

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2019.04.006

引用格式:周延,修连存,杨凯,等. 红外光谱矿物填图技术及其应用[J]. 华东地质, 2019, 40(4): 289-298.

红外光谱矿物填图技术及其应用

周延¹, 修连存¹, 杨凯², 张红亮², 陈世忠¹, 范飞鹏¹, 郑志忠¹

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016; 2. 中科遥感科技集团有限公司, 天津 300384)

摘要: 红外光谱可有效识别与成矿有关的中低温指示矿物, 在野外利用红外光谱仪器开展矿物填图是目前国内外找矿勘查工作中广泛应用的一项高新技术, 具有采样密度高、数据量大、效率高、成本低等优势。文章重点介绍了国内外红外光谱仪器研发历史及现状, 以及近年来运用国产 CMS350A 型全自动数字化岩芯扫描仪开展的矿物填图范例, 较全面地展示矿物填图技术及其应用效果。红外光谱矿物填图技术基于海量数据客观勾绘矿化蚀变特征, 精准识别具有重要找矿意义的蚀变矿物, 获取矿物离子交换信息并反演热液流体性质, 为区域找矿潜力评价及下一步找矿部署提供指导。红外光谱矿物填图技术的发展方向为工作波段向热红外扩展、设备小型化、提高光谱分辨率及拓展应用领域。

关键词: 红外光谱; 仪器研发; 矿物填图技术; 成果应用

中图分类号: P575.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2019)04-289-10

红外光谱探测技术在可见—短波红外谱段范围内, 可用于岩石低温热液矿物和油气成分检测, 原理是矿物晶格中原子间化学键的弯曲、伸缩或电子跃迁吸收某一区域的红外光谱, 形成特征吸收峰, 不同的矿物具有不同的特征光谱, 据此可区分岩石中的不同矿物。红外光谱探测技术在地质科学研究和生产实践方面获得了广泛应用, 可识别的矿物主要有铁氧化物、含羟基的层状硅酸盐矿物、碳酸盐矿物及硫酸盐矿物等近 100 余种^[1-3], 这些矿物大部分与成矿作用密切相关, 对圈定矿化蚀变带、判断成矿类型和指导成矿预测具有重要作用^[4-7]。

红外光谱矿物填图技术具有采样密度高、数据量大、效率高、成本低等优势, 是一种重要的绿色地质调查技术方法。红外光谱矿物填图可准确识别矿物种类、半定量分析矿物化学成分, 区分肉眼无法识别的矿物及其成分的细微变化。某些矿物存在大量的离子置换(如矿物中镁离子被二价铁离子置换, 铝离子被镁离子置换), 这些变化往往是成矿

流体温压条件、酸碱度变化、氧化-还原电位变化等的具体表现。研究矿物成分的细微变化, 可精确地进行成矿过程研究和成矿预测。通过对海量数据进行集成分析, 可更加客观地划分蚀变带, 推断热液性质, 避免了散点式采样的主观性。目前, 国内关于红外光谱填图仪器的研发、性能、获取数据的质量以及应用效果鲜有报道。本文通过介绍国内外红外光谱仪器研发历史及现状, 以及近年来运用国产 CMS350A 型全自动数字化岩芯扫描仪开展的矿物填图示范工作, 展示矿物填图技术及其应用效果, 便于同行深入地了解该项技术, 推进矿物填图方法进入地质调查主流程, 促进红外光谱仪器研发产业化和地质调查技术方法创新的同步发展。

1 红外光谱仪器研发历史及现状

1.1 国外概况

短波红外光谱技术作为一种经济高效的矿物

* 收稿日期: 2018-09-04 修订日期: 2019-02-20 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 中国地质调查局“武夷山成矿带龙泉—上杭地区地质矿产调查(编号: DD20160037)”和国家重大科学仪器设备开发专项“岩芯光谱扫描仪研发与产业化(编号: 2012YQ050250)”项目联合资助。

第一作者简介: 周延, 1984 年生, 男, 高级工程师, 主要从事矿产勘查及光谱对地探测技术应用研究。

鉴定手段,最早在西方矿业勘探和采矿阶段获得广泛应用。早期测量短波红外光谱的便携式仪器主要有澳大利亚 Integrated Spectronics Pty. Ltd 公司生产的便携式短波红外矿物分析仪 (Portable Infrared Mineral Analyzer) (简称 PIMA)^[8] 和美国 Analytical Spectral Devices, Inc. 公司生产的 Terra-Spec 系列光谱分析仪^[9]。20 世纪 90 年代以来, PIMA 已广泛应用于矿产勘查领域,特别是澳大利亚、美国、加拿大、南非和智利许多矿业公司已将 PIMA 作为一种常用的勘查技术手段。2003 年,澳大利亚联邦科工研发了 HyLogger 系列岩芯扫描仪对岩芯进行光谱测试,同时开发了配套的光谱矿物分析软件 TSG(The Spectral Geologist),该软件是矿物、岩石、土壤、岩芯以及切片等地质样品波谱分析的行业标准软件。

近年来,国际上红外光谱技术在地质行业的应用发展迅速,出现了澳洲 CoreScan 公司的 HCI 系列岩芯扫描仪、挪威 Specim 公司的 HiScan 岩芯成像扫描仪、加拿大 INRS 公司的 MSCL 岩芯多源探测仪、加拿大 Photonic Knowledge 公司的 Core Mapper 岩芯扫描仪等。在光谱岩矿应用领域,也出现了一批为矿业界提供技术服务的咨询公司,如澳洲的 Mineral Mapping、Huntington Hyperspectral、CoreScan 及 HYKS Consulting 等。



1.2 国内概况

国内最早的红外光谱探测仪是由中国地质调查局南京地质调查中心研发的国产仪器 PNIRS^[10], 目前又成功研发了机载成像光谱仪、地面便携式地物波谱仪和地下岩芯扫描仪,构成了光谱对地立体探测技术手段。此外,国内市场还没有出现其他专门针对地质行业研发的红外光谱仪器。国内在红外光谱地质应用方面还处于起步阶段,主要依靠进口 PIMA 仪和国产 PNIRS 仪开展少量相关研究工作,其应用深度和广度远落后于澳大利亚等矿业发达国家。

1.2.1 便携式波谱仪

近年来,中国地质调查局南京地质调查中心成功研制了 CSD350A 型宽谱段地物波谱仪(图 1)和 BJKF-IV 型便携式近红外矿物分析仪。CSD350A 型宽谱段地物波谱仪采用光纤传输,分光系统单块光栅,实现了宽谱段分光;采用 3 个线阵探测器立体交错拼接,实现了宽谱段探测。BJKF-IV 型便携式近红外矿物分析仪采用 T 型分光结构和积分球探测技术,是专门针对蚀变矿物的测量仪器。这两种仪器整体结构紧凑,体积小,重量轻,可便携,适合野外光谱测量,在国内应用最为广泛,达到了国际先进水平^[11-14]。

指标	参数
光谱范围	350~500 nm
光谱扫描分辨率	全谱优于7 nm
波长重复性	优于1 nm
信噪比	优于2 500 : 1
测量速度	< 20 次/s
仪器重量	< 3.5 kg
仪器功耗	20 W
电源	内置锂电池

图 1 CSD350A 型宽谱段地物波谱仪及相关参数

Fig. 1 CSD350A wide spectrum mass spectrometer and related parameters

1.2.2 岩芯扫描仪

2012 年,由中国地质调查局南京地质调查中心启动了国家仪器重大专项“岩芯光谱扫描仪研发与产业化”项目,针对国际高光谱遥感地质发展方向,面向我国深部找矿、资源勘查等战略需求,成功研

发了具有自主知识产权的岩芯光谱扫描仪,包括 CMS350A 型和 CMS350B 型全自动数字化岩芯扫描仪(图 2),集成了 ASD 反射光谱仪、高像素数码相机、光源和岩芯盘机械传送台,整个系统由软件控制,实现自动光谱采样。ASD 光谱仪的有效波长

范围是 350~2 500 nm,采用国际标准 Spectralon 白板作为反射率基准。单个岩芯光谱测点的积分时间设为 0.1 s,沿岩芯长度方向测点间隔 5 cm^[15]。



作为自主研发的仪器,不仅节省了引进费用,而且通过实际应用显著改进了其稳定性、可靠性和测量精度。

指 标	参 数
光谱范围	350~2 500 nm
光谱分辨率	< 6 nm
扫描分辨率	1 mm
定位精度	优于0.1 mm
最大扫描速度	200 mm/s
平台尺寸	长1.5 m, 宽1.5 m
平台有效移动距离	X: 1.2 m; Y: 1.2 m
有效载荷	样品台300 kg; 移动台100 kg
采样间隔	5 cm

图 2 CMS350B 型全自动数字化岩芯扫描仪及相关参数

Fig. 2 CMS350B automatic digital core scanner and related parameters

1. 2. 3 机载高光谱成像仪

在成功研制便携式波谱仪和岩芯扫描仪的基础上,中国地质调查局南京地质调查中心又成功研制了 HySpecMap 机载高光谱成像仪(图 3),构建了高光谱遥感对地立体探测系统。HySpecMap 机载高光谱成像仪采用大视场小 F 数设计,可实现大面积高光谱遥感探测。光谱范围为 400~2 500 nm,光谱分辨率优于 10 nm,可区分波段 192 个。仪器

采用一体化设计思路,光学系统、谱仪系统、电子学系统和惯导系统集成在主机内,存储和控制系统集成在计算机内,便于运输和安装,具有体积小、重量轻、成本低和成像数据质量高等特点。

2014 年以来,HySpecMap 机载高光谱成像仪已在新疆哈密、甘南、苏北和苏南等地区多次试飞,获取了大量数据,验证了国产机载高光谱成像仪的性能及稳定性。



指 标	参 数
光谱范围	400~2 500 nm
光谱分辨率	< 10 nm
光机扫描速度	0~20 行/s
传感器瞬时视场	1.5 毫弧度
可区分波段	192 个
视场角	60°
F数	1.5
仪器重量	70 kg

图 3 HySpecMap 机载高光谱成像仪及相关参数

Fig. 3 HySpecMap airborne hyperspectral imager and related parameters

2 红外光谱矿物填图技术应用实例

自2002年首次引进PIMA开始,我国陆续开展了新疆土屋、云南普朗、西藏曲龙斑岩型铜矿、西藏帕南铜钼钨矿的光谱矿物填图工作。2011—2017年,借助ASD光谱分析仪、BJKF-I型便携式近红外矿物分析仪,对西藏铁格隆南和斯弄多斑岩-浅成低温热液矿床开展了矿物填图工作,均取得了较好的效果^[16-21]。近年来,南京地质调查中心运用国产CMS350A型全自动数字化岩芯扫描仪在闽北政和东际金矿区和狮子岗铜矿区、安徽茶亭铜金矿区、福建上杭紫金山铜金矿区开展了一系列红外光谱矿物填图技术试点工作,取得了良好的示范效果^[22-24]。

2.1 基于矿物填图大数据,精准识别蚀变矿物及蚀变特征

光谱矿物填图具有采样密度高、数据量大等特征,基于海量蚀变矿物数据,可客观反映研究区矿化蚀变信息。

(1)在闽北政和东际金矿区,选择3个勘探剖面的32个钻孔,完成岩芯扫描5 168 m,获取103 300多个光谱数据,精准提取了绢云母、绿泥石、绿帘石、叶蜡石、高岭石、蒙脱石、碳酸盐和硫酸盐矿物。分析结果表明,热液蚀变矿物以绢云母化和绿泥石化为主,伊利石是绢云母类矿物的主要成分,蚀变矿物组合及其分带主要受原岩成分控制。结合勘查资料,查明金银矿化赋存在以伊利石为主的绢云母化带中,成矿环境属于低硫型浅成低温热液系统^[22]。

(2)在闽北政和狮子岗铜矿区,开展地表矿物填图20 km²,岩芯扫描3个钻孔,完成岩芯扫描1 302 m,获取30 000多个光谱数据,提取15种蚀变矿物,分别为赤铁矿+褐铁矿、明矾石、绢云母、贫铝绢云母、富铝绢云母、高岭石、蒙脱石、伊利石、绿帘石、绿泥石、石膏、方解石、角闪石、黄钾铁矾和电气石。分析结果表明,钻孔岩芯蚀变矿物以绿帘石、绿泥石和碳酸盐矿物为主,是典型的青磐岩化指示矿物(图4),绢云母化和泥化主要位于钻孔浅部,圈定了2个热液蚀变中心^[23],为成矿系统研究及找矿勘探提供了重要线索。

(3)在安徽宣城茶亭铜金矿区,完成了8 889 m岩芯扫描工作,获得177 700多个光谱数据,提取了

绢云母、蒙脱石、高岭石、地开石、绿泥石、绿帘石、石膏、碳酸盐、铁氧化物、皂石、葡萄石等11种矿物信息,识别出不同结晶度的高岭石类矿物(高岭石和地开石)。地开石的出现可能预示岩体外围局部存在更酸性的明矾石-地开石组合,指示该区可能存在高硫型金矿化。结合矿产勘查资料,查明金、铜品位与绢云母波长呈正相关,说明金属元素更易在酸性条件下富集沉淀。以上认识为茶亭铜金矿区确定下一步找矿勘查方向提供了可靠信息。

(4)在福建上杭紫金山铜金矿区,累计完成超过150 000 m岩芯光谱测试,提取了明矾石、地开石、叶蜡石、高岭石、绢云母、伊利石等与成矿密切相关的蚀变矿物,由浅至深划分出明矾石-地开石化带、高岭石-地开石-云母化带和叶蜡石-明矾石化带3个高级泥化蚀变带,提出铜矿主矿体主要位于高级泥化蚀变带底部叶蜡石-明矾石化带的认识。在罗卜岭斑岩铜钼矿浅部识别出高级泥化蚀变带,该带不仅与浅部蓝辉铜矿矿体具有密切的成因联系,且与深部隐伏斑岩矿体具有较好的空间对应关系,是重要的蚀变找矿标志^[24],为确定深部找矿方向提供了重要依据。

2.2 获取矿物离子交换信息,建立找矿标志,支撑重大找矿突破

红外光谱矿物填图技术不仅可准确厘定肉眼无法识别的热液矿物,且可定量分析矿物成分的细微变化,揭示成矿流体的温压条件、酸碱度及氧化-还原电位变化等,反演成矿流体的性质和运移方向。

(1)在闽北政和县东际金矿,识别出短波和长波2组绢云母,并查明了它们的找矿指示作用。绢云母八面体Al含量(Al/Si值)与Al-OH吸收波长呈线性负相关^[25],浅成环境中的绢云母八面体Al含量最主要的控制因素是温度和热液酸碱度^[26]。东际金矿的短波绢云母Al-OH波长接近正态分布,波长区间为2 201~2 205 nm,峰值为2 203 nm;长波绢云母发育程度远不如短波绢云母,波长区间为2 203~2 208 nm(少数达2 210 nm),峰值为2 205~2 206 nm,二者与硫化物(以及金)的空间关系具有明显差别。短波绢云母是热液作用形成的主要蚀变产物,与金矿化的空间共生关系密切(图5)。通过矿物填图并结合矿区勘查资料,确定了以短波绢云母为特征矿物的找矿标志,推断成矿流体沿晚中生代南园组凝灰岩层内2~3条流体主通道

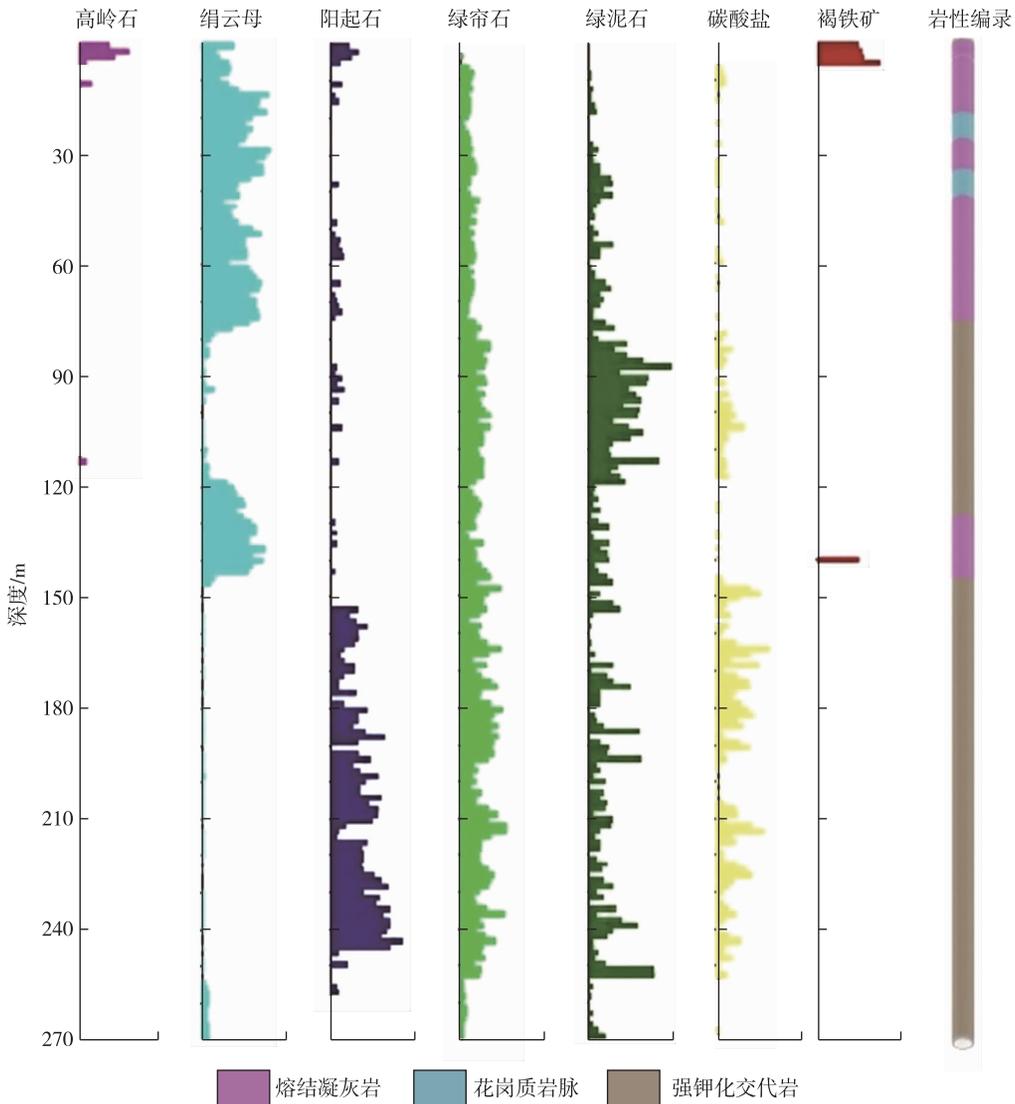


图 4 闽北政和狮子岗 ZK701 蚀变矿物分布与岩性对照图

Fig. 4 Comparison of distribution and lithology of altered minerals in the Shizigang ZK701 in North Fujian

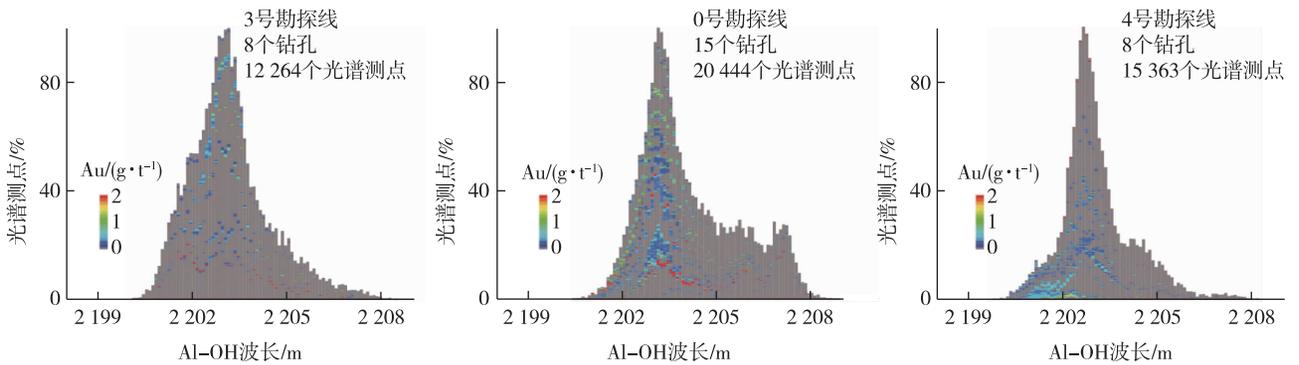


图 5 东际金矿绢云母 Al-OH 谱带波长频度分布图^[22]

Fig. 5 Histograms showing distribution of Al-OH band wavelengths of sericite from the Dongji gold deposit

侧向流动,金、银矿化发育在主通道内^[22]。根据光谱矿物填图成果,东际金矿在其他短波绢云母蚀变部位新发现了金矿(化)体。

(2)在闽北政和县狮子岗铜多金属矿区,岩芯扫描结果表明,青磐岩化(镁绿泥石、绿帘石、白云母、方解石)与铜矿化关系密切,其中镁绿泥石和铜矿化呈明显的正消长关系,可作为铜多金属矿找矿的指示性蚀变矿物。蚀变矿物组合特征指示狮子岗铜多金属矿区具有斑岩型矿床的蚀变分带特征,大规模钾化、青磐岩化和铜多金属矿化反映了区域长期存在大规模和高强度的流体交代活动,具有较好的找矿前景^[23]。

(3)福建上杭紫金山铜金矿区的岩芯扫描结果表明,与斑岩铜钼矿体密切相关的贫铝绢云母和伊利石的 Al-OH 波长 $>2\ 205\ \text{nm}$,以具有该光谱特征的贫铝绢云母作为找矿标志,且发现了肉眼难识别的低品位矿体。研究表明,明矾石中的 K 可以被 Na 类质同象替代,这一矿物化学变化在红外光谱中反映为 $1\ 480\ \text{nm}$ 特征峰中心波长随 Na 含量升高向长波方向移动。在一些高硫-斑岩型矿床中,距离热液来源的侵入体越近,明矾石的 $1\ 480\ \text{nm}$ 峰波长越大,明矾石的光谱特征可作为指示斑岩侵入中心位置的工具体之一^[3,8,27]。基于海量数据,系统分析了紫金山铜金矿明矾石的光谱特征,反演了成矿热液来源及运移路径,推测了热液活动中心 and 隐伏侵入体的位置。利用构建的蚀变模型与原生晕模型,结合深部成矿预测,为老矿山就矿找矿、深部找矿预测、矿田三维建模提供了技术支持^[24]。

福建省位于东南沿海大面积晚中生代陆相火山岩区,具备形成浅成低温热液型-斑岩型铜金矿床二元成矿系统的优越地质条件。典型的斑岩型矿床成矿模式中,由内向外可出现斑岩型、高硫型浅成低温热液型、低硫型浅成低温热液型的蚀变分带。上述光谱矿物立体填图成果揭示,闽北和闽西南地区存在深部斑岩型金铜矿床的良好找矿前景,为今后东南沿海火山岩区铜金矿找矿突破提供了有效的技术手段。

3 构建红外光谱矿物填图技术方法体系

红外光谱矿物填图技术方法体系包含 3 个方面:一是光谱遥感技术,利用卫星、飞机、无人机搭载多光谱、高光谱成像仪及微型成像高光谱仪对地

面进行遥感地质调查,提取地面矿物信息;二是地表光谱矿物填图技术,利用小型便携式近红外矿物分析仪在地表开展矿物填图,获取地表岩(矿)石的矿物信息;三是岩芯扫描技术,利用岩芯扫描仪对钻孔岩芯进行光谱扫描,获取地下岩(矿)石的矿物信息。

光谱遥感技术适用于大尺度区域成矿预测及异常区圈定,主要依赖于光谱数据质量的提高。目前,已从多光谱遥感发展到高光谱遥感,在可见光-远红外波段范围可获取上百个窄光谱波段信息,获取的矿物信息越来越多。目前该技术较为完善,从数据校准到矿物信息提取及解译均形成了较成熟的技术规范要求。根据地表矿物填图和岩芯扫描技术在上述找矿勘查中的实际应用,对这两种技术方法进行初步总结。

3.1 地表光谱矿物填图技术

该方法适用于 1:5 万面积性调查及更大尺度的矿产检查、异常查证及靶区筛选,可查明工作区地表蚀变矿物种类及类型,圈定蚀变分带,通过综合分析可有效缩小找矿靶区。

在开展工作前,采集少量样品判断工作区的主要蚀变类型。地表采样样品为新鲜的基岩露头,矿物填图的采样线距一般 $<300\ \text{m}$,点距一般 $<50\ \text{m}$,每个点采集 3~4 块岩石样品,在岩性变化大、蚀变强的区段,采样密度适度增加。野外统一记录采样点坐标、岩石名称及蚀变特征,并在采样原位拍照保存。采集的样品经过晾晒、表面清理,在保证岩石表面干燥清洁的情况下,利用光谱仪进行光谱测定,针对每块岩石样品不同面采集 2~4 条光谱曲线,取平均值作为该岩石样品的特征曲线。

3.2 岩芯扫描技术

该方法具有成本低、效率高、可实现大规模高密度采样的特点,能满足地质调查和现代矿业对岩矿大数据的需求。适用于典型矿床研究、矿床-矿田-矿集区深部蚀变特征研究及矿产品选冶等环节,可快速获取大量深部矿物信息。基于大数据形成全面揭示成矿过程的矿化蚀变资料,为找矿预测奠定基础。

该方法采用岩芯扫描仪直接对钻孔岩芯进行光谱数据采集,间隔为 $5\ \text{cm}$ 。数据采集包括 4 个环节:岩芯清洗与晾干;岩芯箱按井号与深度进行排序整理;ASD 光源和相机光源的最佳角度调试;岩

芯光谱数据的扫描采集。该过程需要做好深度、岩性记录和岩芯拍照,收集钻孔编录和样品分析资料。

3.3 数据处理与解译

数据处理与解译是红外光谱矿物填图的核心,需有效结合地质矿产信息开展数据综合解译。采用光谱矿物分析软件 TSG 直接从光谱吸收和反射特征提取矿物信息,该方法基于矿物光谱反应的物理机理事实证明合理可行性^[28-30]。数据处理与解译包括以下五方面。

(1) 光谱数据预处理。利用光谱求导、比值、去包络线等手段,增强光谱特征的差异对比性。

(2) 矿物光谱特征提取和矿物识别。以矿物标准波谱库为参考,依据蚀变矿物类型的可诊断吸收光谱特征,识别并建立可诊断光谱识别标志,主要包括吸收峰波长位置、吸收峰深度、吸收对称性和完全波形特征参数等,利用这些参数进行光谱形状匹配,输出最优匹配结果。

(3) 掩膜处理。针对不同矿物之间的光谱反应,在给定波长区间内叠加的现象进行掩膜处理,避免某些矿物的吸收谱带因其他矿物吸收而被掩盖相关信息。

(4) 矿物相对含量标定。矿物的识别基于标准图谱,矿物的含量以光谱数据标准化后的特征吸收强度为量化指标。标准化后每个波长位置的光谱数据为 0~1。

(5) 综合研究解译。根据光谱数据提取的矿物信息进行蚀变矿物时空分布规律研究,获取有关热液成矿系统的矿物组合空间分带,确定热液作用演化过程和热液流向,判断成矿环境及矿床成因类型,建立具有判别意义的找矿蚀变标志。

上述试点示范应用工作表明,以上采样密度及工作方法可行且有效,为今后制定相关技术标准、推进矿物填图方法进入地质调查主流程奠定了基础。

4 红外光谱矿物填图技术发展方向

基于红外光谱矿物填图技术在地质应用方面的优越性,国内外矿产勘查和矿业市场对该技术越来越关注,带动了红外光谱探测设备和技术方法的不断更新和进步。今后,该技术的发展方向主要有以下几方面。

4.1 工作波段从近红外扩展到热(远)红外

近红外波段识别含水蚀变矿物具有优势,但不能很好地识别主要造岩矿物和高温蚀变矿物,这是由矿物本身性质所决定的,但造岩矿物和高温蚀变矿物的热红外反射波谱具较好的识别特征。因此,澳大利亚联邦科工已将视线瞄准了热红外光谱仪器和技术方法的研发,国内也有学者尝试利用高光谱热红外遥感技术提取并区分地表小规模石英脉和硅化带^[31]。

4.2 设备小型化

为适应野外地质工作,仪器设备研发向更轻、更小、更便携的方向发展。野外地质工作地点不固定、场地有限,在保证数据质量的前提下,要尽可能压缩仪器体积和重量,发挥该方法高效、快捷的特征。

4.3 提高光谱分辨率

光谱分辨率为探测光谱辐射能量的小波长间隔,是衡量光谱探测能力最重要的指标。光谱分得越细,波段越多,光谱分辨率越高。红外探测系统从单波段光谱、多光谱向高光谱发展,对矿物或地物特征进行更加精细的识别。

4.4 地面、无人机、航空、星载多维度立体填图

星载和航空是利用卫星和飞机搭载遥感器对地面进行遥感,提取地面矿物信息,利用小型便携式近红外矿物分析仪和岩芯扫描仪对地面及钻孔岩石样品进行测试,提供精确的矿物信息。从星载光谱遥感到地面及地下(钻孔)光谱填图构成对地立体探测系统,极大提高野外地质工作效率。

4.5 应用多元化

(1) 从找矿勘探扩展到采矿、选矿和冶金,如利用近红外光谱可测定硅灰石矿、铝土矿的主要成分^[32-33],通过系统的数据分析与建模可极大优化选矿工艺,节约成本。

(2) 从地质找矿领域扩展到土地质量、环境地质、海岸带地质、油气地质调查等领域,如近红外光谱技术不仅能分析土壤有机成分,还可分析土壤矿物质成分,预测土壤性质(质地和 pH 值等),逐渐成为土壤定位管理和数字土壤信息中海量数据获取的重要技术^[34]。

(3) 近些年,在线近红外光谱测试技术在汽油、

柴油调合管道自动工艺中成为必选的一种分析手段^[35],可快速预测单种类原油和混兑原油的基本性质数据,以及馏分油的关键性质数据^[36]。

5 结 论

(1)国产红外光谱仪器研发取得重大突破,中国地质调查局南京地质调查中心成功研发了具有自主知识产权的系列红外光谱仪器,仪器性能和数据质量达到国际先进水平,打破了国外在该领域的技术垄断并成功实现产业化,可取代国内国际市场上同类进口设备,大大降低了应用成本。

(2)红外光谱矿物填图技术在精准获取矿物信息、确定矿化蚀变类型、分析成矿热液迁移规律、开展成矿预测等方面发挥关键作用,构建了光谱遥感技术、地表矿物填图技术、岩芯扫描技术三位一体的立体矿物填图技术方法体系。

(3)红外光谱矿物填图技术的发展方向包括设备研发水平的提高及应用的多元化,从找矿勘探向采矿、选矿和冶金方面拓展;从地质找矿领域向土地质量、环境地质、油气地质调查拓展。

致谢:在红外光谱矿物填图技术推广应用过程中,得到了紫金矿业集团股份有限公司、安徽省自然资源厅地质勘查基金管理中心、安徽省地质矿产勘查局322地质队、福建省政和县源鑫矿业公司和福建省双旗山矿业有限责任公司的大力支持,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] HAUFF P, COCKS T. Short wave infra-red spectroscopy techniques applied to exploration: Emphasis on alteration mineralogy [J]. Contributions of the Economic Geology Research Unit, 1992, 44: 72-74.
- [2] 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.
- [3] CHANG Z S, 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(1368): 1365-1398.
- [4] 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.
- [5] YANG K, HUNTINGTON J F, SCOTT K M, et al. Compositional variations of white mica in the footwall hydrothermal alteration system of the Hellyer Zn-Pb deposit, Tasmania [M]. Publication Series-Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2004: 283-288.
- [6] YANG K, LIAN C, HUNTINGTON J F, et al. Infrared spectral reflectance characterization of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu-Au deposit, Xinjiang, China [J]. Mineralium Deposita, 2005, 40(3): 324-336.
- [7] YANG K, HUNTINGTON J F, GEMMELL J B, et al. 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 Exploration, 2011, 108(2): 143-156.
- [8] THOMPSON A J B, HAUFF P L, ROBITAILLE A J. Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy [J]. Society of Economic Geologists Newsletter, 1999, 39: 16-27.
- [9] RAJU P V S, KATHAI P, CRAIG H. Integrated SWIR spectral and XRD studies on core samples from Gadawara, Central India craton, Madhya Pradesh, India-footprints for IOCG mineralisation [J]. Mineral Resources to Discover-biennial SGA Meeting, 2017, 3: 1-14.
- [10] 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等. 便携式近红外矿物分析仪研究报告 [R]. 南京: 中国地质调查局南京地质调查中心, 2005: 1-2.
- [11] 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等. 便携式近红外矿物分析仪的研制 [A] // 当代中国近红外分析技术 [C]. 2007: 193-202.
- [12] 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等. 近红外光谱分析技术在蚀变矿物鉴定中的应用 [J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1584-1590.
- [13] 修连存, 郑志忠, 陈春霞, 等. 国产便携式近红外药品分析仪原理及其应用 [J]. 现代科学仪器, 2008(4): 120-123.
- [14] 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.
- [15] 修连存,郑志忠,殷靓,等.岩心扫描仪光谱数据质量评估方法研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(8):2352-2356.
- [16] 张蓬,武振凯.PIMA在斑岩型矿床蚀变带划分中的应用综述[J].吉林地质,2011,30(1):129-132.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 徐庆生,郭健,刘阳,等.近红外光谱矿物分析技术在帕南铜-钼-钨矿区蚀变矿物填图中的应用[J].地质与勘探,2011,47(1):107-112.
- [21] 唐楠,唐菊兴,郭娜,等.短波红外光谱仪在矿床蚀变分带研究中的应用——以西藏铁格隆南斑岩-浅成低温热液矿床为例[J].矿物学报,2015,35(Z):925-926.
- [22] 卢燕,周延,张红亮,等.福建政和东际金-银矿床的热液蚀变特征及其勘探指示意义[J].地质与勘探,2017,53(6):1039-1050.
- [23] 周延,陈世忠,张红亮,等.红外光谱蚀变矿物填图技术在找矿勘查中的应用——以福建政和狮子岗铜矿为例[J].矿物学报,2017,37(Z):769-770.
- [24] 祁进平,李晶,戴茂昌,等.紫金山矿田深部勘查新技术、新方法研究进展[J].矿床地质,2012,31(Z):873-874.
- [25] POST J L, NOBLE P N. The near infrared combination band frequencies of dioctahedral smectites, micas, and illites[J].Clays and Clay Minerals,1993,41(6):639-644.
- [26] YANG K, HUNTINGTON J F, BOARDMAN J W. Mapping hydrothermal alteration in the Comstock mining district, Nevada, using simulated satellite-borne hyperspectral data[J]. Australian Journal of Earth Sciences,1999,46(6):915-922.
- [27] 李晶,祁进平,修连存,等.岩芯光谱扫描仪在紫金山矿产地勘查中的应用[J].矿物学报,2013(Z):1020-1021.
- [28] 甘甫平,王润生,马蔼乃.基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J].地学前缘,2003,10(2):445-454.
- [29] LAUKAMP C, CACCETTA M, CHIA J, et al. The uses, abuses and opportunities for hyperspectral technologies and derived geoscience information[J]. AIG Bulletin,2010,51(3):73-76.
- [30] YANG K, WHITBOURN L, MASON P, et al. Mapping the chemical composition of nickel laterites with reflectance spectroscopy at Koniambo, New Caledonia[J]. Economic Geology,2013,108(6):1285-1299.
- [31] 刘德长,邱骏挺,闫柏琨,等.高光谱热红外遥感技术在地质找矿中的应用[J].地质论评,2018,64(5):1190-1200.
- [32] 李天顺,李莉萍.红外光谱定量测定硅灰石矿中矿物含量[J].岩矿测试,1992,11(3):232-235.
- [33] 赵春芳,褚丙武.近红外光谱法测定铝土矿主要成分含量的探讨[J].中国无机分析化学,2013,3(Z):26-28.
- [34] 李民赞,郑立华,安晓飞,等.土壤成分与特性参数光谱快速检测方法及其传感技术[J].农业机械学报,2013,44(3):73-87.
- [35] 边伟英.海南炼化汽油在线调合系统的应用分析[J].当代石油石化,2010(9):19-22.
- [36] 褚小立,田松柏,许育鹏,等.近红外光谱用于原油快速评价的研究[J].石油炼制与化工,2012,43(1):72-77.

Infrared spectrum mineral mapping technique and its application

ZHOU Yan¹, XIU Lian-cun¹, YANG Kai², ZHANG Hong-liang²,

CHEN Shi-zhong¹, FAN Fei-peng¹, ZHENG Zhi-zhong¹

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China;*

2. *China RS Geoinformatics Co., Ltd, Tianjin 300384, China*)

Abstract: As an effective indicator for low-middle temperature minerals related to mineralization, infrared spectrum has been extensively employed in-site mineral mapping. This high technology is characterized by high sampling density, large data volume, high efficiency and low cost. With an emphasis on introduction to the latest development and status of infrared spectroscopy instrument and application of Domestic CMS350A digital core scanner, this study presents application of the technique and its results. On the basis of mineralization and alteration features outlined by mass data, the study precisely indentified altered minerals which are significant to prospecting, obtained ion exchange data of minerals and deduced the properties of hydrothermal fluid, providing guidance for potential evaluation of regional prospecting and further deployment for mineral exploration. Thus, the study direction of infrared spectrum mineral mapping technology should focus on the outreach of working band toward thermal infrared, miniaturization of equipment, improvement of spectral resolution and expansion of applicable fields, etc.

Key words: infrared spectrum; research and development of the instrument; mineral mapping techniques; application