

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

杨志明¹, 侯增谦^{1**}, 杨竹森², 曲焕春¹, 李振清², 刘云飞¹

(1 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 作为世界上最重要的一种矿床类型, 斑岩铜矿一直是工业界勘查的首选。对此类矿床的勘查, 在中-深剥蚀程度的矿区相对简单, 而在浅剥蚀的矿区则变得较为困难, 这是因为在浅剥蚀的矿区, 矿床热液/矿化中心很难快速有效定位。近年来, 在矿产勘查领域逐渐得到广泛应用的短波红外光谱技术, 可通过特定蚀变矿物反射光谱特征参数系统变化的规律来厘定热液/矿化中心, 在块状硫化物及浅成低温矿床中显示出良好的应用效果, 这为浅剥蚀斑岩铜矿热液/矿化中心的快速、有效厘定提供了一种途径。为此, 文章选择了位于冈底斯斑岩铜矿带东段、剥蚀较弱的念村(即夏玛日)矿区, 拟通过矿区样品短波红外光谱的系统测量, 寻找出蚀变矿物反射光谱特征参数系统变化的规律, 进而约束矿床热液/矿化中心。本次研究在念村矿区共识别出 7 种蚀变矿物, 按出现频率由多至少依次为伊利石、绿泥石、蛋白石、叶蜡石、高岭石、绿帘石及多硅白云母; 而且, 矿区外围以伊利石-绿泥石±绿帘石蚀变矿物组合为主, 向内逐渐过渡为伊利石±蛋白石、伊利石-叶蜡石±高岭石组合。通过对伊利石反射光谱特征参数的计算发现, 伊利石结晶度及 Al-OH 吸收峰位, 这些通常被认为与伊利石形成温度有关的光谱学参数, 在该矿区呈现出系统的变化规律: 在矿区东北部, 伊利石结晶度较大(>1.6), Al-OH 吸收峰位较小($<2\ 033\ \text{nm}$), 而该区域的外围, 伊利石结晶度变小, Al-OH 吸收峰位变大。这表明矿区东北部伊利石的形成温度更高, 暗示该区域可能为矿床热液/矿化中心。因此, 建议在本次研究所圈定的热液/矿化中心范围内, 在适当开展物探工作的基础上, 尽快布置勘查工程进行验证, 以实现矿床的尽快查找和突破。

关键词 地质学; 斑岩铜矿; 短波红外光谱; 伊利石结晶度; Al-OH 吸收峰位; 念村; 冈底斯; 西藏

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Application of short wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu district: A case study of Niancun ore district, Tibet

YANG ZhiMing¹, HOU ZengQian¹, YANG ZhuSen², QU HuanChun¹, LI ZhenQing² and LIU YunFei¹

(1 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China;

2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract

As the most important type of ore deposit, porphyry Cu deposit has long been taken as the primary exploration target. The exploration of such type of ore deposits is relatively easy in strongly eroded areas, but is rela-

* 本文得到国土资源部行业科研专项(编号: 2010111011)和国家基础研究规划"973"项目(编号: 2011CB403104)的联合资助

第一作者简介 杨志明, 男, 博士, 副研究员, 主要从事斑岩铜矿研究。Email: zm.yang@hotmail.com

** 通讯作者 侯增谦, 男, 1961 年生, 博士, 研究员, 主要从事大陆和海底成矿作用研究。Email: houzengqian@126.com

收稿日期 2012-05-21; 改回日期 2012-06-02。许德焕编辑。

tively difficult in poorly eroded area where mineralization/hydrothermal (M/H) centers cannot be easily located by traditional alteration mineral mapping. Short Wavelength Infra-Red (SWIR), a newly-developed technique in the field of mineral exploration, was tentatively used in this study to locate M/H centers of poorly eroded porphyry Cu deposits at Niancun, Tibet based on the fact that it has shown powerful function in locating M/H centers for VMS-type and epithermal deposits. About 300 surficial samples and 30 drill hole samples were measured by TerraSpec in this study. As a result, seven types of alteration minerals were recognized. They are illite, chlorite, opal, pyrophyllite, kaolinite, epidote, and phengite according to frequency of occurrences from high to low. Spatially, the alteration minerals show clear zoning comprising an outer zone of illite-chlorite $\pm$ epidote assemblage to an inner zone of illite-pyrophyllite $\pm$ kaolinite. Numerical values for reflectance spectral features of illite were also extracted, and some of them (e.g., wavelength position of Al-OH absorption and illite crystallinity) show systematic changes. The wavelength position of the illite Al-OH absorption varies between $\sim 2\,192\text{ nm}$ and $2\,220\text{ nm}$ with the mode at $1\,904\text{ nm}$ to $1\,914\text{ nm}$, and it is obviously lower ($< \sim 2\,203\text{ nm}$) in the eastern portion of the district where illite and pyrophyllite constitute dominant alteration minerals. Illite crystallinity (IC) at Niancun typically changes from 0.6 to 3.1, with the mode at 1.0 to 1.8. In contrast, it is relatively higher (>1.6) in the eastern portion of the district. For illite, higher IC value and lower wavelength position of Al-OH absorption generally indicate that their formation occurred at higher temperature. So the eastern portion of the district with higher IC value, lower wavelength position of Al-OH absorption and alteration of illite-pyrophyllite may be the M/H center of the Niancun deposit.

Key words: geology, porphyry Cu deposits, short wavelength infra-red (SWIR), illite crystallinity (IC), position of Al-OH absorption peak, Niancun, Gangdese, Tibet

作为世界上最重要的一种矿床类型,斑岩铜矿目前供应了全世界近 75% 的铜、50% 的钼和 20% 的金 (Sillitoe, 2010), 一直是工业界勘查的首选目标。在中-深剥蚀地区,得益于完善的矿床模型 (Lowell et al., 1970), 此类矿床的勘查相对简单:依据地表所能观察到的蚀变及矿化分带特征,与经典矿床模型进行简单对比,便可推测出矿化中心可能的位置,进而通过有限区域内的物、化探工作及勘查工程予以验证。然而,在浅剥蚀的地区,对此类矿床的勘查则要困难得多。因为在浅剥蚀地区,地表所能观察到的蚀变以黏土化为主,蚀变分带不明显,且蚀变范围通常较大 (可达 10 km^2 或以上),很难直接应用斑岩铜矿模型 (Lowell et al., 1970) 来指导物、化探工作及勘查工程的部署。在此情况下,如何快速有效地缩小勘查区域、确定蚀变/矿化中心,就显得尤为重要。

近年来,在矿产勘查领域逐渐广泛应用的短波红外光谱 (short wavelength infra-red, SWIR) 技术 (如 Hauff et al., 1992; Yang et al., 1998; 2000; 2001; 2004; 2005; 2011; Arne et al., 1999; Thompson et al., 1999; 2009; Chang et al., 2011), 以其独特的技术优势,为解决上述问题提供了可能。该技术不仅可以快速鉴定热液蚀变过程中常见的含

羟基矿物及硫酸盐、碳酸盐矿物,进行蚀变矿物填图,还可利用一些矿物反射光谱特征 (如特定波长吸收峰位) 的系统变化,直接定位热液/矿化中心。如 Chang 等 (2011) 在研究菲律宾 Mankayan 地区 Lepanto 高硫浅成低温热液矿床的蚀变岩帽时发现,蚀变矿物明矾石 $1\,480\text{ nm}$ 吸收峰位相对于侵入体位置有系统的变化规律:靠近侵入体中心部位,明矾石 $1\,480\text{ nm}$ 吸收峰位较高 (可达 $1\,498\text{ nm}$), 远离侵入体中心,明矾石 $1\,480\text{ nm}$ 吸收峰位较低 (可低至 $1\,475\text{ nm}$)。详细研究后发现,明矾石 $1\,480\text{ nm}$ 吸收峰位与明矾石中的 $\text{Na}/(\text{Na} + \text{K})$ 比值密切相关 (正相关),而 $\text{Na}/(\text{Na} + \text{K})$ 比值又受矿物形成时温度的控制,较高温度下形成的明矾石具有较高的 $\text{Na}/(\text{Na} + \text{K})$ 比值,表明明矾石 $1\,480\text{ nm}$ 吸收峰位与矿物的形成温度密切相关,从而可以通过明矾石 $1\,480\text{ nm}$ 吸收峰位的系统变化来定位侵入体中心及斑岩型矿化的位置 (Chang et al., 2011)。此外,其他常见热液蚀变矿物 (如白云母组矿物) 特定波长的吸收峰位相对于蚀变/矿化中心也显示出类似的变化规律 (如 Herrmann et al., 2001; Jones et al., 2005; Yang et al., 2005), 表明该技术在矿产勘查中具有较好的应用前景。

与国外相比, SWIR 技术在中国矿产勘查领域的应用则刚刚起步。2002~2004 年间, 章革、连长云等最早利用中国地质调查局发展研究中心购置的 2 台便携式短波红外矿物分析仪 (portable infra-red mineral analyser, PIMA) 对新疆土屋、云南普朗及西藏驱龙等斑岩铜矿尝试开展了 SWIR 测量, 识别出许多肉眼难以鉴定的矿物, 并通过系统矿物填图结果建立了矿床蚀变分带模式及 PIMA 找矿模型 (章革等, 2004; 2005; 连长云等, 2005a; 2005b)。随后, 一些学者又将 SWIR 技术引入到金矿床蚀变矿物研究中 (如赵利青等, 2008; 曹焱等, 2008)。最近, 徐庆生等 (2011) 又利用 SWIR 技术对西藏帕南铜-钼-钨矿区开展了蚀变矿物填图。值得注意的是, 除少数研究 (如赵利青等, 2008) 外, 上述大多数工作主要是利用 SWIR 技术快速方便的特点进行矿物鉴定或矿物填图, 而很少利用热液蚀变矿物反射光谱特征的变化规律来进行找矿预测 (如 Chang et al., 2011)。

位于冈底斯斑岩铜矿带东段的念村铜矿化点, 紧临 318 国道, 以“火烧皮”大范围发育 (图 1) 而受到工业界及科学界的广泛关注。经初步踏勘发现, 该矿区内热液蚀变也非常发育, 且规模巨大 ($\sim 30 \text{ km}^2$), 可与驱龙超大型斑岩铜矿床相媲美 (杨志明

等, 2008), 预示有较好的找矿前景。然而, 由于该矿区内的蚀变主要是斑岩铜系统末梢的黏土化、绿泥石化, 缺少能指示热液/矿化中心的蚀变类型或脉体, 致使矿业公司在布置矿区物探工作时没有明确的目标, 也不知该在何处进行工程验证, 延缓了该矿区资源潜力评价的进程。

笔者应念村铜矿区矿权所有人——西藏沃金矿业投资有限公司的邀请, 对该矿区开展了相关研究, 希望最终能提供勘查工程布置方案。为解决上述问题, 笔者于 2011 年 7~8 月份, 对该矿区进行了野外蚀变填图。根据矿床地质特征及蚀变特征, 笔者意识到该矿区发育较厚的层火山盖层, 其下部可能存在斑岩铜金系统 (侯增谦等, 2012)。由于厚覆盖和浅剥蚀, 使用传统的蚀变矿物填图方法来揭示热液/矿化中心很难奏效。基于国外利用蚀变矿物反射光谱特征的系统变化规律来确定热液/矿化中心的良好效果 (如 Chang et al., 2011), 笔者在野外蚀变填图的基础上, 对念村矿区蚀变矿物短波红外光谱测量及部分矿物反射光谱特征的空间变化规律进行了系统研究, 从而揭示了热液/矿化中心的位置, 为矿区的下一步勘查工程部署提供了关键依据, 同时也为其他浅剥蚀斑岩矿床或一般热液矿床寻找热液/矿化中心提供了一种思路。



图 1 念村矿区东北部一山头 (具体位置见图 2) 的野外照片
岩石因风化已发生破碎, 局部显示出清晰的“火烧皮”特征

Fig. 1 Photograph of northeastern outcrop of the Niancun ore district (see Fig. 2 for detailed position)
showing clear evidence of post-ore oxidation of Fe-sulfides

1 短波红外光谱及常用测试仪器简介

1.1 短波红外光谱

短波红外光是介于近红外光与中红外光之间的电磁波(波长 $1.1 \sim 2.5 \mu\text{m}$)。短波红外光谱是分子振动光谱的倍频和主频吸收光谱,主要是由分子振动的非谐性使分子振动从基态向高能级跃迁时产生的。

由于不同的矿物含有不同的基团,不同的基团有不同的能级,不同的基团与同一基团在不同的物理化学环境中对短波红外光的吸收波长有明显的差别,因此,短波红外光谱可作为获取矿物信息的一种有效的载体。短波红外光照射时,频率相同的光线与基团会发生共振现象,光的能量通过分子偶极矩的变化传递给分子;而当短波红外光的频率与样品的振动频率不相同,该频率的短波红外光就不会被吸收。因而,选用连续改变频率的短波红外光来照射某样品时,由于样品对不同频率近红外光的选择性吸收,通过样品后的短波红外光在某些波长范围内会变弱,透射出来的短波红外光就携带着样品组分和结构的信息。

通过检测器分析透射或反射光的光密度,就可以确定样品的组分及该组分的含量。并非所有的矿物在短波红外光区内都有显示,常见的适合短波红外光谱测量的矿物主要是含氢基团 X-H ($\text{X} = \text{C}, \text{N}, \text{O}$)及含 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 的矿物等,如各种含羟基矿物、含氨基矿物,以及部分碳酸盐矿物及硫酸盐矿物等。

1.2 常用测试仪器

用来测量短波红外光谱的便携式仪器主要有 3 种类型,分别为:澳大利亚 Integrated Spectronics Pty. Ltd. 生产的 PIMA,美国 Analytical Spectral Devices, Inc. (ASD)生产的 TerraSpec,以及中国南京地质矿产研究所与南京中地仪器有限公司合作开发的 PNIRS。

PIMA 及 PNIRS 两种仪器收集信号的波长范围相同,为 $1\ 300 \sim 2\ 500 \text{ nm}$,而 TerraSpec 所收集信号的波长范围相对较宽,为 $350 \sim 2\ 500 \text{ nm}$,包括了整个可见光、近红外及短波红外光区域。

PIMA 于 1991 年开始投入商业生产,其光谱分辨率为 $7 \sim 10 \text{ nm}$,光谱取样间距 2 nm ,测试窗口为

直径 1 cm 的圆,测试样品所用时间固定,完成一个测点需 50 s 。

第一台 TerraSpec 生产于 2006 年,其光谱分辨率为 $6 \sim 7 \text{ nm}$,光谱取样间距 2 nm ,测试窗口为直径 2.5 cm 的圆,测试样品所用时间可由用户自行设置,淡色岩石完成一个测点需 $4 \sim 6 \text{ s}$,深色岩石完成一个测点需 $6 \sim 10 \text{ s}$ 。

PNIRS 商业化也较晚,2005 年卖出第一台仪器,其分辨率优于 8 nm ,光谱取样间距 $2 \sim 4 \text{ nm}$,测试窗口为边长 1.4 cm 的正方形,测试样品所用时间固定,完成一个测点需 60 s 。

关于这 3 种仪器本身的参数及测试结果更详细的比较,请参考 Chang 等(2012)。

2 矿区地质简介

念村矿区地质框架相对简单,出露的地质单元主要为林子宗火山岩。依据岩性的不同,该地区的林子宗火山岩被分为 4 段:一段厚约 490 m ,与下伏的林布宗组呈角度不整合接触,主要岩性为流纹英安质-英安质凝灰熔岩及安山岩;二段厚约 530 m ,主要岩性为安山岩、英安岩及流纹质角砾熔岩;三段厚约 170 m ,主要岩性为英安质角砾凝灰熔岩、英安质凝灰熔岩,全岩 K-Ar 法给出该段岩石的形成年龄为 47.8 Ma ;四段厚约 630 m ,主要岩性为流纹质凝灰熔岩、流纹英安质-安山质凝灰岩、含火山弹流纹-英安质角砾岩^①。念村矿区内出露的主要为林子宗火山岩的二至四段(图 2)。

该矿区的构造以断层为主,夏玛日逆断层横穿矿区(图 2),该断层为宽约 2 m 的破碎带,走向 106° ,倾向西南,倾角 64° 。沿该破碎带,玉髓质细脉(宽 $< 2 \text{ mm}$)相对发育。

矿区内的蚀变以黏土化及绿泥石化为主,见少量的绿帘石化。黏土化在整个矿区范围内皆发育,绿泥石化主要分布于矿区西部及北部地区。在矿区范围的野外调查中,未见到原生的铜、钼矿化,在部分探槽中见有孔雀石。黄铁矿化在矿区内较为普遍,在林子宗火山岩中,常含有自形-半自形的细小(直径一般 $< 2 \text{ mm}$)黄铁矿颗粒,在钻孔 ZK01 中,见有大量细脉状黄铁矿。

斑岩铜矿系统中常见的各类石英脉等,目前在

① 西藏自治区地质矿产局, 1994. 1:20 万区域地质调查报告(沃卡幅). 内部资料.

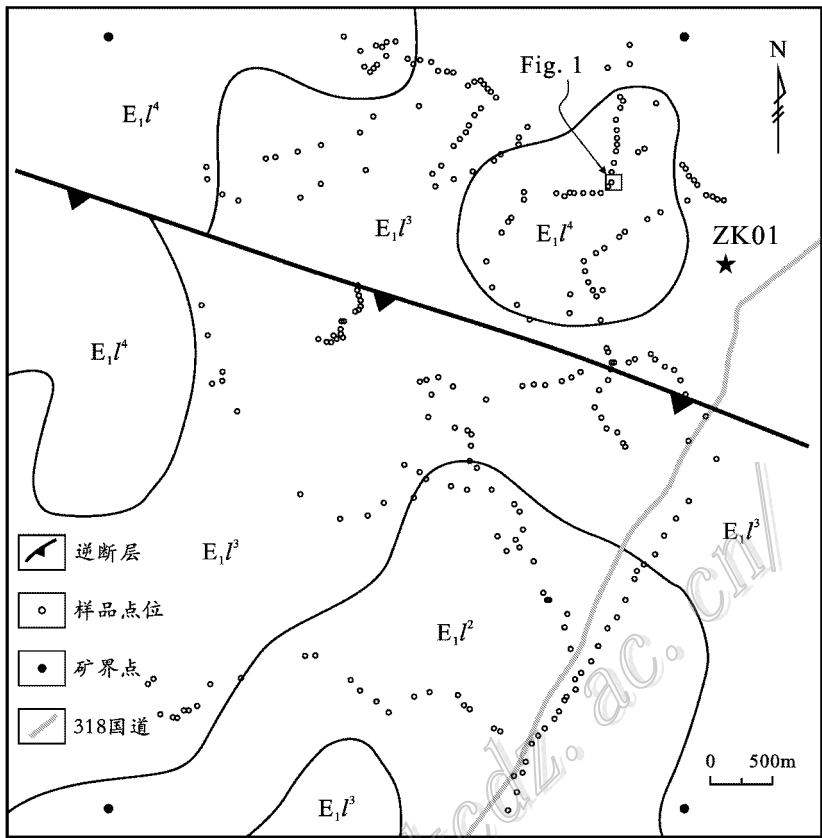


图 2 念村矿区地质简图

E_1l^2 、 E_1l^3 、 E_1l^4 分别为林子宗火山岩二段、三段及四段,详细岩性请见正文

Fig. 2 Geological sketch map of the Niancun ore district

E_1l^2 , E_1l^3 and E_1l^4 are the second, third and fourth member of Linzizong Formation, respectively

该矿区未能观察到。矿区内目前施工了 4 个钻孔,其中有 3 个钻孔施工不到 100 m 时,因钻不下去而报废,ZK01 钻孔的终孔深度为 350 m。

3 样品测试

3.1 样品采集

本次研究所测试的样品由 2 部分组成:① 矿区蚀变填图时采集的控制点样品,共 300 余件,由 9 条野外路线构成,基本覆盖了整个矿区(图 2);② 钻孔 ZK01 中的样品,共 30 余件,基本上均匀分布于该钻孔中(图 3)。

3.2 样品测试

本次短波红外光谱测试所用的仪器是中国地质科学院地质研究所 2011 年新购置的 TerraSpec(仪器编号 2208)。

测试前,先将样品清洗干净,晾干。为避免发生

异常情况,每块样品一般测试 3 个点,用不同颜色的彩笔把点位标记出来。测试时,暗电流(dark current)设置为 25,并保持不变;光谱平均(spectrum Avg)和基准白(white reference)的设置视情况而定。校准时,光谱平均设置为 200,基准白设置为 400。测试时,浅色岩石光谱平均设置为 120,深色岩石光谱平均设置为 200,基准白分别设置成光谱平均的 2 倍。测试过程中,为保证测试数据的质量,每隔 20 分钟对仪器进行优化(optimization)及基准白(white reference)测量一次。

关于 TerraSpec 上述参数设置值的选取及其他注意事项,请参考 Chang 等(2012)。

3.3 数据处理

对测试所得的光谱数据,先用“光谱地质师(the spectral geologist, TSG) v.7”进行自动解译,然后通过人工进行逐条核对。

伊利石 1 900 nm、2 200 nm 的吸收峰位及吸收峰

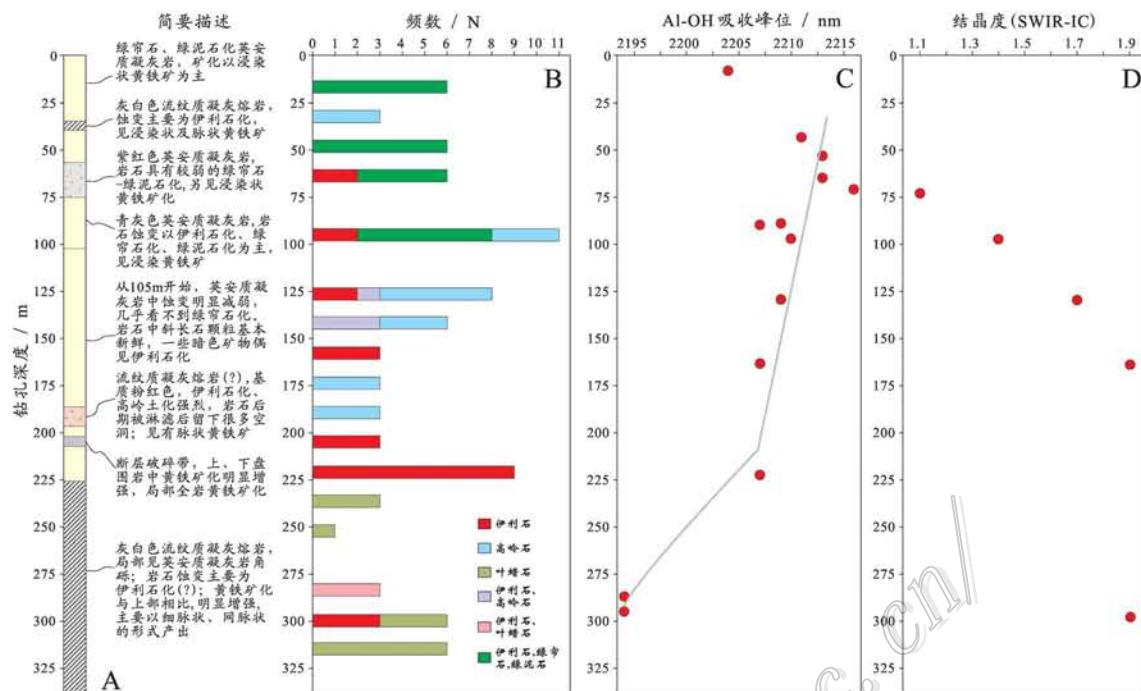


图 3 钻孔 ZK01 简化柱状图(A); 短波红外光谱蚀变填图(B); 伊利石 Al-OH 吸收峰位(C); 结晶度空间分布规律图(D)

Fig. 3 Geological sketch map of the drill hole ZK01(A); distribution of alteration minerals throughout the drillhole based on SWIR mapping results (B); variation of wavelength position of Al-OH absorption peak and illite crystallinity throughout the drillhole (C and D)

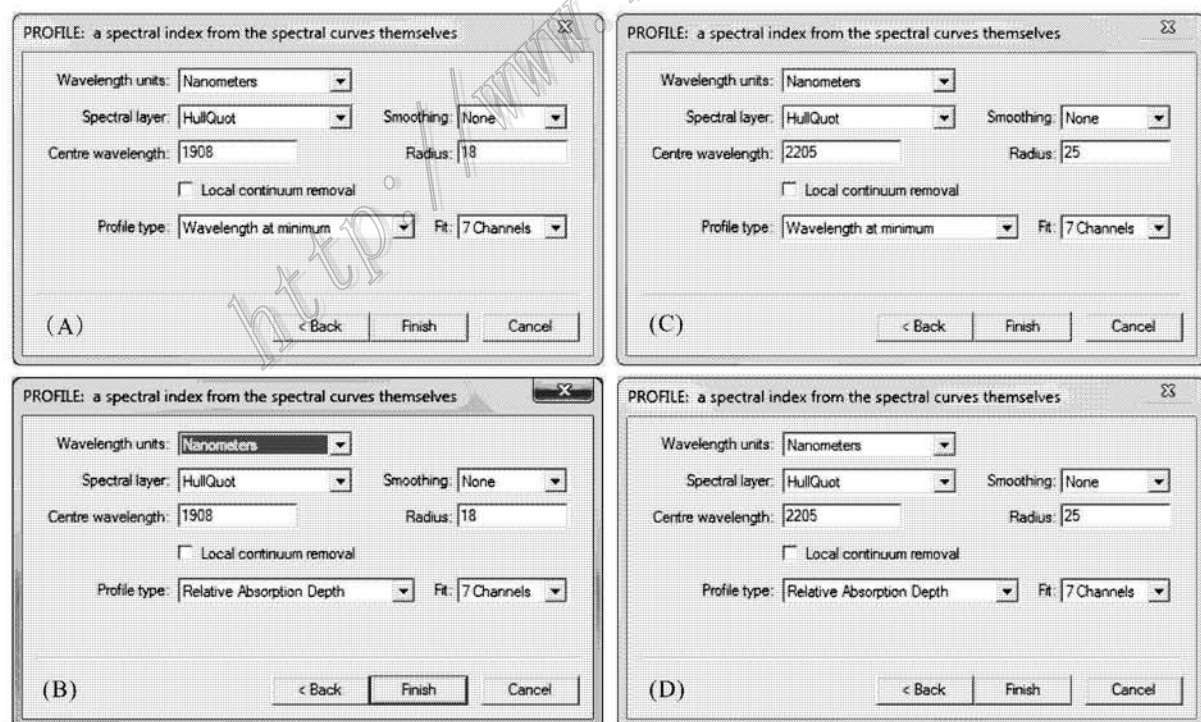


图 4 TSG 软件中伊利石 1 900 nm 吸收峰位(A)、吸收深度(B)及 2 200 nm 吸收峰位(C)、吸收深度(D)提取的设置方法

Fig. 4 Software (TSG) settings used for extraction of wavelength position (A, C) and absorption depth (B, D) of ~1 900 nm and ~2 200 nm absorption feature of illite

深度的计算通过 TSG v.7 的标量(scalar)功能求得,其设置如图 4 所示。伊利石结晶度也可通过 TSG v.7 的标量功能直接求得(图 5;有关伊利石上述几个光谱参数的详细信息请见本文 4.2 节)。一个样品若有多个分析结果,其光谱参数取平均值。

本次测试结果示于图 6~图 9;原始数据因数量过大,无法全部列出,只将部分数据列于表 1~表 3。

4 测试结果

4.1 蚀变矿物种类及分布规律

本次光谱测试,在念村地表样品中共识别出 7 种蚀变矿物,即伊利石、绿泥石、绿帘石、叶蜡石、高岭石、蛋白石及多硅白云母。其中,伊利石及绿泥石

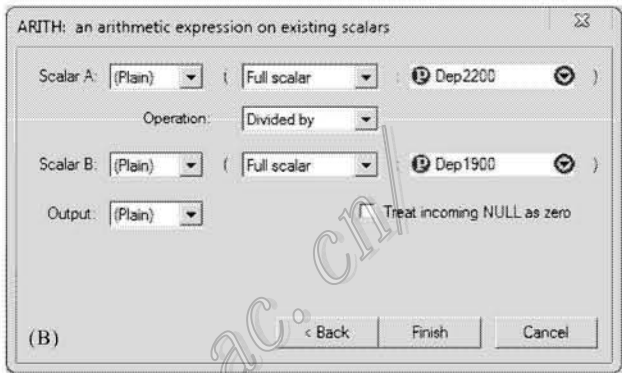
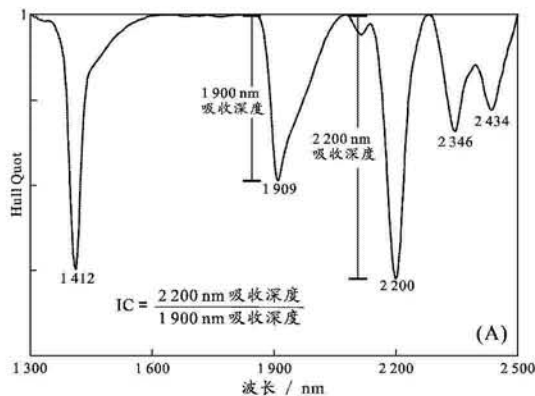


图 5 伊利石 HullQuot 光谱曲线(A)及在 TSG 软件中计算伊利石结晶度的设置方法(B)

$$IC \text{ (伊利石结晶度)} = 2\,200 \text{ nm 吸收峰深度} / 1\,900 \text{ nm 吸收峰深度}$$

Fig. 5 Hull quotient spectra of illite (A) and software TSG setting for calculation of illite crystallinity (B)

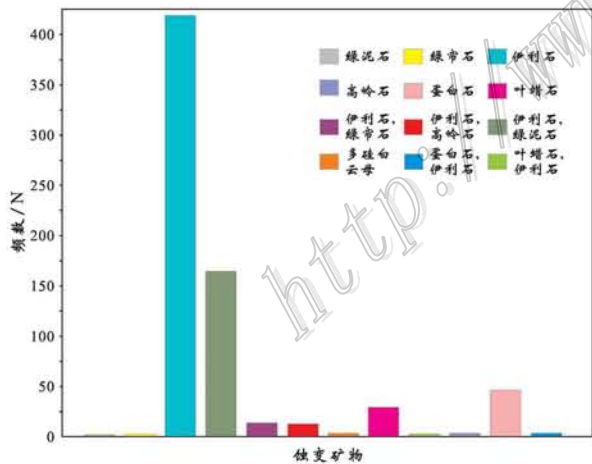


图 6 念村矿区蚀变矿物统计图

Fig. 6 Statistical chart of alteration minerals recognized in the study using SWIR instrument (Terra Spec) at Niancun ore district

最为发育,其次为蛋白石、叶蜡石、绿帘石,高岭石及多硅白云母仅在少量样品中见到(图 6)。钻孔 ZK01 中识别出的蚀变矿物与地表的类似,为伊利石、叶蜡石、绿泥石、绿帘石及高岭石,但缺少蛋白石和多硅

白云母(图 3)。

伊利石是该矿区内最发育的蚀变矿物,在地表分布最为广泛,遍布整个矿区。绿泥石常与伊利石伴生,主要分布于矿区北部,特别是西北部,在矿区的中-南部也有零星出现。其他蚀变矿物在矿区内的分布则相对局限:蛋白石主要分布在矿区东北局部地区,在矿区东南部亦有零星出现;叶蜡石主要分布于矿区东北部,介于蛋白石分布区之间;绿帘石零星分布于矿区外围,常与绿泥石、伊利石伴生;高岭石、多硅白云母仅在矿区零星出现(图 7)。整体上,矿区外围以伊利石-绿泥石±绿帘石蚀变矿物组合为主,向内逐渐过渡为伊利石±蛋白石、伊利石-叶蜡石±高岭石组合(图 7)。

在钻孔 ZK01 中,伊利石也是分布最广泛的蚀变矿物,几乎贯穿该钻孔始末(图 3B)。绿泥石主要分布于该钻孔的浅部(100 m 以上),高岭石分布于该钻孔的中部(100~200 m),而叶蜡石则主要分布于该钻孔的下部,从而呈现出浅部为伊利石-绿泥石、中部为伊利石-高岭石、深部为伊利石-叶蜡石的蚀变矿物组合变化规律(图 3B)。

表 1 念村矿区地表样品蚀变矿物短波红外光谱测量结果(部分数据)
Table 1 Results of SWIR measurement of the surficial samples in the Niancun ore district

样品号	TSG 自动解释结果						人工解释结果			位置		地质路线		
	识别矿物 1	识别矿物 2	Dep2200	Dep1900	Pos1900	Pos2200	IC	最终鉴定结果	IC	Pos1900	Pos2200		经度	纬度
xmr-1.000	phengite	/	0.12	0.08	1909	2215	1.6	illite, chlorite	/	1909	2215	92.324	29.773	Line 0
xmr-1.002	phengite	/	0.12	0.09	1907	2216	1.3	illite, chlorite	/	1907	2216	92.324	29.773	Line 0
xmr-10.000	illitic phengite	/	0.24	0.19	1910	2213	1.2	illite, chlorite	/	1910	2213	92.316	29.784	Line 0
xmr-10.001	illitic phengite	/	0.22	0.19	1911	2210	1.2	illite, chlorite	/	1911	2210	92.316	29.784	Line 0
xmr-10.002	illitic phengite	/	0.26	0.21	1910	2213	1.2	illite, chlorite	/	1910	2213	92.316	29.784	Line 0
xmr-11.000	illitic phengite	/	0.25	0.20	1908	2215	1.2	illite	1.2	1908	2215	92.316	29.785	Line 0
xmr-11.001	illitic muscovite	/	0.27	0.23	1908	2212	1.2	illite	1.2	1908	2212	92.316	29.785	Line 0
xmr-11.002	illitic phengite	/	0.28	0.24	1908	2212	1.2	illite	1.2	1908	2212	92.316	29.785	Line 0
xmr-12.000	illitic muscovite	/	0.21	0.21	1909	2211	1.0	illite	1.1	1909	2211	92.315	29.785	Line 0
xmr-12.001	illitic phengite	/	0.25	0.24	1909	2211	1.1	illite	1.1	1909	2211	92.315	29.785	Line 0
xmr-12.002	illitic phengite	/	0.24	0.22	1912	2216	1.1	illite	1.1	1912	2216	92.315	29.785	Line 0
xmr-13.000	illitic phengite	/	0.21	0.20	1908	2213	1.0	illite	1.0	1908	2213	92.315	29.786	Line 0
xmr-13.001	illitic muscovite	/	0.20	0.20	1908	2211	1.0	illite	1.0	1908	2211	92.315	29.786	Line 0
xmr-13.002	illitic phengite	/	0.20	0.20	1909	2211	1.0	illite	1.0	1909	2211	92.315	29.786	Line 0
xmr-14.000	illitic muscovite	/	0.23	0.22	1907	2208	1.0	illite, chlorite	/	1907	2208	92.315	29.786	Line 0
xmr-14.001	illitic muscovite	/	0.22	0.22	1907	2208	1.0	illite, chlorite	/	1907	2208	92.315	29.786	Line 0
xmr-14.002	illitic muscovite	/	0.21	0.22	1908	2210	1.0	illite, chlorite	/	1908	2210	92.315	29.786	Line 0
xmr-15.000	illitic muscovite	Kaolinite WX	0.33	0.30	1906	2208	1.1	illite	1.1	1906	2208	92.315	29.787	Line 0
xmr-15.001	illitic muscovite	Kaolinite WX	0.33	0.30	1908	2209	1.1	illite	1.1	1908	2209	92.315	29.787	Line 0
xmr-15.002	illitic muscovite	Kaolinite WX	0.32	0.28	1907	2208	1.1	illite	1.1	1907	2208	92.315	29.787	Line 0
xmr-16.000	illitic muscovite	/	0.33	0.30	1907	2208	1.1	illite	1.1	1907	2208	92.315	29.787	Line 0
xmr-16.001	illitic muscovite	Kaolinite WX	0.33	0.29	1908	2209	1.1	illite	1.1	1908	2209	92.315	29.787	Line 0
xmr-16.002	illitic muscovite	Kaolinite WX	0.34	0.31	1907	2209	1.1	illite	1.1	1907	2209	92.315	29.787	Line 0
xmr-18.000	illitic muscovite	/	0.25	0.27	1909	2205	0.9	illite, chlorite	/	1909	2205	92.315	29.788	Line 0

续表 1
Continued Table 1

样品号	识别矿物 1	识别矿物 2	TSG 自动解释结果				人工解释结果			位置		地质路线
			Dep2200	Dep1900	Pos1900	Pos2200	IC	最终鉴定结果	IC	Pos1900	Pos2200	经纬度
xmr-18.001	illitic muscovite	/	0.24	0.25	1910	2207	1.0	illite, chlorite	/	1910	2207	92.315 29.788 Line 0
xmr-18.002	illitic muscovite	/	0.25	0.27	1910	2207	0.9	illite	0.9	1910	2207	92.315 29.788 Line 0
xmr-19.000	Siderite	phengite	0.27	0.22	1909	2217	1.2	illite, chlorite	/	1909	2217	92.314 29.788 Line 0
xmr-19.001	illitic muscovite	Epidote	0.26	0.26	1907	2212	1.0	illite, chlorite	/	1907	2212	92.314 29.788 Line 0
xmr-19.002	illitic phengite	Epidote	0.25	0.24	1909	2211	1.0	illite, chlorite	/	1909	2211	92.314 29.788 Line 0
xmr-2.000	phengite	/	0.15	0.10	1913	2209	1.4	illite	1.4	1913	2209	92.321 29.778 Line 0
xmr-2.001	phengite	/	0.14	0.11	1909	2211	1.3	illite	1.3	1909	2211	92.321 29.778 Line 0
xmr-2.002	phengite	/	0.12	0.09	1908	2213	1.3	illite	1.3	1908	2213	92.321 29.778 Line 0
xmr-20.000	illitic muscovite	Epidote	0.28	0.29	1907	2210	1.0	illite, chlorite	/	1907	2210	92.314 29.788 Line 0
xmr-20.001	illitic phengite	Epidote	0.27	0.28	1907	2211	1.0	illite, chlorite	/	1907	2211	92.314 29.788 Line 0
xmr-20.002	illitic phengite	Epidote	0.29	0.29	1907	2210	1.0	illite, chlorite	/	1907	2210	92.314 29.788 Line 0
xmr-21.000	illitic muscovite	/	0.25	0.24	1908	2211	1.0	illite	1.0	1908	2211	92.314 29.788 Line 0
xmr-21.001	illitic phengite	Ankerite	0.31	0.24	1907	2210	1.3	illite, chlorite	/	1907	2210	92.314 29.788 Line 0
xmr-21.002	illitic phengite	Epidote	0.21	0.20	1908	2209	1.0	illite, chlorite	/	1908	2209	92.314 29.788 Line 0
xmr-22.000	illitic phengite	/	0.20	0.17	1911	2214	1.2	illite	1.2	1911	2214	92.316 29.790 Line 0
xmr-22.001	illitic phengite	/	0.18	0.16	1907	2214	1.1	illite	1.1	1907	2214	92.316 29.790 Line 0
xmr-22.002	illitic phengite	/	0.17	0.15	1908	2211	1.1	illite	1.1	1908	2211	92.316 29.790 Line 0
xmr-3.000	illitic phengite	/	0.13	0.12	1911	2209	1.1	illite	1.1	1911	2209	92.319 29.779 Line 0
xmr-3.001	illitic muscovite	/	0.22	0.17	1909	2215	1.3	illite, chlorite	/	1909	2215	92.319 29.779 Line 0
xmr-3.002	illitic muscovite	/	0.14	0.11	1911	2211	1.3	illite, chlorite	/	1911	2211	92.319 29.779 Line 0

注: Dep 2 200为2 200 nm吸收深度; Dep1900 为1 900 nm吸收深度; Pos2200 为2 200 nm吸收峰位; Pos1900 为1 900 nm吸收峰位; IC 为伊利石结晶度。

表 2 念村矿区地表样品伊利石结晶度平均结果

Table 2 Average IC value of individual surficial sample in the Niancun ore district

样品号	最后鉴定结果	结晶度	经度	纬度	地质路线	样品号	最后鉴定结果	结晶度	经度	纬度	地质路线
xmr-11	illite	1.2	92.316	29.785	Line 0	xmr-329	illite	0.9	92.320	29.805	Line 3
xmr-12	illite	1.1	92.315	29.785	Line 0	xmr-331	illite	1.4	92.318	29.804	Line 3
xmr-13	illite	1.0	92.315	29.786	Line 0	xmr-333	illite	1.4	92.316	29.801	Line 3
xmr-15	illite	1.1	92.315	29.787	Line 0	xmr-335	illite	1.4	92.319	29.797	Line 3
xmr-16	illite	1.1	92.315	29.787	Line 0	xmr-340	illite	1.4	92.328	29.811	Line 3
xmr-18	illite	0.9	92.315	29.788	Line 0	xmr-341	illite	1.5	92.328	29.811	Line 3
xmr-2	illite	1.3	92.321	29.778	Line 0	xmr-347	illite	0.9	92.329	29.817	Line 3
xmr-21	illite	1.0	92.314	29.788	Line 0	xmr-348	illite	1.9	92.329	29.816	Line 3
xmr-22	illite	1.1	92.316	29.790	Line 0	xmr-351	illite	1.6	92.332	29.813	Line 3
xmr-3	illite	1.1	92.319	29.779	Line 0	xmr-352	illite	1.6	92.332	29.812	Line 3
xmr-4	illite	1.3	92.319	29.779	Line 0	xmr-403	illite	1.4	92.322	29.774	Line 4
xmr-5	illite	1.3	92.320	29.780	Line 0	xmr-404	illite	1.2	92.322	29.774	Line 4
xmr-6	illite	0.7	92.319	29.781	Line 0	xmr-405	illite	1.1	92.322	29.775	Line 4
xmr-8	illite	0.8	92.319	29.782	Line 0	xmr-406	illite	1.1	92.318	29.778	Line 4
xmr-9	illite	1.1	92.317	29.783	Line 0	xmr-407	illite	1.3	92.318	29.779	Line 4
xmr-101	illite	1.2	92.335	29.790	Line 1	xmr-519	illite	1.1	92.295	29.769	Line 5
xmr-102	illite	1.5	92.334	29.792	Line 1	xmr-520	illite	1.4	92.292	29.768	Line 5
xmr-104	illite	1.8	92.333	29.793	Line 1	xmr-521	illite	1.0	92.291	29.767	Line 5
xmr-105	illite	0.9	92.332	29.793	Line 1	xmr-523	illite	1.1	92.290	29.766	Line 5
xmr-106	illite	1.4	92.331	29.793	Line 1						
xmr-525	illite	1.0	92.288	29.766	Line 5	xmr-107	illite	1.6	92.331	29.793	Line 1
xmr-526	illite	1.0	92.288	29.769	Line 5	xmr-109	illite	2.5	92.329	29.793	Line 1
xmr-110	illite	1.6	92.328	29.793	Line 1	xmr-601	illite	1.0	92.315	29.815	Line 6
xmr-114	illite	1.1	92.328	29.792	Line 1	xmr-608	illite	1.6	92.318	29.814	Line 6
xmr-115	illite	1.0	92.327	29.791	Line 1	xmr-609	illite	1.3	92.320	29.811	Line 6
xmr-116	illite	0.9	92.326	29.790	Line 1	xmr-611	illite	1.2	92.319	29.810	Line 6
xmr-117	illite	1.1	92.326	29.790	Line 1	xmr-612	illite	1.0	92.319	29.809	Line 6
xmr-118	illite	0.9	92.326	29.790	Line 1	xmr-616	illite	0.9	92.314	29.807	Line 6
xmr-119	illite	1.1	92.326	29.789	Line 1	xmr-617	illite	1.1	92.313	29.808	Line 6
xmr-120	illite	2.1	92.326	29.789	Line 1	xmr-619	illite	1.4	92.312	29.808	Line 6
xmr-122	illite	1.3	92.327	29.789	Line 1	xmr-620	illite	1.2	92.313	29.808	Line 6
xmr-123	illite	1.4	92.327	29.788	Line 1	xmr-621	illite	1.0	92.314	29.810	Line 6
xmr-124	illite	0.9	92.327	29.788	Line 1	xmr-622	illite	1.1	92.314	29.811	Line 6
xmr-125	illite	1.5	92.328	29.788	Line 1	xmr-631	illite	1.5	92.320	29.764	Line 6

续表 2
Continued Table 2

样品号	最后鉴定结果	结晶度	经度	纬度	地质路线	样品号	最后鉴定结果	结晶度	经度	纬度	地质路线
xmr-127	illite	1.2	92.329	29.786	Line 1	xmr-633	illite	1.4	92.321	29.765	Line 6
xmr-139	illite	1.4	92.320	29.791	Line 1	xmr-634	illite	1.1	92.323	29.765	Line 6
xmr-142	illite	1.0	92.313	29.791	Line 1	xmr-635	illite	1.0	92.323	29.766	Line 6
xmr-144	illite	1.1	92.311	29.791	Line 1	xmr-637	illite	1.1	92.324	29.767	Line 6
xmr-146	illite	1.1	92.312	29.790	Line 1	xmr-638	illite	1.8	92.324	29.768	Line 6
XMR-302	illite	1.2	92.335	29.806	Line 3-2	xmr-639	illite	1.0	92.324	29.768	Line 6
XMR-303	illite	1.0	92.335	29.806	Line 3-2	xmr-641	illite	1.6	92.326	29.770	Line 6
XMR-305	illite	1.3	92.334	29.805	Line 3-2	xmr-642	illite	0.9	92.327	29.771	Line 6
XMR-306	illite	1.7	92.332	29.805	Line 3-2	xmr-646	illite	1.9	92.330	29.776	Line 6
XMR-308	illite	1.3	92.329	29.803	Line 3-2	xmr-656	illite	1.2	92.335	29.787	Line 6
XMR-309	illite	1.4	92.328	29.802	Line 3-2	xmr-657	illite	1.1	92.320	29.762	Line 6
XMR-312	illite	1.0	92.325	29.801	Line 3-2	xmr-659	illite	0.8	92.319	29.760	Line 6
XMR-313	illite	2.7	92.325	29.800	Line 3-2	xmr-660	illite	1.1	92.318	29.758	Line 6
XMR-314	illite	1.7	92.325	29.799	Line 3-2	xmr-701	illite	1.2	92.314	29.816	Line 7
XMR-315	illite	1.9	92.326	29.798	Line 3-2	xmr-702	illite	1.1	92.313	29.816	Line 7
XMR-316	illite	0.6	92.326	29.796	Line 3-2	xmr-703	illite	1.4	92.313	29.816	Line 7
xmr-301	illite	1.8	92.341	29.806	Line 3	xmr-704	illite	1.2	92.312	29.816	Line 7
xmr-308	illite	1.7	92.335	29.808	Line 3	xmr-705	illite	1.6	92.312	29.817	Line 7
xmr-310	illite	1.3	92.334	29.808	Line 3	xmr-707	illite	1.5	92.310	29.817	Line 7
xmr-312	illite	1.7	92.330	29.809	Line 3	xmr-708	illite	1.1	92.310	29.817	Line 7
xmr-317	illite	1.5	92.328	29.807	Line 3	xmr-718	illite	1.3	92.308	29.817	Line 7
xmr-318	illite	3.1	92.327	29.806	Line 3	xmr-719	illite	1.1	92.309	29.817	Line 7
xmr-319	illite	1.0	92.327	29.806	Line 3	xmr-721	illite	1.3	92.310	29.817	Line 7
xmr-321	illite	1.8	92.326	29.806	Line 3	xmr-803	illite	1.4	92.305	29.811	Line 8
xmr-324	illite	1.7	92.324	29.806	Line 3	xmr-810	illite	1.3	92.297	29.809	Line 8
xmr-325	illite	1.2	92.323	29.806	Line 3	xmr-811	illite	1.3	92.297	29.809	Line 8
xmr-326	illite	1.2	92.323	29.806	Line 3	xmr-816	illite	1.1	92.294	29.806	Line 8
xmr-327	illite	1.4	92.321	29.806	Line 3	xmr-818	illite	1.1	92.305	29.808	Line 8
xmr-328	illite	1.1	92.320	29.806	Line 3	xmr-901	illite	1.2	92.305	29.799	Line 9

注: illite—伊利石。

表 3 念村矿区地表样品伊利石 Al-OH 吸收峰位平均结果

Table 3 Wavelength position (average value for individual sample) of the illite Al-OH absorption of the surficial samples in the Niancun ore district

样品号	最后鉴定结果	Pos1900	Pos2200	地质路线	样品号	最后鉴定结果	Pos1900	Pos2200	地质路线
xmr-1	illite, chlorite	1908	2215	Line 0	XMR-316	illite	1910	2206	Line 3-2
xmr-10	illite, chlorite	1910	2212	Line 0	xmr-301	illite	1909	2200	Line 3
xmr-11	illite	1908	2213	Line 0	xmr-307	illite, chlorite	/	2210	Line 3
xmr-12	illite	1909	2211	Line 0	xmr-308	illite	1910	2209	Line 3
xmr-13	illite	1908	2212	Line 0	xmr-309	illite, chlorite	1912	2210	Line 3
xmr-14	illite, chlorite	1907	2208	Line 0	xmr-310	illite	1906	2212	Line 3
xmr-15	illite	1907	2208	Line 0	xmr-312	illite	1911	2201	Line 3
xmr-16	illite	1907	2209	Line 0	xmr-317	illite	1910	2202	Line 3
xmr-18	illite	1910	2207	Line 0	xmr-318	illite	1911	2201	Line 3
xmr-19	illite, chlorite	1908	2211	Line 0	xmr-319	illite	1910	2193	Line 3
xmr-2	illite	1910	2211	Line 0	xmr-321	illite	1909	2201	Line 3
xmr-20	illite, chlorite	1907	2210	Line 0	xmr-324	illite	1911	2206	Line 3
xmr-21	illite	1908	2210	Line 0	xmr-325	illite	1910	2192	Line 3
xmr-22	illite	1909	2213	Line 0	xmr-326	illite	1909	2193	Line 3
xmr-3	illite	1911	2209	Line 0	xmr-327	illite	1909	2210	Line 3
xmr-4	illite	1907	2215	Line 0	xmr-328	illite	1908	2215	Line 3
xmr-5	illite	1909	2213	Line 0	xmr-329	illite	1908	2212	Line 3
xmr-6	illite	1911	2208	Line 0	xmr-331	illite	1911	2213	Line 3
xmr-8	illite	1913	2200	Line 0	xmr-333	illite	1913	2214	Line 3
xmr-9	illite	1907	2212	Line 0	xmr-335	illite	1912	2214	Line 3
xmr-101	illite	1909	2205	Line 1	xmr-340	illite	1909	2194	Line 3
xmr-102	illite	1911	2202	Line 1	xmr-341	illite	1913	2201	Line 3
xmr-104	illite	1909	2196	Line 1	xmr-346	illite, chlorite	1909	2211	Line 3
xmr-105	illite	1915	2203	Line 1	xmr-347	illite	1910	2203	Line 3
xmr-106	illite	1910	2207	Line 1	xmr-348	illite	1909	2206	Line 3
xmr-107	illite	1908	2194	Line 1	xmr-351	illite	1912	2202	Line 3
xmr-109	illite	1911	2205	Line 1	xmr-352	illite	1912	2205	Line 3
xmr-110	illite	1909	2197	Line 1	xmr-403	illite	1909	2198	Line 4

续表 3
Continued Table 3

样品号	最后鉴定结果	Pos1900	Pos2200	地质路线	样品号	最后鉴定结果	Pos1900	Pos2200	地质路线
xmr-113	Chlorite, illite	1921	2219	Line 1	xmr-404	illite	1909	2209	Line 4
xmr-114	illite	1907	2197	Line 1	xmr-405	illite	1909	2211	Line 4
xmr-115	illite	1908	2197	Line 1	xmr-406	illite	1908	2212	Line 4
xmr-116	illite	1911	2198	Line 1	xmr-407	illite	1909	2211	Line 4
xmr-117	illite	1911	2198	Line 1	xmr-519	illite	1909	2211	Line 5
xmr-118	illite	1909	2203	Line 1	xmr-520	illite	1911	2209	Line 5
xmr-119	illite	1910	2197	Line 1	xmr-521	illite	1908	2209	Line 5
xmr-120	illite	1910	2206	Line 1	xmr-523	illite	1906	2212	Line 5
xmr-122	illite	1909	2197	Line 1	xmr-525	illite	1909	2207	Line 5
xmr-123	illite	1910	2198	Line 1	xmr-526	illite	1911	2220	Line 5
xmr-124	illite	1911	2202	Line 1	xmr-527	illite	1911	2210	Line 5
xmr-125	illite	1910	2196	Line 1	xmr-601	illite	1908	2210	Line 6
xmr-127	illite	1909	2201	Line 1	xmr-608	illite	1909	2213	Line 6
xmr-138	illite, chlorite	1913	2210	Line 1	xmr-609	illite	1908	2212	Line 6
xmr-139	illite	1908	2210	Line 1	xmr-610	illite, chlorite	1908	2219	Line 6
xmr-142	illite	1906	2209	Line 1	xmr-611	illite	1911	2208	Line 6
xmr-144	illite	1907	2212	Line 1	xmr-612	illite	1908	2211	Line 6
xmr-146	illite	1908	2209	Line 1	xmr-613	illite, chlorite	1912	2209	Line 6
XMR-302	illite	1907	2210	Line 3-2	xmr-616	illite	1910	2208	Line 6
XMR-303	illite	1909	2212	Line 3-2	xmr-617	illite	1910	2211	Line 6
XMR-304	illite, chlorite	1907	2212	Line 3-2	xmr-618	illite, chlorite	1918	2211	Line 6
XMR-305	illite	1909	2208	Line 3-2	xmr-619	illite	1914	2212	Line 6
XMR-306	illite	1909	2199	Line 3-2	xmr-620	illite	1908	2204	Line 6
XMR-308	illite	1908	2200	Line 3-2	xmr-621	illite	1908	2205	Line 6
XMR-309	illite	1915	2206	Line 3-2	xmr-622	illite	1908	2211	Line 6
XMR-312	illite	1911	2200	Line 3-2	xmr-625	illite, chlorite	1908	2204	Line 6
XMR-313	illite	1909	2207	Line 3-2	xmr-631	illite	1908	2205	Line 6
XMR-314	illite	1910	2199	Line 3-2	xmr-633	illite	1910	2206	Line 6

注: Pos2200 为 2 200 nm 吸收峰位; Pos1900 为 1 900 nm 吸收峰位。Chlorite—绿泥石; illite—伊利石。

表 3 念村矿区地表样品伊利石 Al-OH 吸收峰位平均结果

Table 3 Wavelength position (average value for individual sample) of the illite Al-OH absorption of the surficial samples in the Niancun ore district

样品号	最后鉴定结果	Pos1900	Pos2200	地质路线	样品号	最后鉴定结果	Pos1900	Pos2200	地质路线
xmr-1	illite, chlorite	1908	2215	Line 0	XMR-316	illite	1910	2206	Line 3-2
xmr-10	illite, chlorite	1910	2212	Line 0	xmr-301	illite	1909	2200	Line 3
xmr-11	illite	1908	2213	Line 0	xmr-307	illite, chlorite	/	2210	Line 3
xmr-12	illite	1909	2211	Line 0	xmr-308	illite	1910	2209	Line 3
xmr-13	illite	1908	2212	Line 0	xmr-309	illite, chlorite	1912	2210	Line 3
xmr-14	illite, chlorite	1907	2208	Line 0	xmr-310	illite	1906	2212	Line 3
xmr-15	illite	1907	2208	Line 0	xmr-312	illite	1911	2201	Line 3
xmr-16	illite	1907	2209	Line 0	xmr-317	illite	1910	2202	Line 3
xmr-18	illite	1910	2207	Line 0	xmr-318	illite	1911	2201	Line 3
xmr-19	illite, chlorite	1908	2211	Line 0	xmr-319	illite	1910	2193	Line 3
xmr-2	illite	1910	2211	Line 0	xmr-321	illite	1909	2201	Line 3
xmr-20	illite, chlorite	1907	2210	Line 0	xmr-324	illite	1911	2206	Line 3
xmr-21	illite	1908	2210	Line 0	xmr-325	illite	1910	2192	Line 3
xmr-22	illite	1909	2213	Line 0	xmr-326	illite	1909	2193	Line 3
xmr-3	illite	1911	2209	Line 0	xmr-327	illite	1909	2210	Line 3
xmr-4	illite	1907	2215	Line 0	xmr-328	illite	1908	2215	Line 3
xmr-5	illite	1909	2213	Line 0	xmr-329	illite	1908	2212	Line 3
xmr-6	illite	1911	2208	Line 0	xmr-331	illite	1911	2213	Line 3
xmr-8	illite	1913	2200	Line 0	xmr-333	illite	1913	2214	Line 3
xmr-9	illite	1907	2212	Line 0	xmr-335	illite	1912	2214	Line 3
xmr-101	illite	1909	2205	Line 1	xmr-340	illite	1909	2194	Line 3
xmr-102	illite	1911	2202	Line 1	xmr-341	illite	1913	2201	Line 3
xmr-104	illite	1909	2196	Line 1	xmr-346	illite, chlorite	1909	2211	Line 3
xmr-105	illite	1915	2203	Line 1	xmr-347	illite	1910	2203	Line 3
xmr-106	illite	1910	2207	Line 1	xmr-348	illite	1909	2206	Line 3
xmr-107	illite	1908	2194	Line 1	xmr-351	illite	1912	2202	Line 3
xmr-109	illite	1911	2205	Line 1	xmr-352	illite	1912	2205	Line 3
xmr-110	illite	1909	2197	Line 1	xmr-403	illite	1909	2198	Line 4

续表 3
Continued Table 3

样品号	最后鉴定结果	Pos1900	Pos2200	地质路线	样品号	最后鉴定结果	Pos1900	Pos2200	地质路线
xmr-113	Chlorite, illite	1921	2219	Line 1	xmr-404	illite	1909	2209	Line 4
xmr-114	illite	1907	2197	Line 1	xmr-405	illite	1909	2211	Line 4
xmr-115	illite	1908	2197	Line 1	xmr-406	illite	1908	2212	Line 4
xmr-116	illite	1911	2198	Line 1	xmr-407	illite	1909	2211	Line 4
xmr-117	illite	1911	2198	Line 1	xmr-519	illite	1909	2211	Line 5
xmr-118	illite	1909	2203	Line 1	xmr-520	illite	1911	2209	Line 5
xmr-119	illite	1910	2197	Line 1	xmr-521	illite	1908	2209	Line 5
xmr-120	illite	1910	2206	Line 1	xmr-523	illite	1906	2212	Line 5
xmr-122	illite	1909	2197	Line 1	xmr-525	illite	1909	2207	Line 5
xmr-123	illite	1910	2198	Line 1	xmr-526	illite	1911	2220	Line 5
xmr-124	illite	1911	2202	Line 1	xmr-527	illite	1911	2210	Line 5
xmr-125	illite	1910	2196	Line 1	xmr-601	illite	1908	2210	Line 6
xmr-127	illite	1909	2201	Line 1	xmr-608	illite	1909	2213	Line 6
xmr-138	illite, chlorite	1913	2210	Line 1	xmr-609	illite	1908	2212	Line 6
xmr-139	illite	1908	2210	Line 1	xmr-610	illite, chlorite	1908	2219	Line 6
xmr-142	illite	1906	2209	Line 1	xmr-611	illite	1911	2208	Line 6
xmr-144	illite	1907	2212	Line 1	xmr-612	illite	1908	2211	Line 6
xmr-146	illite	1908	2209	Line 1	xmr-613	illite, chlorite	1912	2209	Line 6
XMR-302	illite	1907	2210	Line 3-2	xmr-616	illite	1910	2208	Line 6
XMR-303	illite	1909	2212	Line 3-2	xmr-617	illite	1910	2211	Line 6
XMR-304	illite, chlorite	1907	2212	Line 3-2	xmr-618	illite, chlorite	1918	2211	Line 6
XMR-305	illite	1909	2208	Line 3-2	xmr-619	illite	1914	2212	Line 6
XMR-306	illite	1909	2199	Line 3-2	xmr-620	illite	1908	2204	Line 6
XMR-308	illite	1908	2200	Line 3-2	xmr-621	illite	1908	2205	Line 6
XMR-309	illite	1915	2206	Line 3-2	xmr-622	illite	1908	2211	Line 6
XMR-312	illite	1911	2200	Line 3-2	xmr-625	illite, chlorite	1908	2204	Line 6
XMR-313	illite	1909	2207	Line 3-2	xmr-631	illite	1908	2205	Line 6
XMR-314	illite	1910	2199	Line 3-2	xmr-633	illite	1910	2206	Line 6

注: Pos2200 为 2 200 nm 吸收峰位; Pos1900 为 1 900 nm 吸收峰位。Chlorite—绿泥石; illite—伊利石。

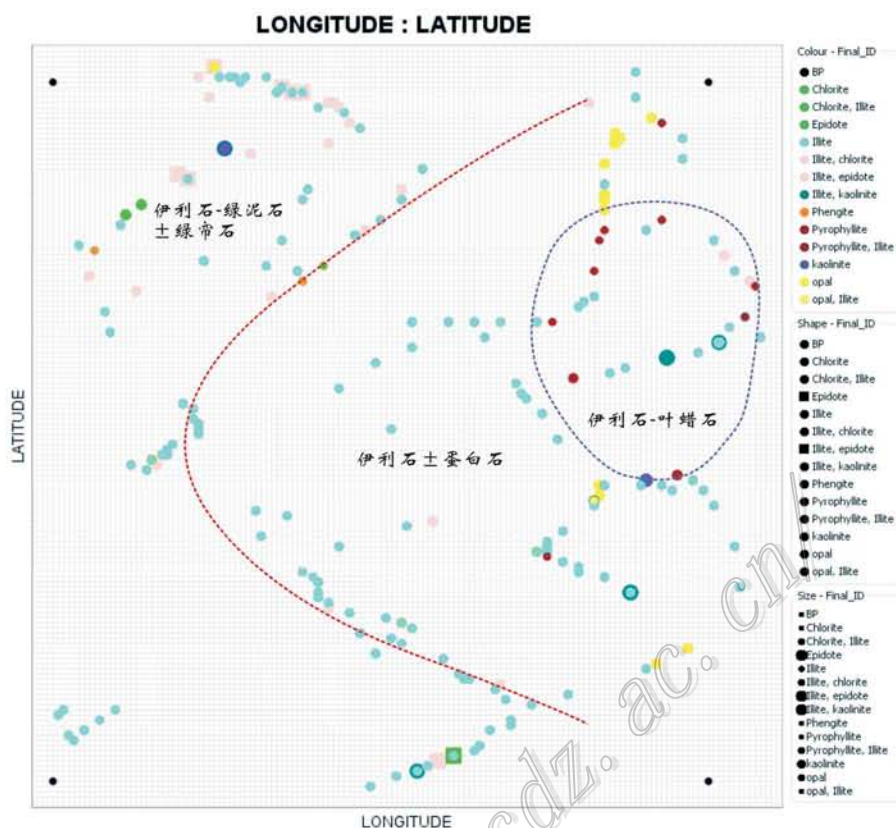


图 7 念村矿区短波红外光谱填图结果

图中的 4 个黑点为矿区界限的 4 个角点,对应图 2 中的矿界点(图 8、9 同)

Fig. 7 SWIR alteration mineral mapping results in the Niancun ore district

Four black dots in the figure (and Fig. 8、9) represent ore district boundaries, which correspond to black dots in Fig. 2

4.2 伊利石光谱学特征及变化规律

伊利石是一种含水层状硅酸盐矿物,属于 2:1 型(即 TOT 型,T 为四面体片,O 为八面体片)结构单元层的二八面体型,分子式为 $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$,其结构中主要有 2 种含氢基团,分别为 Al-OH 和 H_2O 。短波红外光照射时,Al-OH 在 2 200 nm 附近出现特征的吸收,该位置被称为“伊利石 2 200 nm 吸收峰位”,相应吸收峰的深度称为“伊利石 2 200 nm 吸收峰深度”;而 H_2O 则在 1 900 nm 附近出现特征的吸收,该位置被称为“伊利石 1 900 nm 吸收峰位”,相应吸收峰的深度称为“伊利石 1 900 nm 吸收峰深度”(图 5a)。另外,伊利石 2 200 nm 吸收峰深度与 1 900 nm 吸收峰深度的比值,可用来作为“伊利石结晶度指数”,被称作“伊利石结晶度(illite crystallinity, SWIR-IC)”。不过,通过上述计算所得的伊利石结晶度(SWIR-IC)与通过 X 射线粉晶衍射测试所得的伊利石结晶度(XRD-IC)不是同一个概念,后者是指伊利石 10 Å

衍射峰的半高宽。Chang 等依据相同样品的测试结果显示 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伊利石的结晶度(Chang et al., 2011)。伊利石 2 200 nm 吸收峰位和吸收峰深度、1 900 nm 吸收峰位和吸收峰深度及伊利石结晶度(IC)构成了伊利石最为重要的几个光谱特征参数(图 5a)。

该矿区地表样品中的伊利石,其 2 200 nm 吸收峰位变化于 2 192 ~ 2 220 nm 之间,主要集中于 2 203 ~ 2 213 nm;1 900 nm 吸收峰位变化于 1 906 ~ 1 922 nm 之间,主要集中于 1 904 ~ 1 914 nm;伊利石结晶度变化于 0.6 ~ 3.1 之间,主要集中在 1.0 ~ 1.8。在空间上,伊利石 2 200 nm 吸收峰位及结晶度具有明显的变化规律:在靠近矿区东部的伊利石-叶蜡石蚀变区域,伊利石结晶度的值明显较高(>1.6, 图 8),而伊利石 2 200 nm 吸收峰位则明显较低(< 2 203 nm, 图 9)。伊利石 1 900 nm 吸收峰位在空间上尚未发现规律的变化。

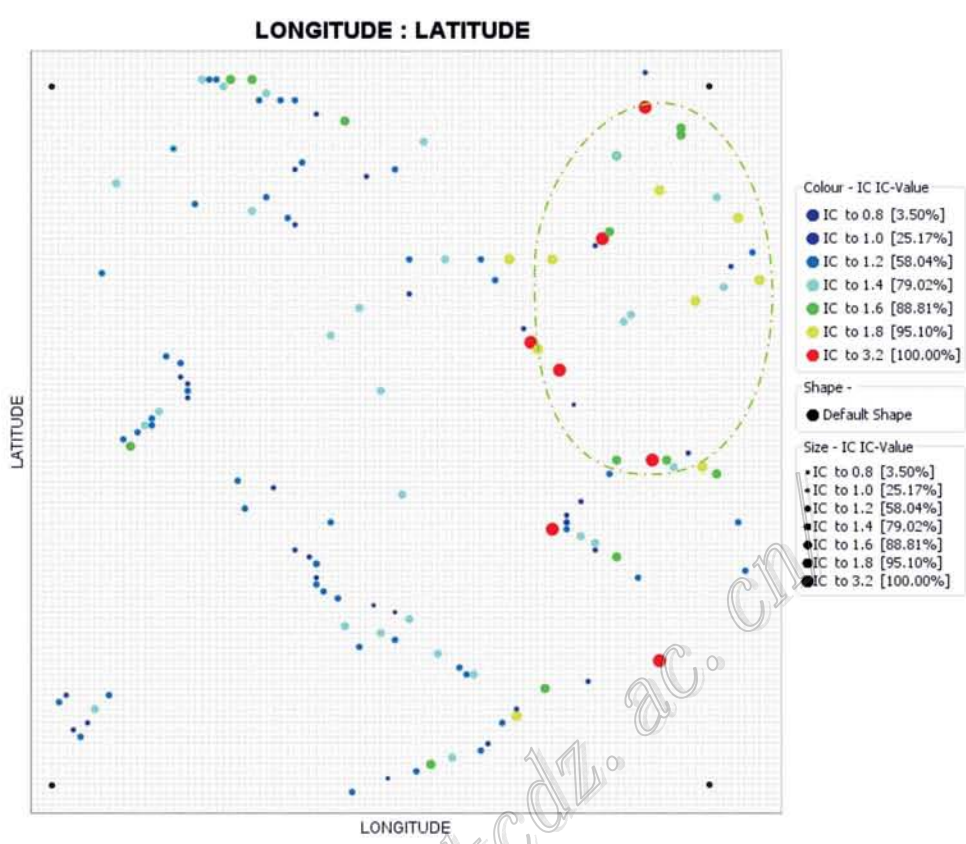


图 8 念村矿区伊利石结晶度

显示出明显的变化规律,靠近矿区东部伊利石结晶度明显较高,绿虚线框范围内的伊利石显示出较高结晶度(>1.6)

Fig. 8 Spatial variation of illite crystallinity of the surficial samples in the Niancun ore district

The IC value is obviously higher (>1.6) in the eastern portion of the district (the area depicted by green dash line)

钻孔 ZK01 中的伊利石,其 2 200 nm 吸收峰位变化于 2 194~2 216 nm 之间,平均为 2 207 nm; 1 900 nm 吸收峰位变化于 1 907~1 923 nm 之间,平均为 1 911 nm;伊利石结晶度变化于 1.1~1.9,平均为 1.6。在空间上,伊利石 2 200 nm 吸收峰位及结晶度的变化规律较为明显:浅部样品,2 200 nm 吸收峰位较大(>2 210 nm)、结晶度较低(~1.1),随样品深度的增加,2 200 nm 吸收峰位逐渐降低(图 3C)、结晶度逐渐增加(图 3D)。不过,伊利石 1 900 nm 吸收峰位随样品深度变化无明显变化规律。

5 讨 论

5.1 矿区剥蚀程度及成矿潜力

对于一个矿床,特别是斑岩矿床来说,准确判断

其剥蚀程度对于下一步的勘查决策至关重要。本次研究的野外观察及短波红外光谱测量结果越来越清楚地显示出,相对于冈底斯带内其他中新世斑岩铜矿床,念村矿区的剥蚀程度要浅得多,这是因为:①该矿区内,新生代火山岩(林子宗组)仍大量存在,表明该矿区的剥蚀程度相比其南部的驱龙-甲玛矿集区浅得多,在驱龙-甲玛矿集区,由于剥蚀已见不到林子宗火山岩;②该矿区地表蚀变以伊利石、叶蜡石、绿泥石、蛋白石为主(图 7),显示出高硫型浅成低温热液矿床热液蚀变的特征。Sillitoe(2010)最近更新的斑岩铜系统蚀变矿化分带模型,为定性评价念村矿区的剥蚀程度提供了一个较好的范本。依据念村矿区地表蚀变组合(图 7),通过与该模型对比,基本上确定了念村矿区是一个保留有部分高硫浅成低温热液系统的斑岩矿床(图 10)。

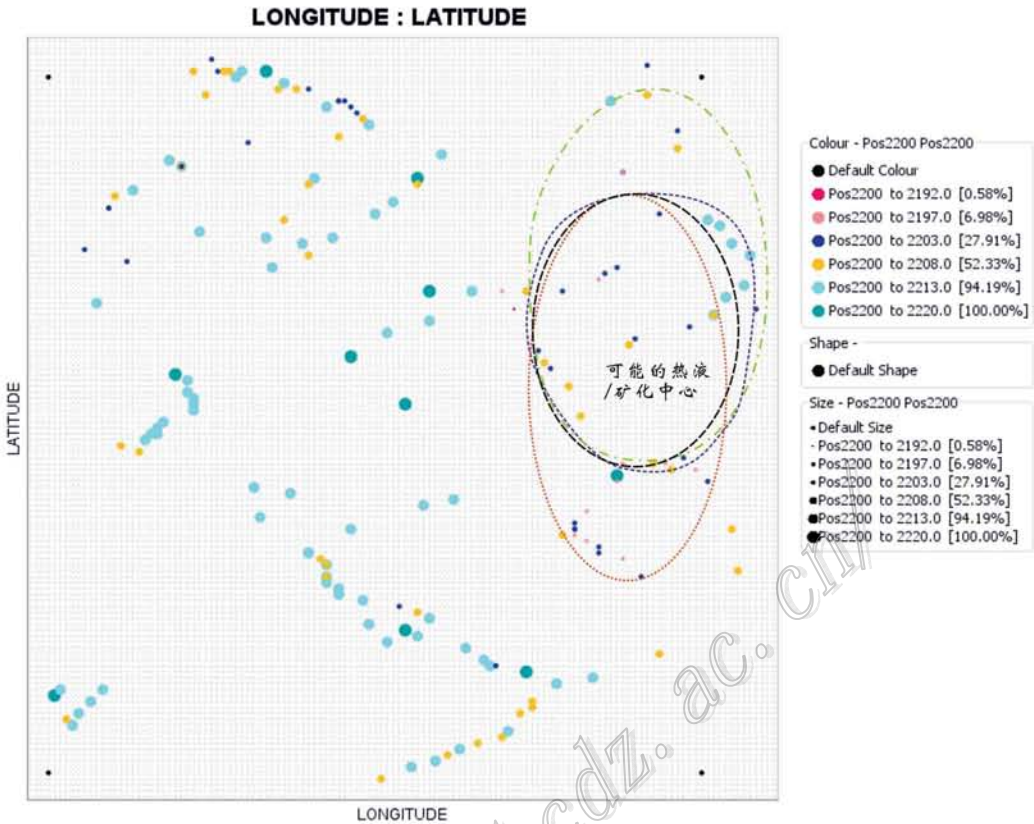


图 9 念村矿区伊利石 2 200 nm 吸收峰位空间分布规律图

矿区东部伊利石 2 200nm 吸收峰位明显较小(粉色的椭圆范围);另外,图中将念村矿床伊利石 2 200 nm 吸收峰位较小区域(粉色的椭圆范围)、伊利石结晶度值较大的区域(>1.6,绿色虚线范围)及叶蜡石主要分布区域(蓝色虚线范围)叠加在一起,三者的交集部位可能为矿床的热液/矿化的中心(图中黑色椭圆所示范围)

Fig. 9 Spatial variation of the wavelength position of the illite Al-OH absorption of the surficial samples in the Niancun ore district

It is relatively lower (<2 203 nm) in the eastern portion of the ore district (the area depicted by pink dash line). Additionally, the area of illite-pyrophyllite alteration (limited by blue dash line) and area with higher IC value (delineated by green ellipse) are also plotted in the figure, and the intersection area of them (shown by black ellipse) are thought to be hydrothermal center of the deposit

对于斑岩铜矿系统来说,要形成一个大型甚至超大型矿床,需要含矿岩浆出溶足够富含金属、硫的流体,同时,要求成矿物质得以有效卸载。纵观念村矿区,以下证据显示其具有较大的成矿潜力:① 矿区热液蚀变规模巨大(约 30 km²),表明该矿区曾有大规模的流体经过;② 在低 pH 值(约为 2, Evans et al., 1988)条件下才能形成的叶蜡石在该矿区局部发育,表明引起蚀变的流体中有岩浆热液组分;③ 钻孔 ZK01 中出现大量的黄铁矿,在所分析的 73 件探槽样品中,有 32 件样品的 $w(\text{Au})$ 大于 0.2 g/t^①,表明引起蚀变的流体具有较高的 S 及金属含量,且

得到了有效卸载;④ 该矿床的剥蚀程度浅,大部分矿体可得以保留。

5.2 可能的热液/矿化中心

对于剥蚀程度浅、尚处于普查阶段的斑岩矿床(如念村)来说,如能快速确定热液/矿化中心,无疑将会大幅度节省勘查工程的成本,并推进勘查的进程。在念村矿区目前所识别出的 7 种热液蚀变矿物中,伊利石所属的白云母组矿物的 Al-OH 吸收峰位与热液/矿化中心常显示出系统的变化规律。如 Herrmann 等(2001)在研究澳大利亚的一些块状硫化物矿床时发现,在靠近矿体或强蚀变岩石之处,

① 西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队. 2006. 西藏自治区墨竹工卡县夏玛日铜多金属矿区 2006 年度普查工作总结. 内部资料.

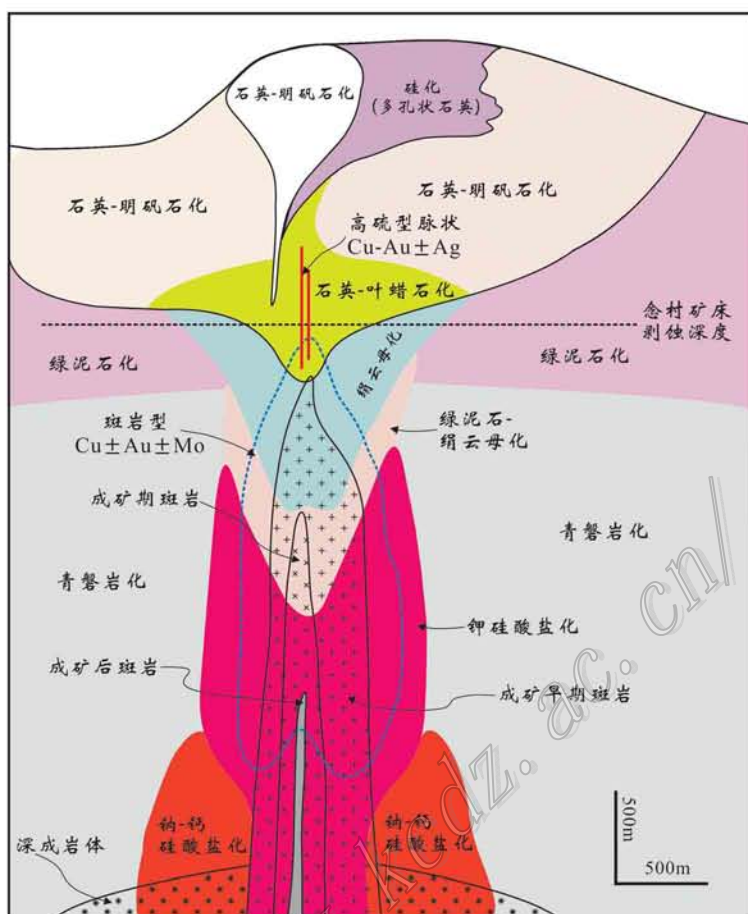


图 10 斑岩铜矿床蚀变矿化分带模型(据 Sillitoe, 2010 修改)
显示念村矿床的剥蚀程度

Fig. 10 Generalized alteration-mineralization zoning pattern for porphyry Cu deposits
(modified after Sillitoe, 2010), showing erosion degree of the Niancun deposit

白云母组矿物的2 200 nm吸收峰位较小,当远离时,则较大;Jones等(2005)在研究加拿大Myra Falls块状硫化物矿床时,也发现了类似的规律。Yang等(2005)在研究新疆土屋斑岩Cu-Au矿床时发现,铜矿化岩石中绢云母的Al-OH吸收峰位多小于2 206 nm,而安山质围岩中绢云母的这一参数则具有较大的变化范围(2 196~2 218 nm),整体也显示出靠近矿体绢云母的Al-OH吸收峰位较小的规律。当然,也有一些矿床的蚀变矿物Al-OH吸收峰位无系统变化规律,如日本的Hishikari浅成低温热液矿床(Yang et al., 2005)。伊利石结晶度(IC)与热液/矿化中心也显示出系统的变化规律。如Duba等(1983)在研究加拿大魁北克东部地区的一些铜矿床时发现,靠近热液中心,XRD-IC较小(SWIR-IC会显示出相反的规律,下同),而远离热液中心,XRD-IC逐渐增大;Jin等(2001)在研究德兴斑岩铜

矿的伊利石结晶度时也发现,伊利石的XRD-IC与铜品位呈明显的负相关,蚀变、矿化越强,XRD-IC越低。

伊利石Al-OH吸收峰位及结晶度之所以与热液/矿化中心有系统的变化规律,可能是因为这些参数与矿物的形成温度密切相关。在高温条件下,伊利石最接近理想的配比成分;随着温度的降低,其四面体位置的Al+K逐渐地被Si和一些缺陷所替代(赵利青等,2008),从而导致层间位置容纳了更多的H₂O。高的H₂O含量会引起较强的1 900 nm吸收,致使伊利石1 900 nm吸收深度值增大,SWIR-IC值降低。而Al-OH吸收峰位则与伊利石分子结构内八面体中的w(Al)明显的负相关(Scott et al., 1997)。在高温条件下,伊利石八面体中的w(Al)较高,对应于较低的Al-OH吸收峰位;随着温度降低,w(Al)降低,Al-OH吸收峰位则逐渐增高。

如果接受多数热液矿床内白云母组矿物的 Al-OH 吸收峰位、结晶度(SWIR-IC)与热液/矿化中心所呈现的变化规律,那么,有理由相信:念村矿区东部伊利石 Al-OH 吸收峰位较小和 SWIR-IC 值较大的区域,可能是该矿床的热液/矿化中心(图 9)。这与该矿床蚀变分带所反映出来的热液/矿化中心相吻合。依据 Sillito(2010)的蚀变矿化模型,叶蜡石化应更靠近热液中心,而本次研究通过伊利石结晶度及 2 200 nm 吸收峰位所圈定的热液中心,与伊利石-叶蜡石化组合具有非常好的套合关系(图 9)。根据侯增谦等(2012)的斑岩-热液系统模型,以叶蜡石化为流体活动中心的热液蚀变,在平面上可以大规模侧向扩展,形成面积性的蚀变晕带(达 30 km²);在空间上则处于斑岩铜矿系统的顶部,构成大规模的蚀变岩盖(alteration blanket)。

5.3 对矿区下一步勘查的建议

通过本次研究,圈定了念村矿床热液/矿化中心的位置,并提出了对工程部署的建议。

由于念村矿区的整体工作程度很低,故建议在本次圈定的热液/矿化中心的范围内,适当开展物探工作(如电法)后,再布置钻探工程,要明确钻孔应布置的深度,以确定矿体的位置,并最终实现矿床的快速查找和突破。

6 结 论

野外地质调查及蚀变矿物短波红外光谱测量结果显示,位于冈底斯斑岩铜矿带东段的念村矿区,其地表出现的蚀变矿物主要有伊利石、绿泥石、叶蜡石、蛋白石等。对照斑岩铜系统的蚀变分带模式,可确定该矿区应为保留有部分浅成低温热液系统的斑岩铜系统,其蚀变规模大、剥蚀程度浅,具有较大的找矿潜力。

伊利石结晶度及 Al-OH 吸收峰位,这些通常被认为与伊利石形成温度有关的光谱学参数,在念村矿区呈现出系统的变化规律:在该矿区东北部,伊利石结晶度较大(>1.6),Al-OH 吸收峰位较小(<2 203 nm);而在该区域的外围,伊利石结晶度变小,Al-OH 吸收峰位变大。这表明该区域的伊利石具有更高的形成温度,可能是矿床热液/矿化中心的位置。

据上,笔者建议,在本次研究所圈定的热液/矿化中心范围内,在适当开展物探工作的基础上,尽快

布置勘查工程进行验证,以实现矿床的尽快查找和突破。

志 谢 在蚀变矿物短波红外光谱研究过程中,始终得到澳大利亚 James Cook 大学常兆山老师的指导和帮助,在此深表感谢。感谢澳大利亚 AusSpec International 公司 Paul Gamson 博士为笔者提供了 TSG v.7 试用版。中铁资源地勘公司的徐庆生研究员及武警黄金地质研究所的葛良胜研究员审阅了本论文,并提出了建设性意见,在此表示感谢。另外,刘英超、张松、李秋耘、赵晓燕、黄克贤、孙清钟、许博、王瑞等参与了野外工作,在此一并谢忱。

参考文献/References

- 曹 烨,李胜荣,申俊峰,要梅娟,李庆康,毛付龙. 2008. 便携式短波红外光谱矿物测量仪(PIMA)在河南前河金矿热液蚀变研究中的应用[J]. 地质与勘探, 44: 82-86.
- 侯增谦,郑远川,杨志明. 2012. 大陆碰撞成矿作用: I. 西藏新生代斑岩成矿系统[J]. 矿床地质, 31(4): 647-670.
- 连长云,章 革,元春华. 2005a. 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: 621-637.
- 连长云,章 革,元春华,杨 凯. 2005b. 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, 32: 483-495.
- 徐庆生,郭 健,刘 阳,黄树峰,李秋平,陈玉水. 2011. 近红外光谱矿物分析技术在帕南铜-钼-钨矿区蚀变矿物填图中的应用[J]. 地质与勘探, 47: 107-112.
- 杨志明,侯增谦,宋玉财,李振清,夏代详,潘凤维. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与矿化[J]. 矿床地质, 27: 279-318.
- 章 革,连长云,元春华. 2004. PIMA 在云南普朗斑岩铜矿矿物识别中的应用[J]. 地学前缘, 11(4): 460.
- 章 革,连长云,王润生. 2005. 便携式短波红外矿物分析仪(PIMA)在西藏墨竹工卡县驱龙铜矿区矿物填图中的应用[J]. 地质通报, 24: 480-484.
- 赵利青,邓 军,原海涛,李晓英. 2008. 台上金矿床蚀变带短波红外光谱研究[J]. 地质与勘探, 44: 58-63.
- Arne D, Bierlein F, McKnight S and Mernagh T. 1999. Recognition of wall-rock alteration in sediment-hosted mesothermal gold deposits: Examples from central Victoria[J]. Australian Institute of Geoscientists Bulletin, 30: 89-96.
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Garcia J, Gemmell J B, McKnight S and Cuisson A L. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines[J]. Econ. Geol., 106: 1365-1398.

- Chang Z S and Yang Z M. 2012. Evaluation of inter-instrument variations between short wavelength infra-red (SWIR) devices[J]. *Econ. Geol.* , (in press).
- Duba D and Williams-Jones A E. 1983. The application of illite crystallinity , organic matter reflectance , and isotopic techniques to mineral exploration : A case study in southwestern Gaspé , Quebec[J]. *Econ. Geol.* , 78 : 1350-1363.
- Evans B W and Guggenheim S. 1988. Talc , pyrophyllite and related mineral[A]. In : Bailey S W , Ed. *Hydrous phyllosilicates(Exclusion of micas)* [M]. *Reviews in Mineralogy* , 19 : 225-294.
- Hauff P and Cocks T. 1992. Short wave infra-red spectroscopy techniques applied to exploration : Emphasis on alteration mineralogy [J]. *Contributions of the Economic Geology Research Unit* , 44 : 72-74.
- Herrmann W , Blake M , Doyle M , Huston D , Kamprad J , Merry N and Pontual S. 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]. *Econ. Geol.* , 96 : 939-955.
- Jin Z D , Zhu J C , Ji J F , Lu X W and Li F C. 2001. Ore-forming fluid constraints on illite crystallinity(IC) at Dexing porphyry copper deposit , Jiangxi Province[J]. *Science in China(Series D)* : 44 : 177-184.
- Jones S , Herrmann W and Gemmell J B. 2005. Short wavelength infra-red spectral characteristics of the HW Horizon : Implications for exploration in the Myra Falls volcanic-hosted massive sulfide camp , Vancouver Island , British Columbia , Canada[J]. *Econ. Geol.* , 100 : 273-294.
- Lowell J D and Guilbert J M. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits[J]. *Econ. Geol.* , 65 : 373-408.
- Scott K M and Yang K. 1997. Spectral reflectance studies of white mica[R]. CSIRO Exploration and Mining Report 439R , Sydney , Australia.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.* , 105 : 3-41.
- Thompson A J B , Hauff P L and Robitaille J A. 1999. Alteration mapping in exploration : Application of short-wave infra-red (SWIR) spectroscopy[J]. *SEG Newsletter* , 39 : 16-27.
- Thompson A J B , Scott K , Huntington J and Yang K. 2009. Mapping mineralogy with reflectance spectroscopy : Examples from volcanogenic massive sulfide deposits[J]. *Reviews in Economic Geology* , 16 : 25-40.
- Yang K , Huntington J F and Scott K M. 1998. Spectral characterisation of the hydrothermal alteration at Hishikari , Japan[R]. *Proceedings-International Symposium on Water-Rock Interaction* , 9 : 587-590.
- Yang K , Huntington J F , Browne P R L and Ma C. 2000. An infra-red spectral reflectance study of hydrothermal alteration minerals from the Te Mihi sector of the Wairakei geothermal system , New Zealand[J]. *Geothermics* , 29 : 377-392.
- Yang K , Browne P R L , Huntington J F and Walshe J L. 2001. Characterising the hydrothermal alteration of the Broadlands-Ohaaki geothermal system , New Zealand , using short-wave infra-red spectroscopy[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , 106 : 53-65.
- Yang K , Huntington J F , Scott K M and Mason P. 2004. Compositional variations of white mica in the footwall hydrothermal alteration system of the Hellyer Zn-Pb deposit , Tasmania[M]. *Publication Series-Australasian Institute of Mining and Metallurgy* , 5 : 283-288.
- Yang K , Lian C , Huntington J F , Peng Q and Wang Q. 2005. Infra-red spectral reflectance characterization of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu-Au deposit , Xinjiang , China[J]. *Mineralium Deposita* , 40 : 324-336.
- Yang K , Huntington J F , Gemmell J B and Scott K M. 2011. Variations in composition and abundance of white mica in the hydrothermal alteration system at Hellyer , Tasmania , as revealed by infra-red reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Geochemical Exploration* , 108 : 143-156.