

短波红外光谱技术在矿床勘查中的应用

田丰^{1 2} 冷成彪^{1 3*} 张兴春¹ 田振东^{1 2} 张伟¹ 郭剑衡^{1 2}

1.中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550081;
2.中国科学院大学 北京 100049; 3.东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室,南昌 330013

摘要:短波红外光谱(SWIR)技术是近年来从国外引入的一种新型矿床勘查研究手段,该技术具有快速、高效、低成本和高灵敏度等优点,已被广泛应用于矿床勘查研究中。本文对SWIR技术的基本原理、发展历程和常用仪器软件进行了较为详尽的介绍,重点介绍了其在矿床勘查中的两个主要应用方向:蚀变矿物填图和成矿地质环境反演。前者为该技术手段的核心功能,通过SWIR波段对特定矿物进行识别,确定蚀变矿物的分布情况,快速划分蚀变分带,以便缩小找矿范围,从而提升找矿效率和准确率;后者是利用目标蚀变矿物反射光谱特征参数(如波长吸收位置、结晶度等)的规律性变化,反演成矿的地质环境,确定热液中心,提供找矿指标。最后,初步提出了短波红外光谱技术的发展趋势。

关键词:地质学; 围岩蚀变; 短波红外光谱; 热液矿床; 矿床勘查; 找矿指标

中图分类号: P614 文章编号: 1007-2802(2019)03-0634-09 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.042

Application of Short Wavelength Infrared Technique in Exploration of Mineral Deposits: A Review

TIAN Feng^{1 2} ,LENG Cheng-biao^{1 3*} ZHANG Xing-chun¹ ,TIAN Zhen-dong^{1 2}
ZHANG Wei¹ ,GUO Jian-heng^{1 2}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: Short-wave infrared (SWIR) technology is a new tool of mineral resource exploration introduced by foreign countries in recent years. This technology is characterized by high efficiency, rapidity, sensitivity, low cost and environmental protection. Therefore, it is widely used in mineral deposit research and prospecting exploration. This paper briefly introduces the basic principles of short-wave infrared spectroscopy and summarizes the characteristics, development and application of this technique. Two main applications of this technique in mineral deposit exploration are highlighted. One application is altered mineral mapping, using the SWIR band to identify specific altered minerals, with which the alteration zone can be divided and the prospecting efficiency can be improved. The other application is utilizing systemic changes of mineral reflection spectral characteristic parameters (such as specific wavelength absorption peak position, crystallinity, etc.) to represent the geological environment of mineralization, locate the hydrothermal or mineralization center, and provide prospecting indicators. Finally, the development trend of SWIR technique is proposed in this paper.

Key words: geology; wall rock alteration; short-wave infrared (SWIR); hydrothermal ore deposit; exploration of deposit; prospecting index

确定矿床内蚀变矿物的种类和分布是对热液矿床进行勘查的基本途径,这对矿产资源评价和矿

床模型的建立有着至关重要的作用(Thompson *et al.*, 1999)。通常对蚀变矿物的鉴定主要是传统的

收稿编号: 2018-183 2018-09-04 收到 2018-11-12 改回

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0603505); 国家自然科学基金资助项目(41673051)

第一作者简介: 田丰(1992-),男,博士研究生,研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: tianfeng@mail.gyig.ac.cn.

* 通信作者简介: 冷成彪(1982-),男,博士,副研究员,研究方向: 矿床地质与地球化学。E-mail: lengchengbiao@vip.gyig.ac.cn.

野外肉眼观察、镜下光薄片鉴定和 X 射线衍射分析。野外观察由于条件所限,难以区分细粒蚀变矿物。室内分析制样繁琐、费用昂贵且测试周期相对较长,难以满足野外工作快速、有效鉴定矿物的要求。短波红外光谱(SWIR)技术无需制样、测试快捷且易携带,可对矿物进行高效现场鉴定识别,不仅节省了野外工作的成本,而且不会产生污染物(修连存等,2007)。因此,短波红外光谱技术和传统的蚀变矿物识别方法(野外观察、镜下鉴定、X 射线衍射等)的结合将成为矿床勘查的常规手段。

1 短波红外光谱技术简介

1.1 基本原理

依据电磁波和光学基本理论,当物质内部分子受光源激发时,会形成一定频率的振动。当产生的振动能量级差较小时,对应的特征性吸收光谱位于中红外和长波红外波段;产生的能量级差较大时,对应的特征光谱就形成于近红外(包括短波红外)和可见光波段(Hunt,1977; Clark *et al.*,1990)。不同波段的光谱特征反映了不同的形成机理,如表 1 所示,400~1300 nm 波段内的光谱特征,反应了目标矿物中可能含有过渡性金属元素。8000~14 000 nm 波段内的光谱吸收特征,则取决于硅酸盐骨架中特定化学键的振动。而本文所述的短波红外光谱(1300~2500 nm)技术是利用目标矿物中羟基(OH⁻)、碳酸根(CO₃²⁻)以及可能存在的水分子(H₂O)等粒子引发的振动来确定目标矿物种类及其含量(Hunt,1977; Clark *et al.*,1990)。

表 1 常用的不同波长区间及对应吸收原理

Table 1 Different wavelength intervals and corresponding absorption principle(after GMEX 2008)

波长区间/nm	响应原理
400~1300	过渡金属元素的电子跃迁
1300~2500	分子振动(OH ⁻ 、CO ₃ ²⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、H ₂ O)
8000~14 000	硅氧骨架内基团振动

注:据 GMEX(2008)修改。

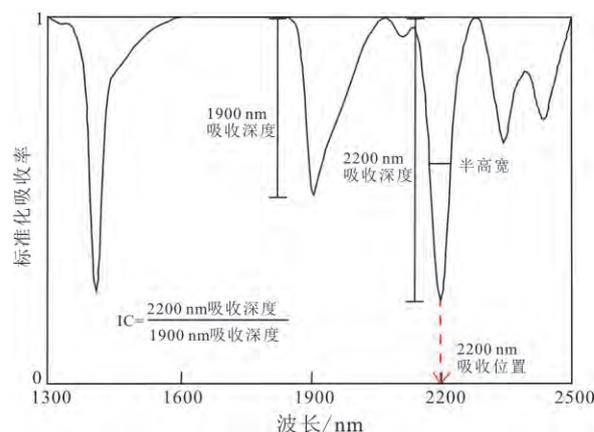
由表 1 可知,短波红外区间的主要机理是特定官能团的分子键振动。当光以能量的形式进入目标矿物之后,矿物中的特征分子键会因此受到激发,可产生不同程度的弯曲和伸缩,从而引起分子振动,同时吸收特定频率的能量。目标矿物的一些内部特征,如化学键类型、晶体结构、分子有序度和结晶程度等都会影响这种振动的能量。不同矿物具有不同内部特征,其吸收的能量大小和对应的频率也不同,所以在短波红外区间内特定位置形成相应的吸收深度和

形态,从而形成诊断性光谱特征(Hunt,1977; Clark *et al.*,1990)。因此,能够依据蚀变矿物中内部特征官能团形成的诊断性光谱来识别不同的矿物和同种矿物中结晶度的变化。

1.2 光谱特征参数意义

为了更好地利用光谱特征来表达矿物信息,经常会提取特征吸收峰的参数(修连存等,2009),并进行不同尺度和维度的作图表达,获得成矿模型。光谱吸收特征各参数的定义和地质意义如下:

峰强度:即光谱吸收峰在标准化后的吸收深度(图 1),代表目标矿物在被测范围内所占的比例,经标准化后的数值总体上与矿物含量呈正相关关系。



修改自 TSG 软件数据库

图 1 短波红外光谱特征参数示意图

Fig.1 Schematic diagram of short-wave infrared spectrum characteristic parameters

半高宽:指光谱特征峰吸收深度一半处的峰宽度(图 1),与矿物形成时的温度有关,值越小对应的峰形越尖锐,表明矿物形成时的温度越高。

峰位置:即光谱特征峰的吸收位置(图 1)。用特征峰反射率最小处(也就是吸收深度最大处)所对应的波长值来表示。具体的吸收位置因所含元素的不同会发生一定的位移。如云母中的 Al³⁺被 Fe²⁺、Mg²⁺等替代,会造成 Al-OH 特征吸收峰位置的“漂移”变化(修连存等,2009)。

峰强比:指矿物吸收峰强度之比。通常用蚀变矿物特征峰深度与其水吸收峰深度之比表示,该比值反映了矿物内部的结晶度信息。如云母类矿物峰强比(IC;图 1)与结晶度成正相关,IC 值越高,表明该矿物的结晶度越好,即形成时的温度越高(Chang *et al.*,2011)。

反射率:表示整体吸收谱线的背景值,是对被测目标色率的指示。被测目标颜色越浅整体背景线越高,也就是反射率越高。

1.3 发展历史

SWIR 技术大体经历了 3 个主要的发展阶段, 其中, 测谱学的出现为该技术的发展和應用奠定了基础。早在 20 世纪初期, 人们在粒子内部分析中就应用到了测谱学(Hunt, 1977)。但是, 由于电子器件及其他硬件技术方面的限制, 没有使该技术得到广泛的普及, 加之体积巨大, 使其难以应用于野外地质勘查中。所以, 这一阶段只在少量的实验室当中进行着基本原理和应用方面的研究, 并未推广到各领域的实践应用中。

第二个阶段是奠基期(1970~1990 年), 短波红外区间的矿物光谱最初由 Hunt(1973; Hunt and Ashley, 1979; Hunt and Wynn, 1979) 发表, 这些成果成为后期相关研究工作的基础。之后短波红外区间的矿物光谱库被 Clark 等(1999) 进行了扩充。该阶段的许多研究工作对矿物光谱特征和形成机理进行了深入广泛的研究, 积累了大量有价值的光谱信息, 这为短波红外光谱技术的发展和應用奠定了坚实的基础。

第三个阶段是发展期(1990 年至今)。在 20 世纪 80 年代, 科技跳跃式的发展极大地提高了光谱仪传感器的光谱分辨率, 使得光谱仪从波段型(低分辨率、不连续)演变为连续型高分辨率光谱仪。此外, 伴随着计算机技术的不断深入, 使得 SWIR 技术的应用领域得到了充分的扩展。加之大规模集成电路的出现和进步, 促进了应用型短波红外光谱仪的研制和完善(Thompson *et al.*, 1999; 孟恺等, 2009)。到 20 世纪末, 芯片技术的发展也促使短波红外光谱仪向便携式方向发展, 极大地拓展了这一技术使用空间。

目前, SWIR 技术在国外一些矿业公司已进入商业化应用阶段, 在各类热液环境(Yang *et al.*, 2001; Crowley *et al.*, 2003), 甚至部分沉积环境(Yang *et al.*, 1999; Sun *et al.*, 2001; Velasco *et al.*, 2005) 的矿床勘查中均发挥了重要作用, 成为常规的矿床勘查手段, 并逐步发展成为一种独立的找矿技术(Fraser *et al.*, 2006)。在中国地质领域使用 SWIR 技术的时间相对延后, 这主要是商业勘探公司的保密性所决定的, 加之受技术条件和资金的限制, 研究主要集中在国家科研单位进行, 没有被更广泛的接受和使用, 更没有广泛地应用到实践中。所以, 与国外相比, SWIR 技术在中国矿产勘查领域的应用依旧有很大的发展空间。

SWIR 技术在中国的应用主要开始于 21 世纪初, 2002 年引进首台 PIMA, 并在之后的几年时间

内, 连长云等(2005a, 2005b)、章革等(2005) 便利用这台 PIMA 对新疆土屋、云南普朗及西藏驱龙等大型、超大型斑岩矿床进行了 SWIR 技术的蚀变矿物填图, 确定了不同蚀变矿物亚类在矿区的空间分布规律, 在此基础上划分出目标矿床的蚀变分带模型, 并总结出蚀变分带模型与矿化之间的规律。随着该技术的推广, 除了继续在斑岩矿床的勘查中发挥着作用(徐庆生等, 2011), 一些学者又将该技术引入到金矿(曹焯等, 2008; 赵利青等, 2008; 孟恺等, 2009; 徐庆生等, 2011; 张篷和武振凯, 2011; 白劲松等, 2015)、矽卡岩(张世涛等, 2017)、浅成低温(郭娜等, 2017)、铅锌矿(刘碧洪和刘鹤, 2016; 郭娜等, 2018) 等类型的矿床研究中, 并取得了良好的找矿效果。这些研究工作表明, SWIR 技术在矿区蚀变矿物快速鉴定、蚀变分带划分和成矿远景区圈定等方面显现出明显优势, 在中国矿床勘查中同样有很好的利用前景, 为后来的研究者提供了一定的借鉴作用。

1.4 测试仪器和辅助软件

由于地质工作的现场测量需求, 常用的野外仪器需便携式, 近年来使用较多的便携式 SWIR 仪器有 3 种: Integrated Spectronics Pty. Ltd. 制造的 PIMA-SP、Analytical Spectral Devices, Inc.(ASD) 制造的 TerraSpec 和中国自主研发的 PNIRS(Chang and Yang, 2012; 杨志明等, 2012)。

PIMA 是最早应用于生产的便携 SWIR 仪, 20 世纪 90 年代初开始商业生产。它主要利用的光谱区间为 1300~2500 nm, 分辨率为 7~10 nm, 测试 1 个样品需要 50 s。后期美国 ASD 公司研制出新的光谱仪, 于 2006 年生产出第一台 TerraSpec, 它的光谱利用区间为 350~2500 nm, 不仅包含了 PIMA 仪的短波红外光区域, 同时还包含了可见光和近红外的一部分, 拓宽了该技术的感知视野。此外, 它的分辨率提高到 6~7 nm, 测试时间也更加灵活, 可以依据测试对象的色率高低进行调整。国内自主研发的 PNIRS 商业化较晚, 于 2005 年生产出第一台商用仪器。PNIRS 与 PIMA 应用的波长区间同为 1300~2500 nm, 其分辨率优于 8 nm, 测试时间固定为 60 s。这 3 种仪器本身的参数及性能测评详见 Chang 和 Yang(2012)、杨志明等(2012)。

通过上述仪器获得的光谱数据需要进行解译和有用信息的提取。常用的解译软件为 CSIRO 开发的“TSG”(The Spectral Geologist), 该软件可以进行初步的自动化解译, 后期需要人工核对和筛选。该软件还可以提取特定的光谱参数(如吸收深度、

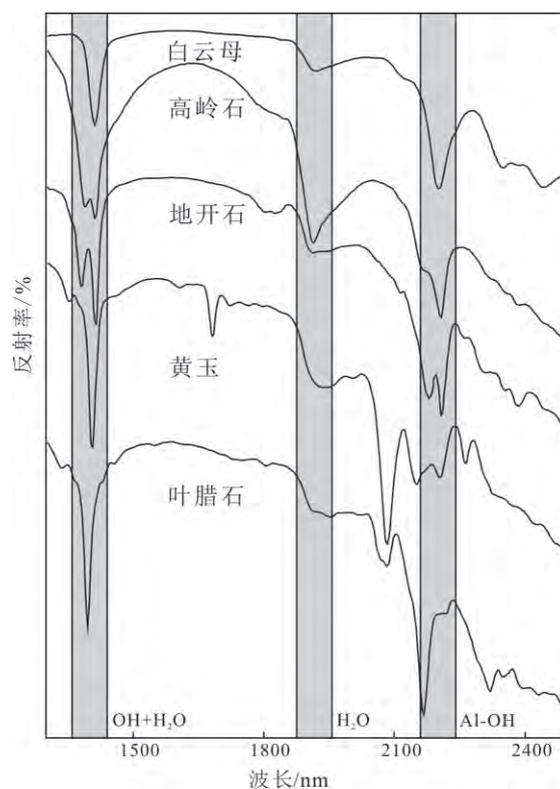
吸收位置等) 进行系统研究分析。软件中附带的光谱库中包含了 50 多种常见矿物的光谱, 如有更多需求则可以接入外部的光谱库 (Clark *et al.*, 1990, 2003, 2007; 万余庆等 2001; 相爱芹 2007)。

2 常见矿物的短波红外光谱特征

矿床勘查中常用的短波红外光谱表现为吸收光谱特征, 它在短波红外区间内一种矿物会产生多个吸收峰, 这些吸收峰中可以反应特定结构成分信息的部分被称为特征吸收峰 (Yang *et al.*, 2000)。这些特征吸收峰可用来区分蚀变矿物的种类, 是光谱分析的主要对象。在短波红外区间内, 能区分的常用蚀变矿物大类超过 50 种, 但本质上形成特征吸收的内因还是源于不同蚀变矿物中的不同官能团。在短波红外区间可鉴别的敏感官能团包括 OH^- 、 H_2O 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 等, 其红外光谱特征会因这些官能团所连接的阳离子不同而不同。

2.1 含 Al-OH 矿物

含 Al-OH 矿物是指在矿物晶格中含有 OH^- 并且与 OH^- 所连接的阳离子为 Al 离子的一类矿物。这类矿物的特征性吸收峰在 2200 nm 左右, 一般在 2190~2220 nm 之间 (GMEX, 2008)。常见的代表性矿物有浅色云母类 (包括白云母和伊利石)、高岭石类、黄玉以及叶蜡石。除了在 2200 nm 左右的 Al-OH 特征吸收外, 这类矿物还有一些其他共同的特征, 如在 1400 nm 左右的 H_2O 和 OH^- 的混合吸收峰, 在 1900 nm 左右的 H_2O 吸收峰。除了这些共性外, 这类矿物还各有其独特的特征 (图 2): ① 浅色云母类矿物, 包括了常见的白云母、伊利石和蒙脱石, 其特征吸收峰为 2345~2350 nm 处的次吸收峰。浅色云母类的特征吸收位置 (2200 nm 左右) 会因阳离子含量的不同而出现“漂移” (后文详述)。除此之外, 可以利用特征吸收深度和 H_2O 吸收 (1900 nm 左右) 深度比值来表征此类矿物的结晶度 (Chang *et al.*, 2011); ② 高岭石类矿物, 其最明显的特征是出现“双吸收峰”, 如图 2 所示, 高岭石短波红外光谱在 1400 nm 和 2200 nm 两处附近分别出现相伴的连续吸收, 即为“双吸收峰”吸收 (GMEX, 2008)。这使得高岭石易于与其他含 Al-OH 矿物区别。高岭石的两处“双吸收峰”的尖锐度可以反映其结晶度, 峰形越尖锐说明高岭石的结晶度越好, 一般深成高岭石或较高温下形成的高岭石结晶度较好, 地表由风化作用形成的高岭石结晶度较差。高岭石类矿物包含有高岭石和高温的地开石, 两者的判别取



修改自 TSG 软件数据库

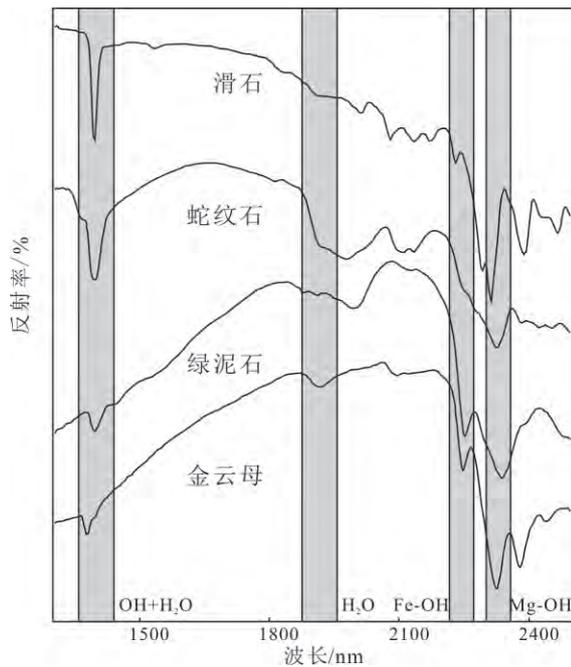
图 2 含 Al-OH 矿物短波红外光谱示意图

Fig.2 Schematic diagrams of short-wave infrared spectrum of Al-OH-bearing minerals

决于 1400 nm 附近的双峰间距, 地开石的双峰间距在 30 nm 左右, 普通高岭石约为 10 nm (GMEX, 2008); ③ 黄玉在 1400 nm 和 2100 nm 处有极为尖锐的强吸收峰, 这是黄玉最明显的吸收特征, 此外还有一些 2200~2300 nm 之间的次级吸收峰 (GMEX, 2008); ④ 叶蜡石在 1400 nm 和 2200 nm 左右同样有尖锐的吸收峰, 此外在 2100 nm 和 2300 nm 左右有次级吸收峰 (GMEX, 2008)。

2.2 含 Mg-OH 矿物

含 Mg-OH 矿物是指矿物晶格中含有 OH^- 官能团, 且与其相连的阳离子为 Mg 离子。这类矿物的吸收峰主要在 2350 nm 附近, 一般在 2300~2400 nm 之间。有时还会有 1400 nm 和 1900 nm 左右的吸收峰 (GMEX, 2008)。常见的含 Mg-OH 的矿物有绿泥石、绿帘石、黑云母、金云母、滑石和蛇纹石等 (图 3), 其谱学特征是: ① 绿泥石的特征吸收位于两个位置, 即 2250 nm 左右的 Fe-OH 吸收峰和 2340 nm 左右的 Mg-OH 吸收峰 (GMEX, 2008)。这两处的吸收位置会随 Mg、Fe 离子的相互置换而发生“漂移” (详见后文)。但由于绿帘石类和黑云母类矿物与绿泥石具有相似的吸收特征, 因此用光谱方法难以



修改自 TSG 软件数据库

图 3 含 Fe-OH、Mg-OH 矿物短波红外光谱示意图

Fig.3 Schematic diagrams of short-wave infrared spectrum of Fe-OH- and Mg-OH-bearing minerals

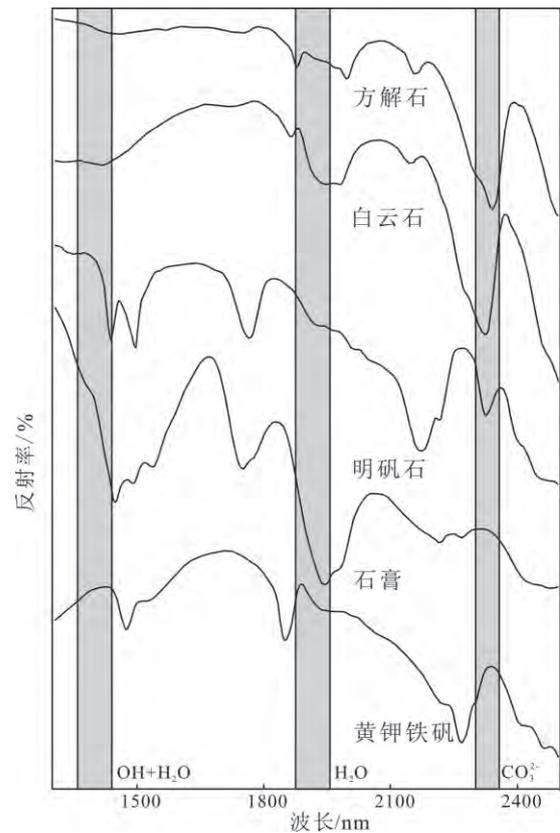
区分它们; ②金云母的 Mg-OH 特征吸收峰与富 Mg 绿泥石的相近, 均在 2330 nm 左右。此外, 金云母在 2400 nm 左右有吸收峰, 在 1900 nm 左右无 H₂O 的吸收峰 (GMEX, 2008); ③蛇纹石的 Mg-OH 特征吸收峰位于较短的位置 (接近 2300 nm), 在近 2400 nm 左右有次级吸收峰 (GMEX, 2008); ④滑石的 Mg-OH 出现“双峰”式特征吸收峰, 在 1400 nm 的吸收峰为尖锐的单峰, 在 2400 nm 左右出现次级吸收峰 (GMEX, 2008)。

2.3 含 Fe-OH 矿物

Fe-OH 的吸收峰在 2250 nm 附近, 含 Fe-OH 的常见矿物有绿泥石和绿帘石, 它们共同含有 Fe-OH 和 Mg-OH, 具体特征如上文所述 (图 3)。

2.4 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物的特征吸收峰在 2300~2400 nm 之间, 为不对称单峰。除了该区间内部的特征吸收峰外, 在 2100 nm 和 2500 nm 左右还有次级吸收峰。常见的这类矿物有方解石和白云石 (图 4), 其谱图特征是: ①方解石的特征吸收峰位于 2340 nm 附近 (GMEX, 2008), 基本和 Mg-OH 的特征吸收重合, 两者容易被混淆, 在两者同时存在的情况下, 需要做其他鉴定工作进行区分; ②白云石的特征吸收峰与方解石相似, 区别在于其特征吸收位置略短 (最短可至 2320 nm)。



修改自 TSG 软件数据库

图 4 碳酸盐和硫酸盐矿物短波红外光谱示意图

Fig.4 Schematic diagrams of short-wave infrared spectrum of carbonate and sulfate minerals

2.5 硫酸盐矿物

硫酸盐矿物的特征吸收峰没有明显的共性, 在此仅列举明矾石、石膏和黄钾铁矾的光谱特征 (图 4): ①明矾石最明显的特征是在 1500 nm 出现“双吸收峰” (GMEX, 2008), 吸收位置会随矿物晶格内 K、Na 含量变化而发生“漂移” (Chang *et al.*, 2011); ②石膏在 1400~1600 nm 之间出现连续上升的“三台阶”特征峰。在 1700 nm 和 1900 nm 左右有较深的吸收峰, 此外在 2200~2300 nm 之间有次级吸收峰 (GMEX, 2008); ③黄钾铁矾的 3 处主要吸收峰分别位于 1500 nm、1850 nm 和 2210 nm, 也存在不明显的次级吸收峰 (GMEX, 2008)。

3 在矿床勘查中的应用

3.1 矿物识别和蚀变矿物填图

矿物识别和蚀变矿物填图是 SWIR 技术最基本的应用领域。热液矿床的形成都会伴随着不同程度的围岩蚀变现象, 查明这些围岩蚀变的矿物组成和空间分布特征是矿床勘查的基本内容 (Berger, 1998)。利用 SWIR 技术可以弥补传统蚀变填图中

细粒蚀变矿物不易识别的缺点,可以在野外直接获取单个蚀变矿物的信息。尤其在样品数量和跨度允许的基础上,利用便携式 SWIR 仪可系统地获得矿区三维的蚀变矿物分布规律,详细划分蚀变分带。并通过分析单个蚀变矿物或特定组合与矿体位置的相关关系,为矿床勘查提供蚀变矿物方面的找矿指标。这样,解译结果可以实时的指导勘查工程的布置,并结合其他技术手段和资料,最终建立起目标矿床的蚀变找矿模型。

20 世纪末,SWIR 技术的这一功能已经有了许多应用的范例。1995 年,Rhys 和 Reynolds(1997)使用 PIMA 仪在英国的 Red Mountain 地区开展了蚀变矿物填图工作,在有效划分出蚀变带的基础上,结合已有矿化位置,圈定出了 Au-Ag 的远景区。随后澳大利亚 CSIRO 的 Yang 等(2011)在 Hellyer 矿区对不同亚类的白云母开展了鉴别和填图工作,发现其中多硅白云母的分布与 Pb-Zn 矿化有很好的吻合,从而提出利用 SWIR 技术探明多硅白云母的空间分布特征,可以指导 Hellyer 矿区的进一步找矿工作。近些年,Tappert(2011)利用该技术对南美 IOCG 型矿床中不同种云母类矿物进行填图工作,他们利用其中多硅白云母与矿化的对应关系,对成矿远景区做出了有效的判断。在中国,也有部分学者(郭娜,2012;郭娜等,2012;孙雨沁等,2012)利用这一技术进行了找矿勘查,并取得了良好的找矿效果。郭娜等(2012)利用美国生产的 SVC HR1024 在甲玛超大型铜多金属矿区选择代表性剖面进行了 SWIR 技术蚀变矿物填图,该项工作不仅鉴定出矿区内发育的各种蚀变矿物组合,建立了 SWIR 的蚀变分带模型和找矿模型,而且据此推断出地下岩浆热液的演化规律,并发现了矿体与多硅白云母及泥化蚀变带的对应关系,圈定了多个远景区,为甲玛矿区的深部及外围找矿提供了一定的指导作用。

3.2 成矿地质环境示踪

成矿地质环境的变化会引起蚀变矿物的成分和结晶度等方面的变化,这些变化会在 SWIR 光谱中的特征参数中得以体现,表现为光谱“漂移”和吸收峰形态变化。

3.2.1 利用光谱“漂移”反演成矿地质环境 光谱“漂移”现象是指蚀变矿物由于发生类质同象替代使其化学成分发生改变,从而导致该矿物的特征峰位置发生规律性变化。基于这些类质同象替代现象发生于特定的地质环境中,可利用这种光谱“漂移”现象来反演蚀变矿物形成时的地质条件。在热液矿床中,白云母、绿泥石和明矾石等蚀变矿物常

形成规律性的光谱“漂移”。因此,可利用 SWIR 技术对其光谱特征进行详细研究,以揭示其内部物质成分变化特征,从而反演矿床的形成环境。

浅色云母的短波红外光谱有明显的“漂移”特征。随着化学成分(主要是阳离子)的变化,Al-OH 的吸收位置在 2190~2220 nm 之间进行“漂移”。当 Na、Al 等阳离子含量高时,特征吸收位置向短波方向(2190 nm)“漂移”;当矿物化学成分贫 Al 而富 K、Fe 和 Mg 等阳离子时,特征吸收位置则会向长波方向(2220 nm)“漂移”(Herrmann *et al.*, 2001; Jones *et al.*, 2005)。

对于“漂移”现象的形成机理,前人做过大量研究(Herrmann *et al.*, 2001; Jones *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2005; 梁树能等, 2012)。Duke(1994)利用 SWIR 技术研究发现了云母类特征官能团(Al-OH)在 2200 nm 附近的吸收峰位置有明显的“漂移”规律,并指出这种吸收位置的“漂移”变化与云母类矿物晶体结构中 Al 离子,尤其是六次配位的 Al 离子(Al^{VI})含量相关。当 Al^{VI} 含量增加时,Al-OH 吸收峰向短波方向漂移,反之向长波方向漂移。刘圣伟等(2006)、王润生等(2010)认为,浅色云母类矿物(如白云母、伊利石)中 Al-OH 吸收峰位置的变化,是由矿物中 Al 离子所处不同位置所致,即 Al-OH 吸收峰位向长波方向“漂移”,对应的是六次配位的 Al 离子向四次配位转化,反之对应为六次配位的 Al 离子含量增加。梁树能等(2012)发现,这些 Al 离子的增加或减少是由其他二价离子置换造成的。

一般认为,这些二价离子和 Al 离子发生类质同象替代需要特定的温压条件。在压力相近的环境中,当温度较高时,Al 离子倾向于六次配位中;而温度较低时,Al 离子倾向于进入四次配位(刘圣伟等, 2006; 王润生等, 2010) 据此可以根据波长“漂移”趋势来反应浅色云母的成分变化和形成环境。在上述趋势的基础上,Ryan 和 Reynolds(1997)提出,当压力变化明显时才会造成 Al-OH 吸收位置的“漂移”,因此在浅部的热液环境中,温度对云母中 Al 离子替换有更大的影响。除了温度和压力外,Halley 等(2015)在研究斑岩矿床时认为,浅色云母中的 Al 和 Si 替代还会受到 pH 值的影响。当位于斑岩矿床深部和边部时,成矿热液的 pH 值较高,此处形成的云母类矿物有较长的 Al-OH 吸收峰位;反之在中心和边部时,位于短波位置。

绿泥石类似于绢云母的波长“漂移”原理,同样取决于离子的置换。在绿泥石晶体结构的八面体

中,普遍发生 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 离子之间的类质同象替代,当 Fe 离子被 Mg 离子替代,即晶格中 Fe/Mg 值减小时,其特征吸收峰向短波方向“漂移”,反之向长波方向漂移(Herrmann *et al.*, 2001; Jones, 2005; 梁树能等, 2014)。绿泥石广泛发育在多种地质环境中,以热液成因的绿泥石为例,具有高 $Fe/(Fe+Mg)$ 值的绿泥石倾向形成于较酸性的环境,反之应形成于较碱性的环境中(Inoue, 1995; 艾永富和刘国平, 1998; 田振东等, 2018)。

明矾石也有类似的“漂移”规律,Chang 等(2011)研究了菲律宾 Lepanto 高硫型浅成低温热液矿床及同地区的其他矿床,发现矿区普遍发育的明矾石具有明显的矿化指示作用,越接近矿化中心位置,明矾石特征吸收峰位置(1480 nm 左右)越向长波方向“漂移”,越远离矿化中心位置,特征吸收峰位置越向短波方向“漂移”。经过进一步对样品全岩和单矿物地球化学测试分析,他们认为明矾石的特征吸收峰位和矿物中的 $Na/(Na+K)$ 值呈正相关关系,而明矾石中 $Na/(Na+K)$ 值与其形成时的温度呈正相关,所以可以根据明矾石特征吸收峰位的“漂移”变化指示古环境的温度变化,反演成矿时的流体通道和温度演化,进而定位热液矿化中心,提供找矿指标。

3.2.2 利用吸收形态变化反演成矿地质环境 吸收形态是指特定吸收峰最小值处宽窄,用半高宽来表示。对同种矿物(一般为伊利石)来说,其特征吸收峰越窄(半高宽值越小),反映其结晶度越高。通常认为,在没有或者有较少后期热活动的干扰下,越接近热液环境的热源或侵入体中心,伊利石的结晶度越高(Duba and Williams-Jones, 1983; Frey, 1987; 王河锦等, 2007)。根据这一变化规律可反演成矿环境中温度场的演化,圈定矿化和热液中心(Duba and Williams-Jones, 1983)。利用 SWIR 技术测得的伊利石结晶度(SWIR-IC, 可用 $Al-OH$ 吸收强度与 H_2O 吸收强度之比来表示; 图 1)。SWIR-IC 与利用 XRD 方法测得的结晶度(XRD-IC)并非相同的定义, XRD-IC 定义为伊利石 1.0 nm 衍射峰的半高宽。Chang 等(2011)对同一样品用这两种方法分别进行了测试,发现两者的结果显示出很好的负相关关系,对伊利石的结晶度有等效的指示作用,并且 SWIR-IC 的获取更加快速高效,便于在野外利用便携短波红外光谱仪直接获得,进而可以在现场对伊利石结晶时的温度进行准确分析。

在许多矿床勘查过程中都涉及利用特征参数来反演成矿环境,并指导找矿工作。如 Yang 等

(2005) 在利用 SWIR 技术对新疆土屋斑岩矿床研究后指出,绿泥石和绢云母的特征波长位置会随距离矿体的远近而形成规律性变化,越靠近矿体和强蚀变区,绿泥石的特征波长位置越向长波方向“漂移”,而绢云母的特征波长越向短波方向“漂移”。同样利用波长“漂移”原理,Laakso 等(2016)在研究加拿大 Nunavut 地区 VMS 型的 $Zn-Cu-Pb-Ag$ 矿床时得出不一样结论,矿体周围的浅色云母矿物和绿泥石矿物都具有短波特征,远离矿体时向长波“漂移”,而在超出矿区的更远区域又“漂移”回短波区域。杨志明等(2012)利用便携红外光谱仪在西藏念村矿区进行短波红外填图工作,确定了不同矿物的种类及其在地表的分布,并依据 SWIR 光谱特征参数(SWIR-IC 和 $Al-OH$ 吸收峰位)的空间系统变化,圈定出矿区的热液通道中心,为浅剥蚀念村矿区进一步的深部勘查提供了有效指导。

4 发展趋势

SWIR 技术在矿床学研究中有着重要作用,必将成为矿床勘查和矿产资源潜力评估等方面的重要常规手段,其未来的发展应主要集中在以下几个方面:

(1) 建立区域光谱库。基于 SWIR 技术在矿床勘查领域的优势,该技术势必将在勘查单位和矿业公司中不断普及,这样就会产生大量岩矿光谱。收集各地质单元内特征性的岩矿 SWIR 光谱,进行归纳整理而形成地域“光谱图书馆”,以便于之后的研究者或者矿业公司可以快速了解区域地质信息,减少重复性工作。而且可以结合现今飞速发展的大数据技术,将会在地质领域有极大的研究前景。同时,光谱的保存远比岩芯及其他样品要方便,通过光谱库的建立,可以避免许多岩芯和岩石标本的浪费,降低岩芯及其他样品中有效信息的保存成本。

(2) 多波段结合分析。短波红外波段的有效鉴别矿物主要是含 OH^- 的矿物,而不含 OH^- 的矿物(如常见的石英、长石、硬石膏等)则无法在短波红外波段中识别,而这些矿物在中波红外波段和热红外波段有着良好的响应。因此,将红外波段的探测宽度进行扩展,可以极大扩展可识别矿物的种类,更加高效的进行填图工作。

(3) 与遥感技术结合。相比地面短波红外光谱技术,遥感技术的优势在于更加广阔的视野。通过两者的结合,可以在拓展视野的基础上提高精确度,在精度和广度上都有很大的提升。

(4) 进一步研究矿物内部因素对光谱的影响,

如类质同象、同质多象等,这些研究将促使红外光谱技术在成因矿物学中的应用进一步拓展,利于通过光谱特征更加精确的研究反演成矿环境,进而对矿床成因和成矿过程的研究提供线索。

(5) 研究未知吸收特征。在短波红外光谱中经常出现一些未知的吸收特征(Aspectral),这会限制光谱库的范围,使得 SWIR 的应用有一定的局限性。因此,有必要对这些未知特征进行研究,探明其产生的机理和变化规律,以此拓宽我们对红外光谱的认知,为地质学和光谱学的研究提供潜在的帮助。

致谢: 成文过程得到了中科遥感集团杨凯博士和中国地质科学院地质研究所杨志明研究员的指导,在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

- Berger B R. 1998. Hydrothermal alteration. In: Marshall C P, Fairbridge R W (eds.). *Geochemistry. Encyclopedia of Earth Science*. Netherlands: Springer
- Chang Z, Yang Z. 2012. Evaluation of inter-instrument variations among short wavelength infrared (SWIR) devices. *Economic Geology*, 107(7): 1479-1488
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Garcia J Jr, Gemmill J B, McKnight S, Cuisson A L. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 106(8): 1365-1398
- Clark R N, King T V V, Klejwa M, Swayze G A, Vergo N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95(B8): 12653-12680
- Clark R N. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz A (ed.). *Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for Earth Sciences*. New York: John Wiley and Sons
- Clark R N, Swayze G A, Wise R K, Livo E, Hoefen T M, Kokaly R F, Sutley S J. 2003. USGS Digital Spectral Library splib05a. U.S. Geological Survey, Open File Report 03-395. U.S. Geological Survey
- Clark R N, Swayze G A, Wise R A, Livo K E, Hoefen T M, Kokaly R F, Sutley S J. 2007. USGS digital spectral library splib06a. Reston, VA: U.S. Geological Survey
- Crowley J K, Williams D E, Hammarstrom J M, Piatak N, Chou I M, Mars J C. 2003. Spectral reflectance properties (0.4-2.5 μm) of secondary Fe-oxide, Fe-hydroxide, and Fe-sulphate-hydrate minerals associated with sulphide-bearing mine wastes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3(3): 219-228
- Duba D, Williams-Jones A E. 1983. The application of illite crystallinity, organic matter reflectance, and isotopic techniques to mineral exploration: A case study in Southwestern Gaspé, Quebec. *Economic Geology*, 78(7): 1350-1363
- Duke E F. 1994. Near infrared spectra of muscovite, tschermak substitution, and metamorphic reaction progress: Implications for remote sensing. *Geology*, 22(7): 621-624
- Fraser S J, Whitbourn L, Yang K, Ramanaidou E, Connor P, Poropat G, Soole P, Mason P, Coward D, Phillips R. 2006. Mineralogical Face-Mapping Using Hyperspectral Scanning for Mine Mapping and Control. Sixth International Mining Geology Conference, "Rising to the Challenge", Darwin, 227-232
- Frey M. 1987. Very low-grade metamorphism of elastic sedimentary rocks. In: Frey M. *Low Temperature Metamorphism*. Glasgow: Blackie
- GMEX. 2008. Spectral interpretation field manual. 3rd ed. AusSpec International Ltd
- Halley S, Dilles J H, Tosdal R M. 2015. Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *Society of Economic Geology Newsletter*, 100: 12-17
- Herrmann W, Blake M, Doyle M, Huston D, Kamprad J, Merry N, Pontual S. 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. *Economic Geology*, 96: 939-955
- Hunt G R, Salisbury J W, Lenhoff C J. 1973. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. VI. Additional silicates. *Modern Geology*, 4: 85-106
- Hunt G R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3): 501-513
- Hunt G R, Ashley R P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74(7): 1613-1629
- Hunt G R, Wynn J C. 1979. Visible and near-infrared spectra of rocks from chromium-rich areas. *Geophysics*, 44(4): 820-825
- Inoue A. 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments. In: Velde B, ed. *Origin and Mineralogy of Clays: Clays and the Environment*. Berlin Heidelberg: Springer
- Jones S, Herrmann W, Gemmill 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. *Economic Geology*, 100(2): 273-294
- Laakso K, Peter J M, Rivard B, White H P. 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. *Economic Geology*, 111(5): 1223-1239
- Ryan P C, Reynolds R C Jr. 1997. The chemical composition of serpentine/chlorite in the Tuscaloosa formation, United States Gulf Coast: EDX vs. XRD determinations, implications for mineralogic reactions and the origin of anatase. *Clays and Clay Minerals*, 45(3): 339-352
- Sun Y Y, Seccombe P K, Yang K. 2001. Application of short-wave infrared spectroscopy to define alteration zones associated with the Elura zinc-lead-silver deposit, NSW, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 73(1): 11-26
- Tapert M, Rivard B, Giles D, Tapert R, Mauger A. 2011. Automated drill core logging using visible and near-infrared reflectance spec-

- troscopy: A case study from the olympic dam IOCG deposit, South Australia. *Economic Geology*, 106(2): 289-296
- Thompson A J B, Hauff P L, Robitaille A J. 1999. Alteration mapping in exploration: Application of Short-wave Infrared (SWIR) spectroscopy. *SEG Newsletter*, 39(3): 16-27
- Velasco F, Alvaro A, Suarez S, Herrero J M, Yusta I. 2005. Mapping Fe-bearing hydrated sulphate minerals with short wave infrared (SWIR) spectral analysis at San Miguel mine environment, Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, 87(2): 45-72
- Yang K, Huntington J F, Boardman J W, Mason P. 1999. Mapping hydrothermal alteration in the Comstock mining district, Nevada, using simulated satellite-borne hyperspectral data. *Australian Journal of Earth Sciences*, 46(6): 915-922
- Yang K, Huntington J F, Browne P R L, Ma C. 2000. An infrared spectral reflectance study of hydrothermal alteration minerals from the Te Mihi sector of the Wairakei geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, 29(3): 377-392
- 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 short-wave infrared spectroscopy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106(1-2): 53-65
- 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. *Mineralium Deposita*, 40(3): 324-336
- 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. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(2): 143-156
- 艾永富, 刘国平. 1998. 内蒙大井矿床的绿泥石研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 34(1): 97-105
- 白劲松, 汪欢, 陈志广, 张斌, 王恒涛. 2015. 短波近红外光谱蚀变填图在黑龙江某岩金矿床找矿勘查中的应用. *黄金*, 36(12): 9-14
- 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. *地质与勘探*, 44(2): 82-86
- 郭娜. 2012. 甲玛斑岩-矽卡岩型铜矿床蚀变矿物组合研究. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 郭娜, 郭科, 张婷婷, 刘廷晗, 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. *地球学报*, 33(4): 641-653
- 郭娜, 黄一入, 郑龙, 唐楠, 伏媛, 王成. 2017. 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. *地球学报*, 38(5): 767-778
- 郭娜, 刘栋, 唐菊兴, 郑龙, 黄一入, 史维鑫, 伏媛, 唐楠, 王成. 2018. 基于短波红外技术的蚀变矿物特征及勘查模型: 以斯弄多银铅锌矿床为例. *矿床地质*, 37(3): 556-570
- 连长云, 章革, 元春华. 2005a. 短波红外光谱矿物测量技术在普朗斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用. *矿床地质*, 24(6): 621-637
- 连长云, 章革, 元春华, 杨凯. 2005b. 短波红外光谱矿物测量技术在热液蚀变矿物填图中的应用: 以土屋斑岩铜矿床为例. *中国地质*, 32(3): 483-495
- 梁树能, 甘甫平, 闫柏珉, 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. *国土资源遥感*, (3): 111-115
- 梁树能, 甘甫平, 闫柏珉, 魏红艳, 肖晨超. 2014. 绿泥石矿物成分与光谱特征关系研究. *光谱学与光谱分析*, 34(7): 1763-1768
- 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. *地质与勘探*, 52(4): 703-711
- 刘圣伟, 闫柏珉, 甘甫平, 杨苏明, 王润生, 王青华. 2006. 绢云母的光谱特征变异分析及成像光谱地质成因信息提取. *国土资源遥感*, 18(2): 46-50
- 孟恺, 申俊峰, 卿敏, 吴学丽, 睢程晨, 刘倩. 2009. 近红外光谱分析在毕力赫金矿预测中的应用. *矿物岩石地球化学通报*, 28(2): 147-156
- 孙雨沁, 许虹, 李胜荣, 张岩. 2012. 黑龙江金厂金矿床18号矿体围岩蚀变及短波红外光谱特征. *矿物岩石地球化学通报*, 31(1): 14-22
- 田振东, 冷成彪, 张兴春, 尹崇军, 张伟, 郭剑衡, 田丰. 2018. 青藏高原义敦岩浆弧前寒武系变质岩绿泥石矿物学特征及其地质意义. *地球科学与环境学报*, 40(1): 36-48
- 万余庆, 张凤丽, 闫永忠. 2001. 矿物岩石高光谱数据库分析. *地球信息科学*, 3(3): 54-58
- 王河锦, 陶晓风, Rahn M. 2007. 伊利石结晶度及其在低温变质研究中若干问题的讨论. *地学前缘*, 14(1): 151-156
- 王润生, 甘甫平, 闫柏珉, 杨苏明, 王青华. 2010. 高光谱矿物填图技术与应用研究. *国土资源遥感*, (1): 1-13
- 相爱芹. 2007. 短波红外技术在矿物填图与遥感岩性识别中的应用研究. 硕士学位论文. 长沙: 中南大学.
- 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 黄俊杰, 殷靓, 王弥建, 张秋宁, 黄宾, 陈春霞, 修铁军, 陆帅. 2007. 近红外光谱分析技术在蚀变矿物鉴定中的应用. *地质学报*, 81(11): 1584-1590
- 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. *岩矿测试*, 28(6): 519-523
- 徐庆生, 郭健, 刘阳, 黄树峰, 李秋平, 陈玉水. 2011. 近红外光谱矿物分析技术在帕南铜-铅-钨矿区蚀变矿物填图中的应用. *地质与勘探*, 47(1): 107-112
- 杨志明, 侯增谦, 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. *矿床地质*, 31(4): 699-717
- 章革. 2005. 高光谱短波红外技术在矿区矿物填图中的应用研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京)
- 张篷, 武振凯. 2011. PIMA在斑岩型矿床蚀变带划分中的应用综述. *吉林地质*, 30(1): 129-132
- 张世涛, 陈华勇, 张小波, 张维峰, 许超, 韩金生, 陈冕. 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. *矿床地质*, 36(6): 1263-1288
- 赵利青, 邓军, 原海涛, 李晓英. 2008. 台上金矿床蚀变带短波红外光谱研究. *地质与勘探*, 44(5): 58-63

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 高剑峰)