DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.01010
田成华,杨立强,和文言,张少颖,刘申态,吴才,2022. 西藏玉龙斑岩铜矿床绢云母族蚀变矿物短波红外光谱特征及对勘查的指示意义. 沉积与特提斯地质,42(1):40-49.
Tian C H, Yang L Q, He W Y, Zhang S Y, Liu S T, Wu C, 2022. Characteristics of short wave infrared spectroscopy of sericite group minerals and their implications for exploration in the Yulong porphyry copper deposit, Tibet. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(1):40-49.

西藏玉龙斑岩铜矿床绢云母族蚀变矿物短波红外光谱特征及对勘查的指示意义

田成华[1], 杨立强[1*], 和文言[1], 张少颖[1], 刘申态[2], 吴 才[2]
(1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 西藏玉龙铜业股份有限公司, 西藏 昌都 854000)

摘要:玉龙斑岩铜矿晚期绢云母化、黏土化蚀变强烈叠加在早期的钾硅酸盐化带内,模糊了蚀变分带特征及其与铜矿化之间的相关性。利用短波红外光谱(SWIR)可快速识别斑岩铜矿床内含羟基蚀变矿物,根据该类矿物的空间分布特征与矿化的对应关系,指导找矿勘查工作。本文对玉龙铜矿床靠近斑岩体中心的三个钻孔进行了详细的蚀变-矿化编录和SWIR分析,在识别出高岭石、蒙脱石、绢云母族矿物(绢云母、多硅白云母)、绿泥石等蚀变矿物的基础上,重点剖析了绢云母族矿物空间分布规律及其与铜矿化之间的相关性。研究表明:深部富铜矿体(Cu>0.6%)紧贴斑岩体侵位中心产出,与绢云母族矿物在空间上紧密伴生,且靠近岩体中心多硅白云母相对发育,绢云母族矿物Al-OH吸收峰值较大(Pos2200>2207 nm)、结晶度较高(IC>2.0);靠近岩体中心外围矿体时,绢云母族矿物Pos2200值相对较小(2206~2207 nm)、IC值相对较低(1.0~2.0)。因此,绢云母族矿物高Pos2200值(>2207 nm)和高IC值(>2.0)以及多硅白云母的出现可作为紧贴斑岩体外围矿体产出的底界线,而绢云母族矿物相对低的Pos2200值(2206~2207 nm)和较低的IC值(1.0~2.0)可作为深部富铜矿体出现的标志。

关 键 词:玉龙斑岩铜矿床;短波红外光谱;绢云母族矿物;深部矿体
中图分类号:P618.41 **文献标识码:**A

Characteristics of short wave infrared spectroscopy of sericite group minerals and their implications for exploration in the Yulong porphyry copper deposit, Tibet

TIAN Chenghua[1], YANG Liqiang[1], HE Wenyan[1], ZHANG Shaoying[1], LIU Shentai[2], WU Cai[2]
(1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources*, *China University of Geosciences*, *Beijing* 100083, *China*; 2. *Yulong Copper Co., Ltd. of Tibet*, *Changdu* 854000, *China*)

Abstract: The late phyllic and clay alteration of Yulong porphyry copper deposit is strongly superimposed within the early potassic alteration, blurring alteration zonation and its correlation with copper mineralization. Using short-wave infrared spectroscopy (SWIR) can identify OH-bearing alteration minerals in porphyry copper deposits and

收稿日期: 2021-10-28; **改回日期:** 2022-01-05
作者简介: 田成华(1998—),硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: tianchua@foxmail.com
通讯作者: 杨立强(1971—),教授,博士生导师,主要从事矿床学及矿产普查与勘探的教学和科研工作。E-mail: lqyang@cugb.edu.cn
资助项目: 本文受国家重点研发计划(2019YFA0708603)、高等学校学科创新引智计划(BP0719021)、中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室专项基金(MSFGPMR201804)联合资助

identify alteration mineralization centers based on their spatial distribution. In this paper, we conduct detailed alteration-mineralization catalogs and SWIR analysis of three drill holes near the porphyry center of the Yulong copper deposit. Based on the identification of kaolinite, montmorillonite, sericite group minerals (sericite and phengite), chlorite and other alteration minerals, the spatial distribution patterns of sericite group minerals and their correlations with copper mineralization are emphatically analyzed. This study reveals that the deep Cu-rich ore bodies (>0.6 wt%) are immediately adjacent to the intrusion center of the porphyry body and are spatially associated with sericite. The phengite is relatively developed in the center of the rock body, and the absorption peak wavelength of the Al-OH of sericite group minerals is larger (Pos2200 >2207 nm) and the crystallinity is high (IC >2.0). The Pos2200 values and IC values of the sericite group minerals are relatively smaller (2206 ~2207 nm) and lower (1.0 ~2.0) when close to the peripheral ore body of rock center. Therefore, high Pos2200 values (>2207 nm), high IC values (>2.0) of sericite group minerals and occurrence of phengite can be used as the bottom boundary of ore bodies, while the relatively lower Pos2200 values (2206 ~2207 nm) and lower IC values (1.0 ~2.0) of sericite group minerals can be used as an indication of the occurrence of deep copper-rich ore bodies.

Key words: Yulong porphyry copper deposit; short wave infrared spectroscopy (SWIR); sericite group minerals; deep orebody

0　引言

对蚀变矿物的矿物类型、组合与时空分布特征开展系统研究,有益于解释矿床蚀变分带结构、深化对矿床成因的认识,提高矿床勘查的效率(Yanget al., 2016;刘向东等,2019;Deng et al., 2020)。然而,对于那些蚀变高度叠加或强烈地表风化作用导致蚀变分带特征杂乱的斑岩矿床,传统的勘查方法如岩相学观察、电子探针及 X 射线衍射光谱分析等,往往成本高耗时长且效率较低(陈华勇等,2019;田丰等,2019)。

短波红外光谱技术(SWIR)以其易携带、快速分析及极低成本等独特优势在矿床勘查中发挥着重要作用(唐楠等,2021)。通过对比热液蚀变矿物光谱学特征参数空间上的变化规律,可以反演蚀变强度、热液流体演化及特征蚀变矿物形成的物理化学条件,从而建立有效的勘查模型(Granham et al., 2018; Neal et al., 2018)。以绢云母族和绿泥石族等含羟基蚀变矿物为代表的 SWIR 光谱学参数的空间变化可用于确定矿化中心,已被广泛应用于蚀变分带特征杂乱的斑岩型矿床(Harraden et al., 2013;唐楠等,2015;郭娜等,2018;任欢等,2020)。

玉龙铜矿是三江成矿带内最大的斑岩铜矿床之一。前人对其矿床地质(Hou et al., 2004)、斑岩体成因(Jiang et al., 2006)、矿化蚀变特征(Hou et al., 2003; Sun et al., 2020)、岩浆 - 热液体系(Chang et al., 2018)等方面开展了详细的相关研究。然而,由于该矿床受强烈的物理风化与蚀变高度叠加的影响,代表热液较低温度的绢云母与晚期黏土蚀变矿物强烈叠加到早期钾硅酸盐化蚀变带

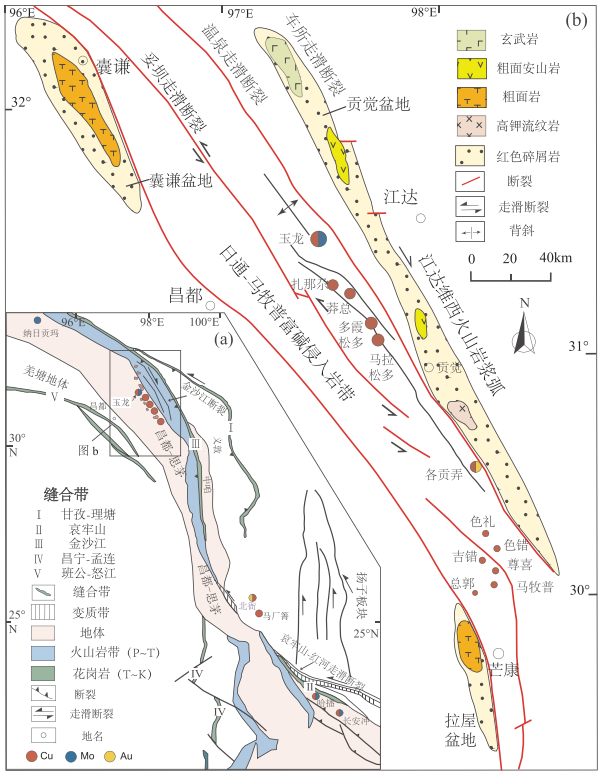


图 1　金沙江 - 哀牢山成矿带区域构造和矿床分布(a;He et al., 2017)及玉龙斑岩铜钼矿带地质略图(b;据唐仁鲤和罗怀松,1995)

Fig. 1　(a) Regional structure and deposit distribution of Jinshajiang-Ailaoshan metallogenic belt (a; He et al., 2017) and geological outline of Yulong porphyry copper-molybdenum ore belt (b; modified from Tang et al., 1995)

内,模糊了蚀变分带特征及其与矿化之间的关系,导致难以定位有利的矿化部位。为此,在对玉龙铜矿典型钻孔详细的蚀变－矿化编录的基础上,本文通过短波红外光谱确定了绢云母族蚀变矿物空间分布特征规律及其光谱参数变化,探讨了其与铜矿化之间的相关性,并建立了绢云母短波红外光谱找矿标志。

1 区域地质概况

玉龙铜矿位于特提斯－喜马拉雅构造带的东缘,处于三江成矿带中北段金沙江深断裂和澜沧江深断裂之间,是新生代金沙江－哀牢山成矿带的组成部分(图 1a;邓军等,2020)。三江成矿带所处的羌塘地体受班公湖－怒江与金沙江缝合带约束,与扬子板块的义敦岛弧带及澜沧江结合带具有共同的古生代褶皱变质基底(唐仁鲤和罗怀松,1995)。玉龙矿带内多发育褶皱、断裂,其 NNW 向的断裂及走滑拉分盆地控制矿带的展布,车所走滑断裂与妥坝－芒康断裂分别位于其东西两侧(图 1b)。矿带经历了加里东期、华力西期、印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期浅成—超浅成中酸性侵入岩的岩浆活动,对玉龙斑岩铜钼矿带具有重要成矿意义。矿带发育有玉龙、马拉松多、多霞松多、扎那尕和莽总等一系列斑岩矿床,Cu 资源量超过 1000 万吨(Hou et al., 2003)。

2 矿床地质

2.1 矿区地质特征

玉龙铜矿床是目前青藏高原东部昌都－思茅地体中最大的后碰撞斑岩矿床(图 1b ;Hou et al., 2003; Liang et al., 2009),已探明 650 万吨铜(0.62%)和 41 万吨钼(0.042%)资源量(玉龙矿区铜矿勘探报告,2009①)。矿床以始新世复式斑岩体为中心,呈岩株状侵位于恒星错－甘龙拉背斜轴部的由三叠纪海相碎屑岩和碳酸盐岩层序组成的上三叠统地层中(图 2a)。该复式岩体以二长花岗斑岩(MGP)为主,钻孔中可见与二长花岗斑岩呈侵入接触的花岗斑岩(GP)及矿床西部发育的钠长斑岩脉(AP)(孙茂妤等,2015)。三类斑岩体具有相似的斑晶矿物组合(石英、钾长石、斜长石和黑云母),但其丰度和大小各不相同:在 MGP、GP 和 AP 中,斑晶分别占比为 40% ~50%、20% ~30% 和 15% ~20%(Chang et al., 2017)。

2.2 蚀变矿化特征

矿区地表发育大面积的黏土化蚀变,新鲜斑岩体出露较少,同时受玉龙复式斑岩体侵位的影响,地层多蚀变为褐铁矿化角岩和含孔雀石化大理岩(图 3a)。矿区地表及浅部可见孔雀石化、褐铁矿化等氧化矿石,孔雀石呈皮壳状和薄膜状分布在岩石表面及裂隙部位,褐铁矿多呈疏松块状(图 3b-c),同时浅表发育铜硫化物矿石,矿石中可见辉铜矿、斑铜矿及黄铁矿(图 3d),在岩体外围的矽卡岩矿石中磁铁矿较为发育(图 3e)。

矿区矿化类型包括产于玉龙斑岩体内的铜钼矿化及围绕斑岩体地层中的角岩型矿化及岩体外围的矽卡岩矿化,主要以斑岩体铜钼矿化为主,其金

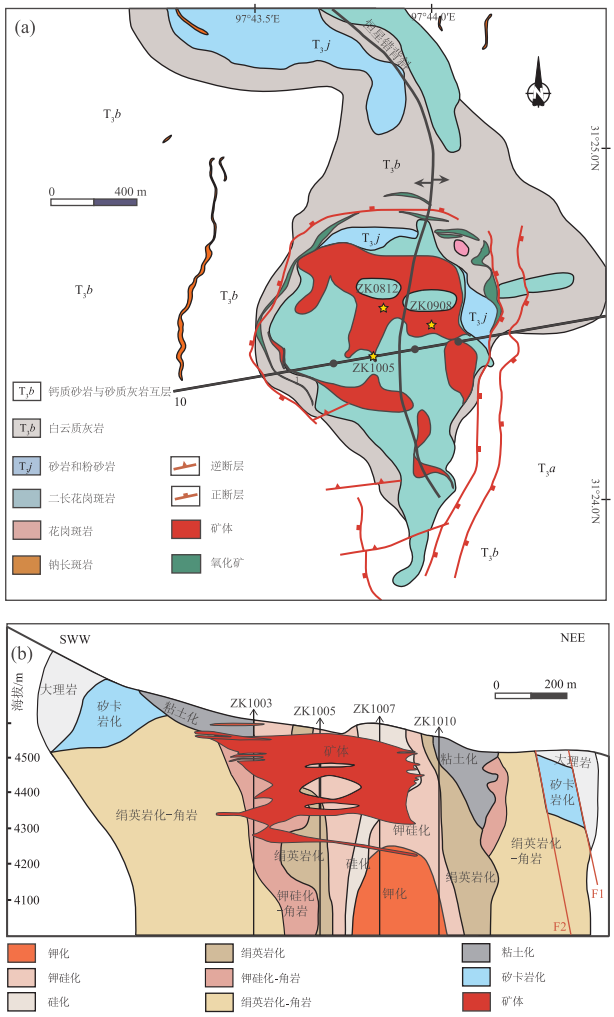
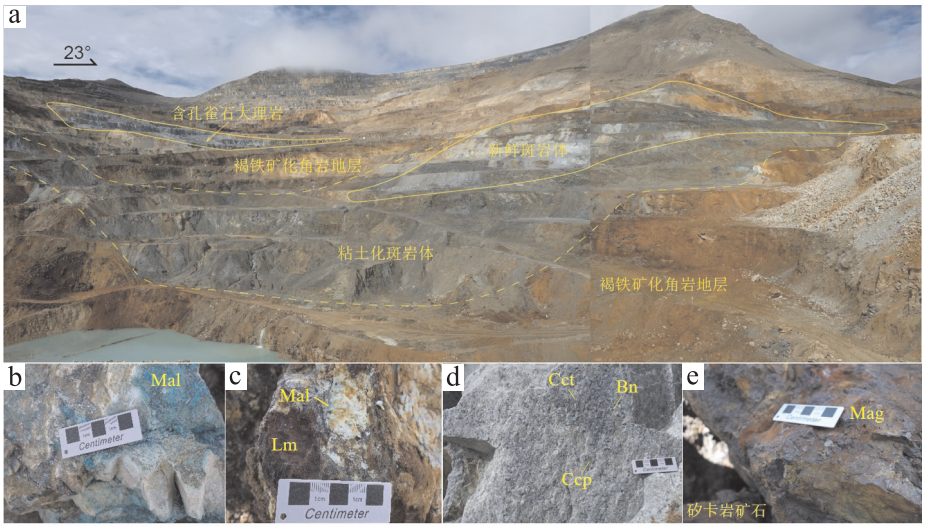


图 2 玉龙斑岩铜矿床地质简图(a;修改自玉龙矿区铜矿勘探报告,2009①)和 10 号勘探线剖面(b)

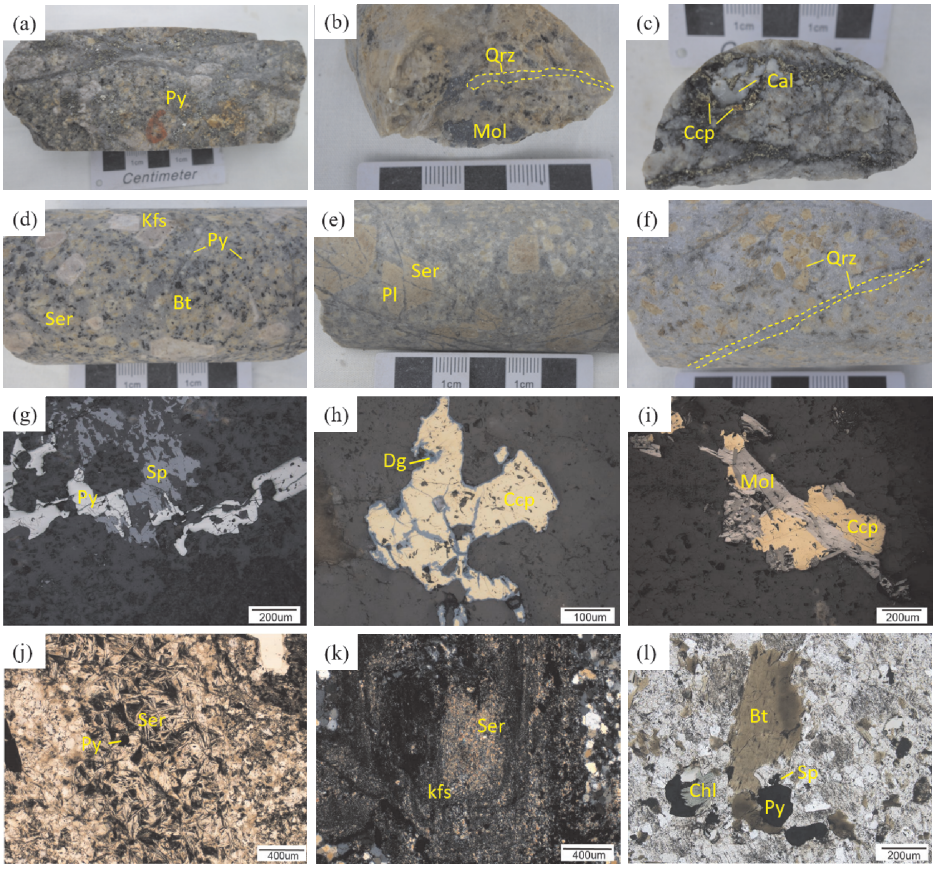
Fig. 2 Geological sketch of Yulong mining area (a; modified from Yulong Copper Exploration Report, 2009①) and section of 10 exploration line in the Yulong porphyry copper deposit



a. 矿区采场全景;b. 薄膜状孔雀石;c. 疏松块状褐铁矿;d. 浸染状铜硫化物;e. 致密块状矽卡岩矿石中磁铁矿。矿物缩写:Mal—孔雀石;Lm—褐铁矿;Cct—辉铜矿;Bn—斑铜矿;Ccp—黄铜矿;Mag—磁铁矿

图 3　玉龙铜矿露天采场全景和代表性矿石

Fig. 3　Panorama open-pitand representative ores of Yulong copper deposit



a. 浸染状黄铁矿;b. 辉钼矿与石英脉;c. 黄铜矿与方解石;d. 钾化与绢云母化蚀变;e. 斜长石斑晶绢云母化;f. 浑圆状石英颗粒;g. 闪锌矿交代黄铁矿;h. 蓝辉铜矿沿裂隙及边缘交代黄铜矿;i. 片状辉钼矿与黄铜矿共生;j. 绢云母与黄铁矿共生;k. 粘土化与绢云母化长石斑晶;l. 黄铁矿和闪锌矿与绿泥石共生。矿物缩写:Ser—绢云母;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bt—黑云母;Chl—绿泥石;Cal—方解石;Qrz—石英;Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿;Mol—辉钼矿;Sp—闪锌矿;Dg—蓝辉铜矿

图 4　玉龙斑岩铜矿床典型蚀变与矿化的镜下特征

Fig. 4　Microscopic characteristics of typical alteration and mineralization in Yulong porphyry copper deposit

属矿物主要有黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿等。黄铁矿多呈浸染状分布与岩石裂隙中,辉钼矿呈粒状集合体分布在岩石裂隙,与石英细脉共生,手标本下可见黄铜矿呈脉状与方解石共生(图 4a-c)。镜下可见不规则粒状黄铁矿被闪锌矿所交代,蓝辉铜矿沿黄铜矿裂隙及边缘进行交代,黄铜矿表面粗糙且裂隙发育,与板片状辉钼矿共生(图 4g-i)。

矿区蚀变强烈,从岩体中心向外围依次发育有钾化蚀变带、钾硅酸盐化蚀变带(钾化与黑云母化)、绢英岩化蚀变带及后期岩体上部发育的一些黏土化带。钾硅酸盐化蚀变带靠近岩体中心,可见钾长石斑晶与石英以及与黑云母矿物共生组合,其中钾长石斑晶颗粒较大,斜长石可见钾长石加大边,同时基质及斜长石颗粒具有显著的绢云母化,叠加钾化蚀变,并伴随石英脉及金属硫化物分布,标本下可见浑圆状石英,可能代表流体出溶的结果(图 3d-f)。镜下可见的绢云母蚀变可分为两种,一种是基质中呈放射鳞片状的绢云母集合体,与金属硫化物(黄铁矿)共生。另一种是长石斑晶发育的绢云母化,斑晶颗粒的内部及遍布均可见绢云母化,且长石表面黏古化强烈,依稀可见其环带(图 4j-k)。可见黑云母发生绿泥石化,这与区域上微弱的青磐岩化特征吻合(图 4l)。

我们对靠近地表岩体出露中心位置的 8、9、10 号勘探线的 ZK0812、ZK0908 和 ZK1005 三个钻孔进行了详细的编录工作,并将柱状图与其 Cu 矿化品位相对应(图 5)。ZK1005 主要岩性以二长花岗斑岩及角岩为主,蚀变类型有钾长石化、黑云母化、绢英岩化,浅部粘土化蚀变强烈。浅部次生富集作用明显,Cu 品位较高。150 ~ 300 m 角岩发育且其矿化相对较好,150 m 处 Cu 品位异常高值,此处发育绢云母蚀变与硅化蚀变叠加。该钻孔二长花岗斑岩钾硅酸盐化与绢云母化发育部位矿化较好,角岩矿化相对较弱。ZK0908 岩性主要为二长花岗斑岩,该钻孔绢英岩化与黑云母化较发育,也可见少部分绿泥石化。在 300 ~ 400 m 矿化现象较好,此处发育较好的黑云母化和绢英岩化,绢云母矿物在此段分布较多。ZK0812 中主要以二长花岗斑岩为主,深部可见花岗斑岩分布,其周围发育硅化及晚期的绢英岩化,但花岗斑岩矿化不明显,在钾化与绢英岩化叠加部位矿化相对较好,但钻孔整体的矿化现象不明显。通过蚀变强度及矿化的对比分析,发现绢英岩化、深部黑云母化蚀变与矿化关系密切,且矿化集中在浅部,400 m 以下矿化较弱。但是仅从肉眼

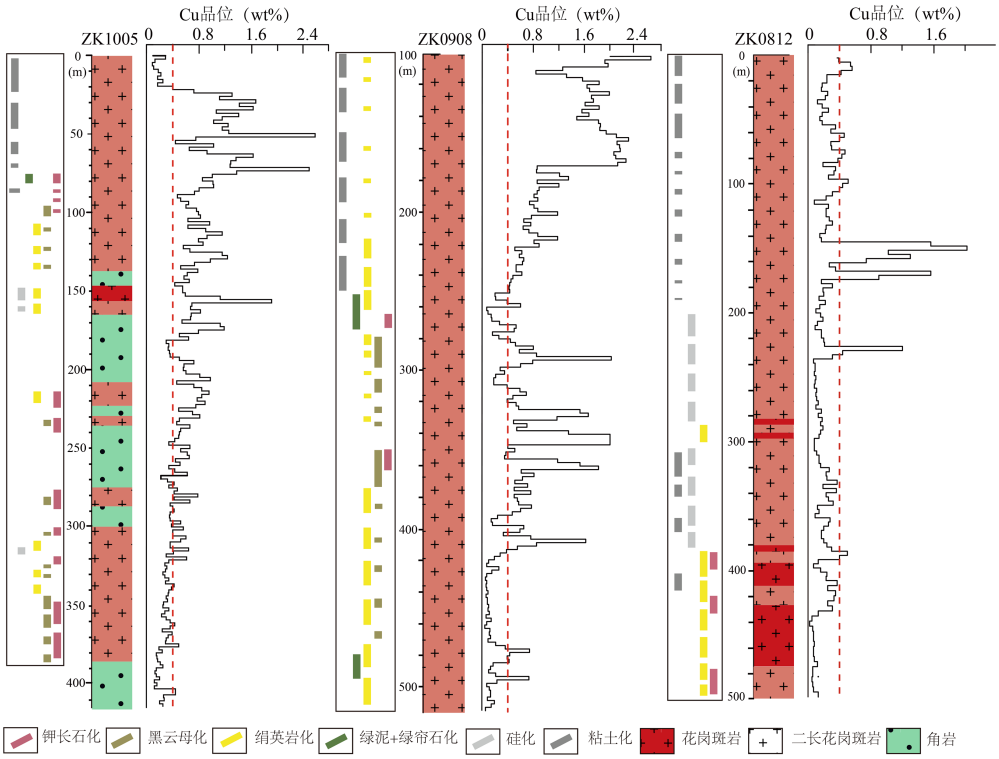


图 5 玉龙铜矿钻孔柱状图、蚀变类型与 Cu 品位变化

Fig. 5 Histogram of drill hole, alteration type and Cu grade spatial variation of Yulong copper deposit

无法很好识别并区分蚀变类型,为了更好地将蚀变与矿化对应,我们对岩心样品进行了短波红外测试。

3　样品采集及测试方法

本次测试的玉龙斑岩铜矿床三个钻孔的岩芯样共 270 余个,获得了 560 条光谱数据。其中 ZK0812 为 42 个采样点,共获得 231 条光谱曲线。ZK0908 为 25 个采样点,共 127 条光谱曲线。ZK1005 为 32 个采样点共 200 条光谱曲线。本次使用 TerraSpec Halo 便携式近红外矿物分析仪对钻孔样品进行测试,测试前需要对样品进行切面、剖光、清洗、晾晒等处理,仪器使用时将 Spectralon 白色参比盘放于仪器光谱采集窗上进行校准,测试时选取样品中较为平滑的面置于采集窗进行光谱采集,为了减少测试误差,要避开硫化物、石英脉及一些包体等(刘鹤等,2015;田丰等,2019),每个样品点至少测试四次,每次光谱采集时间约为 10 ~ 15 s。

短波红外测试光谱数据结果主要是依靠 The Spectral Geologist Version 8(TSG 8)软件进行相关解译与处理,TSG 是澳大利亚联邦科学与工业研究组(CSIRO)研发的光谱软件,便于地质工作者分析样品光谱数据并确定矿物种类。TSG 在运用数学拟合解译时也会存在误差,如绿泥石有时会被识别为绿帘石,黑云母被识别成角闪石等,具有非常相似的成分和晶格结构的矿物从而会产生相似的光谱,从而不易被区分,需要进行人工解译检查核对。伊利石和绢云母(白云母)光谱特征也极为相似,但在某些情况下,可以通过吸收特征的位置、深度或形状的微妙变化及结合电子探针来区分(Thompson et al., 1999; Harraden et al., 2013; Wang et al., 2021)。本文将伊利石和绢云母(白云母)归为一类解译分析,统称为绢云母族矿物。

TSG 光谱局部的吸收特征参数主要有光谱吸收位置(absorption position)、吸收深度(absorption depth)、吸收宽度(absorption width)等(杨国防,2012;赵利青等,2008)。吸收位置是反射率最低的位置,对应矿物中基团的光谱吸收峰。绢云母矿物在光谱测试中受三个基团(-OH、H_2O、Al-OH)的影响,分别在 1400 nm、1900 nm、2200 nm 附近出现特征吸收峰。同时吸收深度表示在标准化反射光谱中吸收峰所对应的深度,通过绢云母族矿物 2200 nm 处吸收深度(Dep2200)与 1900 nm 处吸收深度(Dep1900)之比可以计算出其结晶度(IC)值(杨志明等,2012)。

4　SWIR 测试结果分析

4.1　蚀变矿物组合特征

本次测试识别的矿物包括高岭石、蒙脱石、绢云母、多硅白云母、绿泥石及少数碳酸盐、硫酸盐类等。其中高岭石为矿区内最为发育的黏土类硅酸盐矿物,是晚期低温黏土化的蚀变产物,主要与绢云母伴生出现。绢云母矿物(绢云母、多硅白云母)+高岭石是最为普遍的蚀变矿物组合,其次为高岭石+蒙脱石+绢云母,金云母+绿泥石+绢云母、角闪石+绿泥石等形式的矿物组合形式(图 6)。其中 ZK0812 与 ZK0908 两个钻孔几乎均以高岭石+绢云母及高岭石+蒙脱石+绢云母组合为主,ZK1005 中出现金云母、绿泥石及角闪石等矿物组合,与钻孔角岩出露部位相对应。谱解译结果显示高岭石类粘土矿物广泛出现于钻孔中,并且普遍以高岭石+绢云母矿物组合出现,是贯穿性蚀变矿物。由于玉龙矿区内高岭石的光谱特征无明显变化规律,所以本文选用绢云母矿物作为特征矿物进行分析。

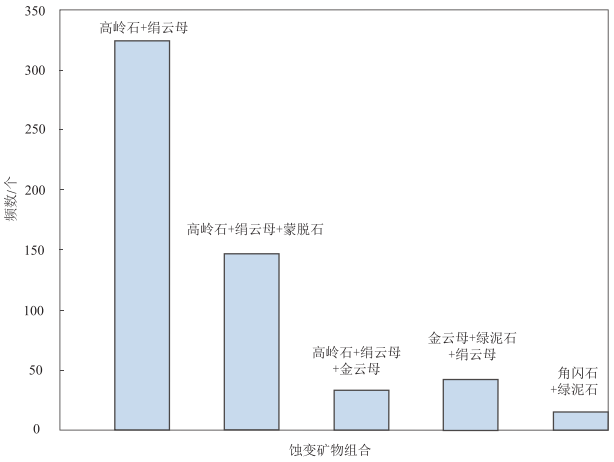


图 6　钻孔主要蚀变类型及其矿物组合特征

Fig. 6　The alteration types and mineral assemblages of drill hole in Yulong deposit

4.2　绢云母族矿物空间分布及光谱特征参数规律

前人对绢云母 SWIR 研究显示不同成分绢云母族矿物 Al-OH 吸收峰值(Pos2200)不同,钠云母(富钠富铝)Pos2200 值接近 2190 nm,绢云母(富铝富钾)Pos2200 值在 2200 nm 附近,多硅白云母(富镁富铁贫铝)Pos2200 值通常大于 2210 nm(Duke, 1994)。本文通过 SWIR 识别出的绢云母族矿物主要事绢云母与多硅白云母,而极少见钠云母的出

现。ZK0812 在浅部较发育多硅白云母,200 m 附近以绢云母为主。ZK0908 普遍为绢云母矿物,该钻孔无多硅白云母出现;ZK1005 深部发育多硅白云母,浅部较少,主要以绢云母为主。根据绢云母族矿物在钻孔中的空间分布特征为:ZK0812 中以绢云母、多硅白云母为主,ZK0908 和 ZK1005 钻孔中以绢云母分布为主。相比较于三个钻孔的地表位置 ZK0812 则更靠近于岩体出露的中心位置(图 7)。

绢云母族矿物 Al-OH 吸收峰值位于 2205 ~ 2209 nm,主要集中于 2206 ~ 2208 nm(图 8a)。TSG 软件所识别出多硅白云母 Pos2200 值的范围多在 2207 ~ 2208 nm。绢云母族结晶度值(IC)范围为 0 ~ 3,主要集中在 0.5 ~ 2.5。且绢云母矿物 Al-OH 吸收波峰值与 IC 值随深度的增加而呈现增大的趋势,其 Pos2200 值浅部集中在 2206 ~ 2207 nm 之间,大于 300 m 区域绢云母矿物 Pos2200 值多分布在 2207 nm 以上(图 8a)。绢云母矿物 IC 值与深度的线性关系较好,较高的 IC 值(> 1.5)基本出现在 300 ~ 500 m 的区域,浅部区域的绢云母 IC 值较小(图 8b)。

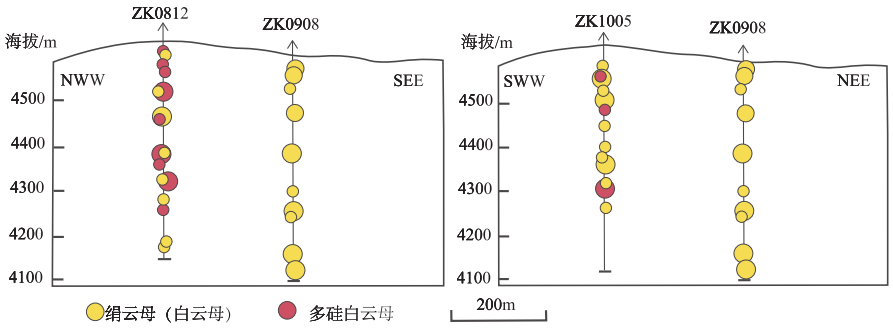


图 7 典型钻孔的绢云母族矿物空间分布规律

Fig. 7 Spatial distribution of sericite minerals in typical drill hole

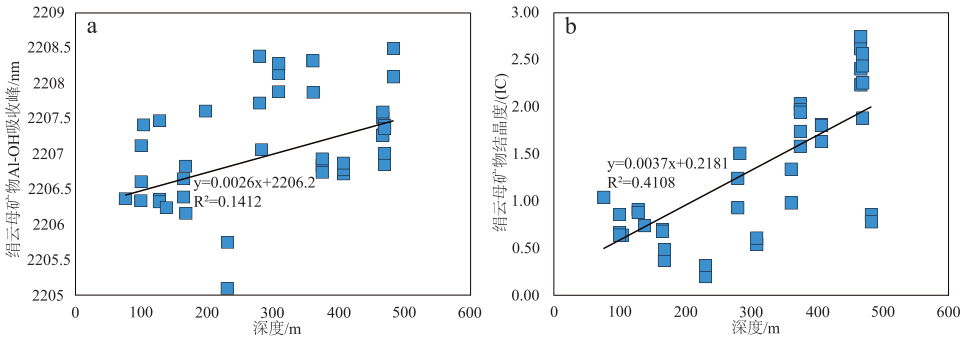


图 8 绢云母矿物 Al-OH 吸收波峰-深度(a)及绢云母矿物结晶度-深度(b)关系图

Fig. 8 The relationship graph of sericite group minerals Al-OH absorption wavelength-depth (a) and sericite group minerals crystallinity-depth (b)

5 讨论

5.1 绢云母光谱特征参数的影响因素

前人研究认为绢云母结晶度值(IC)对流体温度有直接的反映,高温条件下,绢云母矿物接近理想的配比成分,随着温度的降低,水会吸附在绢云母分子层间,绢云母矿物在 1900 nm 产生较强的吸收峰,从而使其结晶度值降低,绢云母的 IC 值降低(杨志明等,2012)。绢云母矿物 Pos2200 值的大小受绢云母分子中八面体 Al^{VI} 的含量的影响,温度越高,Al^{VI} 含量越高,绢云母矿物 Pos2200 值就越小。因此在温度较高时绢云母矿物 Pos2200 值较小。上图中绢云母 IC 值随深度的加深而增大,指示深部的温度较高,而绢云母矿物 Pos2200 值随钻孔深度的加深也呈现出增大的趋势及钻孔深部出现多硅白云母,这一现象仅用温度因素来对其进行解释是不吻合的。然而影响绢云母矿物 Pos2200 值并非温度这一个因素,有前人研究认为热液流体的 pH 也是制约 Pos2200 值另外一个因素。在斑岩体系中,岩浆流体在向上运移过程中会伴随着歧化反应的进

行,温度逐渐降低,流体的酸性增强,在流体运移通道浅部,多形成富 Al 绢云母矿物,其 Pos2200 值较低。其在横向上,越靠近流体运移通道,酸性增强,形成绢云母矿物 Pos2200 值也会越小(Halley et. al. , 2015)。而若是以流体 PH 对其影响为主导则可以解释本文绢云母矿物在空间上的分布特征:在靠近玉龙斑岩体的深部区域,流体的温度高且为中-弱酸性,此时容易形成 Pos2200 值较大的多硅白云母,随着流体的向浅部运移,其温度不断下降且流体酸性不断变强,此时则形成 Pos2200 值较小的富铝绢云母。本次所测整体绢云母 Pos2200 值也相对较大(接近 2210 nm),说明其形成于较深的环境。同时钻孔勘探可能已接近斑岩体的中心位置,且钻孔深度最深控制在 500 m 左右,黏土化矿物(高岭石)普遍发育,说明玉龙铜矿床已遭受了较为严重的剥蚀,其斑岩体侵位中心埋藏浅已接近地表,所以矿床整体经受了强烈的地表物理风化作用,晚期的黏土化蚀变遍布整个矿区。同时 ZK0812 中也出现多硅白云母,在相比较于其他两个钻孔 ZK0812 更靠近于岩体出露的中心位置,也说明了该钻孔靠近岩体中心位置,表现为绢云母 Pos2200 值越大;其浅部出现多硅白云母可能是花岗斑岩枝穿插二长花岗斑岩所致,可能指示花岗斑岩的侵位中心。

玉龙斑岩铜矿床含矿斑岩(二长花岗斑岩)及其内部的花岗斑岩发育强烈的蚀变,钻孔岩芯样中观察到的蚀变主要为钾硅酸盐化、绢英岩化、黏土化及浅部次生氧化,含矿斑岩青磐岩化不发育。在短波红外光谱测试中主要识别的矿物为高岭石类和绢云母类矿物,且二者伴生出现,仅在 1005 钻孔中识别出少量绿泥石与角闪石、金云母组合。相较于其他两个钻孔 1005 钻孔更偏向矿床西侧,ZK0812 与 ZK0908 短波红外测试均无发现绿泥石矿物,或许在靠近东侧对称位置会发现绿泥石矿物,较早期的青磐岩化蚀变的大部分缺失也说明了矿床被剥蚀严重。由于此次取样位置范围较为局限,测试所获的蚀变矿物组合没有明显的变化,对于进一步划分玉龙矿床蚀变分带还需要进行后期的研究工作。

5.2　矿床勘查与找矿方向

目前广泛分布于斑岩矿床中的绢云母族蚀变矿物(钠云母、绢云母、多硅白云母)结晶度值和特征吸收峰值可作为寻找矿床蚀变矿化中心与有利成矿部位的有效标志(Yang et al., 2005; 杨志明等, 2012;许超等,2017;刘新星等,2021)。例如杨志明等(2012)通过计算伊利石的特征光谱参数总结出其在矿区内的变化规律:伊利石结晶度与温度呈正相关关系,在靠近矿化中心处伊利石结晶度值较高,远离矿化中心处 IC 值逐渐降低。任欢等(2020)发现接近含矿热液中心绢云母具有较短 Al-OH 吸收波长。同时在不同矿床中靠近矿化中心绢云母族矿物 2200 nm 吸收峰值并不是只呈现出上述一种变化规律:许超等(2017)在福建紫金山矿床中通过短波红外光谱(SWIR)研究发现,从矿化中心到外围,伊利石结晶度值(IC)和伊利石 2200 nm 吸收峰位值 Pos2200 均有明显地从高值到低值的变化趋势;Laakso 等(2016)在研究加拿大 Izok Lake 矿床时得出靠近矿体的 Pos2200 值较高,而远离矿体的 Pos2200 值变低。可见,对于不同矿床绢云母矿物的特征参数表现出不一致的规律。本次的短波红外光谱测试中也选取了绢云母族矿物为主要研究分析的蚀变矿物,研究发现钻孔控制部位已接近深部岩体侵位中心(400 ~ 500 m),剖面上越靠近岩体中心的位置绢云母族矿物表现较大的绢云母 Al-OH 吸收波长(> 2207 nm)与较高的绢云母 IC 值(> 2.0)。且靠近岩体中心位置多分布多硅白云母,由岩体中心外围绢云母含量增加,多伴随高品位矿化,剖面东西两侧较于中间区域矿化发育(图 9),说明此时矿体可能已到达深部斑岩体附近区域。

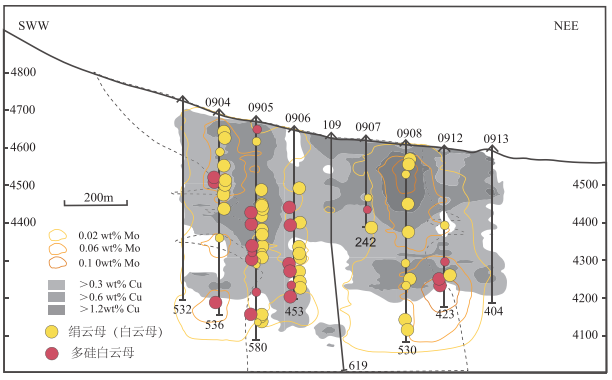


图 9　玉龙铜矿 09 勘探线剖面的绢云母族矿物与矿化关系(剖面数据来源于昌佳,2019,zk0908 是本文测试的结果)

Fig. 9　Relationship between sericite group minerals and mineralization in the 09 exploration line profile of the Yulong copper deposit

绢云母族蚀变矿物纵向的空间分布及特征参数规律显示:越靠近深部岩体中心部位多硅白云母越发育,且绢云母矿物 IC 值与 Pos2200 值也呈现增

大的趋势,在靠近岩体中心外围矿体,绢云母族矿物 Pos2200 值相对较小(2206 ~ 2207 nm)、IC 值相对较低(1.0 ~ 2.0)。利用绢云母矿物短波红外光谱特征在纵向上对紧贴岩体外围发育的矿体进行定位及约束,为了更高效的勘查工作,后期可继续补充一些短波红外光谱相关工作,将横向与纵向上短波红外光谱特征结合,将斑岩体外围矿体区域更好进行限定,同时建立系统 SWIR 勘查模型指导找矿工作。

6 结论

(1)绢云母矿物 Pos2200 值在靠近岩体中心主要受成矿流体 pH 影响,岩浆流体在向上运移过程中会伴随着歧化反应的进行,流体的 pH 下降,温度也逐渐降低,弱酸性条件下利于多硅白云母的形成,此时绢云母族矿物具有较长的 Al-OH 吸收波长。IC 值通常与温度呈正比例关系,在高 IC 值位置其温度也较高。绢云母蚀变矿物高 Pos2200 值与高 IC 值区域表明该位置流体的 pH 较大,温度较高,指示该区域靠近深部斑岩体中心位置。

(2)玉龙铜矿的绢云母族矿物 SWIR 研究结果显示:钻孔控制已接近岩体侵位中心部位,靠近岩体侵位中心绢云母族矿物具有较大的 Pos2200 值(>2207 nm)与 IC 值(>2.0),并伴随多硅白云母的发育,由侵位中心向外绢云母逐渐增多,且铜矿化紧贴岩体发育,富铜矿体(>0.6 wt%)与绢云母在空间上紧密伴生。因此,绢云母族矿物高 Pos2200 值(>2207 nm)和高 IC 值(> 2.0)以及多硅白云母的出现可作为紧贴斑岩体外围矿体产出的底界线,相对于岩体中心较低的绢云母族矿物 Pos2200 值(2206 ~ 2207 nm)和较低的 IC 值(1.0 ~ 2.0)可作为深部富铜矿体出现的标志。

致谢:野外工作得到了高雪博士后、张瑞锐博士与张宏睿硕士的协助,室内分析测试中得到了吴松讲师和赵博硕士的帮助,也感谢各审稿专家提出的宝贵修改建议,在此表示衷心的感谢!

注释:

①西藏玉龙铜业股份有限公司, 2009. 西藏自治区江达县玉龙矿区铜矿勘探报告[R]

参考文献(References):

Chang, J, Li J W, Selby D, et al., 2017. Geological and Chronological Constraints on the Long-Lived Eocene Yulong Porphyry Cu-Mo Deposit, Eastern Tibet: Implications for the Lifespan of Giant Porphyry Cu Deposits [J] Economic Geology, 112 (7): 1719 - 1746.

Chang J, Li J W, Audétat A, 2018. Formation and evolution of multistage magmatic-hydrothermal fluids at the Yulong porphyry Cu-Mo deposit, eastern Tibet: Insights from LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 232: 181 - 205.

Cooke D R, Baker M, Hollings P, et al., 2014. New advances in detecting the distal geochemical footprints of porphyry systems: Epidote mineral chemistry as a tool for vectoring and fertility assessments[J]. Economic Geology Special Publication, 18: 1 - 27.

Deng J, Yang L Q, Groves D I, et al., 2020. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China [J]. Earth-Sciences Reviews, 208: 103274.

Duke E F, 1994. Near Infrared Spectra of Muscovite, Tschermak Substitution, and Metamorphic Reaction Progress: Implications for Remote Sensing [J]. Geology, 22(7): 621 - 624.

Graham, Garth E, Kokaly, et al., 2018. Application of Imaging Spectroscopy for Mineral Exploration in Alaska: A Study over Porphyry Cu Deposits in the Eastern Alaska Range [J]. Economic Geology, 113(2): 489 - 510.

Guo N, Shi W X, Huan Y R, et al., 2018. Alteration mapping and prospecting model construction inthe Tiegelongnan ore deposit of the Duolong ore concentration area, northern Tibet, based on shortwave infrared technique [J]. Geological Bulletin of China, 37(2 - 3): 446 - 457.

Harraden C L, McNulty B A, Gregory M J, et al., 2013. Shortwave Infrared Spectral Analysis of Hydro thermal Alteration Associated with the Pebble PorphyryCopper-Gold-Molybdenum Deposit, Iliamna, Alaska [J]. Economic Geology, 108(3): 483 - 494.

He W Y, Yang L Q, Brugger J, et al., 2017. Hydrothermal evolution and ore genesis of the Beiya giant Au polymetallic deposit western Yunnan, China: Evidence from fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes [J]. Ore Geology Reviews, 90: 847 - 862.

Halley S, Dilles J H, Tosdal R M, 2015. Footprints: Hydrothermal Alteration and Geochemical Dispersion around Porphyry Copper Deposits [J]. Society of Economic Geologists Newsletter (100): 1 - 17.

Herrmann W, Blake M, Doyle M, et al., 2001. Short Wavelength Infrared (SWIR) Spectral Analysis ofHydrothermal Alteration Zones Associated with Base Metal Sulfide Deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland [J]. Economic Geology, 96(5): 939 - 955.

Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, et al., 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet [J]. Economic Geology, 98(1):125 - 145.

Jones S, Herrnumn W, Gemmell J B, 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[J]. Economic Geology, 100(2): 273 - 294.

Laakso K, Rivard B, Peter J M, et al., 2016. Application of airborne, laboratory, and field hyperspectral methods to mineral exploration in the Canadian arctic: Recognition and characterization of volcanogenic massive sulfide-associated hydrothermal alteration in the Izok Lake deposit area, Nunavut, Canada [J]. Economic Geology, 110(4): 925 – 941.

Liang H Y, Sun W, Su W C, et al., 2009. Porphyry copper-gold mineralization at Yulong, China, promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration[J]. Economic Geology, 104(4): 587 – 596.

Neal L C, Wilkinson J J, Mason P J, et al., 2017. Spectral characteristics of propylitic alteration minerals as a vectoring tool for porphyry copper deposits[J]. Journal of Geochemical Exploration, 184: 179 – 198.

Ren H, Zheng Y Y, Wu S, et al., 2020. Characteristics of short-wave infrared spectrum and prospecting significance of Demingding Copper and Molybdenum deposit in Xizang province [J]. Earth Science, 45(3): 930 – 944.

Rusk B, Reed M, 2002. Scanning electron microscope-cathodoluminescence analysis of quartz reveals complex growth histories in veins from the Butte porphyry copper deposit, Montana [J]. Geology, 30(8): 727 – 727.

Sun M Y, Monecke T, Reynolds T J, et al., 2020. Understanding the evolution of magmatic-hydrothermal systems based on microtextural relationships, fluid inclusion petrography, and quartz solubility constraints: insights into the formation of the Yulong Cu-Mo porphyry deposit, eastern Tibetan Plateau, China [J]. Mineralium Deposita, 56(5): 823 – 842.

Thompson A J B, Phoebe L H, Audrey J R. 1999. Alteration Mapping in Exploration: Application of Short Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy [C]// Society of Economic Geologists' Newsletter 39: 1 – 27.

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 [J]. Mineralium Deposita, 40(3): 324 – 336.

Yang L Q, Deng J, Guo L N, et al., 2016. Origin and evolution of ore fluid, and gold deposition processes at the giant Taishang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China [J]. Ore Geology Reviews (72): 585 – 602.

昌佳,2019. 岩浆-热液体系的形成和演化及其对超大型斑岩铜矿床的控制:以西藏玉龙和美国 SantaRita 斑岩型铜钼矿床为例[D]. 武汉:中国地质大学(武汉).

陈华勇,张世涛,初高彬,等,2019. 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, 35(12):3629 – 3643.

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[J]. 地球科学,43(9):2911 – 2928.

陈喜连,黄文婷,邹银桥,等,2016. 玉龙斑岩铜矿带南段含矿斑岩体锆石 U- Pb 年龄、地球化学特征及南北段成矿规模差异分析[J]. 岩石学报,32(8):2522 – 2534.

邓军,王庆飞,陈福川,等, 2020. 再论三江特提斯复合成矿系统[J]. 地学前缘(2):106 – 136.

郭利果,刘玉平,徐伟,等,2006. SHRIMP 锆石年代学对西藏玉龙斑岩铜矿成矿年龄的制约[J]. 岩石学报,22 (4) : 1009 – 1016.

郭娜,史维鑫,黄一入,等,2018. 基于短波红外技术的西藏多龙矿集区铁格隆南矿床荣那矿段及其外围蚀变填图-勘查模型构建[J]. 地质通报,37(2):446 – 457.

侯增谦,钟大赉,邓万明, 2004. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式[J]. 中国地质, 31(1) : 1 – 16.

黄一入,郭娜,郑龙,等, 2017. 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, 38(5):779 – 789.

姜耀辉,蒋少涌,凌洪飞,等, 2006. 陆-陆碰撞造山环境下含铜斑岩岩石成因——以藏东玉龙斑岩铜矿带为例[J]. 岩石学报, 22(3):697 – 706.

李荫清,芮宗瑶,程莱仙, 1981. 玉龙斑岩铜-钼-矿床的流体包裹体及成矿作用研究[J]. 地质学报(3):216 – 231.

刘鹤,马宇,任宏,等,2015. 福建铁帽山钼矿床围岩蚀变的短波红外光谱学研究[J]. 矿物学报, 35(2):221 – 228.

刘向东,邓军,张良,等, 2019. 胶西北寺庄金矿床热液蚀变作用[J]. 岩石学报, 35(5):1551 – 1565.

任欢,郑有业,吴松,等,2020. 西藏德明顶铜钼矿床短波红外光谱特征及勘查指示意义[J]. 地球科学, 45(3):930 – 944.

孙茂好,杨志明,2015. 西藏玉龙铜矿床成矿斑岩的厘定及地质意义[J]. 矿物岩石学杂志, 34(4):439 – 504.

唐仁鲤,罗怀松,1995. 西藏玉龙铜(铝)矿带地质[M]. 北京:地质出版社, 151 – 169.

唐楠,唐菊兴,郭娜,等,2015. 短波红外光谱仪在矿床蚀变分带研究中的应用——以西藏荣那斑岩-浅成低温热液矿床为例[J]. 矿物学报(S1): 925 – 926.

唐楠,林彬,李玉彬,等,2021. 短波红外光谱技术在斑岩 – 高硫化型浅成低温热液矿床中的应用以——西藏铁格隆南超大型铜(金)矿床为例[J]. 地质学报,95(8):2613 – 2627.

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[J]. 地球科学, 44(6):2143 – 2154.

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[J]. 矿床地质, 36(5):1013 – 1038.

杨国防, 2012. 岩芯光谱测量与蚀变矿物信息提取[D]. 南昌:东华理工大学.

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[J]. 矿床地质, 31(4):699 – 717.

杨志明,侯增谦,周利敏,等,2020. 中国斑岩铜矿床中的主要关键矿产[J]. 科学通报, 65(33):3653 – 3664.

赵利青,邓军,原海涛,等, 2008. 台上金矿床蚀变带短波红外光谱研究[J]. 地质与勘探,44(5):58 – 63.

责任编辑:黄春梅