

回广骥,高卿楠,宋利强,等.新疆可可托海稀有金属矿床矿物和岩石热红外光谱特征[J].岩矿测试,2021,40(1):134-144.
HUI Guang - ji, GAO Qing - nan, SONG Li - qiang, et al. Thermal Infrared Spectra Characteristics of Rare Metal Minerals and Rock in the Keketuohai Deposit, Xijiang[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(1): 134 - 144.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202005060001】

新疆可可托海稀有金属矿床矿物和岩石热红外光谱特征

回广骥,高卿楠,宋利强,孙东询

(中国地质调查局自然资源实物地质资料中心,河北三河065201)

摘要:当前新型材料、新能源在各个领域应用不断深化,稀有金属矿床迎来了世界范围内的研究与勘探热潮。新疆可可托海稀有金属矿床是我国最早开发利用稀有金属矿产资源的重要基地,但对其典型矿物和围岩的热红外反射光谱的认识还很缺乏,制约了对同类型矿床开展遥感地质调查和遥感地质学研究工作的推进。本文采用便携式热红外光谱仪,对可可托海3号脉的典型矿物岩石开展热红外光谱特征研究。结果表明:热红外光谱可以有效识别锂辉石、锂云母、绿柱石、电气石等典型的稀有金属矿物。其中,与锂云母相比,含锂云母伟晶岩产生了新的特征峰;含锂辉石伟晶岩、含电气石伟晶岩相比于各自单晶矿物,其反射特征峰均明显向短波方向偏移;含绿柱石伟晶岩光谱曲线反射特征峰比绿柱石单晶反射特征峰明显向长波方向偏移。本文初步建立了可可托海典型矿物和岩石热红外光谱特征数据库,总结了以锂辉石、锂云母等稀有金属矿床矿物、含矿伟晶岩及围岩的热红外光谱特征,可为热红外光谱进行稀有金属矿物的识别及花岗伟晶岩型矿床的勘探提供必要的基础数据支撑。

关键词:可可托海;稀有金属;热红外光谱;锂辉石;锂云母

要点:

- (1) 建立了可可托海稀有金属矿床典型矿物及岩石热红外光谱特征数据库。
- (2) 热红外光谱可以有效识别锂辉石、锂云母、绿柱石、电气石等典型的稀有金属矿物。
- (3) 热红外光谱可以有效区分典型稀有金属矿物、含矿伟晶岩及围岩。

中图分类号: P578.954; P575.4

文献标识码: B

近年来,随着新型材料、新能源在航空工业、汽车工业等领域应用深度和广度的不断扩展,以锂为代表的稀有金属迎来了世界范围内的研究与勘探热潮。众多学者从找矿方向^[1-4]、典型矿床特征^[5-6]、矿物学特征^[7-10]等角度开展了对稀有金属矿床的研究,为稀有金属矿床理论认识和找矿勘查奠定了坚实的基础。

目前,全岩地球化学分析、X射线荧光光谱(XRF)、电子探针(EMPA)、电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等技术广泛应用于稀有金属矿床矿物的元素分析中^[8-15],X射线衍射(XRD)和红外吸收可见光谱分析则广泛应用于矿物的物相及类质同象置

换、官能团存在形式等分析中^[11,14]。也有学者使用红外反射光谱技术对稀有金属矿床矿物开展研究工作^[16]。区别于广泛使用的红外吸收光谱,红外反射光谱对样品进行数据采集时无需将样品研磨制作KBr压片,可以直接对样品表面采集数据,具有无损、快速的特点,并且该方法采集的数据与遥感数据通用,可作为遥感矿物识别与解译的参考数据。目前使用较为广泛的可见光-短波红外波段(400~2500nm)逐渐不能满足光谱矿物研究的要求。该波段虽然技术成熟、设备结构简单,但只能识别由于内部金属阳离子的电子跃迁、振动及羟基、水分子和碳酸根等基团的分子振动引起的红外吸收特征^[16],

收稿日期:2020-04-30;修回日期:2020-08-06;接受日期:2020-09-19

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“实物地质资料汇集与服务”(DD20190411)

作者简介:回广骥,硕士,工程师,主要从事岩心多参数数字化与应用研究。E-mail: 310874768@qq.com。

并不能识别众多的无水硅酸盐。而对 Si(Al)—O 键、S—O 键、P—O 键、OH⁻ 弯曲振动基频十分敏感的热红外光谱技术的出现解决了这一难题。国内外一些学者在热红外光谱矿物识别领域做了很多研究工作。Vincent 等^[17]对 26 块火山岩标本进行了热红外发射光谱(7.5 ~ 14 μm)测量和化学分析。Cooper 等^[18]对 35 块岩石标本及其粉末进行了热红外数据测量,以研究光谱特征与物质成分、粒径大小之间的关系,并利用克里斯琴森特征和投射特征进行岩性的粗略分类。Kokaly 等^[19]发布的第七版 USGS 光谱库囊括了大量矿物岩石的热红外光谱,为其在地质领域的应用奠定了数据基础。代晶晶等^[20]对石英和长石等造岩矿物的热红外光谱特征以及热红外技术在地质找矿中的应用前景进行了综述。刘德长等^[21-23]利用航空遥感手段获取的可见光-热红外数据研究了包括成矿分析、矿床定位和含矿构造追踪在内的固体矿产预测技术。黄宇飞等^[24]利用 ASTER 图像中的 5 个热红外波段计算了石英指数、碳酸盐指数和镁铁质指数,并联合使用这些指数完成了岩性的粗略分类。热红外光谱技术除了被应用于辅助矿床研究和地质勘探,也在矿山管理^[25-27]、土壤调查^[28-30]等领域得到了广泛应用。目前在矿物信息精确提取方面,热红外光谱能够做到石英等常规造岩矿物的定量反演^[31-32],但对于锂辉石、锂云母、绿柱石、电气石等稀有金属矿物的应用较少,其中一个重要原因是各光谱数据库没有太多这些矿物的参考曲线,其光谱特征并没有得到系统的总结。

超大型的新疆可可托海稀有金属花岗伟晶岩型矿床,位于新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州富蕴县可可托海镇东南 1.2 公里处^[33]。该矿床是我国最早开发利用稀有金属矿产资源的重要基地^[4],在 20 世纪 30 ~ 50 年代该矿床的 3 号矿脉被牧民发现,并由前苏联专家进行了初步勘察,随后进入开采阶段^[34]。作为西北地区典型的稀有金属矿床,一直是业内的研究热点,如对矿床地质特征的总结^[5]、对成矿物质来源和矿化过程的探讨^[15,35-37]、三维地质建模与成矿预测^[33]和宝玉石研究^[34]等,但对矿床中典型矿物和围岩的光谱学认识尤其是热红外反射光谱的认识还很缺乏,制约了对同类型矿床开展遥感地质调查和遥感地质学研究工作的推进。本文选择可可托海 3 号矿脉的典型稀有金属矿物标本进行热红外光谱测试,以提取可可托海稀有金属矿床特种矿物的热红外波段的光谱特征,拟为利用热红

外光谱进行锂辉石等稀有金属矿物的识别及花岗伟晶岩型矿床的勘探和研究提供必要的基础数据支撑。

1 实验部分

1.1 样品采集

自然资源实物地质资料中心(以下简称“实物中心”)依托实物地质资料汇集与服务项目(DD20190411)对全国典型矿山的典型标本进行了筛选采集。实物中心保管的可可托海稀有金属矿床系列标本采自 1 号矿坑 3 号脉,伟晶矿物,粒径在 2 ~ 15 cm 不等,只有部分的锂云母颗粒较小,粒径小于 0.5 cm。本文根据矿物的大小、形态、自形程度等,筛选出典型性、代表性的矿物标本,涵盖了可可托海矿床锂辉石、锂云母、白云母、黑云母、电气石、钠长石、绿柱石、蓝晶石、铁铝榴石、石英、铌钽锰矿、斜长石、萤石等主要矿物。所有测试矿物(除锂云母外)粒径均大于 2 cm,保证数据采集时能够覆盖整个传感器窗口。对于锂云母,由于矿物粒度较小,本文采用其集合体的红外光谱数据代替单晶热红外光谱数据。标本基本信息见表 1。

1.2 热红外光谱测试

利用光谱对岩石矿物进行识别时,基于一定物理和化学基础所产生的特征谱段和吸收峰参量是重要依据,如波长 10000 ~ 12500 nm 范围内,由 Si—O—Si 对称伸缩振动^[38]产生的诊断性吸收特征。包括岩石矿物在内的所有物质光谱特征谱段和吸收峰参量的产生都存在一定的机理。热红外范围光谱特征的形成主要与分子振动有关。本文希望通过测量可可托海稀有金属矿床典型矿物标本的热红外光谱数据,总结出一套可直接用于针对本类型矿床遥感地质调查和研究的基础光谱数据,实现对典型矿物、含矿伟晶岩与围岩的快速、无损识别。

目前,可用于岩矿热红外光谱测试的仪器,按照便携程度可以大致分为便携式热红外光谱分析仪和在实验室内使用的大型台式热红外光谱分析仪,而测量的热红外信号类型可以分为发射率、透射率和反射率等。本次实验采用的测试仪器为热红外分析仪(Agilent 4300 Handheld 型),热红外光谱数据测量均在室内进行,环境温度控制在 26℃,无强烈光照,排除了环境因素对测量结果的干扰。每个数据采集点进行了 3 次测量,取平均值作为该数据采集点的热红外测试数据。为保证实验测试数据精度,每测试 1 h,需要对光谱仪进行定标。

表1 标本基本信息

Table 1 Basic information of the specimens

标本编号	标本名称	采样层位	地质特征描述
KKTH-1	锂辉石	可可托海1号矿坑3号脉叶钠长石-锂辉石带(含铍钽的锂矿带)伟晶岩中	晶体属单斜晶系,柱状,无色透明,可达宝石级,其晶体内部略有瑕疵
KKTH-2	锂辉石	可可托海1号矿坑3号脉叶钠长石-锂辉石带(含铍钽的锂矿带)伟晶岩中	主要矿石矿物为锂辉石,含量约占95%。脉石矿物主要为白云母、石英,含量约占5%
KKTH-3	锂云母	可可托海1号矿坑3号脉薄片状钠长石-锂云母带(含铍钽的锂矿带)伟晶岩中	主要矿石矿物为锂云母,含量约占95%。脉石矿物为叶钠长石,含量约占5%
KKTH-8	白云母	可可托海1号矿坑3号脉白云母石英带伟晶岩中	矿石完全由白云母组成,片状,淡绿色
KKTH-9	黑云母	可可托海1号矿坑3号脉文象、变文象石英斜长石带伟晶岩中	晶体为单斜晶系,集合体呈片状。由于富含高价铁,所以标本呈现黑绿色
KKTH-10	电气石单晶	可可托海1号矿坑3号脉薄片状钠长石-锂云母带(含铍钽的锂矿带)伟晶岩中	晶体为三方晶系,呈三方柱状。柱面上呈现出纵纹,横断面呈球面三角形。由于富含铁,电气石呈黑色
KKTH-11	钠长石、电气石、石英伟晶岩	可可托海1号矿坑3号脉薄片状钠长石-锂云母带(含铍钽的锂矿带)伟晶岩中	主要矿石矿物为电气石,含量约占10%。脉石矿物主要为石英、片状钠长石,含量约占90%。电气石为三方晶系,单体呈六方柱状。柱面上呈现出纵纹,横断面呈球面三角形。由于富含锂,电气石呈粉红色
KKTH-12	电气石	可可托海1号矿坑3号脉薄片状钠长石-锂云母带(含铍钽的锂矿带)伟晶岩中	主要矿石矿物为电气石,含量约占20%。脉石矿物主要为斜长石、锂云母,含量约占80%。晶体为三方晶系,单体呈六方柱状,集合体呈棒状。由于该电气石含有锂和铬,从而形成了色带现象,由中心向外形成色环,颜色由粉色向绿色过渡
KKTH-13	海蓝宝石	可可托海1号矿坑3号脉糖晶状钠长石巢体带(主要含铍矿带)花岗伟晶岩中	海蓝宝石在矿物学中属于绿柱石,是一种含铍、铝的硅酸盐。晶体属六方晶系,单体呈六方柱状。由于含有 Fe^{2+} ,标本呈淡蓝色。主要矿石矿物为绿柱石,含量约占10%。脉石矿物主要有长石、石英、白云母,含量约占90%
KKTH-14	绿柱石	可可托海1号矿坑3号脉糖晶状钠长石巢体带(主要含铍矿带)伟晶岩中	主要矿石矿物为绿柱石,含量约占5%。脉石矿物主要为叶钠长石、白云母、石英,含量约占95%。绿柱石晶体为六方晶系,单体呈六方柱状。标本呈淡绿色
KKTH-15	蓝晶石	可可托海1号矿坑3号脉文象、变文象石英斜长石带伟晶岩中	晶体为三斜晶系,单体呈平行双面柱状,淡黄色
KKTH-16	铁铝榴石	可可托海1号矿坑3号脉白云母石英集合体带	主要矿石矿物为铁铝榴石,含量约占5%。脉石矿物主要为绢云母、石英等,含量约占95%。铁铝榴石晶体为等轴晶系,单体为菱形十二面体和四角三八面体聚型,褐红色
KKTH-17	石英	可可托海1号矿坑3号脉块体石英带	烟灰色石英,晶体为三方晶系,单体呈六方柱状,具晶面横纹,在宝石学上称为“烟晶”
KKTH-18	斜长石	可可托海1号矿坑3号脉块体微斜长石带	晶体为三斜晶系,单体呈板柱状,灰白色
KKTH-19	萤石	可可托海1号矿坑3号脉石英-锂辉石带(与5带组合成含铍钽铀锂主矿带)	萤石晶体为等轴晶系,单体为六八面体。绿色或紫色,透明

使用 Agilent 4300 热红外分析仪获取可可托海典型矿物的热红外光谱数据后,将数据导入专业的软件 TSG 进行数据处理和解译工作(TSG 是 The Spectral Geologist 简称,是光谱地质应用开发的专业软件,其中囊括了海量的地质光谱数据的分析算法和澳大利亚 CSIRO 测试的一套矿物光谱数据库,并以此为基础针对不同矿物的提取方法构建了各种模型^[39])。

2 结果与讨论

根据样品采集和测试情况,对每一块样品详细

的记录和描述,包括样品编号、矿物或岩石、测试点位、光谱图、热红外光谱特征,对新疆可可托海的矿物和岩石的热红外光谱特征进行了系统探讨。

2.1 典型矿物标本热红外光谱特征

新疆可可托海锂辉石、锂云母、白云母、黑云母、电气石、钠长石、绿柱石、蓝晶石、铁铝榴石、石英、铍钽锰矿、斜长石、萤石等具有显著的热红外光谱特征(图1,图2)。本文将从特征位置和特征的几何形态两个角度阐述上述矿物的热红外光谱特征。

2.1.1 典型矿物标本热红外光谱特征位置

锂辉石热红外光谱反射率整体较高,三个特征

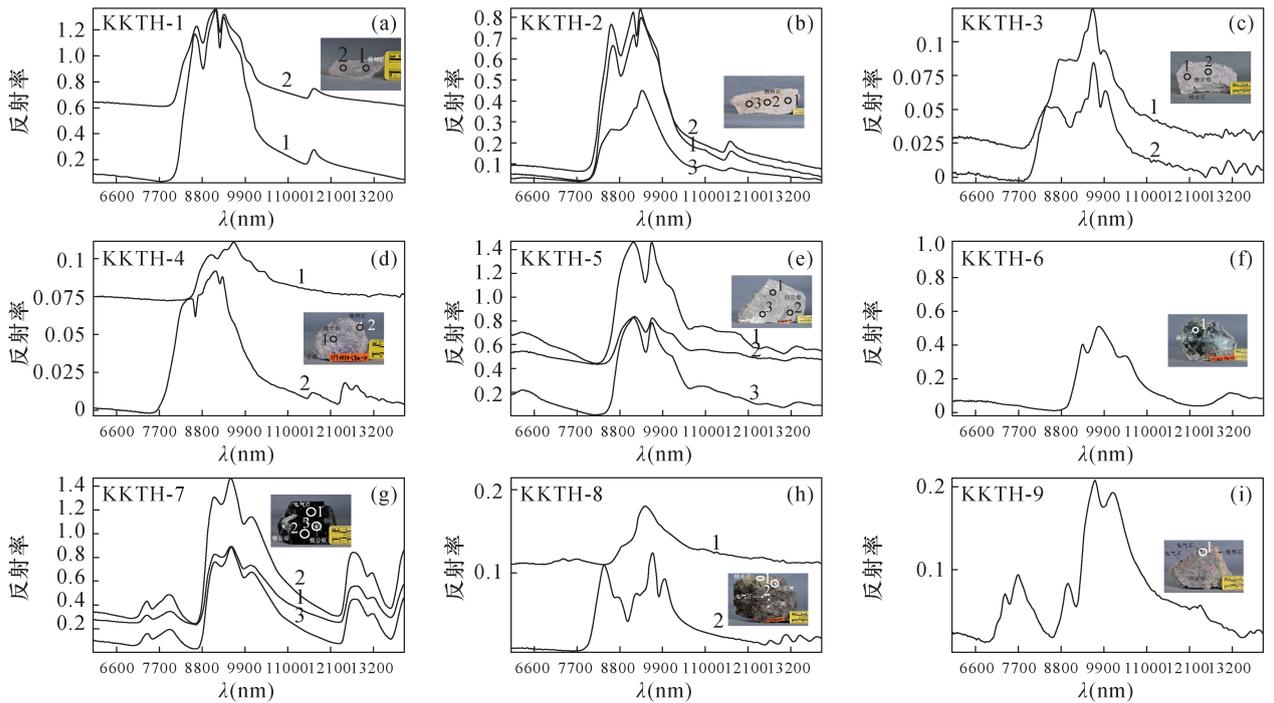


图1 可可托海稀有金属矿床不同矿物或伟晶岩(样品KKTH-1~KKTH-9)的热红外光谱特征

Fig. 1 Spectra of different kinds of minerals and pegmatites (sample from KKTH-1 to KKTH-9) in Keketuohai rare metal deposit

峰特征明显,都集中在8625~9350nm之间(图1a,b)。

锂云母热红外光谱反射率非常低,反射率的平均值在0.1以下,且集中在0.075~0.125之间,这导致了锂云母特征峰十分微弱。锂云母的特征峰在9018nm、9405nm和9605nm处(图1c,d)。

白云母热红外光谱反射率整体较高,在9150nm和9620nm处具有双反射峰,在9460nm处共同作用形成明显的吸收特征。除此之外,在10140nm附近存在明显的肩部特征(图1e)。

黑云母热红外光谱反射率较低,反射率的平均值在0.2附近,最大值不超过0.6。黑云母在热红外波段具有三个反射峰,分别位于9324nm、9747nm和10493nm处(图1f)。

电气石热红外光谱反射率整体上较高,反射率的平均值在0.6附近。特征峰较多,大致分布在三个区间:7000~8500nm、8800~10500nm、12400~13500nm。主要的特征峰分布在8800~10500nm区间,包括9540nm处的主特征峰和9120nm和10060nm附近较弱的特征峰。此外,电气石在7945nm和12730nm附近也存在较为明显的特征峰(图1g,h,i)。

绿柱石热红外光谱反射率整体较高,平均值在0.5附近。在热红外波段,绿柱石存在6个明显的

特征峰,而且分布比较均匀。主要的特征峰为10000~11000nm的一个特征峰以及12000~14000nm区间的两个特征峰,不同标本的6000~10000nm区间的特征峰存在较大差别(图2a,b)。

蓝晶石热红外光谱反射率较低,平均值为0.1,最大值不超过0.2。蓝晶石在本波段的反射率曲线具有十分独特的形态:蓝晶石在本波段具有6个特征峰,两两组合成为3对双峰分布在8000nm、10800nm及12100nm附近(图2c)。

铁铝榴石热红外光谱反射率较低,平均值在0.1以下,最大值不超过0.3。在本波段铁铝榴石存在3个特征峰,分别为9950nm附近主要特征峰和位于11300nm附近的双峰(图2d)。

石英的热红外光谱反射率整体较高,平均值超过0.7。其光谱特征明显,在本波段主要存在一大一小两组双峰,分别位于8600nm和12650nm附近,后者特征较弱(图2e)。本次实验采集到的铈钼锰矿与石英的混合光谱,该光谱曲线在11550nm处存在一个明显的特征峰(图2f)。

斜长石热红外光谱反射率整体较高,在本波段范围存在5个特征峰,其中的4个集中分布在8800~10000nm区间,另外一个特征峰位于13000nm附近(图2g)。

萤石的热红外光谱反射率水平极低,平均值在

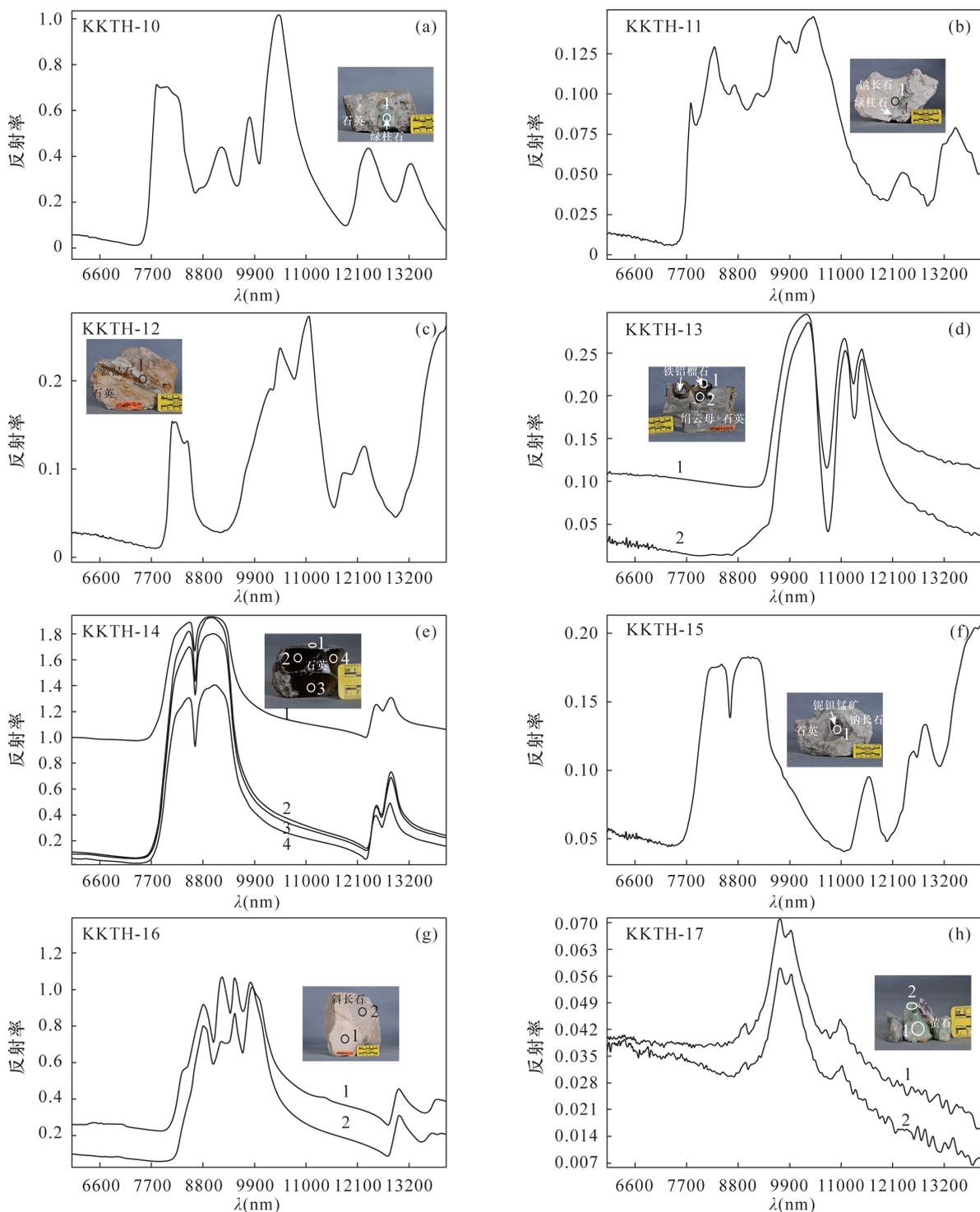


图2 可可托海稀有金属矿床不同矿物或伟晶岩(样品 KKTH - 10 ~ KKTH - 17)的热红外光谱曲线特征

Fig. 2 Spectra of different kinds of minerals and pegmatites (sample from KKTH - 10 to KKTH - 17) in Keketuohai rare metal deposit

0.03 附近,最大值不超多 0.07。信号微弱造成了光谱噪声大、微弱特征被淹没。其主要特征是位于 9900nm 处的一组双峰(图 2h)。

2.1.2 典型矿物标本热红外光谱特征几何形态

锂辉石在热红外波段有三个明显的特征峰,形态上都较为尖锐,9150nm 处特征峰向右偏,9348nm 处

特征峰向左偏(图 1a,b)。

锂云母在热红外波段的特征峰十分微弱。9018nm 处特征峰较为宽缓,9405nm 处的特征峰较为平缓,更像是 9605nm 特征峰的一个肩部(图 1c,d)。

白云母在 9150nm 和 9620nm 处的双反射峰形态上有明显的差别,前者较为宽缓,后者尖锐。10140nm

附近的吸收特征在形态上表现为肩部(图1e)。

黑云母在热红外波段有三个反射峰,分布于9324~10493nm之间。其中9747nm处特征峰略向左偏,而10493nm处特征峰略向右偏。黑云母在13200nm处的特征峰表现得较为宽缓(图1f)。

电气石在热红外波段存在较多的特征峰。在7000~8500nm区间的两个特峰、10000nm附近的两个特征峰和13200nm附近的一个特征峰均略向右偏;在12400nm附近的一个特征峰和9000nm附近的一个特征峰均向左偏(图1g,h,i)。

绿柱石在热红外波段存在6个明显的特征峰,而且分布比较均匀。除8000nm附近的特征峰以外,另外5个特征峰都较为尖锐;6000~12000nm区间的特征峰向右偏,12000~14000nm区间的特征峰向左偏(图2a,b)。

蓝晶石在热红外光谱存在三对双峰,分布在8000nm附近的双峰左高右低,较不尖锐;10800nm和12100nm附近的双峰短波方向一侧的特征峰向左偏,另一个向右偏(图2c)。

铁铝榴石在热红外波段存在三个特征峰。9950nm附近的主要特征峰比较宽缓且明显向右偏;位于11300nm附近的双峰较为尖锐(图2d)。

石英在热红外波段存在一大一小两组双峰,位于8600nm附近双峰的形态较为相似,但短波方向的特征峰较弱一些,12650nm附近的双峰弱于8600nm处双峰,短波方向的特征峰反射强度较长波方向特征峰弱一些(图2e)。铌钽锰矿在11550nm处的特征峰略向右偏(图2f)。

斜长石在热红外存在5个特征峰。在8800~10000nm区间的4个集中分布的特征峰比较明显,9350nm处的特征峰较为微弱,在区间两侧可能会出现肩部,位于13000nm附近的特征峰明显向左偏(图2g)。

萤石在热红外波段存在一组双峰,其中短波方向的特征峰较为明显且略向左偏,长波方向的特征峰较微弱且向右偏(图2h)。

2.2 含典型矿物伟晶岩热红外光谱特征

典型的稀有金属矿物锂辉石、锂云母、绿柱石、电气石,与含有这些矿物的伟晶岩以及不含这些矿物的伟晶岩可以通过热红外光谱进行辨别和区分(图3)。本文将从特征位置和特征的几何形态两个角度阐述上述矿物的热红外光谱特征。

2.2.1 热红外光谱特征位置

锂辉石单晶、含锂辉石伟晶岩、不含锂辉石伟晶

岩的热红外光谱特征具有明显不同的位置。在光谱解译软件TSG中,锂辉石在9155nm和9350nm处有两个典型的反射峰。新疆可可托海稀有金属矿床锂辉石单晶特征峰为9160nm和9350nm,含锂辉石伟晶岩光谱曲线中这两个特征峰波段向短波偏移,分别为9142nm和9309nm。不含锂辉石伟晶岩在9160nm和9350nm附近没有明显的反射峰。

锂云母集合体、含锂云母伟晶岩的热红外光谱特征具有明显不同的位置。锂云母集合体有三个特征反射峰在9018nm、9405nm、9605nm;含锂云母伟晶岩除了在9605nm有特征峰,在8730nm和9900nm附近也有特征反射峰。

绿柱石单晶、含绿柱石伟晶岩可以通过热红外光谱特征位置加以区分。绿柱石单晶有三个典型的反射峰在9197nm、10407nm、12335nm,含绿柱石伟晶岩光谱曲线中这三个峰向短波方向大幅偏移,分别为8292nm、9663nm、10393nm。

电气石单晶、含电气石伟晶岩的热红外光谱特征具有明显不同的位置。电气石单晶有两个特征峰在9538nm、10060nm,而含电气石伟晶这两个特征反射峰明显向长波方向偏移,分别为9545nm、10072nm。

2.2.2 热红外光谱特征几何形态

相比锂辉石单晶,含锂辉石伟晶岩在热红外波段的光谱特征并不尖锐,尤其是8250nm和9160nm两个反射峰极为明显。而9350nm和11600nm附近的反射峰的反射强度得到了削弱(图3a,b)。

锂云母集合体在9018nm、9405nm、9605nm附近的三个特征反射峰较不明显,平均的反射率在0.08~0.09之间,而特征反射峰的反射率在0.11附近,导致锂云母集合体的热红外光谱特征难以捕捉;而含锂云母伟晶岩的平均光谱反射率减低至0.025左右,突出了反射峰,并且伟晶岩中9605nm附近的特征峰相比于集合体的特征峰明显尖锐了很多。此外,新产生的在8730nm和9900nm附近的特征反射峰也较为明显,其中前者比较宽缓,后者较尖锐(图3c,d)。

绿柱石单晶与含绿柱石伟晶岩在热红外波段的光谱特征在几何形态上也有明显区别。绿柱石单晶的三个典型反射峰的反射强度都比较大,形态上较为明显,便于识别,而含绿柱石伟晶岩光谱中这三个峰除8292nm附近的特征峰的反射强度有一定程度的增强外,其余两个在9663nm和10393nm附近的特征峰的反射强度明显减弱(图3e,f)。

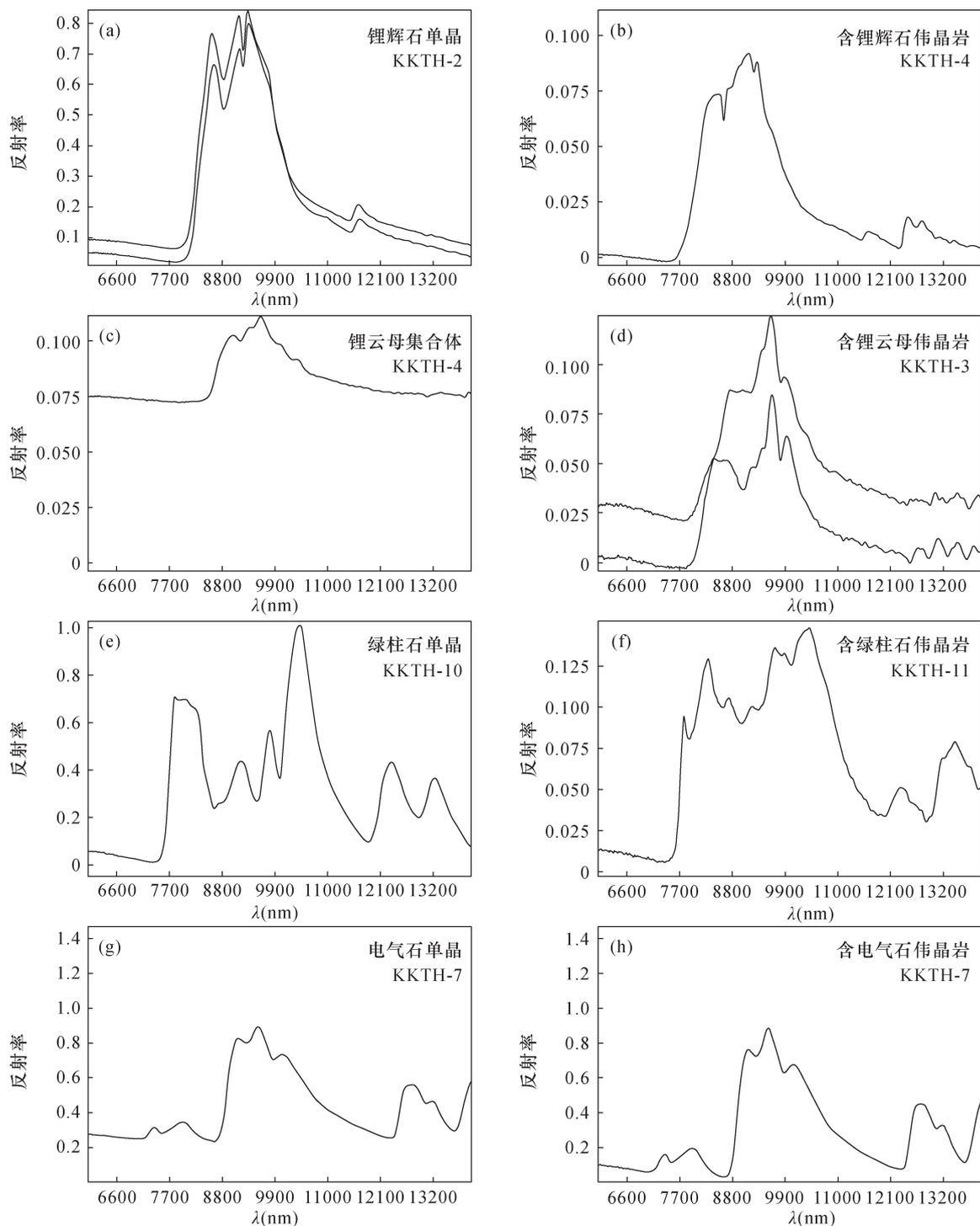


图3 锂辉石、锂云母、绿柱石、电气石矿物与含这些矿物伟晶岩的热红外光谱图

Fig.3 Spectra of spodumene, lepidolite, beryl and tourmaline as well as these minerals – bearing pegmatites

电气石单晶、含电气石伟晶岩在热红外波段的光谱特征在几何形态上区别并不大。相比于电气石单晶,含电气石伟晶岩由于整体反射率较低,其反射特征得到了增强,尤其是对于 9545nm 附近的反射峰而言,明显较电气石单晶的特征尖锐了很多(图 3g,h)。

3 结论

本文使用便携式热红外分析仪对可可托海稀有金属矿床典型矿物及岩石进行了热红外光谱反射率数据采集,建立了该矿区典型矿物和岩石的热红外光谱特征数据库。同时,总结出典型矿物锂辉石、锂云母、绿柱石、电气石和含有这些矿物的伟晶岩的热

红外光谱特征。其中,含锂云母伟晶岩产生了新的特征峰,含锂辉石伟晶岩与含电气石伟晶岩相比,各自单晶矿物的反射特征峰均明显向短波方向偏移;含绿柱石伟晶岩光谱曲线反射特征峰比绿柱石单晶反射特征峰明显向长波方向偏移。这些光谱特征可作为使用热红外波段识别稀有金属矿物的依据,弥补了现阶段使用短波红外光谱对锂辉石等无水硅酸盐类矿物无法进行快速、高效识别的缺陷,为稀有金属矿物快速、无损识别提供了一种新思路。

本文尝试应用热红外光谱对新疆可可托海稀有金属矿床中矿物和岩石进行识别,为高效、快速辨别稀有金属岩矿信息和找矿标志提供了新理论、新方法、新应用,为热红外光谱进行稀有金属矿物的识别及花岗伟晶岩型矿床的勘探提供了必要的基础数据支撑。应用热红外光谱技术能够快速、精准识别含锂辉石伟晶岩和锂辉石单晶,也可以快速、精准识别稀有金属矿床中的典型矿物及岩石。

4 参考文献

- [1] 赵元义. 中国盐湖锂资源及其开发进程[J]. 矿床地质,2003,22(1):99-106.
Zhao Y Y. Saline lake lithium resources of China and its exploitation [J]. Mineral Deposits, 2003, 22 (1): 99-106.
- [2] 李建康,刘喜方,王登红. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报,2014,88(12):2269-2283.
Li J K, Liu X F, Wang D H. The metallogenic regularity of lithium deposit in China[J]. Acta Geologica Sinica,2014,88(12):2269-2283.
- [3] 刘丽君,王登红,刘喜方,等. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质,2017,44(2):263-278.
Liu L J, Wang D H, Liu X F, et al. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine [J]. Geology in China,44(2):263-278.
- [4] 涂其军,李建康,王刚. 中国西部主要伟晶岩型锂辉石矿床成矿作用对比及找矿前景[J]. 中国地质调查,2016,6(6):35-47.
Tu Q J, Li J K, Wang G. Mineralization comparisons of the major pegmatite type spodumene deposits and their prospecting potential in West China [J]. Geological Survey of China,2016,6(6):35-47.
- [5] 杨富全,张忠利,王蕊,等. 新疆阿尔泰稀有金属矿地质特征及成矿作用[J]. 大地构造与成矿学,2018,42(6):1010-1026.
Yang F Q, Zhang Z L, Wang R, et al. Geological characteristics and metallogenesis of rare metal deposits in Altay, Xinjiang [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018,42(6):1010-1026.
- [6] 王吴梦雨,饶灿,董传万,等. 浙江临安石室寺 NYF 型伟晶岩中稀有稀土金属的矿物学行为与成矿过程[J]. 高校地质学报,2019,25(6):914-931.
Wangwu M Y, Rao C, Dong C W, et al. Mineralogical behavior and metallogenic process of rare and rare earth metals in Shishisi NYF - type pegmatite, Lin'an, Zhejiang Province [J]. Geological Journal of China Universities,2019,25(6):914-931.
- [7] 王汝成,谢磊,诸泽颖,等. 云母:花岗岩-伟晶岩稀有金属成矿作用的重要标志矿物[J]. 岩石学报,2018,35(1):69-75.
Wang R C, Xie L, Zhu Z Y, et al. Micas: Important indicators of granite - pegmatite - related rare - metal mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 35 (1):69-75.
- [8] 王臻,陈振宇,李建康,等. 云母矿物对仁里稀有金属伟晶岩矿床岩浆-热液演化过程的指示[J]. 矿床地质,2019,38(5):1039-1052.
Wang Z, Chen Z Y, Li J K, et al. Indication of mica minerals for magmatic - hydrothermal evolution of Renli rare metal pegmatite deposit [J]. Mineral Deposits, 2019,38(5):1039-1052.
- [9] 周起凤,秦克章,唐冬梅,等. 东秦岭卢氏稀有金属伟晶岩的绿柱石矿物学特征及其指示意义[J]. 岩石学报,2019,35(7):1999-2012.
Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, et al. Mineralogical characteristics and significance of beryl from the rare - element pegmatites in the Lushi County, east Qinling, China [J]. Acta petrologica Sinica, 2019, 35 (7): 1999-2012.
- [10] 陈欢,冯梦,康志强,等. 桂东北茅安塘伟晶岩中石榴子石的特征及对岩浆演化的指示意义[J]. 地球科学,2020,45(6):2059-2076.
Chen H, Feng M, Kang Z Q, et al. Characteristics of garnets in pegmatites of Mao'antang, northeast Guangxi, and their implications for magmatic evolution [J]. Earth Science,2020,45(6):2059-2076.
- [11] 邱彩珍. 新疆阿尔泰伟晶岩锂辉石矿物学特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2014.
Qiu C Z. Study on mineralogical characteristics of the spodumene in the Altay Orogen, Xinjiang [D]. Beijing: China University of Geology (Beijing),2014.
- [12] 伍守荣,赵景宇,张新,等. 新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉岩浆-热液过程:来自电气石化学组成演化

- 的证据[J]. 矿物学报, 2015, 35(3): 299-308.
- Wu S R, Zhao J Y, Zhang X, et al. Magmatic - hydrothermal evolution of the Koktokay No. 3 Pegmatite, Altay, NW China; Evidence from compositional variation of tourmaline [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(3): 299-308.
- [13] 王吴梦雨. 浙西北河桥地区花岗质岩石中稀有金属的矿物学行为和成矿过程[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Wangwu M Y. Mineralogical behavior and metallogenic process of rare metals in granitic rocks of Heqiao area, northwest Zhejiang[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [14] 白峰, 冯恒毅, 邹思吉力等. 河南卢氏官坡伟晶岩中锂辉石的矿物学特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(2): 281-285.
- Bai F, Feng H Y, Zou S J L, et al. A mineralogical study of spodumene from Guanpo pegmatites in Lushi, Henan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(2): 281-285.
- [15] 唐宏, 张辉. 可可托海3号伟晶岩脉石英中微量元素组成特征与岩浆-热液演化[J]. 矿物学报, 2018, 38(1): 15-24.
- Tang H, Zhang H. Characteristics of trace elements in quartz from No. 3 pegmatite, Koktokay area, Xinjiang autonomous region, China and implication for magmatic - hydrothermal evolution[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2018, 38(1): 15-24.
- [16] 代晶晶, 王登红, 代鸿章, 等. 川西甲基卡锂矿基地典型岩石及矿物反射波谱特征研究[J]. 岩矿测试, 2018, 37(5): 507-517.
- Dai J J, Wang D H, Dai H Z, et al. Reflectance spectral characteristics of rocks and minerals in Jiajika lithium deposits in west Sichuan [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(5): 507-517.
- [17] Vincent R K, Rowan L C, Gillespie R E, et al. Thermal - infrared spectra and chemical analyses of twenty - six igneous rock samples [J]. Remote Sensing of Environment, 1976, 4: 199-209.
- [18] Cooper B L, Salisbury J W, Killen R M, et al. Midinfrared spectral features of rocks and their powders [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(E4): 1-17.
- [19] Kokaly R F, Clark R N, Swayze G A, et al. USGS spectral library version 7; U. S. Geological Survey Data Series [R]. 2017.
- [20] 代晶晶, 赵龙贤, 姜琪, 等. 热红外高光谱遥感技术在地质找矿中的应用综述[J]. 地质学报, 2020, 94(8): 2520-2533.
- Dai J J, Zhao L X, Jiang Q, et al. Review of thermal - infrared spectroscopy applied in geological ore exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(8): 2520-2533.
- [21] 刘德长, 闫柏琨, 邱骏挺. 航空高光谱遥感固体矿产预测方法与示范应用[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 349-358.
- Liu D C, Yan B K, Qiu J T. The application of airborne hyper - spectral remote sensing technology to mineral resources exploration [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(3): 349-358.
- [22] 刘德长, 邱骏挺, 田丰, 等. 区域控矿断裂带的航空高光谱遥感技术研究——以黑石山-花牛山深大断裂带为例[J]. 地质与勘探, 2015, 51(2): 366-375.
- Liu D C, Qiu J F, Tian F, et al. Application of airborne hyper - spectrum remote sensing to mapping of ore - control faults: A case study of the Heishishan - Huaniushan Fault [J]. Geology and Exploration, 2015, 51(2): 366-375.
- [23] 刘德长, 叶发旺, 赵英俊, 等. 航空高光谱遥感金矿床定位模型及找矿应用——以甘肃北山六院-方山口地区为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(12): 1545-1553.
- Liu D C, Ye F W, Zhao Y J, et al. Airborne hyperspectral remote sensing for gold prospecting around Liuyuan - Fangshankou area, Gansu Province, China [J]. Journal of Geo - informatics Science, 2015, 17(12): 1545-1553.
- [24] 黄宇飞, 李智慧, 宁慧, 等. 应用 ASTER 遥感图像的岩矿信息提取研究[J]. 航天器工程, 2019, 28(6): 130-135.
- Huang Y F, Li Z H, Ning H, et al. Research on rock and mineral information extraction based on ASTER remote sensing image [J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(6): 130-135.
- [25] 王东, 刘善军, 毛亚纯, 等. 鞍山式铁矿 SiO₂ 含量的热红外光谱分析方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2101-2106.
- Wang D, Liu S J, Mao Y C, et al. A method based on thermal infrared spectrum for analysis of SiO₂ content in Anshan - type iron [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2101-2106.
- [26] 宋亮, 刘善军, 虞茉莉, 等. 基于可见-近红外和热红外光谱联合分析的煤和矸石分类方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(2): 416-422.
- Song L, Liu S J, Yu M L, et al. A classification method based on the combination of visible, near - infrared and thermal infrared spectrum for coal and gangue distinguishment [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,

- 2017,37(2):416-422.
- [27] 杨国防,赵英俊,田新光,等.大柳塔矿区煤火高光谱热红外定量探测研究[J].煤炭工程,2016,48(12):103-106.
Yang G F, Zhao Y J, Tian X G, et al. Coalfield fire quantitative detection in Daliuta mining area based on hyperspectral thermal infrared remote sensing[J]. Coal Engineering, 2016, 48(12):103-106.
- [28] 夏军,张飞.热红外光谱的干旱区土壤含盐量遥感反演[J].光谱学与光谱分析,2019,39(4):1063-1069.
Xia J, Zhang F. A study on remote sensing inversion of soil salt content in arid area based on thermal infrared spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(4):1063-1069.
- [29] 买买提·沙吾提,吐尔逊·艾山,塔西甫拉提·特依拜,等.基于热红外光谱的干旱区土壤盐分监测研究[J].干旱区地理,2017,40(1):181-187.
Mamat S, Tueixun A, Tashpolat T, et al. Salt content monitoring on thermal infrared emissivity in arid area [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1):181-187.
- [30] 侯艳军,塔西甫拉提·特依拜,张飞,等.荒漠土壤全磷含量热红外发射率光谱估算研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(2):350-354.
Hou Y J, Tashpolat T, Zhang F, et al. Study on estimation of deserts soil total phosphorus content from thermal - infrared emissivity [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(2):350-354.
- [31] 郭帮杰,张杰林,武鼎.热红外高光谱遥感回归分析定量反演石英含量[J].科学技术与工程,2018,18(17):125-130.
Guo B J, Zhang J L, Wu D. Thermal hyperspectral remote sensing for the quantitative inversion of quartz content by regression analysis [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(17):125-130.
- [32] 杜锦锦,王俊虎,郎朋林.基于102F实测热红外光谱的富硅类岩石 SiO₂含量定量反演[J].世界核地质科学,2016,33(4):216-222.
Du J J, Wang J H, Lang P L. Quantitative inversion of SiO₂ contents in silicon rich rocks based on measured 102F thermal infrared spectra [J]. World Nuclear Geoscience, 2016, 33(4):216-222.
- [33] 赵洁.新疆富蕴可可托海地区稀有金属定量预测与评价[D].北京:中国地质大学(北京),2008.
Zhao J. Quantitative prediction and estimation on rare metals deposit in Koktokay, Xinjiang Province [D]. Beijing: China University of Geology (Beijing), 2008.
- [34] 曲梦.新疆阿尔泰可可托海海蓝宝石的宝石矿物学研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
Qu M. Mineralogy and geological study of a quamarine from Keketuohai in Aletai of Xinjiang [D]. Beijing: China University of Geology (Beijing), 2014.
- [35] 陈剑锋,张辉,张锦煦,等.新疆可可托海3号伟晶岩脉锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特征及地质意义[J].中国有色金属学报,2018,28(9):1832-1844.
Chen J F, Zhang H, Zhang J X, et al. Geochronology and Hf isotope of zircon for Koktokay No. 3 granitic pegmatite in Xinjiang and its geological implications [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9):1832-1844.
- [36] 伍守荣,赵景宇,张新,等.新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉岩浆-热液过程:来自电气石化学组成演化的证据[J].矿物学报,2015,35(3):299-308.
Wu S R, Zhao J Y, Zhang X, et al. Magmatic - hydrothermal evolution of the Koktokay No. 3 pegmatite, Altay, NW China: Evidence from compositional variation of tourmaline [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(3):299-308.
- [37] 田野,秦克章,周起凤,等.阿尔泰可可托海伟晶岩中弧形石英白云母层的成因及意义[J].岩石学报,2015,31(8):2353-2365.
Tian Y, Qin K Z, Zhou Q F, et al. The formation of curve shape quartz - muscovite layers in Koktokay pegmatite intrusions, Altay, and its implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(8):2353-2365.
- [38] 朱莹,丁竑瑞,李艳,等.不同亚类硅酸盐矿物的中红外光谱学特征[J].矿物学报,2019,39(2):143-182.
Zhu Y, Ding H R, Li Y, et al. The middle - infrared spectroscopic characteristics of several common silicate minerals [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2019, 39(2):143-182.
- [39] 郭娜,史维鑫,黄一入,等.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,2018,37(2-3):446-457.
Guo N, Shi W X, Huang Y R, et al. 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, 2018, 37(2-3):446-457.

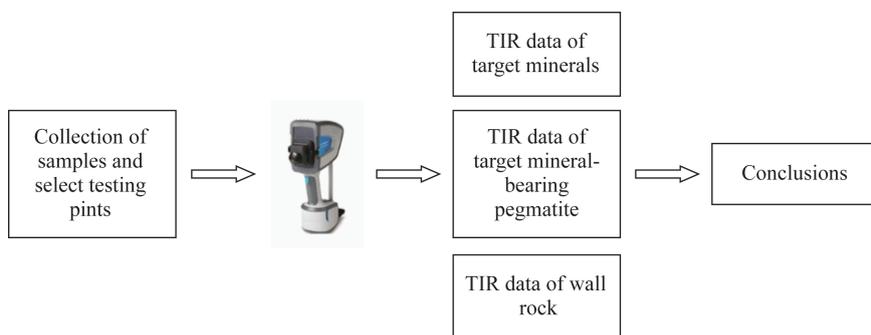
Thermal Infrared Spectra Characteristics of Rare Metal Minerals and Rock in the Keketuohai Deposit, Xijiang

HUI Guang – ji, GAO Qing – nan, SONG Li – qiang, SUN Dong – xun

(Core and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The database of thermal infrared spectra characteristics for typical minerals and rock assemblages from the Keketuohai deposit was developed.
- (2) Spodumene, lepidolite, beryl and tourmaline can be identified by thermal infrared spectroscopy.
- (3) Thermal infrared spectroscopy technology can distinguish typical rare metal minerals, ore – bearing pegmatites and country rocks.



ABSTRACT

BACKGROUND: At present, the application of new materials and new energy in various fields continues to deepen, and rare metal deposits have ushered in a worldwide upsurge of research and exploration. The Keketuohai rare metal deposit is the earliest developed deposit for rare metal mineral in China. However, the thermal infrared (TIR) characteristics of minerals and rocks from this deposit have not been studied, which restricts remote sensing geological survey and relevant studies.

OBJECTIVES: To analyze the characteristics of thermal infrared spectra of minerals and rock assemblages from the Keketuohai deposit, and provide the basic data for rare metal exploration.

METHODS: A portable thermal infrared spectrometer was used to measure the spectrum data of typical minerals and rock assemblages of Keketuohai No. 3 vein. Data was analyzed using tectonics/structural geology (TSG) and related databases.

RESULTS: Typical rare metal minerals like spodumene, lepidolite, beryl and tourmaline can be separated with TIR. Compared with lepidolite, there was a new diagnosed peak for the TIR spectrum of lepidolite – bearing pegmatite. The spectrum peaks of spodumene – bearing pegmatite and tourmaline – bearing pegmatite were significantly shorter than those of spodumene and tourmaline. However, the spectrum peaks of beryl – bearing pegmatite were shorter than the peaks of beryl.

CONCLUSIONS: A database of thermal infrared spectroscopy characteristics of typical minerals and rocks in the Keketuohai has been established, and the thermal infrared spectroscopy characteristics of spodumene and lepidolite, ore – bearing pegmatites and surrounding rocks in rare metal deposits have been summarized in this study. Basic data support for the identification of rare metal minerals using thermal infrared spectroscopy and the exploration of granite pegmatite deposits has also been provided.

KEY WORDS: Keketuohai; rare metals; thermal infrared spectroscopy; spodumene; lepidolite