



短波红外光谱技术 在山东省矿产勘查中的应用及展望

张超^{1,2}, 于学峰^{2*}, 李大鹏¹, 张岩¹, 刘强¹, 刘兰海¹, 李鑫¹, 李新卫¹, 牛志力¹, 刘伟栋³

(1. 山东省地质科学研究所, 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013; 2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 山东 济南 250000)

摘要:在矿产勘查向覆盖区及深部拓展的新形势下,短波红外光谱(SWIR)技术凭借其快速精准识别蚀变矿物的优势,成为提升找矿效能的关键技术手段。本文对 SWIR 技术原理、常用设备、数据处理软件等进行了简要介绍,阐述了短波红外光谱技术在矿产勘查领域的应用情况。列举了山东省金、多金属、稀土及金刚石矿床 SWIR 勘查实例,证实该技术在蚀变矿物分带、示踪热液矿化中心、勘查标识体系建立等方面具有显著优势,为矿产勘查提供重要参考信息,显示出广阔应用前景。结合地质勘查领域发展趋势,展望未来,SWIR 技术将向 3 个方向发展:与热红外光谱技术联用,拓展应用领域;与遥感技术联用,开展蚀变矿物三维填图;利用大数据、机器学习开展蚀变矿物定量预测。

关键词:短波红外光谱(SWIR);矿产勘查;蚀变矿物;山东省

中图分类号:O657.33

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.09.008

0 引言

地质勘查实践和研究表明,热液流体多参与内生金属矿床成矿过程。流体在迁移过程中,会与围岩发生水岩反应,进而产生能量和物质交换,导致围岩发生蚀变^[1]。研究蚀变过程中产生的蚀变矿物的类型、组合、时空分布特征等,可以从中提取与成矿相关的地质信息,进而获得重要的找矿线索^[2-8],提高矿产勘查的效率^[9-12]。20 世纪 70 年代以来,国外学者利用光谱技术获取了常见蚀变矿物的光谱特征^[13-14],随后,该项技术开始应用于商业性矿产勘查,在斑岩型、夕卡岩型矿床勘查中发挥了重要作用,积累了丰富的经验。21 世纪初期,该技术被引入到国内^[7-8,15-16],并在西藏念村^[17]、玉龙^[18]、多不

杂^[19]、甲玛^[20]、云南普朗^[15,21-22]、福建紫金山^[23-24]、鄂东南铜绿山^[25-28]、铜山口^[29]、黑龙江小科勒河^[30]、争光^[31]、江西德兴^[32]、河北邯鄲^[33]等国内多个重要矿集区开展了应用,在成矿理论创新、找矿模型构建、成矿预测等方面发挥了重要作用,有效指导了矿床勘查工作。从矿床类型来看,包含了斑岩型、夕卡岩型、火山成因块状硫化物、浅成低温热液^[34-35]等;从矿种来看,主要为金、铜、铁、金-锌、铜-钼、铜-金、铜-金-铁、铜-钼-钨等重要金属矿种,显示出广阔的应用前景。

当前,SWIR 技术研发和应用已成为矿产勘查和矿床研究领域的热点方向之一。本文对短波红外光谱技术原理、特点、仪器等进行简介,总结其在矿产勘查中的应用领域,列举了山东省应用短波红外

收稿日期:2025-02-25; **修订日期:**2025-03-17; **编辑:**武昕普

基金项目:山东省重点研发计划项目(2023CXGC011001,2022CXPT047);山东省地质勘查项目(鲁勘字[2023]8号,鲁勘字[2024]14号);自然资源部深部金矿勘查开采技术创新中心开放课题(LDKF-2023BZX-28);新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(ZKKJ202405)

作者简介:张超(1986—),男,湖北保康人,高级工程师,主要从事金属矿产勘查与矿床地球化学研究工作;E-mail:sddkyzc@126.com

* **通信作者:**于学峰(1962—),男,山东泰安人,研究员,主要从事地质矿产研究工作;E-mail:xfengyu@sohu.com

光谱勘查的实例,对未来应用情况进行了展望,旨在为矿产勘查一线工作者和技术人员了解 SWIR 技术提供参考。

1 短波红外光谱技术简介

1.1 短波红外光谱技术原理

电磁波和光学基本理论认为,当物质内部分子受到光源激发时,会产生一定频率的振动并选择性吸收一定的光谱。不同矿物的内部特征也各不相同,其晶体结构、化学键种类、结晶程度等因素都会对振动强弱和光谱的吸收产生影响。光谱仪器会采集振动和吸收数据,生成特定的光谱特征,不同的光

谱特征可以用来区分不同的矿物^[13]。
短波红外光(SWIR)是一种介于近红外光与中红外光之间的电磁波,其波长范围一般在 1 300~2 500 nm 之间^[15,17]。前人研究表明,短波红外光可以较为准确的识别出矿物中的羟基(-OH)、碳酸根(CO₃²⁻)以及硫酸根(SO₄²⁻)等官能团(图 1),进而确定矿物种类及其含量^[7,15-17]。利用这一原理,可以识别出含羟基、水、铁羟基、镁羟基、碳酸根等官能团的硅酸盐矿物和碳酸盐矿物^[7,36],例如绿泥石、绿帘石、绢云母、高岭石、白云石、方解石等。表 1 中列出了常见蚀变矿物中特定官能团的波长特征值及代表性矿物。

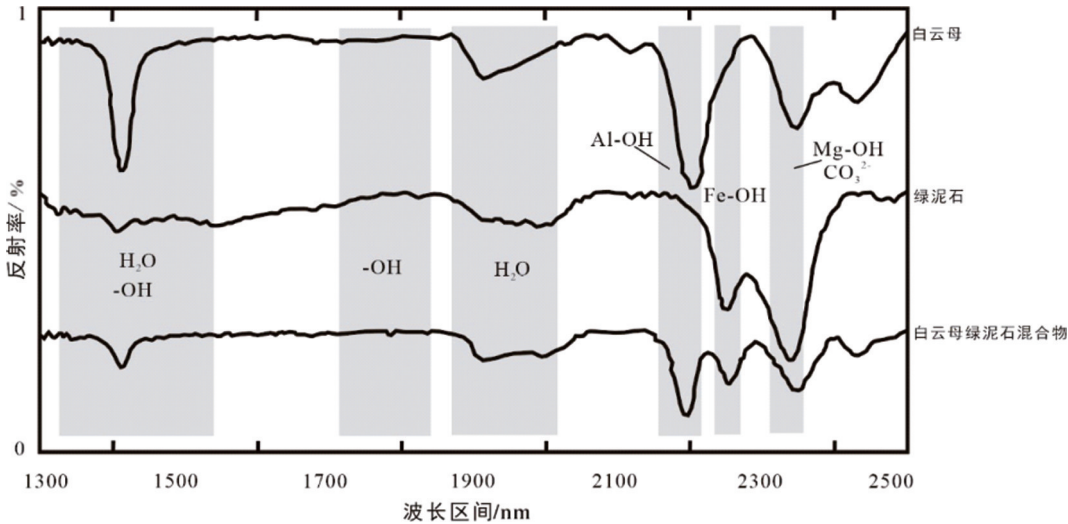


图 1 典型矿物光谱受基团影响位置^[37]

表 1 常见蚀变矿物官能团光谱特征 ^[7]		
官能团	波长特征值/nm	代表矿物
Al - OH	~1400 2170~2221	高岭石、蒙脱石、伊利石、白云母
Fe - OH	~1400 2210~2300	皂石
Mg - OH	~1400 2300~2380	绿泥石、滑石、绿帘石
Si - OH	~1400 ~2250	石英、蛋白石
CO ₃ ²⁻	1850~2220 2300~2350	方解石、白云石、菱铁矿

1.2 短波红外光谱在蚀变矿物识别方面的特点

传统的蚀变矿物研究主要采用薄片、光片、电子探针及 X 射线粉晶衍射等手段。这些方法对样品的制备有一定的要求,开展分析的成本也较高。与

上述方法相比,短波红外光谱分析具有以下几个方面的优势:①仪器便于携带,单人即可操作;②满足多场合环境下测试需求。测试环境既可以在室内,也可以在野外现场,甚至在矿井、巷道内都可以开展测试;③样品无需制备,可以直接对原岩开展分析,无需对样品进行切片或者是粉碎;④测试速度快,单个样品测试最快可在 10s 内完成,特别适合大批量样品分析测试;⑤相关费用较低,可以有效节约分析测试成本;⑥灵敏度较高,可有效识别高岭石、绿泥石、伊利石、皂石等黏土矿物或其他含水蚀变矿物^[6,17,26]。鉴于以上特点,短波红外光谱扫描常用于矿区钻孔岩心、地表岩石样品、井中的扫描,是一种绿色高效的勘查技术。

1.3 常见仪器

常见用于短波红外光谱数据采集的仪器有 4

种,分别是 PIMA、TerraSpec、PNIRS、可见光近红外波谱仪。

PIMA(Portable Infrared Mineral Analyzer)生产于 20 世纪 90 年代,生产厂家为澳大利亚 Integrated Spectronics Pty Ltd,是较早应用于矿产勘查的短波红外光谱仪器(图 2),目前该仪已经停产。该短波红外光谱仪为便携式,可利用的光谱区间为 1 300~2 500 nm 之间,单个样品测试时间相对固定,约为 50 s,分辨率为 7~10 nm^[38]。21 世纪初期由中国地质调查局引入国内,并在云南普朗、新疆土屋等多个矿区使用^[15,16],取得了较好的勘查效果。



图 2 PIMA 短波红外光谱仪器

美国 ASD(Analytical Spectral Devices)公司成立于 1990 年,是一家专业设计、制造和销售红外光谱仪器的厂家。2006 年,该公司生产出一台全新的光谱仪,取名为 TerraSpec^[2,6,39-40](图 3)。它利用的光谱区间介于 350~2 500 nm 之间,不仅涵盖了 PIMA 的短波红外光区域,还包含了部分可见光和近红外光的区间,进一步拓宽了应用领域。同时,分辨率也提高至 6~7 nm,单个样品分析测试时间也大幅缩短至 4~10s。

PNIRS 是由中国地质调查局南京地调中心和南京中地仪器有限公司研制的国产红外光谱仪,2005 年开始商业化生产。该仪器轻便,重量仅为 3 kg 左右,搭配有 6 V 移动电源,可以携带至野外使用。分辨率优于 8 nm,单个样品测试时长介于 30~120 s 之间^[7,15-16]。

可见光近红外地物光谱仪是最新的国产光谱仪器(图 4),仪器参数与美国 ASD 生产的 TerraSpec 相当,单样品的分析测试所需时间更短。



图 3 ASD TerraSpec4 短波红外光谱仪



图 4 国产 CSD350A 型宽谱段地物波谱仪

1.4 数据分析软件

目前,短波红外光谱仪采集的数据大多通过 TSG 软件(The Spectral Geologist)进行处理。该软件由澳大利亚科学与工业研究组织(CSIRO)开发,是一款专业的光谱地质数据处理软件。软件可以实现光谱数据、图像数据和其他地质数据整合,可集成分析光谱数据与地球化学、坐标、样品描述等数据。该软件内置矿物样品实测光谱数据库,可以实现矿物的自动对比和识别。同时,该软件具有强大的绘图与输出功能,可以满足不同格式的图件制作需求。

2 短波红外光谱在矿产勘查中的应用

短波红外光谱技术可以快速获取蚀变矿物种类、含量,该技术主要应用于蚀变矿物填图和示踪矿化、热液中心等方面。

2.1 蚀变矿物填图

SWIR 技术最早应用于矿物勘查领域就是在蚀

变矿物识别和填图方面。查明矿床形成过程中围岩蚀变的矿物组成和空间分布特征是矿床勘查的重要内容之一^[41]。SWIR 技术可以解决传统蚀变填图中细微蚀变矿物难以识别的问题,同时可在野外直接获取岩石样品中蚀变矿物信息。借助于勘探线在平面以及钻孔垂向上的展布,利用短波红外光谱仪可以获取矿区三维尺度上的蚀变矿物分布特征,进而划分蚀变分带,为矿床勘查提供蚀变矿物方面的指标信息。解译结果可以进一步指导勘查工程部署,并结合地质、物探、化探及遥感资料,建立特定矿床的蚀变勘查模型。

国外从 20 世纪 90 年代开始利用短波红外光谱技术开展蚀变矿物填图工作。国外学者^[42]对不同类型的矿床开展了大量的 SWIR 光谱分析,确定了矿床不同蚀变带中的蚀变矿物种类及组合特点,详细的对围岩蚀变分带进行了划分,建立矿床蚀变模型,为指导下步同类型矿床勘查提供了重要参考。

我国在 2001 年引入 PIMA 后,开始利用该仪器开展蚀变矿物填图工作。连长云等^[16]利用 PIMA 对新疆土屋斑岩铜矿开展了蚀变矿物填图,识别出伊利石、绿泥石、白云母、高岭石、硬石膏、黑云母、蒙脱石、方解石、绿帘石等矿物,结合蚀变矿物的空间分布特征,建立了矿区蚀变矿物分带模型,总结了蚀变矿物与岩体或矿体的对应关系,建立了基于短波红外光谱特征的蚀变矿物找矿模型。云南普朗铜矿区也开展了蚀变矿物填图工作^[15],短波红外光谱识别出伊利石、绿泥石、硬石膏、蒙脱石、黑云母、阳起石等矿物,蚀变矿物分带模型由内而外依次为钾化带、绢英岩化带和泥化带。与前人建立的分带模型相比,蚀变矿物分带模型可以更加合理的解释矿化空间分布特征,并指明了下步勘查的重点部位。章革等利用 PIMA 在西藏驱龙矿区开展了蚀变矿物填图,与航天成像谱资料(Hyperion)识别结果相比,便携式短波红外光谱仪获取的蚀变矿物种类更加全面,识别的准确度相对较高。杜斌等^[43]利用国产便携式近红外矿物分析仪 BJKF-Ⅲ在滇西北香格里拉松诺矿床开展了蚀变矿物填图工作,识别出绿泥石、绿帘石、云母类、高岭石、伊利石及蒙脱石类等 6 类蚀变矿物,圈定出青磐岩化带、绢英岩化带 2 个蚀变分带,结合物化探异常特征,圈定的深部找矿靶区经钻探验证,取得了较好的见矿效果。对黑龙江小科勒河铜钼矿区 3 条勘探线剖面的 13 个钻孔

进行了短波红外光谱扫描^[44],分析结果显示钻孔中的蚀变矿物主要为绿泥石和白云母、伊利石、蒙脱石等白云母族矿物。蚀变矿物在空间上的分布具有一定的规律性。其中,绿泥石与花岗闪长斑岩关系密切,白云母主要分布在靠近地表的前部地区,伊利石分布范围与绿泥石大致相同,蒙脱石则呈零散状分布。

2.2 示踪矿化、热液中心

在蚀变矿物填图的基础上,通过典型蚀变矿物短波红外光谱参数变化来示踪矿化、热液中心,是短波红外光谱在矿产勘查中的重要内容^[21,45]。

前人研究发现,某些蚀变矿物对温度和元素含量的变化较为敏感。与矿物标准光谱曲线相比,其光谱特征吸收峰会出现明显变化,这些参数的变化可以有效示踪热液或者是矿化中心^[2,6,9,12,17,20,26,44-46],进而圈定找矿靶区。勘查实践表明,绿泥石、伊利石、绢云母等矿物短波红外光谱特征值可以有效示踪热液及矿化中心。

(1)绿泥石:是一种含水层状硅酸盐矿物,Fe-OH 和 Mg-OH 是其特征官能团。在短波红外波段,Fe-OH 特征吸收峰位于 2 250 nm 附近(图 5),Mg-OH 则位于 2 350 nm 附近。

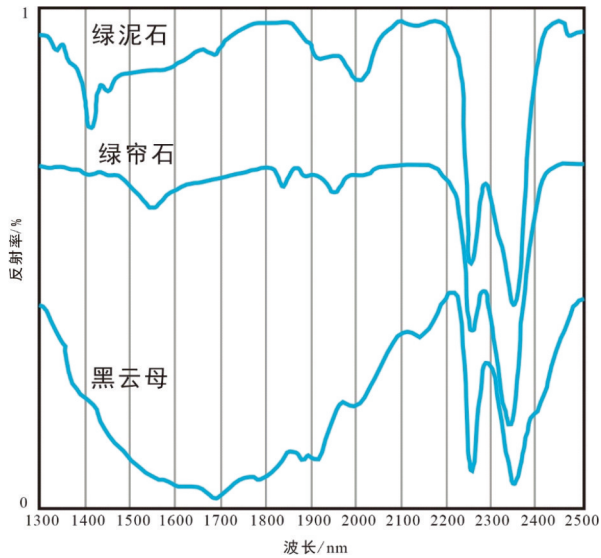


图 5 常见含 Fe-OH 蚀变矿物短波红外标准光谱

绿泥石形成时的流体性质及围岩成分会影响其 Fe、Mg 含量,进而引起绿泥石 2 250 nm 吸收峰的偏移,是斑岩型矿床的重要光谱勘查指标之一。前人研究发现,形成于热液系统不同部位的绿泥石,其化学成分也会有所不同。主要体现在靠近热液系统

中心的绿泥石比远离热液中心的绿泥石在成分上更加富铁,在红外光谱特征上也具有较长的 Fe-OH 波长^[16]。

(2)伊利石:实验数据测得伊利石 Al-OH 特征吸收峰位于 2 200 nm 附近(图 6)。

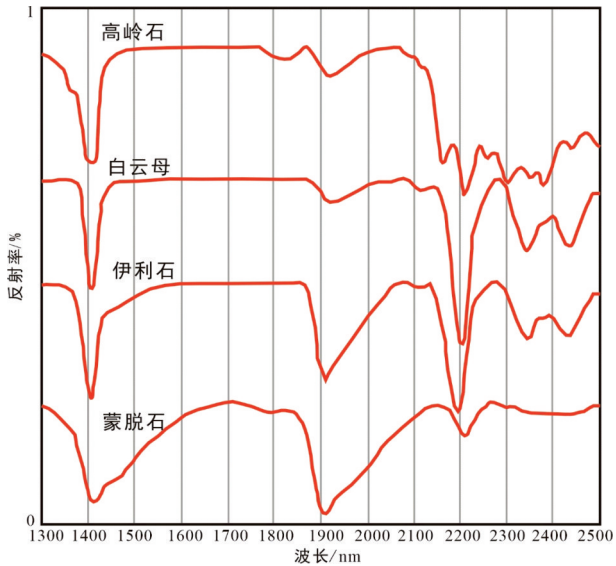


图 6 常见含 Al-OH 蚀变矿物短波红外标准光谱

研究认为,随着温度的降低,伊利石矿物晶格中的 Al、K 会被替代,导致 Al 的减少,H₂O 的增加。H₂O 含量的增加会影响伊利石 1 900 nm 吸收深度值增大;Al 的减少会引起伊利石的 2 200 nm 吸收峰吸收深度减小,从而导致 IC 值(伊利石结晶度)降低。温度高时,伊利石 IC 值较大,温度降低时,IC 值会变小^[17]。西藏念村斑岩铜矿伊利石反射光谱特征显示,矿区东北部的 IC 值普遍大于 1.6,而 Al-OH 吸收峰多小于 2 203 nm;远离该区域,IC 值则随之变小,Al-OH 吸收峰则会变大。由此推断,矿区东北部伊利石形成时具有更高的温度,该区域可能为热液或者矿化中心。许超等^[24]对紫金山矿田西南铜铝矿段蚀变矿物开展了短波红外光谱测量,发现从矿化中心到外围,IC 值、伊利石 2 200 nm 吸收峰值(Pos2200)呈现规律性变化趋势,即由高值变为低值。值得注意的是,有关学者^[31]研究认为,Al-OH 吸收峰位直接受伊利石中 Fe/(Fe+Mg)含量影响,间接受温度、原岩组分、流体组分及岩石渗透率等影响,利用其指示矿化时应尽量保证同一矿区、同一围岩组成及相近的渗透率。

(3)绢云母:是热液矿床中常见的一种蚀变矿物。在斑岩型矿床、VMS 型矿床、浅成低温热液矿

床中均有发育。其 Al-OH 吸收峰波长和 IC 值与矿物的形成温度关系密切。在温度较高的环境下,绢云母中的 Al 含量较高,对应于较低的 Al-OH 吸收波长;随着温度降低 Al 含量降低,Al-OH 吸收波长则随之增加。因此,在高温环境下,绢云母 Al-OH 吸收波长数值变小、IC 值较大。毛星星等^[5]总结了不同类型矿床近矿端绢云母短波红外光谱波长的变化规律,指出在不同类型的矿床中,绢云母可能出现 2 种相反的吸收峰变化规律。例如,在西藏甲玛斑岩铜矿区,绢云母 Pos2220 高值的出现指示热液中心;而在西藏德明顶矿区,绢云母 Al-OH 吸收峰波长低值(2 196~2 204 nm)可能为热液蚀变矿化中心。因此,采用绢云母 2 200 nm 吸收峰变化指示热液或者成矿中心,需要结合矿床的地质特征来加以判断。

3 应用实例

山东省矿产资源种类丰富,金、铁、煤、金刚石、石膏、稀土等矿种在全国占有重要地位。近年来,山东省利用短波红外光谱技术对金、铜多金属、稀土等矿种,开展了蚀变矿物勘查工作。

3.1 金矿

金矿是山东省优势矿种。胶东金矿的形成与热液关系密切,热液蚀变矿物特征及矿物组合可以指示成矿过程中的物理、化学条件变化,是重要的成矿信息,同样也是典型的找矿标志^[1]。随着短波红外光谱技术的推广,近年来,国内一些学者利用该技术在胶东对一些金矿开展了研究工作。赵利青等^[47]采集了台上大型金矿上下盘 1 km 之内的围岩样品,利用 PIMA 进行了光谱测量。结果显示,云母类矿物的光谱特征对蚀变具有较好的反映。位于断裂接触带上盘的栾家河二长花岗岩中白云母含量更多,且云母类层间水强度更高;下盘蚀变带(原岩为玲珑黑云母花岗岩)含更多的多硅白云母,云母类结晶度也更高。邵雪维等^[48]对新城金矿田钻孔样品的短波红外光谱测量显示,IC 值和绢云母 Poss2200 可以作为指示性的勘查标志。在距离焦家主断裂蚀变岩型矿体较近的位置,具有较高的 IC 值、绢云母 Al-OH 吸收位置($\geq 2\,205\text{ nm}$);在远离矿体位置,IC 值、绢云母 Al-OH 吸收位置则偏低。三山岛北部海域金矿床是我国在海域评价的首个特大型金矿

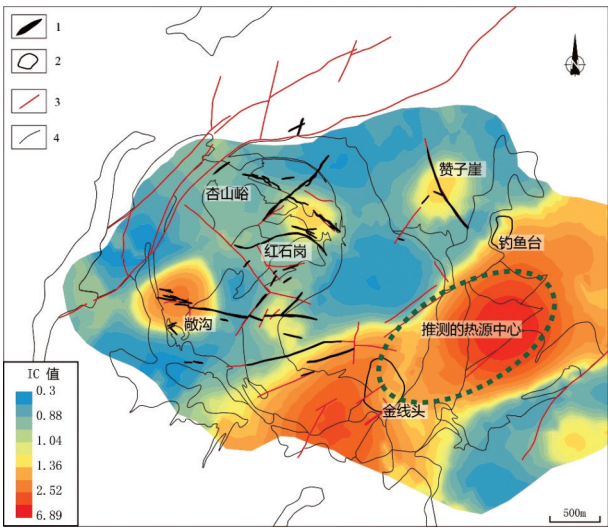
床。李健等^[49]利用短波红外光谱技术对 30 号勘探线的 6 个钻孔开展了蚀变矿物勘查研究。光谱分析显示,钻孔中主要蚀变矿物为含 Al-OH 矿物、Fe-OH 矿物、碳酸盐矿物等 3 类,其中以伊利石、白云母含量为主。统计结果显示,高的 IC 值和 Pos2200 值出现在矿体部位。因此,可以选择 IC 值和绢云母 Pos2200 作为胶东蚀变岩金矿的勘查标识。

3.2 多金属矿

位于胶莱盆地南缘的五莲七宝山地区是山东省重要的铜、铅、锌多金属成矿区域^[50]。七宝山次火山杂岩中发育有金线头铜金矿床、七宝山多金属矿床、钓鱼台硫铁矿矿床。多期次火山岩浆活动与金、银、铜、铅、锌成矿关系密切。为了确定区域深部成矿的潜力,相关研究人员利用短波红外光谱技术在该区开展了地表的蚀变填图工作^[51]。光谱数据显示,七宝山矿区广泛发育伊利石蚀变。矿区东部伊利石 Al-OH 吸收峰位置(Pos2200)较低,IC 值较高,自东向西具有 Pos2200 逐渐降低,IC 值增加的趋势,表明矿区东部可能是热液活动的中心(图 7),也是下步勘查的重点区域。七宝山矿区外围的高家宅科地区分布多个金铅锌多金属矿点,受 NNW 至近 SN 向断裂控制。由于地质工作程度不高,一直未有较大的找矿突破。唐明鹰等^[52]利用 TerraSpec 近红外矿物分析仪,在该区开展了蚀变矿物填图工作。光谱测量显示,蚀变矿物以绢云母族为主。高 IC 值和低 Pos2200 吸收峰值与控矿断裂和绢英岩化蚀变带具有较好的吻合,指示上述位置可能是热液或矿化中心。

3.3 稀土矿

为便于实物地质资料管理和开发利用,山东省 2019 年采购了中国地质调查局南京地质调查中心研制的 CMS350B 高光谱扫描仪。该仪器在传统岩心图像扫描功能基础上,增加了蚀变矿物光谱探测,实现了谱图合一数据采集,可以快速指示热液通道,提供找矿方向。姜腾飞等^[53]利用该仪器首次对郯山稀土矿钻孔岩心进行了短波红外光谱测量。识别出郯山稀土矿区蚀变矿物以蒙脱石、伊利石、碳酸盐矿物、金云母、绿泥石、白云母等为主。蚀变矿物组合分带显示金云母、绿泥石与热液蚀变带对应较好,其含量与矿化品位呈正相关,与矿化关系较为密切。蒙脱石、伊利石、金云母等蚀变矿物光谱特征显示,



1—七宝山矿体;2—露天采坑;3—断层;4—地质界线。

图 7 七宝山矿区伊利石 IC 值分布图^[51]

特征峰位移明显区域与热液蚀变带具有较好的对应关系。Al-OH₂ 200 nm 特征峰位置(Pos2 000)高值区(2 205~2 210 nm)指示热液蚀变区域。IC 值也可以作为指示热液中心的指标。具体表现为:矿体、矿化段 IC 值较低,代表相对较低蚀变温度,IC 值高值区可能位于深部,指示了热液活动中心位于矿区深部,显示矿区深部仍有较大的成矿潜力。

3.4 金刚石

褚志远等^[54]采集了临沂蒙阴西峪金刚石矿床红旗矿区的金伯利岩体及围岩样品,采用美国 Spectral Evolution 公司生产的 OreXplore 光谱仪,对样品进行了短波红外光谱分析,获得了样品的光谱特征和蚀变矿物组分。结果显示,矿区主要蚀变矿物为蛇纹石、蒙脱石、菱铁矿、铁白云石、镁绿泥石、白云母等。样品的蚀变矿物反射光谱曲线在波长 1 391 nm、1 912 nm、2 318 nm、2 393 nm 处出现吸收谷。这些特征为开展金伯利岩找矿相关的遥感蚀变信息提供了波段组合依据。

4 应用展望

近年来,短波红外光谱技术逐渐被应用于斑岩型、夕卡岩型、浅成低温热液矿床的勘查之中。在热液矿床蚀变填图及定位热液矿化中心方面发挥了重要作用,显示出较好的应用前景。结合当前地学发展趋势,未来将会在矿产勘查中发挥更大作用。

4.1 与热红外光谱技术联用,拓展应用领域

与短波红外光谱 (SWIR) 相比,热红外光谱 (TIR,波段介于 6 000~14 000nm 之间)应用较晚。它的工作原理与短波红外光谱相近,对含 SO₄、Si_nO_k、CO₃、PO₄ 等官能团的矿物具有较好的识别效果^[3]。这些矿物主要是短波红外光谱难以有效识别的石英、长石、石榴子石、辉石等中高温矿物。通过短波红外光谱与热红外光谱技术联用,可以扩展光谱矿物成图研究的领域,特别是在夕卡岩型矿床勘查中发挥重要作用^[2]。黄一入^[55]首次利用热红外光谱技术对西藏甲玛多金属矿床的 1 号夕卡岩矿体开展研究,识别出石榴子石、透辉石、硅灰石等典型夕卡岩矿物,开展了矿物分带填图,并建立了夕卡岩型矿床热红外光谱勘查模型。该模型在滇西北红山-红牛夕卡岩矿床开展应用,与地质认识基本一致。显示出该技术在夕卡岩型矿床勘查方面具有较好的应用前景。从山东省来看,齐河-禹城、莱芜等地区夕卡岩型铁矿也可尝试将该技术应用于勘查或研究工作中。

4.2 与遥感技术联用,开展蚀变矿物三维填图

近年来,得益于遥感传感器多样化和遥感数据处理技术的提升,利用遥感技术提取蚀变信息,开展找矿预测,圈定找矿靶区,成为一种重要的勘查方法。利用遥感技术可以快速提取地表的蚀变矿物分布信息,利用短波红外光谱技术可以获取地表、钻孔、巷道等位置的蚀变矿物分布特征。靠近地表的蚀变矿物的短波红外光谱特征,可以对遥感提取的地表蚀变矿物成像遥感光谱特征进行查证。在此基础上,完成星空地一体化三维填图^[56],展现地表水平方向和地下垂向延伸的三维空间蚀变矿物分布组合特征,对开展区域地表找矿和深部成矿预测具有重要指示意义。

4.3 利用大数据、机器学习开展蚀变矿物定量预测

从已发表的论文来看,短波红外光谱的数据多来自于单个矿床的地表或者个别钻孔,数据量少则上百,多则几万。目前,数据量达到百万级别的短波红外光谱数据库极少,导致蚀变矿物的短波红外光谱数据解译多以定性为主。下一步可以通过实施区域性钻孔岩心光谱扫描,整合相对分散的矿床数据,建立巨量数据组成的红外光谱数据库,从而实现基于大数据或者机器学习算法的蚀变矿物定量解译,

建立矿田或成矿区带尺度的蚀变矿物勘查标识体系,应用于矿产预测及勘查。

参考文献:

[1] 申俊峰,李胜荣,杜柏松,等.金矿床的矿物蚀变与矿物标型及其找矿意义[J].矿物岩石地球化学通报,2018,37(2):157-167.

[2] 成嘉伟,刘新星,张娟.红外光谱技术在矿产勘查中的应用[J].光谱学与光谱分析,2024,44(1):15-21.

[3] 代晶晶,赵龙贤,姜琪,等.热红外高光谱技术在地质找矿中的应用综述[J].地质学报,2020,94(8):2520-2533.

[4] 李莎莎,陈华勇,汪礼明.关于建立斑岩型铜矿床勘查标识体系的初步探讨[J].大地构造与成矿学,2019,43(5):991-1009.

[5] 毛星星,彭惠娟,张云龙,等.绢云母短波红外光谱特征及其在矿产勘查中的应用[J].矿床地质,2023,42(3):646-659.

[6] 田丰,冷成彪,张兴春,等.短波红外光谱技术在矿床勘查中的应用[J].矿物岩石地球化学通报,2019,38(3):634-642.

[7] 修连存,郑志忠,俞正奎,等.近红外光谱仪测定岩石中蚀变矿物方法研究[J].岩矿测试,2009,28(6):519-523.

[8] 燕守勋,武晓波,周朝宪,等.遥感和光谱地质进展及其对矿产勘查的实践应用[J].地球科学进展,2011,26(1):13-29.

[9] THOMPSON A J B,HAUFF P L,ROBITAILLE A J. Alteration Mapping in Exploration: Application of Short - Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy[J]. SEG Discovery,1999(39):1-27.

[10] 陈华勇.对我国矿床学未来发展方向的思考[J].地学前缘,2020,27(2):99-105.

[11] 陈华勇,张宇,张世涛,等.蚀变矿物勘查方法理论与应用:现状与前景[J/OL].大地构造与成矿学:1-14. DOI: 10.16539/j. ddgzyckx. 2024. 01. 182.

[12] 陈华勇,肖兵,张世涛.蚀变矿物勘查标识体系[M].北京:科学出版社,2021.

[13] HUNT G R,Ashley R P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared[J]. Economic Geology,1979,74(7):1613-1629.

[14] HUNT G R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared[J]. Geophysics,1977,42(3):501-513.

[15] 连长云,章革,元春华.短波红外光谱矿物测量技术在普朗斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用[J].矿床地质,2005,24(6):621-637.

[16] 连长云,章革,元春华,等.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,2005,32(3):483-495.

[17] 杨志明,侯增谦,杨竹森,等.短波红外光谱技术在浅剥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,2012,31(4):699-717.

[18] 田成华,杨立强,和文言,等.西藏玉龙斑岩铜矿床绢云母族蚀变矿物短波红外光谱特征及对勘查的指示意义[J].沉积与特

- 提斯地质, 2022, 42(1): 40–49.
- [19] 成嘉伟, 刘新星, 张娟, 等. 基于红外光谱技术的西藏多不杂斑岩型 Cu–Au 矿床蚀变及矿化特征研究: 以钻孔 ZK3112 为例[J]. 地质与勘探, 2023, 59(2): 259–270.
- [20] 赵龙贤, 代晶晶, 林彬, 等. 西藏甲玛 3000m 深钻蚀变矿物短波-热红外光谱特征[J]. 地质学报, 2023, 97(4): 1342–1359.
- [21] LENG C B, WANG D Z, YU H J, et al. 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, 2024, 59(4): 699–716.
- [22] 郭东旭, 刘晓, 张海兰, 等. 基于红外光谱技术研究云南普朗斑岩铜矿的蚀变和矿化特征[J]. 岩矿测试, 2021, 40(5): 698–709.
- [23] 赖晓丹, 张锦章, 李晶, 等. 基于短波红外光谱技术的蚀变矿物大数据定量预测方法探索: 以福建上杭县紫金山金铜矿床为例[J]. 矿床地质, 2023, 42(1): 55–65.
- [24] 许超, 陈华勇, WHITE N, 等. 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, 2017, 36(5): 1013–1038.
- [25] 吕翼辉, 张世涛, 高剑峰, 等. 热红外光谱特征和磁化率在矽卡岩型矿床找矿勘查中的应用: 以鄂东南铜绿山铜金铁矿床为例[J]. 地球化学, 2025, 54(1): 141–158.
- [26] 张世涛, 陈华勇, 张小波, 等. 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, 2017, 36(6): 1263–1288.
- [27] ZHANG S, CHU G, CHENG J, et al. Short wavelength infrared (SWIR) spectroscopy of phyllosilicate minerals from the Tonglushan Cu–Au–Fe deposit, Eastern China: New exploration indicators for concealed skarn orebodies[J]. Ore Geology Reviews, 2020: 122.
- [28] ZHANG S, XIAO B, LONG X, et al. Chlorite as an exploration indicator for concealed skarn mineralization: Perspective from the Tonglushan Cu–Au–Fe skarn deposit, Eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 2020(126): 103778.
- [29] CHU G, ZHANG S, ZHANG X, et al. Chlorite chemistry of Tongshankou porphyry-related Cu–Mo–W skarn deposit, Eastern China: Implications for hydrothermal fluid evolution and exploration vectoring to concealed orebodies[J]. Ore Geology Reviews, 2020(122): 103531.
- [30] FENG Y, CHEN H, XIAO B, et al. Late Mesozoic magmatism at Xiaokelehe CuMo deposit in Great Xingan Range, NE China: Geodynamic and metallogenic implications[J]. Lithos, 2020(374/375): 105713.
- [31] WANG L, PERCIVAL J B, HEDENQUIST J W, et al. Alteration Mineralogy of the Zhengguang Epithermal Au–Zn Deposit, Northeast China: Interpretation of Shortwave Infrared Analyses During Mineral Exploration and Assessment[J]. Economic Geology, 2021, 116(2): 389–406.
- [32] 熊燕云, 李兵, 陈静, 等. 斑岩铜矿围岩蚀变绿帘石的光谱特征: 以德兴铜矿富家坞矿区为例[J]. 岩石学报, 2019, 35(12): 3811–3824.
- [33] 成嘉伟, 刘新星, 张娟, 等. 河北邯邢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, 2023, 48(4): 1551–1567.
- [34] 郭娜, 黄一入, 郑龙, 等. 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[J]. 地球学报, 2017, 38(5): 767–778.
- [35] 唐楠, 林彬, 李玉彬, 等. 短波红外光谱技术在斑岩-高硫化型浅成低温热液矿床中的应用: 以西藏铁格隆南超大型铜(金)矿床为例[J]. 地质学报, 2021, 95(8): 2613–2627.
- [36] JONES S, HERRMANN W, GEMMELL J B. 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, 2005, 100(2): 273–294.
- [37] HERRMANN W, BLAKE M, DOYLE M, et al. 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, 2001, 96(5): 939–955.
- [38] 王艳丽, 许虹, 韩剑. PIMA 在地质中的应用研究[J]. 地质找矿论丛, 2009, 24(1): 77–82.
- [39] LI X, ZHOU T, FAN Y, et al. Geology and exploration indications of the lithocap in Qianpu area, Luzong Basin, Anhui[J]. Ore Geology Reviews, 2024(164): 105811.
- [40] CHANG Z, HEDENQUIST J W, WHITE N C, et al. Exploration Tools for Linked Porphyry and Epithermal Deposits: Example from the Mankayan Intrusion–Centered Cu–Au District, Luzon, Philippines[J]. Economic Geology, 2011, 106(8): 1365–1398.
- [41] 冷成彪, 陈喜连, 张静静, 等. 斑岩型 Cu±Mo±Au 矿床的勘查标志: 岩石化学和矿物化学指标[J]. 地质学报, 2020, 94(11): 3189–3212.
- [42] THOMPSON A J B, HAUFF P L, ROBITAILLE A J. Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy[J]. Econ. geol. newsl, 1999: 30.
- [43] 杜斌, 董涛, 董红国, 等. 蚀变矿物填图技术在斑岩型铜矿找矿勘查中的应用: 以滇西北香格里拉松诺矿床为例[J]. 地质与勘探, 2021, 57(4): 879–894.
- [44] FENG Y, XIAO B, LI R, et al. Alteration mapping with short wavelength infrared (SWIR) spectroscopy on Xiaokelehe porphyry Cu–Mo deposit in the Great Xingan Range, NE China: Metallogenic and exploration implications[J]. Ore Geology Reviews, 2019(112): 103062.
- [45] CHANG Z, YANG Z. Evaluation of inter-instrument variations among Short Wavelength Infra-Red (SWIR) devices[J]. Economic Geology, 2012, 107(7): 1479–1488.

[46]

CLARK R N,SWAYZE G A,LIVO K E,et al. Imaging spectroscopy:Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2003(24):108.

[47]

赵利青,邓军,原海涛,等. 台上金矿床蚀变带短波红外光谱研究[J]. 地质与勘探,2008,44(5):58-63.

[48]

邵雪维,彭永明,王功文,等. 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,2021,28(3):236-251.

[49]

李健,宋明春,王昌伟,等. 胶东三山岛断裂带金矿床蚀变矿物勘查标识[J]. 黄金科学技术,2024,32(5):749-767.

[50]

LIU L, CHEN J, LI X, et al. Short wavelength infrared (SWIR) reflectance spectroscopy of alteration minerals of Qibaoshan ore district, Shandong Province, China[J]. Ore Geology Reviews,2024(165):105868.

[51]

王欣,陈建,李大鹏,等. 山东五莲七宝山地区多金属矿体三维模型预测与评价[J]. 山东国土资源,2022,38(6):10-15.

[52]

唐名鹰,陈建,邹占春,等. 胶莱盆地南缘高家宅科地区短波红外光谱特征及金多金属矿勘查指示意义[J]. 山东国土资源,2023,39(5):17-26.

[53]

姜腾飞,支成龙,安茂国,等. 基于高光谱岩心扫描的蚀变矿物光谱特征分带及其在找矿勘查中的应用;以山东省郯山稀土矿为例[J]. 山东国土资源,2023,39(3):110-118.

[54]

褚志远,温殿刚,吕青,等. 山东蒙阴地区金刚石遥感找矿模型的构建与应用[J]. 地球科学与环境学报,2024,46(2):240-251.

[55]

黄一入. 矽卡岩矿物的热红外光谱特征研究及其勘查模型[D]. 四川:成都理工大学,2021.

[56]

黄一入,郭娜,郑龙,等. 基于遥感短波红外技术的三维蚀变填图:以低硫化浅成低温热液型矿床斯弄多为例[J]. 地球学报,2017,38(5):779-789.

Application and Prospect of Short Wave Infrared Spectroscopy Technology in Mineral Exploration in Shandong Province

ZHANG Chao^{1,2}, YU Xuefeng², LI Dapeng¹, ZHANG Yan¹, LIU Qiang¹, LIU Lanhai¹, LI Xin¹, LI Xinwei¹, NIU Zhili¹, LIU Weidong³

(1. Shandong Institute of Geological Sciences, Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Natural Resources, Key Laboratory of Metallogenic Geological Processes and Resources Utilization in Shandong Province, Shandong Jínan 250013, China; 2. Earth Science and Engineering College of Shandong University of Science and Technology ,Shandong Qingdao 266590, China;3. Shandong Zhengyuan Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Shandong Jínan 250000, China)

Abstract: Under the new situation of mineral exploration expanding to the covered area and deep, the short wave infrared spectroscopy (SWIR) technology has become key technical means to improve the prospecting efficiency with its advantages of rapid and accurate identification of altered minerals. In this paper, the principle of SWIR technology, common equipment and data processing software have been briefly introduced, and application of short wave infrared spectroscopy technology in the field of mineral exploration has been expounded. The SWIR exploration examples of gold, polymetallic, rare earth and diamond deposits in Shandong province have been listed. It is confirmed that this technology has significant advantages in the zoning of altered minerals, tracing hydrothermal mineralization centers, and the establishment of exploration identification system. It will provide important reference information for mineral exploration and show broad application prospects. In line with the development trends of geological exploration, the SWIR technology is expected to advance in three key directions in the future. Firstly, integration with thermal infrared spectroscopy technology to expand application domains; secondly, combination with remote sensing technology to achieve three-dimensional alteration mineral mapping; and thirdly, utilization of big data and machine learning for quantitative prediction of alteration minerals.

Key words: Short wave infrared spectroscopy; mineral exploration; altered minerals; Shandong province