

· 方法与应用 ·

短波红外光谱技术在新疆阿舍勒铜锌矿床 勘查中的应用

游富华^{1,2}, 蒋姣姣², 张锦章², 赖晓丹²

(1. 中色紫金地质勘查(北京)有限责任公司, 北京 100012; 2. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200)

摘要: 新疆阿舍勒铜锌矿床是典型的火山岩型块状硫化物矿床, 近年来矿产勘查向深部和外围扩展, 由于矿体的厚度较小、埋深大, 传统的物化探方法勘查效果不佳, 急需寻找快速有效的勘查技术方法。本文在阿舍勒铜锌矿床开展了系统的短波红外光谱(SWIR)勘查研究, 结果显示, 与矿(化)体关系密切的白云母具有的 Al—OH 吸收峰位小于 2 205 nm, 总体具有富 Al 的特征; 与矿(化)体关系密切的绿泥石具有的 Fe—OH 吸收峰值集中在 2 250 nm, 具有富 Mg 特征; 白云母结晶度在矿区由南到北呈逐渐升高的趋势, 表明热液(矿化中心)主要来自于矿区北部。研究表明, 短波红外光谱技术能快速有效地识别出蚀变矿物类型, 确定蚀变矿物组合, 指示蚀变分带规律; 白云母和绿泥石吸收峰波长和白云母结晶度的变化规律, 可以作为阿舍勒铜锌矿床找矿的新标志。

关键词: 短波红外光谱; 块状硫化物矿床; 阿舍勒铜锌矿; 新疆

中图分类号: P618.4; P575.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)05-1010-13

Application of short wave infrared technique in exploration of Ashele Cu-Zn deposit in Xinjiang

YOU Fu-hua^{1,2}, JIANG Jiao-jiao², ZHANG Jin-zhang² and LAI Xiao-dan²

(1. Sino-Zijin Resources (Beijing) Ltd., 100012 Beijing, China; 2. Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang 364200, China)

Abstract: The Ashele Cu-Zn deposit in Xinjiang is a typical volcanic massive sulfide deposit. In recent years, mineral exploration has been extended to the depth and the periphery. The traditional geophysical and geochemical exploration methods are not effective in mineral exploration as the small thickness and large buried depth of the orebody. It is urgent to find a quick and effective mineral exploration method. This paper introduces the application of short wave infrared (SWIR) technique in the exploration of the Ashele Cu-Zn deposit. The results show that the muscovite closely related to orebody or mineralization has an Al—OH absorption peak position of less than 2 205 nm and is characterized by Al-rich; and that the chlorite closely related to orebody or mineralization has Fe—OH absorption peaks concentrating at 2 250 nm and shows Mg-rich characteristics. The crystallinity of muscovite increases gradually from the south to north, indicating that the hydrothermal fluid (mineralization center) was mainly from the north. The SWIR can identify the alteration minerals quickly and effectively, which is useful to determine the alteration mineral assemblages and reveal the regularity of alteration zoning. The wavelength of absorption peak of muscovite and chlorite and crystallinity of muscovite can be used as new prospecting symbols of the Ashele Cu-Zn deposit.

收稿日期: 2020-09-08; 接受日期: 2021-05-14; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项(2012YQ05025007)

作者简介: 游富华(1984-), 男, 硕士, 工程师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事地质找矿工作, E-mail: yfh_02104526@163.com。

网络首发时间: 2021-06-23; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20210623.1057.002.html>

Key words: short wave infrared (SWIR); massive sulfide deposit; Ashele Cu-Zn deposit; Xinjiang

Fund support : Special Programme on National Key Scientific Instruments (2012YQ05025007)

阿舍勒铜锌矿床位于新疆阿尔泰山造山带南缘,是20世纪80年代国内发现和勘查评价的唯一大型火山岩型块状硫化物(VMS)矿床(冯京等,2012)。近半个世纪以来,阿舍勒铜锌矿床作为新疆典型块状硫化物矿床代表引起多数学者的广泛关注,前人对其矿田构造、矿床地质、成矿物质来源、同位素地球化学和年代学等方面进行了系统研究,取得了重要的进展和认识(陈毓川等,1996;王登红,1996;李华芹等,1998;牛贺才等,2006;杨富全等,2013,2015,2016;郑义等,2015)。随着近十多年来勘查和开发程度的不断深入,找矿取得了突破。矿床自发现以来做了大量的物探工作,包括自然电场法、激发极化法、瞬变电磁法(TEM)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、重力及井中物探等,尤其是近年来利用可控源音频大地电磁法(CSAMT)寻找深部隐伏矿化体,并投入了大量地表钻探进行验证,但由于矿体厚度小、埋深大,未取得良好的找矿效果。因此,目前急需寻找快速有效的勘查技术方法进行下一步的找矿工作。

短波红外光谱技术(short wave infrared, SWIR)能够快速有效地识别出含氢氧根或含水的层状硅酸盐、硫酸盐类和碳酸盐类,测定特征蚀变矿物的光谱参数,可用于指示热液成矿体系的环境参数,划分蚀变分带,厘定热液/矿化中心(Chang *et al.*, 2011; Chang and Yang, 2012; Neal *et al.*, 2018; 陈华勇等, 2019; 田丰等, 2019)。该技术是现代找矿勘查和矿产资源潜力评估的重要手段之一(连云长等, 2005; 戴倩倩, 2009; 许超等, 2014; 彭自栋等, 2016; 黄健瀚等, 2016; 陈华勇等, 2019),并已广泛应用于斑岩矿床、浅成低温热液矿床、火山成因块状硫化物矿床(VMS)和铁氧化物-铜金矿床(IOCG)的勘查中(Herrmann *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2005; Chang *et al.*, 2011)。本文在前人研究的基础上,在阿舍勒铜锌矿床开展了系统的短波红外光谱勘查研究,鉴别蚀变矿物,划分蚀变分带,通过特征矿物的光谱参数变化规律,建立矿床蚀变找矿标志,厘定热液/矿化中心,为新疆阿舍勒铜矿下一步找矿方向提供依据。

1 区域地质背景及矿床概况

阿舍勒铜锌矿床位于阿尔泰山造山带南缘阿舍勒火山-沉积盆地内(图1)(李华芹等,1998)。区域内出露的地层主要为中下泥盆统火山岩、碳酸盐岩和碎屑岩以及下石炭统的滨-浅海火山岩-碎屑沉积岩夹碳酸盐岩。区域主体构造为玛尔卡库里断裂,是琼库尔-阿巴宫褶皱带与额尔齐斯褶皱带的分界断裂,总体走向NW-SE,断层面倾向NE,平面上呈舒缓的反“S”型斜穿阿舍勒盆地。在断裂带的东北侧除阿舍勒铜锌矿床外,还发育有萨尔朔克金多金属矿床、床阿依铜矿床、喀英德铜矿点、阿依托汉铜矿点等。区内侵入岩十分发育,岩性以基性和中酸性为主。

矿床产出受地层层位和构造控制。矿床主要赋存在中泥盆统阿舍勒组第2岩性段中亚段(D_2as^{2b})中,是与海底火山喷气活动有关的块状硫化物矿床,具有双层结构。矿化层位较稳定,走向延伸长,矿体形态简单-中等(图2),多呈厚板状、长透镜状,总体近NW走向,倾向E,倾角 $55^\circ \sim 80^\circ$,向北侧伏,侧伏角 $65^\circ \sim 80^\circ$ 。矿石中金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿,次为方铅矿、锌砷黝铜矿、含银锌铋黝铜矿等。非金属矿物为石英、绢云母、绿泥石、重晶石、方解石等。矿石结构主要有微细粒状结构、压碎结构、黄铁矿与黄铜矿固溶体分离结构(图3)。矿石构造主要有块状构造、条带状构造、脉状构造、浸染状构造、网脉状构造(图3)。

矿区围岩蚀变较为发育,热液蚀变大多呈面型展布,少数呈线型,属于火山热液作用的同时蚀变。蚀变类型以硅化、绢云母化、黄铁矿化为主,次有绿泥石化、碳酸盐化,局部发育有重晶石化、高岭土化、绿帘石化、阳起石化等。

经近几年来勘查,取得深部找矿突破,储量进一步扩大,全区矿石量5 950.64万吨,铜金属量131.8万吨,Cu平均品位2.22%,锌金属量61.0万吨,Zn平均品位1.03%(新疆哈巴河阿舍勒铜业股份有限公司,2021)^①。

① 新疆哈巴河阿舍勒铜业股份有限公司. 2021. 新疆哈巴河县阿舍勒矿区铜锌矿资源储量核实报告.

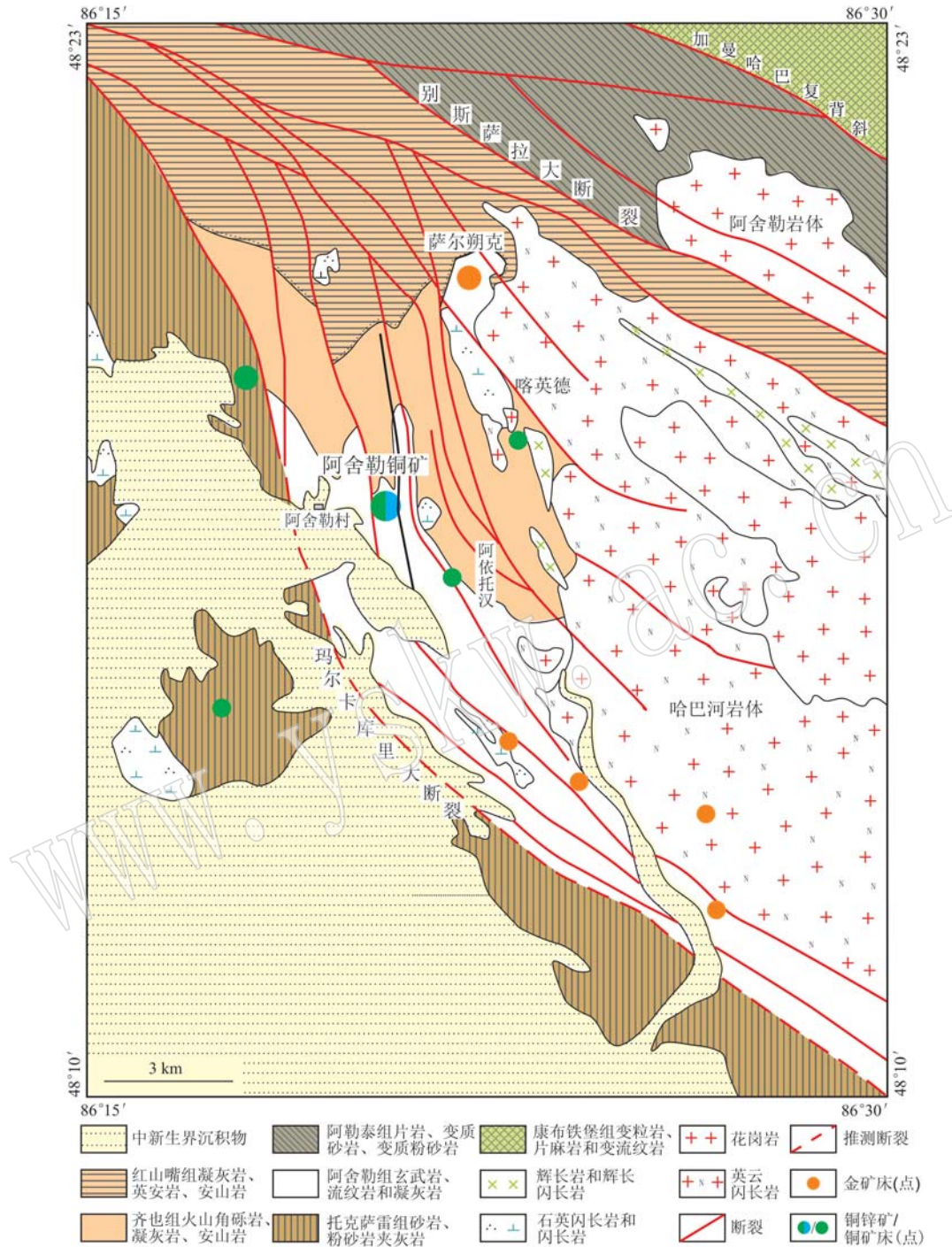


图1 新疆阿舍勒铜矿区区域地质图[据杨富全等(2015)修改]

Fig. 1 Regional geological map of Ashele Cu-Zn deposit in Xinjiang(after Yang Fuquan *et al.* , 2015)

2 样品采集及测试

本次工作主要基于详细的野外地质调查、钻孔岩芯编录和采样分析,在室内进行了详细的显微相

学观察和大量的SWIR光谱分析。从矿区南16线至北25线,涵盖I号铜锌主矿体范围,共编录和测试钻孔47个,累计编录/测试长度22150 m。

野外岩心编录主要包括岩性分层、蚀变分层、构造分层,详细描述颜色、岩矿石的结构构造、岩矿石

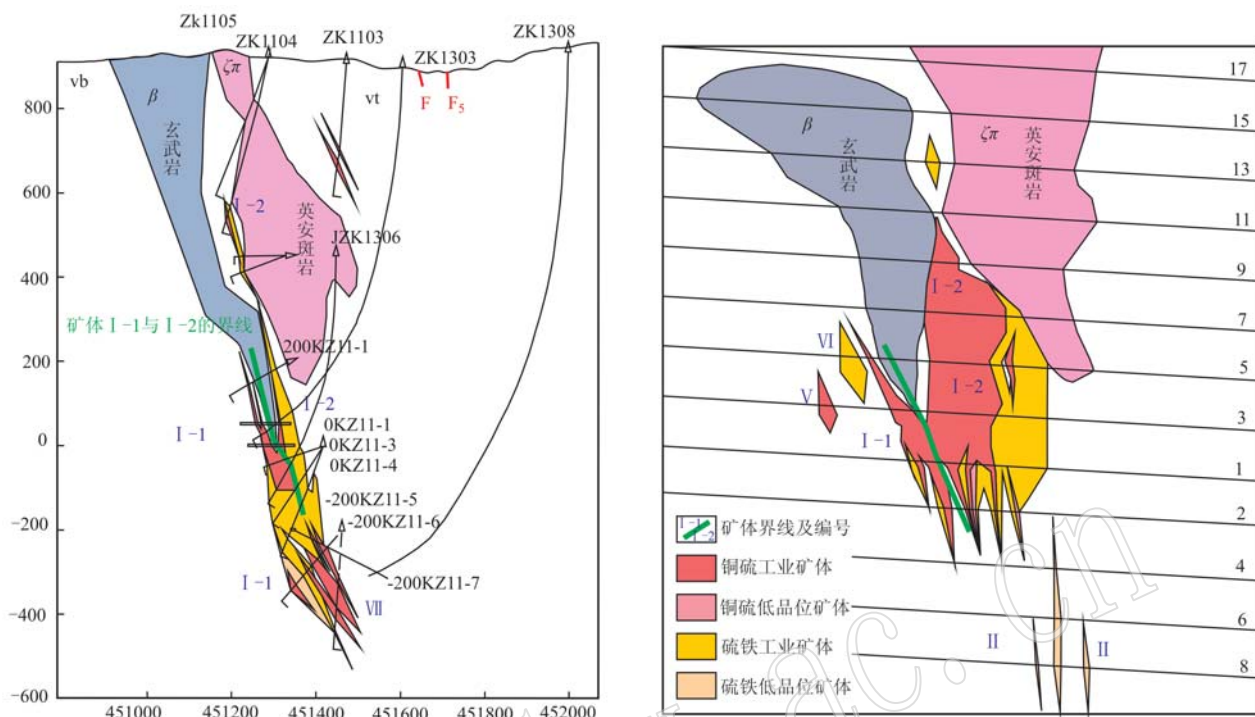


图 2 I 号矿体 11 线地质剖面图(a)和 350 m 中段水平断面图(b)
 Fig. 2 Geological profile of line 11(a) and 350 m level plan(b) of orebody I

的物质组成以及蚀变矿物种类、强度及目估含量,矿化类型、矿化种类、强度以及目估含量,按剖面对上述岩矿石进行对比研究。

所用的岩心光谱扫描仪 CMS350A (以下简称 CMS350A)是中国地质调查局南京调查中心承担的国家重大科学仪器设备开发专项“岩心光谱扫描仪研发与产业化”课题研制而成的,采用小型化可见光-近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)成像光谱仪(蒙亚平等,2017)。扫描对象是固定的岩心,首先对每个钻孔岩心样品进行清洗并晾干,测试前对仪器进行校准,把存放钻孔岩心的岩心箱按扫描顺序放置岩心盘,然后从岩心右上角开始到左下角结束沿岩心盘纵向进行扫描,当达到底部时,向左偏移 1 个岩心盘格子的位置,继续从右上到左下扫描,直至扫描完整个岩心盘。扫描速度为 30 帧/s。

先用光谱地质分析软件(the spectral geologist, TSG)对所有的测试数据进行自动解译,然后通过人工进行逐条核对和检查,并最终确定矿物的种类。白云母族-蒙脱石(1 900 nm 和 2 200 nm)和绿泥石(2 250 nm 和 2 335 nm)的吸收峰位(Pos)和吸收峰位深度(Dep)等参数都可通过 TSG 的标量(scalar)直接获取,白云母族-蒙脱石的结晶度(IC card)也可

以通过 TSG 的标量功能直接求出(陈华勇等,2019)。

3 测试结果及 SWIR 蚀变参数变化特征

3.1 蚀变类型及分带

对矿区南 16 至北 25 线范围共 47 个钻孔累计 22 150 m 岩心的系统进行的测试结果(图 4)显示,矿区围岩蚀变分布广泛(表 1),蚀变类型主要有硅化、绢云母化、黄铁矿化及绿泥石化,次有重晶石化、碳酸盐化(图 5),局部发育有高岭土化、绿帘石化、蒙脱石化、明矾石化和阳起石化、次闪石化等。硅化是矿区内最发育,并且分布较广的蚀变类型。绢云母化为围岩受碱性热液作用的一种蚀变,多伴随硅化出现,分为两种:一为热液蚀变形成,常伴随硅化、黄铁矿化出现;二为区域变质作用形成,常伴随碎裂、糜棱岩化,呈线状分布。黄铁矿化也是矿区广泛发育的一种蚀变,普遍伴随硅化和绢云母化出现,有时与黄铜矿共生。

以 350KZ19-5 孔为例(图 6),可以看出蚀变矿物的含量伴随孔深而变化,浅部以绿泥石化为主,逐渐过渡到以绢云母化为主,并伴随着硅化和黄铁矿

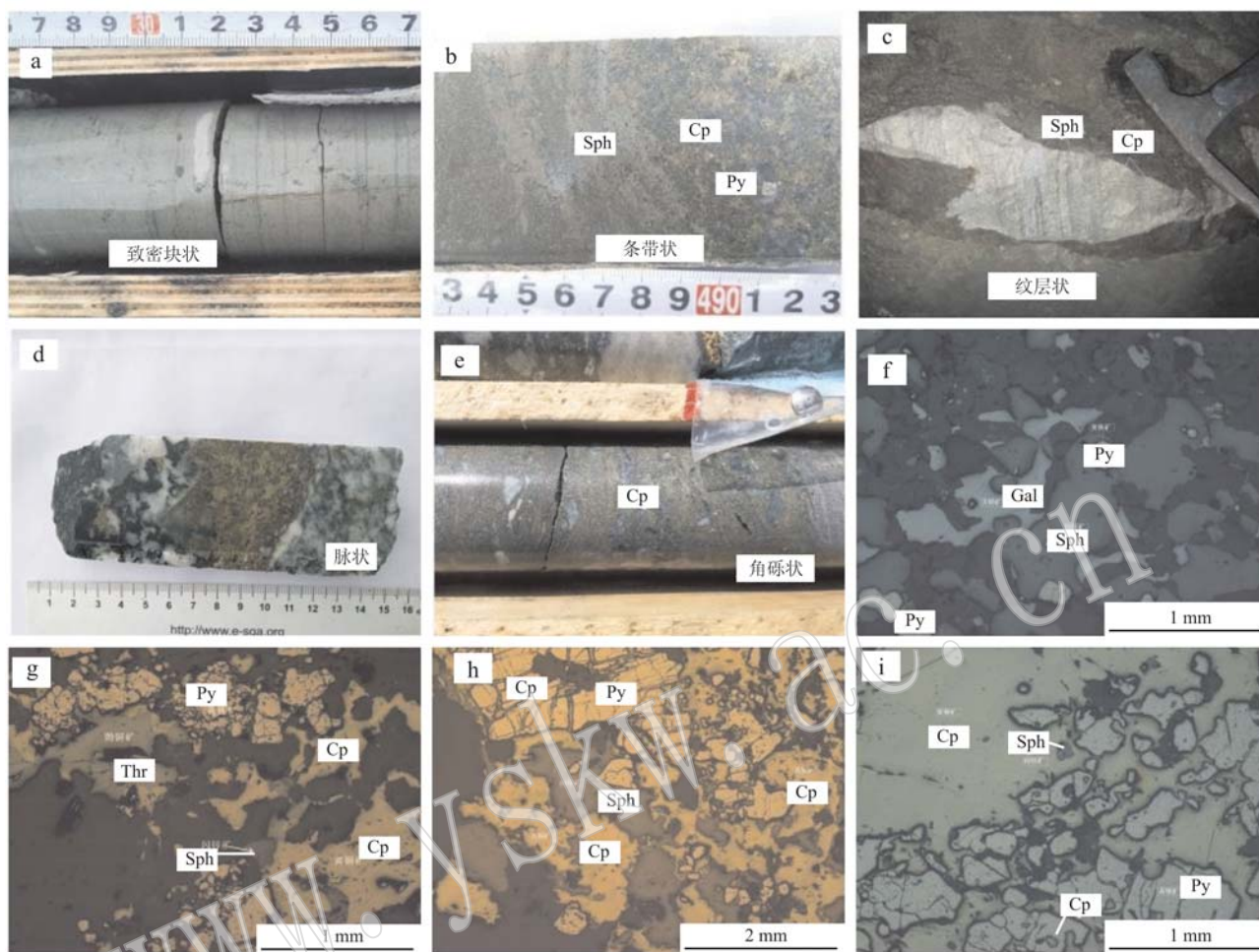


图3 矿石结构构造特征(标本/镜下尺度)

Fig. 3 Photographs /microphotographs showing structural characteristics of ore

a—致密块状(铜锌硫); b—条带状(铜锌硫); c—纹层状(黄铜矿与闪锌矿互层); d—脉状; e—角砾状(铜为主); f—共边结构;
g—交代残余结构; h—交代充填结构; i—骸晶结构; Py—黄铁矿; Cp—黄铜矿; Sph—闪锌矿; Thr—黝铜矿

a—dense massive structure (copper-zinc sulfide ore); b—banded structure (copper-zinc sulfide ore); c—laminated structure (chalcopyrite is interbedded with sphalerite); d—vein; e—breccia (mainly copper); f—co-corresponding edge texture; g—metasomatic relict texture; h—metasomatic packing texture; i—skeletal texture; Py—pyrite; Cp—chalcopyrite; Sph—sphalerite; Thr—tetrahedrite

(光谱无法检测的区域), 钻孔底部以绿泥石化为主。结合岩性、蚀变及矿化特征, 发现浅部绿泥石化的主要岩性为闪长岩脉、凝灰岩, 再过渡到以绢云母化为主, 即发生退蚀变, 对应铜、锌、硫品位升高, 表明黄铁矿开始逐渐增多, 在无法检测区域含量达到最高, 并伴随着铜、锌矿化, 成为铜(锌)硫矿石, 随后又过渡到以绿泥石化为主, 其对应的铜、锌、硫品位急剧下降, 甚至低于检出限, 也表明矿石与围岩接触截然。不难发现, 黄铁矿化+绢云母化+(强)硅化的蚀变组合与成矿关系密切, 其余测试的钻孔也具有相似的规律。因此, 根据野外岩心详细地质编录和观察, 同时结合矿区所测定的蚀变矿物类型及分布情

况, 可将矿区内的围岩蚀变组合类型大致划分为以下5种: 黄铁矿化+绢云母化+强硅化组合、黄铁矿化+绢云母化+硅化组合、黄铁矿化+绢云母化+弱硅化组合、黄铁矿化+绿泥石化+弱硅化组合、黄铁矿化+绿泥石化+碳酸盐化组合。

围岩蚀变组合在走向和垂向上均表现明显的分带特征。在走向上, 由南20线至8线蚀变表现以黄铁绢云母强硅化为主; 8至25线, 硅化有减弱的趋势, 表现为黄铁绢云母硅化, 并在断裂带发育有高岭土化; 25线以北出现大量英安斑岩, 以绿泥石化蚀变为主, 仅在深部可见弱黄铁绢云母硅化。在倾向上, 从正常翼→转折端→倒转翼, 蚀变强度(尤其是硅化

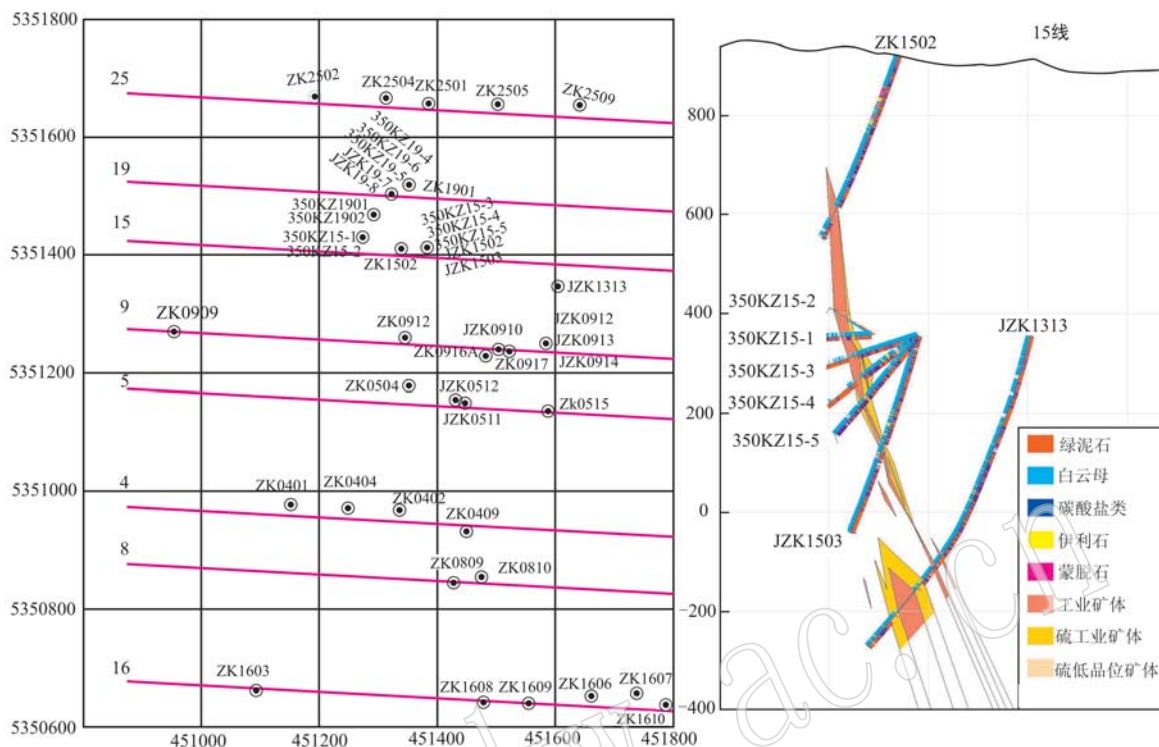


图 4 矿区岩心扫描钻孔分布及蚀变类型[修改自蒋姣姣等(2015)^①]

Fig. 4 Core scanning distribution and alteration type of boreholes (modified from Jiang Jiaojiao *et al.*, 2015)^①

Chl—绿泥石; ser—绢云母; cal—碳酸盐; ill—伊利石; mon—蒙脱石
Chl—chlorite; Ser—sericite; Cal—carbonate; Ill—illite; Mon—montmorillonite

表 1 阿舍勒铜锌矿岩矿石蚀变特征

Table 1 Alteration characteristics of rock and ore in Ashele Cu-Zn deposit

岩矿石名称	主要蚀变矿物	次要蚀变矿物	备注
英安斑岩	绿泥石	绢云母	
凝灰岩	绿泥石	绢云母	局部出现绿帘石
	绢云母	绿泥石	伴随硅化黄铁矿化
玄武岩	绿泥石	碳酸盐	少量暗色矿物
块状铜矿石	含硫较多,无法检测		
稠密浸染状铜硫矿石	绢云母、绿泥石		二者大致 1:1

强度)具逐渐增强的趋势,大致呈带状分带,中心为具(强)硅化-黄铁矿化-绢云母化蚀变,其外侧硅化和黄铁矿化减弱,但处于黄铁矿化-绢云母化带,最外侧为绿泥石化-绢云母化带或碳酸盐化-绿泥石化-绢云母化带,黄铁矿化显著减弱(图 7)。

通过图 7 不难发现主矿体正常翼和倒转翼的蚀变组合、蚀变强度、蚀变宽度均有不同,不具有对称

性,倒转翼的上盘出现黄铁矿+绢云母+强硅化组合,而对应正常翼的下盘出现弱黄铁矿+绢云母+硅化组合,前者的蚀变强度和延伸范围比后者更大。

3.2 蚀变参数特征

不同矿物的光谱曲线形状和吸收峰位不同,根据这一特性,可区分岩石中的矿物成分(Clark *et al.*, 1990)。白云母 Al—OH 波长范围均在 2 195~2 225 nm 内变化,吸收峰值若大于 2 205 nm 表明其为多硅白云母,具有贫 Al、富 Mg 或 Fe 特征;吸收峰值位于 2 205 nm 附近,表明其为白云母,具有富 K 和 Al 特征;若位于 2 195~2 205 nm、集中在 2 200 nm 附近,表明其为钠云母,具有富 Al、含 Na 特征。以 350KZ19-5 钻孔为例,钻孔中不同岩性的白云母吸收峰值区间不同(图 8):英安斑岩的白云母 Al—OH 波长位于 2 200~2 205 nm 之间;凝灰岩(含角砾)的白云母 Al—OH 波长略大于 2 205 nm;黄铁矿化凝灰岩的白云母 Al—OH 波长位于 2 200 nm 附近;块状铜

① 蒋姣姣, 黄海燕, 祁进平, 等. 2015. 岩心光谱扫描仪立体填图矿产勘查应用研究.

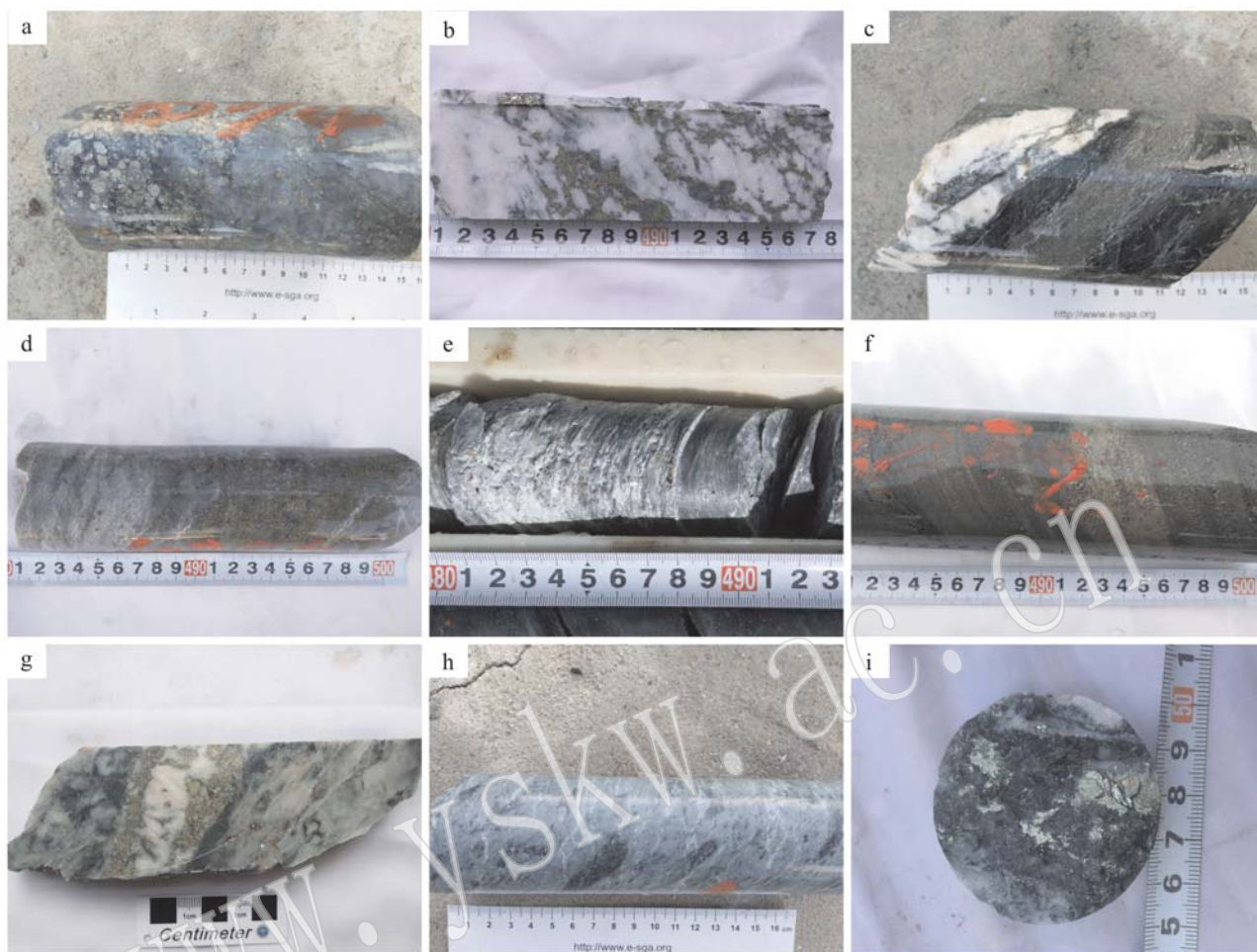


图5 矿区0米标高以下岩矿石蚀变类型及特征

Fig. 5 Alteration types and characteristics of rock and ore of mining area below 0 m level

a—硅化带；b—面型硅化；c—石英脉；d—面型绢云母蚀变；e—强绢云母化(产于断裂带)；f—条纹状铜硫矿石；g—脉状黄铁矿；h—斑点状绿泥石；i—线状绿泥石

a—silicified belt；b—planar silicification；c—quartz vein；d—planar sericitization；e—intensive sericitization (occurrence in the fault zone)；f—striped copper-sulfur ore；g—veined pyrite；h—spotted chlorite；i—linear chlorite

硫矿石受金属硫化物过多,未检测出蚀变矿物;凝灰岩的白云母 Al—OH 波长大于 2 205 nm。350KZ15-5 钻孔由浅到深表现为:从多硅白云母(贫 AL、富 Mg 或 Fe)变化至白云母(富 K 和 AL)、钠云母(富 AL、含 Na),再至多硅白云母。

绿泥石的 Fe—OH 特征吸收峰一般在 2 245 ~ 2 265 nm 附近,并随着 Fe 和 Mg 的二价离子在绿泥石晶体中八面体含量的变化而变化:2 260~2 265 nm 的吸收峰值对应富铁绿泥石,集中在 2 250 nm 对应富镁绿泥石,2 255~2 260 nm 则对应富铁镁绿泥石。以 350KZ15-3、350KZ15-4 为例,绿泥石的 Fe—OH 特征吸收峰分布特征反映钻孔从浅到深对应的是铁镁绿泥石—富铁绿泥石—富镁绿泥石—(矿化

体)—铁镁绿泥石(图9)。

峰强比是特征峰强度和吸附水峰强度之比,可以反映矿物形成时的相对温度,峰强比值大时形成的矿物温度相对偏高。这一比值也被称为矿物结晶度(SWIR-IC)(杨志明等,2012)。SWIR-IC 与通过 X 射线粉晶衍射测试所得的白云母结晶度(XRD-IC)不是同一概念,Chang 等(2011)对同样品进行的测试结果显示 SWIR-IC 与 XRD-IC 具有非常好的负相关关系,认为两者均可用作指示白云母的结晶度。根据对钻孔中提取的白云母反射光谱特征参数进行采集,然后对每个钻孔的特异值进行剔除,按 95% 可信度进行统计,结果发现围岩及矿石的白云母 SWIR-IC(白云母 2 200 nm 吸收峰深度与 1 900 nm

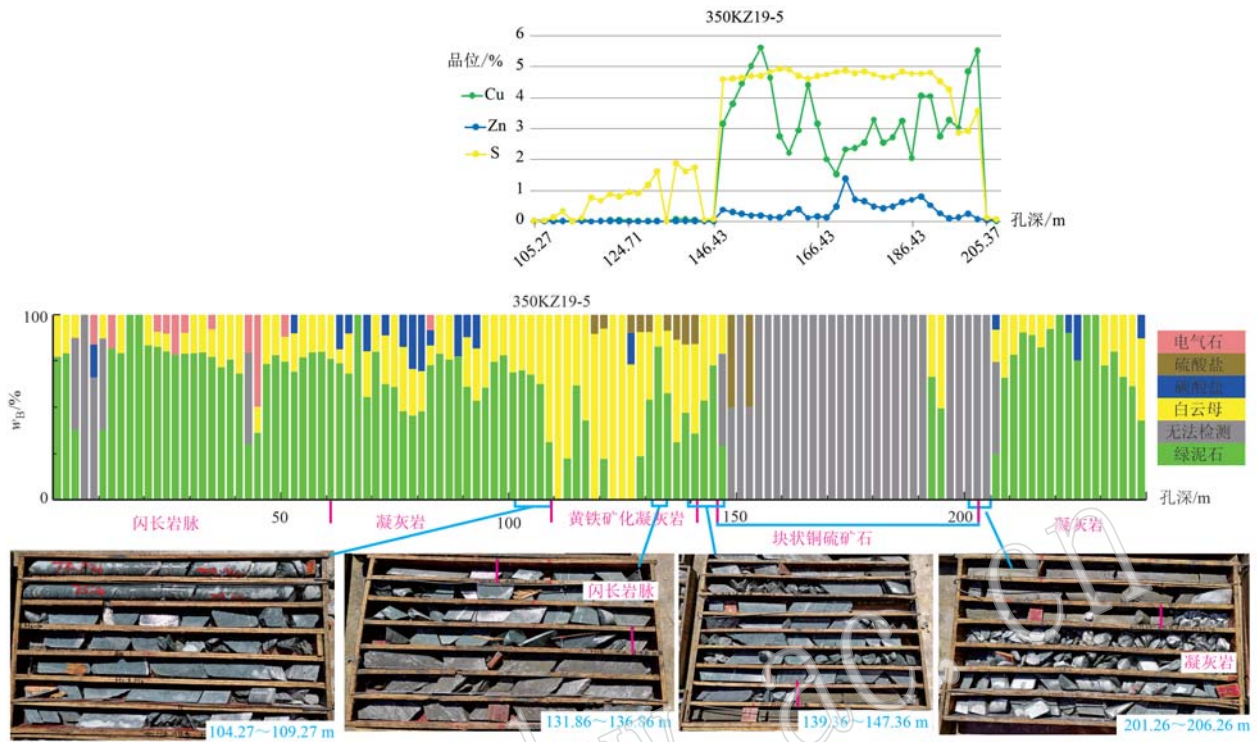


图 6 阿舍勒铜锌矿 350KZ19-5 蚀变与矿化关系

Fig. 6 Relationship between alteration and mineralization of 350KZ19-5 borehole in Ashele Cu-Zn deposit

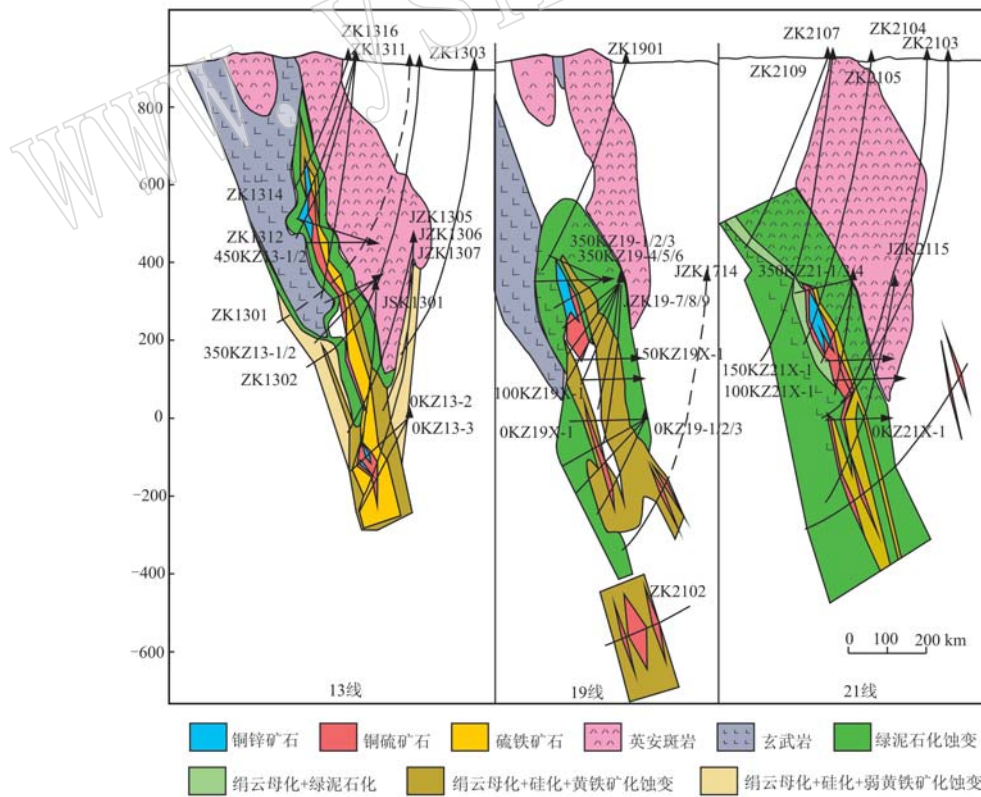


图 7 阿舍勒铜锌矿 13、19、21 线围岩蚀变分带简图 [修改自吴晓贵等 (2018)]

Fig. 7 Wall-rock alteration zones on lines 13, 19 and 21 of Ashele Cu-Zn deposit (revised from Wu Xiaogui *et al.*, 2018)

① 吴晓贵, 陈 鹏, 秦纪华, 等. 2018. 新疆哈巴河县阿舍勒铜矿区矿体空间分布规律及深部找矿预测研究 (内部报告).

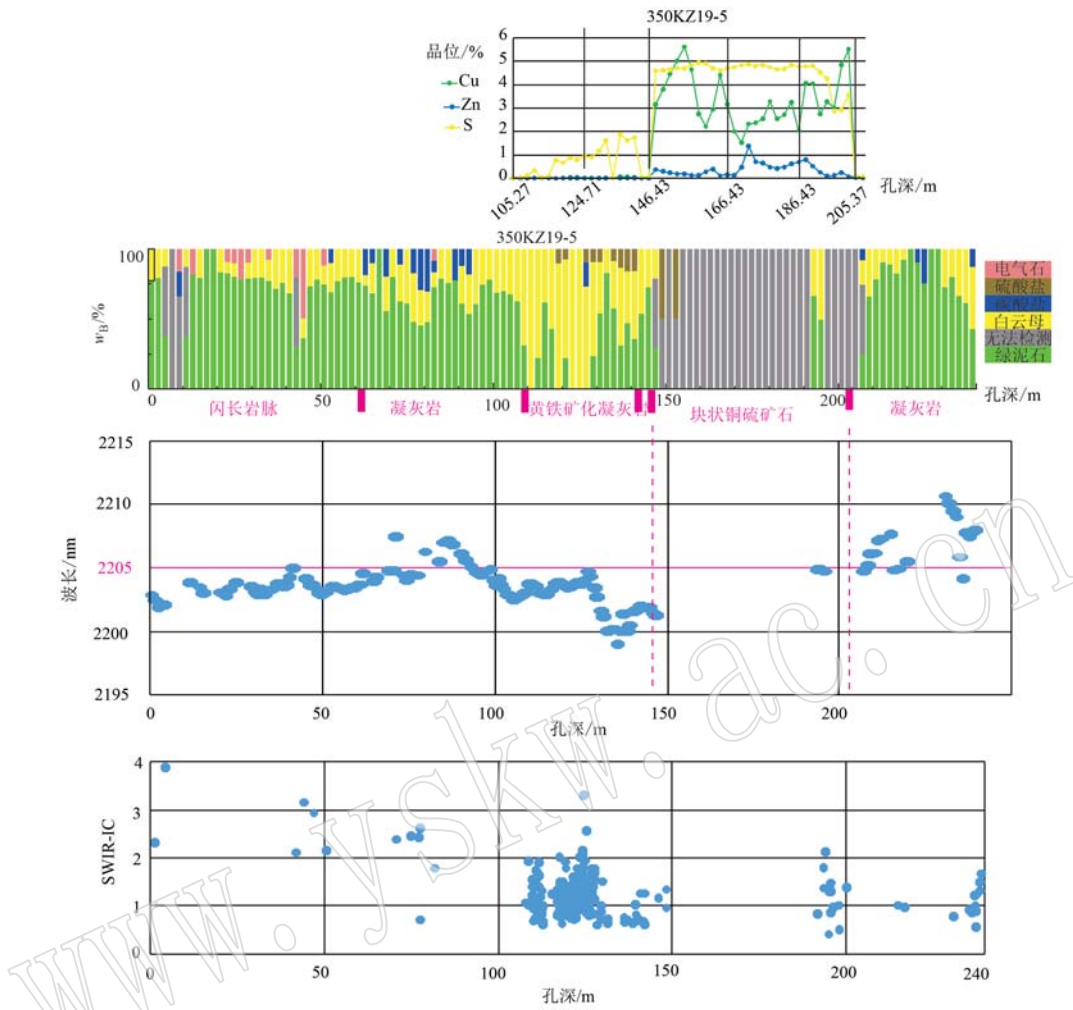


图 8 350KZ19-5 白云母铝羟基吸收峰位及结晶度空间分布规律

Fig. 8 Distribution of Al—OH absorption peak position and crystallinity of muscovite in borehole 350KZ19-5

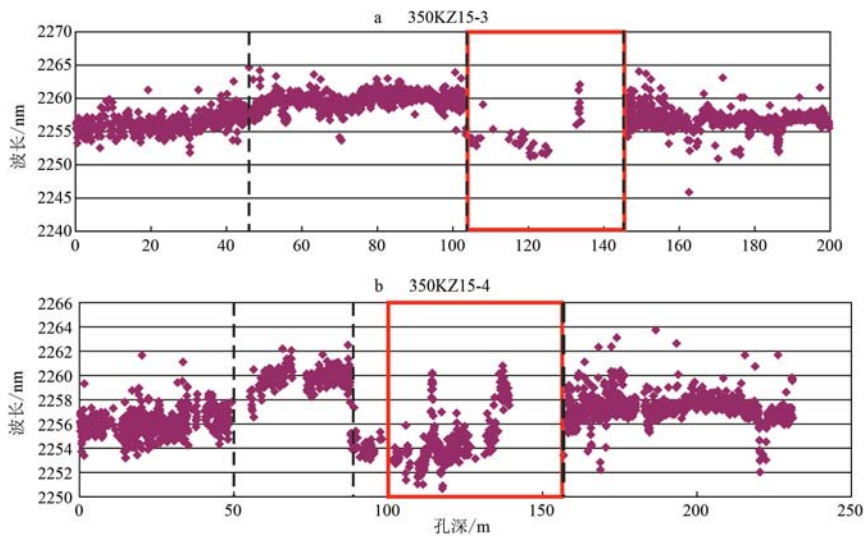


图 9 350KZ15-3(a)、350KZ15-4(b) 绿泥石 Fe—OH 吸收峰位(红色框标注代表矿化体位置)

Fig. 9 Fe—OH absorption peak position of chlorite in borehole 350KZ15-3(a) and 350KZ15-4(b) (the red box indicates the location of mineralization)

吸收峰深度的比值)均具有一定变化范围(表2)。从表2中可知,英安斑岩(2.27~3.11)>玄武岩(2.00)>黄铁矿化凝灰岩(1.12~2.20)>含角砾凝灰岩(0.91~1.63),硫铁矿石(1.03~1.57)>铜锌硫矿石(0.98~1.42)>锌矿石(1.08)>铜矿石(1.00)>低品位锌矿石(0.77)。

表2 钻孔中岩矿石中白云母的结晶度

Table 2 Muscovite crystallinity of rock and ore in boreholes

岩矿石类型	岩矿石名称	SWIR-IC
围岩	英安斑岩	2.27~3.11
	玄武岩	2.00
	黄铁矿化凝灰岩	1.12~2.20
	含角砾凝灰岩	0.91~1.63
矿石	硫铁矿石	1.03~1.57
	铜锌硫矿石	0.98~1.42
	锌矿石($Zn \geq 1.0$)	1.08
	铜矿石	1.00
	低品位锌矿石($0.5 \leq Zn < 1.0$)	0.77

4 讨论

4.1 蚀变矿物(SWIR)勘查标志

通过钻孔SWIR蚀变测试,并结合钻孔二次编录,发现阿舍勒矿区的绿泥石(镁绿泥石、铁镁绿泥石和铁绿泥石)、白云母族(伊利石、白云母和多硅白云母)在空间分布上非常广泛,进一步探索蚀变组合、白云母与绿泥石的蚀变参数在空间上的变化规律,对了解热液的温压环境等有着极其重要的作用。

(1) 蚀变组合标志

在上述5种蚀变组合分带中,黄铁矿化+绢云母化+强硅化蚀变组合和黄铁矿化+绢云母化+硅化蚀变组合对应的矿化最好,具有指示火山喷气沉积矿化发育的重要意义。以350KZ19-5为例,具有与矿化的关系密切的蚀变组合为黄铁矿化+硅化+绢云母化,其蚀变矿物绢云母总体上与绿泥石呈消长关系,推测是由绿泥石退蚀变形成的。黄铁矿化+绢云母化+弱硅化蚀变组合矿化次之,具有一定的找矿意义。黄铁矿化+绿泥石化+弱硅化蚀变组合矿化最弱且少见,仅在深部可见,矿化以脉状分布(图5i)。黄铁矿化+绿泥石化+碳酸盐化蚀变组合主要在矿体的上部玄武岩盖层中,黄铁矿颗粒较大,晶形较好,分布稀疏,与玄武岩共生形成,局部为玄武岩暗色矿物的析出,常常伴随着后期脉状碳酸盐脉,绿泥石化常

呈面状分布,其找矿意义不大。

(2) 白云母的Al—OH特征峰值标志

白云母的Al—OH特征吸收峰值在空间上具有明显的变化规律。从图8可知,矿体的上下盘具有不同吸收峰位:矿体上盘白云母Al—OH吸收峰位小于2205nm或位于2205nm附近,富Al;而矿体下盘白云母Al—OH吸收峰位大于2205nm,发生了 Al^{3+} 被 Na^+ 或 K^+ 取代,贫Al富Na,并且靠近矿体或矿体顶板出现的白云母Al—OH吸收峰位位于2200nm附近,具有富Al、含Na的特征。这些特征与Herrmann等(2001)对澳大利亚的一些块状硫化物矿床的研究结果一致,即在靠近矿体或强蚀变岩石部位,白云母组矿物的2200nm吸收峰位较小;当远离时,则吸收峰变大。从白云母的结晶度看,黄铁矿化绢云母化凝灰岩的白云母结晶度与硫铁矿石、铜硫矿石的白云母结晶度接近,结合岩矿心详细地质编录,发现硅化+黄铁矿化+绢云母化组合与矿化关系最为密切。因此,富Al的钠云母(Al—OH吸收波长小于2205nm,集中于2200nm)可作为找矿标志。

(3) 绿泥石Fe—OH特征峰值标志

350KZ15-3、350KZ15-4钻孔绿泥石的Fe—OH特征显示,靠近矿化体或在矿化体中,绿泥石的Fe—OH吸收峰值出现断崖式下降,由2260nm附近降至2250~2255nm,具富镁特征。通常,从热液系统的中心到边缘,绿泥石的成分通常会发生变化,在接近热液系统中心形成的绿泥石比外带和边缘形成的绿泥石具有较长的Fe—OH波长,即热液系统中心更富铁。一般认为在热液蚀变矿床中,在低氧逸度和低pH值的环境下有利于镁质绿泥石的形成,而在相对还原的环境中则有利于富铁绿泥石的形成(Inoue, 1995)。在绿泥石成分中,若Fe取代Mg,表明其形成于相对酸性的环境中,反之,如果Mg取代Fe,则其形成于相对碱性的环境中(艾永富等, 1998)。因此,从上述特征看,靠近矿化体的绿泥石形成过程中以Mg取代Fe,具富镁特征,其应形成于相对低氧逸度、相对碱性的环境。因此,富镁绿泥石(Fe—OH吸收波长集中于2250nm)可作为有利的找矿标志。

黄铁矿化+绢云母化+强硅化组合和黄铁矿化+绢云母化+硅化组合是该区铜矿蚀变组合找矿标志,同时富铝的钠云母和富镁绿泥石可在该区作为勘查找矿标志。

4.2 矿区深部及外围勘查指示

通过白云母结晶度的系统分析,发现黄铁矿化凝灰岩与铜锌硫矿石中的白云母的结晶度相近,同时在空间上具有一定分布规律,由南到北:8线(IC值0.85)<16线(0.95~1.20)<4线(0.92~1.15)<5

线(1.10~1.26)<9线(0.60~0.90/1.34)<15线(1.01~1.52)<19线(1.23~1.83)<25线(1.70~1.88)。由此可以看出由南到北绢云母 SWIR 结晶度呈逐渐升高的趋势(图 10),表明热液(矿化中心)主要来自于矿区北部。

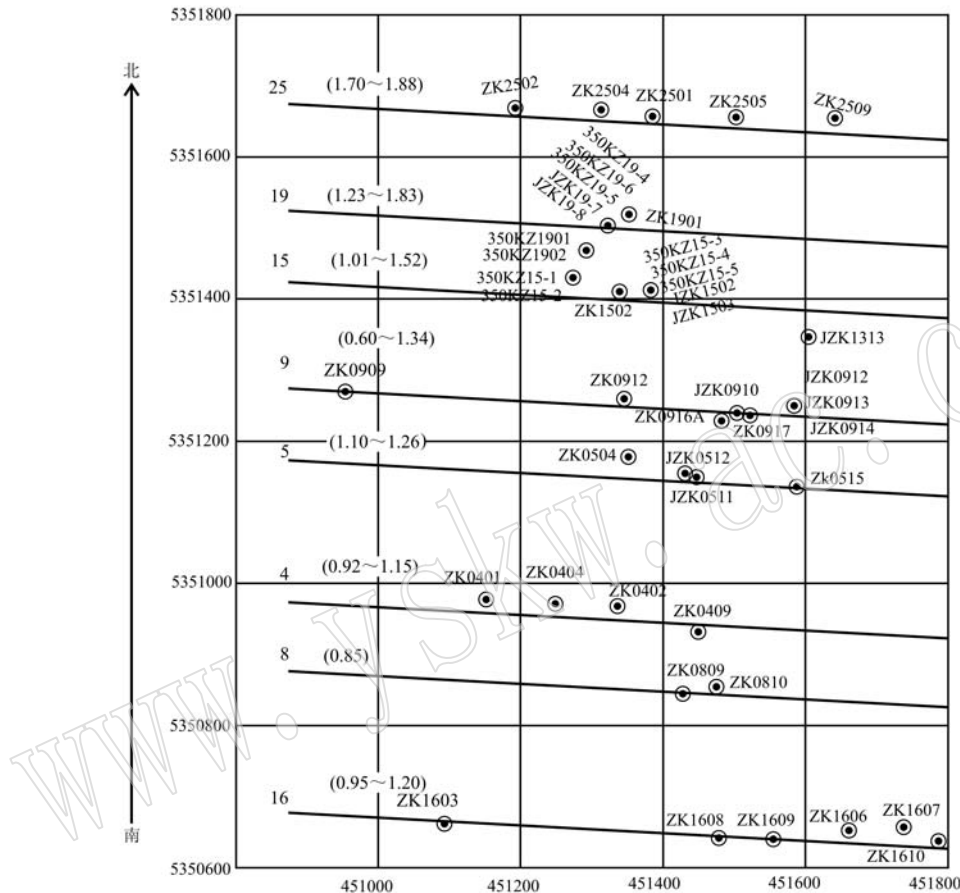


图 10 阿舍勒铜锌矿区白云母结晶度(SWIR-IC)分布示意图

Fig. 10 Distribution diagram of muscovite crystallinity (SWIR-IC) in Ashele Cu-Zn deposit

根据上述矿体特征,矿体呈南北走向,倾向东,并向北侧伏,深部矿石以浸染状、细脉状铜矿石为主,同时在矿区北部的深部硅化+黄铁矿化+绢云母化蚀变组合范围比浅部蚀变范围更广。在矿区 19 线的 ZK2102 孔控制矿体最低标高为-558 m,在矿区北部 29、37 线施工的钻孔,虽然未见有铜矿化(体),但在深部仍见有硅化+黄铁矿化+绢云母化组合。从目前深部勘查结果来看,矿区北部仍具有较大找矿潜力,与白云母 SWIR 结晶度所表明矿化热液中心来自北部相一致,可对深部钻孔进一步细化岩性分类,对不同成因白云母进行识别,同时开展红外光谱技术等相关工作,建立蚀变与矿化找矿模型,为下步矿产勘查提供依据。

5 结论

通过对本区钻孔岩心蚀变参数变化特征的研究,结合地质编录及矿化特征,可以总结如下:

(1) 矿区蚀变矿物组合可划分为 5 种,其中黄铁矿化+绢云母化+强硅化蚀变组合和黄铁矿化+绢云母化+硅化蚀变组合对应的矿化最好。

(2) 矿体在走向和倾向上具有明显的蚀变分带特征,主矿体正常翼和倒转翼的蚀变特征不对称,倒转翼的上盘出现黄铁矿+绢云母+强硅化组合,而正常翼的下盘出现弱黄铁矿+绢云母+硅化组合,前者的蚀变强度和延伸范围比后者更大。

(3)与矿(化)体关系密切的蚀变组合为黄铁矿化+硅化+绢云母化组合,与矿(化)体关系密切的白云母具 Al—OH 吸收峰位小于 2 205 nm,总体具富 Al 的特征;与矿(化)体关系密切的绿泥石具 Fe—OH 吸收峰值集中在 2 250 nm,具富 Mg 特征。

(4)白云母 SWIR 结晶度在矿区由南到北呈逐渐升高的趋势,表明热液(矿化中心)主要来自于矿区北部,矿区北部仍具有较大找矿潜力。

致谢 工作期间始终得到紫金矿业集团股份有限公司矿产地地质勘查院领导的指导和帮助,在此深表感谢。成文过程中,广州地化所陈华勇老师、贵阳地化所吴承泉老师及中国地质科学院杨富全老师给予了指导和帮助,同事林金灿、朱林丰等和阿舍勒铜业股份有限公司肖辉、陈泽粟、刘涛都给予了大力支持,特别是匿名审稿人为本文提出了宝贵的修改建议,使本文得以完善,在此一并致以诚挚的谢意!

References

- Ai Yongfu and Liu Guoping. 1998. Study on Chlorite of Dajing Deposit in Neimeng [J]. Beijing: Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 34(1): 97~105 (in Chinese).
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, *et al.* 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Manokayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines [J]. Economic Geology, 106(8): 1 365~1 398.
- Chang Z and Yang Z. 2012. Evaluation of inter-instrument variations among short wavelength infrared (SWIR) devices [J]. Economic Geology, 107(7): 1 479~1 488.
- Chen Huayong, Zhang Shitao, Chu Gaobin, *et al.* 2019. 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, 35(12): 3 629~3 643 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Ye Qingtong, Feng jing, *et al.* 1996. Metallogenic Conditions and Metallogenic Prediction of Ashele Copper-Zinc Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~330 (in Chinese).
- Clark R N, King T V V, Klejwa M, *et al.* 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals [J]. Journal of Geophysical Research, 95(B8): 12 653~12 680.
- Dai Qianqian. 2009. Application and Study on SWIR Spectroscopy in the Jin Qingding Golden Deposit, Rushan, China [D]. Beijing: China University of Geosciences for Master Degree, 1~66 (in Chinese).
- Feng Jing and Xu Shiqi. 2012. Synthesized prospecting prediction model of Ashele copper-zinc deposit [J]. Xinjiang Geology, 30(4): 418~424 (in Chinese with English abstract).
- Herrmann W, Blake M, Doyle M, *et al.* 2001. Short wavelength infra-red (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland [J]. Economic Geology, 96: 939~955.
- Huang Jianhan, Chen Huayong, Han Jinsheng, *et al.* 2016. Spatial and temporal characteristics of mineralization and alteration zonation of the Honghai VMS Cu-Zn deposit in the Kalatag District, East Tianshan, NW China [J]. Geochimica, 45(6): 582~600 (in Chinese with English abstract).
- Inoue A. 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments [A]. Velde B. Origin and Mineralogy of Clays: Clay and the Environment [C]. Berlin: Springer, 268~330.
- Li Huaqin, Xie Caifu, Chang Hailiang, *et al.* 1998. Metallogenic and Geochronology of Nonferrous-Precious Metals Deposits in Northern XinJiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~264 (in Chinese).
- Lian Yunchang, Zhang Ge and Yuan Chunhua. 2005. Application of SWIR reflectance spectroscopy to Pulang porphyry copper ore district, Yunnan Province [J]. Mineral Deposits, 24(6): 621~637 (in Chinese with English abstract).
- Meng Yaping, Du Peijun, Li Erzhu, *et al.* 2017. Data preprocessing methods of domestic core spectral scanner MS350A [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 29(4): 73~81 (in Chinese with English abstract).
- 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 [J]. Journal of Geochemical Exploration, 184: 179~198.
- Niu Hecai, Yu Xueyuan, Xu Jifeng, *et al.* 2006. Late Paleozoic Volcanism and Mineralization in Aletai, Xinjiang, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~184 (in Chinese).
- Peng Zidong, Shen Junfeng, Cao Weidong, *et al.* 2016. The application of near-infrared spectroscopy to identify altered minerals and its implications for geologic prospecting: A case study of the Gangcha gold deposit in Gansu Province [J]. Geological Bulletin of China, 35(5): 824~830 (in Chinese with English abstract).
- Tian Feng, Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, *et al.* 2019. Application of short wavelength infrared technique in exploration of mineral

- deposits: A review[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(3): 634~642(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 1996. Sulfur and lead isotopic geochemistry of the Ashele volcanogenic massive sulfide deposit, Xinjiang, China[J]. *GeoChimica*, 25(6): 582~590(in Chinese with English abstract).
- Xu Chao, Zhou Taofa, Chen Huayong, *et al.* 2014. Application on SWIR spectroscopy in the Sawuerkuoerzhenkuola gold-copper deposit in Xinjiang[A]. *Annual Meeting of China Geoscience Association* [C]. 1 873~1 875(in Chinese).
- Yang Fuquan, Li Fengming, Qin Jihua, *et al.* 2013. LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of zircons from volcanic rocks and subvolcanic intrusions in Ashele Cu-Zn ore district, Xinjiang, and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 32(5): 869~883(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Li Fengming, Wu Yufeng, *et al.* 2015. The Ashele Cu-Zn Deposit in Aletai, Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~257(in Chinese).
- Yang Fuquan, Wu Yufeng, Yang Junjie, *et al.* 2016. Metallogenetic model for VMS type polymetallic copper deposits in the Ashele ore dense district of Altay, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 701~715(in Chinese with English abstract).
- 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 Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *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[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 699~717(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yi, Li Dengfeng, Zhang Li, *et al.* 2015. A preliminary study on the ore metal remobilization of the Ashele VMS Cu-Zn deposit, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(3): 542~553(in Chinese with English abstract).
- 陈毓川, 叶庆同, 冯京, 等. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1~330.
- 戴倩倩. 2009. 短波红外光谱技术在山东乳山金矿的应用和分析研究[D]. 北京: 中国地质大学硕士论文, 1~66.
- 冯京, 徐仕琪. 2012. 阿舍勒铜锌矿综合找矿预测模型[J]. *新疆地质*, 30(4): 418~424.
- 黄建瀚, 陈华勇, 韩金生, 等. 2016. 新疆东天山卡拉塔格红海 VMS 铜锌矿床蚀变与矿化时空分布特征[J]. *地球化学*, 45(6): 582~600.
- 李华芹, 谢才富, 常海亮, 等. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社, 1~264.
- 连云长, 章革, 元春华. 2005. 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*, 24(6): 621~637.
- 蒙亚平, 杜培军, 李二珠, 等. 2017. 国产岩石光谱扫描仪 CMS350A 数据预处理技术[J]. *国土资源遥感*, 29(4): 73~81.
- 牛贺才, 于学元, 许继峰, 等. 2006. 中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1~184.
- 彭自栋, 申俊峰, 曹卫东, 等. 2016. 蚀变矿物近红外光谱特征对地质找矿的指示意义——以甘肃岗岔金矿为例[J]. *地质通报*, 35(5): 824~830.
- 田丰, 冷成彪, 张兴春, 等. 2019. 短波红外光谱技术在矿床勘查中的应用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 38(3): 634~642.
- 王登红. 1996. 新疆阿舍勒火山岩型块状硫化物铜矿硫、铅同位素地球化学[J]. *地球化学*, 25(6): 582~590.
- 许超, 周涛发, 陈华勇, 等. 2014. 短波红外光谱技术(SWIR)在新疆萨吾尔阔尔真阔腊金(铜)矿床中的应用[A]. *中国地球科学联合学术年会*[C]. 1 873~1 875.
- 杨富全, 李凤鸣, 秦纪华, 等. 2013. 新疆阿舍勒铜锌矿区(潜)火山岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 32(5): 869~883.
- 杨富全, 李凤鸣, 吴玉峰, 等. 2015. 新疆阿尔泰阿舍勒铜锌矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1~257.
- 杨富全, 吴玉峰, 杨俊杰, 等. 2016. 新疆阿尔泰阿舍勒矿集区铜多金属矿床模型[J]. *大地构造与成矿学*, 40(4): 701~715.
- 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.
- 郑义, 李登峰, 张莉, 等. 2015. 新疆阿舍勒 VMS 型铜锌矿床元素活化富集作用初步研究[J]. *大地构造与成矿学*, 39(3): 542~553.

附中文参考文献

- 艾永富, 刘国平. 1998. 内蒙大井矿床的绿泥石研究[J]. 北京: 北京大学学报(自然科学版), 34(1): 97~105.
- 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): 3 629~3 643.