

# 湖北金银山锑矿蚀变矿物红外光谱特征及找矿应用

邱佳炜<sup>1</sup>, 刘新星<sup>1,2</sup>, 薛哲<sup>3</sup>, 张娟<sup>1,2</sup>, 成嘉伟<sup>1</sup>, 卢克轩<sup>1</sup>, 王猛<sup>1</sup>,  
杨俊峰<sup>1</sup>, 王瑛雪<sup>1</sup>

(1. 河北地质大学 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031; 2. 河北地质大学 地球科学学院,  
河北 石家庄 050031; 3. 湖北省地质局 第四地质大队, 湖北 赤壁 437100)

**摘要:** 鄂南锑矿地区是我国重要锑矿产地之一, 研究区内发现过大量锑多金属矿床(点)。目前随着浅部锑矿资源被开发殆尽, 以往对中深部的找矿勘查仍未有新的进展, 因此急需寻找一套快速有效的勘查方法, 对该地找矿模型与预测方面进行深入研究, 以扩大资源量和找矿成果。本文以金银山锑多金属矿床作为研究对象, 利用短波红外光谱技术(SWIR)对于金银山锑矿ZK3101、ZK2701钻孔岩心进行光谱扫描, 厘定获得了金银山锑矿蚀变矿物种类、组合、波谱参数等信息, 并划分出蚀变矿物分带, 分析矿化与蚀变矿物分带之间的关系。金银山锑金矿主要蚀变矿物有云母类、绿泥石类、碳酸盐类等, 其中绢云母化带与成矿关系密切。通过计算绢云母族矿物Al—OH光谱特征参数, 发现矿化部位绢云母结晶度(IC值)与Al—OH 200nm特征峰吸收峰位值(Pos 2 200)出现低值异常( $IC < 2$ ,  $Pos 2 200 < 2 205 \text{ nm}$ ), 可作为有效的示矿指标。认为应用短波红外光谱技术可以快速圈定锑金矿体, 有效指导矿产勘查, 降低找矿成本, 提高勘查效率, 实现找矿突破。

**关键词:** 锑矿床; 热液蚀变; 红外光谱分析; 绢云母; 绿泥石; 绢云母结晶度

中图分类号:P618.4; P575.4

文献标识码:A

文章编号: 1000-6524(2024)03-0776-11

## Infrared spectroscopic characteristics and prospecting applications of altered minerals in the Jinyinshan antimony deposit in Hubei Province

QIU Jia-wei<sup>1</sup>, LIU Xin-xing<sup>1,2</sup>, XUE Zhe<sup>3</sup>, ZHANG Juan<sup>1,2</sup>, CHENG Jia-wei<sup>1</sup>, LU Ke-xuan<sup>1</sup>,  
WANG Meng<sup>1</sup>, YANG Jun-feng<sup>1</sup> and WANG Ying-xue<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 3. Fourth Geological team of Hubei Geological Bureau, Chibi 437100, China)

**Abstract:** As one of the important antimony mining areas in China, a large number of antimony polymetallic deposits (points) have been discovered in the southern Hubei antimony mining area. With the depletion of shallow antimony ore resources, there has been no new progress in the exploration of middle and deep parts. Therefore, there is an urgent need to find a fast and effective exploration method, conduct in-depth research on the exploration model and prediction of the area, in order to expand the amount of resources and exploration results. This article takes the Jinyinshan antimony polymetallic deposit as the research object. Short wave infrared spectroscopy (SWIR) technology

收稿日期: 2023-04-13; 接受日期: 2023-12-14; 编辑: 曲丽莉

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702352); 国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFC2900100); 河北地质大学博士启动基金(BQ2017012); 河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2022017)

作者简介: 邱佳炜(1999- ), 男, 硕士研究生, 研究方向: 第四纪地质学, E-mai: 755282579@qq.com; 通讯作者: 刘新星(1987- ), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质找矿工作, E-mai: Email: liuxinxing963@163.com。

网络首发时间: 2024-02-04; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240202.1519.002.html>

was used to scan the rock cores of ZK3101 and ZK2701 boreholes in Jinyinshan antimony deposit, obtaining information on the types, combinations, and spectral parameters of altered minerals in Jinyinshan antimony deposit. The altered mineral zoning was divided, and the relationship between mineralization and altered mineral zoning was analyzed. The main altered minerals in the Jinyinshan antimony gold deposit include mica, chlorite, carbonate, etc. Among them, the sericite mineralization zone is closely related to mineralization. By calculating the Al—OH spectral characteristic parameters of sericite minerals, it was found that the crystallinity (IC value) of sericite at the mineralized site and the absorption peak value (Pos 2 200) of the Al—OH 2 200 nm characteristic peak showed low value anomalies ( $IC < 2$ ,  $Pos 2 200 < 2 205$  nm), which can be used as an effective indicator of mineralization. It is believed that the application of shortwave infrared spectroscopy technology can quickly delineate antimony gold deposits, effectively guide mineral exploration, reduce exploration costs, improve exploration efficiency, and achieve breakthroughs in mineral exploration.

**Key words:** antimony deposits; hydrothermal alteration; infrared spectral analysis; sericite; chlorite; sericite crystallinity

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (41702352); National Key Research and Development Program for Young Scientists (2021YFC2900100); Doctoral Start-up Fund of Hebei University of Geosciences (BQ2017012); Hebei Provincial Postgraduate Innovation Funding Program (CXZZSS2022017)

蚀变矿物一直都是国内外学者研究热液矿床中的重点,通过对研究区矿床的蚀变矿物类型、空间分布特征、期次等方面进行研究,能够提高对矿床成因的认知并引导找矿勘查率(Thompson *et al.*, 1999; 谢富伟等, 2015; 张世涛等, 2017)。传统的针对矿床围岩蚀变矿物的研究手段如EPMA、XRD等技术研究周期长、成本高、效率低。近年兴起的短波红外光谱技术(SWIR),能够快速、高效、低成本对矿床中蚀变矿物进行识别,利用短波红外波段中( $1\text{ 300}\sim 2\text{ 500}$  nm)矿物基团振动规律能够有效识别 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Al—OH}$ 、 $\text{Fe—OH}$ 、 $\text{Mg—OH}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 等基团,同时可以通过提取矿物反射波谱变化规律指示热液中心。目前短波红外技术已被广泛应用于国内外矿产勘查领域当中,在斑岩型、浅成低温热液型、VMS型、矽卡岩型等矿床中均有应用(Thompson *et al.*, 1999; Jones *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2005; Chang *et al.*, 2011; Laakso *et al.*, 2016; 陈华勇等, 2019; 游富华等, 2021)。

金银山锑矿位于湖北省赤壁市拓坪矿区,研究区蚀变矿物主要分布在破碎带周边,蚀变矿物种类有硅化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、绿泥石化,且出现褪色蚀变现象(舒志明等, 2015)。早在1958年该矿区内锑矿就已有研究与开采,近年来在金银山破碎带中发现了伴生锂矿的存在(郭唯明等, 2019),但是随着浅部的锑矿资源被开采殆尽,前人对矿区中深部并未取得突破性进展,并且对成矿规

律、找矿模型的研究仍处于空白阶段(舒志明等, 2015; 罗湘生, 2013)。鉴于此本文使用短波红外对金银山钻孔ZK3101、ZK2701进行光谱测量,解译钻孔蚀变矿物种类及其相对含量,分析蚀变矿物光谱特征及变化规律,提取绢云母光谱变化参数特征,为金银山及所处拓坪矿区进一步勘查工作提供技术指导。

## 1 地质概况

金银山矿区位于赤壁市赵李桥镇,隶属湖北拓坪锑矿勘查区,其大地构造位置处于扬子陆块区下扬子陆块幕阜山被动边缘褶冲带上(图1)。区域内出露地层除少量第四系外,基底为中元古界冷家溪群以泥沙为主的板岩、砂质板岩、凝灰质砂岩等浅变质岩,盖层为震旦-侏罗系以碳酸盐为主的夹泥沙、砂质、硅质等沉积岩。矿区属于方山大幕山金锑铅锌多金属IV成矿带西段,成矿地质条件较好。因经历多次构造运动与变形,使得区内构造断裂极为发育,北西向、北东向、东西向、近南北向断裂均有发育,其中北西向构造为最主要的控矿构造。区内侵入岩为燕山期侵入的幕阜山花岗岩。围岩内见有少量煌斑岩脉、辉绿岩脉。区域岩浆活动频繁,燕山早期构造、重熔岩浆活动与成矿密切相关,区内主要容矿地层为震旦系陡山沱组及冷家溪群坪原组,岩性为泥质白云岩、灰岩、页岩及板岩。

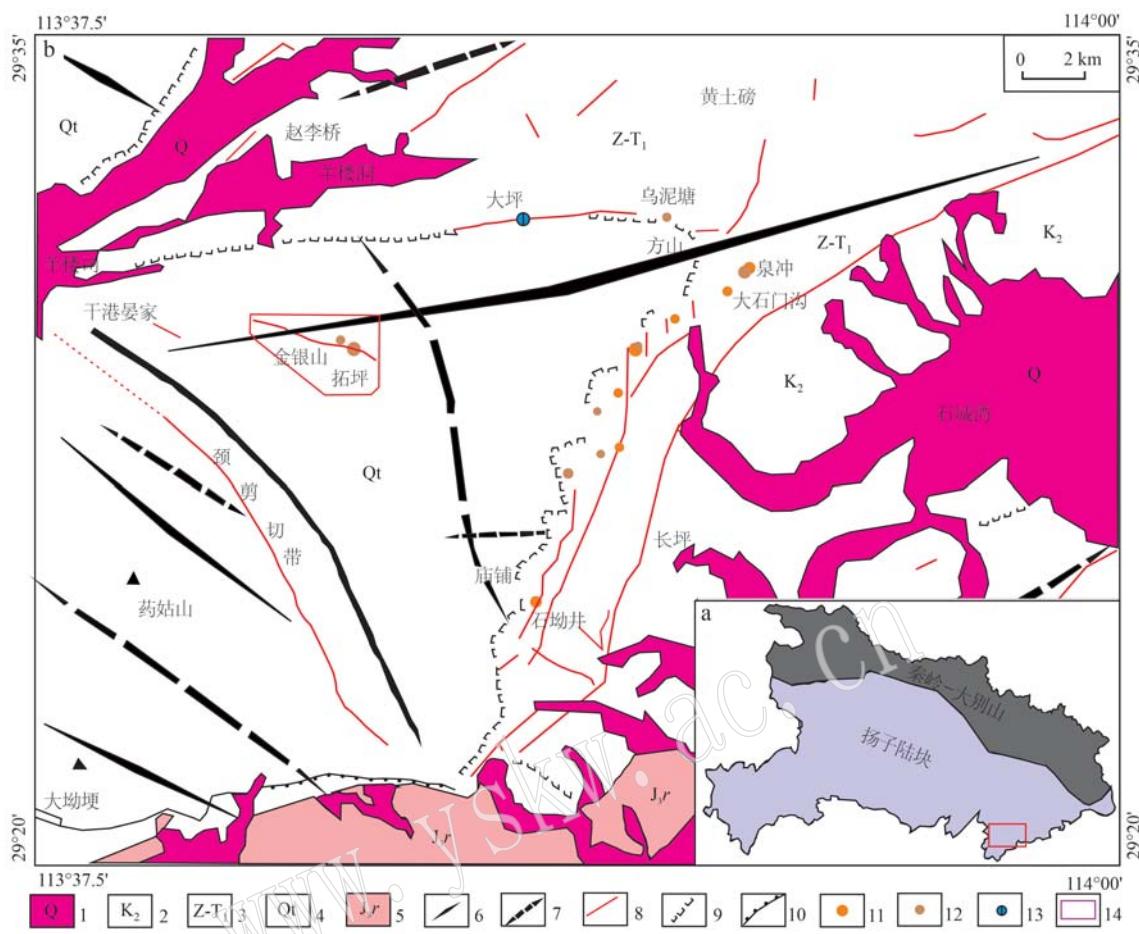


图1 湖北省大地构造地质简图(a)与拓坪矿区地质图(b)(据舒志明等, 2015修改)

Fig. 1 Geotectonic sketch map of Hubei Province (a) and geological map of Tuoping mining area (b) (modified after

Shu Zhiming et al., 2015)

1—第四系; 2—上白垩统; 3—震旦系-下三叠统; 4—青白口系; 5—晚侏罗世花岗岩; 6—倒背斜; 7—倒转向斜; 8—断裂; 9—向斜构造; 10—低级接触变质相带; 11—金矿床(点); 12—锑矿床(点); 13—铅锌矿床; 14—普查区范围

1—Quaternary; 2—Upper Cretaceous; 3—Sinian-Lower Triassic; 4—Qingbaikou System; 5—Late Jurassic granite; 6—inverted anticline slope; 7—inverted syncline; 8—fault; 9—syncline tectonics; 10—low-level contact metamorphic zone; 11—gold deposits (points); 12—antimony deposits (points); 13—lead-zinc deposits; 14—scope of census area

## 2 实验部分

### 2.1 样品采集

本次测试样品为金银山 ZK3101、ZK2701 钻孔岩心。ZK3101 钻孔终孔深度为 150.38 m, ZK2701 孔深 138.2 m, 2 个钻孔均穿透主矿体, 毗邻断裂破碎带, 能够从矿石类型、岩石、地层、地质构造等方面, 反映矿床总体情况。

### 2.2 实验仪器与数据采集

本次红外光谱测量使用了美国 ASD (Analytical Spectral Devices) 公司的 TerraSpec 4 Hi-Res 矿物光

谱仪, 测试范围为 350~2 500 nm, 分辨率达到 6 nm, 光谱解译软件为澳大利亚 CSIRO 的 The Spectral Geologist 软件 (TSG8.0)。针对全孔岩心每隔 0.3 m 设置测点, 如遇蚀变显著区域或矿化段则加密测试点。同时测试之前对岩心进行清洗晾晒工作, 确保岩心处于干燥、无尘状态下方可进行测试。使用 ASD 便携式光谱测量仪时, 需要将仪器提前半小时进行预热, 并放置标准矿物使其校准, 当基线平直且接近 100% 时表示完成校准。测量工作进行时, 应将岩心标记的油漆面朝下, 同时保证岩心表面无其余遮挡物, 每个测试样点测试 10 条数据, 测试完成后, 人工在 ViewSpecPro 软件内对异常值剔除后, 将剩余

数据平均后合并。

### 2.3 数据处理与分析

软件 TSG 全称为“*The Spectral Geologist*”, 是一款专门为地质光谱应用开发的软件。此次数据处理使用的是最新版本 TSG8.0, 软件内置的光谱助手(TSA)会对光谱数据进行自动处理。将合并后的数据导入 TSG 中, 借助软件内置的核心算法对光谱数据自动处理, 并将标准光谱库数据与测试数据进行匹配, 计算数据中矿物的相对含量以及误差(郭娜等, 2018)。

## 3 结果分析与解译

### 3.1 钻孔岩性与蚀变矿物种类

对金银山钻孔 ZK3101、ZK2701 短波红外光谱进行解译, 并统计地表向深部蚀变矿物分布。结果表明, 金银山锑金矿短波红外光谱波段共识别出多硅白云母、铁绿泥石、镁铁绿泥石、白云母、菱铁矿、方解石、铁白云石、菱镁矿、蒙脱石、黑云母、石膏等

矿物, 以多硅白云母、铁绿泥石为主, 镁铁绿泥石、白云母次之, 蒙脱石、菱铁矿以及部分碳酸盐类矿物仅在钻孔零星出现(图 2)。金银山钻孔 ZK3101、ZK2701 全孔岩性以变质粉砂岩、粉砂质板岩为主, 烩斑岩脉、碎裂岩穿插其中, 烩斑岩脉、碎裂岩为矿化富集部位, 与矿化关系密切。

### 3.2 蚀变分带

对金银山钻孔 ZK3101、ZK2701 测试光谱数据进行解译, 并通过对比钻孔数据以及手标本和镜下岩相学观察, 发现绢云母、黑云母、绿泥石、石英、方解石、黄铁矿、辉锑矿的存在(图 3a、3b、3c), 亦有热液活动痕迹(图 3d), 基本证实本次短波红外光谱解译结果的正确性。针对解译出大于 10% 蚀变矿物, 结合地球化学数据, 对钻孔中的蚀变分带进行了划分。ZK3101 中蚀变分带由浅至深划分为: 绢云母-绿泥石带、绢云母化带、绢云母绿泥石化带。ZK2701 划分为绢云母-绿泥石带、绿泥石-蒙脱石带、绢云母-绿泥石-方解石带、绢云母带。ZK3101 矿化品位高值主要存在于绢云母带中, 绢云母-绿泥

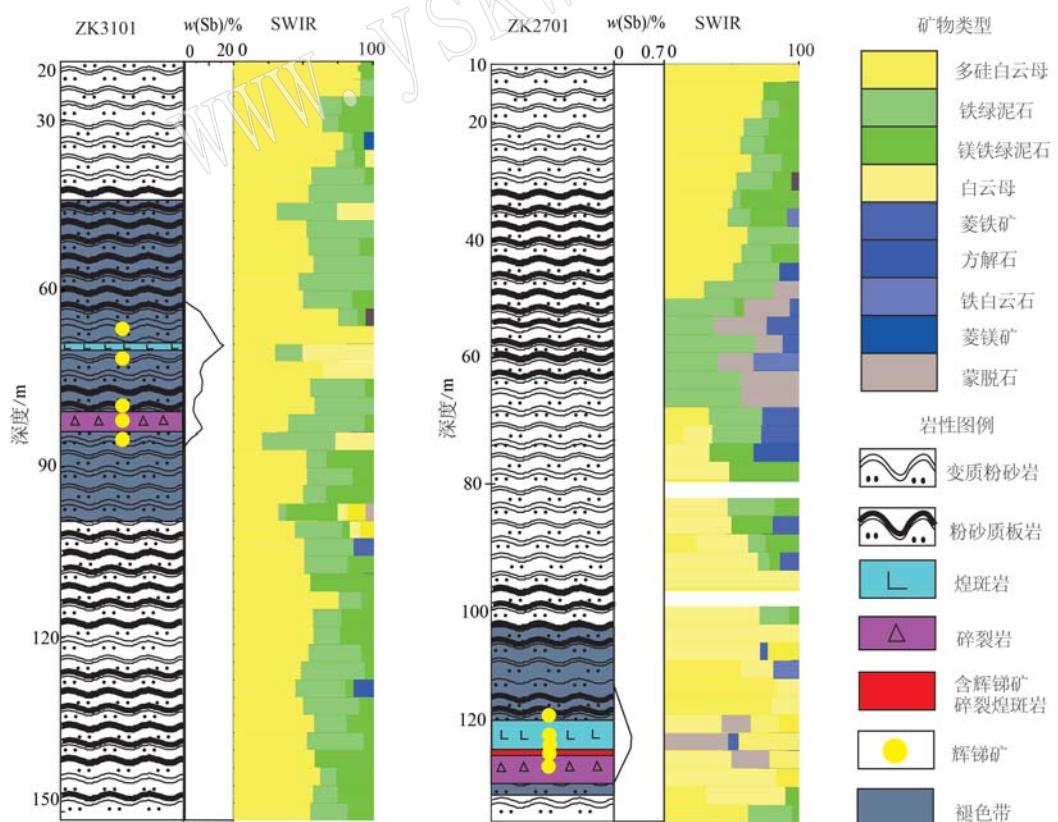


图 2 金银山锑矿 ZK3101、ZK2701 短波红外解译结果与岩性分布柱状图

Fig. 2 Short wave infrared interpretation results and lithological distribution histogram of ZK3101 and ZK2701 in Jinyinshan antimony mine

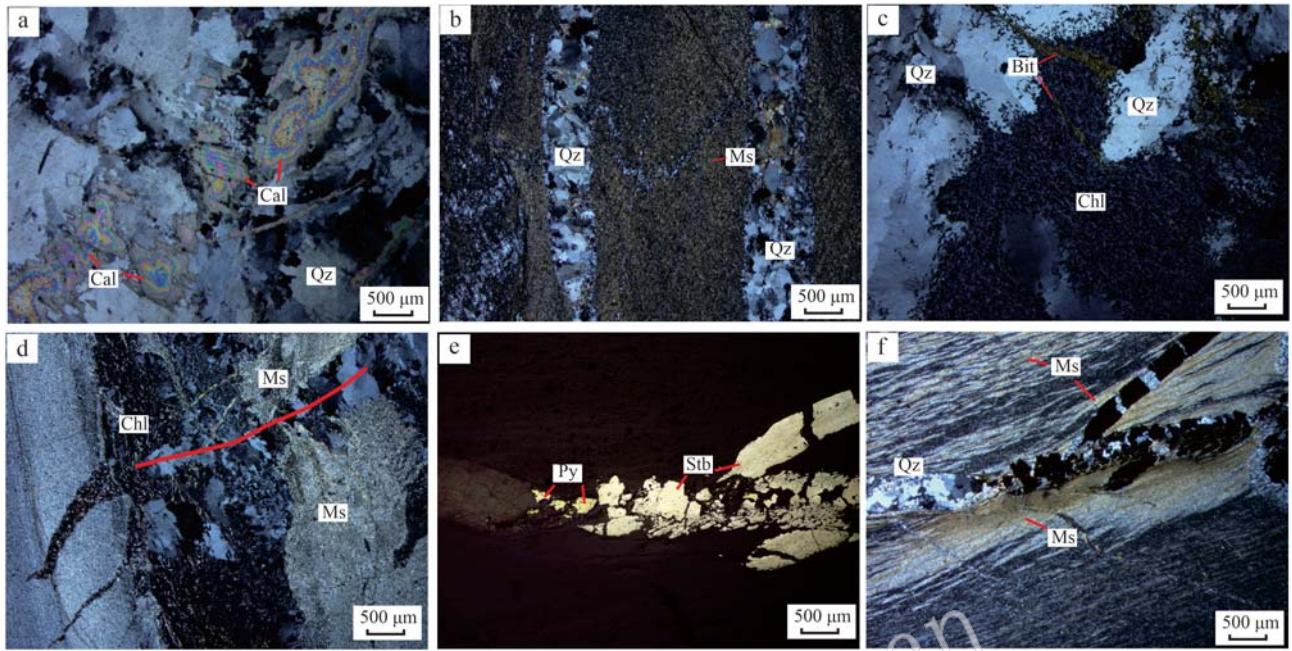


图3 金议山蚀变矿物与金属矿物镜下照片

Fig. 3 Microscopic photographs of alteration minerals and metal minerals in Jinyinshan

a—碳酸盐化；b—微斜长石发生绢云母化蚀变；c—黑云母发生绿泥石化蚀变；d—红线代表流体运移方向；e、f—黄铁矿、辉锑矿伴随石英、绢云母出现；Cal—方解石；Ms—绢云母；Chl—绿泥石；Qz—石英；Ab—长石；Py—黄铁矿；Stb—辉锑矿；Bit—黑云母  
 a—carbonated；b—microcline feldspar undergoes sericite alteration；c—chlorite alteration of biotite；d—the red line represents the direction of fluid migration；e, f—pyrite and stibnite occur along with quartz and sericite；Cal—calcite；Ms—sericite；Chl—chlorite；Qz—quartz；Ab—feldspar；  
 Py—pyrite；Stb—stibnite；Bit—biotite

石化带中略有出现，而ZK2701矿化则出现在绢云母化带中，绢云母在矿化部位大量出现（图3e、3f），可作为重要的找矿标志。

## 4 讨论

### 4.1 绢云母特征光谱参数指示意义

绢云母是常见的热液蚀变矿物之一，红外光谱中对绢云母族矿物的识别主要是根据2 200 nm位置的Al—OH吸收特征，以及2 170、2 350、2 450 nm附近的次级吸收特征（Clark *et al.*, 1990），图4为标准绢云母族矿物谱线特征与本次实测绢云母矿物谱线特征。在矿产勘查领域，利用绢云母族矿物光谱吸收特征如：Pos 2 200（2 200 nm处吸收峰位置偏移）、IC值（绢云母2 200 nm处吸收深度与1 900 nm处层间吸附水深度之比）、FWHM（2 200 nm吸收峰半高宽比值）建立新型找矿指标，已应用于多种不同矿床的找矿实践当中（郭娜等，2019；代晶晶等，2020；王旭辉等，2022）。成嘉伟等（2023）在河北白

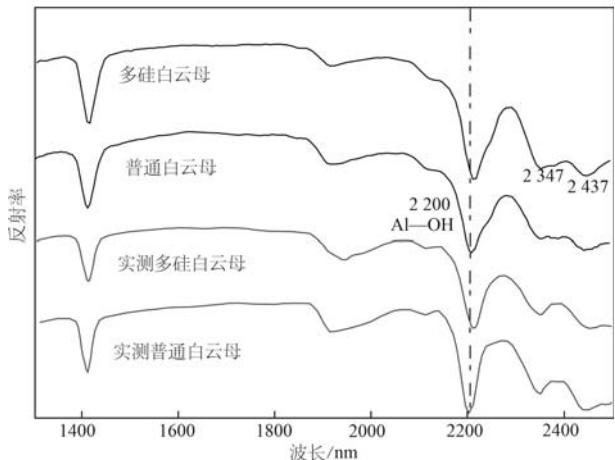


图4 标准绢云母与实测金议山绢云母的红外光谱特征

Fig. 4 The IR spectral characteristics of standard sericite and the measured spectral in Jinyinshan

洞砂卡岩型铁矿中发现越靠近热液、矿化中心，伊利石IC值增加，Al—OH 2 200 Pos减小。刘新星等（2021）在乌奴格吐山斑岩型矿床发现越趋近于成矿

中心,白云母 Al—OH 2 200 Pos 变小,同时伊利石结晶度(IC)越大。任欢等(2020)在冈底斯德明顶矿区斑岩型铜矿发现越靠近矿化热液中心,绢云母越向短波方向偏移。Yang 等(2012)在塔斯马尼亚海利尔 VHSM 型矿床中发现,在矿化部位以及热液中心绢云母波长 Al—OH 2 200 Pos 增大。王猛等(2023)在湖南仁里伟晶岩型铌钽矿发现矿化部位绢云母 Pos 2 200 出现异常低值(2 196~2 199 nm),IC 值出现异常高值(>3)。邵雪维等(2021)在胶东新城金矿发现伊利石结晶度增加(<1.2)与绢云母 Al—OH 2 200 Pos 增加(<2 205 nm)为矿化部位。郭娜等(2018)在铁格隆南斑岩-浅成低温热液型矿床发现矿体主要位于绢英岩化带中,与中铝绢(白云母)(2 206~2 208 nm 附近)共存。

不难看出,在不同类型的矿床中,在热液中心、矿化富集部位所呈现的光谱特征参数并不一致,即使在同一类型的矿床当中亦完全不相同,这可能与绢云母自身的结构特征有关。绢云母单矿物结构为两层硅氧四面体夹一层铝氧八面体,绢云母光谱吸收特征由硅氧四面体、铝氧八面体结构中的 Al 离子决定,若结构中 Al 离子含量发生改变,对应的光谱吸收特征亦会发生改变(Jones *et al.*, 2005)。当四、八面体中 Al 含量较高时,绢云母光谱吸收特征表现为 Al—OH 2 200 Pos 向短波方向偏移,而当 Si、Fe、Mg 离子与晶格中的 Al 离子发生 Tschermark 置换时,四、八面体中 Al 含量减小,光谱上表现为 Al—OH 2 200 Pos 向长波偏移(Jones *et al.*, 2005; 梁树能等, 2012)。按照 Al 相对含量与 Pos 2 200 吸收峰之间关系进行划分即:高铝绢云母(Pos 2 200<2 203 nm)、中铝绢云母(普通绢云母)(2 203~2 208 nm)、低铝绢云母(多硅白云母)(Pos 2 200>2 208 nm)(Scott and Yang, 1997; 杨志明, 2012; 叶发旺等, 2018)。绢云母 IC 值,能够反映绢云母矿物的结晶程度、温度,IC 值变化的原因在于绢云母矿物形成过程中当环境温度降低时,绢云母硅氧四面体晶格中分子逐渐被其他成分所取代,使得绢云母层间中蕴含了更多的 H<sub>2</sub>O,在短波红外谱线上表现中吸附水深度增加,从而导致 IC 值减小。因此结晶度越差,IC 值越小。

使用绢云母族矿物特征光谱参数示踪矿化时,应当充分考虑研究对象所处的具体地质环境。温度、压力、围岩成分、断裂构造均能够对绢云母 Al—OH 2 200 Pos 吸收峰位造成影响。如楚多曲中

温硫化物型铅锌矿床中发现绢云母 Al—OH 2 200 Pos、绢云母 IC 值均与矿化富集区域呈负相关关系,原因可能是矿体形成受岩浆水与大气降水发生流体混合导致矿物沉淀(李明, 2018)。郭娜等(2018)在铁格隆南斑岩-浅成低温热液型矿床中发现中铝白云母(2 206~2 208 nm 附近)与矿化关系密切原因可能是由深部的斑岩型矿体与受断层共同作用所致。叶发旺等(2018)指出在热液蚀变系统中,高铝绢云母处在更高温流体的环境中,低铝绢云母处在更低温的流体环境,而在变质系统中,高铝绢云母反映更高温低压的流体环境,而低铝绢云母反映更低温高压的流体环境。总之,不同研究区的绢云母光谱参数与矿化之间并不一定能总结出相同的波谱变化规律,但目前绢云母特征光参数已经被成功应用在各类矿床的实际找矿勘查当中,证明绢云母矿物光谱特征参数能够在一定范围内对矿化、流体运移的趋势起到指示性作用。

金银山锑多金属矿床中 2 个钻孔均识别出大量绢云母族矿物,本次研究提取绢云母族矿物中 2 200 nm 附近 Al—OH 吸收峰位值(Pos 2 200)来对应吸收峰深度(Dep 2 200),H<sub>2</sub>O 在 1 900 nm 附近吸收峰位值(Pos 1 900)对应吸收峰深度为(Dep 1 900),并通过计算 2 200 nm 吸收峰深度(Dep 2 200)与 H<sub>2</sub>O 吸收峰深度来表示绢云母结晶度(IC)。对金银山 ZK3101、ZK2701 中 Al—OH 吸收峰位值与结晶度进行统计,通过在空间上 Pos 2 200 与 IC 值变化特征对金银山流体运移趋势做出一定讨论。在金银山锑矿中绢云母 Pos 2 200 与 IC 值均呈现出一定的变化规律(图 5)。

整体分布情况为:在 ZK3101 中,Pos 2 200 变化区间集中在 2 202~2 210 nm 之间,大多数样点集中在 2 207~2 209 nm。伴随着深度增加,Pos 2 200 略有减少,而 IC 值具有显著的增大趋势。大多数样点集中在 2 207~2 209 nm 之间。IC 值变化区间总体位于 1.8~15 之间,在 20~60 m 处 IC 值集中在 3~10 区间内,在 60~85 m 处 IC 值呈明显降低趋势,集中在 1~5 区间内,在 85~150 m 处,IC 值集中在 7~15.5 之间。

在 ZK2701 中,Pos 2 200 变化区间集中在 2 196~2 204 nm 之间,大多数样点集中在 2 200~2 204 nm 之间,煌斑岩、碎裂岩体所测得 Pos 2 200 明显向短波方向偏移(Pos 2 200<2 202 nm)。C 值整体样点集中在 0.5~2 之间。如图所示,煌斑岩段、碎裂岩段

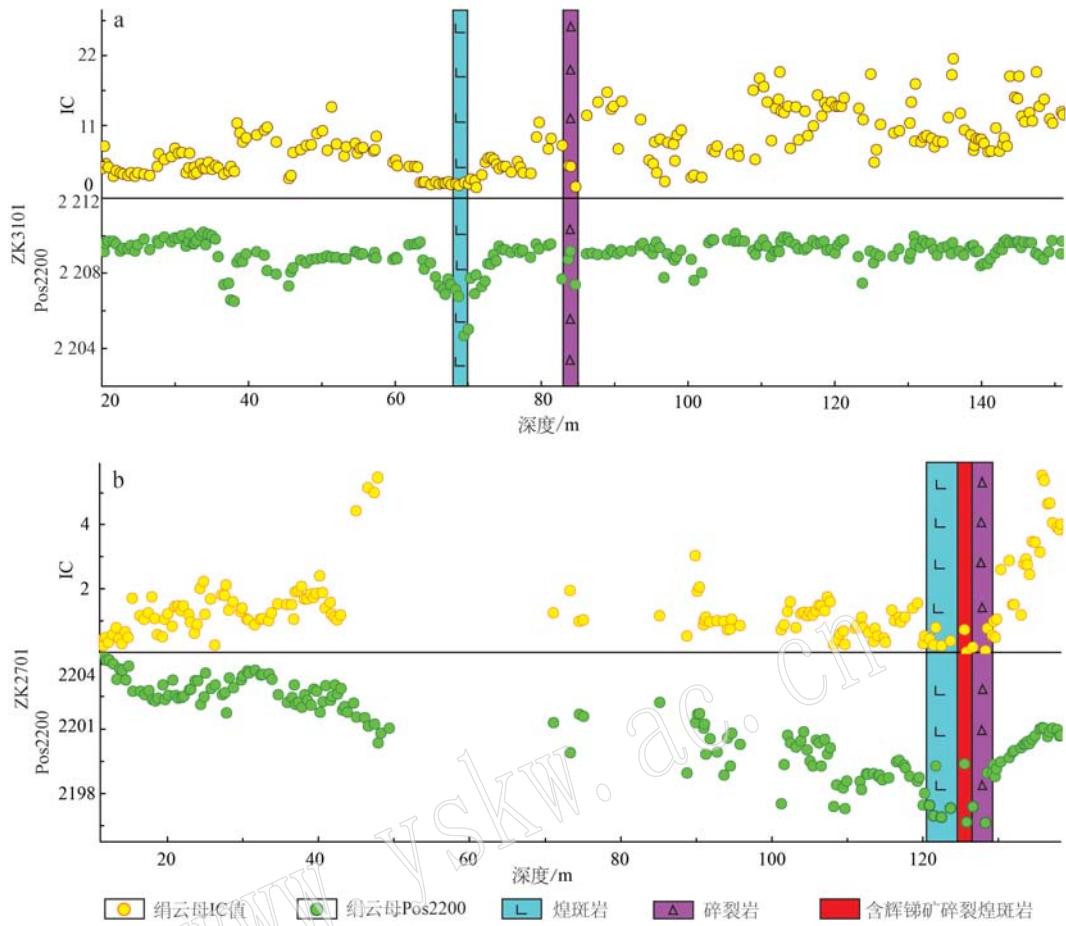


图 5 ZK3101(a) 和 ZK2701(b) 绢云母短波红外光谱特征参数示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of sericite shortwave infrared spectral parameters from ZK3101 (a) and ZK2701 (b)

Pos 2 200 和 IC 值具有异常低值, 同时此处为矿化部位。

从 ZK2701、ZK3101 的钻孔情况而言, 伴随着深度的增加, Pos 2 200 呈现逐渐减小的趋势, 而 IC 值则呈逐渐增大的趋势。温度、压力、pH 值均能对绢云母 Al—OH 吸收偏移产生一定影响, 但金银山钻孔整体岩性多为浅变质岩系, 整体并无太大变化, 推测 Pos 2 200 与 IC 值变化主要是受到深部热液与地层压力影响。在无矿部位, 如 ZK3101 中 35~40 m、45~50 m 和 ZK2701 中的 45~50 m, 出现 Al—OH 吸收峰向短波方向偏移、IC 值增大的现象, 推测可能是由于构造运动或受到石英脉侵入影响所致, 与矿化关系不大。在矿化段(煌斑岩、碎裂岩)60~90 m, 绢云母 Pos 2 200、IC 出现异常低值, 形成结晶程度较差的高铝绢云母、中铝绢云母 (IC < 4, Pos 2 200 < 2 207 nm)。ZK2701 中也出现类似现象。20~50 m 主要形成结晶程度相对较差的中铝绢云母 (IC < 2,

Pos 2 200 < 2 204 nm), 130~140 m 出现结晶程度较好的高铝绢云母 (IC > 2, Pos 2 200 > 2 200 nm)。在矿化段(110~130 m), 绢云母 Pos 2 200、IC 出现异常低值, 形成结晶程度较差的高铝绢云母 (IC < 0.5, Pos 2 200 < 2 202 nm)。而伴随钻孔深度的增加, 绢云母结晶程度逐渐增加, 光谱偏移规律表现为 IC 伴随着深度增加而增加, 可能是受到深部隐伏热源的影响所致。

研究显示, 在金银山锑矿床中与成矿关系密切的是低 Pos 值、低 IC 值特征的普通绢云母。而在无矿部位, 主要出现高 Pos 值、高 IC 值特征的多硅绢云母。绢云母矿物光谱特征与锑矿的形成密切相关。当温度降低时绢云母光谱往往会出现高 Pos 值、低 IC 值特征, 但金银山该处则出现了低 Pos 值、低 IC 值, 推测在绢云母形成时除了温度降低之外, 也受到酸性条件的影响, 使得绢云母 Pos 2 200 向短波方向偏移(井新奎, 2018; Portela *et al.*, 2021)。

前人对鄂南成矿远景区中流体进行过测试, 成矿流体具有弱酸性、高还原性的流体环境(李江洲, 2013)。还原性流体也为辉锑矿的析出提供了充足的条件。热液流体中锑矿往往以硫代亚锑酸盐( $\text{Sb}_2\text{S}_4^{2-}$ 、 $\text{HSb}_2\text{S}_4^-$ 、 $\text{H}_2\text{Sb}_2\text{S}_4$ )或 $\text{Sb}_2\text{S}_2(\text{OH})_2$ 、 $\text{Sb}(\text{OH})_3$ 的形式赋存于流体中, 而研究区流体温度大致在200°C以下(李江洲, 2013), 此时流体中辉锑矿主要以硫代亚锑酸盐 $\text{Sb}_2\text{S}_2(\text{OH})_2$ 的形式赋存于流体中, 而当温度降低或pH值发生改变时, 会使得辉锑矿发生交代而析出,  $\text{HSb}_2\text{S}_4^- + \text{H}^+ = \text{H}_2\text{S} + \text{Sb}_2\text{S}_3$ 、 $\text{Sb}_2\text{S}_2(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{S} = \text{Sb}_2\text{S}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ (胡雄伟, 1995; 林鑫, 2021)。在这个过程中, 由于水岩反应的不断进行, 流体中的 $\text{H}_2\text{O}$ 也在不断增加, 温度不断下降, 绢云母层间中容纳更多 $\text{H}_2\text{O}$ , 使得结晶度下降, IC值降低。值得一提的是, 在本次解译结果中矿化段未见绿泥石化与碳酸盐化, 伴随着岩石褪色现象的发生, 认为地层中的碳酸盐类矿物在受到酸性含矿流体影响下, 发生溶解消失, 如李江洲(2013)提及成矿流体还具有较高还原性, 受到酸性还原热液的影响, 原先形成含铁镁成分的硅酸盐类矿物如黑云母中铁镁质发生淋失, 引发岩石的褪色, 而铁镁质的淋失也是光谱解译矿化段并未形成绿泥石化的根本原因。因此, 对金银山锑矿可以通过研究普通白云母Pos 2 200与IC值叠加区作为矿化的指示标志。

#### 4.2 勘查指示意义

金银山锑金矿属于中-低温浅成热液型矿床, 浅成低温热液型矿床在形成时代上与周边的火山岩、次火山侵入岩形成时代一致, 作为热液成矿系统的浅部、远端, 往往与周围的矿床以及深部的侵入岩体构成一个完整的成矿系统, 例如福建紫金山浅成低温型金矿床与周边的碧田浅成低温热液金银矿床以及深部的中寮斑岩铜矿构成一个浅成低温热液-斑岩成矿系统(许超等, 2017; 毛光武等, 2015)。金银山锑金矿位于大幕山-方山成矿带西段, 段内发现如方山、金银山等12处锑矿床(矿点), 它们与金银山在围岩蚀变、矿化特征、矿床成因等方面具有相似性(舒志明等, 2015; 丁建华等, 2022; 王书民等, 2011), 同时金银山矿床位于幕阜山锂铍铌钽稀有金属矿集区的外围, 与断峰山伟晶岩型铌钽锂矿床相隔仅12 km, 南侧为稀有金属成矿关系密切的幕阜山大岩基, 这种紧密的时空关系也说明了该地区具有

良好的成矿潜力(郭唯明等, 2019)。

浅成低温热液型矿床有高硫型、低硫型之分, 在蚀变分带上, 低硫型一般由浅至深为冰长石-硅化-绿泥石化→绢云母、伊利石化→泥化→青磐岩化带, 高硫型则为硅化-高级泥化→(高岭石-蒙脱石)-泥化→青磐岩化带(Simmons et al., 2005, 毛光武等, 2015)。

结合本次光谱解析结果及金银山基础地质特征, 与典型浅成低温热液型矿床蚀变分带进行对比, 金银山锑多金属矿床可能是低硫型浅成低温热液型锑矿床, 同时与低硫型蚀变分带对比, 金银山锑多金属矿床的剥蚀水平处于中、浅部位。但此结论仍需更多实验数据进行验证。

短波红外光谱测量已被应用在如斑岩、矽卡岩、浅成低温热液型矿床的勘查和研究中, 证明了该技术能够应用于寻找不同矿床的热液、矿化中心。本次研究发现在金银山矿区的ZK3101、ZK2701 2个钻孔中Pos 2 200、IC值叠加区能够有效的指示矿化。该矿床的Pos 2 200、IC值变化规律与楚多曲浅成低温热液矿床规律相似(李明, 2018)。矿体附近出现较小的Pos 2 200、IC值, 远离矿体则逐渐增大, 这些规律在ZK3101的65~70 m段、80~85 m段、ZK2701的115~130 m段均可以得到清晰的展示。IC值的大小与温度相关, 金银山锑多金属矿床IC值由深至浅呈现减小的趋势, 可能反映了深部热液上侵时流体的水、岩比例以及温度的变化, 流体热液方向可能是自下而上流动。前人认为金银山多金属矿床是受构造破碎带控制的浅成低温热液型矿床。根据本文对温度变化的推测, 认为成矿热流体从深部沿构造破碎带向上运移、与大气降水接触混合、发生温度降低等物理化学条件的变化, 使得成矿物质析出并富集成矿。

值得一提的是, 虽然在本次测试结果中, 煌斑岩与矿化之间的相关性较为良好, 但煌斑岩与锑矿化之间是否有具体关系仍有待考证。张丽雅等(2016)对研究区内方山煌斑岩与辉锑矿年龄进行测定, 发现煌斑岩年龄远大于辉锑矿, 煌斑岩与矿化之间仅存在空间上耦合的关系, 并未对成矿提供物质和能量。

综上所述, IC值与Pos 2 200低值的叠加区可以作为鄂南地区寻找金银山式锑多金属矿床的找矿标志( $\text{IC} < 2, \text{Pos } 2 \text{ 200} < 2 \text{ 202 nm}$ )。

## 5 结论

(1) 湖北金银山锑金矿钻孔ZK3101、ZK2701短波红外光谱解译出的蚀变矿物主要有绢云母族、绿泥石族、碳酸盐族等,以绢云母族矿物、绿泥石族矿物含量最多。ZK3101中按照蚀变分带由浅至深为:绢云母-绿泥石带、绢云母化带、绢云母绿泥石化带。ZK2701划分为:绢云母-绿泥石带、绿泥石-蒙脱石带、绢云母-绿泥石-方解石带、绢云母带。矿化附近绢云母大量出现,可作为重要的找矿标志。

(2) 在金银山锑矿对ZK3101、ZK2701进行短波红外光谱测试,绢云母IC值总体表现为在垂向上随着深度减小而增大,推测深部具有隐伏岩提供热源。

(3) 绢云母短波红外光谱特征显示,金银山锑矿绢云母结晶度(IC)与Al—OH吸收峰位值(Pos 2 200)矿化具有明显负相关,表现为越接近矿化中心,即Al—OH吸收峰位值(Pos 2 200)、绢云母结晶度(IC)均短波方向偏移,因此可以将Al—OH吸收峰位值(Pos 2 200)、绢云母结晶度(IC)低值叠加区( $IC < 2$ ,  $Pos 2 200 < 2 202 \text{ nm}$ )作为研究区寻找金山式锑多金属矿床的找矿标志。

## References

- Chang Z, Hedenquist J W, White N C, et al. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines[J]. Economic Geology, 106(8): 1 365~1 398.
- Chen Huayong, Zhang Shitao, Chu Gaobin, et al. 2019. The short wave infrared (SWIR) spectral characteristics of alteration minerals and applications for ore exploration in the typical skarn-porphyry deposits, Edong ore district, eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(12): 3 629~3 643 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Jiawei, Liu Xinxing, Zhang Juan, et al. 2023. Infrared Spectral Analysis and Prospecting of Alteration Minerals of Baijian Skarn Type Iron Deposit in Han-Xing Area[J]. Earth Science, 48(4): 1 551~1 567 (in Chinese with English abstract).
- Clark R N, King T, Klejwa M, et al. 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 95(B8): 12 653~12 680.
- Dai Jingjing, Zhao Longxian, Jiang Qi, et al. 2020. Review of thermal-Infrared spectroscopy applied in geological ore exploration[J]. Acta Geologicica sinica, 94(8): 2 520~2 533 (in Chinese with English abstract).
- Ding Jianhua, Ye Huishou, Zhang Yong, et al. 2022. Metallogenesis of antimony deposits in Damushan area, north margin of Yangtze block[J]. Geological Bulletin of China, 41(7): 1 237~1 248 (in Chinese with English abstract).
- Guo Na, Guo Wenbo, Liu Dong, et al. 2019. Alteration zoning model associated with Tibetan Sinogduo epithermal deposit, the continental volcanic areas of Gangdise metallogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(3): 833~848 (in Chinese with English abstract).
- Guo Na, Shi Weixin, Huang Yiru, et al. 2018. Alteration mapping and prospecting model construction in the Tiegelongnan ore deposit of the Duolong ore concentration area, northern Tibet, based on shortwave infrared technique[J]. Geological Bulletin of China, 37(2/3): 446~457 (in Chinese with English abstract).
- Guo Weiming, Wang Denghong, Li peng, et al. 2019. Sb-Li assemblages: Rare assemblages of mineralization and the occurrence of lithium [J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1 296~1 308 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiongwei. 1995. Characteristics and discussion of stibnite solubility in different solutions [C]//Yichang Institute of Geology and Mineral Resources. Proceedings of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences(20). Geological Publishing House, 38~47 (in Chinese with English abstract).
- Jing Xinkui. 2018. Application of Short Wave Infrared Spectroscopy Technology in Dongshibu Area, Tibet[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Jones S, Herrmann W and Gemmell J B. 2005. Short wavelength infrared spectral characteristics of the HW horizon: Implications for exploration in the Myra Falls volcanic-hosted massive sulfide camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada[J]. Economic Geology, 100(2): 273~294.
- Laakso K, Peter J M, Rivard B, et al. 2016. Short-wave infrared spectral and geochemical characteristics of hydrothermal alteration at the Archean Izok Lake Zn-Cu-Pb-Ag volcanogenic massive sulfide deposit, Nunavut, Canada: Application in exploration target vectoring[J]. Economic Geology, 111(5): 1 223~1 239.
- Li Jiangzhou. 2013. Analysis on the ore-forming materials source of the antimony deposit in southern HuBei[J]. Hubei Geology & Mineral Resources, 27(S1): 59~64 (in Chinese with English abstract).
- Li Ming. 2018. Study on the Hyperspectral Characteristics and Hydrothermal Alteration of the Drill Core from ChuDuoqu Lead-Zinc Deposit in Tuotuo River Area, Qinghai Province[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

- Liang Shuneng, Gan Fuping, Yan Bokun, et al. 2012. Relationship between composition and spectral feature of muscovite [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, (3): 111~115 (in Chinese with English abstract).
- Lin Xin. 2021. A review of study of mineralogy of stibnite in hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 41(S1): 78~82 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xinxing, Zhang Hong, Zhang Juan, et al. 2021. A study on alteration mineral assemblages and mineralization characteristics of a Wunugetushan porphyry copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, China, based on infrared spectroscopy [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 40(1): 121~133 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xiangsheng. 2013. Geology, metallogenesis and prospecting directions of stibium deposits in south HuBei[J]. *Resources Environment & Engineering*, 27(S1): 69~75, 80 (in Chinese with English abstract).
- Mao Guangwu, Cao Liang, Yan Xieping, et al. 2015. A review of research on epithermal gold deposits[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 30(1): 121~132 (in Chinese with English abstract).
- Portela B, Sepp M D, van Ruitenbeek F J A, et al. 2021. Using hyperspectral imagery for identification of pyrophyllite-muscovite intergrowths and alunite in the shallow epithermal environment of the Yerington porphyry copper district [J]. *Ore Geology Reviews*, 131: 104012.
- Ren Huan, Zheng Youye, Wu Song, et al. 2020. Short-wavelength infrared characteristics and indications of exploration of the Demingding copper-molybdenum deposit in Tibet [J]. *Earth Science*, 45(3): 930~944 (in Chinese with English abstract).
- Scott K M and Yang K. 1997. Spectral reflectance Studies of white micas [J]. Australian Mineral Industries Research Association Ltd. Report, 439: 35.
- Shao Xuewei, Peng Yongming, Wang Gongwen, et al. 2021. Application of SWIR, XRF and thermoelectricity analysis of pyrite in deep prospecting in the Xincheng gold orefield, Jiaodong Peninsula [J]. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 236~251 (in Chinese with English abstract).
- Shu Zhiming, Wan Fangyi, Sun Guangjin, et al. 2015. Discussion on middle-deep prospecting of Zheping Ore District in Chibi City [J]. *Resources Environment & Engineering*, 29(6): 785~789 (in Chinese with English abstract).
- Simmons S F, White N C and John D A. 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits[J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, 485~522.
- Thompson A J B, Hauff P L, Robitaille A J, et al. 1999. Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy[J]. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 39: 1~13.
- Wang Meng, Liu Xinxing, Li Jiankang, et al. 2023. Study on the Characteristics of infrared spectral and exploration application of Renli granite pegmatite type rare metal deposit in northern Hunan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(7): 2101~2116 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuming, Zhang Wensheng, Shi Huabin, et al. 2011. Exploration of the mineralization law of southern antimony ore[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 37(7): 46~49 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xuhui, Duan Shigang, Sun Peng, et al. 2022. Short-Wave infrared spectroscopy analysis and prospecting indication of hydro-thermal alteration of Waigang silver polymetallic deposit in Zhejiang, China [J]. *Mineral Deposits*, 41(1): 174~188 (in Chinese with English abstract).
- Xie Fuwei, Tang Juxing and Lang Xinghai. 2015. Ore potential of the porphyry in No. I deposit of the Xiongcuo ore district, Tibet: Evidence from hydrothermal and accessory minerals[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(1): 51~64 (in Chinese with English abstract).
- Xu Chao, Chen Huayong, White N, et al. 2017. Alteration and mineralization of Xinan Cu-Mo ore deposit in Zijinshan orefield, Fujian Province, and application of short wavelength infra-red technology (SWIR) to exploration[J]. *Mineral deposits*, 36(5): 1013~1038 (in Chinese with English abstract).
- Yang K, Lian C, Huntington J F, et al. 2005. Infrared spectral reflectance characterization of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu-Au deposit, Xinjiang, China [J]. *Mineralium Deposita*, 40(3): 324~336.
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusen, et al. 2012. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu district: A case study of Niancun ore district, Tibet [J]. *Mineral deposits*, 31(4): 19 (in Chinese with English abstract).
- Ye Fawang, Meng Shu, Zhang Chuan, et al. 2018. Minerageny study of high-Al, medium-Al and low-Al sericitic identified by airborne hyperspectral remote sensing technology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(2): 395~412 (in Chinese with English abstract).
- You Fuhua, Jiang Jiaoqiao, Zhang Xiaobo, et al. 2021. Application of short wave infrared technique in exploration of Ashele Cu-Zn deposit in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(5): 1010~

- 1 022 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liya, Zhang Chengsheng and Zhang Wensheng. 2016. The relationship between gold belt and lamprophyre (dyke) in South Hubei [J]. Resources Environment & Engineering, 30(6): 825~828 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shitao, Chen Huayong, Zhang Xiaobo, et al. 2017. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique to exploration of skarn deposit: A case study of Tonglvshan Cu-Fe-Au deposit, Edongnan (southeast Hubei) ore concentration area [J]. Mineral Deposits, 36(6): 1 263~1 288 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈华勇, 张世涛, 初高彬, 等. 2019. 鄂东南矿集区典型矽卡岩-斑岩矿床蚀变矿物短波红外(SWIR)光谱研究与勘查应用[J]. 岩石学报, 35(12): 3 629~3 643.
- 成嘉伟, 刘新星, 张娟, 等. 2023. 河北邯郸地区白涧铁矿蚀变矿物红外光谱分析及找矿研究[J]. 地球科学, 48(4): 1 551~1 567.
- 代晶晶, 赵龙贤, 姜琪, 等. 2020. 热红外高光谱技术在地质找矿中的应用综述[J]. 地质学报, 94(8): 2 520~2 533.
- 丁建华, 叶会寿, 张勇, 等. 2022. 扬子地块北缘大幕山地区锑矿成矿预测[J]. 地质通报, 41(7): 1 237~1 248.
- 郭娜, 郭文铂, 刘栋, 等. 2019. 冈底斯成矿带陆相火山岩区浅成低温热液矿床蚀变分带模型——以西藏斯弄多矿床为例[J]. 岩石学报, 35(3): 833~848.
- 郭娜, 史维鑫, 黄一入, 等. 2018. 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, 37(2~3): 446~457.
- 郭唯明, 王登红, 李鹏, 等. 2019. Sb-Li 组合: 罕见的矿化组合及锂的赋存状态[J]. 地质学报, 93(6): 1 296~1 308.
- 胡雄伟. 1995. 不同体系溶液中辉锑矿溶解度特征及讨论[C]//宜昌地质矿产研究所. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集(20). 北京: 地质出版社, 38~47.
- 井新奎. 2018. 短波红外光谱技术在西藏懂师布地区的找矿应用[D]. 中国地质大学(北京).
- 李江洲. 2013. 鄂南地区锑矿成矿物质来源浅析[J]. 资源环境与工程, 27(S1): 59~64.
- 李明. 2018. 青海省沱沱河地区楚多曲铅锌矿岩心高光谱特征及蚀变分带研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 梁树能, 甘甫平, 闫柏锐, 等. 2012. 白云母矿物成分与光谱特征的关系研究[J]. 国土资源遥感, (3): 111~115.
- 林鑫. 2021. 热液金矿中辉锑矿矿物学研究综述[J]. 四川地质学报, 41(S1): 78~82.
- 刘新星, 张弘, 张娟, 等. 2021. 基于红外光谱技术研究内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿蚀变和矿化特征[J]. 岩矿测试, 40(1): 121~133.
- 罗湘生. 2013. 鄂南地区锑矿地质特征、成矿作用及找矿方向[J]. 资源环境与工程, 27(S1): 69~75, 80.
- 毛光武, 曹亮, 严卸平, 等. 2015. 浅成低温热液型金矿研究综述[J]. 地质找矿论丛, 30(1): 121~132.
- 任欢, 郑有业, 吴松, 等. 2020. 西藏德明顶铜钼矿床短波红外光谱特征及勘查指示意义[J]. 地球科学, 45(3): 930~944.
- 邵雪维, 彭永明, 王功文, 等. 2021. 短波红外光谱、X射线荧光光谱、黄铁矿热电性分析在胶东新城金矿田深部找矿中的应用[J]. 地学前缘, 28(3): 236~251.
- 舒志明, 万方义, 孙广进, 等. 2015. 浅谈赤壁柘坪矿区中深部找矿[J]. 资源环境与工程, 29(6): 785~789.
- 王猛, 刘新星, 李建康, 等. 2023. 湘北仁里花岗伟晶岩型稀有金属矿床红外光谱特征研究及勘查应用[J]. 岩石学报, 39(7): 2 101~2 116.
- 王书民, 张文胜, 石华斌, 等. 2011. 鄂南锑矿成矿规律浅探[J]. 内蒙古石油化工, 37(7): 46~49.
- 王旭辉, 段士刚, 孙鹏等. 2022. 浙江外岗银多金属矿床热液蚀变短波红外光谱分析及找矿指示[J]. 矿床地质, 41(1): 174~188.
- 谢富伟, 唐菊兴, 郎兴海. 2015. 西藏雄村矿区I号矿体斑岩含矿性研究——来自热液蚀变矿物和副矿物的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 34(1): 51~64.
- 许超, 陈华勇, White N, 等. 2017. 福建紫金山矿田西南铜钼矿段蚀变矿化特征及SWIR勘查应用研究[J]. 矿床地质, 36(5): 1 013~1 038.
- 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 等. 2012. 短波红外光谱技术在浅剥蚀斑岩铜矿区勘查中的应用——以西藏念村矿区为例[J]. 矿床地质, 31(4): 19.
- 叶发旺, 孟树, 张川, 等. 2018. 航空高光谱识别的高、中、低铅绢云母矿物成因学研究[J]. 地质学报, 92(2): 395~412.
- 游富华, 蒋姣姣, 张锦章, 等. 2021. 短波红外光谱技术在新疆阿舍勒铜锌矿床勘查中的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 40(5): 1 010~1 022.
- 张丽雅, 张成乘, 张文胜. 2016. 鄂南方山金矿床煌斑岩(脉)与金矿关系[J]. 资源环境与工程, 30(6): 825~828.
- 张世涛, 陈华勇, 张小波, 等. 2017. 短波红外光谱技术在矽卡岩型矿床中的应用——以鄂东南铜绿山铜铁金矿床为例[J]. 矿床地质, 36(6): 1 263~1 288.