

# 高硫-低硫化浅成低温热液矿床的短波红外矿物 分布特征及找矿模型

——以西藏铁格隆南(荣那矿段)、斯弄多矿床为例

郭娜<sup>1,2)</sup>, 黄一入<sup>1)</sup>, 郑龙<sup>1)</sup>, 唐楠<sup>1)</sup>, 伏媛<sup>1)</sup>, 王成<sup>1)</sup>

1)成都理工大学, 四川成都 610059; 2)中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094

**摘要:** 本文以铁格隆南(荣那矿段)高硫化浅成低温热液矿床和斯弄多低硫化浅成低温热液矿床为研究对象, 运用短波红外技术快速厘定了上述两个矿床的蚀变矿物类型及组合特征, 构建了基于短波红外勘查技术的找矿模型。研究发现: 铁格隆南矿床(荣那矿段)的蚀变矿物垂向分带组合为: 高岭石→高岭石+(地开石+明矾石)→高岭石+明矾石+(地开石)→高岭石+地开石+明矾石。由于高硫化浅成低温热液交代黄铁绢英岩化带的斑岩型矿体, 致使上部矿石中还有少量交代残余的绢云母; 斯弄多低硫化浅成低温热液矿床的蚀变矿物垂向分布为: 白(绢)云母+(钠云母)→白(绢)云母+钠云母+(伊利石)→白(绢)云母+钠云母+蒙脱石+伊利石→白(绢)云母+钠白云母+蒙脱石+伊利石, 其中顶部白(绢)云母是后期黑云母花岗岩斑岩蚀变所产生, 本身与成矿无关; 矿体主要赋存在伊利石+蒙脱石带, 随着蒙脱石被伊利石化, 矿体也逐渐尖灭。

**关键词:** 浅成低温热液型矿床; 短波红外技术; 蚀变分带; 找矿模型; 蚀变矿物

中图分类号: P407.6; P614 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2017.05.16

## Alteration Zoning and Prospecting Model of Epithermal Deposit Revealed by Shortwave Infrared Technique: A Case Study of Tiegelongnan and Sinongdu Deposits

GUO Na<sup>1,2)</sup>, HUANG Yi-ru<sup>1)</sup>, ZHENG Long<sup>1)</sup>, TANG Nan<sup>1)</sup>, FU Yuan<sup>1)</sup>, WANG Cheng<sup>1)</sup>

1) Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

2) Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094

**Abstract:** With the Tiegelongnan (Rongna ore block) high sulfidation epithermal deposit and the Sinongdu low sulfidation epithermal deposit as the research objects and on the basis of the shortwave infrared technology, the authors determined alteration and mineral assemblages of the two deposits, and built a shortwave infrared prospecting model. It is found that the alteration minerals in the Tiegelongnan deposit (Rongna) exhibits vertical zoning of kaolinite→kaolinite+(dickite+alunite)→kaolinite+alunite+(dickite)→kaolinite+alunite+dickite. Owing to the metasomatism of hydrothermal on beresitization zone of porphyry, there is a small amount of remanent sericite on the top. Minerals in the Sinongdu deposit show the vertical zoning of muscovite+(paragonite)→muscovite+paragonite+(illite)→muscovite+paragonite+illite→muscovite+paragonite+montmorillonite+illite. The muscovite at the top was produced by the alteration of the late biotite granite porphyry. It had nothing to do with mineralization. The orebody is mainly hosted in the illite+montmorillonite belt, and the orebody is gradually pinched out as the montmorillonite with illitization.

**Key words:** epithermal deposit; shortwave infrared technique; alteration zoning; prospecting model; alteration minerals

浅成低温热液型矿床的形成与酸性岩浆流体密切相关(Hedenquist, 1986), 构造环境主要为岩浆

弧和弧后张裂带(陈根文等, 2001)。该类型矿床的形成温度在 50~350℃, 压力来源于起主导作用的弱盐

本文由国土资源部公益性行业科研专项(编号: 201511017-4)和国家自然科学基金(编号: 41302265)联合资助。

收稿日期: 2017-06-23; 改回日期: 2017-08-20。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 郭娜, 女, 1979年生。讲师, 博士后。主要从事地球探测信息技术及 3S 找矿预测研究。E-mail: cdu\_guona@126.com。

化(<1%~5%)流体(Pirajno, 2009)。目前,关于此类矿床被普遍接受的分类方式是按照流体中硫的氧化-还原态与蚀变矿物的组合特征进行划分:高硫化(或酸性硫酸盐型,明矾石-高岭石型)、低硫化(冰长石-绢云母型)(Heald et al., 1987; Pirajno and Bagas, 2002)。西藏阿里多龙矿集区的铁格隆南矿床(荣那矿段)位于班公湖—怒江成矿带西段,是西藏首例千万吨级的斑岩-高硫化浅成低温热液型矿床(唐菊兴等, 2016a, 2017)。西藏日喀则地区的斯弄多银多金属矿床位于冈底斯成矿带中段的南木林火山喷发沉积盆地中,是产于林子宗群火山岩系中的低硫化浅成低温热液型矿床(唐菊兴等, 2016b, 2017; 黄一入等, 2017; 李海峰等, 2017; 李壮等, 2017)。高硫化矿床的成矿流体混合了岩浆水和大气降水,流体 pH 值呈现出 1~3 的强酸性特征,蚀变矿物以明矾石、地开石、高岭石及叶腊石为主,并形成特有的硅帽,矿化以 Au-Cu-(Ag)为主导;低硫化矿床的成矿流体以大气降水为主,流体 pH 值偏中性,蚀变矿物主要有冰长石、伊利石、绢云母、玉髓、方解石及铁锰碳酸盐矿物,矿化以 Ag-Au-Pb-Zn 为主导(Hedenquist and Lowenstern, 1994; 唐菊兴等, 2014a)。通过对上述浅成低温热液型矿床中蚀变矿物的组合及分布研究,其成果对于厘定该类矿床类型、明确找矿方向具有极其深远的意义。

短波红外测量技术应用波长范围 1 300~2 500 nm 的电磁波,通过测定蚀变矿物在该波段范围内的吸收特征,识别羟基、碳酸盐、硫酸盐、硅酸盐型等蚀变矿物(郭娜, 2012)。美国生产的便携式 ASD 光谱分析仪能够快速扫描岩石,形成 350~2 500 nm 的全光谱波谱曲线,通过光谱解混处理后能够在野外快速识别蚀变矿物类型,确定其组合特征(郭娜, 2017)。浅成低温热液型矿床中蚀变矿物以黏土型居多,通过肉眼难以识别,采用短波红外技术能够快速识别蚀变矿物类型、确定蚀变矿物组合特征,进而构建深部-外围的找矿勘查模型(郭娜等, 2016)。本文采用短波红外勘查技术,分别选择近几年在西藏新发现的高硫化型(铁格隆南矿床(荣那矿段))(杨超等, 2014; 杨超, 2015; 王勤, 2015)和低硫化型(斯弄多矿床)(钱建平, 2013; 孟展, 2016; 付燕刚, 2017)两个浅成低温热液型典型矿床进行蚀变矿物类型的识别、蚀变矿物组合研究,进而构建针对不同类型的浅成低温热液型矿床找矿模型,为下一步的勘查评价指明方向。

## 1 地质概况

铁格隆南矿区位于班公湖—怒江结合带西段,属南羌塘—三江复合板片的南缘(图 1)。区域出露的地层主要为古生代—中生代海相盆地沉积、弧前复

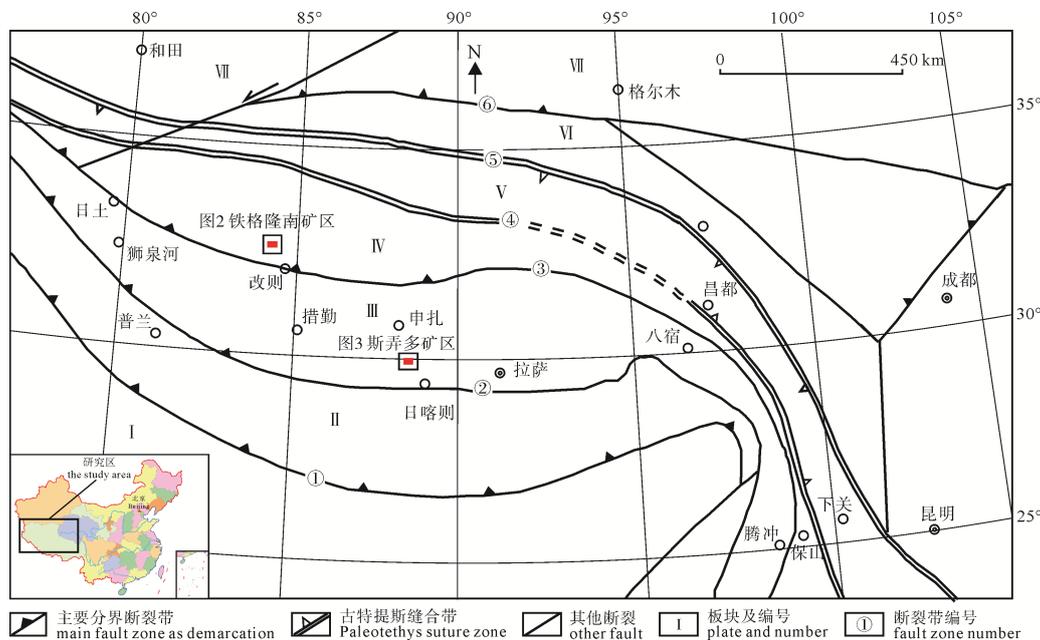


图 1 研究区位置图(据潘桂棠等, 2002 改绘)

Fig. 1 Location of the study area (modified after PAN et al., 2002)

①-西瓦里克陆内俯冲带; ②-雅鲁藏布江板块缝合带; ③-班公湖—怒江缝合带; ④-龙木措—双湖—澜沧江断裂带;  
⑤-西金乌兰—金沙江断裂带; ⑥-昆南—玛沁板块缝合带;

I-印度板块; II-喜马拉雅陆块; III-冈底斯—念青唐古拉陆块; IV-羌南—保山褶皱带; V-羌北—昌都褶皱带; VI-可可西里—念青唐古拉褶皱带

①-western Warrick intracontinental subduction zone; ②-Yarlung Zangbo River plate suture zone; ③-Bangong Co-Nujiang suture zone;

④-Longmucuo-Shuanghu-Lancangjiang fault zone; ⑤-western Jinwulan-Jinshajiang fault zone; ⑥-Kunnan-Maquin plate suture zone;

I-Indian plate; II-Himalaya landmass; III-Gangdise-Nyainqentanglha landmass; IV-Qiangtang-Baoshan fold belt;

V-northern Qiangtang-Changdu fold belt; VI-Hoh Xil-Nyainqentanglha fold belt

理石或类复理石沉积以及局部的陆相火山岩及磨拉石沉积, 包括上石炭统展金组(C<sub>2z</sub>)—曲地组(C<sub>2q</sub>)—下二叠统龙格组(P<sub>1l</sub>)—上三叠统亭贡组(T<sub>2t</sub>)、日干配组(T<sub>3r</sub>)—中下侏罗统色哇组(J<sub>2-3s</sub>)、曲色组(J<sub>2q</sub>)—下白垩统美日切组(K<sub>3m</sub>)及上白垩统阿布山组(K<sub>2a</sub>)。铁格隆南斑岩-浅成低温型铜金矿体主要赋存于色哇组、曲色组地层及中酸性侵入岩中(唐菊兴等, 2016a)。

矿区出露地层为早中侏罗统色哇组(J<sub>1-2s</sub>)复理石或类复理石沉积, 由一套深灰色长石石英粉砂岩泥岩组成, 下白垩统美日切组(K<sub>1m</sub>)为陆相中基性火山岩建造, 主要为紫红色安山岩、英安岩、玄武岩、火山角砾岩等, 以及渐新统康托组(E<sub>3k</sub>)河湖相碎屑岩沉积(唐菊兴等, 2014b)(图 2)。断裂构造主要依靠遥感解译成果, 主要的控矿构造具有左行走滑及逆冲的特征。岩浆岩活动发育, 主要是中酸性早白垩世侵入岩, 以闪长岩-花岗闪长斑岩为主。地表仅有少量露头(唐菊兴等, 2016a)。早白垩世美日

切错组的基性火山岩覆盖层为保存矿体的完整性提供了必要的条件。

铁格隆南矿床从深至浅、从早至晚, 分别为深部花岗闪长斑岩型矿体→中浅部斑岩型矿体叠加浅成低温热液矿体→浅部为成矿后美日切组安山岩(或英安岩)盖层。其中下部斑岩型矿床的围岩蚀变以绢英岩化为主; 上部高硫化浅成低温热液型矿体产生了与高级泥化相关的高岭土化、叶腊石化和明矾石化(李光明, 2015)。

斯弄多矿区位于西藏谢通门县境内, 大地构造位置处于冈底斯—念青唐古拉板块冈底斯陆缘火山-岩浆弧南部隆格尔—南木林地块北缘(图 1)。区域地层以火山-沉积建造为主, 出露石炭—二叠系碳酸盐-碎屑岩建造, 中生界浅海相至海陆交互相碎屑岩、碳酸盐岩建造, 新生界林子宗群(E<sub>1-2</sub>)陆相火山岩。其中林子宗群陆相火山岩自下而上划分为典中组、年波组和帕那组。典中组表现为弧火山岩特征, 年波组表现为陆缘弧、碰撞和板内环境特征, 帕那组表现

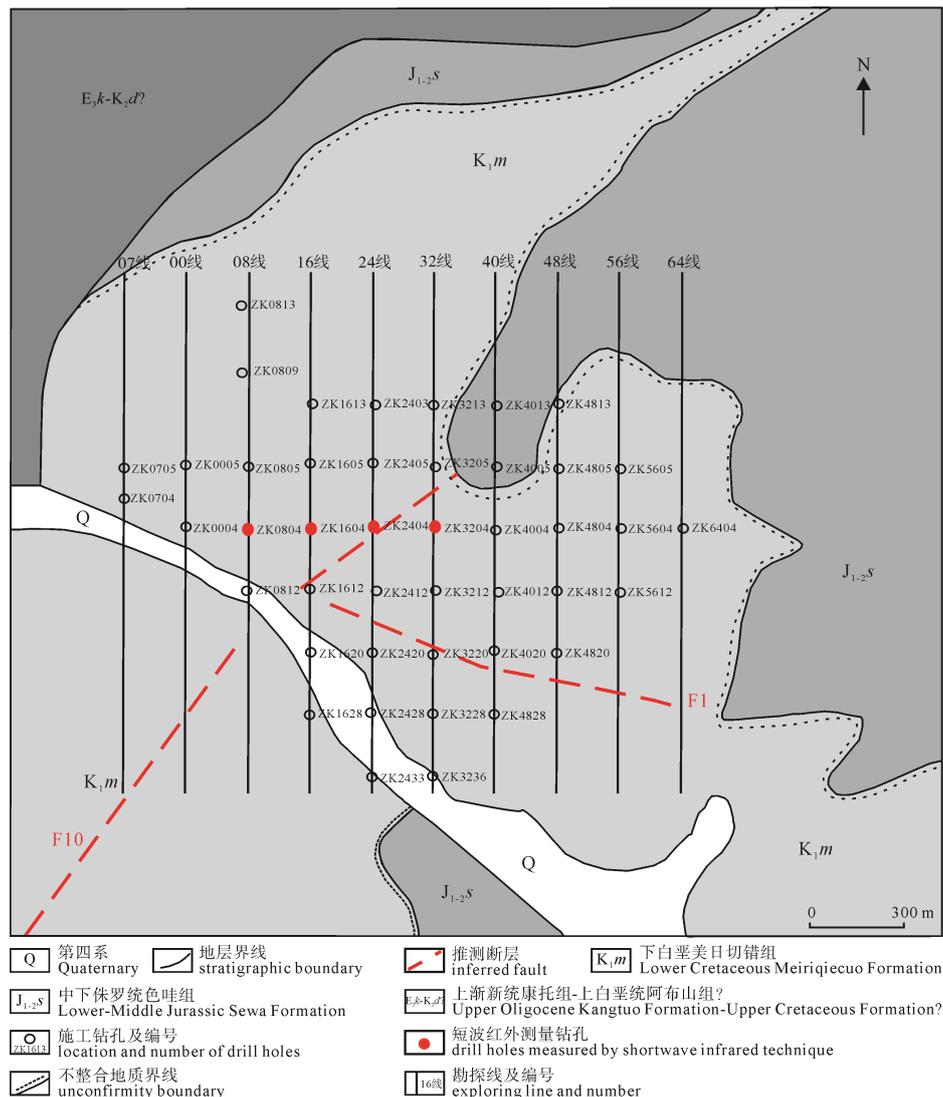


图 2 铁格隆南矿床地质图(据杨超, 2015)  
Fig. 2 Geological map of the Tiegelongnan deposit(after YANG, 2015)

为大陆碰撞、板内环境特征(唐菊兴等, 2016b)。

斯弄多矿区出露地层主要包括下石炭统永珠组(C<sub>1y</sub>)、上石炭统拉嘎组(C<sub>2l</sub>)、上石炭统昂杰组(C<sub>2a</sub>)、下二叠统下拉组(P<sub>1x</sub>)、下白垩统楚木龙组(K<sub>1c</sub>)、上白垩统设兴组(K<sub>2s</sub>)、古近系典中组(E<sub>1d</sub>)、年波组(E<sub>2n</sub>)、帕那组(E<sub>2p</sub>)及第四系(Q)(图 3)。含矿围岩为古新统典中组(E<sub>1d</sub>)，其中火山岩主要有流纹斑岩、晶屑凝灰岩和火山角砾岩等。侵入岩主要为黑云母花岗斑岩，呈岩脉、岩枝状分布在 13-15 号勘探线附近，与典中组火山岩接触带多形成热液引爆角砾岩。受热液蚀变作用，矿区围岩存在明显的分带现象，在 0 号勘探线附近以硅化为主，表现为玉髓化、晚期石英脉，向外围逐渐表现为较强的黏土化，以伊利石化、绢云母化为主(郭衍游等, 2016)。

### 2 蚀变矿物光谱特征

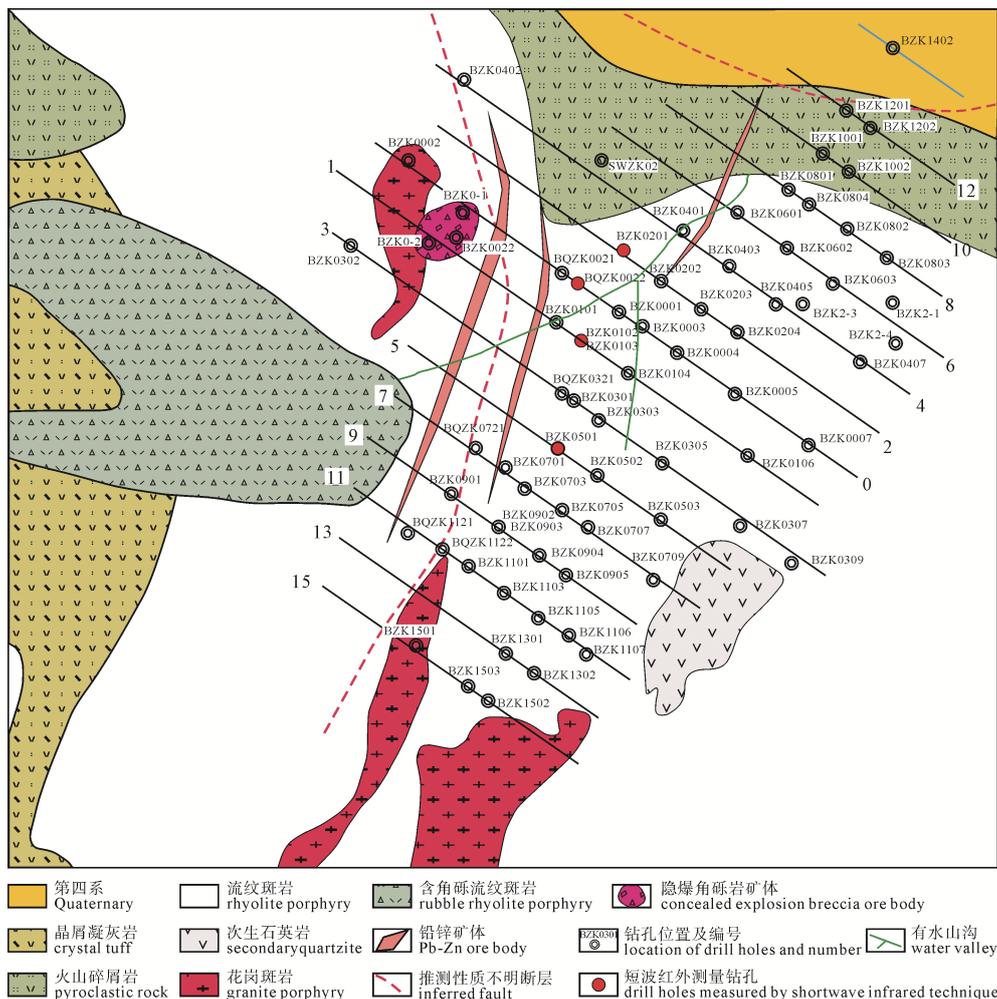
高硫化和低硫化浅成低温热液型矿床的蚀变矿物在温度、pH 值等因素的影响下明显不同。高硫化浅成低温热液矿床由于成矿流体呈强酸性，蚀变矿物具有从硅化-高级泥化(明矾石、地开石)→泥化

(高岭石)-绢云母化)→青磐岩化(绿泥石、绿帘石)的明显垂向分带特征，根据短波红外技术的矿物光谱识别特征，能够判别出上述不同蚀变带中代表性蚀变矿物的类型、含量、分布及矿物组合特征；低硫化浅成低温热液矿床的成矿流体由于呈中性，蚀变矿物分带特征表现为：冰长石-硅化-绿泥石化→绢云母化-(泥化)→青磐岩化，代表性蚀变矿物主要有玉髓、蛋白石、冰长石、绢云母、蒙脱石和伊利石，利用短波红外技术能够识别白(绢)云母、蒙脱石和伊利石，并通过白(绢)云母的波长变化及分布进一步反演绢云母与冰长石之间的交代作用。

本次研究测量铁格隆南矿床钻孔 4 个，包括 ZK0804、ZK1604、ZK2404 和 ZK3204(图 2)；测量斯弄多矿床钻孔 5 个，包括 BZK0501、BZK102、BZK103、BQZK0022 和 BZK0201 (BZK102 和 BZK103 分别是同一位置打的斜孔和直孔)(图 3)。

#### 2.1 高硫化矿床代表性蚀变矿物光谱特征

在研究铁格隆南矿床时，大多数黏土矿物难以用肉眼进行识别，需要借助显微镜下观察，主要蚀变组合为明矾石-高岭石-地开石(杨超, 2015)。而短



波红外技术可以在野外快速获取岩石的蚀变及矿物组合, 为下一步的找矿勘查提供及时便捷的手段。

对钻孔岩心进行短波红外测量和数据分析后发现铁格隆南矿床(荣那矿段)中的蚀变矿物主要包括白(绢)云母、高岭石、地开石、明矾石和叶腊石。本文仅针对上部的高硫化浅成低温热液型矿体进行讨论和分析, 不涉及下部的斑岩型矿体部分。

### 2.1.1 白(绢)云母

白(绢)云母在 2 200 nm 附近具有非常明显的吸收特征(图 4), 受硅、铝离子含量变化的影响, 绢云母的吸收特征会向长波或短波方向移动至 2 180~2 220 nm。温度(Guidotti et al., 1994)、压力(Duke, 1994)、pH 值(Scott, 2015)等的变化都会影响绢云母的波长变化。以研究区 ZK1604 为例, 绢云母的波长主要分布在 2 200~2 210 nm 的范围内, 表现为一种富 Na、Al 特征的普通绢云母, 数量不多, 与大量高岭石、水铝石、明矾石共存。

绢云母在定义中属于细粒白云母, 短波红外测量无法测定矿物的粒径大小, 因此在识别过程中, 用白云母统一表达矿物类型。但从矿床学角度及野外观察来看, 该矿物确实具有明显的丝绢光泽, 粒

度较细, 所以在文中会出现两个名词混用的情况, 实则同一种矿物类型。该矿物的二八面体结构中离子间相互替代导致短波红外测量结果中波长的变化, 长波白云母在识别中称为多硅白云母, 表现出特征吸收峰波长值偏大的特征, 波长一般大于 2 208 nm, 具有贫 Al、富 Si 的特点, 主要出现在岩体周围或深部斑岩体附近的钾化带当中, 常看到与黑云母、硬石膏相互伴生; 短波白云母被称为钠云母, 特征吸收峰的波长值比较小, 波长一般小于 2 203 nm, 具有富 Al、Na 的特点, 常表现为一种低温环境下的产物; 其他则被称为普通白云母, 矿物特征位于上述二者之间, 该类型矿物赋存区间是斑岩型矿床黄铁绢英岩化带的主要组成部分, 也是斑岩型矿体的重要赋存之处。

### 2.1.2 高岭石与地开石

高岭石的化学组成与地开石相同, 均为  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 。高岭石在热液蚀变系统中属于一种常见的低温黏土矿物, 经常出现于斑岩系统蚀变分带中的泥化带当中; 而地开石则作为高级泥化带的重要蚀变矿物出现。二者的形成均处于一种酸性流体环境当中, 光谱特征均是在 1 400 nm 和 2 200 nm 处具有双吸收峰(图 5)。但高岭石的形成温度略低于地开石, 光谱区别在于高岭石在 1 400 nm 处的双吸收峰距离较近, 一般为 10~15 nm, 而地开石则可达 20 nm。钻孔中发现大量结晶比较好的高岭石, 与地开石形成共存的状态。

### 2.1.3 明矾石与叶腊石

明矾石是一种极酸性环境下形成的矿物, 它与高岭石、地开石等共存的蚀变组合特征构成了高硫化浅成低温热液型矿床的识别标志。光谱吸收特点是在 2 170 nm 附近具有强烈的吸收特征, 诊断吸收峰位于 1 765 nm 和 1 475 nm 附近, 这也是区别于其他矿物的重要特征(图 6a)。在铁格隆南矿床(荣那矿段)的钻孔中见到明矾石广布, 并与结晶比较好的

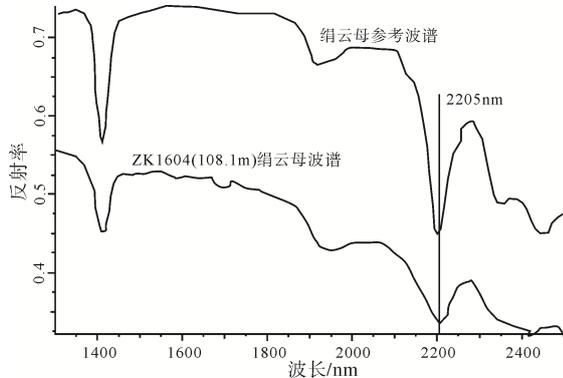


图 4 铁格隆南钻孔中绢云母光谱曲线  
Fig. 4 The spectral curve of the muscovite (sericite) in drill holes in Tiegelongnan deposit

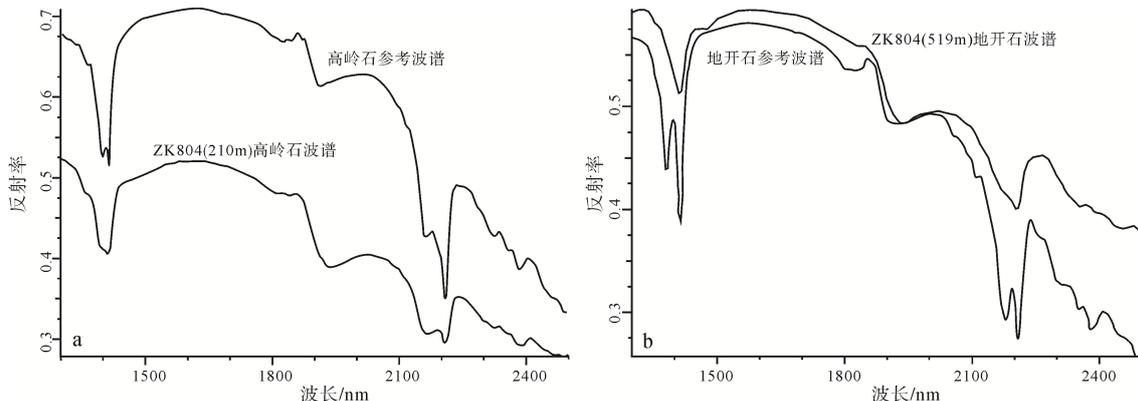


图 5 铁格隆南钻孔中高岭石(a)、地开石(b)光谱曲线  
Fig. 5 The spectral curves of kaolinite (a) and dickite (b) in drill holes in Tiegelongnan deposit

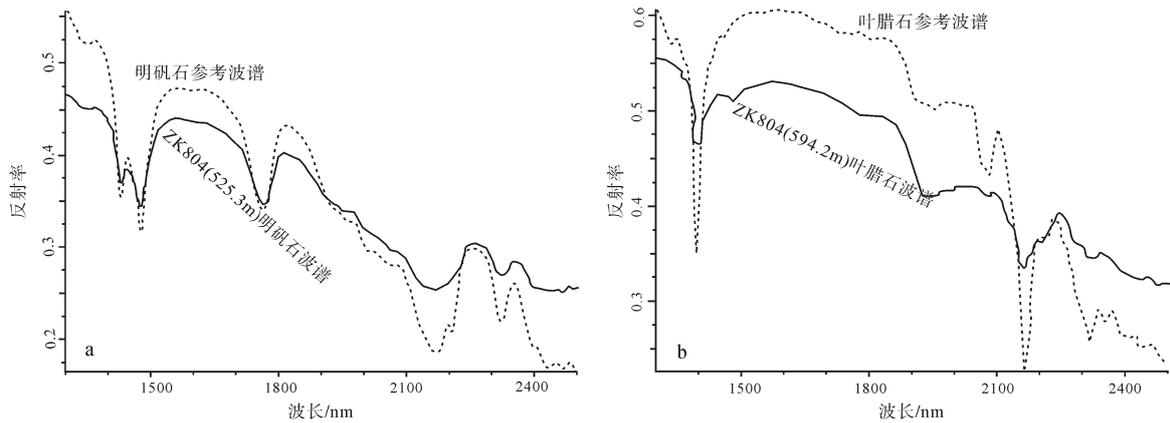


图 6 铁格隆南钻孔中明矾石(a)、叶腊石(b)光谱曲线

Fig. 6 The spectral curves of alunite (a) and pyrophyllite (b) in drill holes in Tiegelongnan deposit

高岭石及地开石共存。

叶腊石,  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , 具有与绢云母类似的二八面体晶体结构。两个主要的吸收特征位于 2 188 nm 和 1 388 nm 附近(图 6b)。该矿物由长石衍变而来, 存在于一种酸性环境中, 同时也是一种高温环境下的蚀变矿物。钻孔中的叶腊石并不多, 主要存在于钻孔底部, 与明矾石、地开石、绢云母并存。

## 2.2 低硫化矿床代表性蚀变矿物光谱特征

对钻孔岩心进行短波红外测量和数据分析后发现: 斯弄多银(金)铅锌矿床中的蚀变矿物主要是白(绢)云母、蒙脱石和伊利石。

### 2.2.1 白(绢)云母

斯弄多矿床与铁格隆南矿床(荣那矿段)均发现白(绢)云母, 但是与高硫化矿床不同的是: 低硫化矿床中的白(绢)云母波长更短, 主要位于 2 200 nm 附近以及小于 2 200 nm 的范围内(图 7), 表现出一种极富 Na、Al, 贫 Si 的特征。从其波长分布的位置来看: 钻孔顶部白云母的波长值相对较大, 表现为一种普通白(绢)云母的特点, 向深部波长逐渐变短, 底部出现大量短波白(绢)云母(钠云母)。从白(绢)云母的波长变化可以看出: 蚀变矿物从上到下 Na、

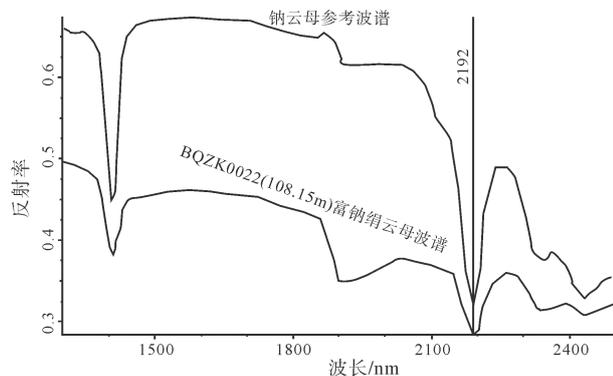


图 7 斯弄多钻孔中绢云母光谱曲线

Fig. 7 The spectral curve of the muscovite (sericite) in drill holes in the Sinongduo deposit

Al 元素逐渐增多, Si 逐渐减少的变化趋势。

### 2.2.2 蒙脱石

蒙脱石在热液蚀变系统中比较常见, 属于一种低温、非酸性环境下的蚀变矿物, 通常富 Fe、Mg, 在各种岩石中都有可能出现。该矿物在 2 208 nm 附近表现出强烈的吸收特征, 同时在 1 410 nm 和 1 910 nm 附近也具有吸收特征(图 8a)。钻孔中没有独立蒙脱石矿物出现, 虽然在钻孔中部分布较多, 但都是与伊利石共存, 能够明显看出蒙-伊之间的相互依存和转化规律。

### 2.2.3 伊利石

受 K、Si 离子数量变化及分子中额外水的影响, 伊利石与白(绢)云母形成明显的差异性, 实际地球化学应用中也经常以 K/Na 比值来区分这两种矿物类型。伊利石是一种典型的低温蚀变矿物, 常与蒙脱石共存于泥化带的中间层当中。主要特征吸收峰位置位于 1 408 nm、2 200 nm、2 348 nm 及 2 442 nm 附近(图 8b)。钻孔中伊利石分布较多, 与蒙脱石、白(绢)云母共同形成了低硫化浅成低温热液型矿床的蚀变分带特点。

## 3 蚀变矿物分布特征

### 3.1 高硫化矿床蚀变矿物分布特征

在短波红外测量的钻孔中, 铁格隆南矿床(荣那矿段)中 ZK804 和 ZK1604 具有典型的高硫化浅成低温热液型矿床的特点。从测量钻孔的短波红外矿物分布柱状图(图 9)来看: 蚀变矿物类型多样, 以黏土型矿物高岭石、地开石, 硫酸盐矿物明矾石和硅酸盐矿物绢云母为主。

钻孔中高岭石按照结晶程度的不同分为两种: 无序高岭石和有序高岭石。无序高岭石一般在常温常压下通过结晶八面体中离子交换而形成, 并可在较稳定的地质条件下长期保存。在地热与高温热水作用或水岩作用中它常由无序向有序化固相发展(刘长龄和刘

钦甫, 2002)。钻孔中的高岭石以有序高岭石为主, 主要分布在石英砂岩当中(郭娜等, 2017)。从 ZK804 中的高岭石分布来看: 浅地表附近由于大气降水的加入, 使得高岭石的结晶度变差, 出现大量无序高岭石; 结晶比较好的有序高岭石则主要分布在钻孔底部。

明矾石作为浅成低温热液型矿床的典型蚀变矿物在钻孔中分布极其广泛, 且与地开石、高岭石共存。同时, 在极酸性流体环境下形成明矾石的同时, 在钻孔下部也发现少量叶腊石。

地开石主要分布在钻孔岩矿心的中下部。同时,

由于浅成低温矿化叠加于斑岩型矿化之上, 有少量白(绢)云母的分布。从垂向来看蚀变矿物分布表现为: 高岭石→高岭石+(地开石+明矾石)→高岭石+明矾石+(地开石+白(绢)云母)→高岭石+地开石+明矾石+白(绢)云母。

从蚀变矿物和钻孔岩性分布的柱状图(图 9)中可以看出: (1)钻孔中白(绢)云母的广布主要由两方面引起: ①花岗闪长斑岩侵入后期的热液活动形成绢英岩化带, 并在浅成低温热液矿体中形成交代残余; ②长石类矿物受热液流体作用交代形成白

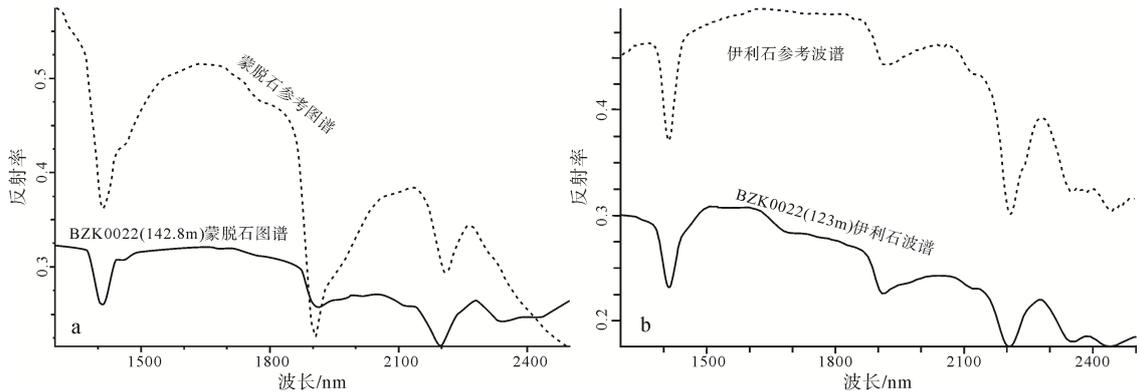


图 8 斯弄多钻孔中蒙脱石(a)、伊利石(b)光谱曲线

Fig. 8 The spectral curves of montmorillonite (a) and illite (b) in drill holes in the Sinongduo deposit

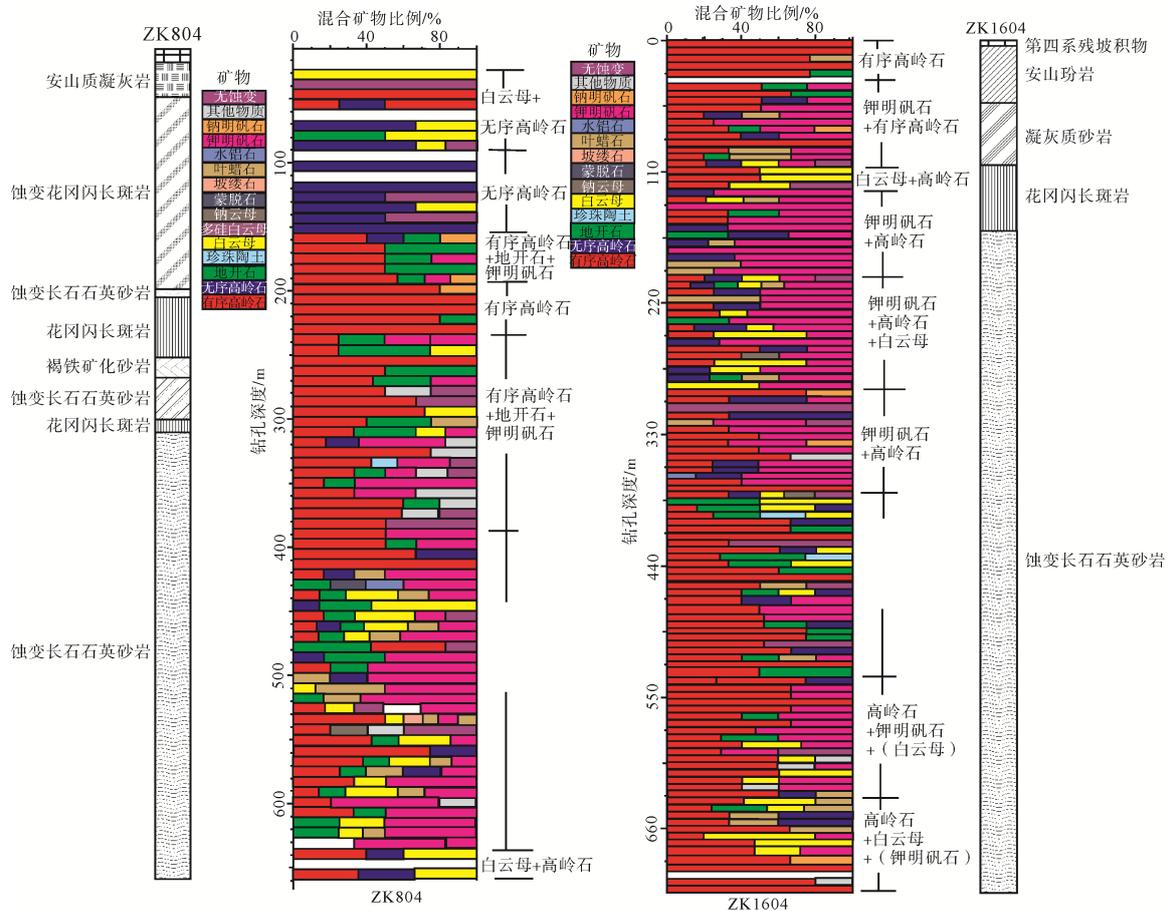


图 9 铁格隆南矿床(荣那矿段)钻孔中蚀变矿物-岩性分布柱状图

Fig. 9 The histogram showing the alteration minerals and lithology distribution in drill holes in the Tiegelongnan deposit (Rongna)

(绢)云母; (2)所观察的几个钻孔中蚀变作用均较强, 表现为明矾石+高岭石+地开石的矿物组合, 其中明矾石是重要蚀变矿物; (3)钻孔中无序高岭石与成矿无关, 是后期大气降水加入冷凝后的产物; 但有序高岭石广布于矿石中, 是高硫化浅成低温热液矿床的重要蚀变矿物; (4)由于地开石形成温度略高于高岭石, 因此地开石主要分布在钻孔的中下部; (5)叶腊石是在一种极酸性环境下产生的, 在钻孔底部可见少量叶腊石分布; 明矾石也生成于酸性环境, 说明形成矿体的流体 pH 值为强酸性; (6)根据蚀变矿物组合在钻孔中自下而上的垂向分布可推断: ①pH 值逐渐降低; ②温度逐渐降低。

### 3.2 低硫化矿床蚀变矿物分布特征

低硫化浅成低温热液矿床中蚀变矿物以白(绢)云母、冰长石、蒙脱石和伊利石为主, 然而短波红外测量的波谱区间无法识别冰长石, 因此利用短波红外技术快速甄别是否属于低硫化浅成低温热液矿床的特点则需要对矿物组合进行系统的识别和分类, 确定是否符合低硫化矿床的蚀变分带特点, 再进一步结合电子探针等其他手段来确定冰长石的存在。利用特征光谱识别出斯弄多矿床的蚀变矿物主要包括白(绢)云母、蒙脱石、伊利石和钠云母(图 10)。

白(绢)云母广布于流纹斑岩中, 是研究区中最主要的围岩, 但从矿体与流纹斑岩、白(绢)云母的空间分布关系来看, 流纹斑岩作为主岩本身并没有意义。

钠云母是白云母族矿物中(Fe, Mg)+Si 被  $Al^{3+}$  和  $Na^+$  所替代后产生的, 是流体 pH 值、温度逐渐降低的重要体现。钻孔中钠云母大量分布在钻孔下部, 并主要发生在火山碎屑岩、火山角砾岩层。从其波长变化来看: 随着埋深的增加逐渐变短,  $Na^+$  被越来越多的参与到热液与围岩的交代反应中, 这是深部碱性交代作用增强的重要指示标志。

蒙脱石主要分布在钻孔的中下部, 并与伊利石形成共存矿物, 在火山碎屑岩和火山角砾岩层中及附近广布, 在钻孔中很难发现独立的蒙脱石矿物。但与矿体之间的关系可以看出, 蒙-伊层是矿体存在的重要层位, 因此矿体与蒙脱石的关系密切。蒙脱石-伊利石形成无序间层, 火山灰或玻璃质凝灰岩蚀变为蒙脱石, 且不易向伊利石转变; 随着埋深的增大, 黏土成岩过程加速了层间矿物成分的变化, 蒙脱石逐渐减少, 而伊利石则逐渐增多, 矿体也逐渐尖灭。

伊利石也主要分布在钻孔的中下部, 与蒙脱石共存, 大部分伊利石通过交代白(绢)云母形成, 少

部分通过交代钠云母形成, 这也正是原地交代形成了伊-蒙混层的原因。

从蚀变矿物和岩性分布的柱状图(图 10)中可以看出: 垂向上自上而下依次形成了白(绢)云母+(钠云母)→钠云母+蒙脱石+钠云母伊利石→白(绢)云母+(白云母伊利石)→钠云母+蒙脱石+白云母伊利石+(白(绢)云母)的矿物组合排序规律。

## 4 浅成低温热液型矿床找矿勘查模型

从铁格隆南和斯弄多两个不同类型的浅成低温热液型矿床的短波红外矿物光谱特征及分布变化来看: 蚀变矿物的识别对于矿床学、矿物学的研究都至关重要。短波红外勘查技术能够快速厘定矿物的类型、含量等, 定量确定蚀变分带组合特征, 反演各种流体运移指标变化趋势等。对于高硫化和低硫化矿床(体)的研究更是如此, 浅成低温热液矿床类型的进一步划分都是通过蚀变矿物组合进行的。根据两个矿床典型钻孔中的蚀变矿物组合分布特征, 分别构建出铁格隆南(荣那矿段)和斯弄多矿床的短波红外找矿勘查模型(图 11, 图 12)。

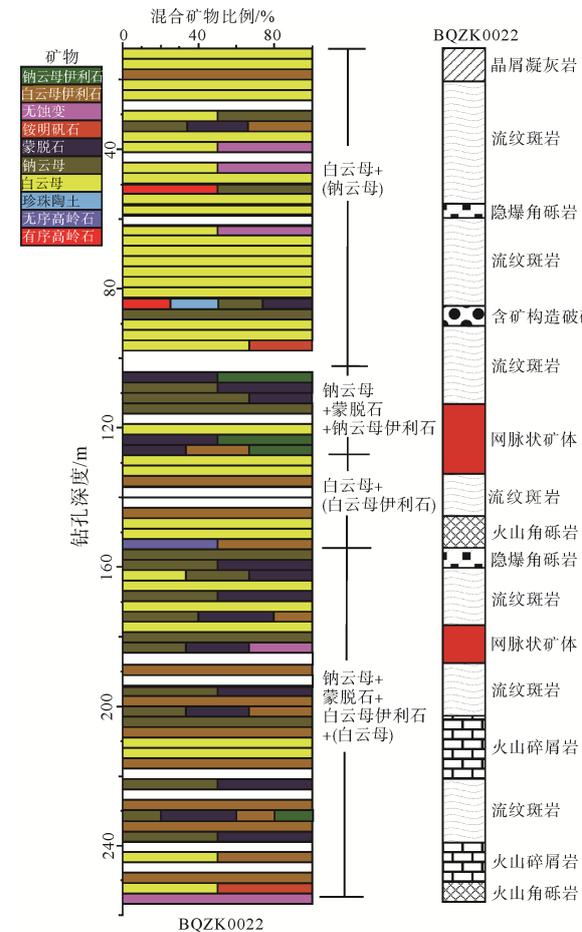


图 10 斯弄多钻孔蚀变矿物-岩性分布柱状图  
 Fig. 10 The columnar section showing the alteration minerals and lithology distribution in drill holes of the Sinongduo deposit

从图 11 可以看出: 铁格隆南(荣那矿段)矿床上部的高硫化浅成低温热液型矿体主要分布在白(绢)云母+地开石+高岭石+明矾石矿物组合的高级泥化带中; 下部斑岩型矿体目前仍存在于黄铁绢英岩化带中, 从白(绢)云母的波长分布来看钴探还未涉及斑岩型矿体的钾化带, 一般来说斑岩型矿体会从绢英岩化带延伸至钾化带的外围, 绢云母的波长也会从 2 200 nm 附近变化至 2 215 nm 甚至 2 220 nm 附近。因此, 该矿床深部的找矿潜力仍然巨大。

结合蚀变矿物-岩性柱状图(图 9), 从高硫化浅成低温热液矿床的找矿模型(图 11)中的分布可知:

- (1)叶腊石在钻孔中的分布位置来看: 极酸性环境下形成的叶腊石存在于高硫化浅成低温热液型矿体叠加于斑岩型矿体的接触面上;
- (2)矿体顶部高级泥化带(明矾石+地开石+有序高岭石带)、泥化带

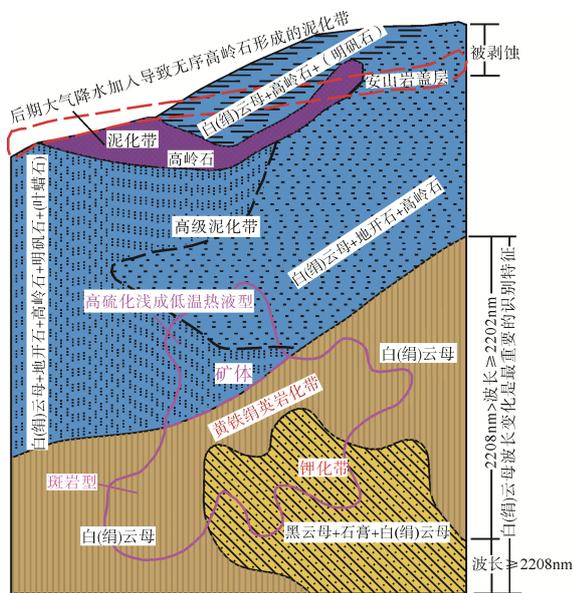


图 11 铁格隆南矿床(荣那矿段)短波红外找矿勘模型  
Fig. 11 The prospecting model of the Tiegelongnan deposit (Rongna) based on shortwave infrared technique

- (高岭石带)的一部分已经被剥蚀;
- (3)受大气降水混合降温的影响, 泥化带中出现大量无序高岭石;
- (4)地表的安山岩盖层是矿体得以完整保存的重要因素。

结合蚀变矿物-岩性柱状图(图 10), 从低硫化浅成低温热液矿床的找矿模型(图 12)中可以看出: (1)矿体呈现脉状, 主要赋存于伊-蒙混层当中, 虽然钻孔中很难找到独立的蒙脱石矿物, 但是从矿体的赋存层位中不难获知矿体与蒙脱石关系密切; (2)下部大量白(绢)云母是隐爆角砾岩发生的蚀变; (3)蒙-伊混层位于钻孔中部, 与后期的黑云母花岗岩斑岩相接处, 从二者之间的空间关系来看, 后期的黑云母花岗岩斑岩对矿体造成了破坏; (4)从矿体中心位置分别向两侧表现出不同的蚀变矿物交代变化, 南部随着埋深的增加伊利石交代蒙脱石和白(绢)云母表现出逐渐增多的趋势; 东部随着埋深的增加主要表现为钠云母的富集, 因此碱性交代作用主要发生在矿体的东部; (5)外围青磐岩化带表现为以绿泥石、绿帘石为主的蚀变矿物分布, 这是找寻金矿的有利条件; (6)矿体主要赋存于火山角砾岩和火山碎屑岩当中。

### 5 结论

(1)高硫化浅成低温热液型矿床和低硫化浅成低温热液型矿床从概念上来讲本就是以蚀变矿物的组合特征来进行划分的, 因此短波红外测量无疑为该类型矿床的区分提供了有效、快捷的办法。

(2)白(绢)云母对于斑岩型、浅成低温热液型矿床而言都是十分重要且必然存在的一种蚀变矿物, 该矿物的波长变化可作为温度、压力、pH 值、变质程度的指示标志。斑岩型矿床大多产自绢英岩化带当中, 因此关注白(绢)云母的波长变化十分重要。

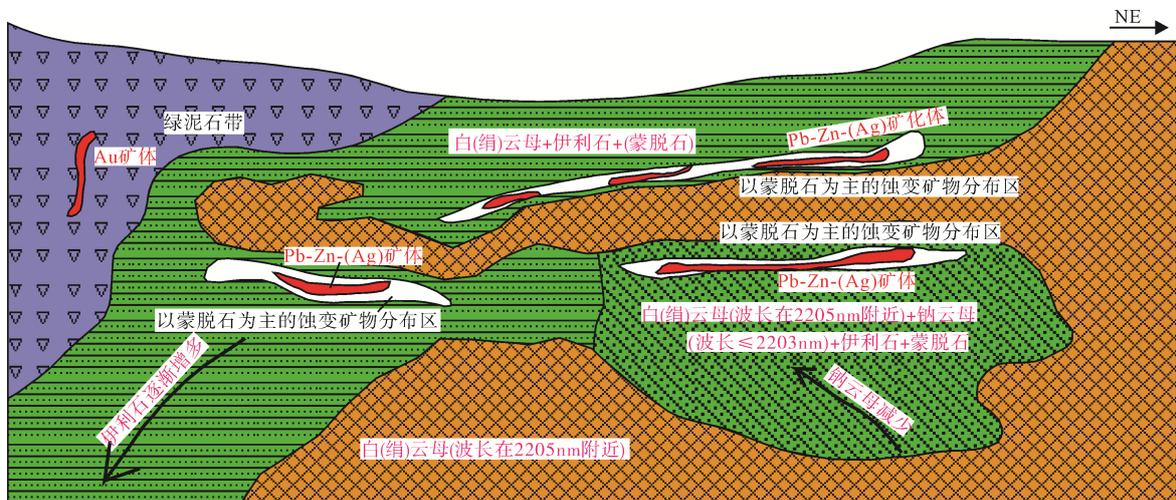


图 12 斯弄多矿床短波红外找矿勘模型  
Fig. 12 The prospecting model of the Sinongduo deposit based on shortwave infrared technique

高硫化浅成低温热液矿床中白(绢)云母(波长 2 200~2 210 nm)要根据原岩的分布来确定到底是一种交代残余后产物,还是原岩中长石矿物的蚀变产物;低硫化浅成低温热液矿床中白(绢)云母主要产生于钙碱质安山岩或流纹岩的围岩蚀变,富钠云母的逐渐增多是碱交代作用的重要体现。

(3)铁格隆南矿床(荣那矿段)表现为白(绢)云母+高岭石+地开石+明矾石+(少量叶腊石)的蚀变矿物组合分带特征;斯弄多矿床表现为白(绢)云母+钠云母+蒙脱石+伊利石的蚀变矿物组合分带特征,可通过蚀变矿物组合特征来进行矿床类型的划定。

(4)从垂向分布来看,铁格隆南矿床(荣那矿段)浅成低温热液型矿体的蚀变矿物变化规律为:高岭石→高岭石+(地开石+明矾石)→高岭石+明矾石+(地开石)→高岭石+地开石+明矾石,同时有少量交代残余的白(绢)云母;斯弄多矿床的蚀变矿物变化规律为:白(绢)云母+(钠云母)→白(绢)云母+钠云母+(伊利石)→白(绢)云母+钠云母+蒙脱石+伊利石→白(绢)云母+钠白云母+蒙脱石+伊利石。

(5)基于短波红外勘查技术的高硫化浅成低温热液矿床和低硫化浅成低温热液矿床模型,展示了不同类型矿床中蚀变矿物的分布组合规律及其蚀变矿物与矿体之间的关系。

## Acknowledgements:

This study was supported by the Special Scientific Research Fund of Public Welfare Profession of Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China (No. 201511017-4), and National Natural Science Foundation of China (No. 41302265).

## 参考文献:

- 陈根文,夏斌,肖振宇,喻亨祥,王核,钟志洪,王国强. 2001. 浅成低温热液矿床特征及在我国的找矿方向[J]. 地质与资源, 10(3): 165-170
- 付燕刚,胡古月,唐菊兴,刘秋平,王豪. 2017. 西藏斯弄多低硫化型浅成低温热液 Ag-Pb-Zn 矿床: Si-H-O 同位素示踪应用[J]. 地质学报, 91(4): 836-848
- 郭娜,童庆禧,王成,唐楠,伏媛. 2017. 基于短波红外技术的西藏多龙矿集区铁格隆南矿床(荣那矿段)及其外围蚀变填图-勘查模型构建[J]. 地质通报(待刊).
- 郭娜,钟康惠,唐楠,王成,伏媛,黄一人,郑龙,彭书明. 2016. “西藏多龙整装勘查区高光谱勘查模型示范及矿田构造研究”国土资源部公益性行业科研专项经费中期研究报告[R]. 成都: 成都理工大学.
- 郭娜. 2012. 甲玛斑岩-矽卡岩型铜矿床蚀变矿物组合研究——基于高光谱短波红外技术[D]. 成都: 成都理工大学.
- 郭娜. 2017. “斑岩铜矿高光谱短波红外勘查模型构建研究”国

家自然科学基金项目结题/成果报告[R]. 成都: 成都理工大学.

- 郭衍游,高春武,郝晓玲,唐瑶泉,邹兵,魏建,李军,牛传军,杜靓,王鑫,孟祥梅. 2016. 西藏自治区谢通门县斯弄多矿区铅锌矿 2015 年度工作总结报告[R]. 北京: 中地宝联(北京)国土资源勘查技术有限公司.
- 黄一人,郭娜,郑龙,杨宗耀,伏媛. 2017. 基于遥感短波红外技术的三维蚀变填图——以低硫化浅成低温热液型矿床斯弄多为例[J]. 地球学报, 38(5): 779-789.
- 李光明,张夏楠,秦克章,孙兴国,赵俊兴,印贤波,李金祥,袁华山. 2015. 羌塘南缘多龙矿集区荣那斑岩-高硫型浅成低温热液 Cu-(Au)套合成矿: 综合地质、热液蚀变及金属矿物组合证据[J]. 岩石学报, 31(8): 2307-2324
- 李海峰,唐菊兴,丁帅,李壮,胡古月,谢富伟,周会林,杨宗耀,施硕. 2017. 西藏斯弄多银-铅-锌矿床流体包裹体研究和稳定同位素特征[J]. 地球学报, 38(5): 670-686.
- 李壮,郎兴海,丁帅,李海峰,杨宗耀,施硕,王立强,李于海. 2017. 西藏斯弄多浅成低温热液型银铅锌矿床银的赋存状态研究[J]. 地球学报, 38(5): 687-701.
- 刘长龄,刘钦甫. 2002. 高岭石矿物结晶有序化程度与成因关系研究新进展[J]. 地质找矿论丛, 17(2): 73-81
- 孟展. 2016. 西藏斯弄多铅锌银矿床矿物学特征研究及地质意义[D]. 成都: 成都理工大学.
- 潘桂棠,李兴振,王立全,丁俊,陈智梁. 2002. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. 地质通报, 21(11): 701-707.
- 钱建平,黄德阳,谢彪武,陈宏毅,赵小星. 2013. 西藏谢通门县斯弄多铅锌矿区矿床地质特征和构造地球化学找矿研究[J]. 大地构造与成矿学, 37(1): 29-41.
- 唐菊兴,丁帅,孟展,胡古月,高一鸣,谢富伟,李壮,袁梅,杨宗耀,陈国荣,李于海,杨洪钰,付燕刚. 2016b. 西藏林子宗群火山岩中首次发现低硫化型浅成低温热液型矿床——以斯弄多银多金属矿为例[J]. 地球学报, 37(4): 461-470
- 唐菊兴,宋扬,王勤,林彬,杨超,郭娜,方向,杨欢欢,王艺云,高轲,丁帅,张志,段吉琳,陈红旗,栗登逵,冯军,刘志博,韦少港,贺文,宋俊龙,李彦波,卫鲁杰. 2016a. 西藏铁格隆南铜(金银)矿床地质特征及勘查模型——西藏首例千万吨级斑岩-浅成低温热液型矿床[J]. 地球学报, 37(6): 663-690
- 唐菊兴,宋扬,王勤,林彬. 2014a. 浅成低温热液矿床及主要找矿标志[J]. 矿床地质, 33(增刊): 33-34
- 唐菊兴,孙兴国,丁帅,王勤,王艺云,杨超,陈红旗,李彦波,李玉彬,卫鲁杰,张志,宋俊龙,杨欢欢,段吉琳,高轲,方向,谭江云. 2014b. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床[J]. 地球学报, 35(1): 6-10.
- 唐菊兴,王勤,杨欢欢,高昕,张泽斌,邹兵. 2017. 西藏斑岩-矽卡岩-浅成低温热液铜多金属矿成矿作用、勘查方向与资源潜力[J]. 地球学报, 38(5): 571-613.
- 王勤,唐菊兴,方向,林彬,宋扬,王艺云,杨欢欢,杨超,李彦波,卫鲁杰,冯军,李力. 2015. 西藏多龙矿集区铁格隆

南铜(金银)矿床荣那矿段安山岩成岩背景: 来自锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学的证据[J]. 中国地质, 42(5): 1324-1336.

- 杨超, 唐菊兴, 王艺云, 杨欢欢, 王勤, 孙兴国, 冯军, 印贤波, 丁帅, 方向, 张志, 李玉彬. 2014. 西藏铁格隆南浅成低温热液型\_斑岩型 Cu-Au 矿床流体及地质特征研究[J]. 矿床地质, 33(6): 1287-1305.
- 杨超. 2015. 西藏铁格隆南浅成低温热液-斑岩型 Cu(Au)矿床矿石、蚀变、流体特征研究[D]. 北京: 中国地质科学院.

## References:

- CHEN Gen-wen, XIA Bin, XIAO Zhen-yu, YU Heng-xiang, WANG He, ZHONG Zhi-hong, WANG Guo-qiang. 2001. Characteristics of epithermal deposits and the prospecting guide in China[J]. *Geology and Resources*, 10(3): 165-170(in Chinese with English abstract).
- DUKE E F. 1994. Near infrared spectra of muscovite, Tschermak substitution, and metamorphic reaction progress: implications for remote sensing[J]. *Geology*, 22: 621- 624.
- FU Yan-gang, HU Gu-yue, TANG Ju-xing, LIU Qiu-ping, WANG Hao. 2017. Low- sulfidation epithermal Ag-Pb-Zn deposit in Sinongduo, Tibet: tracer application of Si-H-O stable isotope geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 836-848(in Chinese with English abstract).
- GUIDOTTI C V, SASSI F P, BLENCOE J G, SELVERSTONE J. 1994. The paragonite- muscovite solvus: I.P-T-X limits derived from the Na-K compositions of natural, quasibinary paragonite-muscovite pairs[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(10): 2269-2275.
- GUO Na, TONG Qing-xi, WANG Cheng, TANG Nan, FU Yuan. 2017. Alteration mapping and prospecting model construction at Tiegelongnan, Duolong metallogenic district, northern Tibet, as revealed by shortwave infrared technique[J]. *Geological Bulletin of China*(in Chinese)(in press).
- GUO Na, ZHONG Kang-hui, TANG Nan, WANG Cheng, FU Yuan, HUANG Yi-ru, ZHENG Long, PENG Shu-ming. 2016. "Set an example for Duolong ore cluster by shortwave infrared technique and study for the construction " Interim report of public science and technology research funds projects[R]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese).
- GUO Na. 2012. The altered mineral assemblage research in Jiama porphyryskarn copper deposit—based on Hyperspectral high frequency wave infrared technology [D]. Chengdu: Chengdu university of technology (in Chinese with English abstract).
- GUO Na. 2017. "Study for the porphyry prospecting model construction based on the shortwave infrared technique" Report of the National Science Foundation of China[R]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese).
- GUO Yan-you, GAO Chun-wu, HAO Xiao-ling, TANG Yao-quan, ZOU Bing, WEI Jian, LI Jun, NIU Chuan-jun, DU Liang, WANG Xin, MENG Xiang-mei. 2016. 2015 annual final report concerning the exploring working in Sinongduo mining area, Xietongmen county[R]. Beijing: Zhong Di Bao Lian (Beijing) Land & Respectfully Yours, Esource Exploration Technology Co., Ltd.(in Chinese).
- HEALD P, FOLEY N K, HAYBA D O. 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite types[J]. *Economic Geology*, 82: 1-26.
- HEDENQUIST J W, LOWENSTERN J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 370: 519-527.
- HEDENQUIST J W. 1986. Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the circum-Pacific Basin[J]. *Transactions of the Fourth Circum Pacific Conference on Energy and Mineral Resources Conferences*, Abstract: 513.
- HUANG Yi-ru, GUO Na, ZHENG Long, YANG Zong-yao, FU Yuan. 2017. 3D Geological Alteration Mapping Based on Remote Sensing and Shortwave Infrared Technology: A Case Study of the Sinongduo Low-sulfidation Epithermal Deposit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 779-789(in Chinese with English abstract).
- LI Guang-ming, ZHANG Xia-nan, QIN Ke-zhang, SUN Xing-guo, ZHAO Jun-xing, YIN Xian-bo, LI Jin-xiang, YUAN Hua-shan. 2015. The telescoped porphyry-high sulfidation epithermal Cu(-Au) mineralization of Rongna deposit in Duolong ore cluster at the southern margin of QiangtangTerrane, Central Tibet: Integrated evidence from geology, hydrothermal alteration and sulfide assemblages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2307-2324(in Chinese).
- LI Hai-feng, TANG Ju-xing, DING Shuai, LI Zhuang, HU Gu-yue, XIE Fu-wei, ZHOU Hui-lin, YANG Zong-yao, SHI Shuo. 2017. Fluid Inclusion Study and Stable Isotope Characteristics of the Sinongduo Ag-Pb-Zn Deposit, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 670-686(in Chinese with English abstract).
- LI Zhuang, LANG Xing-hai, DING Shuai, LI Hai-feng, YANG Zong-yao, SHI Shuo, WANG Li-qiang, LI Yu-hai. 2017. A Study of the Modes of Occurrence of Silver in the Sinongduo Epithermal Ag-Pb-Zn Deposit, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 687-701(in Chinese with English abstract).
- LIU Chang-ling, LIU Qin-fu. 2002. Advance on the relation of orders of kaolinite crystallization in coal series to the origin[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 17(2): 73-81(in Chinese).
- MENG Zhan. 2016. The study on mineralogical characteristics of Sinongduo epithermal Pb-Zn-Ag deposit of Tibet and its prospecting significance[D]. Chengdu: Chengdu University of

- Technology(in Chinese with English abstract).
- PAN Gui-tang, LI Xing-zhen, WANG Li-quan, DING Jun, CHEN Zhi-liang. 2002. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions[J]. Geological Bulletin of China, 21(11): 701-707(in Chinese with English abstract).
- PIRAJNO F, BAGAS L. 2002. Gold and silver metallogeny of the South China Fold Belt: a consequence of multiple mineralizing events?[J]. Ore Geology Reviews, 20: 109-126.
- PIRAJNO F. 2009. Hydrothermal Processes and Mineral System[M]. Springer, 355-356
- QIAN Jian-ping, HUANG De-yang, XIE Biao-wu, CHEN Hong-yi, ZHAO Xiao-xing. 2013. Study on geology and Tectono-geochemistry of the Sinongduo lead-zinc deposit in Xietongmen county, Tibet[J]. Geotectonica et Metallogenia, 37(1): 29-41(in Chinese with English abstract).
- SCOTT H, JOHN H D, RICHARD M T. 2015. Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits[J]. SEG Newsletter, 100: 12-17.
- TANG Ju-xing, DING Shuai, MENG Zhan, HU Gu-yue, GAO Yi-ming, XIE Fu-wei, LI Zhuang, YUAN Mei, YANG Zong-yao, CHEN Guo-rong, LI Yu-hai, YANG Hong-yu, FU Yan-gang. 2016b. The First Discovery of the Low Sulfidation Epithermal Deposit in Linzizong Volcanics, Tibet: A Case Study of the Sinongduo Ag Polymetallic Deposit[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(4): 461-470(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, SONG Yang, WANG Qin, LIN Bin, YANG Chao, GUO Na, FANG Xiang, YANG Huan-huan, WANG Yi-yun, GAO Ke, DING Shuai, ZHANG Zhi, DUAN Ji-lin, CHEN Hong-qi, SU Deng-kui, FENG Jun, LIU Zhi-bo, WEI Shao-gang, HE Wen, SONG Jun-long, LI Yan-bo, WEI Lu-jie. 2016a. Geological Characteristics and Exploration Model of the Tiegelongnan Cu (Au-Ag) Deposit: The First Ten Million Tons Metal Resources of a Porphyry-epithermal Deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(6): 663-690(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, SONG Yang, WANG Qin, LIN Bin. 2014. Epithermal deposits and the main prospecting indicators[J]. Mineral Deposits, 33(s1): 33-34(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, SUN Xing-guo, DING Shuai, WANG Qin, WANG Yi-yun, YANG Chao, CHEN Hong-qi, LI Yan-bo, LI Yu-bin, WEI Lu-jie, ZHANG Zhi, SONG Jun-long, YANG Huan-huan, DUAN Ji-lin, GAO Ke, FANG Xiang, TAN Jiang-yun. 2014. Discovery of the Epithermal Deposit of Cu (Au-Ag) in the Duolong Ore Concentrating Area, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(1): 6-10(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, WANG Qin, YANG Huan-huan, GAO Xin, ZHANG Ze-bin, ZOU Bing. 2017. Mineralization, Exploration and Resource Potential of Porphyry-skarn-epithermal Copper Polymetallic Deposits in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(5): 571-613(in Chinese with English abstract).
- WANG Qin, TANG Ju-xing, FANG Xiang, LIN Bin, SONG Yang, WANG Yi-yun, YANG Huan-huan, YANG Chao, LI Yan-bo, WEI Lu-jie, FENG Jun, LI Li. 2015. Petrogenetic setting of andsites in Rongna ore block, Tiegelong Cu (Au-Ag) deposit, Duolong ore concentration area, Tibet: Evidence from zircon U-Pb LA-ICP-MS dating and petrogeochemistry of andsites[J]. Geology in China, 42(5): 1324-1336(in Chinese with English abstract).
- YANG Chao, TANG Ju-xing, WANG Yi-yun, YANG Huan-huan, WANG Qin, SUN Xing-guo, FENG Jun, YIN Xian-bo, DING Shuai, FANG Xiang, ZHANG Zhi, LI Yu-bin. 2014. Fluid and geological characteristics researches of Southern Tiegelong epithermal porphyry Cu-Au deposit in Tibet[J]. Mineral Deposits, 33(6): 1287-1305(in Chinese with English abstract).
- YANG Chao. 2015. Minerals, alteration and fluid characteristics research of Southern Tiegelong high sulfidation epithermal-porphyry Cu (Au) deposit, Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- YANG K, HUNTINGTON J F, CUDAHY T J, MASON P, SCOTT K M. 2001. Spectral mapping the compositional variation of white micas in hydrothermal systems and the application in mineral exploration[J]. IEEE, 3294-3296.