

doi: 10.12029/gc20230509004

徐清俊, 张志新, 叶发旺, 张川, 王艺龙, 李瑞炜, 田程, 李新春. 2025. 热液型矿床白色云母短波红外光谱特征及其在地质找矿中的应用[J]. 中国地质, 52(3): 1022–1035.

Xu Qingjun, Zhang Zhixin, Ye Fawang, Zhang Chuan, Wang Yilong, Li Ruiwei, Tian Cheng, Li Xinchun. 2025. Shortwave infrared spectral characteristics of white mica in hydrothermal deposits and its application in geological exploration[J]. *Geology in China*, 52(3): 1022–1035(in Chinese with English abstract).

热液型矿床白色云母短波红外光谱特征及其在地质找矿中的应用

徐清俊¹, 张志新², 叶发旺¹, 张川¹, 王艺龙³, 李瑞炜⁴, 田程⁵, 李新春¹

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 水利部信息中心, 北京 100053; 3. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650100; 4. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002; 5. 陕西核工业工程勘察院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:【研究目的】白色云母是热液型矿床最为广泛发育的蚀变矿物, 其短波红外光谱蕴含着丰富的地质信息, 记录了其形成热液环境及其与矿化的关系。研究热液型矿床白色云母短波红外光谱变化规律及地质影响因素, 这不仅可为高光谱矿物填图技术的深入找矿应用提供重要理论支持, 还可以进一步完善蚀变矿物勘查标识体系。

【研究方法】本文系统整理、总结了热液型矿床白色云母短波红外光谱特征, 剖析了白色云母化学组分和含量, 热液流体温度、酸碱性、压力等地质因素与其短波红外光谱特征的关系。【研究结果】白色云母短波红外光谱吸收特征与其结构中主要的两种含氢基团 Al–OH 和 H₂O 有着密切的关系, 主要的两个特征吸收峰位分别位于 2200 nm (主要吸收峰) 和 2350 nm (次要吸收峰) 附近。白色云母 Al–OH 特征吸收峰位受到热液流体温度、压力、酸碱性等地质因素影响, 主要发生 Tschermak (契尔马克) 替换 $^{VI}Al^{3+} + ^{IV}Al^{3+} + ^{IV}Si^{4+} + ^{VI}(Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+})$, Si、Al、Fe、Mg、K、Na 等离子含量产生变化, 致使其 Al–OH 特征吸收峰位在 2180 nm 和 2230 nm 之间发生漂移变化。原岩组分、其他蚀变矿物、流体组分、岩石渗透率和水/岩比值等地质因素也会影响白色云母 Al–OH 特征吸收峰位波长的变化。【结论】白色云母 Al–OH 特征吸收峰波长与矿化的关系会因地质环境的不同而呈现出正相关或负相关关系, 在利用 Al–OH 特征吸收峰波长变化规律圈定矿床热液矿化中心时需要综合考虑矿床地质特征。白色云母的伊利石成熟度或结晶度 (ISM 或 SWIR–IC) 在不同的热液矿床系统中则呈现出一致性, 即靠近矿床热液矿化中心, 伊利石成熟度值相对较大, 远离矿床热液矿化中心则相对较小。未来应加强白色云母光谱特征的精细、量化星空 (卫星和航空) 高光谱遥感反演研究, 建立典型热液矿床成矿热液特征的高光谱遥感反演应用示范, 以推进星空高光谱遥感矿物填图技术的深入地质应用。

关键词: 白色云母; 短波红外光谱; Al–OH 特征吸收峰; 伊利石成熟度; 矿产勘查工程; 热液型矿床

创 新 点: 系统总结了热液型矿床白色云母短波红外光谱特征及其地质影响因素; 提出了白色云母 Al–OH 特征吸收峰波长变化规律指示矿床热液矿化中心具有局限性, 伊利石成熟度或结晶度 (ISM 或 SWIR–IC) 指示矿床热液矿化中心具有可靠性。

中图分类号: P627 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2025)03–1022–14

Shortwave infrared spectral characteristics of white mica in hydrothermal deposits and its application in geological exploration

收稿日期: 2023–05–09; 改回日期: 2024–01–29

基金项目: 核技术研发科研项目 (地 HTLM2101) 资助。

作者简介: 徐清俊, 男, 1987 年生, 博士, 工程师, 主要从事遥感地质和构造地质研究; E-mail: aniuge2020@163.com。

通信作者: 张川, 男, 1985 年生, 博士, 研究员, 主要从事遥感地质研究; E-mail: chuanzi521@163.com。

XU Qingjun¹, ZHANG Zhixin², YE Fawang¹, ZHANG Chuan¹, WANG Yilong³, LI Ruiwei⁴,
TIAN Cheng⁵, LI Xinchun¹

(1. *Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China*; 2. *Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China*; 3. *Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Kunming 650100, Yunnan, China*; 4. *Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, Hebei, China*; 5. *Shaanxi Nuclear Industry Engineering Survey Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China*)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] White mica is widely developed in the hydrothermal deposits, and the shortwave infrared spectrum of white mica contains rich geological information, recording the hydrothermal environment it formed and its relationship with mineralization. Analyzing the variation patterns and geological influencing factors to short wave infrared spectra of white mica in hydrothermal deposits not only provides important theoretical support for the in-depth exploration and application of hyperspectral mineral mapping technology, but also further improves the identification system for exploration of altered minerals. **[Methods]** This paper systematically summarizes the characteristics of the short wave infrared spectral changes of white mica in hydrothermal deposits, and analyzes the relationship between the chemical composition and content of white mica, and geological factors such as hydrothermal fluid temperature, acid-base properties, pressure, and their shortwave infrared spectral characteristics. **[Results]** The absorption characteristics of shortwave infrared spectra in white mica are closely related to the two main hydrogen containing groups Al-OH and H₂O in its structure, and the two main characteristic absorption peaks are located near 2200 nm (main absorption peak) and 2350 nm (secondary absorption peak), respectively. Since the Al-OH characteristic absorption-peak positions of white mica are influenced by geological factors such as hydrothermal fluid temperature, pressure, acidity and alkalinity, white mica mainly undergoes Tschermak substitution $^{VI}Al^{3+} + ^{IV}Al^{3+} \rightarrow ^{IV}Si^{4+} + ^{VI}(Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+})$, resulting in changes in the content of Si, Al, Fe, Mg, K, and Na plasma, which results in a shift in the Al-OH characteristic absorption-peak position varying between 2180 nm and 2230 nm. Geological factors, such as original rock components, other altered minerals, fluid components, rock permeability, and water/rock ratios, can also affect the changes in the wavelength of the Al-OH characteristic absorption peaks of white mica. **[Conclusions]** The relationship between the Al-OH characteristic absorption peak wavelength of white mica and mineralization may exhibit a positive or negative correlation depending on the geological environment, therefore, when delineating the hydrothermal mineralization center, it is necessary to comprehensively consider the geological characteristics of the deposits. The illite maturity or crystallinity (ISM or SWIR-IC) of white mica is consistent in different hydrothermal deposit systems, that is, the maturity values of illite near the hydrothermal mineralization center are relatively large, while the maturity values of illite far away from the hydrothermal mineralization center are relatively small. In the future, in order to promote the in-depth geological application of satellite and airborne hyperspectral remote sensing mineral mapping technology, it should strengthen the fine and quantitative satellite and airborne hyperspectral remote sensing inversion researches on spectral characteristics of white mica, and establish a demonstration of hyperspectral remote sensing inversion application for mineralization hydrothermal characteristics of typical hydrothermal deposits.

Key words: white mica; shortwave infrared spectroscopy; Al-OH characteristic absorption peak; illite maturity; mineral exploration engineering; hydrothermal deposit

Highlights: The shortwave infrared spectral characteristics and geological influencing factors of white mica in hydrothermal deposits are systematically summarized. The changes in the wavelength of the Al-OH characteristic absorption peaks of white mica have limitations in indicating the hydrothermal mineralization center of the deposit, while the maturity or crystallinity (ISM or SWIR-IC) of illite is reliable in indicating the hydrothermal mineralization center of the deposit.

About the first author: XU Qingjun, male, born in 1987, doctor, engineer, mainly engaged in remote sensing in geology and structural geology; E-mail: aniuge2020@163.com.

About the corresponding author: ZHANG Chuan, male, born in 1985, doctor, professor, mainly engaged in remote sensing in geology; E-mail: chuanzi521@163.com.

Fund support: Supported by Nuclear Technology Research and Development Program (No. Geology HTLM2101).

1 引言

热液矿床, 又称汽水热液矿床(hydrothermal deposits), 是指各种成因的含矿的热流体, 在一定的物理化学条件下, 在有利的构造和围岩中, 通过充填和交代等成矿方式形成有用矿产的堆积(陈洪治和曾载淋, 2014)。对热液型矿床来说, 围岩蚀变是热液成矿作用的重要组成部分, 研究围岩蚀变能提供成矿时的物理化学条件、热液性质和演化(张川, 2020)。同时, 由于蚀变围岩与伴生矿体有着密切的成因和空间关系, 蚀变矿物的广泛分布是热液型矿床最为重要的特征之一, 全球主要热液矿床类型成矿机制的研究和成矿模式的建立都与蚀变矿物密切相关(陈华勇等, 2021)。短波红外光谱技术在热液蚀变矿物识别, 尤其是对肉眼难以区分的云母族矿物(含铝量不同划分)、绿泥石族矿物(镁、铁含量不同划分)、泥化矿物等; 利用典型蚀变矿物(如白色云母)短波红外光谱特征参数变化规律直接定位热液矿化中心; 快速定量测量矿物短波红外(SWIR)光谱的多种吸收特征属性(比如吸收特征的波长位置、半峰全宽、吸收深度和宽度等)等方面具有明显的独到的优势, 可为后期深入的地质勘查工作和找矿突破提供重要的找矿线索和找矿有利区, 已成功用于斑岩型矿床、浅成低温热液矿床、火山成因块状硫化物矿床(VMS)和铁氧化物-铜-金矿床(IOCC)中(Herrmann et al., 2001; Jones et al., 2005; Chang et al., 2011; 杨志明等, 2012; 杜小弟等, 2015; Laakso et al., 2016; 刘德长等, 2017; Wang et al., 2017; 侯隰鹏等, 2018; Guo et al., 2019; Zhang et al., 2019; Wang et al., 2021)。

白色云母是热液型矿床最常见、广泛发育的蚀变矿物, 其短波红外(SWIR)光谱的多种吸收特征属性均可被定量测量, 比如特征吸收峰的峰强度、峰对称、半峰全宽、峰位移、峰强比、反射率等参数, 这些光谱参数蕴含着丰富的地质信息, 记录了其形成热液环境及其与矿化的关系(连云长等, 2005; 章革等, 2005; 刘圣伟等, 2006; 曹焘等, 2008; Yang et al., 2011; Tappert et al., 2011, 2013; 杨志明等, 2012;

郭娜等, 2012, 2018; Travers and Wilson, 2015; Mauger et al., 2016; Guo et al., 2019; Wang et al., 2017; Xu et al., 2017; 侯隰鹏等, 2018; Uribe-Mogollon and Maher, 2018, 2020; Wang et al., 2021)。然而, 目前还很少有论文对白色云母短波红外光谱及其地质影响因素研究进行过综合总结。本文对近年来热液型矿床白色云母短波红外光谱特征及地质影响因素方面有关的研究成果进行总结和评述, 以期对白色云母短波红外光谱特征有一个系统全面的认识。

2 白色云母术语

白色云母(绢云母、白云母、伊利石等)是高光谱蚀变矿物填图中最为普遍的一组蚀变矿物, 是一种含水层状硅酸盐矿物, 光谱吸收特征与其结构中主要的两种含氢基团 Al-OH 和 H₂O 有密切的关系, 主要的两个特征吸收峰位分别位于 2200 nm(主要吸收峰)和 2350 nm 附近(次要吸收峰)(USGS, 1999)(图 1)。绢云母是斑岩系统绢英岩化带中的重要蚀变矿物, 从矿物学角度讲, 绢云母是具有丝绢光泽的细粒白云母, 由于实际光谱测量中未对矿物进行粒径测量, 因此严格意义上讲, 不同晶体结构的白云母与绢云母均属于白云母族矿物, 主要包括钠云母、白云母、多硅白云母等(Al-OH 特征吸收峰波长逐渐变大, 一般从 2180 nm 变化到 2230 nm)(郭娜等, 2012, 2018; Wang et al., 2017)。前人依据白云母 Al-OH 特征吸收在 2200 nm 附近的波长变化将其分为不同的亚类, 如富铝白云母(短波白云母)(2190~2203 nm)、中铝白云母(中波白云母)(2204~2212 nm)、贫铝白云母(长波白云母)(2213~2225 nm), 具体的划分标准随着研究区地质条件的不同而具有细微的差别(Yang et al., 2001; Carsten, 2011; 杨志明等, 2012; Xu et al., 2017; 张川等, 2017; Guo et al., 2019)。伊利石是一种层间阳离子亏损并具有二八面体结构的含水层状硅酸盐矿物, 伊利石的 Al-OH 特征吸收峰波长与白云母矿物相似, 与白云母相比, 伊利石在 1400 nm 处的水峰吸收相对较弱, 而在 1900 nm 处的水峰吸收相对

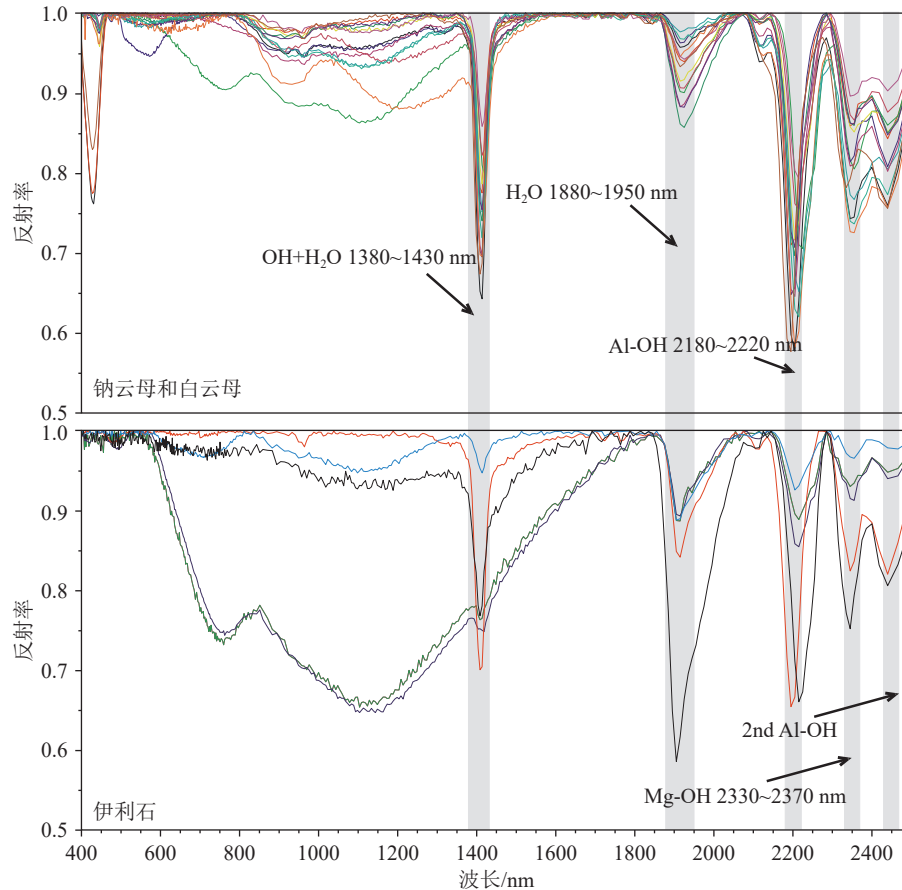


图 1 白云母组矿物短波红外光谱曲线(USGS, 1999)

Fig.1 Short wave infrared spectroscopy curves of white mica minerals (USGS, 1999)

较强(USGS, 1999)(图 1),但不能作为区分二者的标准。在实际应用中利用短波红外光谱很难将白云母与伊利石区分,一般将伊利石划为白云母组矿物来处理(甘甫平等, 2003; 卢燕, 2018)。因此,本文所提及的“白云母”术语是指一组具有明显的 Al-OH 光谱吸收特征的层状硅酸盐矿物,即是白云母、钠云母、多硅白云母、绢云母、伊利石、伊蒙混层等矿物或多个矿物组合的一个统称。

3 白云母短波红外光谱

同种矿物由于所处空间不同,其特征吸收峰的峰强度、峰对称、半高宽、峰位移、峰强比、反射率等参数也不尽相同。特征峰的各项参数地质意义如下:特征吸收峰的峰强度一定程度上反映了相对应蚀变矿物的相对丰度,峰强度大,则蚀变矿物相对丰度越大(van Ruitenbeek et al., 2005; Tappert et al., 2011, 2013),蚀变矿物的相对丰度对于划分矿床蚀

变分带至关重要,一般可用蚀变矿物特征峰的吸收深度来量化(Clark et al., 1990);峰对称一定程度上反映地质作用强度,峰对称数值越大,代表地质作用越强;半高宽则反映矿物形成温度,半高宽数值越大,代表该矿物形成温度低;特征峰的峰位移反映了在地质作用过程中,蚀变矿物某些阳离子的交换,如白云母的成分变化 Tschermak(契尔马克)替换 ${}^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} + {}^{\text{IV}}\text{Al}^{3+} \leftrightarrow {}^{\text{IV}}\text{Si}^{4+} + {}^{\text{VI}}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Mn}^{2+})$;反射率近似反映了岩石的颜色深浅,反射率数值大,岩石颜色偏浅,岩石偏酸性;峰强比是指矿物特征峰强度与其吸收水峰强度之比值(修连存等, 2009; Dufrechou et al., 2014)。

白云母的 Al-OH 在 2200 nm 附近出现特征的吸收,该吸收位置被称为白云母 2200 nm 吸收峰位(wAl-OH),相应吸收峰的深度称为伊利石 2200 nm 吸收峰深度(Depth2200),相应吸收峰的吸收深度一半位置的宽度称为半峰全宽(FWHM2200),

左边的宽度称为半高左宽(LWHD2200), 右边的宽度称为半峰右宽(RWHD2200), $FWHM2200 = LWHD2200 + RWHD2200$ (图 2), 半峰左宽(LWHD2200)与半峰右宽(RWHD2200)的比值($As = LWHD2200 / RWHD2200$)可来表征相应特征吸收峰带的不对称性(简称 $As2200$), $As2200 = 1$ 则表示对称, $As2200 > 1$ 则表示向左不对称, $As2200 < 1$ 则表示向右不对称(Dufréhou et al., 2014), 当然也有文献中用左右侧面积比值来表示不对称性(van der Meer, 2004); 同理, 白色云母的含氢基团 H_2O 在 1900 nm 附近出现特征的吸收, 该位置被称为伊利石 1900 nm 吸收峰位(wH_2O), 相应吸收深度称为伊利石 1900 nm 吸收峰深度(Depth1900), 相应吸收峰的吸收深度一半位置的带宽称为 1900 nm 半峰全宽($FWHM1900$) (图 2)。白色云母 2200 nm 吸收深度(Depth2200)与其 1900 nm 吸收峰深度(Depth1900)的比值, 可以用来确定白色云母类矿物的成熟度, 即伊利石光谱成熟度(Illite Spectral Maturity, $ISM = Depth2200 / Depth1900$), 也被称为短波红外伊利石结晶度(Short Wavelength Infrared Illite Crystallinity, 简称 SWIR-IC) (Yang et al., 2001; Chang et al., 2011; 杨志明等, 2012; Doublier et al., 2015) (图 2)。白色云母的伊利石结晶度是由 Kübler (1967) 提出用来指示白色云母形成温度的一个术语, 可由 X 射线衍射(XRD)测试得到, 称为 XRD-IC, 表示为伊利石的晶胞参数 10-Å 特征峰的半高宽(Kübler 参数),

XRD-IC 主要与温度有关, 温度越高, 伊利石结晶度越高(晶体越大), XRD-IC 值越小(吸收峰形越尖锐)(Frey, 1987), 而白色云母的短波红外伊利石结晶度(SWIR-IC)与 XRD-IC 有非常好的负相关关系, 即温度越高, XRD-IC 值越小, 短波红外伊利石结晶度值(SWIR-IC)越大(Chang et al., 2011; Doublier et al., 2015)。白色云母的伊利石成熟度(ISM 或 SWIR-IC)与 Al-OH 特征吸收峰波长($wAl-OH$)是云母族矿物常用的重要光谱参数(图 2), 与矿物形成的热液温度密切相关, 对指示热液矿化中心具有重要的作用(Chang et al., 2011; 杨志明等, 2012; Doublier et al., 2015; 陈华勇等, 2021)。因此, 利用上述白色云母短波红外光谱特征参数规律性变化来直接定位矿床可能的热液矿化中心, 已成为短波红外光谱技术勘查的前沿热点。

4 白色云母短波红外光谱影响因素

4.1 白色云母化学组分和含量

白色云母的晶体结构由两个四面体和一个八面体组成, 为 2:1 型(TOT 型, T 为四面体片, O 为八面体片)层状硅酸盐矿物, 当八面体中二价阳离子占据主导时, 称为三八面体云母(如金云母)(Velde, 1985), 但当八面体中三价阳离子占据主导时则为二八面体云母或白云母。白色云母的分子通式为 $XY_2Z_4O_{10}(OH, F)_2$, 其中 X 代表大阳离子(如 K^+ 、 Na^+ 、 Li^+), Y 代表八面体配位阳离子(如

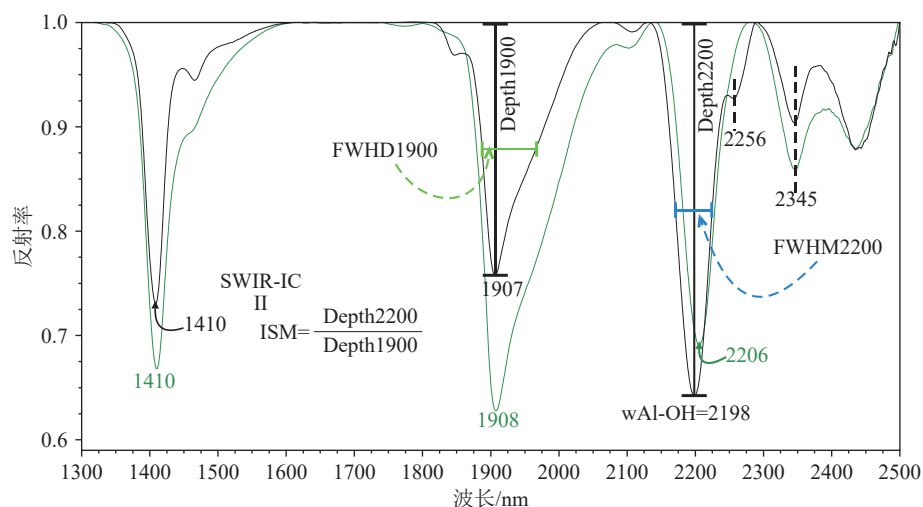


图 2 白色云母光谱
Fig.2 Spectra of white mica

Al^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+}), Z 代表四面体配位阳离子(如 Al^{3+} 、 Si^{4+})(Wang et al., 2017)。白色云母由于八面体配位原子的振动(如 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Ti^{4+} 与羟基)在短波红外(SWIR)区域的 1400 nm、2200 nm、2350 nm 和 2450 nm 处产生诊断性吸收特征(Clark et al., 1990; Beran, 2002)(图 1)。

在白云母($\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)、镁绿磷石($\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)和铁绿磷石($\text{KFeAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)三解图解中, Tschermak(契尔马克)耦合替换决定了三个化学端元之间的关系。白云母系列每配方单位含有 3.0 至 3.1 个硅阳离子(基于 11 个氧原子计算), 多硅白云母系列则含有 3.1 至 3.5 个硅阳离子, 绿磷石系列则含有 3.5 至 4.0 个硅阳离子(Tappert et al., 2013; Wang et al., 2017)(图 3)。研究表明, 在白云母系列中(多硅白云母、白云母、钠云母), 多硅白云母→白云母→钠云母(有些文献中也称为低铝绢云母、中铝绢云母、高铝绢云母), 波长呈现出向短波漂移的特征, 波长变化一般介于 2180~2230 nm(叶发旺等, 2018)。白云母的化学组分和含量决定了其波长的变化, 白云母系列 Al-OH 特征吸收峰波长通常位于 2195~2215 nm, 而多硅白云母系列 Al-OH 特征吸收峰波长则在 2215~2225 nm 变化(Duke, 1994; Clark, 1990)。而在白云母系列、多硅白云母系列、绿磷石系列中, 绿

磷石其实已经超出了白色云母范畴, 不属于广义上的白色云母族矿物。

白色云母的成分变化主要包括四种不同的替换过程: (1) Na^+ 与 K^+ 的直接层间替换; (2) 八面体结构中 $^{\text{VI}}\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow ^{\text{VI}}\text{Al}^{3+}$ 的直接替换; (3) 伊利石替换 $\text{K}^+ + ^{\text{IV}}\text{Al}^{3+} \leftrightarrow ^{\text{IV}}\text{Si}^{4+} + \square$ 层间阳离子位点; (4) Tschermak(契尔马克)替换 $^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} + ^{\text{IV}}\text{Al}^{3+} \leftrightarrow ^{\text{IV}}\text{Si}^{4+} + ^{\text{VI}}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Mn}^{2+})$ (Duke, 1994; Jones et al., 2005; Tappert et al., 2013; Wang et al., 2017; Uribe-Mogollon and Maher, 2018, 2020)(图 4), 其中, 白色云母的 Tschermak(契尔马克)替换 $^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} + ^{\text{IV}}\text{Al}^{3+} \leftrightarrow ^{\text{IV}}\text{Si}^{4+} + ^{\text{VI}}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Mn}^{2+})$ 和 Na^+ 与 K^+ 的直接层间替换可通过短波红外光谱技术监测到。当白云母波长变短时(2190~2204 nm), 白云母 Na 含量增多, 表现出钠云母的组分特征, 而当波长向长波方向移动时(2200~2208 nm), 表现出相对富 K 的特征(郭娜等, 2018)。在钠云母对白云母的替代中, $\text{Na}/(\text{Na} + \text{K})$ 的最大值可达 38 mol%(Lee et al., 1987); 而白云母替代钠云母, 其 $\text{K}/(\text{Na} + \text{K})$ 比值仅接近 15 mol%(Karabinos, 1981), 二者的相互替换与围岩类型中元素含量、其他微量元素含量、pH 值、温度、压力、变质程度等都有关系(郭娜等, 2018)。

研究表明白色云母 Al-OH 在 2200 nm 附近的特征吸收波长变化会受其化学组分六次配位铝含量的影响。Clark et al. (1990) 研究发现白色云母矿

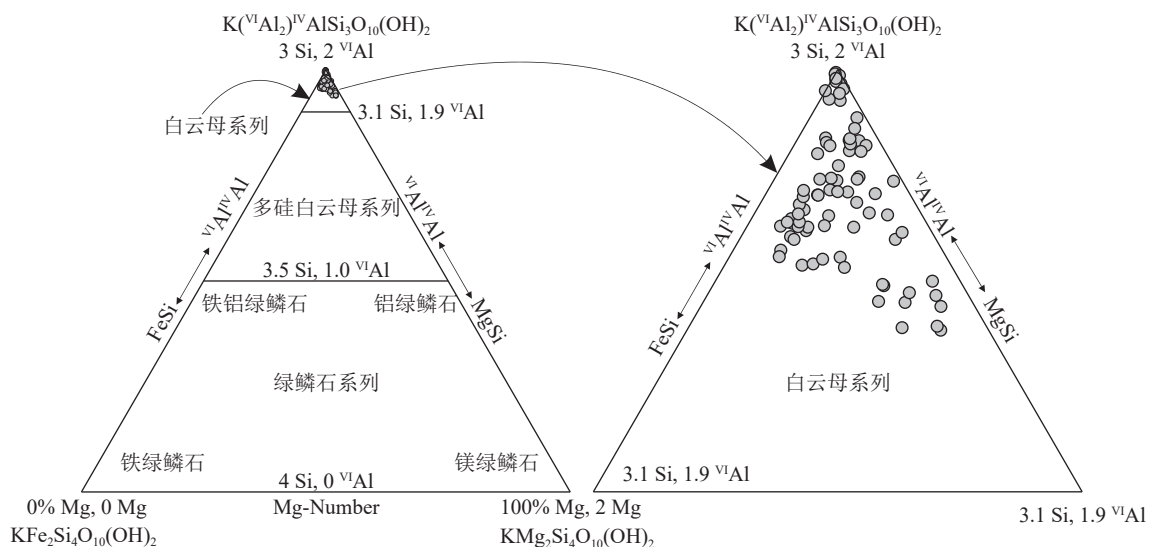


图 3 白云母、镁绿磷石和铁绿磷石三解图解(据 Tappert et al., 2013)
Fig.3 Ternary diagram of muscovite, Mg-celadonite and Fe-celadonite (after Tappert et al., 2013)

物在 2200 nm 处的吸收波段随 Al 含量增加向短波方向移动。Post and Noble(1993)对白色云母矿物在短波红外的合频波段与 Al_2O_3 含量的相关性进行研究,得出白色云母合频光谱位置与 Al_2O_3 含量有一定关系。Duke(1994)认为白色云母 Al-OH 的特征吸收波长主要与白色云母晶体结构中的 Al^{VI} 含量相关,高含量的 Al^{VI} 会导致白色云母的波长变短(Herrmann et al., 2001; Jones et al., 2005)。刘圣伟等(2006)认为白色云母中四次配位和六次配位的铝不同程度的被 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 等替代,会造成硅酸盐矿物 Al-OH 特征吸收峰峰位的变化。梁树能等(2012)则认为白色云母矿物的诊断吸收特征波长位置随矿物中 Al^{VI} 离子数的减少而呈现出向长波方向移动的趋势。也有不少研究表明白色云母 Al-OH 吸收位置偏移的主要因素为白色云母中 Al^{VI} 的含量,随着 Al^{VI} 含量增高,Al-OH 吸收峰向短波方向(2190 nm)偏移,随着 Al^{VI} 含量降低,Al-OH 吸收峰向长波方向(2220 nm)偏移(Swayze et al., 1999;

Herrmann et al., 2001; Carsten, 2011)。上述研究表明,随着六次配位铝含量增高,白色云母在 2200 nm 附近的吸收谱带逐渐向短波方向移动,反之则向长波方向移动。此外,另有研究指出白色云母 Al-OH 特征吸收峰位直接受白色云母中 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比值的影响,白色云母 Al-OH 特征吸收波长与 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比值呈现出正相关或负相关的关系(Wang et al., 2017; Wang et al., 2021)。

由此可见,白色云母 Al-OH 在 2200 nm 附近的特征吸收峰波长往往随着其化学组分和含量的变化产生漂移现象,波长漂移现象通常是由六次配位铝(Al^{VI})、硅(Si)、铁(Fe)和镁(Mg)等元素的含量变化所决定,即 Tschermak(契尔马克)耦合替换。随着六次配位铝含量(Al^{VI})的增加,硅(Si)含量的减少,白色云母 Al-OH 特征吸收峰波长向短波方向漂移,其波长通常位于 2180~2200 nm,也就是分类中的富铝/贫硅白色云母,而随着六次配位铝含量(Al^{VI})的减少,硅(Si)含量的增加,Al-OH 特征吸

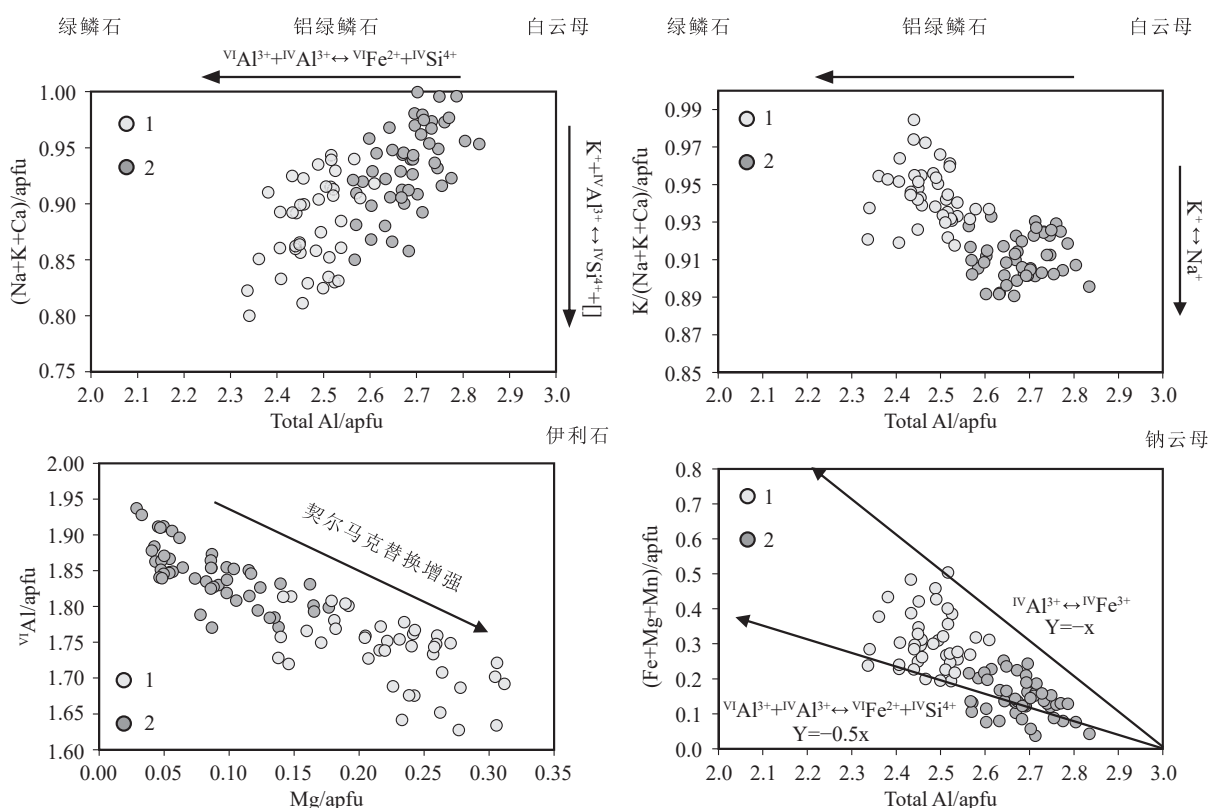


图4 白色云母成分变化的四种替换过程(据 Uribe-Mogollon and Maher, 2018)

1—早期绿色绢英岩化; 2—晚期白色绢英岩化

Fig.4 Four replacement processes of white mica composition changes (after Uribe-Mogollon and Maher, 2018)

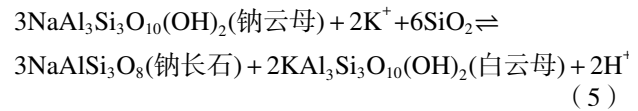
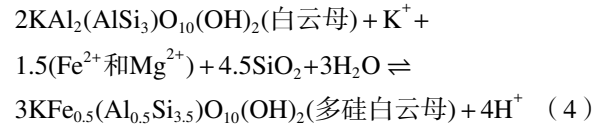
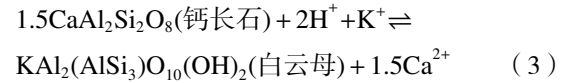
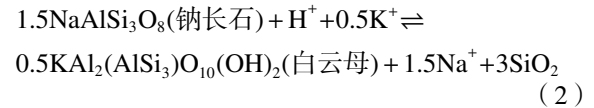
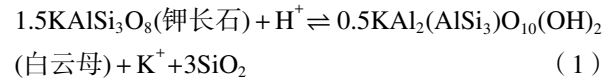
1—Early green phyllic alteration; 2—Late white phyllic alteration

收峰波长则向长波方向漂移, 其波长一般变化于 2200~2230 nm, 即所谓的贫铝/富硅白色云母。

4.2 热液流体温度、压力和酸碱性质

白色云母 Al-OH 特征吸收波长位置的漂移常常是地质学上组分相互替代造成的, 组分替代过程中温度和压力是重要的影响因素。研究发现白色云母 Al-OH 特征吸收峰位受热液温度和压力的影响, 主要发生 Tschermak (契尔马克) 替换, Si、Al、Fe、Mg 等离子含量产生变化, 致使其 Al-OH 特征吸收峰位发生变化, 比如钠云母 Al-OH 特征吸收波长位置靠近短波方向, Al 含量相对较高, Si 含量则相对较低, 而多硅白云母 Al-OH 特征吸收波长位置靠近长波方向, Al 含量相对较低, Si 含量则相对较高。波长较短的白色云母处于相对高温高压的热液环境, 而波长较长的白色云母则处于相对低温低压的热液环境 (Duke et al., 1994; Jones et al., 2005; Scott and Richard, 2015; Wang et al., 2017; Xu et al., 2017; 郭娜等, 2018; Uribe-Mogollon and Maher, 2018, 2020; Guo et al., 2019)。而也有研究认为波长较短的白色云母形成于相对低温高压的环境, 波长较长的白色云母形成于相对高温低压环境 (刘圣伟等, 2006; 王润生等, 2010; Yang et al., 2011)。此外另有研究指出白色云母 Al-OH 特征吸收峰位的变化间接受温度、原岩组分、流体组分及岩石渗透率等影响 (Wang et al., 2021)。叶发旺等 (2018) 通过研究新疆雪米斯坦地区蚀变矿物发现高铝绢云母蚀变岩空间上常与叶腊石、地开石等形成于酸性环境下的矿物密切联系或共生, 低铝绢云母在空间上常与绿泥石、碳酸盐等形成于偏碱性条件下矿物密切联系或共生, 由此推断高铝绢云母 (短波绢云母) 形成于相对偏酸性的热液流体环境, 而低铝绢云母 (长波绢云母) 则形成于相对偏碱性的热液环境。以上研究表明不同波长的白色云母所形成的热液温度、压力仍存争议, 尚未达成共识。

白色云母 Al-OH 特征吸收波长位置的变化除了受到热液温度和压力的影响外, 热液流体的酸碱度 (pH 值) 以及 Fe^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 等阳离子含量也是至关重要的影响因素。白色云母族矿物主要由长石水解蚀变形成, 镁铁质矿物的水解也可以在较小程度上产生白色云母, 因此, 形成白云母的化学反应如下所示 (Halley et al., 2015; Wang et al., 2017):



反应式 (1)、(2) 和 (3) 表明钾长石、钠长石和钙长石在酸性条件下, 反应生成白色云母, 释放出 Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 等阳离子, 在一定温度下, 白色云母在酸性 (低 $\log(\text{K}^+/\text{H}^+)$) 至中性 (高 $\log(\text{K}^+/\text{H}^+)$) 溶液中保持稳定。反应式 (4) 和 (5) 表明钠云母、白云母、多硅白云母系列, 钠云母反应生成白云母或多硅白云母过程中, $[\text{H}^+]$ 浓度呈现降低趋势, 而 $[\text{K}^+]$ 浓度则呈现增大趋势 (Halley et al., 2015; Wang et al., 2017)。

由于研究者运用技术手段、研究区域地质环境的异同, 所反映出的不同波长白色云母所形成的热液流体温度、压力也有差异。白色云母共生蚀变矿物组合一定程度上可能定性地反映热液环境的酸碱性质变化, 但共生蚀变矿物的酸碱性质变化往往难以表征。白色云母生成的理想化学反应需要综合考虑热液 SiO_2 与其他相关阳离子浓度的影响。如何更为准确地表征白色云母所形成地质过程中热液环境的物理化学条件, 流体包裹体分析可能是一种有效的途径。流体包裹体是研究矿物中和岩石中的古流体, 通过利用现代热力学原理, 可以恢复流体捕获时的物理化学条件, 如温度、压力、密度、成分、组分逸度等。对它们的研究可以定性和定量分析流体参与下的各种地质作用。为了准确获取白色云母形成地质过程中的物理化学参数, 需要对不同类型和期次的白色云母蚀变岩中的共生透明矿物 (石英、方解石、萤石等) 进行流体包裹体成分和

物相变化的研究,进而获取地质过程中的物理化学参数,包括成岩成矿流体的温度、压力、密度、成分(盐度和稳定同位素组成),pH 值等。除了热液温度、压力、酸碱性的影响,其他相关地质因素(如原岩组分、其他蚀变矿物、流体组分、岩石渗透率和水/岩比等)是否也会影响白色云母 Al-OH 特征吸收峰波长位置的漂移亦值得探讨。

5 白色云母短波红外光谱与地质勘探

5.1 白色云母短波红外光谱地质应用

白色云母是热液型矿床最为普遍的一类蚀变矿物,与成矿热液环境关系密切,其短波红外光谱蕴含着丰富的地质信息,研究白色云母蚀变矿物短波红外光谱及形成热液环境,对完善热液型矿床成因和深部与外围勘探具有重要的实际意义。在实际地质应用中,近年来多数研究主要集中在化学组分六次配位铝的变化如何影响白色云母 Al-OH 特征吸收峰位漂移方面,而在白色云母其他化学组分和含量如何影响 Al-OH 特征吸收峰位波长变化研究方面依然薄弱。虽然也有研究发现白色云母化学组分 Si^{4+} 、 Fe^{2+} 、 K^{+} 和 Mg^{2+} 等阳离子含量对 Al-OH 特征吸收波长也会产生影响,但仍未达成共识。白色云母的 Al-OH 特征吸收峰波长、伊利石成熟度 (ISM 或 SWIR-IC) 和半峰全宽 (FWHM2200) 等重要光谱参数,与温度关系密切。其中 Al-OH 特征吸收峰位波长漂移变化规律常被用来讨论矿床热液流体温度、压力、酸碱性等理化条件,伊利石成熟度 (ISM) 被广泛用于矿产勘查,用来定位可能的热液矿化中心,一般高 ISM 值对应较高的古热液温度。然而白色云母的化学组分和含量如何影响这些重要的光谱参数,目前还未有系统的研究。此外,白色云母特征吸收峰的峰强度一定程度上反映了相对应蚀变矿物的相对丰度,峰强度大,则蚀变矿物相对丰度越大 (van Ruitenbeek et al., 2005; Tappert et al., 2011, 2013), 蚀变矿物的相对丰度对于划分矿床蚀变分带至关重要,一般可用蚀变矿物特征峰的吸收深度来量化 (Clark et al., 1990)。对于纯净单一的蚀变矿物,特征吸收峰的相对深度越深,则其相对丰度越大,而对于混合蚀变矿物,如果目标矿物与其他矿物无共享吸收特征,则吸收特征的相对深度只能用于量化矿物光谱丰度 (Buschette

and Piercey, 2016; Cloutier and Piercey, 2020)。对于白色云母光谱来说,可能是混合了绿泥石、碳酸盐等蚀变矿物的混合光谱,那么哪一种光谱参数能更为准确地表征其相对丰度,相关研究程度依然薄弱。因此,有必要对白色云母短波红外光谱参数变化规律进行深入的研究,白色云母化学组分和含量如何制约光谱参数的变化亦需要系统的研究。

5.2 wAl-OH 指示热液矿化中心的局限性

白色云母 Al-OH 特征吸收峰波长 (wAl-OH) 往往与热液矿化中心显示出一定的系统变化规律:

① 白色云母 wAl-OH 与热液矿化中心呈正相关关系,高铝绢云母与矿化密切相关,而低铝绢云母则多出现于矿化作用较弱的区域,即靠近矿体白色云母 Al-OH 特征吸收波长向短波方向偏移,而远离矿体其 Al-OH 特征吸收波长则向长波方向偏移 (Yang et al., 2005; Laakso et al., 2015, 2016; 黄健瀚等, 2016; Xu et al., 2017); ② 白色云母 wAl-OH 与热液矿化中心呈负相关关系,即从矿化中心到外围,白色云母 Al-OH 特征吸收峰波长具有从长波到短波的变化趋势 (陈龙, 2017; 王锦荣等, 2017; 许超等, 2017); ③ 白色云母 wAl-OH 与矿床热液矿化中心无明显相关关系 (Leng et al., 2024)。上述研究表明白色云母 Al-OH 特征吸收峰位波长与矿化的关系会因地质环境的不同而呈现出不同的变化规律,即白色云母 Al-OH 特征吸收峰波长与矿床矿化的经验关系并不总是成立,在一个矿区适用的规律性变化在另一个矿区并不一定适用,因此在实际勘查中使用白色云母 Al-OH 特征吸收峰波长变化规律指示矿床热液矿化中心时需要综合考虑相关地质因素的影响,如矿床后期构造改造、热液流体的理化条件、水/岩比值空间变化、围岩组分等。

5.3 ISM (SWIR-IC) 指示热液矿化中心的可靠性

对于白色云母的伊利石成熟度 (ISM) 或短波红外伊利石结晶度 (SWIR-IC) 而言,在不同的矿床系统中 ISM 变化规律呈现出一致性,即靠近热液矿化中心伊利石成熟度值相对较大,而远离热液矿化中心伊利石成熟度值则相对较小,这已在很多热液矿床中得到印证。如杨志明等 (2012) 研究西藏念村矿区,推断出伊利石形成温度较高的念村东北部为热液矿化中心; Cassady et al. (2013) 发现白色云母的短波红外伊利石结晶度 (SWIR-IC) 与其波长呈负

相关关系, 结晶度越高, 矿物形成温度越高, 对应的金属元素浓度越高; 刘碧洪和刘鹤(2016)研究内蒙古干珠尔善德银铅锌矿床, 发现伊利石结晶度与矿化作用具有很好的正相关关系, 即围岩伊利石结晶度越高, 铅锌矿化作用越强。Xu et al.(2017)研究新疆白杨河铀矿床发现矿床北缘铀矿化带短波红外伊利石结晶度大, 而随着远离矿床北缘铀矿化带, 伊利石结晶度呈现变小的趋势, 并推断北缘为可能的热液矿化中心; Wang et al.(2021)研究争光中硫型浅成低温 Au-Zn 矿床认为短波伊利石和高 ISM 值区域为争光 Au-Zn 矿区的两个古高温热液上涌中心。虽然白色云母的伊利石成熟度(ISM)或短波红外伊利石结晶度(SWIR-IC)对指示矿床热液矿化中心具有较高的可靠性, 但其地质影响因素及如何获取更为真实可靠的 ISM 值得关注与研究。

5.4 白色云母光谱特征的精细、量化高光谱遥感反演

白色云母短波红外光谱蕴含着丰富的地质信息, 记录了其形成热液环境及其与矿化的关系, 而前人研究多采用地面非成像、便携式光谱仪(PIMA、ASD、Hylogger、SVC HR1024 等)对矿床围岩进行光谱测量, 获取白色云母蚀变矿物光谱特征, 分析其形成热液环境, 进而探讨与成矿的关系(章革等, 2005; 连云长等, 2005; 刘圣伟等, 2006; 曹焱等, 2008; Yang et al., 2011; Tappert et al., 2011, 2013; 杨志明等, 2012; 郭娜等, 2012, 2018; Travers and Wilson, 2015; Mauger et al., 2016; Wang et al., 2017; Xu et al., 2017; Uribe-Mogollon and Maher, 2018, 2020; Guo et al., 2019; Wang et al., 2021)。上述短波红外光谱技术在地质勘查的应用往往需要大量的钻孔岩心作支撑, 但实际勘查中, 如我国西北和青藏高原等地质环境复杂地区, 往往缺乏钻孔岩心, 传统的地质勘查方式多受限于地质环境, 成本大且效率低。高光谱遥感技术是当前遥感对地观测领域的前沿, 在热液蚀变带的识别和圈定等方面具有独特的优势。然而大量研究依然集中于蚀变矿物填图、蚀变矿物组合、蚀变分带等方面, 典型热液矿床成矿热液特征的高光谱遥感反演研究程度依然薄弱。因此, 有必要开展白色云母光谱特征的精细、量化高光谱遥感反演研究, 建立典型热液矿床成矿热液特征的高光谱遥感反演应用示范,

这不仅可以进一步完善蚀变矿物勘查标识体系, 还可为将来国内外卫星高光谱遥感矿物填图技术的深入地质应用提供重要理论参考。

6 结 论

通过对前人文献综合分析表明白色云母是热液型矿床中最为普遍的一类蚀变矿物, 其短波红外光谱蕴含着丰富的地质信息, 记录了其形成热液环境及其与矿化的关系, 加强白色云母短波红外光谱变化规律和成因机理研究有利于深入了解其化学组分和含量、形成热液流体物理化学条件(温度、压力、pH 值等)等地质因素如何制约其短波红外光谱参数的变化, 以期在地质勘探中对云母短波红外光谱与矿化的关系赋予更加合理的地质解释, 更为准确地反映成矿热液流体特征。

(1)白色云母 Al-OH 特征吸收峰波长在 2200 nm 处的漂移变化直接受其化学组分六次配位铝含量、硅含量、铁含量、钾和含量的影响, 同时受到 Fe/(Fe + Mg) 比值的影响。白色云母 Al-OH 特征吸收波长位置的漂移间接受热液流体温度、压力和酸碱性的影响, 主要发生 Tschermak(契尔马克)替换, Si、Al、Fe、Mg 等离子含量产生变化, 致使其 Al-OH 特征吸收峰位波长发生变化。另外, 原岩组分、其他蚀变矿物、流体组分、岩石渗透率和水/岩比等地质因素也会影响白色云母 Al-OH 特征吸收峰位波长的变化。

(2)白色云母 Al-OH 特征吸收波长(wAl-OH)和伊利石成熟度(ISM)是云母组矿物重要的光谱参数, 与形成的温度密切相关, 可以用来指示矿床的热液矿化中心, 但是 wAl-OH 指示热液矿化中心具有局限性, Al-OH 特征吸收峰位波长与矿化的关系会因地质环境的不同而呈现出不同的变化规律, 需要综合考虑相关地质因素的影响; 而对 ISM 而言, 不同的热液矿床系统中 ISM 变化规律呈现出一致性, 即靠近热液矿化中心伊利石成熟度值相对较大, 而远离热液矿化中心伊利石成熟度值则相对较小。

致谢:感谢两位审稿专家和编辑老师对本文的修改和意见。

References

Beran A. 2002. Infrared spectroscopy of micas[J]. *Reviews in*

- Mineralogy and Geochemistry*, 46: 351–369.
- Buschette M J, Piercey S J. 2016. Hydrothermal alteration and litho–geochemistry of the Boundary volcanogenic massive sulphide deposit, central Newfoundland, Canada[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53: 1–22.
- Cao Ye, Li Shengrong, Shen Junfeng, Yao Meijuan, Li Qingkang, Mao Fulong. 2008. Application of portable infrared mineral analyzer (PIMA) in the Qianhe gold mine, Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 44(2): 82–86 (in Chinese with English abstract).
- Carsten L. 2011. Short wave infrared functional groups of rock forming minerals[J]. *CSIRO Earth Science and Resource Engineering*, Kensington, 1–14.
- Cassady L H, Brian M, Gregory M J. 2013. Shortwave infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with the pebble porphyry copper–gold–molybdenum deposit, Iliamna, Alaska[J]. *Economic Geology*, 108: 483–494.
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Garcia J J, Gemmel J B, McKnight S, Cuison L A. 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): 1365–1398.
- Chen Huayong, Xiao Bing, Zhang Shitao. 2021. Identification System for Exploration of Altered Minerals[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Chen Hongzhi, Zeng Zailin. 2014. Genetic Type of Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Chen Long. 2017. Application of Short Wavelength Infrared (SWIR) Technique and Geochemical Prospecting Indications Inexploration of Duobaoshan porphyry Cu Deposit in Heilongjiang Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–156 (in Chinese).
- Clark R N, King T V V, Klejwa M, Swayze G A, Vergo N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 95: 12653–12680.
- Cloutier J, Piercey S J. 2020. Tracing mineralogy and alteration intensity using the spectral alteration index and depth ratios at the northwest zone of the Lemarchant volcanogenic massive sulfide deposit, Newfoundland, Canada[J]. *Economic Geology*, 115(5): 1055–1078.
- Doublier M P, Roache T, Potel S. 2015. Short–wavelength infrared spectroscopy: A new petrological tool in low–grade to very low–grade pelites[J]. *Geology*, 38(11): 1031–1034.
- Du Xiaodi, Tang Yue, Liu Dechang, Li Zhao, Wang Haida. 2015. The application of aerial hyperspectral technology to the geological survey for oil and gas in the East Junggar Basin[J]. *Geology in China*, 42(1): 275–287 (in Chinese with English abstract).
- Dufr  chou G, Grandjean G, Bourguignon A. 2014. Geometrical analysis of laboratory soil spectra in the short–wave infrared domain: Clay composition and estimation of the swelling potential[J]. *Geoderma*, 243/244: 92–107.
- Duke E F. 1994. Near infrared spectra of muscovite, Tschermak substitution, and metamorphic reaction progress: Implications for remotesensing[J]. *Geology*, 22(7): 621–624.
- Frey M. 1987. Very low–grade metamorphism of clastic sedimentary rocks[C]//Frey M. *Lowtemperature Metamorphism*. New York, Chapman and Hall, 9–58.
- Gan Fuping, Wang Runsheng, Ma Ainai. 2003. Spectral identification tree(sit) for mineral extraction based on spectral characteristics of minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 445–454 (in Chinese with English abstract).
- Guo N, Cudahy T, Tang J X, Tong Q X. 2019. Mapping white mica alteration associated with the Jiama porphyry–skarn Cu deposit, central Tibet using field SWIR spectrometry[J]. *Ore Geology Reviews*, 108: 147–157.
- Guo Na, Guo Ke, Zhang Tingting, Liu Tinghan, Hu Bin, Wang Zhongwu. 2012. Hydrothermal alteration distribution model of the Jiama(Gyama) copper–polymetallic deposit based on shortwave technique[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 641–653 (in Chinese with English abstract).
- Guo Na, Shi Weixin, Huang Yiru, Zheng Long, Tang Nan, Wang Cheng, Fu Yuan. 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).
- Halley S, Dilles J H, Tosdal R M. 2015. Footprints: hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits[J]. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 100(1): 12–17.
- Herrmann W, Blake M, Doyle M. 2001. Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway–Reward, Queensland[J]. *Economic Geology*, 96: 939–955.
- Hou Jianpeng, Xu Qingjun, Ye Fawang, Zhang Chuan, Meng Shu. 2018. Alteration zonation of drilling cores in the Baiyanghe uranium deposit of Xinjiang and its geological implications[J]. *Geology in China*, 45(4): 839–850 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jianhan, Chen Huayong, Han Jinsheng, Lu Wanjian, Zhang Weifeng. 2016. Spacial and temporal characteristics of mineralization and alteration zonation of the Honghai VMS Cu–Zn deposit in the Kalatag District, East Tianshan, NW China[J]. *Geochimica*, 45(6): 582–600 (in Chinese with English abstract).
- Jones S, Herrmann W, 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.
- Karabinos P. 1981. Deformation and Metamorphism of Cambrian and

- Precambrian Rocks on the East Limb of the Green Mountains Anticlinorium near Jamaica, Vermont (Doctoral thesis) [D]. Maryland: The Johns Hopkins University, 1–196.
- Kübler B. 1967. La cristallinité d'illite et les zones tout à fait supérieures de métamorphisme, in Schaer, J. P., ed., Étages tectoniques [J]. Colloquede Neuchâtel, 1966, 105–122.
- Laakso K, Peter J M, Rivard B. 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): 1223–1239.
- Laakso K, Rivard B, Peter J M. 2015. Application of airborne, laboratory, and field hyperspectral methods to mineral exploration in the Canadian Arctic: Recognition and characterization of volcanogenic massive sulfide-associated hydrothermal alteration in the Izok Lake deposit area, Nunavut, Canada[J]. *Economic Geology*, 110: 925–941.
- Lee D E, Loenen R E V, Brandt E L M, Gleason J D. 1987. Chemical and stable-isotope data for micas from metaclastic rocks of eastern White Pine County, Nevada[J]. *Geological Survey Bulletin*, 1694: 41–53.
- Leng C B, Wang D Z, Yu H J, Tian F, Zhang X C. 2024. Mapping hydrothermal alteration zones with short wavelength infrared (SWIR) spectra and magnetic susceptibility at the Pulang porphyry Cu–Au deposit, Yunnan, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 59(4): 699.
- Lian Yunchang, Zhang Ge, Yuan Chunhua, Yang Kai. 2005. Application of SWIR reflectance spectroscopy in mapping of hydrothermal alteration minerals: A case study of the Tuwu porphyry copper prospect, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 32(3): 483–495 (in Chinese with English abstract).
- Liang Shuneng, Gan Fuping, Yan Bokun, Wang Runsheng, Yang Suming, Zhang Zhijun. 2012. Relationship between composition and spectral feature of muscovite[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, (3): 111–115 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bihong, Liu He. 2016. Short-wave infrared spectroscopy study on wall rock alteration of the Ganzhuershande Silver–Lead–Zinc deposit in Inner Mongolia[J]. *Geology and Exploration*, 52(4): 703–711 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dechang, Tian Feng, Qiu Juntong, Ye Fawang, Yan Bokun, Sun Yu, Wang Zitao. 2017. Application of hyperspectral remote sensing in solid ore exploration in the Liuyuan–Fangshankou area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2781–2795 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shengwei, Gan Fuping, Yan Bokun, Yang Suming, Wang Runsheng, Wang Qinghua, Tang Panke. 2006. Application of the imaging spectroscopic technique in mineral identification and mapping[J]. *Geology in China*, 33(1): 178–186 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yan. 2018. Applications of Hyperspectral Mineral Mapping In mineral and Petroleum Exploration[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–106 (in Chinese).
- Mauger A J, Ehrig K, Kontonikas–Charos A, Kamenetsky V S, Ehrig K. 2016. Alteration at the Olympic Dam IOCG–U deposit: Insights into distal to proximal feldspar and phyllosilicate chemistry from infrared reflectance spectroscopy[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 63(8): 959–972.
- Post J L, Noble P N. 1993. The near-infrared combination and frequencies of dioctahedral smectites, micas, and illite[J]. *Clays and Clay Minerals*, 41(6): 639–644.
- Scott H, Richard M T. 2015. Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits[J]. *SEG newsletter*, 100: 12–17.
- Swayze G A. 1999. The Hydrothermal and Structural History of the Cuprite Mining District, Southwest Nevada: An Integrated Geological and Geophysical Approach [D]. University of Colorado at Boulder. Colorado, 430.
- Tappert M C, Rivard B, Giles D, Tappert R, Mauger A. 2011. Automated drill core logging using visible and near-infrared reflectance spectroscopy: A case study from the Olympic Dam IOCG deposit, South Australia[J]. *Economic Geology*, 106: 289–296.
- Tappert M C, Rivard B, Giles D, Tappert R, Mauger A. 2013. The mineral chemistry, near-infrared, and mid-infrared reflectance spectroscopy of phengite from the Olympic Dam IOCG deposit, South Australia[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 26–38.
- Travers S J, Wilson C J L. 2015. Reflectance spectroscopy and alteration assemblages at the Leven Star gold deposit, Victoria, Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 62(7): 873–882.
- Uribe–Mogollon C, Maher K. 2018. White mica geochemistry of the copper cliff porphyry Cu deposit: Insights from a vectoring tool applied to exploration[J]. *Economic Geology*, 113(6): 1269–1295.
- Uribe–Mogollon C, Maher K. 2020. White mica geochemistry: Discriminating between barren and mineralized porphyry systems[J]. *Economic Geology*, 115(2): 325–354.
- USGS. 1999. USGS spectroscopy Lab[R]. U. S. Geological Survey, New York.
- van der Meer F. 2004. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5: 55–68.
- van Ruitenbeek F J A, Cudahy T, Hale M, Hale M, van der Meer F. 2005. Tracing fluid pathways in fossil hydrothermal systems with near-infrared spectroscopy[J]. *Geology*, 33: 597–600.
- Velde B. 1985. Clay minerals: A physico-chemical explanation of their occurrence: Developments in sedimentology, Amsterdam [J]. Elsevier, 427.
- Wang Jinrong, Lü Xinbiao, Huang Zhaoqiang, Sun He, Qin Zhiping, Zou Ruixin, Fan Xinglu, Huang Xiaoyu. 2017. A study of near-infrared spectroscopy on altered minerals in the Nuri copper–polymetallic deposit, Tibet[J]. *Geology and Exploration*,

- 53(1): 141–150 (in Chinese with English abstract).
- Wang L, Percival J B, Hedenquist J W, Hattori H K, Qin K Z. 2021. Alteration mineralogy of the Zhengguang epithermal Au–Zn deposit, Northeast China: Interpretation of shortwave infrared analyses during mineral exploration and assessment[J]. *Economic Geology*, 116(2): 389–406.
- Wang R, Tom C, Carsten L, John L W, Adam B, Mei Y, Carl Y, Tony J R, Andrew J, Malcolm R, Andrew B, Jamie L. 2017. White mica as a hyperspectral tool in exploration for the Sunrise Dam and Kanowna Belle gold deposits, Western Australia[J]. *Economic Geology*, 112: 1153–1176.
- Wang Runsheng, Gan Fuping, Yan Bokun, Yang Suming, Wang Qinghua. 2010. Hyperspectral mineral mapping and its application[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 88(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Xiu Lianchun, Zheng Zhizhong, Yu Zhengkui, Huang Junjie, Chen Chunxia, Yin Liang, Wang, Mijian, Zhang Qiuning, Huang Bin, Xiu Tiejun, Wu Ping. 2009. Study on method of measuring altered minerals in rocks with near-infrared spectrometer[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(6): 519–523. (in Chinese with English Abstract).
- Xu Chao, Chen Huayong, Noel White, Qi Jinping, Zhang Lejun, Zhang Shuang, Duan Gan. 2017. Alteration and mineralization of Xinan Cu–Mo ore deposit in Zijinshan ore field, 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).
- Xu Q J, Ye F W, Liu S F, Zhang Z X, Zhang C. 2017. Hyperspectral alteration information from drill cores and deep uranium exploration in the Baiyanghe uranium deposit in the Xuemisan area, Xinjiang, China[J]. *Remote Sensing*, 9: 451.
- Yang K, Browne P R L, Huntington J F, Walshe J L. 2001. Characterising the hydrothermal alteration of the Broadlands–Ohaaki geothermal system, New Zealand, using shortwaveinfrared spectroscopy[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106: 53–65.
- Yang K, Huntington J F, Gemmell J B, Scott K M. 2011. Variations in composition and abundance of white mica in the hydrothermal alteration system at Hellyer, Tasmania, as revealed by infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Geochemical Exploring*, 108: 143–156.
- Yang K, Lian C, Huntington J F, Peng Q, Wang Q. 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, Qu Huanchun, Li Zhenqing, Liu Yunfei. 2012. Application of short wavelength infrared(SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu district: A case study of Niancun ore district, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 699–717 (in Chinese with English abstract).
- Ye Fawang, Meng Shu, Zhang Chuan, Xu Qingjun, Liu Hongcheng, Wu Ding. 2018. Mineragenystudy of high–Al, medium–Al, and low–Al sericites identified by airborne hyperspectral remote sensing technology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(2): 395–412 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Liu S F, Ye F W, Qiu J T, Zhang Z X, Wang J G. 2019. Three-dimensional modeling of alteration information with hyperspectral core imaging and application to uranium exploration in the Heyuanbei uranium deposit, Xiangshan, Jiangxi, China[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1): 014524.
- Zhang Chuan, Ye Fawang, Xu Qingjun, Liu Hongcheng, Meng Shu. 2017. Mineral mapping and analysis of alteration characteristics using airborne hyperspectral remote sensing data in the Baiyanghe uranium and beryllium ore district, Xinjiang[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 29(2): 160–166 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chuan. 2020. Core Imaging Spectroscopy and Three-dimensional Alteration Modeling for Uranium Deposit in Xiangshan Jiangxi [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–179 (in Chinese).
- Zhang Ge, Lian Yunchang, Wang Runsheng. 2005. Application of the portable infrared mineral analyser (PIMA) in mineral mapping in the Qulong copper prospect, Mozhuogongka County Tibet[J]. *Regional Geology of China*, 24(5): 480–484 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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(2): 82–86.
- 陈华勇, 肖兵, 张世涛. 2021. 蚀变矿物勘查标识体系[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈龙. 2017. 黑龙江多宝山斑岩铜矿短波红外光谱技术找矿应用与地球化学找矿标志[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–156.
- 陈洪治, 曾载淋. 2014. 矿床成因类型[M]. 北京: 地质出版社.
- 杜小弟, 唐跃, 刘德长, 李昭, 王海达. 2015. 航空高光谱探测技术在准噶尔盆地东部地区油气调查中的应用[J]. *中国地质*, 42(1): 275–287.
- 甘甫平, 王润生, 马霭乃. 2003. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J]. *地学前缘*, 10(2): 445–454.
- 郭娜, 郭科, 张婷婷, 刘廷哈, 胡斌, 汪重午. 2012. 基于短波红外勘查技术的西藏甲玛铜多金属矿热液蚀变矿物分布模型研究[J]. *地球学报*, 33(4): 641–653.
- 郭娜, 史维鑫, 黄一入, 郑龙, 唐楠, 王成, 伏媛. 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.
- 侯隼鹏, 徐清俊, 叶发旺, 张川, 孟树. 2018. 新疆白杨河铀矿床钻孔岩芯蚀变分带特征及地质意义[J]. *中国地质*, 45(4): 839–850.
- 黄健瀚, 陈华勇, 韩金生, 陆万俭, 张维峰. 2016. 新疆东天山卡拉塔格红海 VMS 铜锌矿床蚀变与矿化时空分布特征[J]. *地球化学*, 45(6): 582–600.

- 连云长, 章革, 元春华, 杨凯. 2005. 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(3): 483–495.
- 梁树能, 甘甫平, 闫柏琨, 王润生, 杨苏明, 张志军. 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.
- 刘碧洪, 刘鹤. 2016. 内蒙古干珠尔善德银铅锌矿床的短波红外光谱研究[J]. 地质与勘探, 52(4): 703–711.
- 刘德长, 田丰, 邱骏挺, 叶发旺, 闫珀琨, 孙雨, 王子涛. 2017. 柳园—方山口地区航空高光谱遥感固体矿产探测及找矿效果[J]. 地质学报, 91(12): 2781–2795.
- 刘圣伟, 甘甫平, 闫柏琨, 杨苏明, 王润生, 王青华, 唐攀科. 2006. 成像光谱技术在典型蚀变矿物识别和填图中的应用[J]. 中国地质, 33(1): 178–186.
- 卢燕. 2018. 高光谱矿物填图技术在金属矿产和油气勘查中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–106.
- 王锦荣, 吕新彪, 黄照强, 孙赫, 秦志平, 邹睿馨, 范兴炉, 黄啸宇. 2017. 西藏努日铜多金属矿床蚀变矿物的近红外光谱学研究[J]. 地质与勘探, 53(1): 141–150.
- 王润生, 甘甫平, 闫柏琨, 杨苏明, 王青华. 2010. 高光谱矿物填图技术与应用研究[J]. 国土资源遥感, 88(1): 1–12.
- 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 黄俊杰, 陈春霞, 殷靓, 王弥建, 张秋宁, 黄宾, 修铁军, 吴萍. 2009. 近红外光谱仪测定岩石中蚀变矿物方法研究[J]. 岩矿测试, 28(6): 519–523.
- 许超, 陈华勇, White N, 祁进平, 张乐骏, 张爽, 段甘. 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): 1013–1038.
- 杨志明, 候增谦, 杨竹森, 曲焕春, 李振清, 刘云飞. 2012. 短波红外光谱技术在浅剥蚀斑岩铜矿区勘查中的应用——以西藏念村矿区为例[J]. 矿床地质, 31(4): 699–717.
- 叶发旺, 孟树, 张川, 徐清俊, 刘洪成, 武鼎. 2018. 航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母矿物成因学研究[J]. 地质学报, 92(2): 395–412.
- 张川, 叶发旺, 徐清俊, 刘洪成, 孟树. 2017. 新疆白杨河铀钍铀矿区航空高光谱矿物填图及蚀变特征分析[J]. 国土资源遥感, 29(2): 160–166.
- 张川. 2020. 岩心成像光谱技术与江西相山铀相山铀矿蚀变三维建模[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–179.
- 章革, 连云长, 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(5): 480–484.