

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

连长云¹ 章 革² 元春华¹ 杨 凯³

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083;
3. 澳大利亚 CSIRO 勘探与采矿部, NSW 1670)

摘要:便携式短波红外光谱仪(PIMA)是利用短波红外光谱测量技术,对肉眼难以识别的层状硅酸盐、粘土、碳酸盐以及部分硫酸盐矿物进行快速识别的实用仪器。通过不同地质环境的光谱参考数据库及计算机数据处理软件,辅之野外观察和必要的岩石学分析,可以从 PIMA 测量获得的谱线中得出研究区蚀变矿物组合的信息。应用蚀变矿物组合,结合其他勘探数据,有利于确定钻孔的位置,指导区域勘探工作。PIMA 可应用于许多成矿环境中,包括高硫化物、低硫化物热液成矿系统、斑岩成矿系统、中温热液成矿系统、沉积岩中的金-铜矿床、铀矿床、火山成因块状硫化物矿床和金伯利岩矿床。已有的研究表明,PIMA 可以快速获得和处理短波红外光谱数据并形成蚀变矿物钻孔柱状分布图或平面分布图,这些信息对找矿靶区的确定至关重要。应用 PIMA 在新疆土屋斑岩铜矿区开展了系统的蚀变矿物填图工作,有效地识别出镁绿泥石、铁绿泥石、蒙脱石、白云母、黑云母等蚀变矿物,这些蚀变矿物的类型和丰度与岩石鉴定结果基本一致。在此基础上,建立了土屋斑岩铜矿区蚀变矿物组合及其分带模式,并与传统的分带模式进行了对比。最后总结了土屋斑岩铜矿区 PIMA 找矿模型,该模型对土屋斑岩铜矿区及未知地区矿产勘查工作具有指导意义。

关键词:短波红外光谱矿物测量技术;PIMA;蚀变矿物;土屋

中图分类号:P622⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2005)03-0483-13

短波红外(SWIR)光谱矿物测量技术是近年来发展起来并逐步成熟的一种应用于光谱矿物测量的遥感技术,它由高光谱遥感技术发展而来。高光谱遥感(Hyperspectral Remote Sensing)是指利用很多很窄的电磁波波段从感兴趣的物体获取有关数据的一种技术。它的基础是波谱学(Spectroscopy)。波谱学早在 20 世纪初就被用于识别分子和原子结构^[1]。20 世纪 80 年代开始建立成像光谱学(Imaging Spectroscopy),它可以在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和中红外区域获取许多非常窄且连续的图像数据。

目前,技术上可行并常用的高光谱技术可以探测的波长区间大致为 0.4~2.5 μm ,包括了整个可见光区(0.4~0.7 μm)和习惯上所称的近红外(0.7~1.1 μm)与短波红外区(1.1~2.5 μm)。在该波长范围内,地表的植物主要体现在可见光区,而岩石中的含水或含氢氧根的矿物(主要为层状硅酸盐和粘土类)

以及硫酸盐和碳酸盐矿物则在短波红外区有特殊显示。这些矿物大多见于与金属矿床有关的热液蚀变带,故可用于指示热液成矿体系的环境参数,提供找矿线索并指导找矿。

短波红外光谱矿物测量采用的波长范围为 1300~2500 nm,即大致位于短波红外区。利用这一波长范围开展的光谱矿物测量技术称之为短波红外(SWIR)光谱矿物测量技术。目前,这种技术已经成型并走向商业化,其中澳大利亚生产的便携式短波红外光谱矿物测量仪(Portable Infrared Mineral Analyzer,以下简称 PIMA)为其典型代表。

20 世纪 90 年代以来,PIMA 已广泛地应用于矿产勘查领域,特别是澳大利亚、美国、加拿大、南非、智利和欧洲的许多矿业公司,已将 PIMA 测量作为一种常用的勘查手段。通过对矿物种类、丰度和成分的识别,特别是与成矿作用密切相关的蚀变矿物的识别,PIMA 测量可有效地圈定热液矿化

收稿日期:2004-09-02;改回日期:2005-03-26

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(200210000006)资助。

作者简介:连长云,男,1965年生,博士,副研究员,从事地球化学勘查和矿产资源评价工作;E-mail:lchangyun@mail.cgs.gov.cn。

蚀变带,定量或半定量估计相对蚀变强度和蚀变矿物含量,给出成矿作用规模和强度的有益认识^[2-6]。在辅助勘查决策方面,PIMA 测量也能获得独特的效果。

2002年,笔者首次利用 PIMA SP 在新疆土屋斑岩铜矿区开展试验工作,取得了很好的效果。

1 PIMA SP 简介

PIMA SP 是由澳大利亚 Integrated Spectronics Pty Ltd 公司生产的一种短波红外反射光谱分析仪,它的波长范围为 1300~250 nm;光谱分辨率 7~10 nm;光谱取样间距 2 nm;信噪比 1/3500~1/4500;对于样品和参考物有 32 个识别级别,测量速度 10 s~6 min。

PIMA SP 具有很多优点,主要包括:仪器轻便、测试速度快、无须制样、测量样品类型多样、不需要单独光源和成本低廉等特点。

PIMA SP 的工作原理是,利用短波红外光照射被测样品,并接收矿物的特征吸收光谱,通过所获的光谱曲线与标准曲线对比,反演被测样品蚀变矿物信息。具体而言,由于包括羟基、水、碳酸盐以及 Al-OH、Mg-OH 和 Fe-OH 等分子键的矿物对短波红外光十分敏感,当短波红外光照射到这些矿物表面时,就会产生特征的吸收光谱。包含上述分子键的矿物主要有:层状硅酸盐(粘土、绿泥石和蛇纹状矿物)、羟基化硅酸盐(绿帘石和闪石)、硫酸盐(明矾石、黄钾铁矾和石膏)及碳酸盐。因此,PIMA SP 测量的主要是上述几类蚀变矿物。

2 土屋斑岩铜矿区地质矿产特征^[7-13]

土屋斑岩铜矿区位于哈密市西南 210°方向约 80 km 处,行政区划属新疆哈密市管辖。

2.1 区域地质特征

土屋斑岩铜矿床位于塔里木板块与准噶尔板块碰撞对接拼合带的北侧,即准噶尔板块最南缘的石炭纪增生拼贴岛弧带中,南距板块边缘断裂——康古尔塔格深大断裂仅 1~3 km。土屋斑岩铜(钼)矿床的形成与两大板块的碰撞对接存在着时间和空间上的联系(图 1)。

工作区及其外围出露的地层有下泥盆统大南湖组、中泥盆统头苏泉组、上—下石炭统企鹅山群、梧桐窝子组,上石炭统干墩组,中侏罗统西山窑组及古近—新近系、第四系。古生代地层以康古尔塔格断裂为界分为两部分:断裂以北为大南湖组、头苏泉组和企鹅山群,均由钙碱性岛弧型火山岩及内源碎屑岩组成(陆相—海相);断裂以南为梧桐窝子组、干墩组,由海沟—残洋盆地相快速堆积碎屑岩、非完整序列蛇绿岩套及崩坍岩块组成,该系列岩石组合及构造形迹基本反映了北天山残洋逐渐消失以及两大板块最终实现碰撞闭合的全过程。

区内侵入岩较发育,岩石类型齐全,正常系列的基性到酸性岩均有出露,以偏酸性深成侵入岩为主。大草滩断裂以北的泥盆纪地层中发育晚泥盆纪—石炭纪侵入岩,呈面形展

布;大草滩断裂与康古尔塔格断裂之间的企鹅山地层中发育晚石炭纪—早二叠纪花岗岩,与地层同构造线方向;康古尔塔格断裂以南侵入岩欠发育,仅有少量花岗岩沿断裂侵入。此外,在大南湖组、头苏泉组和企鹅山群中,还大量发育中酸性浅成岩和次火山岩体,该类岩体在本区常常是寻找斑岩型铜矿床的目标地质体。

关于本区构造,以康古尔塔格深大断裂为界,以北属哈尔里克古生代岛弧带,以南为秋格明塔什—黄山海沟系。次级构造单元有彩霞山早古生代残余岛弧(红岭西北部)、大南湖泥盆纪岛弧、企鹅山石炭纪岛弧、梧桐窝子石炭纪蛇绿构造混杂带和干墩残洋盆地。

2.2 矿床地质特征

土屋斑岩铜矿床主要产在侵位于企鹅山群第二组第一岩性段的闪长玢岩中,及其稍晚的部分脉状斜长花岗斑岩中,地表出露于岩体北部,北侧围岩为灰绿色含砾岩屑砂岩,南侧岩石为玄武岩。

地表以 0.20% 为边界品位圈定铜矿(化)体长 1400 m,最大宽 124 m,铜平均品位 0.43%。以 0.50% 为边界圈定矿体连续长 900 m,平均宽 25.46 m。0~7 线间沿倾向已控制矿体斜深 500 m。

矿石品位一般在 0.30%~1.50% 之间,以 0.50% 为边界计算的铜平均品位 0.72%,伴生金品位 0.16×10^{-6} 、银 2.97×10^{-6} 。在走向上自 0 线至 31 线铜品位逐渐降低,剖面上的相对高品位矿体主要分布在地表至 -400 m 埋深之间。

矿石金属矿物以黄铜矿、黄铁矿为主,偶见少量斑铜矿、铜蓝和辉钼矿。黄铁矿主要发育在矿体顶底板,与铜矿物成负相关关系,在主矿体中基本无黄铁矿存在。

矿石结构属中—细粒半自形至他形粒状结构。矿石构造在斜长花岗斑岩铜矿石中以浸染状为主,表现为中粗粒黄铜矿(或集合体)较均匀分布于呈大脉状侵位的斜长花岗斑岩中,所占比例不高;主矿体是碎裂状闪长玢岩中大量发育与石英脉共存(同期)的浸染状、细脉状甚至团块状黄铜矿,局部还发育浸染状斑铜矿。

矿石类型按矿石构造不同可划分为浸染状和细脉浸染状两种铜矿石,同属斑岩型成因类型。

矿体赋存在闪长玢岩体的中、底部,其间穿插少量斜长花岗斑岩。矿体直接底板主要为角砾状沉凝灰岩、含砾砂岩和后期侵位的闪长玢岩,底板岩石多呈隐爆角砾状,发育黄铁矿碳酸盐脉。矿体顶板为同期同成分闪长玢岩,与矿体呈渐变过渡关系,亦发育同成分隐爆角砾岩。

3 工作方法

PIMA 测量工作包括野外样品的采集、现场测量和数据处理与解译 3 个密切相关的环节。

3.1 样品采集

尽管 PIMA 测量可以采用多种多样的介质,但根据本次

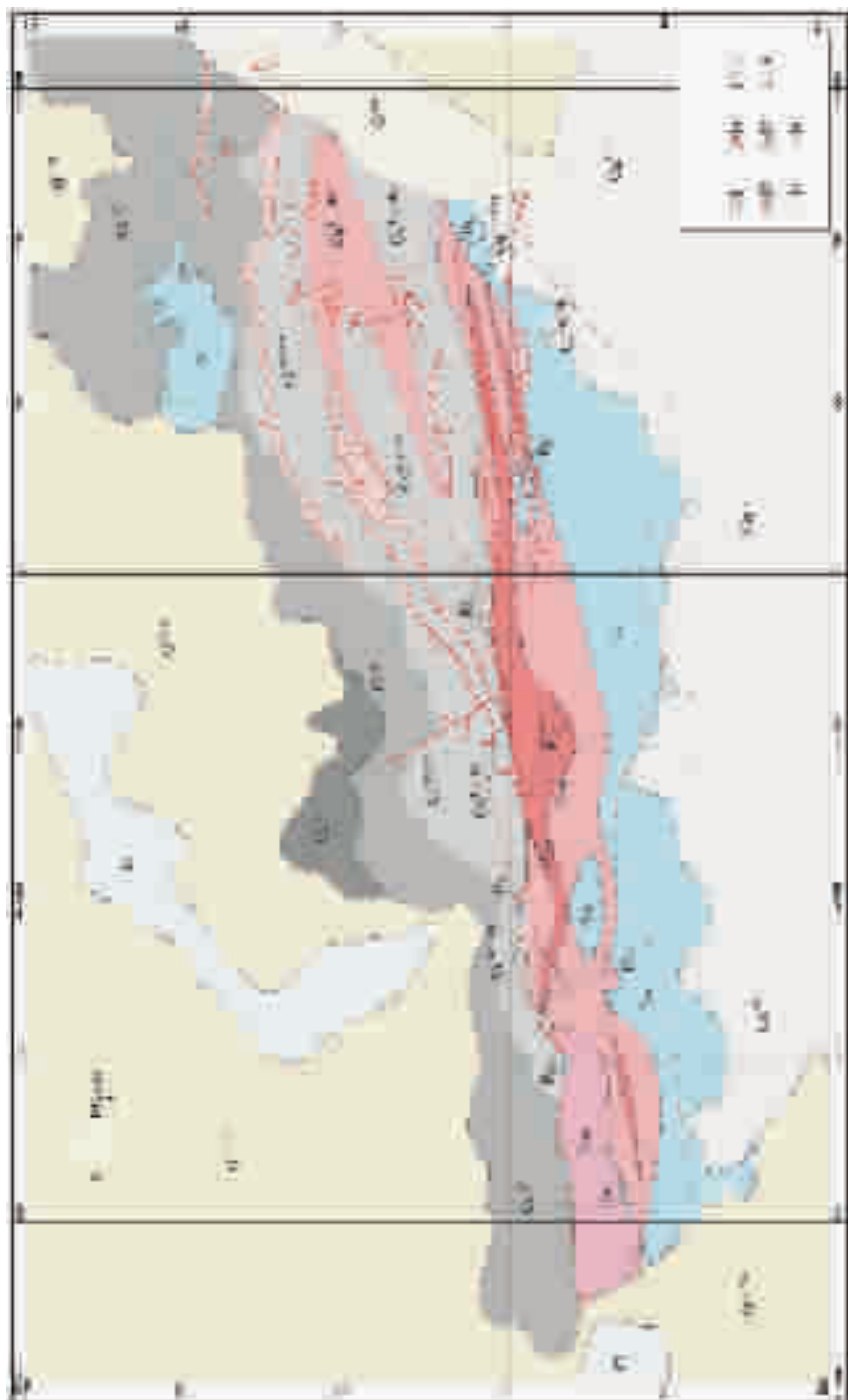


图 1 土屋斑岩铜矿床地质图(据姜立丰等●修改)

Q^{pld}—第四纪冲洪积物;Q^{ml}—第四纪冲洪积物;Jx—侏罗纪西山窑组泥岩、粉砂岩,含铁质结核;Cq^{5b}—石炭纪企鹅山群第五层:灰绿色含杏仁玄武岩夹紫红色安山岩、角砾熔岩;Cq^{4cqb}—石炭纪企鹅山群第四层:灰绿色、浅白色含砾岩屑砂岩夹复成分砾岩、岩屑砂岩、凝灰岩、玄武岩、安山岩、英安岩;Cq^{3a}—石炭纪企鹅山群第三层:安山岩;Cq^{3b}—石炭纪企鹅山群第三层:灰绿色含杏仁玄武岩;Pδμ—二叠纪闪长花岗岩(体);Pγoπ—二叠纪斜长花岗岩(体);1—铜矿体(0.2×10²~0.7×10²);2—铜矿体(>0.7×10²);3—地质界线;4—破碎蚀变带及编号;5—断裂及编号;6—推测断裂;7—孔雀石化边界\孔雀石化符号;8—褐铁矿化边界\褐铁矿化符号

Fig.1 Geological map of the Tuwu Cu deposits

Q^{pld}—Quaternary alluvium-diluvium-and slope wash; Q^{ml}—Quaternary alluvium-diluvium; Jx—Jurassic Xishanyao Formation mudstone, siltstone and iron nodules; Cq^{5b}—Bed 5 of the Carboniferous Qi'e Mountain Group; grayish green amygdaloidal basalt with purplish red andesite and breccia lava; Cq^{4cqb}—Bed 4 of the Carboniferous Qi'e Mountain Group; grayish green, light white-grayish white pebbly lithic sandstone with pyritic; sandstone and conglomerate, lithic sandstone, sedimentary tuff, basalt, andesite and dacite; Cq^{3a}—Bed 3 of the Carboniferous Qi'e Mountain Group; andesite; Cq^{3b}— Bed 3 of the Carboniferous Qi'e Mountain Group; grayish green amygdaloidal basalt; Pδμ—Permian diorite porphyry; Pγoπ—Permian plagiogranite porphyry; 1—copper ore body (0.2×10²~0.7×10²); 2—copper ore body (>0.7×10²); 3—Geological boundary grayish green amygdaloidal basalt with purplish red; 4—Fractured alteration zone and number; 5—Fault and number; 6—Inferred fault; 7—Malachitization border symbol; 8—Limonitization border\ limonitization symbol

① 姜立丰,等.新疆哈密市土屋—延东及其外围以铜为主的资源综合评价项目设计,2002.

工作的性质,均采集岩(矿)石样品进行测量。采样原则是,沿已有的勘探线剖面,以一定点距(一般 5m 点距,在蚀变较强地区可加密至 1~2m)进行,地表和剖面测量分别以探槽和钻孔岩心为对象。另一个原则是,尽量使所采样品具有代表性。

土屋斑岩铜矿区共采集了 10 个钻孔的岩心样品和 13 条探槽的地表岩石样品。10 个钻孔分别是 0 线的 ZK002, ZK003, ZK004, ZK005; 7 线的 ZK701, ZK702, ZK703, ZK705; 15 线的 ZK1501 和 31 线的 ZK3101。共采集岩心样品 1293 件。

地表样品的采集在探槽上进行,这些探槽分别是 TC39、TC35、TC31、TC25、TC19、TC13、TC09、TC05、TC01、TC02、TC08、TC12 和 TC16。共采集样品 724 件。

3.2 现场测量

野外采集的绝大多数样品均在野外驻地现场测量,部分样品在采样现场测量。测量时,首先对样品进行编号,然后开始测量。对一块样品,一般测试 3 个数据,以使结果具有较好的代表性。

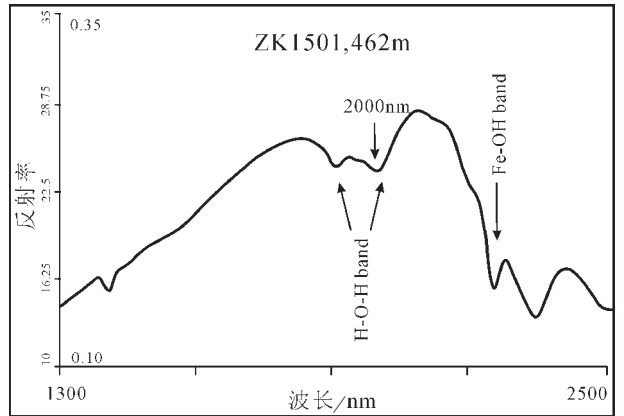


图 2 ZK1501 中以绿泥石为主的样品的反射光谱特征
Fig.2 SWIR reflectance spectrum of chlorite-dominated samples from ZK1501

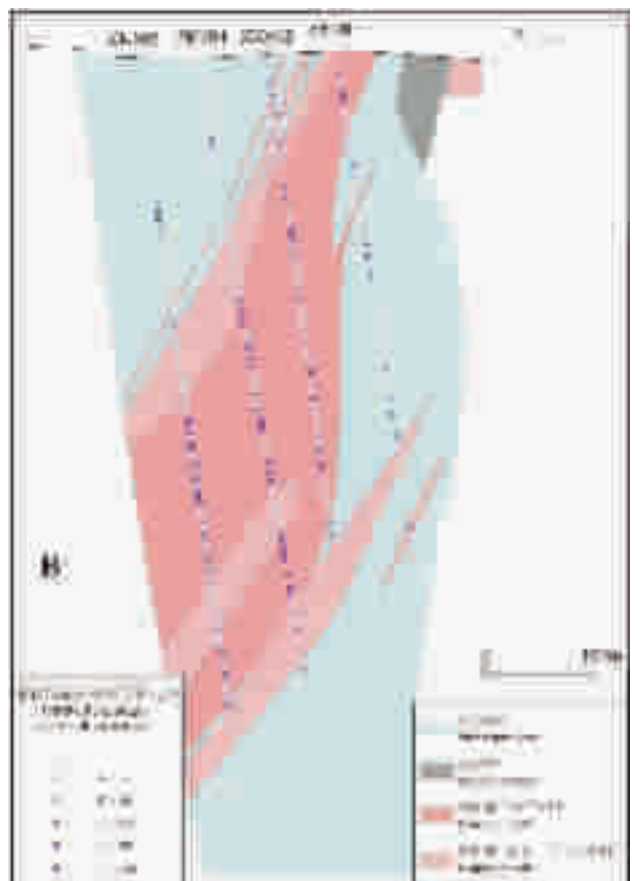
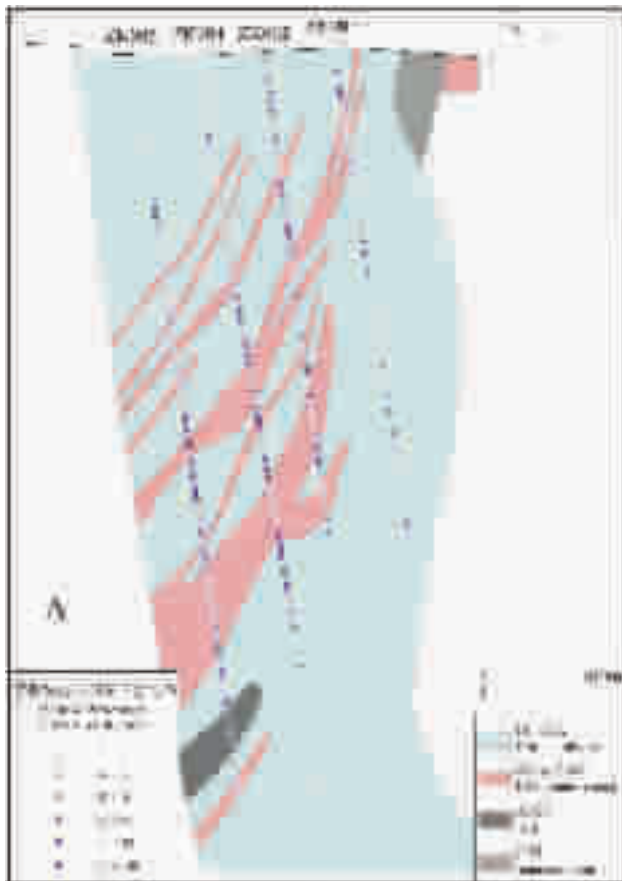


图 3 土屋斑岩铜矿区 0 线剖面识别出的富铁绿泥石分布

A-侵入体剖面分布;B-矿体剖面分布

Fig.3 Distribution of Fe-rich chlorite recognized at cross-section 0, Tuwu Cu prospect

A-Intrusion section;B-orebody section

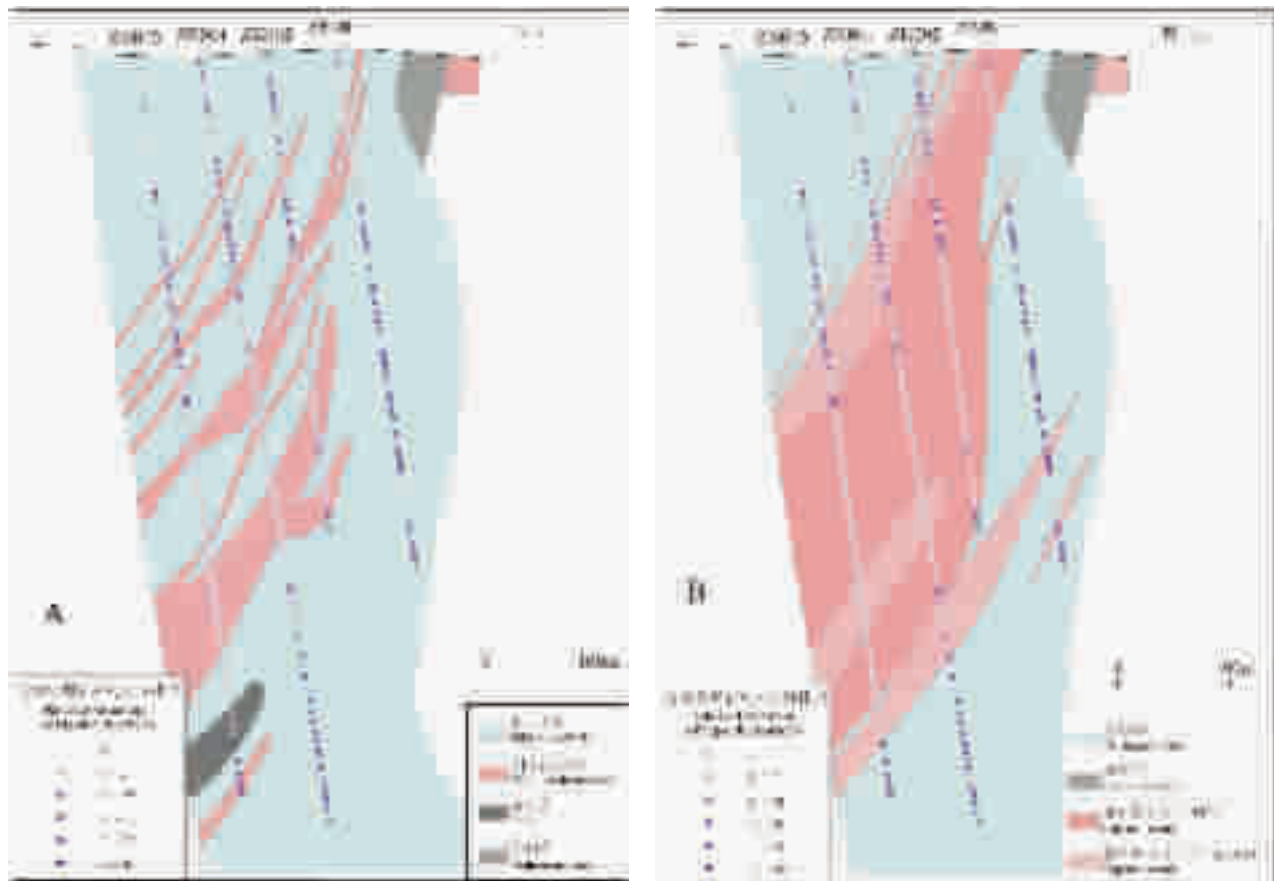


图 4 土屋斑岩铜矿区 0 线剖面识别出的富镁绿泥石分布

A—侵入体剖面分布;B—矿体剖面分布

Fig.4 Distribution of Mg-rich chlorite at cross-section 0, Tuwu Cu prospect

A—Intrusion section;B—orebody section

3.3 数据处理与解译

PIMA 测量获得的是岩矿石样品的光谱曲线。如何将光谱曲线解译为对应的蚀变矿物,是数据处理与解译工作的主要任务。PIMA 仪内储存了大量的蚀变矿物标型谱线,因此,将测量获得的光谱曲线与蚀变矿物标型谱线比对,即可获得所测样品的蚀变矿物种类。

蚀变矿物识别是在 PimaView 3.1 软件支持下自动进行的,同时参考矿物特征的吸收谱线。PimaView 3.1 是 PIMA SP 自带的光谱解译软件。它基于 Windows 95/98/NT 平台,能够方便地对仪器测得的光谱进行查看、分析、绘图及打印。对识别出的蚀变矿物,可将其投影到矿区平面地质图和剖面地质图上。根据蚀变矿物或其组合的空间分布特征,及其与矿区岩石、构造、矿体的对应关系,可分析蚀变作用产生的地质环境,总结蚀变与矿化间的经验规律。

4 结果与解释

4.1 蚀变矿物种类

光谱测量结果表明,土屋斑岩铜矿区探槽中共有 21 种

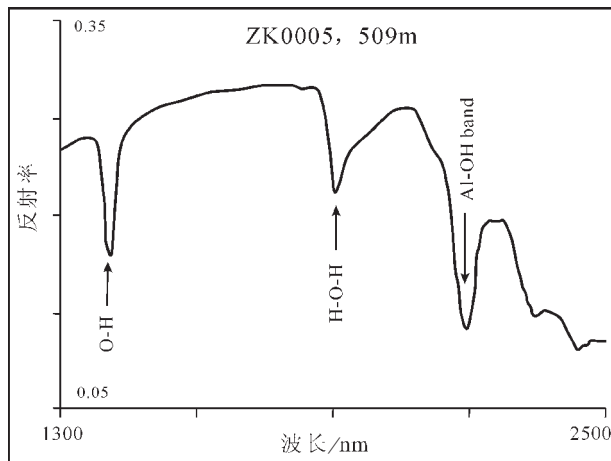


图 5 ZK702 中以白云母为主的样品的反射光谱特征

Fig.5 SWIR reflectance spectrum of muscovite-dominated samples from ZK702

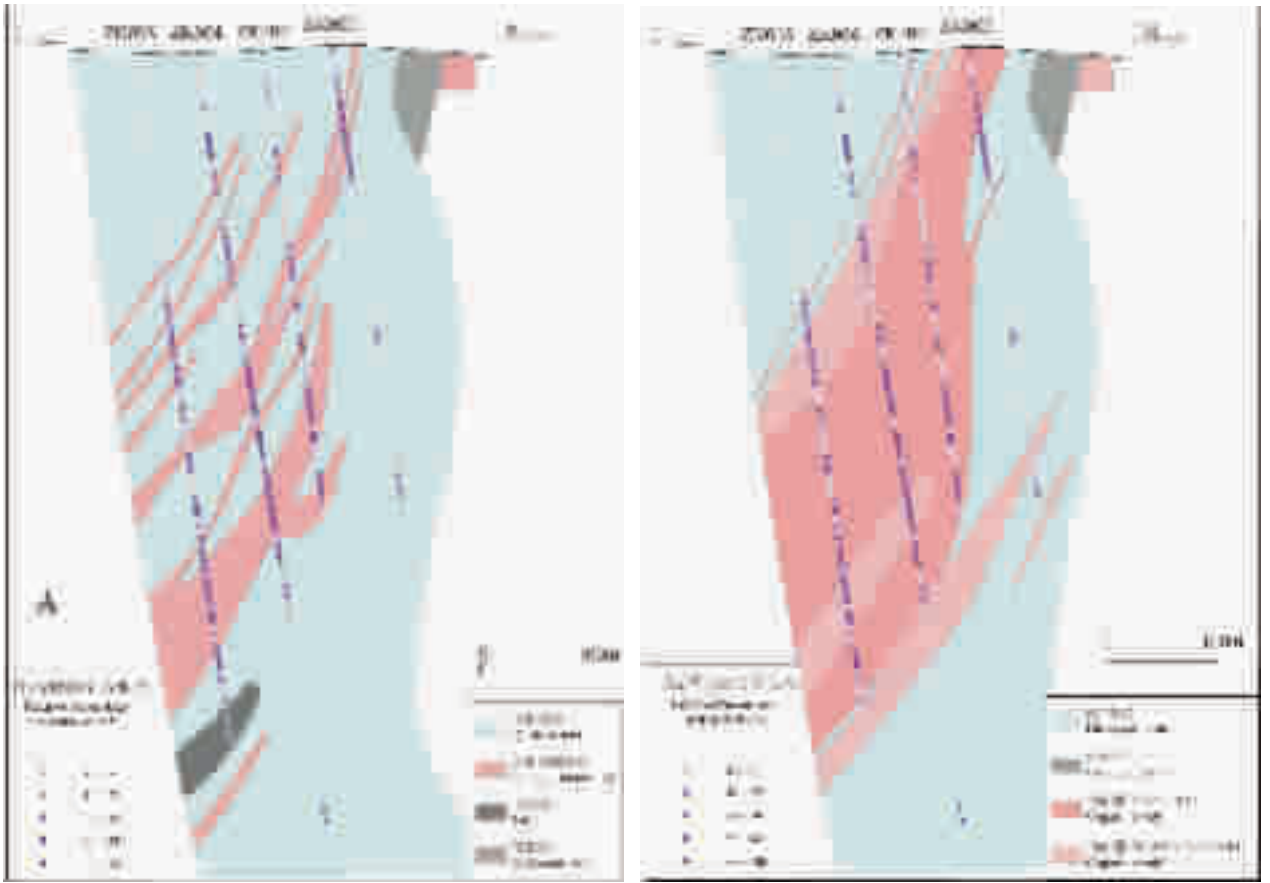


图 6 土屋斑岩铜矿区 0 线剖面识别出的白云母分布

A—侵入体剖面分布;B—矿体剖面分布

Fig.6 Distribution of muscovite at cross-section 0, Tuwu Cu prospect

A—Intrusion section;B—orebody section

蚀变矿物分布。按出现多少顺序,分别为白云母、铁镁绿泥石、多水高岭石、蒙脱石、伊利石、高岭石、硬石膏、镁绿泥石、铁绿泥石、绿脱石、方解石、多硅白云母、石膏、绿帘石、电气石、文石、白云石、菱铁矿、阳起石、明矾石和黄钾铁矾。

钻孔中识别出的蚀变矿物与探槽类似。按出现多少顺序,分别是伊利石、镁绿泥石、铁镁绿泥石、白云母、蒙脱石、铁绿泥石、多水高岭石、硬石膏、多硅白云母、方解石、绿帘石、文石、石膏、阳起石、绿脱石、菱铁矿、水铝石和黑云母。

4.2 蚀变矿物的分布

4.2.1 绿泥石

绿泥石是土屋斑岩铜矿热液系统中分布最广的蚀变矿物,它广泛地分布在整個蚀变系统中,尽管其含量从系统的中间到边缘有所变化。

绿泥石在短波红外光谱范围是可以直接识别的,Fe—OH 的吸收谷靠近 2250~2260nm,另一个次一级的 H—O—H 的吸收谷靠近 2000nm(图 2)。

识别出绿泥石成分上从富铁绿泥石到富镁绿泥石变化,具体取决于绿泥石光谱中 Fe—OH 吸收谷的位置,大体上是随着 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,富铁绿泥石的吸收谷一般在 2265 nm,而富镁绿泥石的吸收谷一般在 2250 nm(Scott et al.,1998)。但大多数情况下,富铁绿泥石的吸收谷在 2260~2265 nm,而铁镁绿泥石的吸收谷在 2255~2260 nm。

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,即更富铁。换言之,铁绿泥石主要分布在斜长花岗斑岩和矿体上,而镁绿泥石则主要分布在花岗斑岩体和矿体的上下盘,这一特征在 0 线剖面看得很清楚(图 3~4)。显然,利用这一特征,可以有效地指示岩体或矿体展布范围,为勘查工作部署提供积极的指导。

4.2.2 白云母

白云母实际上是一个泛泛的术语,它是指分子式为(K,

$(\text{Na})_2(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})_4(\text{Si}, \text{Al})_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ 的一组层状硅酸岩。该组矿物最常见的种类(或端元矿物)是白云母、钠云母和多硅白云母。本文中绢云母具有与白云母相同的含义。

观察到的白云母族矿物的 Al-OH 的波长范围从 2190 nm 变化到 2225 nm。这一现象表明,白云母的成分从钠云母(富 Al、含 Na, Al-OH 位于 2190 nm)变化至白云母(富 K 和 Al, Al-OH 位于 2200 nm),再至多硅白云母(贫 Al、富 Mg 或 Fe, Al-OH 位于 2225 nm 附近)(图 5)。

白云母似乎倾向于形成在斑岩体和角砾岩带内及其附近(如 ZK705、ZK005),这反映了白云母主要形成于热液系统的主流体通道内及其附近的特点。在矿区东部,大量出现的白云母可能与原岩成分有关。从地表看,白云母与岩石的专属性不强,但在剖面上,白云母主要出现在斜长花岗斑岩体的上方,在斑岩体的上下盘出露较少。

从 0 线剖面(图 6)白云母与斜长花岗斑岩体及矿体的空间分布关系可以看出,白云母与斜长花岗斑岩体空间关系密切。因此有理由认为,白云母(以钠云母为主)可以作为斑岩体以及与之有关的矿化作用存在的指示。

4.2.3 黑云母

黑云母是与斑岩铜矿化有关的钾质蚀变的指示,本次工作中仅在 0 线和 7 线的部分钻孔中识别出极少量的黑云母(图 7~8)。

在短波红外区,黑云母和绿泥石的光谱特征十分相似,因此,共存的绿泥石可能使含量很少的黑云母很难被识别出来。当然,如果样品中以黑云母为主时,黑云母是很容易识别的。

本次测量的大多数样品中,黑云母并非主要的层状硅酸盐矿物,即使在以前定义的黑云母蚀变带(钾化)中的样品,其光谱测量结果也是如此。

4.2.4 蒙脱石

在土屋矿区,蒙脱石是识别出来的主要的蒙脱石族矿物。它的最主要的光谱特征是,在 2200 nm、1900 nm 和 1400 nm 分别存在 Al-OH、水和 OH 的吸收谷(图 9)。

蒙脱石广泛地出现在探槽样品中和钻孔上部(通常距地表深度小于 60 m)的样品中(图 10)。在 ZK705 和 ZK703 的上部,可以明显地看到蒙脱石成带状分布。很可能,在地表或接近地表处出现的蒙脱石是通过风化作用形成。

但是,在 ZK002、ZK005、ZK702 和 ZK703 等几个钻孔中,蒙脱石形成于较深(从 150 m~300 m)的蚀变安山质火山岩的局部地段,这些地段远离风化作用的影响。一种可能是,蒙脱石的形成是冷的地表水沿断裂下降,并在较大的深度叠加在热液蚀变系统上所致。

蒙脱石的空间分布具有明显的规律性。从剖面上看,蒙脱石主要分布在斜长花岗斑岩和矿体的上盘,而在地表,蒙脱石主要位于斑岩和矿体的上盘,部分则位于下盘,如 TC27、TC19 和 TC8 北部的部分样品。这一规律性为指导矿床勘查工作部署提供了有价值的依据。

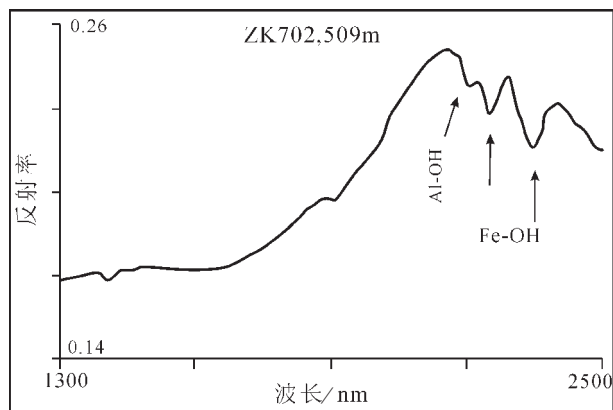


图 7 ZK702 中以黑云母为主的样品的反射光谱特征
Fig.7 SWIR reflectance spectrum of biotite-dominated samples from ZK702

4.2.5 绿帘石

在土屋热液蚀变系统边缘和外围的火山岩中,绿帘石是最丰富的蚀变矿物。但光谱测量工作表明,绿帘石不是土屋成矿作用过程中形成的主要蚀变矿物,尽管尚需岩石学工作来进一步证实。

在土屋地区,绿帘石并非正好围绕矿化蚀变系统分布。从区域上看,绿帘石(图 11)同时以细脉状和弥散状方式广泛出现在玄武质火山岩和安山质火山岩中。这可能意味着存在一种区域热液蚀变事件,该事件发生在与热液作用有关的铜矿化之前。

4.3 热液蚀变及其分带

根据光谱测量结果,获得土屋斑岩铜矿的蚀变分带如下(图 12):

硅化核:发育丰富的石英(方解石)脉,在不同的硅化岩石中也分布少量的绿泥石和白云母。该带代表了热液系统的主要流体通道。绿泥石主要为富铁绿泥石(Fe-OH 波长靠近或大于 2260 nm),Mg/(Fe+Mg)比值大约为 0.4 或更小。碳酸岩主要是方解石。该带主要发育在斑岩体中。硅化带可厚可薄,取决于成脉作用的强度、角砾岩化作用和斑岩体的可能规模。

黑云母带(?):前人工作后圈定的黑云母蚀变带靠近蚀变系统的中心,空间上与铜矿化范围吻合^[4]。然而,从光谱识别的信息来看,该带主要是绿泥石,个别样品中有黑云母,但并不十分确切。显然,利用少量的黑云母光谱数据的分析结果来确定蚀变分带是不充分的。

从光谱分析的结果来看,黑云母不是主要的蚀变矿物,即便在以前确定的黑云母蚀变带中也是如此。事实上,以前圈定的黑云母带主要根据与斑岩接触的角页岩中的细粒黑云母和偶尔分布的含黑云母细脉的产出来确定。本次工作对 ZK705 钻孔中的部分样品也进行了镜下矿物鉴定,未发现黑云母矿物。

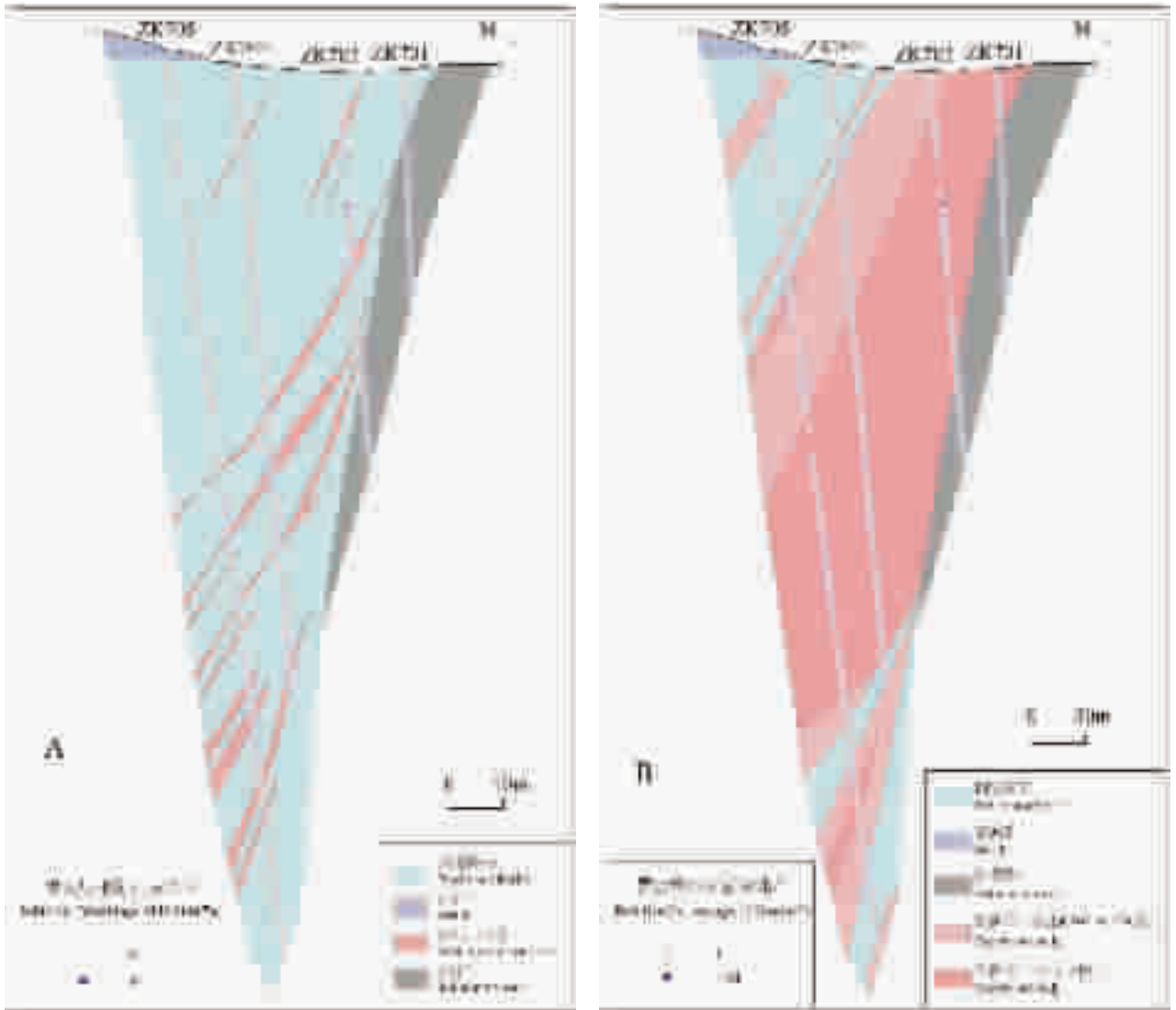


图8 土屋斑岩铜矿区7线剖面识别出的黑云母分布

A—侵入体剖面分布;B—矿体剖面分布

Fig.8 Occurrences of biotite at cross-section 7, Tuwu Cu prospect

A—Intrusion section;B—orebody section

无论如何,较少的黑云母数量决定了钾质蚀变在土屋斑岩铜矿并非一次重要事件。很可能,早期、相对高温的黑云母蚀变被绿泥石、绢云母叠加而覆盖,由蚀变系统中广泛产生的绿泥石判断,与热液蚀变有关的铜矿化远晚于黑云母,其实,地质体被抬升,热液蚀变系统的上部被剥蚀,铜成矿作用及有关的低温蚀变叠加在早期高温钾质蚀变之上。

绢英岩化带:该带形成硅化核的晕圈,白云母是其内主要的蚀变矿物,由内向外,其成分从相对较多的白云母甚至钠云母向多硅白云母为主过渡(如 ZK002,ZK004 和 ZK005)。该带倾向于但并不总是严格地受斑岩体控制,显然是由于主岩的高钾含量所致。此外,白云母+绿泥石的组合反

映该带形成于中性条件下。

蒙脱石带:该带主要由蒙脱石构成,绿泥石也有出现,但不能确定是单独的绿泥石还是混层的蒙脱石-绿泥石。在地表探槽中蒙脱石分布最明显,至少在几个钻孔(如 ZK004,ZK005,ZK703 和 ZK705)的上部有蒙脱石出现,其厚度从地表以下几米到大于 40m。蒙脱石分布在地表或地表附近,可能与风化作用有关,而不是热液蚀变系统的一部分。

部分含蒙脱石的样品也出现在钻孔的深部,这一深度超出了目前风化作用的影响范围。尽管尚未证实,但推测此处的蒙脱石是在断裂和角砾岩带中由于冷的地下水下渗形成,可能代表了土屋铜矿热液成矿作用的最后阶段。

青磐岩化带:该带的蚀变矿物主要是绿帘石,以及不同含量的绿泥石甚至白云母。绿帘石所含的铁主要为三价铁,表明青磐岩化带形成于相对氧化的环境。绿泥石出现于蚀变系统中斑岩或角砾岩带之间的弱蚀变的火山岩中,这说明它的形成早于与热液蚀变有关的铜矿化。如果是这样,青磐岩化带就代表了一种背景蚀变,它被后期的与铜矿化有关的热液活动所叠加。尽管笔者将此蚀变带称为外围蚀变带,并且把它同其他 3 个蚀变带放在一起,但并不意味着这一蚀变带与其他 3 个蚀变带属于同一热液事件的产物。

4.4 PIMA 找矿模型

上述蚀变矿物空间分布特征表明,蚀变矿物或其组合与斜长花岗斑岩体乃至铜矿体具有密切的空间关系,据此可以根据蚀变矿物的出现指示斑岩体甚至矿体、矿化体的存在。现利用蚀变矿物分布特征及其与斑岩体或矿体的对应关系,总结土屋斑岩铜矿床 PIMA 找矿模型如下:

(1)富铁绿泥石、富镁绿泥石、白云母、蒙脱石可以有效地指示斜长花岗斑岩体的存在。PIMA 测量表明,富铁绿泥石主要位于花岗斑岩体的上方,富镁绿泥石则主要分布于斑岩体

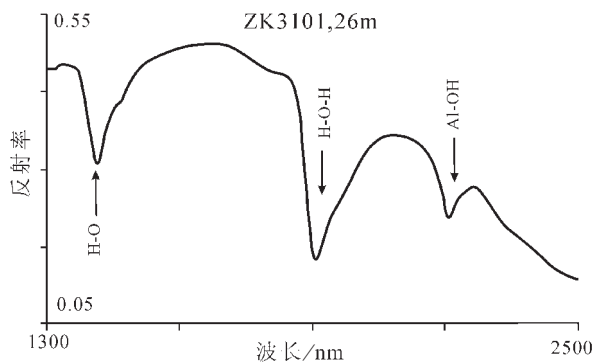


图 9 ZK3101 中以蒙脱石为主的样品的反射光谱特征
Fig.9 SWIR reflectance spectrum of a montmorillonite-dominated samples from ZK3101

的上下盘,说明不同成分的绿泥石与斑岩体具有不同的空间对应关系(图 3~4)。利用这一特点,可以有效地指导找矿工作部署。如当出现大量的富铁绿泥石时,意味着主斑岩体的存

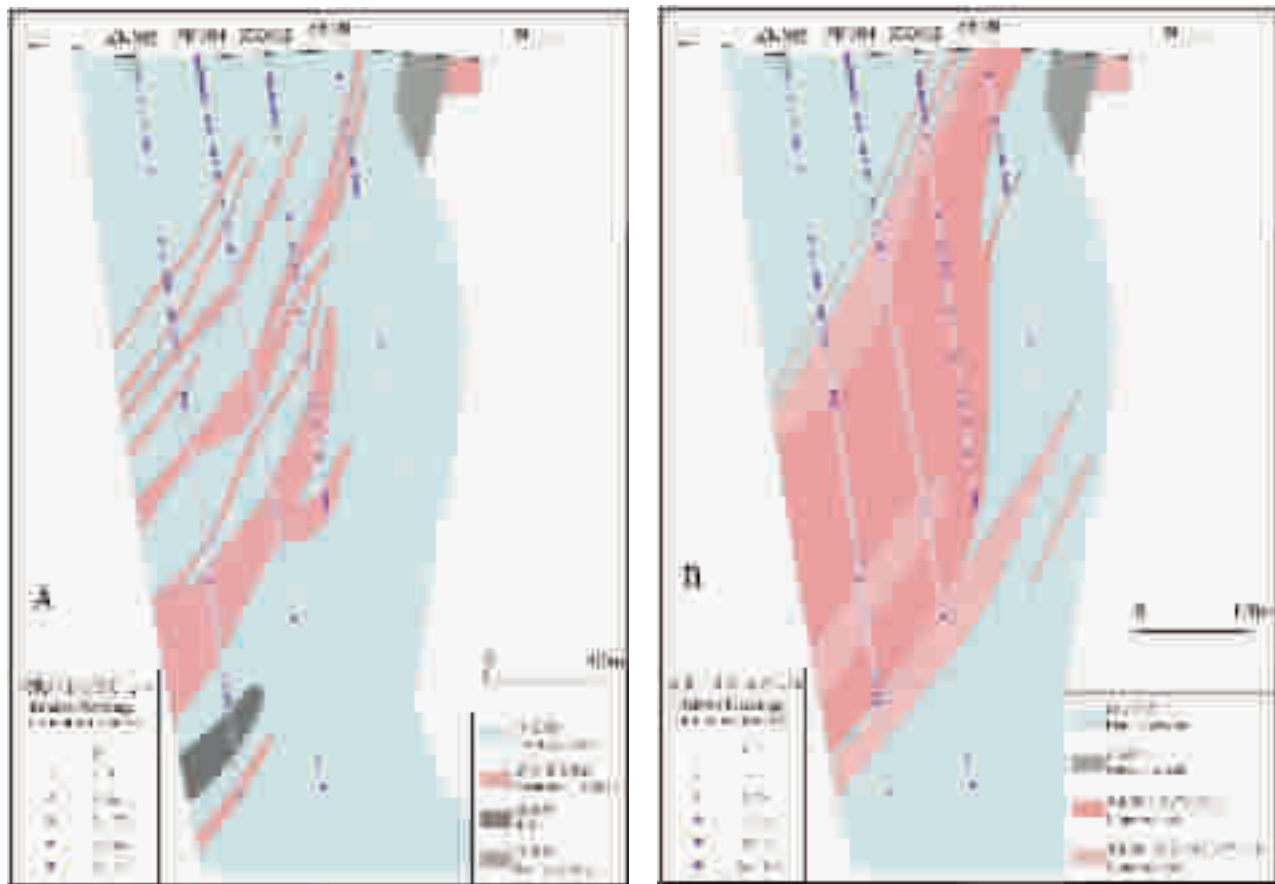


图 10 土屋斑岩铜矿区 0 线剖面识别出的蒙脱石分布

A—侵入体剖面分布;B—矿体剖面分布

Fig.10 Distribution of montmorillonite at cross-section 0, Tuwu Cu prospect

A—Intrusion section;B—orebody section

在。若出现富镁绿泥石,则表明其上盘或下盘为主斑岩体。

白云母分布的特点是,总体上围绕斜长花岗斑岩体外圈分布,其中在0线剖面体现得最为明显。在7线剖面也具有类似特点,但在沉积岩中也有较多分布,显示其受原岩影响的性质(图6)。可以认为,白云母的出现基本上反映了斜长花岗斑岩体的存在,其范围与斑岩体的范围也基本一致。

蒙脱石的空间分布特征也十分明显。总体上,蒙脱石位于斜长花岗斑岩体的上盘,下盘出露很少(图10)。因此,当蒙脱石分布越来越少,意味着越靠近与成矿有关的斑岩体。

(2)富铁绿泥石、富镁绿泥石、白云母、蒙脱石的分布可以帮助确定矿体(矿化体)的存在。由于斑岩铜矿床基本上围绕斑岩体分布,因此,指示斑岩体的蚀变矿物同样可以用于帮助确定矿体(矿化体)的存在。从富铁绿泥石、富镁绿泥石、白云母、蒙脱石在0线剖面 ZK005 钻孔中的分布(图13)可以看出,对应矿体的部位主要出现富铁绿泥石和白云母,缺富镁绿泥石和蒙脱石。显然,利用上述规律,可以有效地指导勘探工作部署。

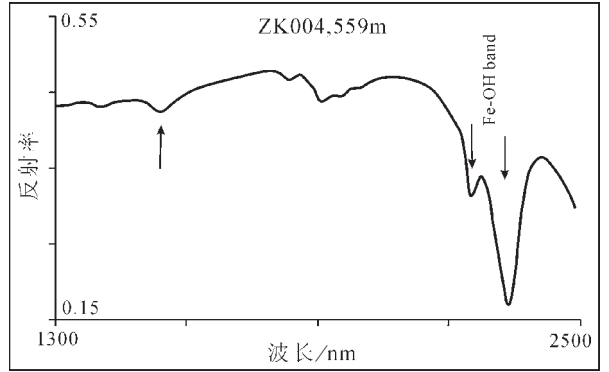


图 11 ZK004 中以绿帘石为主的样品的反射光谱特征
Fig.11 SWIR reflectance spectrum of an epidote-dominated sample from ZK004

5 结论与讨论

土屋斑岩铜矿区 PIMA 测量结果表明,短波红外光谱矿

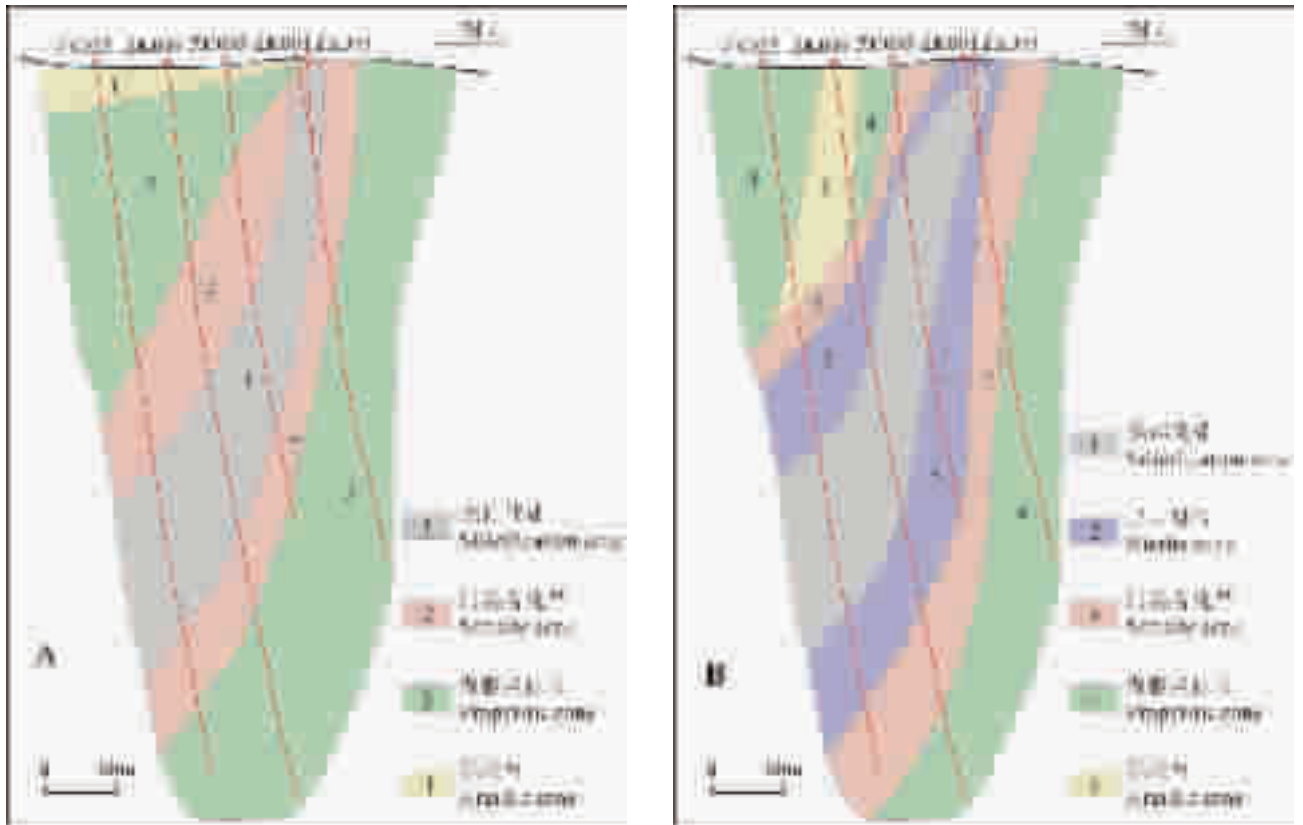


图 12 土屋斑岩铜矿床 0 线剖面识别出蚀变分带及其与前人划分的蚀变分带对比

A—本次工作确定的蚀变分带;B—前人划分的蚀变分带

Fig.12 Comparison of the alteration zones recognized at cross-section 0, Tuwu Cu prospect in this study with the alteration zones recognized by previous study

A—Alteration zones determined in this study;B—Alteration zones determined by previous study

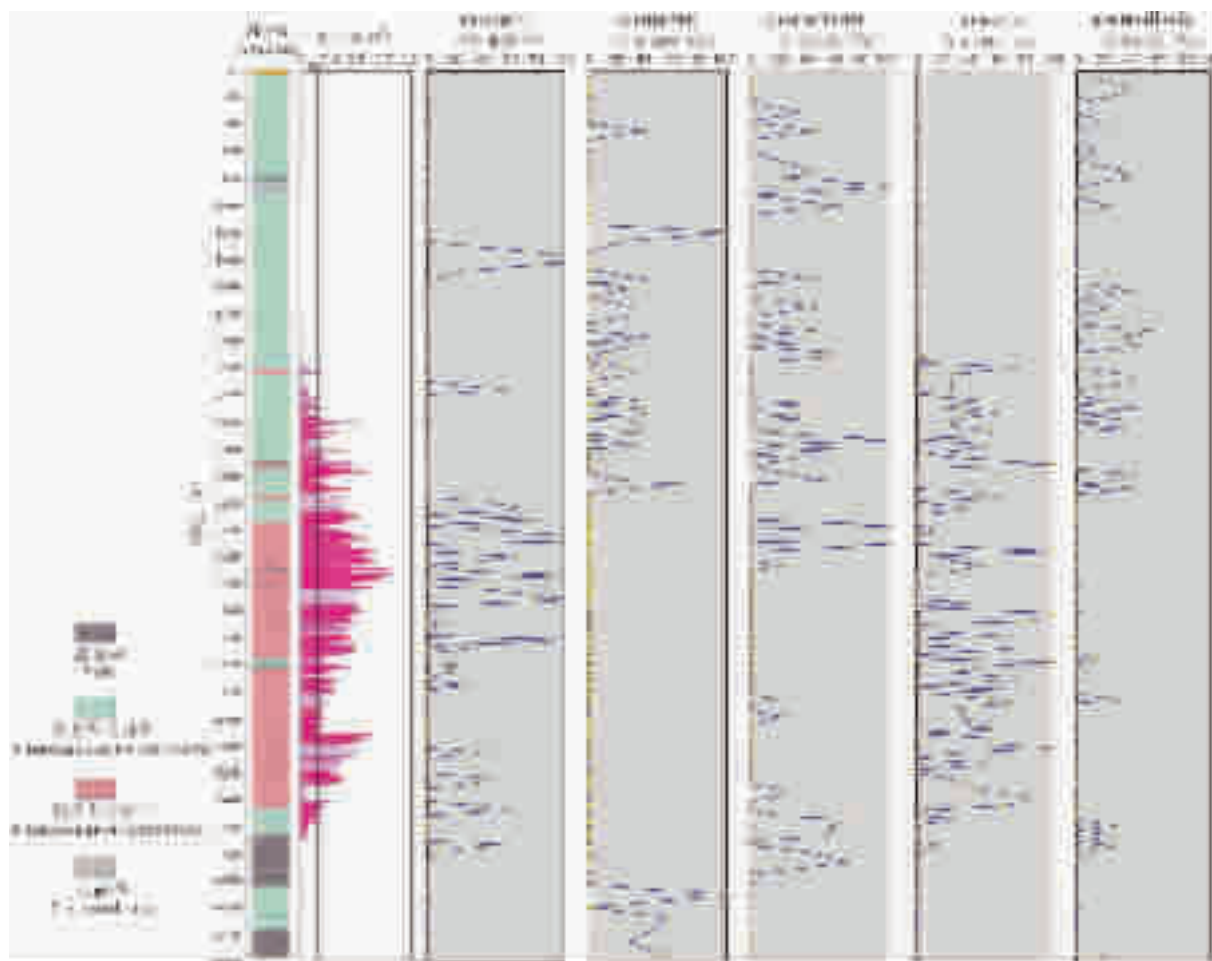


图 13 土屋斑岩铜矿床 ZK005 钻孔富铁绿泥石、富镁绿泥石、白云母和蒙脱石分布
Fig.13 Distribution of Fe-rich chlorite, Mg-rich chlorite, muscovite and montmorillonite from hole ZK005 in the Tuwu Cu prospect

物测量技术可以有效地应用于蚀变矿物填图工作中,通过识别肉眼难以分辨的蚀变矿物,建立蚀变分带模型,指导矿产勘查工作。

绿泥石是土屋斑岩铜矿区最广泛的蚀变矿物,其成分的变化可以有效地指示斑岩体或矿体的产出。如富铁绿泥石主要位于花岗斑岩体或矿体的上方,富镁绿泥石则主要分布于斑岩体或矿体的上下盘。

绿帘石尽管在土屋矿区广泛出现,但它与成矿热液的相关性并不明显。显然,广泛分布的绿帘石是土屋斑岩铜矿成矿作用之前区域热事件的产物。

白云母倾向于形成在斑岩体和角砾岩带内及其附近,反映了白云母主要形成于热液系统的主流体通道内及其附近的特点。白云母主要出现在斜长花岗斑岩体的上方,在斑岩体的上下盘出露较少。

蒙脱石广泛地出现地表或接近地表的斑岩体或矿体的上部,显然,此处的蒙脱石主要是风化作用的产物。当然,还

有一些蒙脱石形成于较深的部位,这类蒙脱石是冷的地表水沿断裂下降,并在较大的深度叠加在热液蚀变系统上所致。

利用绿泥石、白云母和蒙脱石及其他蚀变矿物的空间分布特征,建立了土屋铜矿区蚀变矿物分带模型,该分带模型与前人建立的分带模型不完全相同。

总结了蚀变矿物与斑岩体或矿体的对应关系,建立了 PIMA 找矿模型。该模型对土屋矿区及未知地区同类矿产的勘查具有积极的指导意义。

致谢:野外工作得到新疆地勘局董连慧总工程师、姜立丰高级工程师、新疆地质调查院王庆明总工程师、新疆地勘局第六地质大队吴华总工程师的大力支持;中国地质调查局发展研究中心刘大文博士、中国地质调查局张大权同志和新疆地勘局第一地质大队李生虎高级工程师参与了野外工作;中国地质调查局资源评价部王瑞江主任、王全明处长及科技外事部彭齐鸣主任、肖桂义处长对本项工作给予了大力支持,谨此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 2~9.
Pu Ruiling, Gong Peng. Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 2~9 (in Chinese).
- [2] Dennis A M, Colman T B, Cooper D C, et al. The combined use of PIMA and VULCAN technology for mineral deposit evaluation at Parys Mountain mine, Anglesey, UK: International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, 13th, Vancouver, B.C., March 1-3, ERIM International Inc., Proceedings, 1999, p. 1-25~32.
- [3] Passos R V, De Souza Filho C R. Spectro-mineral mapping using field pectroscopy and the geometry of hydrothermal alteration zones associated with mesothermal gold mineralization: A case study in the Brumal Deposit, Quadrilatero, Ferrifero, Brazil: International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, 13th, ERIM International Inc., Proceedings, 1999, p. 1-73~80.
- [4] Crowley J K, Association of magnesium-rich clay minerals and borate deposits: A potential remote sensing guide for borate mineral exploration, Brazil: International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, 13th, Vancouver, B.C., March 1-3, ERIM International Inc., Proceedings, 1999, p. 1-255~262.
- [5] Yang K, Huntington J F, Boardman J W, et al. Mapping hydrothermal alteration in the Comstock mining district, Nevada, using simulated satellite-borne hyperspectral data[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1999, 46: 915~922.
- [6] Yang K, Browne P R L, Huntington J F, et al. Characterising the hydrothermal alteration of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand, using short-wave infrared spectroscopy [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2001, 106: 53~65.
- [7] 王福同, 冯京, 胡建卫, 等. 新疆土屋大型斑岩铜矿特征及发现意义[J]. 中国地质, 2001,28(1):36~39.
Wang Futong, Feng Jing, Hu Jianwei, et al. The Characteristics and implication of Tuwu porphyry copper deposit in Xinjiang [J]. Geology in China, 2001,28(1):36~39 (in Chinese).
- [8] 王福同, 庄道泽, 胡建卫, 等. 物探在新疆土屋地区铜矿找矿中的应用——兼论斑岩铜矿“三位一体”的找矿模式[J]. 中国地质, 2001,28(3):40~47.
Wang Futong, Zhuang Daoze, Hu Jianwei, et al. Application of geophysical exploration methods in the Tuwu area, Xinjiang—on the prospecting model of porphyry copper deposit [J]. Geology in China, 2001,28(3): 40~47(in Chinese).
- [9] 龙保林, 薛迎喜, 冯京, 等. 新疆东天山斑岩铜矿的找矿模型试探[J]. 中国地质, 2001,28(5): 35~38.
Long Baolin, Xue Yingxi, Feng Jing, et al. Prospecting model of porphyry copper deposits of East Tianshan, Xinjiang[J]. Geology in China, 2001,28(5): 35~38(in Chinese).
- [10] 芮宗瑶, 王龙生, 王义夫, 等. 东天山土屋和延东斑岩铜矿床时代讨论[J]. 矿床地质, 2002,21(1):16~22.
Rui Zongyao, Wang Longsheng, Wang Yifu, et al. Discussion on mineralization age of Tuwu and Yandong copper deposits in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2002,21(1): 16~22 (in Chinese with English abstract).
- [11] 陈文明, 曲晓明. 论东天山土屋—延东(斑岩)铜矿的容矿性[J]. 矿床地质, 2002,21(4): 331~340.
Chen Wenming, Qu Xiaoming. Host rocks of Tuwu-Yandong porphyry copper deposit in Tianshan Mountains [J]. Mineral Deposits, 2002,21(4): 331~340 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘德权, 陈毓川, 王登红, 等. 土屋—延东铜钼矿田与成矿有关的问题的讨论[J]. 矿床地质, 2003,22(4): 334~344.
Liu Dequan, Chen Yuchuan, Wang Denghong, et al. A discussion on problems related to mineralization of Tuwu-Yandong Cu-Mo orefield in Hami, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2003,22(4): 334~344 (in Chinese with English abstract).
- [13] 朱裕生, 王福同, 龙宝林, 等. 土屋—延东斑岩铜(钼)矿床多源信息找矿模型[J]. 矿床地质, 2003,22(3): 287~294.
Zhu Yusheng, Wang Futong, Long Baolin, et al. Polygenic information prospecting model for Tuwu-Yandong porphyry Cu-Mo deposit [J]. Mineral Deposits, 2003,22(3): 287~294 (in Chinese with English abstract).

Application of SWIR reflectance spectroscopy in mapping of hydrothermal alteration minerals: A case study of the Tuwu porphyry copper prospect, Xinjiang

LIAN Chang-yun¹, ZHANG Ge², YUAN Chun-hua¹, YANG Kai³

(1. *Development and Research Centre, China Geological Survey, Beijing 100037, China;*

2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

3. *Mineral Mapping Technologies Group, CSIRO Division of Exploration and Mining, NSW, Australia, 1670*)

Abstract: This study demonstrates that the portable infrared mineral analyzer (PIMA) is capable of deriving detailed mineralogical information on hydrothermal alteration at low cost and therefore is an operational tool for mineral exploration. With this technology, hydrothermal minerals can be quickly identified and hydrothermal alteration zones effectively mapped to assist in mineral exploration. Because of the fast data acquisition and no requirement for sample preparation, it becomes practical to measure a sufficiently large number of samples in order to objectively capture the mineralogical variation of a hydrothermal alteration/mineralization system. The results of PIMA application at the Tuwu porphyry prospect show the effectivity of mineral identification and characterizing the porphyry copper mineralization system.

Key words: SWIR reflectance spectroscopy; PIMA; alteration mineral; Tuwu

About the author: LIAN Chang-yun, male, born in 1965, doctor of economic geology, mainly specializes in exploration geochemistry and mineral resources assessment; E-mail: lchangyun@mail.cgs.gov.cn.