1288.
- [14] 连长云, 章革, 元春华, 等. 短波红外光谱矿物测量技术在普朗斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用 [J]. *矿床地质*, 2005, 24(6): 621 – 637.
Lian C Y, Zhang G, Yuan C H, et al. Application of SWIR reflectance spectroscopy to Pulang porphyry copper ore district, Yunnan Province [J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(6): 621 – 637.
- [15] 谭钢, 常国雄, 余宏全, 等. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿 – 钼同位素定年及其地质意义 [J]. *矿床地质*, 2010, 29(增刊): 506 – 508.
Tan G, Chang G X, She H Q, et al. The Re – Os isotope dating of molybdenite and its geological significance in the porphyry copper – molybdenum deposit of Wunugetushan, Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposit*, 2010, 29(Supplement): 506 – 508.
- [16] 陈志广, 张连昌, 万博, 等. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床低 Sr – Yb 型成矿斑岩地球化学特征及地质意义 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(1): 115 – 128.
Chen Z G, Zhang L C, Wan B, et al. Geochemistry and geological significances of ore – forming porphyry with low Sr and Yb value in Wunugetushan copper – molybdenum deposit, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(1): 115 – 128.
- [17] 谭钢. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床成矿作用研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2011.

- Tan G. The ore – forming processes and mineralization of Wunugetushan porphyry Cu – Mo deposit, Inner Mongolia [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011.
- [18] 李宁. 内蒙古乌奴格吐山铜钼矿成矿侵入岩特征及成矿时代 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2013.
- Li N. Study on characteristics of intrusive rocks related to mineralization and metallogenic time of Wunugetushan Cu – Mo deposit, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [19] 王荣全, 宋雷鹰, 曹书武, 等. 乌奴格吐山斑岩铜 – 钼矿地球化学特征及评价标志 [J]. 矿产与地质, 2007, 21 (5): 515 – 519.
- Wang R Q, Song L Y, Cao S W, et al. Geochemical characteristics of the Wunugetushan porphyry Cu – Mo deposit and its evaluation indicators [J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21 (5): 515 – 519.
- [20] 尹煜春. 内蒙古乌奴格吐山次火山斑岩型铜 – 钼矿床控矿因素分析及找矿方向 [J]. 矿产与地质, 2007, 21 (3): 298 – 303.
- Yin Y C. Ore controlling factors of subvolcanic porphyry type copper molybdenum deposit in Wunugetushan of Inner Mongolia, and its ore prospecting orientation [J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21 (3): 298 – 303.
- [21] 王泉. 内蒙古满洲里—新巴尔虎右旗铜银多金属成矿带地质特征、成矿模式及预测 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- Wang Q. Geological characteristics, metallogenic model and prognosis of Manzhouli—Xinbaerhuyouqi Cu, Ag, polymetal metallogenic belt in Inner Mongolia [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [22] 张海心. 内蒙古乌奴格吐山铜钼矿床地质特征及成矿模式 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- Zhang H X. Geological characteristics and metallogenic model of the Wunugetushan porphyry Cu – Mo deposit, Inner Mongolia [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [23] 黄力军, 刘瑞德, 陆桂福, 等. 乌奴格吐山铜矿物化探索异常特征及外围找矿 [J]. 物探与化探, 2004, 28 (5): 418 – 420, 424.
- Huang L J, Liu R D, Lu G F, et al. Characteristics of geophysical and geochemical anomalies in the Wunugetushan copper deposit and ore prospecting work on the outskirts [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 28 (5): 418 – 420, 424.
- [24] 秦克章, 李惠民, 李伟实, 等. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床的成岩、成矿时代 [J]. 地质论评, 1999, 45 (2): 180 – 185.
- Chen K Z, Li H M, Li W S, et al. Intrusion and mineralization ages of the Wunugetushan porphyry Cu – Mo deposit, Inner Mongolia, northwestern China [J]. Geological Review, 1999, 45 (2): 180 – 185.
- [25] 陈殿芬, 艾永德, 李荫清, 等. 乌奴格吐山斑岩铜钼矿床中金属矿物的特征 [J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15 (4): 59 – 63, 65 – 67.
- Chen D F, Ai Y D, Li Y Q, et al. Characteristics of metallic minerals from the Wunugetushan porphyry copper – molybdenum deposit [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1996, 15 (4): 59 – 63, 65 – 67.
- [26] 秦克章, 王之田. 内蒙古乌奴格吐山铜 – 钼矿床稀土元素的行为及意义 [J]. 地质学报, 1993, 67 (4): 323 – 335.
- Qin K Z, Wang Z T. Rare earth element behaviour in the Wunugetushan Cu – Mo deposit, Inner Mongolia, and its significance [J]. Acta Geologica Sinica, 1993, 67 (4): 323 – 335.
- [27] 金力夫, 孙凤兴. 内蒙乌奴格吐山斑岩铜钼矿床地质及深部预测 [J]. 长春: 长春地质学院学报, 1990 (1): 61 – 67.
- Jin L F, Sun F X. Correlation between the northern southern ore sections in Wunugetushan porphyry copper deposit, Inner Mongolia, China [J]. Changchun: Journal of Changchun University of Earth Science, 1990 (1): 61 – 67.
- [28] 叶欣, 王莉娟. 乌奴格吐山斑岩铜钼矿床流体包裹体与成矿作用研究 [J]. 地质与勘探, 1989 (6): 14 – 21.
- Ye X, Wang L J. A study on fluid inclusion and metallogenesis of a porphyry Cu – Mo deposit, Urugetu Hill, Inner Mongolia, China [J]. Geology and Exploration, 1989 (6): 14 – 21.
- [29] 郭娜, 刘栋, 唐菊兴, 等. 基于短波红外技术的蚀变矿物特征及勘查模型——以斯弄多银铅锌矿床为例 [J]. 矿床地质, 2018, 37 (3): 556 – 570.
- Guo N, Liu D, Tang J X, et al. Characteristics of alteration minerals and prospecting model revealed by shortwave infrared technique: Take Sinongduo Ag – Pb – Zn deposit as an example [J]. Mineral Deposits, 2018, 37 (3): 556 – 570.
- [30] Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. The spectral geologist software help of common minerals [M]. 2019.
- [31] 黄一入, 郭娜, 郑龙, 等. 基于遥感短波红外技术的三维蚀变填图——以低硫化浅成低温热液型矿床斯弄多为例 [J]. 地球学报, 2017, 38 (5): 779 – 789.
- Huang Y R, Guo N, Zheng L, et al. 3D geological alteration mapping based on remote sensing and

- shortwave infrared technology: A case study of the Sinongduo low – sulfidation epithermal deposit[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(5): 779 – 789.
- [32] 彭自栋. 甘肃岗岔金矿短波红外找矿应用及伊利石成因矿物学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Peng Z D. Short wave infrared and illite's genetic mineralogy study of gold deposit in Hezuo, Gansu Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [33] 郭娜. 甲玛斑岩 – 矽卡岩型铜矿床蚀变矿物组合研究——基于高光谱短波红外技术[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
Guo N. The altered mineral assemblage research in Jiama porphyry – skarn copper deposit—Based on hyperspectral high frequency wave infrared technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [34] Yang K, Huntington J F, Gemmell J B, et al. Variations in composition and abundance of white mica in the hydrothermal alteration system at Hellyer, Tasmania, as revealed by infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Geochemical Exploring, 2011, 108(2): 143 – 156.

A Study on Alteration Mineral Assemblages and Mineralization Characteristics of a Wunugetushan Porphyry Copper – Molybdenum Deposit in Inner Mongolia, China, Based on Infrared Spectroscopy

LIU Xin – xing¹, ZHANG Hong², ZHANG Juan^{1*}, SHI Wei – xin², ZHANG Xin – le¹,
CHENG Jia – wei¹, LU Ke – xuan¹

- (1. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;
2. Core and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The alteration minerals in a Wunugetushan copper molybdenum deposit were identified by short – wave infrared spectroscopy and thermal infrared spectroscopy.
- (2) The alteration minerals in a Wunugetushan copper molybdenum deposit have obvious zonation, and the mineralization of the deposit was significantly correlated with the alteration zoning. The alteration assemblages of mineralized positions were mainly quartz + illite + sericite + potassium feldspar.
- (3) The wavelength shift at the 2200nm absorption peak of sericite was closely related to the mineralization center, which can help to determine the mineralization center.

ABSTRACT

BACKGROUND: In recent years, infrared spectroscopy and thermal infrared spectroscopy have played an important role in mineralogy research, geological exploration and prospecting.

OBJECTIVES: To investigate alteration minerals and mineralization features of a Wunugetushan porphyry copper – molybdenum deposit in Inner Mongolia.

METHODS: Core samples were scanned by infrared spectroscopy core scanning system and analyzed by TSG 8.0.

RESULTS: The alteration minerals of the Wunugetushan porphyry copper molybdenum deposit mainly included quartz, potassium feldspar, sericite, illite, kaolinite and montmorillonite. The alteration mineral assemblage showed obvious zonation in space. Quartz + illite + sericite + potassium feldspar had the closest relationship with mineralization and can be used as the standard mineral assemblage for ore prospecting. By comparing with the spatial distribution of Cu and Mo mineralization, the wavelength shift of the absorption peak at 2200nm to shorter wavelengths was closely related to the mineralization center, and the IC value of illite reflects the degree of crystallization and mineralization.

CONCLUSIONS: This technical method can be used to quickly delineate the alteration mineral assemblage of porphyry copper – molybdenum ore through the alteration mineral spectrum, thereby improving the exploration efficiency.

KEY WORDS: drill core; infrared spectroscopy; alteration zonation; porphyry copper – molybdenum deposit; Wunugetushan