

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 Kang, JI Guang - xuan, ZHU You - feng, et al. Study on Alteration Characteristics of the Chengmenshan Tielukan Copper Deposit by A Hyperspectral Core Scanning System[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(6): 944 - 953.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202005060005】

## 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

陈康, 纪广轩, 朱有峰, 张华川

(自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201)

**摘要:** 铜矿床蚀变围岩与伴生矿体有着密切的成因与空间关系, 通过分析铜矿床蚀变特征, 可获得成矿时物理化学条件, 热液中成矿元素的迁移、富集以及演化规律, 最终指示铜矿床矿化富集程度以及矿体赋存位置。本文通过对城门山铜矿床外围铁路坎矿区的代表性岩心进行高光谱岩心扫描系统快速分析, 结果显示在 ZKJ9 - 7 典型钻孔中, 0 ~ 350m 处以蒙脱石和碳酸盐典型光谱曲线为主; 350 ~ 578m 处以高岭土和白云母典型光谱曲线为主。通过矿物解译, 自地表向下, 城门山铁路坎矿区的矿物变化规律为: 蒙脱石 + 高岭石 → 碳酸盐 + 蒙脱石 → 碳酸盐 → 白云母 + 高岭石 + 蒙脱石 → 白云母 + 高岭石 + 绿泥石。矿区浅部区域主要受花岗岩闪长斑岩体与碳酸盐类围岩之间的接触带构造控制; 深部区域主要经历矽卡岩化和硅化, 部分有绿泥石化, 这些蚀变过程有利于铜矿的形成与富集。钻孔深部接触带两侧的岩石发生成分置换而形成矽卡岩, 上升溶液沿着碳酸盐类接触面流动时, 碳酸盐中的 CaO 通过粒间溶液, 以上升溶液为媒介向硅铁质岩和硅铝质岩石方向扩散。相反, 硅铁质岩和硅铝质岩中的 FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 以同样的方式向灰岩方向扩散, 从而接触带两侧的岩石发生成分置换而形成矽卡岩。富铜矽卡岩型矿床的形成与溶液和岩石间的组分交换密切相关, 组分的浓度差所引起的扩散作用在其中发挥了重要作用。

**关键词:** 铜矿; 高光谱; 蚀变矿物; 矽卡岩; 城门山

**要点:**

- (1) 采用高光谱岩心扫描系统直接获得城门山铁路坎铜矿床蚀变矿物的变化规律。
- (2) 总结了蚀变矿物对城门山铁路坎铜矿床的影响。
- (3) 探讨了矽卡岩型铜矿床的形成原因。

**中图分类号:** P588.312

**文献标识码:** B

热液形成的铜矿床矿体周围通常出现围岩蚀变, 蚀变特征受岩性、构造等影响, 形态较为复杂。在空间上, 蚀变特征出现在矿体附近, 离矿体越近, 蚀变强度越大, 特征越明显; 并且蚀变通常呈带状分布, 有一定的规律性, 所以蚀变特征是铜矿床的重要找矿标志之一。例如, 国外 Lowell 等<sup>[1]</sup> 根据 Kalamazoo 矿床的蚀变, 参照美洲 27 个斑岩矿床, 提出斑岩型铜、钼矿床的蚀变带模式, 得到了广泛应用。因为蚀变围岩与伴生矿体有着密切的成因与空

间关系, 通过分析铜矿床蚀变特征, 可以得到成矿时物理化学条件, 热液中成矿元素的迁移、富集以及演化规律, 最终指示矿产的种类、矿化富集程度以及矿体赋存位置。由于蚀变岩体分布范围广, 蚀变分带性强, 蚀变类型复杂, 常规手段往往无法快速获取矿体周围的蚀变特征, 所以近年来利用遥感地质调查获得的光谱数据, 在铜矿床蚀变信息提取领域得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>。但是对于已经获取的岩心, 应用高光谱岩心扫描系统快速获得光谱数据仍然处于起步阶段。

收稿日期: 2020 - 04 - 28; 修回日期: 2020 - 07 - 24; 接受日期: 2020 - 09 - 19

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: 陈康, 硕士, 工程师, 从事实物地质资料开发与服务研究工作。E - mail: kangchen320@163.com。

高光谱岩心扫描系统是基于反射光谱分析技术,利用光谱仪采集和分析岩心、岩屑等样品在一定波长范围的反射光谱,并依据其光谱诊断性特征来识别不同的矿物,实现矿物的自动识别,同时获取样品的高分辨率图像信息,帮助建立虚拟岩心数据库和光谱找矿应用模型。国外最早应用的高光谱岩心扫描仪器是澳大利亚的 PIMA 红外光谱仪和美国的 ASD 地面波谱仪,随着挪威研制出能够进行图谱合一采集的 Hypsplex 地面成像光谱仪,高光谱仪器从单点式的采样测量发展到成像式的面状扫描测量<sup>[5-7]</sup>。进入二十一世纪后,澳大利亚科学与工业研究组织(CSIRO)设计的 Hylogger 岩心高光谱扫描系统更加成熟,能够更加准确地识别围岩蚀变特征<sup>[8-9]</sup>。近年来我国研发了一系列高光谱岩心扫描仪,尤其 CMS350B 型高光谱岩心扫描仪实现了对斑岩型铜矿床的蚀变特征准确识别。但是高光谱岩心扫描系统的研制在我国还属于起步阶段,由于光谱特征复杂,矿物识别准确性还需要进一步提高,同时需要建立内容更丰富、更精确的光谱库<sup>[10-15]</sup>。

铁路坎矿区位于城门山铜矿外围,是近年来城门山铜矿外围找矿的重要区域,矿区矿物蚀变特征与矿化机理仍有争议。本文依据 CMS350B 型高光谱岩心扫描仪和 TSG(The Spectral Geologist)光谱地质分析软件组成的高光谱岩心扫描系统,通过研究城门山铜矿外围铁路坎矿区钻探获取的代表性岩心,利用提取的高密度的蚀变矿物信息,参考已有的地球物理、地球化学等相关信息,采用钻孔综合柱状图、蚀变矿物丰度图等手段,准确鉴定了蚀变矿物类型,揭示矿区不同深度具有不同的蚀变矿物组合特征,反映成矿环境的演化。同时分析了重点矿段蚀变矿物的地球化学特征,为进一步揭示城门山铜矿的成矿机理、拓展城门山铜矿外围资源储量以及勘探开发工作奠定了基础。

## 1 实验部分

### 1.1 样品地质特征

本次研究对象是国家实物地质资料库 ZKJ9-7 钻孔岩心,取自城门山铜矿铁路坎矿区。该矿区位于长江中下游成矿带的中部,九瑞铜矿田东南端,长山—城门山背斜东端北翼近倾伏端处,城门山矿区东部,西与城门山铜矿采坑紧邻。该矿床是一个以铜为主,共生有银、铅、锌、硫、钼、铁,伴生有金、镉、铈等有用组分的铜多金属矿床。大地构造位置位于扬子陆块(I级)的下扬子地块(II级)西部,III级构

造单元为长江中下游拗陷带,IV级构造单元为九江拗陷。区域地层发育较好,基底地层为中元古界双桥山群,盖层除早、中泥盆系、晚石炭系、晚三叠系、侏罗系—白垩系地层外,其他各时代地层均较发育。区域断裂以北东东向最为发育,次为北西—北北西及北东—北北东向。区域岩浆侵入活动主要为燕山旋回导致。区域内矿体主要赋存于岩体与碳酸盐岩接触带及接触带内外,矿床具有斑岩型、矽卡岩型、块状硫化物型“三位一体”成矿模式,以及规模大、矿种多、矿石类型复杂等特色<sup>[16-20]</sup>。

ZKJ9-7 钻孔位于铁路坎矿区 9 号勘探线上,岩心长度为 578.37m,穿插了矿区内主要岩体和矿体,具有典型性。通过高光谱岩心扫描系统快速厘定了孔内蚀变及矿化发育情况。孔内圈出矿体共 5 层,均为矿区主矿体,累计见矿厚度为 50.61m,主矿体平均品位均达到全区的水平。该孔岩性种类丰富,包含了全区大部分岩性。由浅到深,所见矿体为银、铅锌、铜矿和硫矿,体现了垂向上金属分带性,丰富的矿种和矿石自然类型的特点,为全区钻孔的代表和典型(图1)。

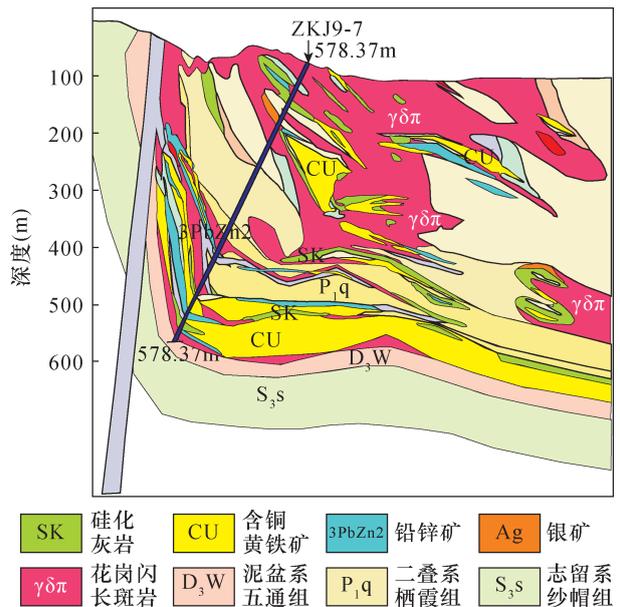


图1 ZKJ9-7 钻孔位置示意图

Fig. 1 Map of the ZKJ9-7 drilling location

### 1.2 高光谱岩心扫描系统

高光谱岩心扫描系统,在岩心编录中的特色是快速、高效、低成本、永久性、数字图像化存储,自动化、图像化、无损识别岩心矿物种类,定量、半定量估算矿物含量,甚至取代了昂贵的矿物测量方法,可识别出岩心中常规难以识别的矿物<sup>[21]</sup>。

本文采用的高光谱岩心扫描系统主要由 CMS350B 型全自动数字化岩心扫描仪和 TSG (The Spectral Geologist) 光谱地质分析软件组成。CMS350B 型全自动数字化岩心扫描仪,是由中国地质调查局南京地质调查中心研制,主要基于反射光谱分析技术,采集和分析岩心样品反射光谱,实现矿物的自动识别,同时获取样品的高分辨率图像信息<sup>[15]</sup>(表1)。

表1 CMS350B 岩心光谱扫描技术参数

Table 1 Technical parameters of core spectrum scan in CMS350B

参数	工作条件	参数	工作条件
移动方向	X、Y 方向移动	有效荷载	样品台 300kg, 移动台 100kg
平台	长 1.5m, 宽 1.5m	光谱范围	350 ~ 2500nm
有效移动距离	X:1.2m, Y:1.2m	光谱分辨率	小于 6nm
扫描分辨率	1mm	测量矿物	低温蚀变矿物
定位精度	优于 0.1mm	照片面积	130mm × 100mm
最大扫描速度	200mm/s	照片分辨率	0.1mm <sup>2</sup>

TSG(The Spectral Geologist) 光谱地质分析软件,是将岩心扫描仪采集的岩心高光谱数据通过处理转化为有用的纯净的岩心信息。该软件是澳大利亚联邦科学与工业组织(CSIRO)针对采矿和勘探地质工作人员设计,用于对矿物、岩石、土壤、岩心以及切片等地质样品的波谱进行分析的行业标准软件。

经过 CMS350B 型全自动数字化岩心扫描仪扫描采集的 ZKJ9-7 岩心高光谱数据相当于初级数据,需要经过 TSG 光谱地质分析软件进行辐射校正、反射率光谱重建、噪声去除、蚀变信息提取等过程的数据处理和加工,才能转化为有用信息。硬件加软件组成的高光谱岩心扫描系统能够提取岩心中各种蚀变矿物信息,并且可以利用多种手段进行图像处理与分析、钻孔蚀变信息编录、信息系统集成和三维可视化等,由地质人员解译信息得出地质认识,进一步指导找矿勘查应用研究。

### 1.3 电子探针分析

电子探针分析在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。本文在高光谱岩心扫描系统的基础上,利用电子探针进一步解释扫描的结果。选取 ZKJ9-7 岩心重点区域岩石,按照规范要求制作成 35mm × 25mm,厚 0.04mm 的探针片,仔细抛光后在显微镜下标记选好分析部位和区域,以便分析时可以快速地找到需要分析的位置。用 JEOL JEE-420 真空喷镀仪将探针片镀碳,使探针片具导电性。用 JEOL

JXA-8230 电子探针显微分析仪对样品进行微区分析,根据莫塞莱定律,测定激发源轰击样品产生的特征 X 射线的波长及强度,即可确定样品中含有的元素种类及含量,对矿物进行定性或定量分析。测试条件为:电压 15kV,电流 20nA,温度 23℃,湿度 55% ~ 60%,束斑直径 5μm,ZAF 校正<sup>[22]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 短波红外光谱特征

通过 CMS350B 型全自动数字化岩心扫描仪能够快速获得 ZKJ9-7 钻孔岩心的光谱信息与图像信息,同时利用 TSG(The Spectral Geologist) 光谱地质分析软件进行自动光谱匹配来识别矿物,通过解译 ZKJ9-7 钻孔岩心的短波红外光谱特征,获得蚀变矿物-岩性分布柱状图(图2)。在 ZKJ9-7 钻孔中,根据短波红外光谱曲线图,碳酸盐在 2300 ~ 2400nm 间具有单一的吸收特征,在 2100 ~ 2200nm 及 2500nm 附近具有次一级特征吸收峰;蒙脱石在 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;绢云母在 2200nm 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;高岭石在 1400nm 和 2200nm 处出现双吸收峰,同时双吸收峰的距离较近(表2)。根据 ZKJ9-7 钻孔不同深度代表性岩石样品的铜品位测试结果,得到铜含量与钻孔深度关系图(图3)。图2和图3结果显示,ZKJ9-7 钻孔 0 ~ 350m,光谱特征以碳酸盐、蒙脱石为主,岩石类型以灰岩和花岗斑岩为主,铜矿化程度不高;ZKJ9-7 钻孔 350 ~ 578m,蚀变矿物以高岭土、白云母为主,岩石类型以石英斑岩、矽卡岩为主,铜的含量有明显增高,矿化程度增强。

城门山铁路坎铜矿床 ZKJ9-7 钻孔主要受花岗闪长斑岩体与碳酸盐类围岩之间的接触带构造控制,区内花岗闪长斑岩岩浆-热液活动期与铜矿有关的蚀变最主要的是矽卡岩化。钻孔内主要蚀变矿物为灰岩、蒙脱石、高岭石和白云母等。矽卡岩基本上就是矿体,这种空间上依存的原因主要是:矽卡岩具有不稳定性和高孔隙度(中细粒结构)以及性脆易碎等特点,而有利于成矿溶液进行充填交代;区内矽卡岩主要由钙铁石榴子石组成,可提供黄铜矿沉淀需要的铁质,从而降低了黄铜矿沉淀所需铜的浓度,而有利于黄铜矿沉淀富集。硅化发育,灰岩中形成硅化灰岩。蚀变不甚强烈,为近矿蚀变。绿泥石

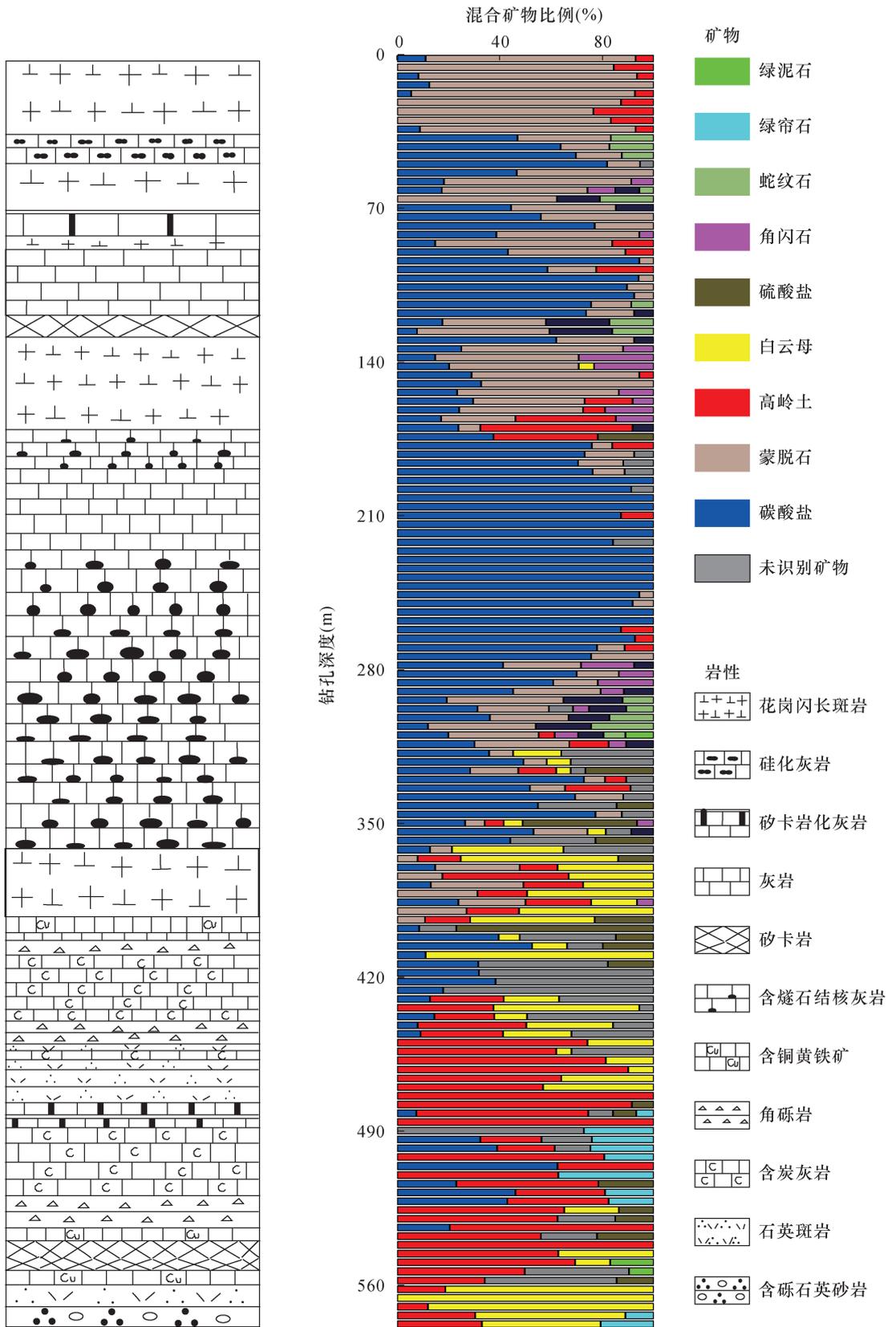


图2 ZKJ9 - 7 钻孔蚀变矿物——岩性分布柱状图

Fig. 2 Histogram of altered mineral - lithology in ZKJ9 - 7 drilling

表2 ZKJ9-7 钻孔典型蚀变矿物光谱特征

Table 2 Spectral characteristics of typical altered minerals from the ZKJ9-7 drilling

矿物	波谱图	波谱特征
碳酸盐		<p>碳酸盐在 2300 ~ 2400nm 间具有单一的吸收特征,对称性左宽右窄,有别于其他矿物;同时绝大多数矿物在 2100 ~ 2200nm 及 2500nm 附近具有次一级特征吸收峰</p>
蒙脱石		<p>蒙脱石在 2208nm 附近表现出强烈的吸收特征,同时在 1410nm 和 1910nm 附近具有吸收特征</p>
绢云母		<p>绢云母的光谱吸收特征主要分布在 2200nm 附近有明显的吸收峰,在 2340nm 和 2440nm 附近有次级吸收峰</p>
高岭石		<p>高岭石在 1400nm 和 2200nm 处出现双吸收峰,同时双吸收峰的距离较近 (&lt; 15nm)</p>

化分布在砂卡岩和花岗闪长斑岩内,多交代石榴石砂卡岩,常与绿泥石伴生又被绿泥石交代,与黄铁矿关系密切<sup>[23-25]</sup>。

### 2.2 围岩蚀变特征

城门山铜矿铁路坎矿区围岩以石榴砂卡岩、闪

长玢岩、花岗斑岩、石英岩、粉晶灰岩为主(图2),结构种类较多。由于围岩的物理、化学性质的差异,不同的岩性组合,以及在成矿作用方式、矿体产出特征上的不同,而形成不同的矿床类型。在 ZKJ9-7 钻孔附近,石英斑岩、含炭灰岩、角砾岩、石英砂岩这些

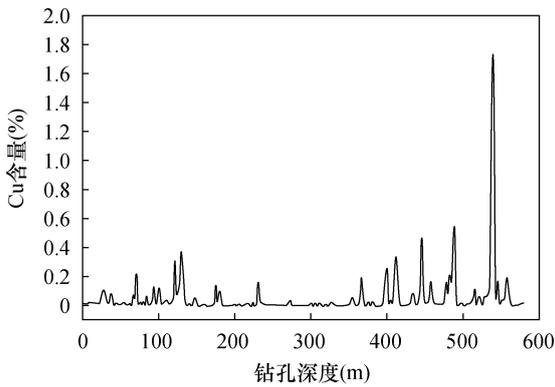


图3 ZKJ9-7 钻孔 Cu 含量与钻孔深度关系

Fig. 3 Relationship between Cu content and depth in ZKJ9-7 drilling

围岩均与成矿密切相关。同时,围岩蚀变种类复杂,主要有大理岩化、矽卡岩化、绿泥石化、硅化、绢云母化、高岭土化等。

ZKJ9-7 钻孔内上部主要是以城门山岩体为中心的斑岩矿床蚀变分带,铜矿化与蚀变围岩关系十分密切,矿石就是蚀变了岩石;下部铜矿化程度高,主要是以接触带为中心的矽卡岩蚀变分带,并且还存在着层间破碎带组成的硅化带、以石英斑岩体为中心的斑岩矿床蚀变分带等,在空间上的相互影响和重叠,构成了复杂的综合蚀变分带。根据原岩岩性及蚀变矿物组合的空间分布规律,矿区从复式杂岩体中心向外可划分为内、外两带。内带,以岩体为中心形成面状蚀变分带。外带,以花岗闪长斑岩接触带为中心形成环带状蚀变分带<sup>[26-31]</sup>(表3)。

表3 城门山矿区蚀变带划分

Table 3 Partition of alteration zone in Chengmenshan copper deposit

蚀变带	亚带	蚀变带名称	相对位置	蚀变特征	
内带	1	钾长石-石英化带	中心带	岩体中的蚀变	
	2	黑云母-钾长石化带	过渡带		
	3	泥化-绢云母化带	边缘带		
外带	4	矽卡岩化带	接触带		围岩中的蚀变(碳酸盐类岩石和砂岩)
	5	硅化-大理岩化带	外接触带		

铁路坎矿区铜矿化主要集中在下部接触带(图2、图3),主要为矽卡岩化带,分布于花岗闪长斑岩与灰岩接触处,特别发育于悬垂体内及岩体呈枝状穿插部位。该带主要蚀变矿物为钙铁石榴石,其次为碳酸盐、绢云母、绿泥石等热液矿物。由岩体至围岩主要显露的是由矽卡岩化花岗闪长斑岩-石

榴石矽卡岩-矽卡岩化灰岩-灰岩这一相带规律。通过高光谱岩心扫描(图2),并且用电子探针测量ZKJ9-7 钻孔中的石榴子石进行验证(表4),钻孔内主要为钙铁-钙铝石榴石系列,总体上钙铁石榴石大于钙铝石榴石。由于钻孔上部主要为灰岩,所以越接近灰岩的石榴子石,其CaO含量越高,说明Ca来源于灰岩。当上升溶液沿着碳酸盐类接触面流动时,碳酸盐中的CaO通过粒间溶液,以上升溶液为媒介向硅铁质岩和硅铝质岩石方向扩散。相反,硅铁质岩和硅铝质岩中的FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>以同样的方式向灰岩方向扩散,从而接触带两侧的岩石发生成分置换而形成矽卡岩。在此过程中,铜在热液中富集,易形成矽卡岩型铜矿床。

表4 ZKJ9-7 钻孔中石榴子石的化学组成

Table 4 Chemical compositions of garnet in ZKJ9-7 drilling

元素	各样品化学组成(%)						
	9-7-3-1	9-7-3-2	9-7-3-3	9-7-3-5	9-7-3-6	9-7-3-7	9-7-3-8
SiO <sub>2</sub>	37.902	37.867	38.019	38.503	37.027	37.455	38.501
CaO	34.941	35.274	34.902	35.365	34.608	34.874	34.121
FeO	16.679	16.601	17.044	13.112	17.921	19.106	17.701
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.568	9.058	8.897	11.828	7.548	7.202	8.297
MnO	0.379	0.295	0.341	0.505	0.343	0.347	0.320
TiO <sub>2</sub>	0.148	0.164	0.075	0.170	0.199	0.012	0.046
K <sub>2</sub> O	0.019	0	0.014	0.036	0.023	0.011	0.003
Na <sub>2</sub> O	0	0.011	0.008	0.052	0.013	0.037	0.066
MgO	0.096	0.058	0.081	0.122	0.148	0.034	0.098
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.019	0.021	0	0.008	0.001	0	0.001
NiO	0	0.009	0	0	0	0	0
总计	98.751	99.358	99.381	99.701	97.831	99.078	99.154

### 3 结论

本文采用高光谱岩心扫描系统快速识别江西城门山铜矿床铁路坎矿区蚀变特征,认为城门山铜矿床浅部区域主要受花岗闪长斑岩体与碳酸盐类围岩之间的接触带构造控制;深部区域主要经历矽卡岩化和硅化,部分有绿泥石化,这些蚀变过程有利于铜矿的形成与富集。富铜矽卡岩型矿床的形成,主要通过热液在岩石的裂隙之间流动,从而实现组分交换,具体是组分的浓度差所引起的扩散作用实现的。上升溶液沿着碳酸盐类接触面流动时,碳酸盐中的CaO通过粒间溶液,以上升溶液为媒介向硅铁质岩和硅铝质岩石方向扩散。相反,硅铁质岩和硅铝质岩中的FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>以同样的方式向灰岩方向扩散,从而接触带两侧的岩石发生成分置换而形成矽卡岩。

本文通过高光谱岩心扫描系统获得的光谱数据与地球化学特征数据相结合,在江西城门山铁路坎铜矿床得到了很好的应用,为矿床外围扩充资源储量以及勘探开发奠定基础。高光谱扫描系统能够快速准确获得岩心的矿物蚀变信息以及矿化特征,并且不损害岩心样品,使得岩心样品能够重复利用。这种方法尤其适合有明显蚀变特征的矿床,丰富的光谱特征信息指示出丰富的蚀变矿物,对找矿勘探等具有重要的实践意义。

#### 4 参考文献

- [1] Lowell J D, Guilbert J M. Lateral and vertical alteration – mineralization zoning in porphyry ore deposits [J]. *Economic Geology*, 1970, 65: 373 – 408.
- [2] 杨金中, 方洪宾, 张玉君, 等. 中国西部重要成矿带遥感找矿异常提取的方法研究[J]. *国土资源遥感*, 2003 (3): 50 – 53.  
Yang J Z, Fang H B, Zhang Y J, et al. Remote sensing anomaly extraction in important metallogenic belts of western China [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2003 (3): 50 – 53.
- [3] 张玉君, 杨建民, 姚佛军. 多光谱遥感技术预测矿产资源的潜能——以蒙古国欧玉陶勒盖铜金矿床为例[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 63 – 69.  
Zhang Y J, Yang J M, Yao F J. The potential of multi – spectral remote sensing techniques for mineral exploration—Taking the Mongolian Oyu Tolgoi Cu – Au deposit as an example [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 63 – 69.
- [4] 代晶晶, 王瑞江, 王润生, 等. 基于蚀变信息提取的西藏班公湖—怒江成矿带中段斑岩铜矿找矿预测[J]. *地球学报*, 2012, 33(5): 755 – 762.  
Dai J J, Wang R J, Wang R S, et al. Porphyry copper deposit prognosis in the middle part of the Bangong Co—Nujiang River metallogenic belt in Tibet based on alteration information extraction [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2012, 33(5): 755 – 762.
- [5] Kruse F A. Identification and mapping of minerals in drill core using hyperspectral image analysis of infrared reflectance spectra [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(9): 1623 – 1632.
- [6] Taylor G R. Mineral and lithology mapping of drill core pulps using visible and infrared spectrometry [J]. *Natural Resources Research*, 2000, 9(4): 257 – 268.
- [7] 张川, 叶发旺, 徐清俊, 等. 钻孔岩心高光谱技术系统及其在矿产勘查中的应用[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(6): 177 – 183.
- Zhang C, Ye F W, Xu Q J, et al. Drill core hyperspectral technology system and its application in mineral prospecting [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(6): 177 – 183.
- [8] Michelle T, Benoit R, David G, et al. Automated drill core logging using visible and near – infrared reflectance spectroscopy: A case study from the Olympic Dam IOCG deposit, South Australia [J]. *Economic Geology*, 2011, 106(2): 289 – 296.
- [9] Michelle C T, Benoit R, David G, et al. The mineral chemistry, near – infrared, and mid – infrared reflectance spectroscopy of phengite from the Olympic Dam IOCG deposit, South Australia [J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53(3): 26 – 38.
- [10] 张杰林, 黄艳菊, 王俊虎, 等. 铀矿勘察钻孔岩心高光谱编录及三维矿物填图技术研究[J]. *铀矿地质*, 2013, 29(4): 249 – 255.  
Zhang J L, Huang Y J, Wang J H, et al. Hyperspectral drilling core logging and 3D mineral mapping technology for uranium exploration [J]. *Uranium Geology*, 2013, 29(4): 249 – 255.
- [11] 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等. 近红外光谱分析技术在蚀变矿物鉴定中的应用[J]. *地质学报*, 2007, 81(11): 1584 – 1590.  
Xiu L C, Zheng Z Z, Yu Z K, et al. Mineral analysis technology application with near infrared spectroscopy in identifying alteration mineral [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1584 – 1590.
- [12] 修连存, 郑志忠, 陈春霞, 等. 国外便携式近红外药品分析仪原理及其应用[J]. *现代科学仪器*, 2008(4): 120 – 123.  
Xiu L C, Zheng Z Z, Chen C X, et al. Principle and application of domestic portable near infrared medicine analyzer [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2008(4): 120 – 123.
- [13] 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等. 近红外光谱仪测定岩石中蚀变矿物方法研究[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(6): 519 – 523.  
Xiu L C, Zheng Z Z, Yu Z K, et al. Study on method of measuring altered minerals in rocks with near – infrared spectrometer [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(6): 519 – 523.
- [14] 修连存, 郑志忠, 殷靓, 等. 岩心扫描仪光谱数据质量评估方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(8): 2352 – 2356.  
Xiu L C, Zheng Z Z, Yin L, et al. Research on assessment methods of & spectrum data quality of core scan [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(8):

- 2352-2356.
- [15] 蒙亚平,杜培军,李二珠,等. 国产岩心光谱扫描仪CMS350A数据预处理技术[J]. 国土资源遥感,2017,29(4):73-81.  
Meng Y P, Du P J, Li E Z, et al. Data preprocessing methods of domestic core spectral scanner CMS350A [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017, 29(4):73-81.
- [16] 赵瑞,谢奕汉,姚御元,等. 城门山及武山铜矿床的硫同位素研究[J]. 地质学报,1985,59(3):251-258.  
Zhao R, Xie Y H, Yao Y Y, et al. Sulfur isotope study of the copper ore deposit of Chengmenshan and Wushan [J]. Acta Geologica Sinica, 1985, 59(3):251-258.
- [17] 孟良义,黄恩邦. 城门山铜、钼矿床的稳定同位素地质[J]. 长春地质学院学报,1988,18(3):269-276.  
Meng L Y, Huang E B. The stable isotopic geology of copper, molybdenum ore deposits in Chengmenshan, Jiangxi [J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1988, 18(3):269-276.
- [18] 黄恩邦,张迺堂,罗钊生. 城门山、武山铜矿床成因[J]. 矿床地质,1990,9(4):291-300.  
Huang E B, Zhang N T, Luo Z S. The genesis of the Chengmenshan and Wushan copper deposits [J]. Mineral Deposits, 1990, 9(4):291-300.
- [19] 王忠玲. 江西城门山块状硫化物矿床地质特征及成因研究[J]. 地质找矿论丛,1991,6(1):47-57.  
Wang Z L. Genesis and geological features of Chengmenshan massive sulfide Cu, S ore deposit, Jiangxi Province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1991, 6(1):47-57.
- [20] 贾伟. 江西城门山、武山矿区块状硫化物型铜矿成因新探讨[J]. 江西地质,1999,13(1):33-37.  
Jia W. A discussion on the genesis of the Chengmenshan and Wushan massive sulfide copper deposits in Jiangxi Province [J]. Jiangxi Geology, 1999, 13(1):33-37.
- [21] 王青华,王润生,郭小方. 高光谱遥感技术在岩石识别中的应用[J]. 国土资源遥感,2000,12(4):39-43.  
Wang Q H, Wang R S, Guo X F. Application for discrimination of rock using hyperspectral remote sensing technique [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2000, 12(4):39-43.
- [22] 徐翠,李林庆,张洁,等. X射线荧光光谱-电子探针在中酸性火山岩鉴定中的应用[J]. 岩矿测试,2016,35(6):626-633.  
Xu C, Li L Q, Zhang J, et al. Application of X-ray fluorescence spectrometry and electron microprobe in the identification of intermediate-felsic volcanic rocks [J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(6):626-633.
- [23] 罗建安,杨国才. 江西城门山铜矿地质特征及矿床成因[J]. 矿产与地质,2007,21(3):284-288.  
Luo J A, Yang G C. Geological characteristics of Chengmenshan copper deposit, Jiangxi and its ore genesis [J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21(3):284-288.
- [24] 李旭辉,田九玲. 城门山铜矿地质特征及深部三维成矿预测[J]. 金属矿山,2016(6):113-116.  
Li X H, Tian J L. Geological characteristics and deep three-dimensional metallogenic prediction of Chengmenshan copper mine [J]. Metal Mine, 2016(6):113-116.
- [25] 李旭辉,高任,马立成,等. 江西城门山矿田块状硫化物型矿体矿化分带特征[J]. 地质力学学报,2016,22(3):794-802.  
Li X H, Gao R, Ma L C, et al. Mineralization zonation of massive sulfide deposit in the Chengmenshan orefield, Jiangxi Province, China [J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3):794-802.
- [26] 吴俊华,龚敏,袁承先,等. 江西城门山铜矿含矿斑岩体风化作用地球化学特征[J]. 矿床地质,2010,29(3):501-509.  
Wu J H, Gong M, Yuan C X, et al. Weathering geochemical characteristics of ore-bearing porphyry in Chengmenshan copper deposit, Jiangxi Province [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(3):501-509.
- [27] 吴俊华,龚敏,龚鹏,等. 江西九江城门山铜矿三维地质地球化学特征与成矿预测[J]. 地质通报,2010,29(6):925-932.  
Wu J H, Gong M, Gong P, et al. 3D geological and geochemical features and metallogenic prognosis of Chengmenshan copper deposit, Jiujiang, Jiangxi, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(6):925-932.
- [28] 龚鹏,龚敏,熊燃,等. 老矿区深部资源量预测的地球化学方法——以江西九江城门山铜矿深部铜资源量预测为例[J]. 地质通报,2010,29(2/3):414-420.  
Gong P, Gong M, Xiong R, et al. Resources prediction geochemical method in deep area for old orefield—A case study of Chengmenshan copper deposit about copper deep area resources prediction, Jiujiang County, Jiangxi Province, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2/3):414-420.
- [29] 方福康. 江西城门山斑岩铜钼矿成矿流体研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2012.  
Fang F K. Studies on the fluid inclusions of the Chengmenshan porphyry Cu-Mo deposit, Jiangxi Province [D]. Beijing: China University of Geosciences

(Beijing), 2012.

[30] 文春华,徐文艺,钟宏,等. 九瑞矿集区城门山斑岩型钼铜矿床流体包裹体研究[J]. 地质学报, 2012, 86(10):1604-1619.

Wen C H, Xu W Y, Zhong H, et al. Fluid inclusion study of the Chengmenshan porphyry Mo - Cu deposit in the Jiujiang—Ruichang district[J]. Acta Geologica Sinica,

2012, 86(10):1604-1619.

[31] 郭宇明,胡基垣,李超. 城门山铜矿矿石矿物组成及矿物学特征[J]. 四川地质学报, 2018, 38(3):427-430.

Guo Y M, Hu J H, Li C. Ore mineral component and mineralogy of the Chengmenshan Cu deposit [J]. Acta Geologica Sichuan, 2018, 38(3):427-430.

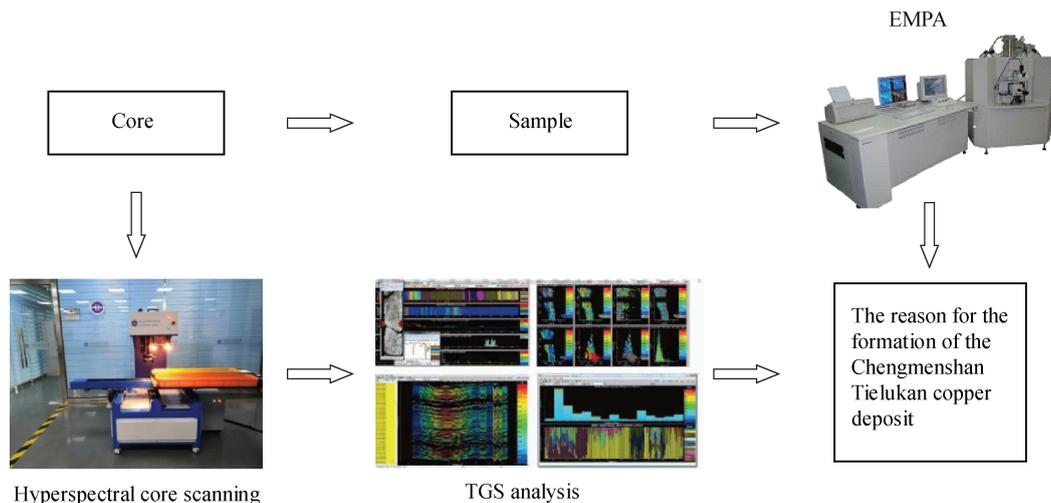
## Study on Alteration Characteristics of the Chengmenshan Tielukan Copper Deposit by A Hyperspectral Core Scanning System

CHEN Kang, JI Guang - xuan, ZHU You - feng, ZHANG Hua - chuan

(Core and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) The variations and compositions of altered minerals in the Chengmenshan Tielukan copper deposit were analyzed by a hyperspectral core scanning system for the first time.
- (2) The effect of altered minerals on the formation of the Chengmenshan Tielukan copper deposit was discussed.
- (3) The ore genesis of skarn - type copper deposits was discussed.



**ABSTRACT**

**BACKGROUND:** The altered wall rocks of copper deposits and associated ore bodies have a close genetic and spatial relationship. By analyzing the alteration characteristics of copper deposits, the physical and chemical conditions of the mineralization, the migration, enrichment and evolution of ore-forming elements in the hydrothermal fluid can be obtained. The alteration features ultimately indicate the mineralization degree of the copper deposit and the location of the ore body. The hyperspectral core scanning system is a new type of technical testing method, developed in recent years. This article documents the first time of studying the representative cores from the Chengmenshan Tielukan copper deposit by the hyperspectral core scanning system. At the same time, altered minerals were analyzed by electron probe microanalysis (EMPA). Thus, further revealing the metallogenic mechanism of the Chengmenshan copper deposit.

**OBJECTIVES:** To investigate the alteration features of the Chengmenshan Tielukan copper deposit and to understand the ore genesis.

**METHODS:** Samples were analyzed by a hyperspectral core scanning system and electron probe microanalyzer.

**RESULTS:** The results showed that in the typical borehole ZKJ9-7, the typical spectral curves of montmorillonite and carbonate were dominated at 0-350m, whereas the typical spectral curves of kaolin and muscovite were dominated at 350-578m. The mineral composition variation from the surface to the depth of the Tielukan region in the Chengmenshan copper deposit periphery was montmorillonite + kaolinite → carbonate + montmorillonite → carbonate → muscovite + kaolinite + montmorillonite → muscovite + kaolinite + chlorite.

**CONCLUSIONS:** In the Tielukan region, the contact zone between the granodiorite porphyry and the carbonate wall rocks controls the superficial part, but in the deep part it has alteration processes such as skarnization, silicification and chloritization. These alteration processes will conduce to the formation and enrichment of the copper mine. The deep part of the drilling core also shows that rock component exchange occurred on both sides of the contact zone, resulting in the formation of the skarn in the deep part. When the ascending mineralized solution flows along the carbonate interface, CaO in carbonate diffuse to the ferrosilicon rock and aluminosilicon rock along with the intergranular solution. In contrast, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> in the ferrosilicon rock and aluminosilicon rock diffuse to limestone, and thus rock components exchange on both sides of the contact zone generating the skarn in the deep part. The formation of copper-rich skarn deposit is closely related to the components exchange between solution and rock. The diffusion effect caused by the concentration difference of the components plays an important role.

**KEY WORDS:** copper deposit; hyperspectral spectrum; altered minerals; skarn; Chengmenshan