

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.373



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

田丰^{1,2}, 冷成彪^{1*}, 张兴春¹, 田振东^{1,2}, 张伟¹, 郭剑衡^{1,2}

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550081

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为进一步探明岗讲斑岩铜-钼矿床蚀变和矿化结构, 有效指导下一步勘查工作, 利用短波红外光谱技术对矿床内典型剖面上的4个钻孔进行了系统的测试分析. 共检测到绢云母类、高岭石类、绿泥石类、硫酸盐类和碳酸盐类等蚀变矿物, 其中尤以绢云母类矿物最为发育. 对绢云母进行短波红外光谱测试分析显示: 在靠近矿体的位置, 有较大的伊利石结晶度(≥ 1.5)和较小的绢云母 Al-OH 吸收位置($\leq 2\ 205$ nm); 而在远离矿体的位置伊利石结晶度和绢云母 Al-OH 吸收位置分别为 0.8~1.2 和 2 207~2 209 nm. 同时, 铁氧化物强度值与氧化矿体的出现具有同步性. 表明短波红外光谱的这些特征参数有助于进一步理解岗讲斑岩铜-钼矿床蚀变和矿化结构, 有效识别成矿流体性质, 有潜力成为该矿区及其他类似矿区有效的找矿指标.

关键词: 地质学; 围岩蚀变; 绢云母; 短波红外光谱; 岗讲斑岩铜-钼矿床; 矿床.

中图分类号: P614

文章编号: 1000-2383(2019)06-2143-12

收稿日期: 2018-09-28

Application of Short-Wave Infrared Spectroscopy in Gangjiang Porphyry Cu-Mo Deposit in Nimu Ore Field, Tibet

Tian Feng^{1,2}, Leng Chengbiao^{1*}, Zhang Xingchun¹, Tian Zhendong^{1,2}, Zhang Wei¹, Guo Jianheng^{1,2}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to reveal the alteration and mineralization structure of the Gangjiang porphyry copper-molybdenum deposit, the short-wave infrared spectroscopy (SWIR) technique was systematically used to analyze the four drill-holes in the typical section of the deposit. Five types of altered mineral groups were detected, i.e. sericite, kaolinite, chlorite, sulphate and carbonate. Short-wave infrared spectroscopy results of sericite show that there is a greater illite crystallinity (≥ 1.5) and a smaller sericite Al-OH absorption position ($\leq 2\ 205$ nm) towards the ore body. However, the value of illite crystallinity and sericite Al-OH absorption position distal the ore body are 0.8–1.2 and 2 207–2 209 nm, respectively. In addition, the iron oxide intensity value is synchronized oxidized ore body. It is indicated that these characteristic parameters of short-wave infrared spectroscopy are helpful to the understanding of the alteration and mineralization structure of the Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit, which may effectively restrict the ore-forming fluid condition and provide a potential prospecting indicator for the target mine and other similar mining areas.

Key words: geology; wall rock alteration; sericite; short-wave infrared spectroscopy (SWIR); Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit; deposits.

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2016YFC0600305).

作者简介: 田丰(1992-), 男, 博士研究生, 专业为矿物学、岩石学、矿床学. ORCID: 0000-0002-0134-3756. E-mail: tianfeng@mail.gyig.ac.cn

* 通讯作者: 冷成彪, E-mail: lengchengbiao@vip.gyig.ac.cn

引用格式: 田丰, 冷成彪, 张兴春, 等. 2019. 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. 地球科学, 44(6):2143-2154.

0 引言

斑岩型矿床是当今世界上铜、钼和金等多种金属的重要来源(Sillitoe, 2010),是具有巨大经济价值的勘查目标.该类型矿床的勘查一直依赖于不断完善的矿床模型(Lowell and Guilbert, 1970; Sillitoe, 2010).即通过目标勘查区内围岩蚀变特征与典型勘查模型中蚀变分带的对比,确定勘查方向,定位矿体可能存在的位置.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.而仅将其笼统地定义为绢云母化蚀变带或者泥化蚀变带,则会忽略其内部具体蚀变矿物微弱变化所蕴含的有效信息(Thompson *et al.*, 1999).因此,在这类矿床地质环境下,需要引入新的勘查技术方法,并建立行之有效的找矿标志和勘查模型.

短波红外光谱(short-wave infrared, SWIR)技术是近些年从国外引入的一种新型的矿床勘查研究手段,以其独特的优势,为上述问题提供了一种潜在的解决途径.该技术利用常见热液蚀变矿物在短波红外光谱区间(1 300~2 500 nm)内的敏感性,主要依据目标矿物中羟基(OH^-)、碳酸根(CO_3^{2-})、硫酸根(SO_4^{2-})以及可能存在的水分子(H_2O)等不同粒子在不同位置振动形成的不同吸收特征来确定目标矿物的种类和含量.而且该技术具有快速、低成本和高灵敏度等优点,被广泛的应用于高效精确的蚀变矿物填图工作中(Thompson *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2001; 连长云等, 2005a, 2005b; 章革等, 2005; Guo *et al.*, 2017).此外,可以利用特定蚀变矿物反射光谱特征参数(如波长吸收位置、结晶度等)的规律性变化,反演成矿的地质环境,确定热液中心,提供找矿指标.经常利用的特征参数包括浅色云母类矿物的吸收位置(Herrmann *et al.*, 2001; Jones, 2005; Yang *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017)、绿泥石类矿物的吸收位置(Yang *et al.*, 2005; 张世涛等, 2017; 陈寿波等, 2018; Neal *et al.*, 2018)、明矾石类矿物的吸收位置(Chang *et al.*, 2011)以及伊利石的结晶度(Chang *et al.*, 2011; 杨志明等, 2012; 许超等, 2017)等.

本文在前人研究工作的基础上,对西藏冈底斯带中段的岗讲斑岩铜—钼矿床进行了短波红外光谱研究.岗讲矿床内发育大面积的绢云母化蚀变和泥化蚀变,而且对钾化带有高度的套合,仅通过传

统方法难以将它们区分.因此,本文对研究区内典型剖面上的4个钻孔进行了系统的短波红外光谱分析,旨在确定热液蚀变矿物的种类及其在空间上的分布规律.同时,探明浅色云母类(绢云母类)的光谱特征变化与矿体的对应关系.以期通过该研究增强对岗讲斑岩铜—钼矿床蚀变矿化结构和成因等方面的理解,为该矿床及具有相似地质环境矿床的进一步勘查提供帮助.同时,希望通过利用绢云母类矿物反射光谱特征参数在空间上的变化,反演成矿流体的演化,以增加对尼木岗讲矿床成因的解释.

1 矿区地质简介

岗讲斑岩铜—钼矿床地处拉萨市东120 km,隶属于西藏自治区尼木县.该矿床位于冈底斯斑岩铜矿带中段的尼木矿田中,与其同属该矿田的还包括白容、厅官、冲江等大型或超大型矿床(图1).尼木矿田内主要发育3种主要的岩性单元(王小春等, 2002; 李金祥等, 2007; Hou *et al.*, 2009; Leng *et al.*, 2013)分别为:由粉砂岩、泥岩、杂砂岩和泥质灰岩组成的早白垩世沉积序列,由安山质—英安质火山岩、凝灰岩及凝灰质砂岩组成的古新世—渐新世火山—沉积序列(林子宗火山岩),以及中新世包括石英二长岩、石英二长斑岩、花岗斑岩和花岗闪长岩在内的多期侵入岩(图2).

岗讲斑岩铜—钼矿区内主要发育有4种与成矿相关的侵入岩,前人已经对这几种侵入岩做过详细的野外观察和年代学工作(冷成彪等, 2010; 杨震等, 2017).呈岩基产出的黑云石英二长岩(QM; 图3a、3e)最早侵入,其锆石U-Pb年龄为 $14.73 \pm 0.13 \text{ Ma}(2\sigma)$ (冷成彪等, 2010),在钻孔和地表均可见其被石英二长斑岩(QMP; 图3b、3g)和流纹英安斑岩(RP; 图3f、3h、3c)所切割.流纹英安斑岩是与成矿较为密切的一期斑岩,主要分布在矿区地表的南部(图1).在钻孔和地表均可见其切割黑云二长花岗岩和二长花岗斑岩(图2),锆石U-Pb年龄为 $12.01 \pm 0.29 \text{ Ma}(2\sigma)$ (冷成彪等, 2010).最后一期是成矿后期的英安斑岩脉(DP),其与流纹英安斑岩常同时出现,两者形成顺序尚不明确.此外,在钻孔的局部可见晚期侵入的角闪质岩脉(图3d),未观察到其与成矿具有直接关系.除了侵入岩体外,在矿区的北部出现大面积的第四纪沉积物和冰碛物(图1和2),基本覆盖在黑云石英二长岩的岩基之上.

矿区内的蚀变组合类型主要有4种,其中以钾

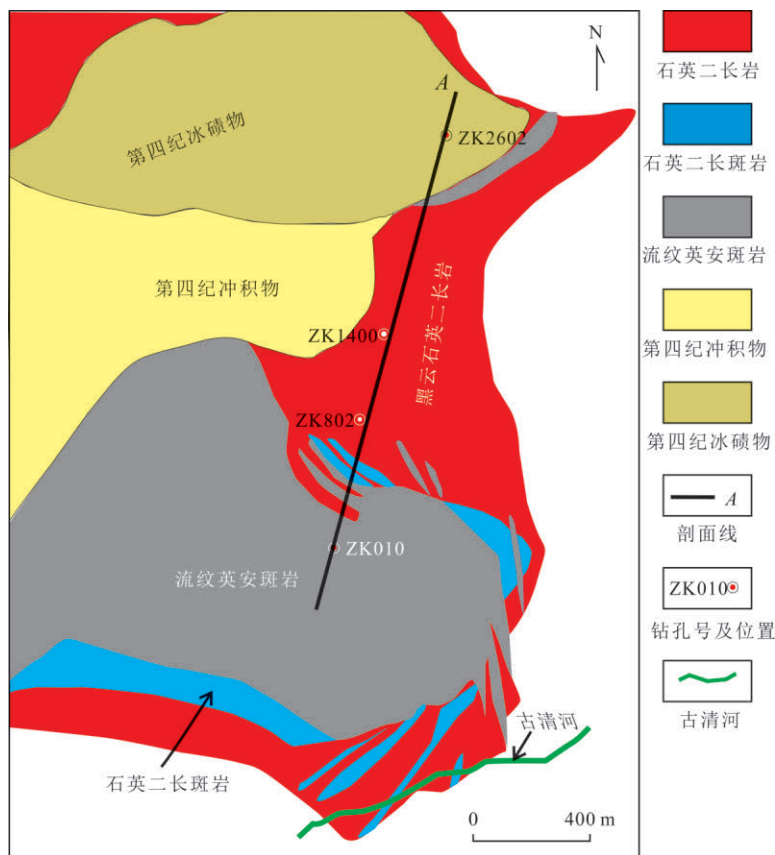


图1 岗讲斑岩铜—钼矿床地质简图

Fig.1 Simplified geological map of the Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit
据 Leng et al.(2013)修改

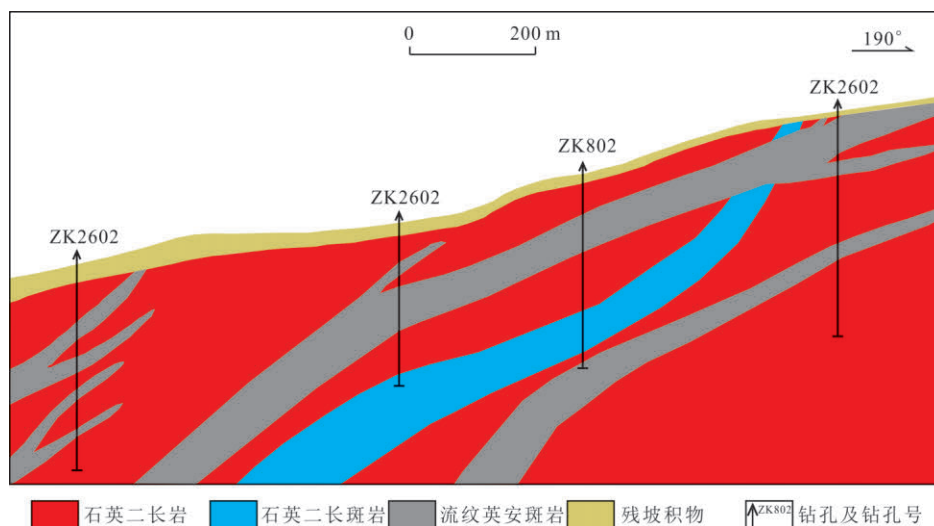


图2 岗讲斑岩铜—钼矿床 A 勘探线地质剖面

Fig.2 Geological section along A exploration line in the Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit

化(图 3a、3e、3k、3l)、绢云母化(图 3e、3i、3k、3l)蚀变带最为发育,绿泥石—绢云母化(图 3g、3h、3j)和泥化(图 3e~3g)蚀变带在局部位置发育,而青磐岩化

蚀变带基本不发育或缺失.钾化蚀变带主要见于黑云二长花岗岩和石英二长斑岩中,主要矿物为次生加大的钾长石和星点状分布的次生黑云母(图 3a、

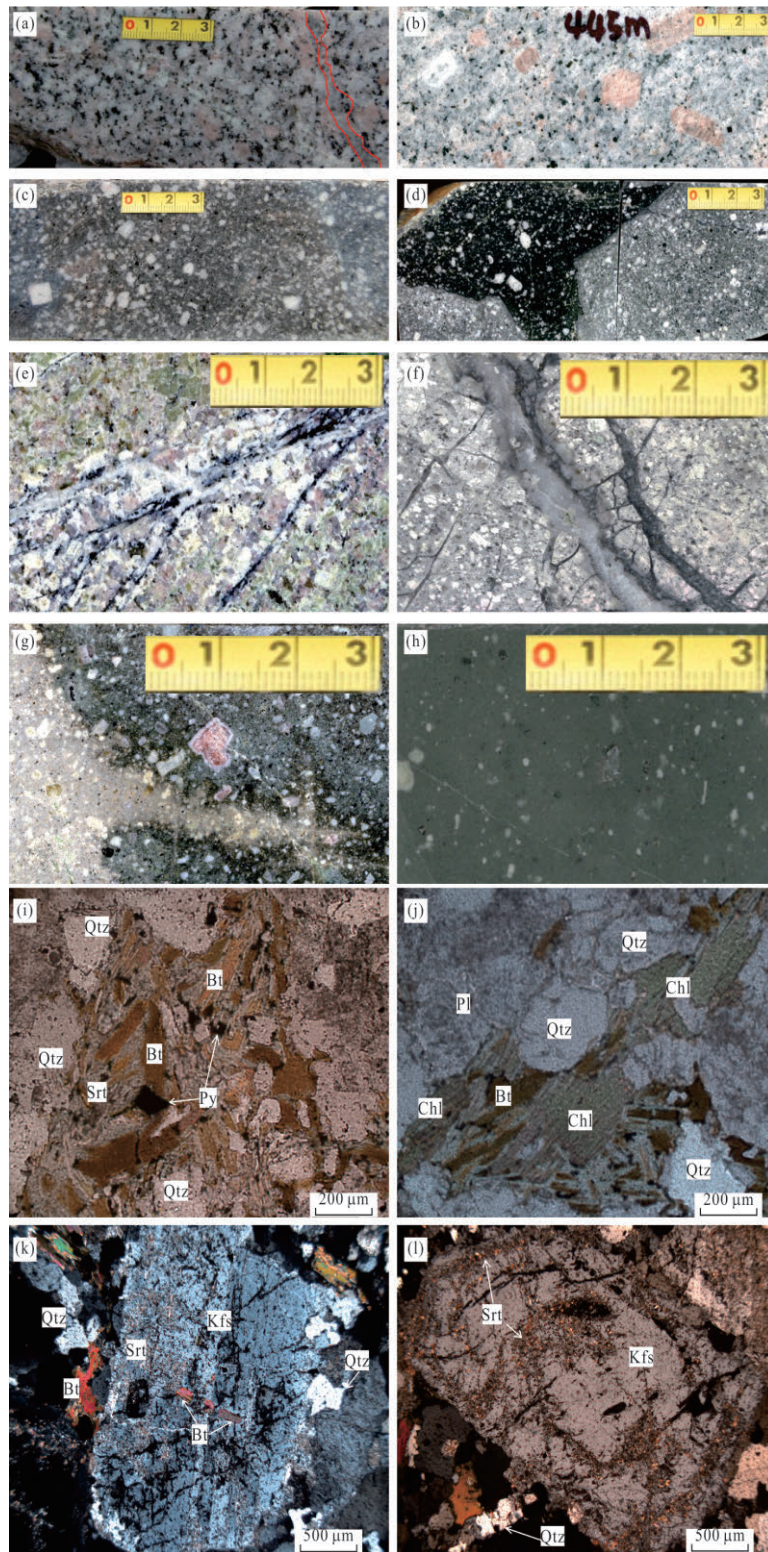


图 3 岗讲斑岩铜-钼矿床岩矿岩心及显微照片

Fig.3 Drill core and microscopic photographs of rocks and ore in the Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit

a. 发育有 A 脉的钾化石英二长岩; b. 石英二长斑岩; c. 流纹英安斑岩; d. 闪长质岩脉(深)侵入流纹英安斑岩(浅)中; e. 浅绿色伊利石化叠加在早期钾化的石英二长岩之上,又被后期高岭石化(白色)沿后期裂隙所交代; f. 强烈高岭石化的流纹英安斑岩; g. 绿泥石化(绿色)石英二长斑岩被后期泥化(白色)沿裂隙交代; h. 绿泥石-绢云母化流纹英安斑岩; i. 后期热液将早期黑云母交代溶蚀为港湾状,并在其内和周围形成石英+绢云母+黄铁矿; j. 黑云母被大面积蚀变为绿泥石; k. 卡式双晶的钾长石内包含钾化形成的黑云母,并在边缘被绢云母交代; l. 绢云母沿解理和裂隙交代钾长石. Bt. 黑云母; Chl. 绿泥石; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Py. 黄铁矿; Qtz. 石英; Srt. 绢云母

3k),其他还包括石英、磁铁矿以及少量的硬石膏。除了蚀变矿物外,在黑云二长花岗岩中普遍发育有不连续的弯曲石英脉体(A脉;图3a),即使被后期蚀变叠加,依旧保存完整。绢云母化蚀变在流纹英安斑岩中最为发育,甚至可见全岩蚀变。此外,在流纹英安斑岩与黑云二长花岗岩和石英二长斑岩的接触界部位也会使后两者发生较为强烈的绢云母化蚀变(图3e,3g)。绢云母化蚀变的主要组成矿物为绢云母(包括白云母和伊利石),还包括石英、黄铁矿和少量绿泥石(图3i、3k、3l)。绿泥石化蚀变带规模不大,主要存在于英安斑岩和部分流纹英安斑岩中(图3h),主要蚀变矿物为绿泥石(图3j),此外还包括一定含量的绢云母和碳酸盐矿物。绿泥石化蚀变带经常可见被后期绢云母化或泥化蚀变带所套印覆盖(图3g),两者基本呈过渡的接触关系。泥化蚀变带发育在特定部位,分别为断裂或节理的破碎带中和距地表100~200 m以上部位,蚀变矿物种类包括高岭石、蒙脱石和伊利石等。

矿区的矿石类型主要有原生矿和氧化矿,其中以原生硫化物矿为主。原生硫化物的矿石矿物比较简单,主要为黄铜矿和辉钼矿,偶见少量斑铜矿。原生铜钼矿化在黑云石英二长岩的钾化带中大面积发育,但大部分为稀疏浸染状产出,铜品位基本在0.1%左右,钼品位也普遍低于0.01%,很难达到工业品位要求。工业矿体主要产在黑云石英二长岩与流纹英安斑岩的接触部位,矿化形式在浸染状的基础上叠加了粗大的黄铜矿-辉钼矿石英脉和网脉状矿化,铜品位平均在0.3%以上,钼品位也可以达到0.03%。辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄集中在 $12.51 \pm 0.19 \text{ Ma} (2\sigma) \sim 12.85 \pm 0.18 \text{ Ma} (2\sigma)$ (Leng *et al.*, 2013),与流纹英安斑岩的 U-Pb 年龄相近。氧化矿体位于距地表100 m(局部200 m)以上的位置,矿石矿物主要为孔雀石,也可见铜蓝,常伴随铁氧化物。

2 样品测试

依据光学基本理论,当光以能量的形式进入目标矿物之后,矿物中的特征分子键会因此受到激发,产生不同程度的弯曲和伸缩,引起分子振动,同时吸收特定频率的能量。目标矿物的一些内部特征,如化学键类型、晶体骨架结构、分子有序度和结晶程度等都会影响这种振动的能量的频率和大小。因不同种类矿物具有不同的内部特征,相应吸收的

能量大小和频率也不同,所以会在特定位置形成相应的吸收深度和形态,从而形成诊断性光谱特征(Clark *et al.*, 1990;杨志明等,2012)。因此,可依据蚀变矿物中内部特征官能团形成的诊断性光谱来识别不同的矿物种类和同种矿物的结晶度。本文所述的短波红外光谱技术,研究的主体正是目标矿物中羟基(OH⁻)、碳酸根(CO₃²⁻)以及水分子(H₂O)等粒子在短波红外光谱区间内(1 300~2 500 nm)内形成的特征光谱曲线。

短波红外光谱技术在野外的使用需要借助便携式红外光谱仪,此次使用的红外光谱仪为美国 Analytical Spectral Devices, Inc. (ASD)最新制造的 Terra Spec 4。这台仪器收集信号的波长范围为350~2 500 nm,包括了可见光-近红外和短波红外区段。该仪器自带探头,探头的测试窗口为直径2.5 cm的圆。探头内含3个探测器,探测区间分别为350~1 000 nm、1 001~1 800 nm和1 801~2 500 nm,第一个探测器的分辨率为3 nm,后两者为6 nm。样品的测试时间很灵活,可以依据测试对象的色率进行调整,仪器详细的测评可见 Chang and Yang (2012)。

2.1 样品采集及测试

本次研究对岗讲斑岩铜钼矿床A剖面上的 ZK010、ZK802、ZK1400和ZK2602四个钻孔进行了系统采样(图2和3),共采集600余件钻孔样品。采样的间距基本控制在2~10 m,在蚀变现象均匀和样品比较破碎的区段适当扩大间距,矿化现象好的区段进行一定的加密。

样品系统采集完成后,首先进行编号和简要的岩性描述,之后用软刷清洗干净,并在太阳下晾晒至少8 h。样品测试前,需要对测试时间进行设置,暗电流(dark current)数值设置为25并保持不变,光谱平均(spectrum Avg)数值设置为200(测试时间20 s),基准白(white reference)数值为400。本次测试使用的标样为仪器自带的特制白板,其反射率近于1。每次开机进行测量都需要利用标样白板进行优化校正(optimization),在确定仪器正常之后,进一步利用标样白板进行基准白校正(white reference),在获取平直光滑的直线后,方可进行样品测试。为避免仪器随着使用时间发热的影响,仪器在每次使用间隔20 min后都会利用标样白板进行一次基准白校正。在测试样品时,探头对准钻孔样品的平直面,并避开硫化物和石英脉较为发育的部位,以防它们

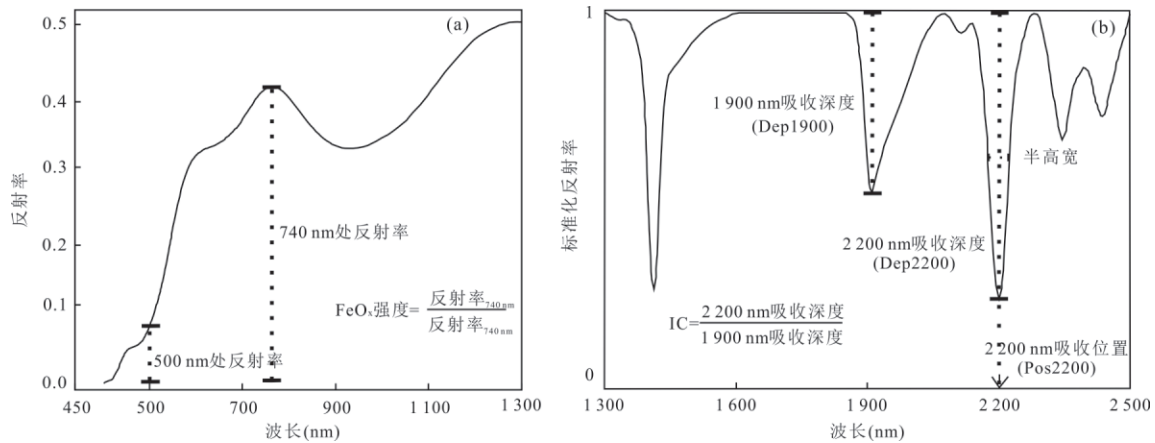


图4 短波红外光谱特征参数示意图

Fig.4 Schematic diagram of short-wave infrared spectrum characteristic parameters

影响光谱的整体反射率,而使得测试结果不准确.为减弱样品不均匀和偶然误差的影响,每个样品一般测试3次,最后取平均值.此外具体的注意事项和参数设置说明可参考 Chang and Yang(2012).

2.2 数据处理

获取的光谱数据首先导入“光谱地质师(the spectral geologist, TSG)v.8”软件进行处理.导入数据的重新进样间距设为1 nm,并在350~400 nm和2 450~2 500 nm这两端高噪音区间进行光滑处理.新的数据工程建立完成后,设置解混矿物的种类为3,检测阈值设为5%.完成设置之后,软件进行自动解译.

获得自动解译结果后,首先对获取的光谱曲线进行信噪比和质量检查,剔除信噪比和可信度低以及无意义的光谱数据.然后逐类提取矿物,分别对每类矿物进行提取检查,将不准确和错误的光谱进行改正,并对一些矿物大类进行合并以便于蚀变带的划分.最后是对所有矿物进行特征参数提取.

本次研究共提取Al-OH波长位置(Pos2200)、伊利石结晶度(IC)和铁氧化物强度(FeO_x)3个SWIR特征参数.Al-OH波长位置(Pos2200)指Al-OH特征吸收峰在2 200 nm附近反射率最小值对应的波长值(图4b),可在TSG中使用“scalar”功能以2 205 nm为中心、20 nm为半径在标准化(Hull)谱线中进行提取.伊利石结晶度(IC)用来反映浅色云母类(绢云母类)矿物的结晶度,表示方法为Al-OH吸收深度(Dep2200)与水吸收深度(Dep1900)之比(图4a).其中,Al-OH吸收深度(Dep2200)和水吸收深度(Dep1900)同样利用“scalar”功能对标准化光谱分别在2 200 nm和1 900 nm

附近提取相对吸收深度.由于本矿区高岭石,而高岭石同样在2 200 nm附近形成吸收特征,从而会影响Al-OH的吸收深度和位置.因此,本文对高岭石含量超过20%的样品数据进行了掩膜(mask)处理,以增加数据的可信度.一些金属离子在可见光-近红外区间会有吸收特征,尤其对500~740 nm光谱的曲线的总体斜率有影响(Hunt, 1977; Clark *et al.*, 1990).依此思路,本文分别对740 nm和500 nm的反射率(原始反射率)进行提取运算,用两者的比值定义为铁氧化物强度(FeO_x ,图4a).

3 测试结果

3.1 蚀变矿物种类及分布规律

本次短波红外光谱测试,在岗讲斑岩铜-钼矿床中主要识别出5大类蚀变矿物(图5a,附表1),分别为绢云母类(图3i、3k、3l)、高岭石类(图3e~3g)、绿泥石类(图3h、3j)、硫酸盐类和碳酸盐类.其中以绢云母类最为发育,包括白云母和伊利石(图5b).其次为高岭石类矿物,主要包括高岭石和高温地开石.绿泥石类矿物主要为镁绿泥石和铁镁绿泥石.硫酸盐矿物(石膏)和碳酸盐矿物(方解石和白云石)存在于个别样品中.此外,还通过光谱检测出蒙脱石、电气石、黄钾铁矾和硬水铝石等矿物.

图6为蚀变矿物大类在矿区不同海拔高度的分布概况,其中每一组数据由相邻10个样品加权平均获得,每个样品中的矿物含量为相对含量,由TSG软件的TSA功能结合手动修改获得.由图6可清晰看出,绢云母类矿物遍布整条采样剖面,除在地表和石英二长斑岩产出的位置外,绢云母的含量基本

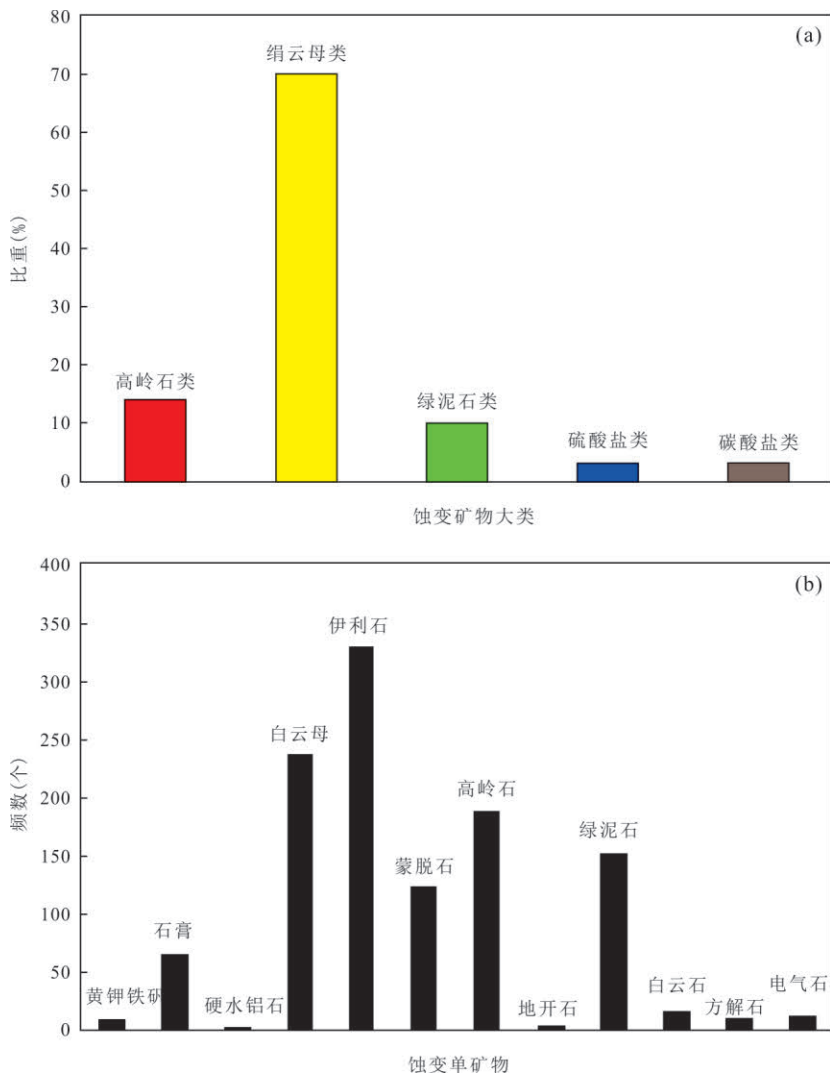


图 5 岗讲斑岩铜—钼矿床主要蚀变矿物统计

Fig.5 Statistical chart of alteration minerals at the Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit

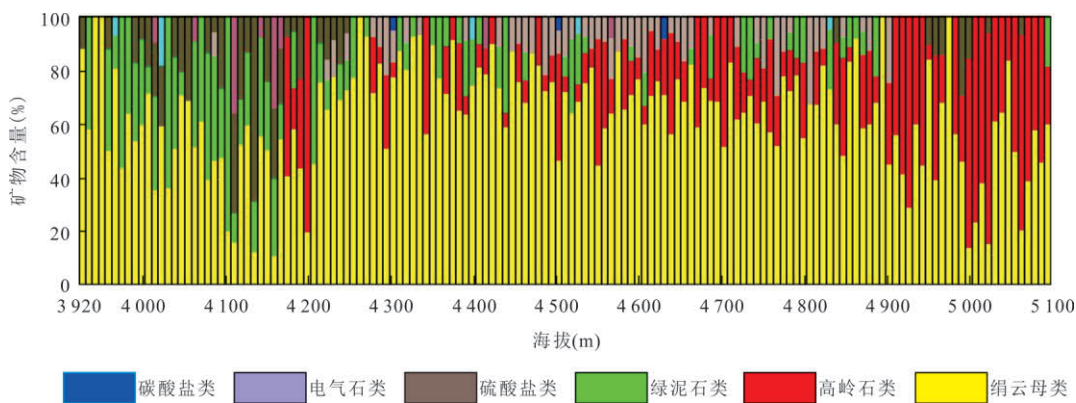


图 6 岗讲斑岩铜—钼矿床蚀变矿物大类分布

Fig.6 Distribution diagram of alteration mineral groups at the Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit

占了样品中可识别矿物的 60% 以上,尤其在海拔 4 200~4 900 m 特别发育.高岭石类矿物主要分布在近

地表和高海拔的地区,与绢云母含量基本成互补关系.绿泥石类、硫酸盐类(石膏)、及电气石等矿物集

中出现在个别钻孔(ZK2602)的低海拔位置.

3.2 特征参数变化规律

对岗讲斑岩铜—钼矿床 A 剖面上四个钻孔中绢云母 Al-OH 吸收位置(Pos2200)和伊利石结晶度(IC)进行了统计分析.所测的样品中,IC 的变化区间位于 0.2~4.3(附表 1),其中主要集中于 0.3~1.8,在 0.8~1.2 所占最多(图 7a).Pos2200 的值位于 2 200~2 212 nm,大多数样品位于 2 207~2 209 nm.测得的铁氧化物强度(FeO_x)所获取的数量有限,基本处于 1~2(图 8,附表 1).

在剖面上,绢云母的正 2200 值和 IC 值呈现出一定的变化规律.总体上,硫化物原生矿体附近样品的 Pos2200 值会比相邻样品中的值要小($\leq 2 205$ nm),而 IC 值会比相邻样品中 IC 值要大(≥ 1.5).此规律最为明显的例子在钻孔 ZK010 中 200~320 m、ZK802 中 170~250 m、ZK1400 中 200 m 附近和 400~480 m 以及 ZK2602 中 60~240 m 和 370~420 m 这几处(图 8).此外,出现两个特例,一处是在 ZK802 的 600 m 和 ZK1400 的 450~480 m 这两段呈现出较低 Pos2200 值,却没有矿体出现,这主要是由于此时围岩为石英二长斑岩(图 8a 和 8b,附表 1),绢云母化蚀变弱,而使得参数提取时的误差较大;另一处为在 ZK2602 后半段,Pos2200 和 IC 的值变化幅度大,变化规律不明显,可能是石膏的存在(附表 1)影响

了绢云母在 2 200 nm 处的吸收位置和深度,从而使得变化趋势不明显.

除绢云母的正 2200 和 IC 两个参数外, FeO_x 在空间上的变化规律也比较明显.存在 FeO_x 值大于 1 的地方基本位于 200 m 以上(图 8),且随着深度加深, FeO_x 值逐渐变小,表明该值对岩层的氧化带存在和强度有良好的指示作用.此外, FeO_x 值和氧化矿体的存在具有很好的同步性,而且在 FeO_x 值接近 1.5 附近都对应有工业氧化矿体的出现.因此,该参数对氧化矿体指示有潜在的应用.唯一的例外是 ZK010 的近地表处,出现了很高的 FeO_x 值却未出现矿体,可能是由于流纹英安斑岩本身不含矿而不具备形成次生矿体的先决条件.

4 讨论

4.1 绢云母类矿物 SWIR 特征对成矿体流体的制约

伊利石结晶度(IC)被用作找矿指标已经有很多应用(Chang *et al.*, 2011; 杨志明等, 2012; 许超等, 2017),前人普遍认为 IC 值与矿物形成时的温度直接相关.即在高温条件下,蚀变形成的绢云母类矿物中含水量低(Dep1900 小),而随着热液扩散流动和冷却,形成的绢云母类矿物会含水量会增加,从而加深 1 900 nm 处的吸收深度,即减小 IC 值(杨志明等, 2012; 许超等, 2017).因此,利用 SWIR 获取的

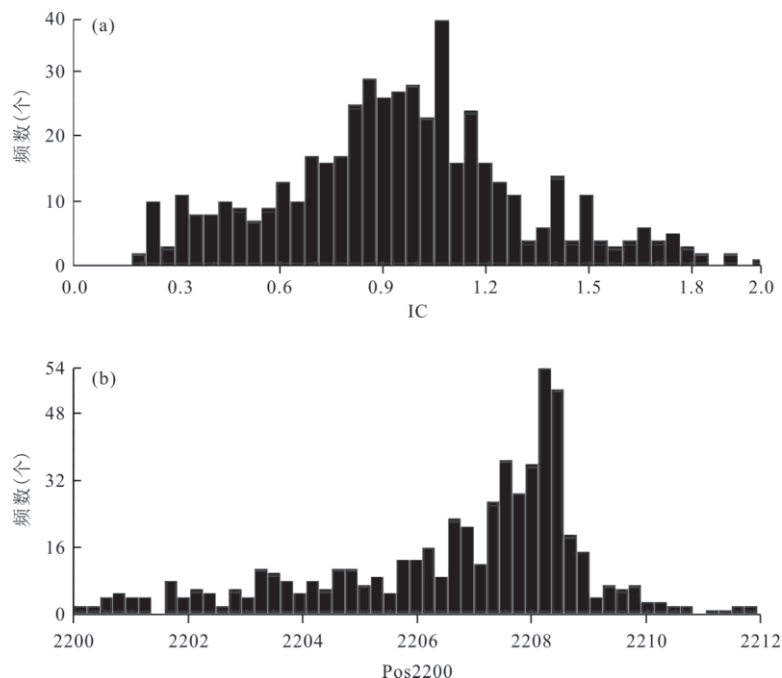


图 7 岗讲斑岩铜—钼矿床绢云母 Pos2200 值和 IC 值统计图

Fig.7 Statistical chart of values about Pos2200 and IC at the Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit

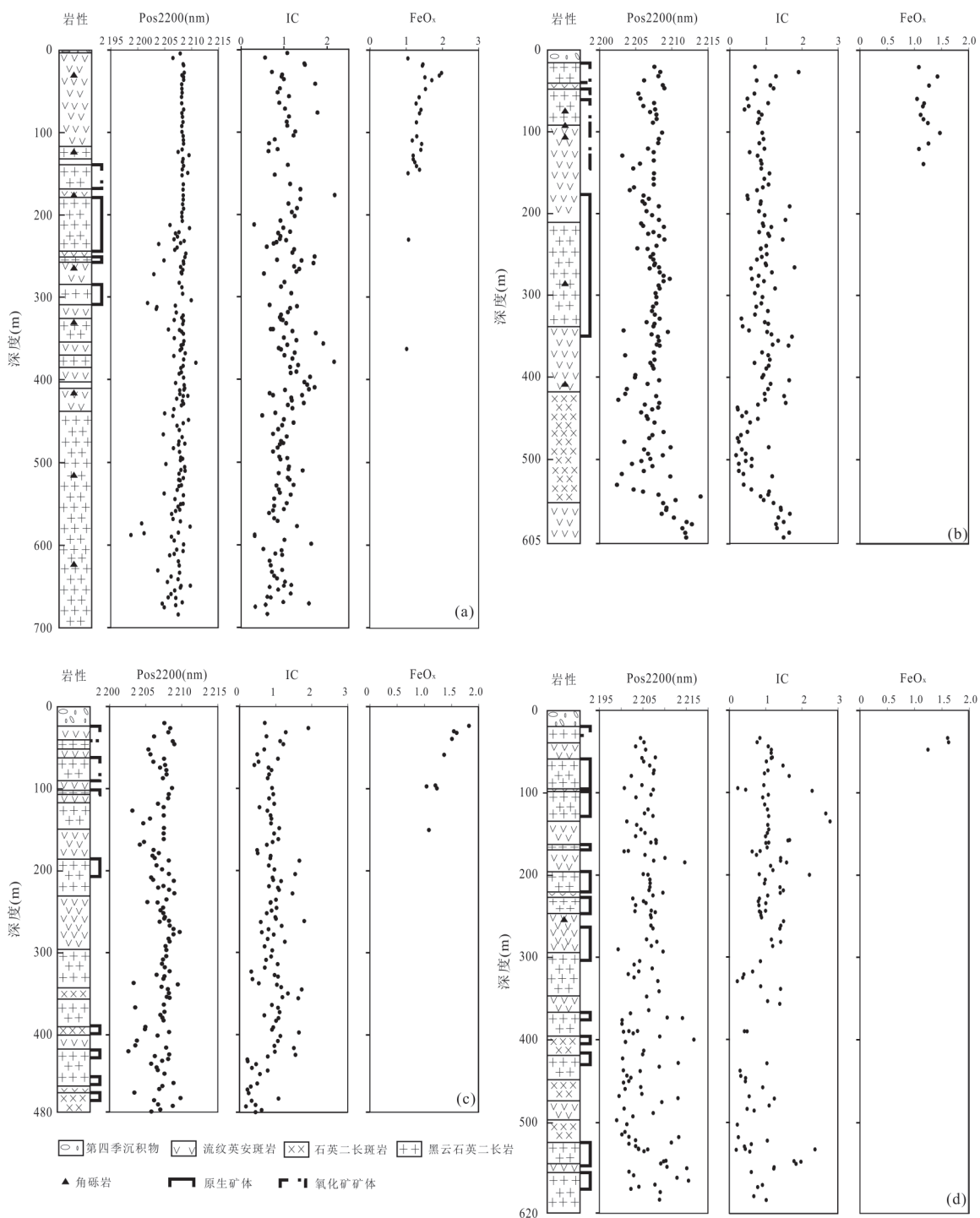


图 8 钻孔岩性及特征参数分布规律

Fig.8 Distribution of lithology and SWIR characteristic parameters in drill-hole
a.ZK010;b.ZK802;c.ZK1400;d.ZK2602

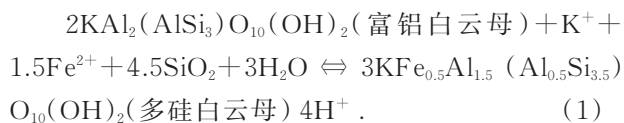
IC 可以很好的代表绢云母类矿物形成时的温度. 通常认为 IC 在范围 0.3~0.5 代表的主要矿物成分为蒙脱石, 在范围为 0.5~0.7 主要成分为伊利石或者伊蒙混层, 而大于 0.7 则主要是白云母或白云母和伊利石的混合 (Chang *et al.*, 2011). 本次研究发现岗

讲斑岩铜—钼矿床中的绢云母的 IC 多数位于 0.8~1.2, 主要为伊利石和白云母, 而且 IC 值同样类似于前人研究, 靠近矿体的 IC 值变大, 可以用作指导找矿 ($IC \geq 1.5$).

绢云母 Al-OH 吸收位置 (Pos2200) 同样是被广

泛应用的 SWIR 找矿指标,许多研究(Herrmann *et al.*, 2001; Jones, 2005; Yang *et al.*, 2005; 杨志明等, 2012) 都发现在靠近矿体部位时, Pos2200 值变小, 而远离矿体时 Pos2200 值变大. Pos2200 的值与绢云母中八面体铝(Al^{VI})含量相关(Duke, 1994), Al^{VI} 含量越高, Pos2200 值越小. 在高级变质区域, 压力和温度被认为是造成 Al^{VI} 变化的关键原因(Duke, 1994; van Ruitenbeek *et al.*, 2005). 但在低压环境下, 温度被认为可能是重要的控制因素(杨志明等, 2012). 因为在高温条件下, 绢云母类矿物最接近理想的成分比, 随着温度降低, 四面体铝(Al^{IV})会被 Si 替代, 同时为了平衡电荷, 八面体铝(Al^{VI})也会被 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子和晶格缺陷替代, 从而造成 Al^{VI} 含量减少, Pos2200 值增大.

然而, 温度不是控制 Pos2200 的唯一因素, 例如在研究区钻孔 ZK010 的 400 m 附近, 虽然绢云母的形成温度很高(高 IC 值), 但是 Pos2200 却没有很明显的变化. 在研究区的环境下, 笔者认为 pH 可能是另外一个控制 Pos2200 值的重要因素. 以富 Al 白云母和多 Si 白云母为例, 两者存在以下的互相转换反应(Halley *et al.*, 2015):



由上述反应可知, 热液流体的 pH 值会影响白云母的种类, 即低 pH 环境下形成富 Al 白云母, 在高 pH 环境下形成多 Si 白云母. 在斑岩系统中, 向上运移的岩浆流体会随着歧化反应进行和温度的不断降低而酸度不断增加, 从而导致越到浅处, 形成的绢云母越来越富集 Al, 即 Pos2200 值越低. 同样在横向上, 越靠近流体运移通道, 水岩比越高, 酸度越强, 形成的 Pos2200 值也会越小. 所以, 在研究区钻孔 ZK010 的 400 m 附近, 虽然 IC 值高, 反映有后期岩脉侵入引起温度升高, 但是由于此处岩脉厚度小, 即水岩比并没有明显提高, 因此不会对 Pos2200 值显著有影响. 同时上述反应表明由富 Al 白云母向多 Si 白云母转化时, 有 4.5 个单位的 SiO_2 参与, 因此成矿流体中的 Si 活度也会同步影响云母类矿物的化学成分(Wang *et al.*, 2017).

综上所述, 绢云母的 IC 值对形成时流体的温度有直接的反映, 而 Pos2200 的值除了反映流体温度外, 还在一定程度上可以反映研究区内流体的 pH 和 Si 活度变化. IC 值和 Pos2200 值

两者共同对成矿流体条件进行约束.

4.2 剥蚀程度和勘查目标

在此次 SWIR 研究工作中, 获得的绢云母矿物 Pos2200 值多数介于 2207~2209 nm (图 7), 由上文绢云母矿物 Pos2200 对流体环境的制约影响可知, 其形成环境的 pH 值较高, 压力较大, 推测这些绢云母大多形成于斑岩矿床的深部. 可能说明现今所勘查的位置已处于斑岩系统的接近核心部位, 而钻孔深度都小于 1 km, 表明研究区已经受了较强程度的剥蚀. 此外, 在 SWIR 识别的矿物中, 虽然存在一定量的绿泥石, 但较少发现绿帘石的踪迹. 而这种典型青磐岩化矿物的缺失, 也说明矿床经受了较深的剥蚀. 而且, 从矿体矿化形式来看, 矿床内较少发育斑岩矿床系统顶部的大面积网脉状矿体(冷成彪等, 2010). 这些因素都说明矿床已经遭受了很强的剥蚀.

矿区虽然较少发育网脉状的富矿体, 但是依旧存在可观的工业矿体, 其产出的部位主要位于晚期绢云母化和早期钾化的套合部位. 单纯的黑云石英二长岩钾化带虽然具有大面积发育铜钼矿化, 但是整体品位不高(铜当量 $\approx 0.1\%$, 铜当量 = $Cu + 5 \times Mo$), 同样单纯的流纹英安斑岩中基本不含矿(铜当量 $< 0.1\%$). 但是, 在两者的接触部位可见工业矿体. 这可能是较晚的流纹英安斑岩, 在两者的接触部位带来了热量和运载体(可能含有一定的铜钼), 对低品位石英二长斑岩中的成矿元素进行活化迁移, 并在合适的温度和 pH 部位进行沉淀, 从而富集成矿. 因此, 在下一步勘查部署中, 要着重对黑云石英二长岩和流纹英安斑岩接触带的勘查. 但在接触部位普遍发生绢云母化, 无法利用肉眼进行分带识别. 因此, 在缩小勘查范围之后, 再利用绢云母类矿物 SWIR 特征值, 对矿体进行进一步定位, 将 $IC \geq 1.5$ 及 Pos2200 的值 ≤ 2205 nm 的位置划定为重要勘查目标.

5 结论

(1) 短波红外光谱技术测试结果显示, 在冈底斯斑岩铜矿带中段的岗讲斑岩铜—钼矿床中共识别出 5 大类蚀变矿物, 分别为绢云母类、高岭石类、绿泥石类、硫酸盐类和碳酸盐类. 其中以绢云母类最为发育, 几乎遍布整个矿区.

(2) 利用绢云母 Al-OH 的吸收位置和伊利石结晶度这两个 SWIR 特征光谱参数, 可以有效制约成矿流体物理化学条件, 在伊利石结晶度较大 (≥ 1.5) 和绢云母 Al-OH 吸收位置较小 (≤ 2205 nm) 的地

段是工业级别原生矿体赋存的部位。同时,铁氧化物强度和氧化矿体出现具有同步性,且在铁氧化物强度较大(≥ 1.5)的部位有可能含有氧化矿体。

(3)野外观察和SWIR测量数据都显示,岗讲斑岩铜—钼矿床已经遭受了较大剥蚀。应将勘查的目光聚焦绢云母化和钾化的叠加套合部位,并利用SWIR找矿指标进一步定位矿体。

致谢:野外工作中得到了拉萨天利矿业有限公司副总经理曾红坤的极大帮助;室内光谱解译和软件解译过程中得到了中科遥感集团杨凯博士的耐心指导,在此一并致以诚挚的感谢!

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Chang, Z., Yang, Z., 2012. Evaluation of Inter-Instrument Variations among Short Wavelength Infrared (SWIR) Devices. *Economic Geology*, 107(7): 1479–1488. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.7.1479>
- Chang, Z.S., Hedenquist, J.W., White, N.C., et al., 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. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.8.1365>
- Chen, S.B., Huang, B.Q., Li, C., et al., 2018. Alteration and Mineralization of the Yuhai Cu Deposit in Eastern Tianshan, Xinjiang and Applications of Short Wavelength Infrared (SWIR) in Exploration. *Earth Science*, 43(9): 2911–2928(in Chinese with English abstract).
- Clark, R.N., King, T.V., Klejwa, M., et al., 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95(B8):12653–12680.
- Duke, E.F., 1994. Near Infrared Spectra of Muscovite, Tschermak Substitution, and Metamorphic Reaction Progress: Implications for Remote Sensing. *Geology*, 22(7):621.
- Guo, N., Thomas, C., Tang, J.X., et al., 2017. Mapping White Mica Alteration Associated with the Jiama Porphyry-Skarn Cu Deposit, Central Tibet Using Field SWIR Spectrometry. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.027>
- Halley, S., Dilles, J.H., Tosdal, R.M., 2015. Footprints: Hydrothermal Alteration and Geochemical Dispersion around Porphyry Copper Deposits. *SEG Newsletter*, 100:11–17
- Herrmann, W., Blake, M., Doyle, M., et al., 2001. 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. *Economic Geology*, 96(5):939–955. <https://doi.org/10.2113/96.5.939>
- Hou, Z.Q., Yang, Z.M., Qu, X.M., et al., 2009. The Miocene Gangdese Porphyry Copper Belt Generated during Post-Collisional Extension in the Tibetan Orogen. *Ore Geology Reviews*, 36(1–3):25–51. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.09.006>
- Hunt, G.R., 1977. Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and near Infrared. *Geophysics*, 42(3):501–513. <https://doi.org/10.1190/1.1440721>
- Jones, S., 2005. Short Wavelength Infrared Spectral Characteristics of the HW Horizon: Implications for Exploration in the Myra Falls Volcanic-Hosted Massive Sulfide Camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 100(2):273–294. <https://doi.org/10.2113/100.2.273>
- Leng, C.B., Zhang, X.C., Zhong, H., et al., 2013. Re-Os Molybdenite Ages and Zircon Hf Isotopes of the Gangjiang Porphyry Cu-Mo Deposit in the Tibetan Orogen. *Mineralium Deposita*, 48(5):585–602. <https://doi.org/10.1007/s00126-012-0448-x>
- Leng, C.B., Zhang, X.C., Zhou, W.D., 2010. A Primary Study of the Geological Characteristics and the Zircon U-Pb Age of the Gangjiang Porphyry Copper-Molybdenum Deposit in Nimu, Tibet. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 185–197(in Chinese with English abstract).
- Li, J.X., Qin, K.Z., Li, G.M., et al., 2007. K-Ar and ^{40}Ar - ^{39}Ar Age Dating of Nimu Porphyry Copper Orefield in Central Gangdese: Constrains on Magmatic-Hydrothermal Evolution and Metallogenetic Tectonic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):953–966(in Chinese with English abstract).
- Lian, C.Y., Zhang, G., Yuan, C.H., 2005a. Application of SWIR Reflectance Spectroscopy to Pulang Porphyry Copper Ore District, Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 24(6):621–637(in Chinese with English abstract).
- Lian, C.Y., Zhang, G., Yuan, C.H., et al., 2005b. Application of SWIR Reflectance Spectroscopy in Mapping of Hydrothermal Alteration Minerals: A Case Study of the Tuwu Porphyry Copper Prospect, Xinjiang. *Geology in China*, 32(3):483–495(in Chinese with English abstract).
- Lowell, J.D., Guilbert, J.M., 1970. Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373–408. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.65.4.373>
- Neal, L.C., Wilkinson, J.J., Mason, P.J., et al., 2018. Spectral Characteristics of Propylitic Alteration Minerals as a Vectoring Tool for Porphyry Copper Deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 184:179–198. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.019>

- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Thompson, A.J.B., Hauff, P.L., Robitaille, A.J., 1999. Alteration Mapping in Exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy. *SEG Newsletter*, 39:1–13.
- van Ruitenbeek, F.J.A., Cudahy, T., Hale, M., et al., 2005. Tracing Fluid Pathways in Fossil Hydrothermal Systems with Near-Infrared Spectroscopy. *Geology*, 33(7):597.
- Wang, R., Cudahy, T., Laukamp, C., et al., 2017. White Mica as a Hyperspectral Tool in Exploration for the Sunrise Dam and Kanowna Belle Gold Deposits, Western Australia. *Economic Geology*, 112(5): 1153–1176. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2017.4505>
- Wang, X.C., Yan, Z.G., Zhou, W.D., et al., 2002. Preliminary Study on Geological Features of Porphyry-Type Copper Deposits in the Northwestern Nimu, Middle Section of Gangdisi Belt, Tibet. *Geology and Prospecting*, 38(1):5–8 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Chen, H.Y., White, N., et al., 2017. Alteration and Mineralization of Xinan Cu-Mo Ore Deposit in Zijinshan Orefield, Fujian Province, and Application of Short Wavelength Infra-Red Technology (SWIR) to Exploration. *Mineral Deposits*, 36(5): 1013–1038 (in Chinese with English abstract).
- Yang, K., Browne, P.R.L., Huntington, J.F., et al., 2001. Characterising the Hydrothermal Alteration of the Broadlands-Ohaaki Geothermal System, New Zealand, Using Short-Wave Infrared Spectroscopy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106(1–2):53–65.
- Yang, K., Huntington, J.F., Gemmill, J.B., et al., 2011. Variations in Composition and Abundance of White Mica in the Hydrothermal Alteration System at Hellyer, Tasmania, as Revealed by Infrared Reflectance Spectroscopy. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(2): 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.01.001>
- Yang, K., Lian, C., Huntington, J.F., et al., 2005. Infrared Spectral Reflectance Characterization of the Hydrothermal Alteration at the Tuwu Cu-Au Deposit, Xinjiang, China. *Mineralium Deposita*, 40(3):324–336. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0479-7>
- Yang, Z., Jiang, H., Yang, M.G., et al., 2017. Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating of the Gangjiang Porphyry Cu-Mo Deposit in Central Gangdese and Its Geological Significance. *Earth Science*, 42(3): 339–356 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.M., Hou, Z.Q., Yang, Z.S., et al., 2012. Application of Short Wavelength Infrared (SWIR) Technique in Exploration of Poorly Eroded Porphyry Cu District: A Case Study of Niancun Ore District, Tibet. *Mineral Deposits*, 31(4):699–717 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., Lian, C.Y., Wang, R.S., 2005. Application of the Portable Infrared Mineral Analyser (PIMA) in Mineral Mapping in the Qulong Copper Prospect, Mozhugongka County, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 24(5):480–484 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.T., Chen, H.Y., Zhang, X.B., 2017. 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. *Mineral Deposits*, 36(6):1263–1288 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈寿波, 黄宝强, 李琛, 等, 2018. 新疆东天山玉海铜矿蚀变矿化特征及 SWIR 勘查应用研究. *地球科学*, 43(9):2911–2928.
- 冷成彪, 张兴春, 周维德, 2010. 西藏尼木地区岗讲斑岩铜—钼矿床地质特征及锆石 U-Pb 年龄. *地学前缘*, 17(2): 185–197.
- 李金祥, 秦克章, 李光明, 等, 2007. 冈底斯中段尼木斑岩铜矿田的 K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄: 对岩浆—热液系统演化 and 成矿构造背景的制约. *岩石学报*, 23(5):953–966.
- 连长云, 章革, 元春华, 等, 2005a. 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. *矿床地质*, 24(6):621–637.
- 连长云, 章革, 元春华, 等, 2005b. 短波红外光谱矿物测量技术在热液蚀变矿物填图中的应用——以土屋斑岩铜矿床为例. *中国地质*, 32(3):483–495.
- 王小春, 晏子贵, 周维德, 等, 2002. 初论西藏冈底斯带中段尼木西北部斑岩铜矿地质特征. *地质与勘探*, 38(1):5–8.
- 许超, 陈华勇, White, N., 等, 2017. 福建紫金山矿田西南铜钼矿段蚀变矿化特征及 SWIR 勘查应用研究. *矿床地质*, 36(5):1013–1038.
- 杨震, 姜华, 杨明国, 等, 2017. 冈底斯中段岗讲斑岩铜钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年代学及其地质意义. *地球科学*, 42(3):339–356.
- 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 等, 2012. 短波红外光谱技术在浅剥蚀斑岩铜矿区勘查中的应用: 以西藏念村矿区为例. *矿床地质*, 31(4):699–717.
- 章革, 连长云, 王润生, 2005. 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. *地质通报*, 24(5):480–484.
- 张世涛, 陈华勇, 张小波, 等, 2017. 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. *矿床地质*, 36(6):1263–1288.