

郭东旭, 刘晓, 张海兰, 等. 基于红外光谱技术研究云南普朗斑岩铜矿的蚀变和矿化特征[J]. 岩矿测试, 2021, 40(5): 698 – 709.

GUO Dong – xu, LIU Xiao, ZHANG Hai – lan, et al. The Infrared Spectroscopy Characteristics of Alteration and Mineralization in the Porphyry Copper Deposit in Pulang, Yunnan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(5): 698 – 709.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11 – 2131/td.202005060002】

基于红外光谱技术研究云南普朗斑岩铜矿的蚀变和矿化特征

郭东旭, 刘晓, 张海兰, 张志国
(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作为一种绿色、快速、无损、精确探测矿物的技术手段而倍受关注, 针对斑岩型矿床蚀变矿物高度叠加、蚀变分带界线不明显、细粒蚀变矿物多、黏土蚀变矿物多等特征, 该技术在蚀变矿物识别和勘探信息解读等方面优势突出。本文应用红外光谱技术对云南普朗斑岩铜矿区钻孔 ZK1801 岩心进行矿物识别和蚀变分带划分的研究, 识别出钾硅酸盐化带、绿帘石 – 绿泥石化带、绿泥石 – 伊利石化带、石英 – 伊利石化带和泥化带。研究表明: 普朗铜矿整个钻孔的蚀变矿物主要有石英、钾长石、绢云母、绿泥石、绿帘石、高岭石、蒙脱石、伊利石等; 根据矿化特征, 发现铜矿体广泛赋存在钾硅酸盐化带和绿帘石 – 绿泥石化带中, 与矿化关系密切的蚀变矿物“石英 + 钾长石 + 绢云母”和“绿帘石 + 绿泥石”, 可以作为普朗矿床勘查的标型蚀变矿物组合; 研究区广泛发育的绢云母 Al—OH 波长随钻孔深度增加而逐渐从 2210 ~ 2205nm 减小到 2202 ~ 2198nm, Al—OH 波长 2210 ~ 2205nm(长波绢云母)与矿化关系密切, 可以作为普朗矿床勘查的指示信息。

关键词: 红外光谱; 蚀变矿物; 蚀变分带; 钾硅酸盐化; 绿帘石 – 绿泥石化; 斑岩铜矿; 普朗

要点:

(1) 采用红外光谱技术对普朗矿区的钻孔进行了矿物识别和蚀变分带划分。

(2) 石英 + 钾长石 + 绢云母和绿帘石 + 绿泥石, 可以作为普朗矿床勘查的标型蚀变矿物组合。

(3) Al—OH 波长 2210 ~ 2205nm(长波绢云母)与矿化关系密切, 可以作为普朗矿床勘查的指示信息。

中图分类号: P575.4 文献标识码: B

斑岩铜矿提供了全球约 75% 的铜、约 50% 的钼, 具有重要的经济价值, 一直以来倍受工业界和地质学家的关注^[1-3]。传统典型的斑岩铜矿勘查方法是, 根据地表出露的蚀变矿化分带, 结合经典面状蚀变分带模型, 推测矿化中心位置, 进而通过地球物理、地球化学、地质钻探等勘探技术加以综合评估和验证^[4]。然而, 斑岩型矿床具有蚀变矿物高度叠加和蚀变分带界线不明显以及细粒蚀变矿物多、黏土蚀变矿物多等特点^[3-5], 不利于蚀变矿物的识别和勘探信息的解读。因此, 如何高效缩小小勘查区域, 确定蚀变和矿化中心, 显得十分迫切。

近年来, 红外光谱作为一种绿色、快速、无损、精

确探测矿物的技术手段而受到越来越广泛的关注。按照波长不同, 红外光谱包括可见光 – 近红外(380 ~ 1100nm)、短波红外(1100 ~ 2500nm)、热红外(6000 ~ 14500nm)等^[6-7]。在国外, 红外光谱技术被广泛应用于 IOCG 矿床^[8]、斑岩型铜矿^[9]、VMS 型矿床^[10]等矿床类型的理论研究和找矿勘探。在中国, 短波红外光谱被广泛应用于斑岩型铜矿^[11-16]、中低温热液矿床^[17-20]、稀有金属矿床^[21]等矿床类型的研究, 高效识别出蚀变矿物与蚀变分带, 分析成矿环境, 不断推动对热液中心的认识和勘查模型的建立, 促进找矿勘查技术的进步和发展。热红外光谱应用于矽卡岩型、伟晶岩型^[22-24]等矿床类型的研

收稿日期: 2020 – 05 – 06; 修回日期: 2020 – 08 – 05; 接受日期: 2021 – 06 – 02
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“实物地质资料汇集与服务”(DD20190411)
作者简介: 郭东旭, 硕士, 助理工程师, 研究方向为矿物学、岩石学、矿床学。E – mail: gdx2016@163.com。

究,快速识别出常见的造岩矿物(长石、石英、辉石、石榴子石、橄榄石等),弥补了短波红外技术对石榴子石、辉石等矽卡岩矿物,石英、长石等造岩矿物及黑云母、角闪石等暗色矿物探测效果不理想的缺陷^[7]。综合应用短波红外和热红外光谱技术,可以发挥更大的优势。

普朗斑岩型铜矿位于中国西南“三江”构造岩浆成矿带,产生于义敦岛弧南段的中甸火山-岩浆弧之中,是国内发现的印支期重要的斑岩型铜矿床^[25]。前人对普朗斑岩铜矿深入开展了成岩成矿时代^[26]、成矿流体演化^[27-28]、岩石地球化学特征^[29]、矿物学特征^[30-32]、矿床成因^[33-36]等研究,并利用红外光谱方法对普朗斑岩铜矿地表蚀变矿物进行了识别和矿区表面填图^[12,25]。最新的研究表明,普朗矿区发育着钾硅酸盐化、绿帘石-绿泥石化、绿泥石-伊利石化、石英-伊利石化和泥化5种蚀变类型^[35]。该矿区绿帘石-绿泥石化在矿床外围和中心均有发育,且强烈叠加在矿床中心的钾硅酸盐化之上。对于蚀变矿物高度叠加和蚀变分带界线不明显的普朗矿床,运用红外光谱技术研究钻孔岩心的蚀变与矿化之间的关系,可以显著提高勘查效率。普朗斑岩型铜矿南矿区钻孔 ZK1801,涵盖了普朗铜矿大部分蚀变类型,矿化效果好,为钻孔红外光谱测试工作和蚀变矿物光谱识别提供了较大的研究潜力。本文基于普朗矿床钻孔 ZK1801 的岩心,开展红外光谱扫描测试和分析工作,结合岩心编录情况,精准识别出该钻孔矿物组合及蚀变分带,探究蚀变矿物组合与矿化之间的关系,以及蚀变矿物光谱特征对找矿勘查的指示意义,为普朗矿床的进一步找矿勘探提供依据。

1 地质概况

云南省普朗铜矿位于三江-特提斯成矿带西南、义敦弧的南部。区域主要出露三叠系和第四系地层^[37]。普朗铜矿分为三个矿区:南普朗、东普朗和北普朗。其中南普朗矿区最大,包括 430.5Mt(平均品位 0.52%)矿石储量,约占整个普朗矿区铜矿储量的 96%^[35]。普朗矿区主要的侵入岩体包括细粒石英闪长岩、粗粒石英闪长岩、石英二长斑岩、石英闪长玢岩等,普朗铜矿体主要位于石英二长斑岩中,少量位于粗粒石英闪长岩中,石英闪长玢岩中也有极少量的分布。普朗矿区岩体发生矿化,南矿区矿体中心形成由细脉浸染状矿化组成的筒状矿体。成矿元素以铜为主,伴有金、银、钼、钡、硫等多种有

益组分。经地表工程及钻孔控制,共圈出 2 个矿化体、5 个工业矿体。在南普朗矿区的 18 号勘探线剖面上主要有 KT1 和 KT2 等矿体。

围岩蚀变是斑岩型矿床的一个重要特征,蚀变面积大小,直接与矿床规模有关。普朗铜矿是较典型的大型斑岩铜矿,受构造、侵入岩、围岩岩性、热液蚀变等多方面因素的综合控制。矿体产于 NW 向深大断裂和 NE 向小断裂交汇部位。微裂隙的发育直接影响蚀变及矿化的强弱。普朗矿区从岩体中心向边部依次发育的钾硅酸盐化、绿帘石-绿泥石化、绿泥石-伊利石化、石英-伊利石化和泥化 5 种蚀变类型^[35]中,后期的蚀变叠加在前期的蚀变之上,尤其是绿帘石-绿泥石化叠加在钾硅酸盐化之上。蚀变矿物主要有石英、钾长石、绢云母、绿泥石、绿帘石、高岭石、蒙脱石、伊利石等^[25](图 1)。

2 实验部分

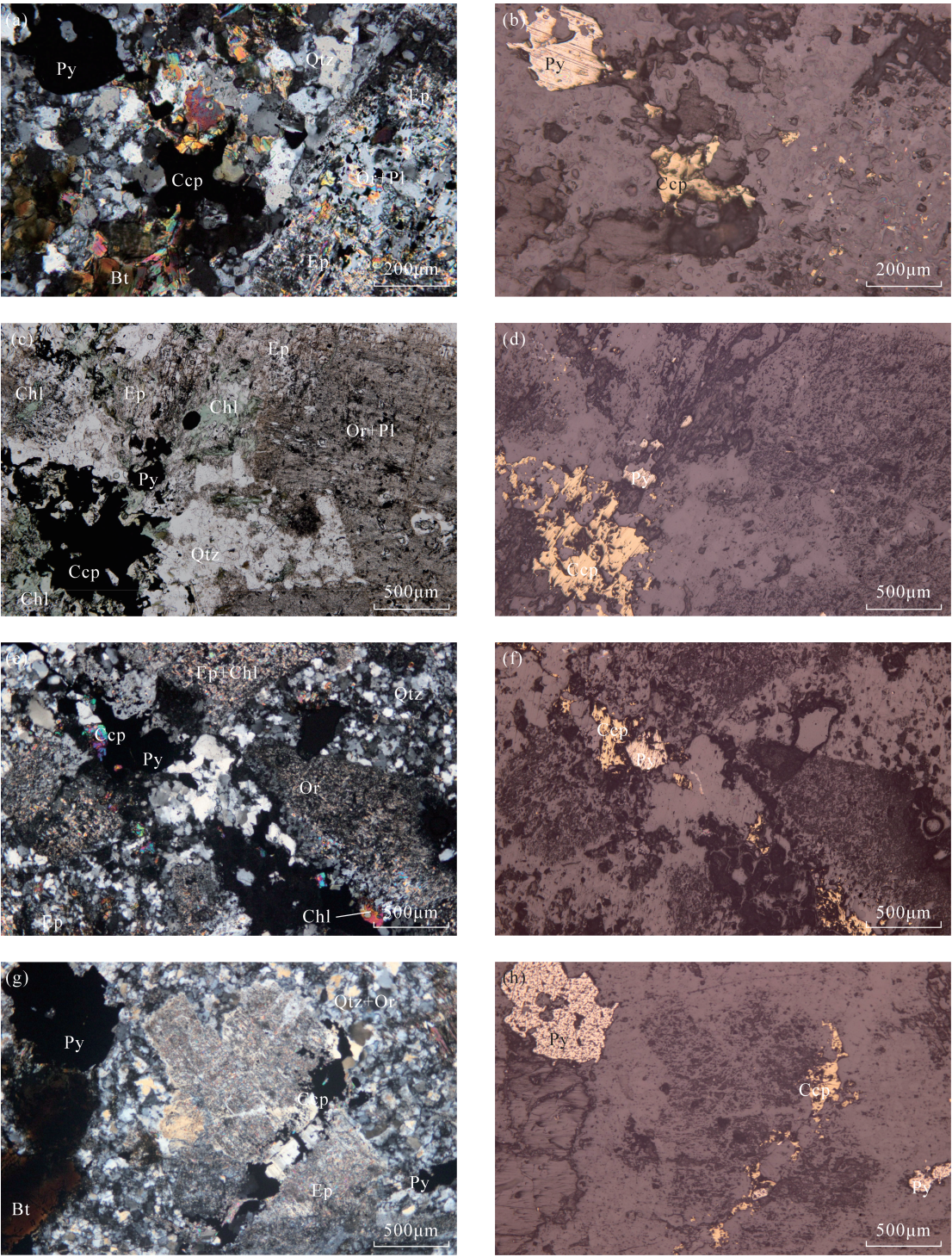
2.1 样品采集

普朗铜矿区位于云南省香格里拉县县城向北 70km 的格咱乡大山深处,岩心主要存放于格咱乡项目基地。自然资源实物地质资料中心(以下简称“实物中心”)采集人员和项目组负责人在野外查看了岩心,并通过查阅相关资料,一致认为钻孔 ZK1801 岩心(进尺 456.62m)不仅见矿效果较好,而且钻遇了相关围岩和普朗铜矿大部分蚀变类型,具有典型性和代表性,保存价值较高,因此被选入实物中心保管。

岩心从云南运到实物中心的同时,也收集了《普朗铜矿区 ZK1801 原始编录资料》、《区域成矿地质背景》(普朗铜矿)、18 号勘探线剖面图等基础地质资料,包括纸质版和电子版资料,并开展了对岩心清洁整理等岩心管理的相关工作,为后期开展普朗铜矿地质和矿床相关研究提供了方便。

2.2 样品测试

使用 HyLogger 型岩心红外光谱扫描仪(以下简称“HyLogger”)对普朗矿床钻孔 ZK1801 进行全孔光谱数据采集。HyLogger 是澳大利亚联邦科工组织(CSIRO)研发和设计、FLSmidth 公司负责加工和生产的一种岩心红外光谱数据测量系统。该系统利用数字线扫描相机、ASD 光谱仪、热红外光谱仪、激光表面测度仪四个传感器,模拟太阳光源和热红外光源照射岩心,使用光谱仪传感器探头逐点同步获取岩心(或切片、粉末等样品)相同位置的图像和红外光谱反射率数据(包括波长为 380~2500nm 的可见



Bt—黑云母；Ccp—黄铜矿；Chl—绿泥石；Ep—绿帘石；Or—钾长石；Pl—斜长石；Py—黄铁矿；Qtz—石英。
a、c、e、g—正交偏光显微镜下照片；b、d、f、h—反射光显微镜照片。

图1 普朗斑岩铜矿钻孔 ZK1801 蚀变矿物组合

Fig. 1 Altered minerals assemblages of the drill ZK1801 in Pulang porphyry copper deposit, Yunnan Province

光 - 近红外和短波红外波段, 波长为 6000 ~ 14500nm 的热红外波段)。在岩心红外光谱数据采集之前, 对岩心进行整理, 保证岩心清洁、干燥、无遮挡物。岩心扫描间隔为 5cm, 可见光 - 近红外扫描

波段范围为 350 ~ 1100nm, 分辨率为 3nm; 短波红外扫描波段范围为 1100 ~ 2500nm, 分辨率为 10nm; 热红外波谱范围为 6000 ~ 14500nm, 分辨率为 18 ~ 150nm。

2.3 数据解译

数据采集完成后,将原始图像和光谱数据导入专业的地质光谱解译软件 TSG(全称“The Spectral Geologist”,翻译为“光谱地质专家”,该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^[13]),开展光谱数据的处理和解译工作。剔除岩心箱、木头牌、标识牌等非岩矿信息的光谱数据,实现光谱数据的完整、连续、干净,并重新进行钻孔岩心的深度校准。在 TSG 软件中对光谱数据进行解译,结合野外地质和钻孔 ZK1801 岩心的实际情况,获取蚀变矿物的种类、相对含量、矿物组合、矿物光谱曲线、Al—OH 波长等相关信息。

3 结果与讨论

3.1 蚀变矿物光谱特征

3.1.1 绿泥石

短波红外波段,富 Fe 绿泥石特征吸收峰位置在 2260nm 和 2350nm,富 Mg 绿泥石特征吸收峰位置在 2250nm、2330~2340nm。因为绿泥石八面体晶格中的 Fe 和 Mg 离子的类质同象替代,导致绿泥石特征吸收峰的位置发生变化。一般情况下,富 Fe 绿泥石吸收峰位置在 2260~2265nm,富 Mg 绿泥石吸收峰位置在 2255~2260nm^[3]。绿泥石的次一级结晶水吸收峰位置在 1910nm、2000nm^[38]。在钻孔 ZK1801 中,绿泥石广泛分布于整个钻孔,尤其是在绿帘石—绿泥石化带和绿帘石—伊利石化带中,绿泥石含量更高。ZK1801 中典型的绿泥石短波红外光谱曲线 2250~2265nm 波段的吸收峰为 2256nm,因此,钻孔 ZK1801 中的绿泥石主要富镁(图 2a)。

3.1.2 绿帘石

绿帘石通常与绿泥石相伴生,主要位于绿帘石—绿泥石化带中,在短波红外光谱曲线图中,绿帘石光谱与绿泥石很相似,虽然二者在 2000~2500nm 波谱区间特征相同,但绿帘石在 1550nm、1830nm 存在明显次级吸收,从而区别于绿泥石^[38]。钻孔 ZK1801 中典型的绿帘石短波红外光谱曲线明显的次级吸收峰在 1550nm、1830nm(图 2b)。

3.1.3 伊利石

伊利石, $K_{2-x}Al_4(Si_{6+x}Al_{2-x})O_{20}(OH)_4$, 是一种富 K 的 2:1 型层间缺失的二八面体硅酸盐云母类黏土矿物,伊利石的诊断吸收峰位于 1408nm、2200nm、2348nm 和 2442nm,同时具有一个较宽的双吸收峰位于 2100nm 附近。其光谱形态与白云母

极为相似,仅在 1910nm 和 1460nm 处,关于水的吸收深度要大于白云母。富 Fe 伊利石在 2240nm 具有特征吸收;混合了蒙脱石的伊利石在 1455nm 具有反射特征,在 1910nm 具强水分吸收^[19]。在钻孔 ZK1801 中,伊利石主要分布在 90~170m 深度范围内。从伊利石的光谱曲线吸收特征来看,钻孔中的伊利石大部分通过交代绢(白)云母形成(图 2c)。

3.1.4 高岭石

高岭石化学式为 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, 通常出现在斑岩系统的泥化带中,属于低温黏土矿物。高岭石的出现,代表了曾经历酸性流体作用。在短波红外光谱中,高岭石在 1400nm 和 2200nm 处出现双吸收峰^[17]。在普朗铜矿钻孔 ZK1801 中,典型的高岭石在 1400nm 附近的双吸收峰位置在 1399nm 和 1414nm,在 2200nm 附近的双吸收峰位置在 2164nm 和 2208nm(图 2d)。该钻孔中泥化带发育较弱,仅在少量石英二长斑岩中出现了高岭石。

3.1.5 蒙脱石

蒙脱石在热液蚀变系统中比较常见,属于一种低温、非酸性环境下的蚀变矿物,通常富 Fe、Mg,在各种岩石中都可能出现。该矿物在 2208nm 附近表现出强烈吸收的特征,同时在 1410nm 和 1910nm 附近也具有吸收特征。在钻孔 ZK1801 中,典型的蒙脱石吸收峰的波长位置分别在 1414nm、1908nm、2210nm(图 2e)。

3.1.6 绢(白)云母

绢云母是分子式为 $(K, Na)_2(Al, Fe, Mg)_4(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4$ 的层状硅酸盐,在定义中属于细粒白云母。短波红外光谱无法识别矿物粒径大小,因此在文中可能出现绢云母和白云母两个名词混用的情况。绢云母在钻孔 ZK1801 中贯穿在整个钻孔(图 4)。在短波红外扫描时,绢云母在 1400、1900、2200、2348 和 2442nm 附近出现明显的吸收峰,在 2100nm 附近会出现一个微弱的肩峰,以此区别于其他矿物。钻孔 ZK1801 中典型的绢云母短波红外光谱曲线图中,波长在 1412nm、1914nm、2208nm 处具有明显的吸收峰(图 2f)。

3.1.7 石英

石英主要成分为 SiO_2 , 在热红外波段可以被精准识别,其 8625nm 和 12610nm 附近的特征吸收峰非常尖锐,且在 7400nm 处波形突然抬升,在 9400nm 波形突然下降^[7]。钻孔 ZK1801 中典型的石英特征吸收峰在 8631nm 和 12628nm(图 2g)。石英广泛分布于 ZK1801 中,一类为岩浆形成过程中

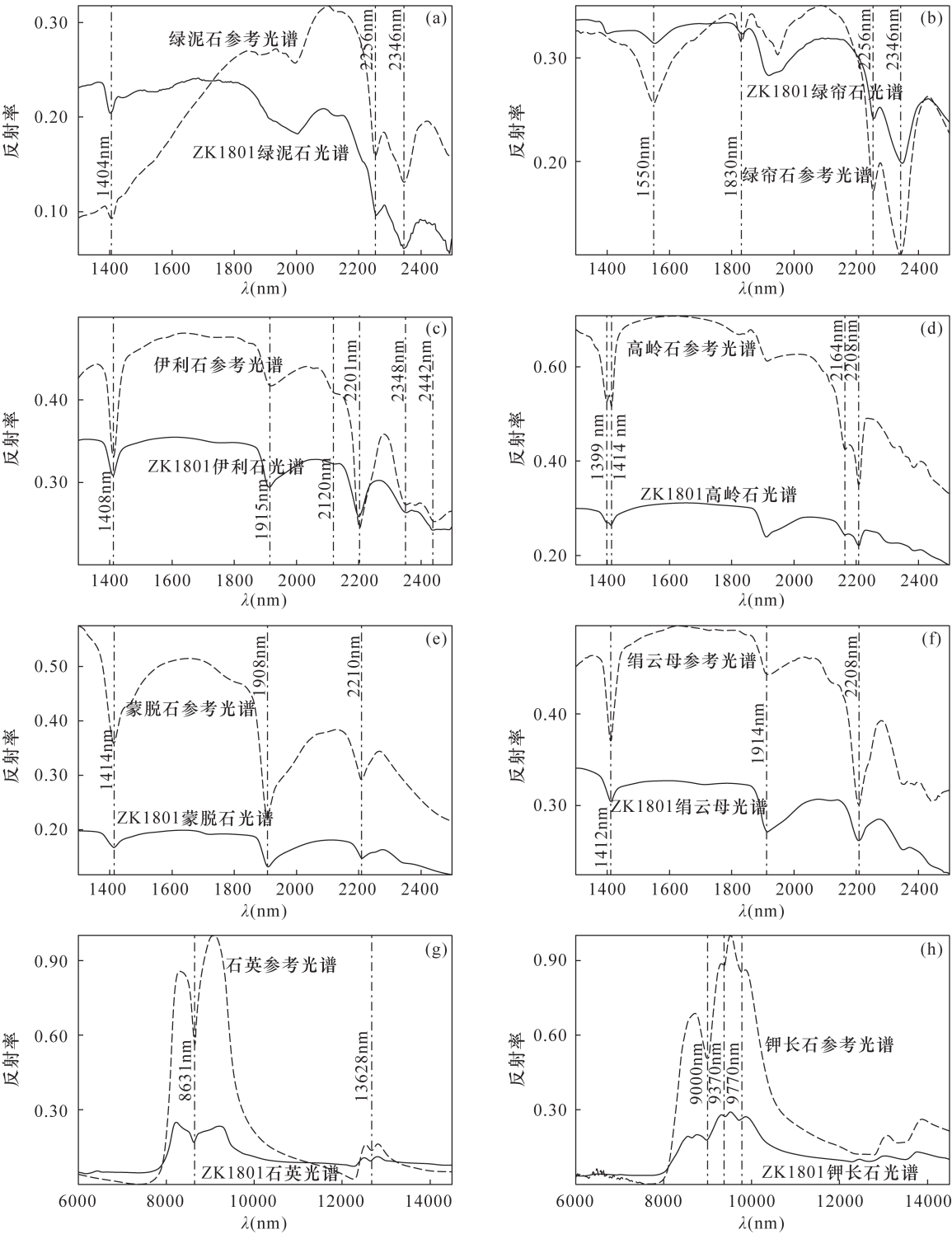


图2 普朗铜矿钻孔 ZK1801 中典型矿物光谱特征
Fig.2 Spectral characteristics of typical minerals from the drill ZK1801 within Pulang porphyry copper deposit, Yunnan Province

的造岩矿物,另一类为钾硅酸盐化新形成的蚀变矿物。与岩浆阶段形成的石英相比,钾硅酸盐化的石英表现为石英变晶的形成、再生长及基质硅化,并伴有石英细脉(含石英金属硫化物脉)的产生。整个钻孔的中上部是钾硅酸盐化的重要区域。

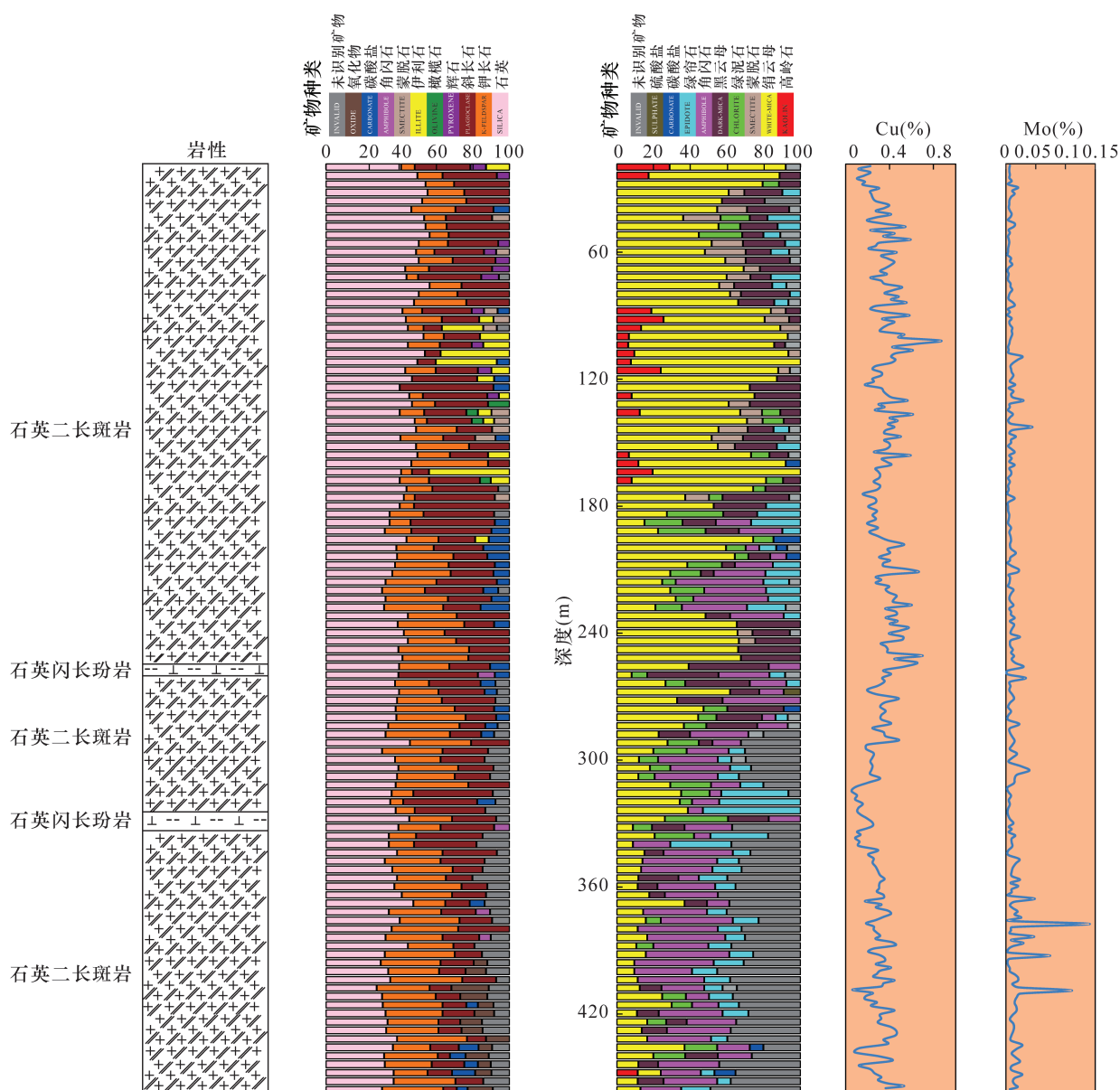
3.1.8 钾长石
钾长石主要包括正长石、微斜长石、透长石等矿物。其中,微斜长石的热红外波谱特征为在9000nm、9350nm、9600nm 波段附近有特征吸收峰^[7]。钾长石是斑岩铜矿蚀变组合中钾硅酸盐化

的主要矿物成分之一, 钻孔 ZK1801 中的钾长石为微斜长石, 其典型特征吸收峰位置在 9000nm、9370nm、9770nm 附近 (图 2h), 与石英、黑云母、绢云母等矿物共生。

3.2 蚀变矿物组合

对称同心轴状蚀变是斑岩型铜矿的显著特征之一,因此,精准地识别斑岩型铜矿床的蚀变类型、蚀变分带,有利于更好地解读矿化情况,进而理解整个成矿过程^[2]。本文基于对普朗铜矿床 18 号勘探线的钻孔 ZK1801 岩心开展红外光谱测试工作,根据

钻孔 ZK1801 获取的数据显示, 钻孔由浅入深, 蚀变矿物组合依次为: 绢云母 + 伊利石 + 蒙脱石 + 高岭石 + 绿泥石 + 绿帘石 → 石英 + 钾长石 + 绢云母 + 绿帘石 + 绿泥石 → 绢云母 + 绿帘石 + 绿泥石 + 石英 → 绢云母 + 绿帘石 + 绿泥石 (图 3)。总体上, 顶部以伊利石、蒙脱石、高岭石、绢云母为主, 中部以石英、钾长石、绢云母、绿泥石、绿帘石为主, 底部以绢云母、绿泥石、绿帘石为主。普朗矿床钻孔 ZK1801 中主要的岩石类别是石英二长斑岩和石英闪长玢岩的互层, 矿体主要赋存于石英二长斑岩中。



参考材料:云南省地质调查院. 普朗铜矿区 ZK1801 原始编录资料. 2009:29-37。

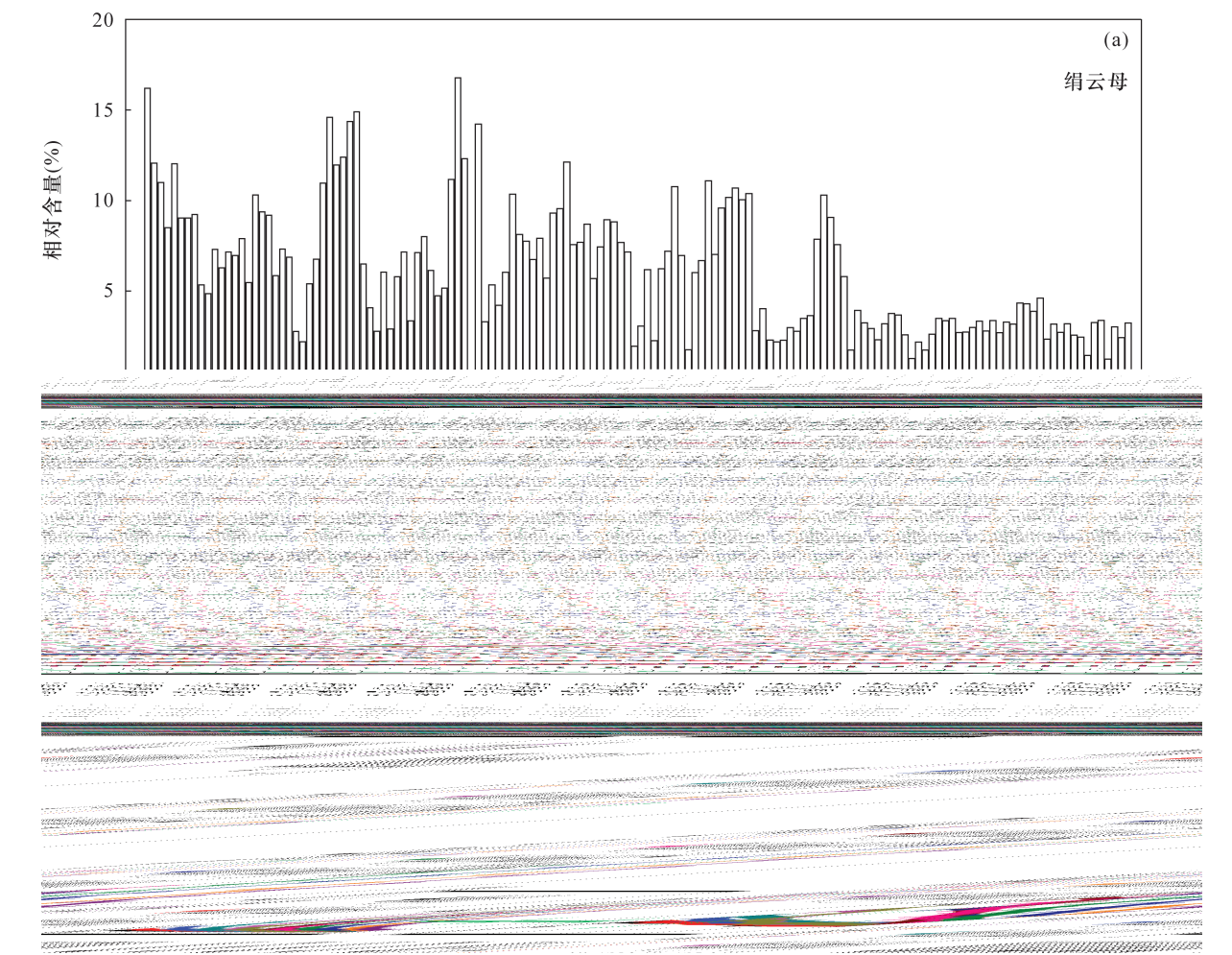
图3 普朗斑岩铜矿蚀变矿物相对含量、岩性、金属铜钼含量分布柱状图

Fig. 3 Column chart of the relative contents of altered minerals, the lithology categories, and the contents of copper and molybdenum in Pulang porphyry copper deposit, Yunnan Province

分别提取钻孔 ZK1801 中的主要蚀变矿物及其赋存岩性进行对比分析,发现:①热红外光谱数据显示,钾长石和石英在整个钻孔中的含量较多,该钻孔钾硅酸盐化明显;②绢云母贯穿整个钻孔(图 4a);③自顶部向下 20~90m 出现大量的绿帘石-绿泥石,之后自 140m 深度向下,绿泥石和绿帘石普遍存在;④顶部有很少量的伊利石和高岭石,自顶部向下 90 m 后伊利石、蒙脱石增多,形成伊利石+蒙脱石+高岭石的蚀变矿物组合。

普朗矿区从岩体中心向边部依次发育钾硅酸盐化、绿帘石-绿泥石化、绿泥石-伊利石化、石英-伊利石化和泥化 5 种蚀变类型,这几种类型的蚀变矿物组合被红外光谱清晰地测试、识别出来。钻孔 ZK1801 中,钾硅酸盐化带范围较大,深度在 0~400m 基本整体发育,以钾长石+石英+绢云母

+黑云母+斜长石等矿物组合为主要特征(图 3)。硅化表现为石英变晶的形成、再生长及基质硅化,并伴有产生石英细脉(含石英金属硫化物脉);钾化表现为大量钾长石的生成,自形钾长石的粒度在 50~500 μm ,与石英共生的钾长石的粒度 < 50 μm ^[35]。该钻孔中钾硅酸盐化与矿化关系密切,主要的矿石矿物为黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等(图 2 中 b、d、f、h)。绿帘石-绿泥石化带位于自顶部向下 20~90m、140~456.61m,表现为出现大量的绿帘石、绿泥石,并且叠加在钾硅酸盐化带之上(图 2 中 a、c、e、g),其中绿帘石和绿泥石由钾长石、斜长石或黑云母蚀变形成(图 2 中 e、g)。同时,绿帘石、绿泥石与黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等密切共生,与矿化关系密切(图 2 中 a、c、e、g)。绿泥石-伊利石化带主要位于自顶部向下 140~200m 位置,叠加在前期形成



a—绢云母相对含量随钻孔深度的变化特征; b—Al—OH 波长随钻孔深度的变化特征。

图 4 普朗斑岩型铜矿钻孔 ZK1801 绢云母相对含量及 Al—OH 波长随钻孔深度的变化特征

Fig.4 Relative concentrates of sericite and the Al—OH wavelength along to the depth in the drill ZK1801 from Pulang porphyry copper deposit

的蚀变之上,蚀变较弱(图 3),以伊利石 + 绿泥石矿物组合为特征。石英 - 伊利石化带以石英 + 伊利石等矿物组合为特征,主要位于自顶部向下 140 ~ 200m 位置,叠加在前期形成的蚀变之上,蚀变较弱。泥化带主要位于自顶部向下 185 ~ 200m 位置,蚀变较弱(图 3),叠加在较早期的蚀变组合之上,伊利石、蒙脱石、高岭石是这个蚀变阶段的主要蚀变矿物。

在大多数的斑岩铜矿中,矿床热液蚀变呈同心环状分带,中心为钾硅酸盐化,向外过渡为泥化等,最外围为青磐岩化。矿化主要位于中部的钾硅酸盐化,青磐岩化带中几乎见不到矿化^[2]。然而,青磐岩化在普朗矿床的中心部位和边部都非常发育。钻孔 ZK1801 中,自顶部向下 20 ~ 90m 出现大量的绿帘石 - 绿泥石,之后自 140m 深度向下,绿泥石和绿帘石广泛发育,同时该钻孔的矿化主要位于钻孔的中上部,与绿帘石 - 绿泥石矿物组合明显叠加在一起。最新研究成果表明^[35]:受流体性质、流动路径或围岩条件发生异常变化的影响,斑岩铜矿系统中绿帘石 - 绿泥石等蚀变矿物组合所代表的青磐岩化,有时可以位于矿化中心,并与矿石矿物密切共生。因此,根据蚀变矿物组合特征与矿化之间的关系,可以明确普朗矿床与矿化息息相关的蚀变类型为钾硅酸盐化和绿帘石 - 绿泥石化,主要的蚀变矿物组合为:钾长石 + 石英 + 绢云母和绿帘石 + 绿泥石。

3.3 Al—OH 波长对矿化的指示

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^[14,20,39-40]。通常情况下,Al—OH 在 2200nm 处吸收峰最小值波长位置越高,越接近热液中心^[3]。根据波长 - 孔深变化散点图的线性拟合结果,绢云母在 2200nm 处的波长变化反映出三段明显的特征:顶部的绢云母波长集中在 2210 ~ 2205nm 之间,到中部波长迅速降低到 2205 ~ 2199nm 的范围;钻孔的下部,绢云母的波长维持在 2205 ~ 2199nm 基本保持稳定;钻孔的底部,绢云母的波长在 2202 ~ 2198nm 之间(图 4b)。绢云母的波长总体呈现出向钻孔深部逐渐减小的趋势,长波绢云母(2210 ~ 2205nm)表现为吸收峰波长偏大的特征,主要位于斑岩体的钾硅酸盐化带和绿帘石 - 绿泥石化带中,与黑云母等矿物伴生;短波绢云母(2202 ~ 2198nm)常表现为一种低温环境下的产物。随着钻孔 ZK1801 深度的增加,绢云母 Al—OH 波长

总体呈现出从 2210 ~ 2205nm 减小到 2202 ~ 2198nm 的趋势,表明从钻孔上部到下部,流体的温度、压力逐渐降低^[8,20]。钻孔 ZK1801 矿化区主要位于中上部,与长波绢云母(2210 ~ 2205nm)关系密切。因此,长波绢云母(2210 ~ 2205nm)可以作为矿床勘查和圈定找矿靶区的矿化信号之一。

4 结论

本文应用短波红外和热红外光谱技术,对普朗矿区钻孔 ZK1801 岩心进行矿物识别和蚀变分带划分的研究,识别出钾硅酸盐化带、绿帘石 - 绿泥石化带、绿泥石 - 伊利石化带、石英 - 伊利石化带和泥化带。普朗铜矿整个钻孔的主要蚀变矿物有石英、钾长石、绢云母、绿泥石、绿帘石、高岭石、蒙脱石、伊利石等,钻孔从浅部到深部蚀变矿物组合表现为:绢云母 + 伊利石 + 蒙脱石 + 高岭石 + 绿泥石 + 绿帘石 → 石英 + 钾长石 + 绢云母 + 绿帘石 + 绿泥石 → 绢云母 + 绿帘石 + 绿泥石 + 石英 → 绢云母 + 绿帘石 + 绿泥石。

根据矿化特征,表明铜矿体广泛赋存在钾硅酸盐化带和绿帘石 - 绿泥石化带中,与矿化关系密切的蚀变矿物石英 + 钾长石 + 绢云母和绿帘石 + 绿泥石,可以作为普朗矿床勘查的标型蚀变矿物组合;研究区广泛发育的绢云母 Al—OH 波长随钻孔深度增加而逐渐从 2210 ~ 2205nm 减小到 2202 ~ 2198nm, Al—OH 波长 2210 ~ 2205nm(长波绢云母)与矿化关系密切,可以作为普朗矿床勘查的指示信息。

5 参考文献

[1]

Richards J P. Tectono - magmatic precursors for porphyry Cu - (Mo - Au) deposit formation [J]. Economic Geology, 2003, 98: 1515 - 1533.

[2]

Sillitoe R H. Porphyry - copper systems [J]. Economic Geology, 2010, 105: 3 - 41.

[3]

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 X X, Zhang H, Zhang J, 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.

[4]

杨志明,侯增谦,杨竹森,等. 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, 2012, 31(4): 699–717.
- Yang Z M, Hou Z Q, Yang Z S, et al. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu district: A case study of Niancun ore district, Tibet [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(4): 699–717.
- [5] 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 deposit: A review [J]. Earth Science, 2019, 44(6): 2143–2154.
- [6] Clark R N, Swayze G A, Livo K E, et al. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS tetracorder and expert systems [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(E12): 5131.
- [7] 代晶晶, 赵龙贤, 姜琪, 等. 热红外高光谱技术在地质找矿中的应用综述[J]. 地质学报, 2020, 94(8): 2520–2533.
- Dai J J, Zhao L X, Jiang Q, et al. Review of thermal – infrared spectroscopy applied in geological ore exploration [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 94(8): 2520–2533.
- [8] Tappert M C, Rivard B, Giles D, et al. The mineral chemistry, near – infrared, and mid – infrared reflectance spectroscopy of phenite from the Olympic Dam IOCG deposit, South Australia [J]. Ore Geology Reviews, 2013, 53: 26–38.
- [9] Neal L C, Wilkinson J J, Mason P J, et al. Spectral characteristics of propylitic alteration minerals as a vectoring tool for porphyry copper deposits [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 184: 179–198.
- [10] Duuring P, Hassan L, Zelic M, et al. Geochemical and spectral footprint of metamorphosed and deformed VMS – style mineralization in the Quinns District, Yilgarn Craton, western Australia [J]. Economic Geology, 2016, 111: 1411–1438.
- [11] 连长云, 章革, 元春华, 等. 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[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 483–493.
- Lian C Y, Zhang G, Yuan C H, et al. Application of SWIR reflectance spectral in mapping hydrothermal alteration minerals: A case study of the Tuwu porphyry copper prospect, Xinjiang [J]. Geology in China, 2005, 24(6): 621–636.
- [12] 连长云, 章革, 元春华. 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): 621–636.
- Lian C Y, Zhang G, Yuan C H. Application of SWIR reflectance spectroscopy to Pulang porphyry copper ore district, Yunnan Province [J]. Deposit Geology, 2005, 24(6): 621–636.
- [13] 郭娜, 史维鑫, 黄一入, 等. 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, 2018, 37(2–3): 446–457.
- Guo N, Shi W X, Huang Y R, et al. Alteration mapping and prospecting model construction in the Tiegelongnan ore deposit of the Duolong ore concentration area, northern Tibet, based on shortwave infrared technique [J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(2–3): 446–457.
- [14] Guo N, Cudahy T, Tang J X, et al. Mapping white mica alteration associated with the Jiama porphyry – skarn Cu deposit, central Tibet using field SWIR spectrometry [J]. Ore Geology Reviews, 2019, 108: 147–157.
- [15] 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.
- [16] 陈康, 纪广轩, 朱有峰, 等. 基于高光谱岩心扫描系统研究城门山铁路坎铜矿床的蚀变特征 [J]. 岩矿测试, 2020, 39(6): 944–953.
- Chen K, Ji G X, Zhu Y F, et al. Hyperspectral core scanning system analysis alteration characteristics of Chengmenshan Tielukan copper deposit [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(6): 944–953.
- [17] 郭娜, 黄一入, 郑龙, 等. 高硫 – 低硫化浅成低温热液矿床的短波红外矿物分布特征及找矿模型——以西藏铁格隆南 (荣那矿段)、斯弄多矿床为例 [J]. 地球学报, 2017, 38(5): 767–778.
- Guo N, Huang Y R, Zheng L, et al. Alteration zoning and prospecting model of epithermal deposit revealed by shortwave infrared technique: A case study of Tiegelongnan and Sinongduo deposits [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(5): 767–778.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 郭娜, 郭文铂, 刘栋, 等. 冈底斯成矿带陆相火山岩区浅成低温热液矿床蚀变分带模型——以西藏斯弄多矿床为例[J]. *岩石学报*, 2019, 35(3): 833–848.
- Guo N, Guo W B, Liu D, et al. Alteration zoning model associated with Tibetan Sinongduo epithermal deposit, the continental volcanic areas of Gangdise metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(3): 833–848.
- [21] 代晶晶, 王登红, 代鸿章, 等. 川西甲基卡锂矿基地典型岩石及矿物反射波谱特征研究[J]. *岩矿测试*, 2018, 37(5): 507–517.
- Dai J J, Wang D H, Dai H Z, et al. Reflectance spectral characteristics of rocks and minerals in Jiajika lithium deposits in West Sichuan[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37(5): 507–517.
- [22] 易锦俊. 闽西南马坑铁矿成因机制与找矿模式研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Yi J J. Study on the genetic mechanism and prospecting model of Makeng iron deposit in southwest Fujian[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [23] 史维鑫, 易锦俊, 王浩, 等. 马坑铁矿钻孔岩心红外光谱特征及蚀变分带特征研究[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(6): 934–943.
- Shi W X, Yi J J, Wang H, et al. Study on the characteristics of infrared spectrum and the alteration zoning law of drill core in Makeng iron deposit[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(6): 934–943.
- [24] 回广骥, 高卿楠, 宋利强, 等. 新疆可可托海稀有金属矿床矿物和岩石热红外光谱特征[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(1): 134–144.
- Hui G J, Gao Q N, Song L Q, et al. Thermal infrared spectra characteristics of rare metal minerals and rock in the Keketuohai deposit, Xinjiang[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(1): 134–144.
- [25] 张国亮. 新疆北山地区与云南普朗铜矿高光谱岩矿信息提取研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- Zhang G L. Research on extraction of rocks and minerals information from hyperspectral data in Beishan area of Xinjiang and Pulang copper deposit of Yunnan[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [26] 石洪召, 范文玉, 胡志中, 等. 滇西北普朗铜矿床高钾中-酸性侵入岩年代学及其地质意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(8): 2600–2613.
- Shi H Z, Fan W Y, Hu Z Z, et al. Geochronology and geological significance of the Pulang high-K intermediate-acid intrusive rocks in the Zhongdian area, northwest Yunnan Province[J]. *Earth Science*, 2018, 43(8): 2600–2613.
- [27] 陈玲, 潘磊, 黄丰, 等. 云南普朗超大型斑岩铜矿床岩浆混合作用: 熔融包裹体证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2018, 42(5): 880–892.
- Chen L, Pan L, Huang F, et al. Magma mixing in the giant Pulang porphyry copper deposit, Yunnan Province: Evidence from melt inclusions[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 2018, 42(5): 880–892.
- [28] 刘旭东. 滇西北普朗斑岩铜多金属矿床成矿流体演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Liu X D. The evolution of ore-forming fluid of the Pulang porphyry copper polymetallic deposit in the northwest Yunnan Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [29] 周晓丹, 杨帆, 吴静, 等. 云南普朗斑岩铜矿床外围东部斑岩体岩石地球化学特征研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(4): 731–740.
- Zhou X D, Yang F, Wu J, et al. A study on petrological and geochemical characteristics of the porphyry bodies in the eastern periphery of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(4): 731–740.
- [30] 邢凯, 舒启海, 赵鹤森, 等. 滇西普朗斑岩铜矿床中磷灰石的地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34(5): 1427–1440.
- Xing K, Shu Q H, Zhao H S, et al. Geochemical characteristics and geological significance of apatites in the Pulang porphyry copper deposit, NW Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(5): 1427–1440.
- [31] 冯乾, 黄明亮, 胥磊落, 等. 锆石和磷灰石原位地球化学成分对普朗斑岩铜成矿的指示意义[J]. *矿物学报*, 2019, 39(6): 681–689.
- Feng Q, Huang M L, Xu L L, et al. *In situ* geochemical compositions of the zircon and apatite and their

- implications for the Pulang porphyry Cu mineralization [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2019, 39(6): 681–689.
- [32] 李华伟,董国臣,董朋生,等. 滇西北中甸弧成矿岩体中楣石化学成分特征及其成岩成矿标识[J]. *地球科学*, 2020, 45(6): 1999–2010.
- Li H W, Dong G C, Dong P S, et al. Titanite chemical compositions and their implications for petrogenesis and mineralization in the Zhongdian Arc, NW Yunnan, China [J]. *Earth Science*, 2020, 45(6): 1999–2010.
- [33] 杨镇. 义敦岛弧晚三叠世斑岩铜矿成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Yang Z. Late Triassic mineralization of the porphyry copper deposits in Yidun Arc, southwest China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [34] 王国强,和翠英,羊劲松,等. 滇西普朗矿区北矿段及外围成矿条件及找矿标志[J]. *现代矿业*, 2018, 34(7): 27–31.
- Wang G Q, He C Y, Yang J S, et al. Metallogenic conditions prospecting criteria of the northern ore – section and periphery of Pulang mining area in western Yunnan Province [J]. *Modern Mining*, 2018, 34(7): 27–31.
- [35] Cao K, Yang Z M, Mavrogenes J, et al. Geology and genesis of the giant Pulang porphyry Cu – Au district, Yunnan, southwest China [J]. *Economic Geology*, 2019, 114(2): 1–100.
- [36] Li W K, Yang Z M, Cao K, et al. Redox – controlled generation of the giant porphyry Cu – Au deposit at Pulang, southwest China [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2019, 174(12): 1–34.
- [37] 李芙蓉. 云南普朗矿区北部Ⅲ号斑岩体的岩石学及年代学研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- Li F R. Study on the petrology and chronology of No. Ⅲ porphyry body in the north of Pulang, Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [38] 汪重午,郭娜,郭科,等. 基于短波红外技术的斑岩 – 矽卡岩型矿床中绿泥石蚀变分布特征研究: 以西藏甲玛铜多金属矿为例[J]. *地质与勘探*, 2014, 50(6): 1137–1146.
- Wang C W, Guo N, Guo K, et al. Characteristics of the chlorite alteration in the porphyry – skarn deposit based on short – wave infrared technology: A case study of the Jima copper – polymetallic deposit in Tibet [J]. *Geology and Exploration*, 2014, 50(6): 1137–1146.
- [39] Wang R, Cudahy T, Laukamp C, et al. White mica as a hyperspectral tool in exploration for the Sunrise Dam and Kanowna Belle gold deposits, western Australia [J]. *Economic Geology*, 2017, 112(5): 1153–1176.
- [40] 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.

The Infrared Spectroscopy Characteristics of Alteration and Mineralization in the Porphyry Copper Deposit in Pulang, Yunnan Province

GUO Dong – xu, LIU Xiao, ZHANG Hai – lan, ZHANG Zhi – guo

(Core and Samples Centre of Land and Resources, Sanhe 065201, China)

HIGHLIGHTS

- (1) Alteration minerals and alteration zones were identified in the Pulang mining area using infrared spectroscopy technology.
- (2) Quartz + potassium, feldspar + sericite and epidote + chlorite were typical altered mineral assemblages in the exploration of the Pulang porphyry copper deposit.
- (3) The Al—OH wavelength from 2210nm to 2205nm of sericite (long – wave sericite) was closely related to mineralization, which could be used as an indicator for prospecting in the Pulang deposit.

ABSTRACT

BACKGROUND: Infrared spectroscopy technology, as a green, fast, non – destructive and accurate mineral detection technology, has drawn widespread attention of geologists all over the world in recent years. In view of the high superposition of altered minerals in porphyry deposits, the inconspicuous alteration zone boundaries, many fine – grain altered minerals, and clay altered minerals, this technology has outstanding advantages in the identification of altered minerals and interpretation of exploration information.

OBJECTIVES: To analyze the characteristics of alteration and mineralization of the porphyry copper deposit in Pulang, Yunnan Province, and to provide the basis theory for porphyry copper deposits (especially in the Pulang deposit) exploration.

METHODS: The core samples in the drill ZK1801 were detected using HyLogger – 3 through infrared spectroscopy technology, and the spectral data was processed and analyzed by TSG 8.0.

RESULTS: K – silicate alteration, epidote – chlorite alteration, chlorite – illite alteration, quartz – illite alteration and clay alteration were identified in the Pulang porphyry copper deposit. The main altered minerals included quartz, potassium feldspar, sericite, chlorite, epidote, kaolinite, smectite and illite. According to the characteristics of mineralization, it was found that copper ore bodies were widely present in the potassium silicate zone and epidote – chlorite zone.

CONCLUSIONS: Quartz + potash, feldspar + sericite and epdote + chlorite can be typical altered mineral assemblages for exploration of the Pulang porphyry copper deposit. The Al—OH wavelength from 2210nm to 2205nm of sericite (long – wave sericite) is closely related to mineralization, which can be used as an indicator for prospecting in the Pulang deposit.

KEY WORDS: infrared spectroscopy; alteration minerals; alteration zonation; K – silicate alteration; chlorite – chlorite alteration; porphyry copper deposit; Pulang