

中国不同类型铍矿床中绿柱石流体包裹体特征研究

董京娉^{1,2)}, 黄 凡^{2)*}, 魏 娜³⁾

1) 中国地质大学(北京)珠宝学院, 北京 100083;

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

3) 河北水利电力学院, 河北沧州 061001

摘 要: 采用偏光显微镜薄片观察、激光拉曼成分分析等方法, 对伟晶岩型和岩浆热液型铍矿床中绿柱石的流体包裹体进行了岩相学观察和成分分析。结果表明, 绿柱石中原生流体包裹体形态多样, 常孤立或成群沿晶体生长带定向分布, 大小从 5~80 μm 不等。流体包裹体类型以富液相型气液两相包裹体最常见, 其次为含液相 CO_2 的三相包裹体和含子矿物多相包裹体, 偶见固体包裹体和熔融包裹体。其中, 伟晶岩型绿柱石中包裹体数量和种类更为丰富, 常见含子晶多相包裹体和气液包裹体共存, 岩浆热液型绿柱石中包裹体则相对较少, 可见熔融包裹体与富液相 CO_2 流体包裹体共存。流体包裹体气相成分主要以 CO_2 和 N_2 为主, 液相主要为 H_2O 和 CO_2 以及 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等离子。伟晶岩型绿柱石中常见含石英、云母、钠长石等子矿物的多相包裹体, 由伟晶岩中晶体快速结晶形成; 岩浆热液型绿柱石中的有机质气体更丰富, 与氧化剂 Al_2O_3 活度较低而形成相对还原环境有关。富含 CO_2 、 H_2O 成分的流体更有利于绿柱石的形成。结合流体包裹体的生成机制, 认为岩浆热液型绿柱石形成于岩浆演化晚期的热液阶段, 伟晶岩型绿柱石形成于岩浆-热液过渡→热液阶段, 绿柱石的形成机制为岩浆的结晶分异和液态不混溶作用。

关键词: 绿柱石; 流体包裹体; 岩相学特征; 成分特征; 形成机制

中图分类号: P618.72 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.122901

Characteristics of Fluid Inclusions in Beryl from Different Beryllium Deposits in China

DONG Jing-yu^{1, 2)}, HUANG Fan^{2)*}, WEI Na³⁾

1) School of Gemmology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

2) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou, Hebei 061001

Abstract: The fluid inclusions in beryl in pegmatitic and magmatic hydrothermal beryllium deposits were studied using polarizing microscope observations of thin sections and laser Raman composition analysis. The results showed that the primary fluid inclusions in beryl had various forms. Beryl was usually distributed in isolation or in groups along the crystal growth zone, ranging in size from 5 μm to 80 μm . Liquid-rich gas-liquid two-phase inclusions were the most common types of fluid inclusions, followed by liquid-phase CO_2 -containing three-phase inclusions and multiphase inclusions containing daughter minerals. Occasionally, solid inclusions and melt inclusions were also observed. Pegmatitic beryl had substantial quantity and variety of inclusions, and it was common to have multiphase inclusions with carrier crystals and gas-liquid inclusions. However, there were relatively few inclusions in magmatic hydrothermal beryl, and melt inclusions coexisted with liquid-rich CO_2 fluid inclusions. The gaseous components of the fluid inclusions were primarily CO_2 and N_2 , and the liquid phase

本文由国家自然科学基金项目(编号: 42172007)和中国地质调查局“中国矿产地质志”项目(编号: DD20221695; 20190379; DD20160346)联合资助。

收稿日期: 2022-11-21; 改回日期: 2022-12-26; 网络首发日期: 2023-01-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 董京娉, 女, 1998 年生。硕士研究生。材料与化工专业。E-mail: 939759346@qq.com。

*通讯作者: 黄凡, 男, 1983 年生。研究员, 硕士生导师。主要从事区域成矿规律与成矿预测研究。E-mail: hfhymin@163.com。

was primarily H_2O , CO_2 , CO_3^{2-} , HCO_3^- , and other ions. Pegmatitic beryl often contained multiphase inclusions containing quartz, mica, albite, and other daughter minerals, which are formed by the rapid crystallization of pegmatitic crystals. Organic gas, which is related to the relative reduction environment formed by the low activity of the oxidant Al_2O_3 , was more abundant in magmatic hydrothermal beryl. Fluids rich in CO_2 and H_2O were more conducive to the formation of beryl. Combined with the formation mechanism of fluid inclusions, it is suggested that magmatic hydrothermal beryl was formed in the hydrothermal stage of late magmatic evolution. Pegmatitic beryl was formed during the transition from the magmatic-hydrothermal stage to the hydrothermal stage. The formation mechanism of beryl is crystal differentiation and liquid immiscibility of magma.

Key words: beryl; fluid inclusion; petrography characteristics; ingredient characteristics; formation mechanism

铍(Be)因其独特的物理化学性质,在军工、卫星及信息工业等涉及国防安全的高精尖领域有着难以替代的重要作用,是我国重要的战略储备资源(陶湘媛等, 2020)。我国铍矿产资源丰富,主要分布在 16 个省(区),已发现铍矿产地 241 处,查明铍矿资源储量 57.1 万 t, 包括基础储量 2.9 万 t, 可采储量 1.44 万 t, 资源量为 53.9 万 t(梁飞, 2018)。其中,新疆、内蒙古、四川和云南四省(区)的储量占总储量的 90%以上,江西、甘肃、湖南、广东、河南、福建、浙江、广西、黑龙江、河北和陕西 11 个省(区)拥有资源储量合计占不足 10%(梁飞, 2018)。总体上,我国铍矿床具有规模较小、品位较低、分布不均衡且高度集中、共伴生矿床多、单一矿床少、储量大等特点(梁飞, 2018)。近些年来,我国铍需求量不断增长,而铍生产量却供不应求,致使我国铍的对外依存度高,难以保障铍资源的大量连续供应。因此,现阶段为提高综合国力,加强找铍矿是当务之急(李建康等, 2017)。

绿柱石是一种重要的含铍(Be)的硅酸盐矿物,主要赋存于花岗伟晶岩和高度分异花岗岩中(陶湘媛等, 2020),粒度、透明度、颜色俱佳者可以作为高档宝石原料(阮青锋等, 2008)。由于绿柱石能提炼出有重要军事用途的稀有金属元素铍,因此,深入开展绿柱石的矿物学研究对理解矿床成因、铍的提取、示踪产地等具有重要意义(Lum et al., 2016)。国内外学者从物理性质、化学成分、包裹体和同位素组成等方面对绿柱石进行了矿物学研究(Khiller, 2017; Michalik et al., 2020; 王臻, 2021; 赵可含, 2021)。

绿柱石中流体包裹体往往较发育,卢焕章(2014)将流体包裹体按相态分为纯液体包裹体、纯气体包裹体、液体包裹体、气体包裹体、含子矿物包裹体、含液体 CO_2 包裹体、油气包裹体等。此外,流体-熔融包裹体是介于固体包裹体和流体包裹体之间的一种形态(卢焕章, 2014)。不同类型的包裹体形成的温度压力条件不同,通常流体包裹体的形成温度较低(阮青锋等, 2008),不同包裹体类型的存在

反映出绿柱石成岩成矿的复杂性和多阶段性。近年来,国内学者对新疆可可托海、云南麻栗坡、湖南幕阜山、四川平武等地区的铍矿床中绿柱石的包裹体的岩相学、成分特征及均一温度和盐度等进行了分析测试,探讨了成矿流体来源与演化机制、矿床成因和矿脉形成温压条件,取得了一系列研究成果(叶琳, 2010; 林龙华等, 2012; 丁欣, 2016; 熊欣等, 2022)。如,云南变质熔融成因的铍矿床所产的绿柱石中包裹体主要为熔融包裹体和流体-熔融包裹体(李兆麟等, 2000; 刘斌和沈昆, 2000);湖南幕阜山伟晶岩型岩浆分异成因的铍矿床产出的绿柱石中包裹体常见四种类型,分别为熔融包裹体、结晶质-流体熔融包裹体、气液包裹体和沸腾包裹体(李兆麟等, 1998);四川平武绿柱石中包裹体为典型的流体包裹体且类型丰富,成矿流体主要来源于岩浆期后热液(陈志军等, 2002; 刘琰等, 2005)。

尽管如此,对不同地区、不同类型铍矿床中绿柱石的研究程度不均衡,多集中在对伟晶岩型铍矿床中的绿柱石研究(周天怡等, 2014),对其中包裹体的研究也往往局限于单个矿床,很少有系统地开展对不同地区、不同类型铍矿床所产的绿柱石中流体包裹体的综合对比研究。因此,本文选取了中国新疆、云南、陕西、江西等省(区)不同类型铍矿床中的绿柱石样品,开展了流体包裹体岩相学和快速激光拉曼分析,以期反映不同类型铍矿床中绿柱石内包裹体的特征,从而判断绿柱石的形成条件,揭示不同类型矿床中绿柱石的成因。

1 铍矿床类型及主要特征

我国铍矿床包括内生型和外生型两种。为了有效地反映不同类型铍矿床的地质条件,特别是构造环境、矿物组成、成矿物质来源和赋矿岩石类型等方面的信息,指示矿物组合和蚀变类型, Barton and Young(2002)根据内生矿床岩浆系统的铝饱和指数,即岩浆系统碱铝性($\text{ACNK}=(\text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})_{\text{molar}}$)将内生型铍矿床分为:①过铝性成矿系统($\text{ACNK}>1.0$, $\text{A}>\text{CNK}$);②偏铝性成矿系统

($ACNK < 1.0$, $A > CNK$); ③碱性成矿系统($ACNK < 1.0$, $A < CNK$)(金庆花等, 2015)。我国铍矿床以过铝性成矿系统为主, 仅有少量矿床属于碱性系列(李建康等, 2017)。

根据流体演化阶段, 再将上述铍矿床分为: 岩浆型、伟晶岩型和岩浆热液型铍矿床。一般而言, 岩浆型→伟晶岩型→热液型铍矿床体现了岩浆-热液的演化过程, 三者之间存在连续转化的关系(丁欣等, 2016)。然后根据赋矿环境和矿化形式, 还可将岩浆热液型进一步分为: 矽卡岩型、交代型、云英岩型和脉状矿床(梁飞等, 2018), 反映了围岩条件的差异, 矿物组成和成分随着围岩和岩浆岩组成的不同亦有所变化。其中, 伟晶岩型和岩浆热液脉型的总和占有铍矿类型的 85%以上(李建康等, 2017)。

伟晶岩型铍矿床的矿体多呈脉状、似层状、透镜状和不规则状产于花岗岩的内外接触带, 矿石结构主要有花岗结构、斑状结构、伟晶结构和文象伟晶结构, 以块状构造为主, 矿石矿物主要为绿柱石、海蓝宝石、电气石、萤石、锂云母、锰铝榴石、黄铁矿、辉钼矿、辉铋矿、闪锌矿和磷灰石, 及少量锂辉石和铈榴石等(梁婷, 1999; 李尚等, 2018; 冯京等, 2021)。部分复杂的伟晶岩脉具矿化分带性, 以新疆可可托海和四川甲基卡伟晶岩的结构分带性最为典型。新疆可可托海伟晶岩矿床的空间形态总体呈实心的草帽形, 分为 9 个共生结构带, 由内向外依次是: I 文象-变文象伟晶岩带; II 糖粒状钠长石带; III 块体微斜长石带; IV 白云母-石英带; V 叶钠长石-锂辉石带; VI 石英-锂辉石带; VII 白云母-薄片钠长石带; VIII 锂云母-薄片钠长石带; IX 石英和微斜长石核(林龙华等, 2012; 周天怡等, 2014)。四川甲基卡花岗伟晶岩矿脉物质组分复杂, 根据矿物组合类型, 自岩体接触带向外可依次划分为: 微斜长石型(I型, 占 4.4%)→微斜长石-钠长石型(II型, 占 24.5%)→钠长石型(III型, 占 28.9%)→钠长石-锂辉石型(IV型, 占 21.1%)→钠长石-锂(白)云母型(V型, 白云母亚型占 19.7%, 锂云母亚型占 1.4%)(代鸿章等, 2018; 熊欣等, 2022)。其他典型的伟晶岩型铍矿床还包括新疆阿斯喀尔特、新疆阿祖拜、新疆大喀拉苏、四川甘孜、湖南仁里、云南梁河等地的铍矿床(邹天人, 1996; 李强等, 2019; 王登红等, 2000; 王臻等, 2021; 燕利军等, 2021; 丁子龙等, 2022)。

岩浆热液型铍矿床的矿体多以似层状或脉状产出, 绿柱石呈自形长柱状, 有时呈放射状、团块状、层状集合体分布于云英岩中或产于云英岩脉中的晶洞或矿囊中, 颜色较艳丽, 有翠绿、黄绿及浅绿, 少数为蓝绿色, 颜色分带有时明显, 表现为核部浅边

缘深、优质的云南祖母绿多产于该类型中(梁婷, 1999)。矿石结构主要为他形、半自形及自形粒状结构。矿石构造主要为浸染状、条带状构造, 偶见团块状构造。矿石矿物主要包括石英、萤石、黄铁矿、白钨矿和绿柱石, 另含少量辉钼矿、黑钨矿及辉铅铋矿等, 脉石矿物主要为石英、黠帘石、钾长石、绿柱石、铬云母、萤石、电气石、白钨矿、毒砂、黄铁矿、绿泥石、透辉石、金云母、方解石、白云石、白云母、硬石膏等(梁婷, 1999; 黄文清等, 2015; 郭碧君等, 2016)。如陕西商南的矽卡岩化型(钨)和石英方解石脉型(铍和钨)矿床、云南麻栗坡的云英岩型铍矿床, 陕西核桃坪的碳酸盐脉型铍矿床等均为典型岩浆热液脉型铍矿床(黄文清等, 2014; 代鸿章等, 2019; 韩珂等, 2021)。

2 样品与测试方法

研究样品共 12 块, 分别采自陕西、新疆、云南、江西、四川五个省(区)的 10 个铍矿区(图 1), 样品编号及特征详见表 1。肉眼观察可见, 所采集的绿柱石呈玻璃光泽或蜡状光泽, 半透明-不透明, 不完全解理, 断口呈贝壳状或参差状, 断口处玻璃或树脂光泽。绿柱石颜色主要呈无色、浅绿色、翠绿色、蓝绿色和黄绿色。其中, 伟晶岩型铍矿床中样品 8 件, 以黄绿色和蓝绿色为主; 岩浆热液型铍矿床中样品 4 件, 以翠绿色或黄绿色为主。

将绿柱石样品切磨成包体片, 进行流体包裹体岩相学观察和激光拉曼光谱仪分析。岩相学观察在偏光显微镜下进行, 所用仪器为中国地质科学院矿产资源研究所 Leica DM 2500 偏反光显微镜, 将薄片上的绿柱石矿物区域置于偏光显微镜下由 5X 放大至 40X, 观察流体包裹体所在位置、形态和整体分布特征等。

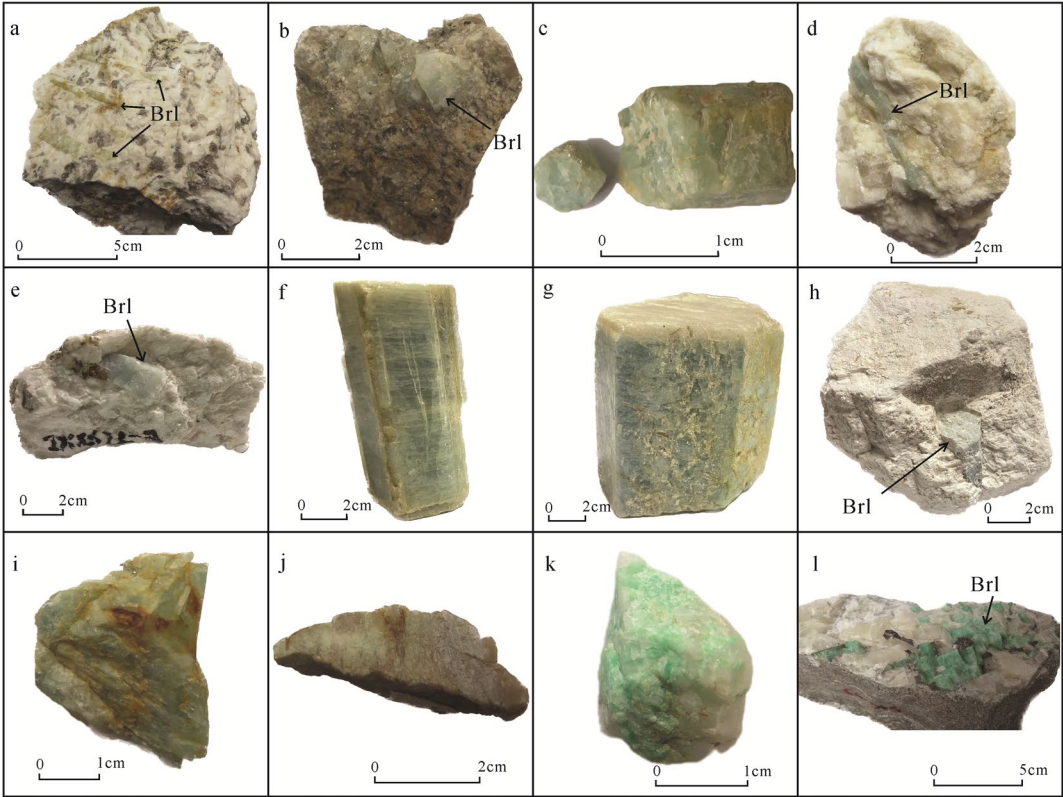
拉曼光谱分析使用中国地质科学院矿产资源研究所的英国 Renishaw System-2000 显微共焦激光拉曼光谱仪, 激发激光波长 514.53 nm, 激光功率 20 mW, 激光束斑最小直径 1 μm , 显微镜下放大倍数为 500 倍, 光谱分辨率 1~2 cm^{-1} , 光谱范围 100~4 000 cm^{-1} , 全波段一次取峰计数时间为 30 s, 仪器校正采用单晶硅片, 校正后的单晶硅所对应的拉曼位移为 520.72 cm^{-1} 。

3 测试结果

3.1 岩相学特征

3.1.1 伟晶岩型铍矿床

绿柱石中最常见气液两相包裹体, 其次是含液相 CO_2 的三相包裹体和含子矿物多相包裹体, 还有少量的熔融包裹体、纯液体包裹体、固体包裹体(图 2)。



Brl—绿柱石矿物; a, b, c, d, e, f, g, h—伟晶岩型铍矿床中的绿柱石; i, j, k, l—岩浆热液型铍矿床中的绿柱石; a—新疆大喀拉苏(S10-12); b—新疆库尔其木克矿(KEQMK); c—新疆阿斯喀尔特(L-03); d—新疆阿祖拜(L-07); e—江西宜春(L-11); f—江西宜春(L-12); g—新疆可可托海(L-13); h—云南那俄铍矿(L-14); i—陕西商南(L-05); j—云南麻栗坡(L-09); k—云南麻栗坡(L-10); l—陕西核桃坪(SX-05)。
Brl—beryl mineral; a, b, c, d, e, f, g, h—beryl in pegmatite beryllium deposits; i, j, k, l—beryl in magmatic hydrothermal beryllium deposits; a—Dakalasus, Xinjiang (S10-12); b—Keerqimuke, Xinjiang (KEQMK); c—Asikaerte, Xinjiang (L-03); d—Azubai, Xinjiang (L-07); e—Yichun, Jiangxi (L-11); f—Yichun, Jiangxi (L-12); g—Koktokay, Xinjiang (L-13); h—beryllium ore of Na'e, Yunnan (L-14); i—Shangnan, Shaanxi (L-05); j—Malipo, Yunnan (L-09); k—Malipo, Yunnan (L-10); l—Hetaoping, Shaanxi (SX-05).

图 1 绿柱石样品图片
Fig. 1 Pictures of beryl samples

表 1 不同类型矿床中的绿柱石样品特征
Table 1 Characteristics of beryl samples from various sites

样品号	产地	样品特征
伟晶岩型铍矿床		
S10-12	新疆大喀拉苏	绿柱石呈长柱状产于花岗伟晶岩中, 黄绿色, 半透明至不透明, 共生的矿物组合: 石英-长石-白云母-黑云母-绿柱石-电气石
KEQMK	新疆库尔其木克矿	绿柱石透明度高, 略带蓝色调, 微油脂光泽, 共生矿物组合: 黑云母-白云母-石英-长石-绿柱石
L-03	新疆阿斯喀尔特	绿柱石单晶呈不规则六方柱状, 黄绿色, 半透明, 矿物组合: 石英-云母-绿柱石
L-07	新疆阿祖拜	绿柱石晶体呈长柱状分布于淡黄色长石中, 蓝绿色, 属于海蓝宝石, 晶形完好, 透明-半透明, 共生矿物组合: 石英-长石-绿柱石
L-11	江西宜春宜丰县	绿柱石晶体呈块状或柱状产出, 带蓝色调, 微透明至不透明, 共生矿物组合: 绿柱石-黑云母-石英-长石-赤铁矿
L-12	江西宜春宜丰县	巨大的完整六方柱状绿柱石晶体, 带蓝色调, 蓝色浓郁的区域透明度更高, 残余的黄色长石呈脉状、丝状浸染于绿柱石的柱面上, 可见云母等共生矿物
L-13	新疆可可托海	巨大的六方短柱状绿柱石单晶, 蓝至蓝绿色, 透明至半透明, 长石呈脉状、丝状浸染于绿柱石的柱面上, 可见云母等共生矿物
L-14	云南梁河县那俄铍矿	完整的六方柱状绿柱石晶体产于伟晶岩中, 整体呈浅蓝绿色, 微透明, 矿物组合: 绿柱石-长石-云母等
岩浆热液型铍矿床		
L-05	陕西商南	绿柱石单晶体呈不规则块状, 绿色、黄绿色为主, 微透明, 局部为赤铁矿浸染
L-09	云南麻栗坡	绿柱石呈不规则粒状分布于岩石之中, 晶体部分呈浅绿色至黄绿色, 微透明, 矿物组合: 绿柱石-云母-石英
L-10	云南麻栗坡	绿柱石晶体与石英交互生长, 整体呈不规则块状, 翠绿色, 半透明, 裂隙发育
SX-05	陕西核桃坪	绿柱石产于片麻岩中的白色碳酸盐(方解石)脉中, 形成于开放式空间, 呈晶洞状产出。绿柱石晶体呈一致的六方柱状, 翠绿色至蓝绿色, 共生的矿物组合: 石英-方解石-电气石-黑云母-绿柱石

(1) 气液两相包裹体

此类包裹体最为常见, 占比 50%, 呈不规则状、长柱状、椭圆状等(图 2a, d, f, i), 大小 5~15 μm , 气相填充度小于 20%, 均属富液相型气液两相包裹体, 常成群分布或呈线形排列。如新疆阿祖拜 L-07 绿柱石中的长管状气液包裹体, 长度可达到 200~300 μm , 定向分布, 为该区的特征包裹体类型(图 2q)。

(2) 含液相 CO_2 的三相包裹体

此类包裹体较常见, 占比 20%, 一部分呈不规则状或近椭圆状, 大小 10~30 μm , 从外至内依次为盐水溶液或水等液体物质、液相 CO_2 、气相 CO_2 , 两相 CO_2 间边界模糊呈黑色(图 2b, l), 常随机成群分布。另一部分三个相态间有清晰边界, 中间的液相多呈拉长椭圆形(图 2j)。目前仅在新疆阿斯喀尔特 L-03 绿柱石中发现, 是该区特征性包裹体类型, 大小 5~40 μm 。

(3) 含子矿物多相包裹体

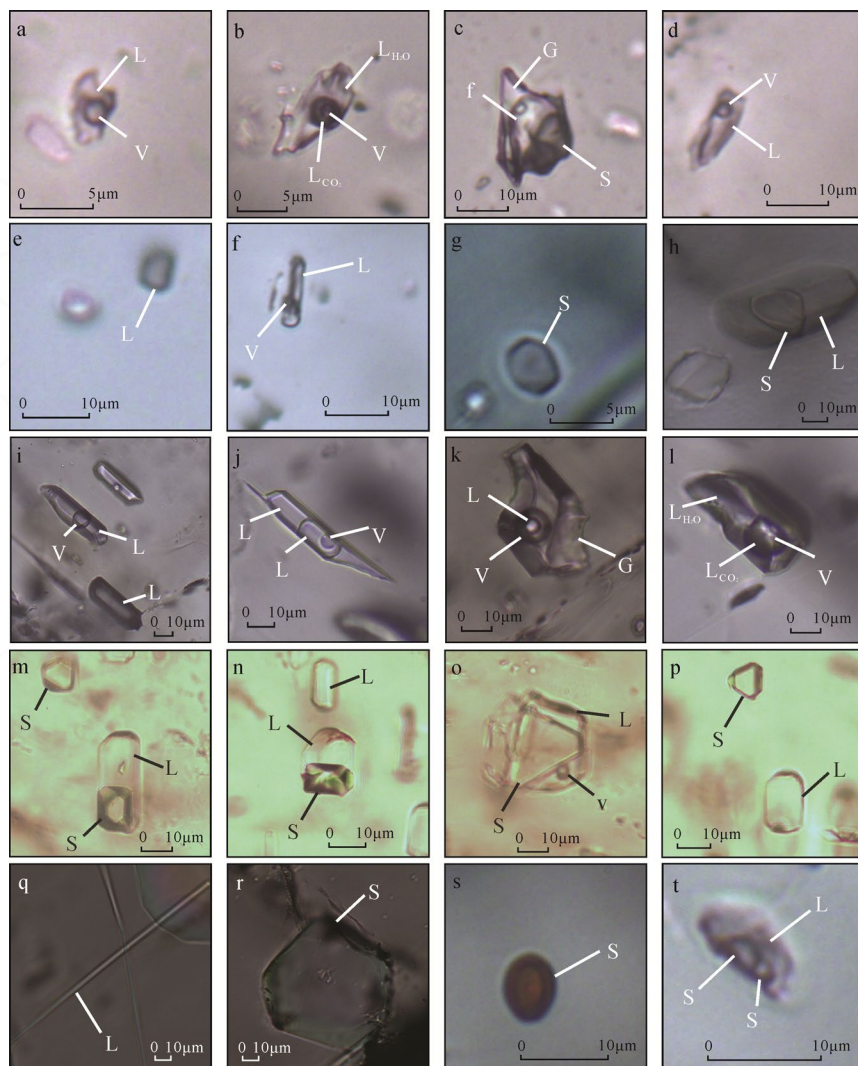
此类包裹体较常见, 占比 15%左右, 由一个或多个子矿物和透明液体组成, 有时内部含有气泡即为固-液-气三相包裹体(图 2o), 子矿物呈近六方板状、三方板状或椭圆状(图 2h, m, n, t), 大小 10~40 μm , 大多成群分布。

(4) 熔融包裹体

此类包裹体仅占 5%左右, 但十分典型, 从外至内依次由玻璃相、流体相、结晶相组成, 流体相中包含气体相和液体相, 立体感强, 呈不规则状(图 2c, k), 大小为 25 μm 左右, 常与含液相 CO_2 的三相包裹体同时存在(图 2k, l)。

(5) 纯液体包裹体

此类包裹体占比 5%左右, 呈长管状、短柱状或椭圆状、浑圆状、拉长椭圆状等, 大小 3~40 μm 不等, 一般为 20 μm 左右, 多与其他类型包裹体相伴出现(图 2e, n, p)。



L—液相; V—气相; S—固相; G—玻璃相; f—流体相。

L—liquid phase; V—gas phase; S—solid phase; G—glass phase; f—fluid phase.

图 2 伟晶岩型铍矿床中绿柱石的包裹体镜下照片

Fig. 2 Microscopic images of beryl inclusions in pegmatitic beryllium deposits

(6) 固体包裹体

此类包裹体占比 5% 以内, 呈长方板状、三方板状、近六边形或不规则状(图 2g, m, r), 大小在 $8\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 多成群分布, 为不透明暗色包裹体, 偶见其他颜色, 如云南梁河县那俄铍矿中 L-14 绿柱石的固体包裹体呈绿色, 推测为绿柱石子晶(图 2p), 以及新疆阿祖拜 L-07 绿柱石中的亮红色晶体包裹体(图 2s)。

3.1.2 岩浆热液型铍矿床

绿柱石中常见含液相 CO_2 的三相包裹体、气液两相包裹体、含子矿物多相包裹体, 其次为固体包裹体和熔融包裹体(图 3)。

(1) 含液相 CO_2 的三相包裹体

此类包裹体最常见, 占比约为 60%, 外观以椭圆形居多, 也有梭形或不规则形状, 大小 $30\sim 80\text{ }\mu\text{m}$, 从内至外依次为气相 CO_2 、液相 CO_2 和液相 H_2O , 其中液相 CO_2 呈黑色浑圆状, 大多界限模糊, 两相 CO_2 充填度约为 45%(图 3c, d, h, k)。

(2) 富液相的气液两相包裹体

此类包裹体较常见, 气相充填度 20%, 属富液相型气液包裹体, 占比 30%~55%, 呈近椭圆状、浑圆状、长柱状、油泼状等不规则形状(图 3f, i), 常与其他类型包裹体成群分布, 大小 $5\sim 25\text{ }\mu\text{m}$, 一般小于 $15\text{ }\mu\text{m}$, 气相充填度小于 30%, 属富液相气液包

裹体, 常呈串珠状成群分布, 具定向性。其中, 云南麻栗坡 L-10 绿柱石样品中气液两相包裹体的气相部分呈黑色, 推测其由水溶液和气相 CO_2 组成。

(3) 含子矿物多相包裹体

此类包裹体较少见, 占比 10% 以内, 外观呈逗号状、不规则状、长柱状、近椭圆状等, 大小 $10\sim 40\text{ }\mu\text{m}$, 一般由液相中包含一至多个晶体相(图 3g, j) 组成, 周围常有气液两相包裹体分布, 一般与富液相气液包裹体处于同一包裹体组合中, 疑似同时被捕获。

(4) 固体包裹体

此类包裹体占比约 5% 左右, 颗粒较大者多具规则外观, 呈近六边形者应为绿柱石负晶(图 3e), 大小在 $5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 常呈串珠状分布或与其他类型的包裹体相伴出现。

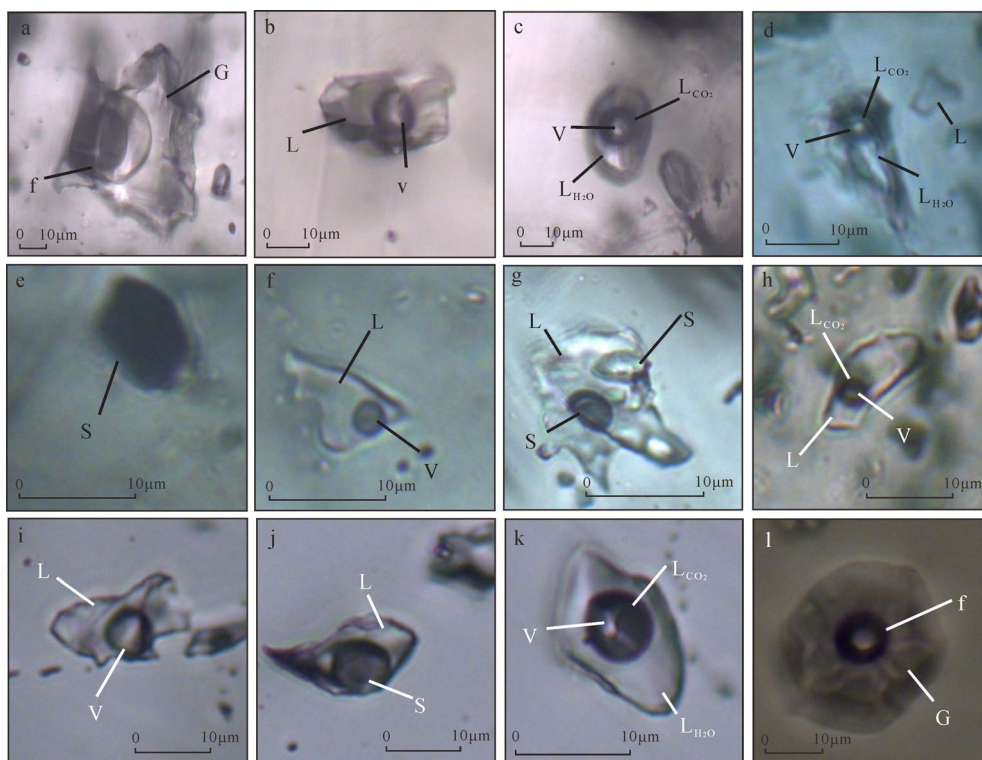
(5) 熔融包裹体

此类包裹体占比约 5%, 以近六方板状或不规则状为主, 由具立体状外观的玻璃相和流体相组成(图 3a, l), 个体尺寸较大为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 常与气液两相包裹体或含液相 CO_2 的三相包裹体成群分布。

3.1.3 绿柱石中包裹体的岩相学特征

(1) 包裹体的类型

绿柱石中包裹体的主要岩相学特征列于表 2。所测绿柱石样品中, 最常见气液两相包裹体, 其次



L—液相; V—气相; S—固相; G—玻璃相; f—流体相。

L—liquid phase; V—gas phase; S—solid phase; G—glass phase; f—fluid phase.

图 3 岩浆热液型铍矿床中绿柱石的包裹体显微镜下照片

Fig. 3 Microscopic images of beryl inclusions in magmatic hydrothermal beryllium deposits

表 2 绿柱石中流体包裹体的岩相学特征
Table 2 Characteristics of fluid inclusions in beryl

矿床类型	样品编号	产地	包裹体的类型	包裹体的尺寸	包裹体的丰度	特征/主要包裹体类型
伟晶岩型	S10-12	新疆大喀拉苏	①气液两相包裹体; ②含液相 CO ₂ 的三相包裹体; ③熔融包裹体	10~25 μm, 一般为 15 μm 左右	包裹体少	气液两相包裹体约占 40%, 属富液相型
	KEQMK	新疆库尔其木克矿	①气液两相包裹体; ②纯液体包裹体; ③固体包裹体	3~40 μm, 一般 10 μm 以内	包裹体少	固体包裹体约占 45%
	L-03	新疆阿斯喀尔特	①气液两相包裹体; ②含液相 CO ₂ 的三相包裹体; ③一般气-液-液三相包裹体; ④纯液体包裹体; ⑤熔融包裹体	5~60 μm, 一般 30~40 μm	包裹体丰富	一般气-液-液三相包裹体为特征, 气液包裹体占 30%, 属富液相型
	L-07	新疆阿祖拜	①固体包裹体; ②长管状气液包裹体; ③含子矿物的多相包裹体	10~75 μm, 一般大于 20 μm	较多	长管状气液包裹体为特征, 固体包裹体占 60%以上
	L-14	云南梁河县那俄铍矿	①固体包裹体; ②含子矿物多相包裹体; ③纯液体包裹体	5~40 μm, 一般 25 μm 左右	包裹体多	含子矿物多相包裹体约占 45%
岩浆热液型	L-05	陕西商南羊泉沟	①气液两相包裹体; ②含液相 CO ₂ 的三相包裹体; ③熔融包裹体	10~80 μm, 一般 30 μm 左右	包裹体数较丰富	含液相 CO ₂ 的三相包裹体约占 45%
	L-09	云南麻栗坡	①含液相 CO ₂ 的三相包裹体; ②纯液体包裹体	10 μm 以内	包裹体少	含液相 CO ₂ 的三相包裹体占 70%以上
	L-10	云南麻栗坡	①气液两相包裹体; ②含子矿物的多相包裹体; ③固体包裹体	5~40 μm, 一般 20 μm 左右	包裹体少	含子矿物包裹体约占 50%
	SX-05	陕西核桃坪	①气液两相包裹体; ②含液相 CO ₂ 包裹体; ③含子矿物的多相包裹体; ④熔融包裹体	3~25 μm, 一般为 15 μm 左右	包裹体较多	含液相 CO ₂ 包裹体约占 45%

为含液相 CO₂ 的三相包裹体和含子矿物多相包裹体, 还可见固体包裹体和熔融包裹体。其中, 气液两相包裹体的液相充填度普遍大于 50%, 均为富液相型。此外, 长管状气液包裹体为新疆阿祖拜绿柱石的特征包裹体, 目前仅在伟晶岩型铍矿床的绿柱石中发现。含液相 CO₂ 的三相包裹体在岩浆热液型绿柱石中明显更为发育。伟晶岩型绿柱石中常见含子矿物多相包裹体与气液两相包裹体同时存在, 岩浆热液型绿柱石中常见熔融包裹体与含液相 CO₂ 的三相包裹体同时存在。

(2)包裹体的大小、丰度和分布

绿柱石中原生流体包裹体的分布形式为单独出现或者沿晶体生长带呈带状成群分布。绿柱石中包裹体的大小差异悬殊, 从 5~80 μm 不等, 大部分包裹体普遍较小。绿柱石中包裹体的丰度不同, 部分绿柱石中尚未形成流体包裹体群, 不具代表性, 其中, KEQMK(新疆库尔其木克)和 L-14(云南梁河那俄)等伟晶岩型绿柱石样品中, 包裹体数量和种类十分丰富, 而大多数岩浆热液型绿柱石中包裹体则较少。

3.2 成分特征

利用拉曼光谱分析仪, 对不同类型绿柱石中包裹体的成分进行了分析, 结果显示:

3.2.1 伟晶岩型铍矿床

气液两相包裹体中, 液相成分主要为 H₂O、CO₃²⁻(图 4a, m), 气相成分主要有 N₂、CO₂、CH₄、C₄H₆(图 4b, n); 固体包裹体成分为石英(图 4f); 熔融包裹体中, 同时含有多个晶体, 其中晶体相为钠长石(图 4c), 流体相含 CO₂、H₂O、HCO₃⁻和有机气体(图 4q, r); 含子矿物的流体包裹体中, 液相主要成分为 H₂O、CO₃²⁻(图 4e, j), 晶体相可见钠长石、云母、石英和绿柱石(图 4d, k, l); 含液相 CO₂ 的三相流体包裹体中, 液相成分为 H₂O、CO₃²⁻、HCO₃⁻(图 4g, h, o), 气相成分主要是 CO₂, 还含有一定量的 CH₄、C₄H₆等有机气体(图 4i, p)。

3.2.2 岩浆热液型铍矿床

气液两相包裹体中, 液相成分主要为 CO₂、H₂O、CO₃²⁻(图 5d, i), 气相主要成分有 CO₂、CH₄、C₄H₆、C₃H₈等(图 5e, f, g, h); 含液相 CO₂ 的三相包裹体中, 液相主要成分为 CO₂、CO₃²⁻、CH₄、C₄H₆(图 5a, b), 气相成分主要是 CO₂(图 5c)。

4 讨论

4.1 绿柱石的流体包裹体成分规律

不同类型铍矿床中绿柱石的包裹体成分汇总

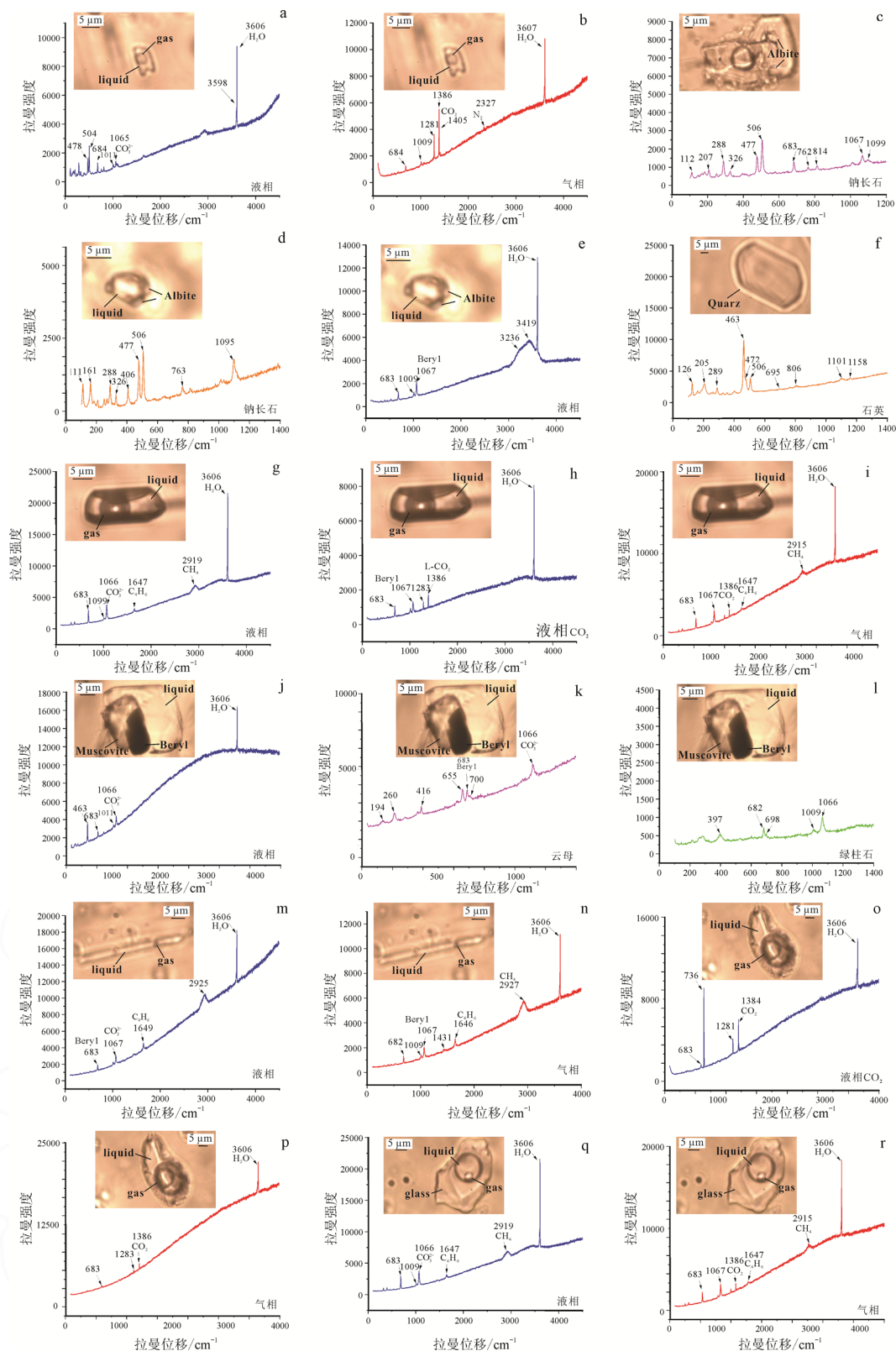


图4 伟晶岩型铍矿床的绿柱石中包裹体拉曼光谱图

Fig. 4 Raman spectra of inclusions in PG-B

于表 3。结果显示,不同类型绿柱石中流体包裹体成分具有一定的相似性,即气相部分同其他包裹体相似,主要由 CO_2 和 N_2 组成,液相主要成分为 H_2O 和 CO_2 ,溶液中还有 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等离子的存在。与前人测得绿柱石中的流体包裹体成分结果基

本一致(叶琳, 2010),证明了本次实验结果的可信性。

此外,针对不同的流体包裹体类型,不同铍矿床中绿柱石的包裹体成分略有不同。气液两相包裹体中,伟晶岩型和岩浆热液型绿柱石的液相成分均

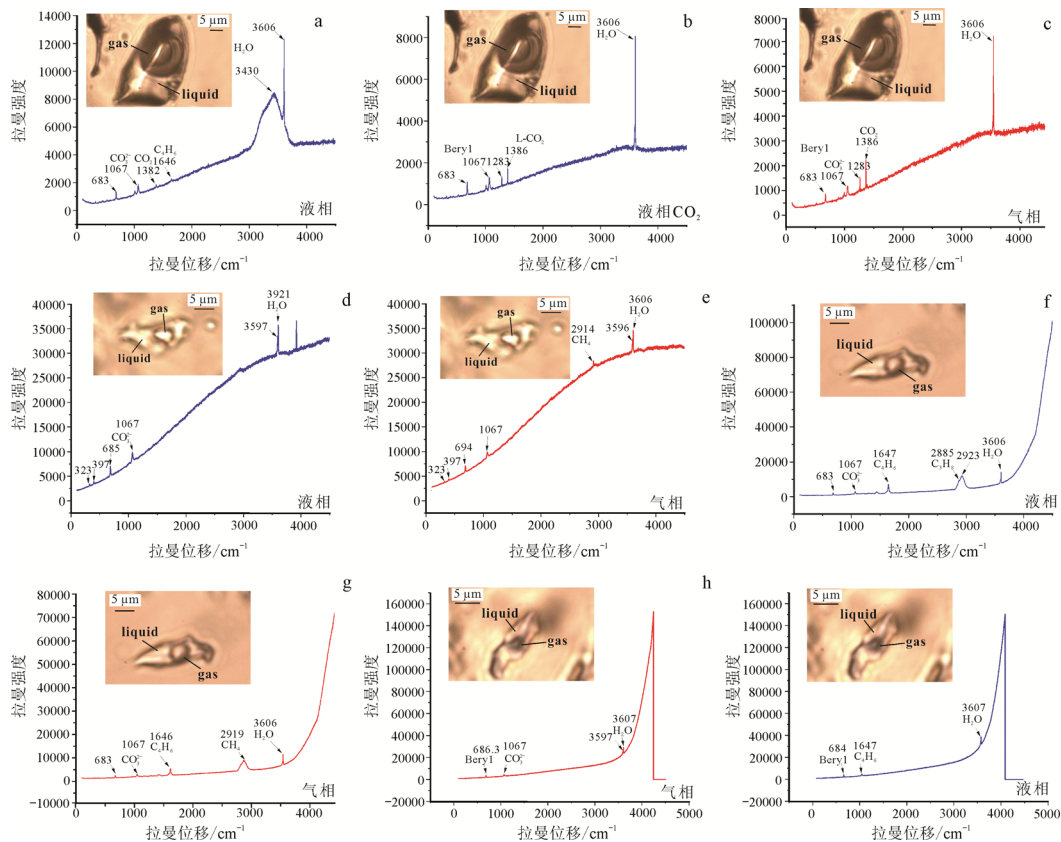


图 5 岩浆热液型铍矿床的绿柱石中包裹体拉曼光谱图
Fig. 5 Raman spectra of inclusions in QV-B

表 3 绿柱石中包裹体的成分特征
Table 3 Compositional characteristics of inclusions in beryl

矿床类型	样品编号	产地	包裹体类型	液相成分	气相成分	固相成分
伟晶岩型	S10-12	新疆大喀拉苏	气液两相包裹体	H ₂ O、CO ₃ ²⁻	N ₂ 、CO ₂	-
			含子矿物多相包裹体	H ₂ O、HCO ₃ ⁻	CO ₂	钠长石
			含子矿物多相包裹体	H ₂ O	-	钠长石
	KEQMK	新疆库尔其木克矿	固体包裹体	-	-	石英
	L-03	新疆阿斯喀尔特	含液相 CO ₂ 的流体包裹体	CO ₃ ²⁻ 、HCO ₃ ⁻	CO ₂ 、CH ₄ 、C ₄ H ₆	-
	L-11、L-12	江西宜春	气液两相包裹体	H ₂ O、CO ₃ ²⁻	CO ₂ 、CH ₄ 、C ₄ H ₆	-
			含液相 CO ₂ 的流体包裹体	H ₂ O、CO ₂	CO ₂	-
	L-13	新疆可可托海	含子矿物多相包裹体	H ₂ O、CO ₂ 、HCO ₃ ⁻	CO ₂	云母、石英、绿柱石
	L-14	云南梁河县那俄铍矿	含子矿物多相包裹体	H ₂ O、CO ₃ ²⁻	-	石英、云母
	L-05	陕西商南羊泉沟	气液两相包裹体	H ₂ O、CO ₃ ²⁻	CO ₂ 、CH ₄ 、C ₄ H ₆	-
岩浆热液型			含液相 CO ₂ 的流体包裹体	CO ₂ 和 CO ₃ ²⁻	CO ₂ 、CH ₄ 、C ₄ H ₆	-
	L-09	云南麻栗坡	气液两相包裹体	H ₂ O、CO ₃ ²⁻	CO ₂ 、CO ₃ ²⁻	-
	L-10	云南麻栗坡	气液两相包裹体	H ₂ O、CO ₃ ²⁻	CH ₄	-
	SX-05	陕西核桃坪	气液两相包裹体	H ₂ O、CO ₃ ²⁻	CH ₄ 、C ₄ H ₆ 、C ₃ H ₈ 、H ₂ O	-

为 H₂O 和 CO₃²⁻，气相成分都含有 CO₂、CH₄、C₄H₆，此外伟晶岩型绿柱石中还测得 N₂ 成分，相比之下，岩浆热液型绿柱石流体包裹体中的 CH₄、C₄H₆、C₃H₈ 等有机质气体更丰富，从而指示相对还原环境(胡志康, 2019); 在岩浆热液型绿柱石中较典型和常见的含液相 CO₂ 的流体包裹体，气相成分为 CO₂、CH₄、C₄H₆，液相成分主要为 CO₂、H₂O，还含有 CO₃²⁻ 或 HCO₃⁻；伟晶岩型绿柱石中常见的含子矿物

多相包裹体中，晶体相成分为石英、云母、钠长石和绿柱石等矿物，这些在岩浆热液型绿柱石中几乎不可见。

推测出现以上差异的原因如下：一方面，不同于岩浆热液型铍矿床，伟晶岩中晶体快速结晶而非缓慢结晶(李建康等, 2017)，部分原生矿物包裹体或同生晶体包裹体在熔体迅速结晶过程中，将其与气体和液体同时被捕获进入伟晶岩型绿柱石中，形成

了含子矿物的多相包裹体;岩浆热液型绿柱石通常经历了强烈的流体渗透和交代作用而形成,蚀变交代过程之后,伟晶岩中的石英、云母等矿物被溶解,故此类绿柱石中少见含子晶的流体包裹体。

另一方面,岩浆热液型绿柱石包裹体中的有机质和甲烷类气体含量更高,推测是受到绿柱石主要组分 Al_2O_3 活度的影响。绿柱石和硅铍石是一对相似的矿物,两者主要差异在于其形成时的温压条件不同,自然界中以(羟)硅铍石为主,是因为绿柱石形成需要的温度和压力更高,本质原因是 Al_2O_3 只有在高温高压条件下才具有更高的活度,才有可能形成绿柱石(李建康等, 2017)。同时, Al_2O_3 作为氧化剂在活度更高时,氧化性更强。据此分析,由于岩浆热液型绿柱石是在岩浆不混溶作用后产生的气成热液进一步与围岩交代所形成,在此过程中,岩浆温度不断降低,其中的 Al_2O_3 活度亦不断降低,导致氧化性相对较弱,形成了相对还原环境。

4.2 H_2O 和 CO_2 对绿柱石成矿作用的影响

由表 3 可以看出,不同类型铍矿床中绿柱石的流体包裹体中均含 CO_2 和 H_2O 两种成分,推测二者与绿柱石的成矿作用存在一定联系。

稀有金属花岗岩浆通常具有两种分异机制——结晶分异和液态不混溶,从而形成不同的花岗岩型或花岗伟晶岩型矿床(丁欣, 2016; 姜雪等, 2019)。岩浆演化早期,富 H_2O 花岗岩常发生岩浆不混溶作用,分离出富水和贫水的流体,后各自演化分离结晶,富水型流体形成大量的伟晶岩脉,在其中形成粗大的伟晶岩型绿柱石晶体;岩浆充分结晶分异作用的晚期,残余的 H_2O 饱和熔体向外扩散进一步与围岩发生蚀变交代作用产生岩浆热液型绿柱石。然而,无论是岩浆结晶分异还是液态不混溶机制,都基于岩浆中有充足的 H_2O 含量。富 H_2O 熔体具有较低的成核密度,晶体可以更快生长,这归因于 H_2O 同时充当挥发分和矿化剂两个角色, H_2O 与 F、K 等矿化剂通过与其他金属元素结合,形成溶解度高、易挥发的络合物,并逐渐在伟晶岩中富集,可以降低介质的黏度,从而促进结晶物质的快速迁移与沉淀;高含量的 H_2O 还有利于增加 F、 N_2 、 CO_2 这些挥发分的溶解度,大量挥发分的存在可以降低结晶温度,其携带的巨大热量,可以促进岩浆熔体的长期而缓慢结晶,同时也促进了岩浆的高度分异演化。

研究表明, H_2O 的溶解度很大程度上也受到压力和 CO_2 的影响,而 CO_2 的溶解度一般较为有限,通常受温度、压力、岩浆成分等因素的影响。 CO_2 对于形成绿柱石的影响,一种观点认为,虽然 CO_2 本身对金属溶解度的影响有限,但是可以促进岩浆

液态不混溶作用和加强含 Be 气相的分离和演化,使得有用元素运移沉淀形成绿柱石,这是绿柱石矿床及其他稀有金属矿床形成的一个重要机制(丁欣等, 2016)。另一种观点则认为 CO_2 的存在对于流体的介电常数和 pH 值有一定影响(胡志康, 2019),打破了熔体的酸碱平衡,形成了偏铝型至过铝型成矿系统,使得绿柱石矿物从中结晶析出。目前,尚未有研究证实, CO_2 在绿柱石成矿作用过程中起到的具体作用,但可以确定的是,富含 CO_2 、 H_2O 成分的流体更有利于绿柱石的形成。

4.3 铍矿床中绿柱石的流体包裹体的捕获机制

由于岩浆从上升、侵位到冷却结晶经历了岩浆结晶分异过程,该过程分为三个阶段:正岩浆阶段→岩浆-热液过渡阶段→热液阶段。不同包裹体类型代表岩浆演化的不同阶段,并保存于矿物之中(胡志康, 2019)。首先岩浆形成初期的正岩浆阶段,两个凝聚相之间达到平衡时,体系中的熔体相和晶体相通常共存,即出现矿物中的熔融包裹体;接下来,在岩浆-热液过渡阶段,会出现熔体相、晶体相和流体相三相平衡现象;最终,随着温度进一步降低和结晶作用不断进行,体系中的熔体相逐渐消失,仅存的流体相和晶体相两相之间达到平衡关系,自此往后便是热液阶段。

本次研究发现,岩浆热液型绿柱石中常见熔融包裹体与含液相 CO_2 的三相包裹体同时存在,显示两者的形成具有相关性。熔融包裹体指示绿柱石的成矿流体演化机制为岩浆演化晚期的液态不混溶作用(单强等, 2007; 黄文清, 2014)。本文将绿柱石中熔融包裹体分为两类:一类由玻璃相和流体相两部分组成,是由于矿物生长过程中将共存的硅酸盐熔体相和岩浆流体相一起捕获,随着温度下降导致熔体部分演变为玻璃质;另一类由玻璃相、晶体相和流体相三部分组成,是因为晶体生长过程中先俘获了均一的硅酸盐熔体相,在封闭的系统中,结晶出硅酸盐晶体相,同时分离出流体相。流体相成分主要为 CO_2 和 H_2O ,晶体相一般为钠长石和石英等(Thomas et al., 2009; 卢焕章等, 2015)。由绿柱石中富液相 CO_2 三相包裹体与熔融包裹体常常共存这一现象(图 3a, c),推测富液相 CO_2 三相包裹体的形成过程是 H_2O - CO_2 气液两相包裹体随温度下降,气相成分中 CO_2 含量降低,发生液态不混溶作用,逐渐分离出液相 CO_2 。同时表明岩浆热液型铍矿床是形成于岩浆演化晚期,以岩浆不混溶作用为主要形成机制。

本次研究的部分伟晶岩型绿柱石中存在含子晶多相包裹体,且通常与气液包裹体及其衍生包裹体如纯液相包裹体等同时存在,可能对绿柱石的产

出环境具有指示意义。含硅酸盐子晶流体包裹体代表岩浆-热液过渡阶段时的一种超临界流体相(秦克章等, 2021), 通常认为在这一过渡阶段分离出的流体中溶质含铍铝硅酸盐, 溶剂以 NaCl 和 H_2O 为主, 生长于伟晶岩脉的绿柱石先将分离出的流体相捕获, 之后随着温度和压力下降, 溶质部分缓慢结晶沿包裹体壁形成硅酸盐子矿物, 溶剂部分成分复杂, 可演化为气液两相包裹体, 而后经降温形成含液相 CO_2 的三相包裹体, 与本研究测得的包裹体组合一致。

当伟晶岩内部结晶分异演化到热液阶段时, 所捕获的流体相, 随温度和压力的降低, 进一步形成含液相 CO_2 的三相包裹体、气液两相包裹体, 以及纯液体包裹体等多种组合的流体包裹体, 解释了本文 L-14(云南梁河那俄)绿柱石中大量纯液体包裹体与含子矿物多相包裹体普遍共存的现象(图 2n, p)。因此, 含硅酸盐子晶流体包裹体和气液包裹体是伟晶岩岩浆体系演化不同阶段的反映, 当两者及其衍生包裹体同时存在于绿柱石中, 可表明绿柱石形成于岩浆-热液过渡→热液阶段。

5 结论

(1) 绿柱石中原生流体包裹体类型丰富, 常单独出现或沿晶体生长带定向分布, 大小 $5\sim 80\ \mu\text{m}$ 不等, 常见富液相型气液两相包裹体, 其次为含液相 CO_2 的三相包裹体和含子矿物多相包裹体, 偶见固体包裹体和熔融包裹体。伟晶岩型绿柱石中包裹体数量和种类相对更为丰富, 常见含子晶多相包裹体和气液包裹体普遍共存; 而岩浆热液型绿柱石中包裹体则普遍较少, 以含液相 CO_2 的三相包裹体为主, 可见与熔融包裹体共存。

(2) 不同类型绿柱石的流体包裹体成分具有一定的相似性, 气相主要由 CO_2 和 N_2 组成, 液相主要为 H_2O 和 CO_2 及部分 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等离子。伟晶岩型绿柱石中含子矿物多相包裹体的晶体相成分为石英、云母、钠长石和绿柱石等矿物, 是由伟晶岩中晶体快速结晶而非缓慢结晶导致; 岩浆热液型绿柱石流体包裹体中的 CH_4 、 C_4H_6 、 C_3H_8 等有机质气体更丰富, 指示相对还原环境, 且受到了氧化剂 Al_2O_3 活度的影响。

(3) 富含 CO_2 、 H_2O 的流体更有利于绿柱石的形成, 岩浆热液型绿柱石形成于岩浆演化晚期的热液阶段, 伟晶岩型绿柱石形成于岩浆-热液过渡→热液阶段, 形成机制为岩浆的结晶分异和液态不混溶作用。

致谢: 感谢中国地质科学院矿产资源研究所王登红研究员、熊欣博士、秦锦华博士和张珈铭师兄对论

文写作进行了指导, 并在实验中给予的帮助。感谢中国地质科学院矿产资源研究所王成辉教授级高工、代鸿章副研究员, 长安大学梁婷教授, 四川地质调查院郝雪峰高级工程师等人经野外一线采集提供的绿柱石样品。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42172007), and China Geological Survey (Nos. DD20221695, DD20190379 and DD20160346).

参考文献:

- 陈志军, 万世明, 吕新彪, 王文魁. 2002. 四川省平武县绿柱石中的流体包裹体研究[J]. 地质科技情报, 21(3): 65-68, 73.
- 代鸿章, 王登红, 刘丽君, 黄凡, 王成辉. 2018. 电子探针和微区 X 射线衍射研究陕西镇安钨-铍多金属矿床中祖母绿级绿柱石[J]. 岩矿测试, 37(3): 336-345.
- 代鸿章, 王登红, 刘丽君, 黄凡, 王成辉. 2019. 南秦岭镇安核桃坪钨铍矿床成矿时代及成矿模式探讨[J]. 地质学报, 93(6): 1342-1358.
- 单强, 牛贺才, 于学元, 罗勇, 曾乔松. 2007. 新疆可可托海三号伟晶岩脉的熔融包裹体研究[C]//地质流体和流体包裹体研究国际学术会议暨第十五届全国流体包裹体会议论文集: 163-164.
- 丁欣, 李建康, 丁建刚, 王赛, 刘永超, 王娟. 2016. 新疆阿斯喀尔特 Be-Nb-Mo 矿床 Re-Os 同位素年龄及地质意义[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 60-65.
- 丁欣. 2016. 新疆阿斯喀尔特花岗岩型铍矿床成矿机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 丁子龙, 姜颖, 俞浪, 杨远明, 左雨, 汤雨彤. 2022. 湖南仁里海蓝宝石的谱学特征研究[J]. 世界有色金属, (6): 152-155.
- 冯京, 贾红旭, 徐仕琪, 陈建中, 谭克彬, 王厚方, 张朋. 2021. 西昆仑大红柳滩矿集区伟晶岩型锂铍矿床找矿模型及意义[J]. 新疆地质, 39(03): 410-417.
- 郭碧君. 2016. 云南麻栗坡祖母绿矿床矿物共生组合关系的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 韩珂. 2021. 南秦岭宁陕-镇安一带钨钼金多金属矿集区控矿构造-岩浆-流体-成矿规律与找矿预测[D]. 西安: 长安大学.
- 胡志康. 2019. 藏南绿柱石的包裹体研究及成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 黄文清, 倪培, 水汀, 杨佩. 2015. 云南麻栗坡祖母绿的矿物学特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 34(1): 103-109.
- 黄文清. 2014. 云南麻栗坡祖母绿矿床的矿物学与流体包裹体研究[D]. 南京: 南京大学.
- 姜雪, 余晓艳, 郭碧君, 徐鐔. 2019. 云南麻栗坡祖母绿的矿物包裹体特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 38(2): 279-286.
- 李建康, 邹天人, 王登红, 丁欣. 2017. 中国铍矿成矿规律[J]. 矿床地质, 36(4): 951-978.
- 李强, 杨富全, 杨成栋. 2019. 新疆阿尔泰大喀拉苏花岗岩年代

- 学、地球化学特征及其构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 41(4): 396-413.
- 李尚, 梁婷, 高景刚, 周义, 任文琴, 李聪, 丁亮, 陈永康. 2018. 新疆阿斯喀尔特铍矿床特征及成矿时代研究[J]. 世界有色金属, (23): 110-111.
- 李兆麟, 杨荣勇, 李文, 翟伟, 毛艳华. 1998. 中国不同成因伟晶岩形成的物理化学条件[J]. 地质科技情报, 17(S1): 30-35.
- 李兆麟, 张文兰, 李文, 翟伟, 石贵勇. 2000. 云南哀牢山和新疆可可托海伟晶岩矿物中熔融包裹体电子探针研究[J]. 高校地质学报, 6(4): 509-522.
- 梁飞. 2018. 我国铍资源特征、供需预测与发展探讨[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 梁婷. 1999. 云南与哥伦比亚祖母绿宝石学特征对比研究[D]. 成都: 成都理工学院.
- 林龙华, 徐九华, 魏浩, 陈栋梁, 徐伟, 刘泽群, 王燕海. 2012. 新疆阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉绿柱石流体包裹体 SRXRF 研究[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 603-611.
- 刘斌, 沈昆. 2000. 新疆海蓝宝石中包裹体特征、形成条件和鉴别专属性[J]. 岩石学报, 16(4): 633-638.
- 刘琰, 邓军, 蔡克勤, 周彦, 王庆飞, 周应华, 高帮飞, 李德秀, 徐福玉, 朱悦荣. 2005. 四川平武板状绿柱石矿物学特征及板状成因[J]. 地学前缘, 12(2): 324-331.
- 卢焕章, 王蝶, 单强. 2015. 岩浆熔体包裹体研究正当时[J]. 矿物学报, 35(S1): 607.
- 卢焕章. 2014. 流体包裹体岩相学的一些问题探讨[J]. 高校地质学报, 20(2): 177-184.
- 秦克章, 周起凤, 唐冬梅, 王春龙, 朱丽群. 2021. 阿尔泰可可托海 3 号脉花岗伟晶岩侵位机制、熔-流体演化、稀有金属富集机理及待解之谜[J]. 地质学报, 95(10): 3039-3053.
- 阮青锋, 张良钊, 张昌龙, 雷威, 饶灿, 廖宝丽, 曾伟来. 2008. 绿柱石的成因与特征的研究[J]. 矿产与地质, (3): 265-269.
- 陶湘媛, 谢磊, 王汝成, 章荣清, 胡欢, 刘晨. 2020. 绿柱石的矿物学特征: 以喜马拉雅错那和珠峰地区绿柱石为例[J]. 南京大学学报(自然科学), 56(6): 815-829.
- 王登红, 陈毓川, 邹天人, 徐志刚, 李华芹, 陈文, 陈富文, 田锋. 2000. 新疆阿尔泰阿祖拜稀有金属-宝石矿床的成矿时代——燕山期稀有金属成矿的新证据[J]. 地质论评, 46(3): 307-311.
- 王臻. 2021. 川西甲基卡伟晶岩型锂矿床岩浆-热液演化与成矿的矿物学示踪[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 熊欣, 丁欣, 李建康, 李鹏, 邓静仪, 张珈铭. 2022. 川西甲基卡花岗伟晶岩的锂铍成矿作用过程——来自 308 号脉流体包裹体的约束[J]. 岩石学报, 38(2): 323-340.
- 燕利军, 王胜江, 陈曹军, 严志安, 余中明, 邓志祥, 吴清华, 殷伟. 2021. 滇西梁河县新发现那俄铍矿岩石地球化学特征及铍成矿事件[J]. 地质与勘探, 57(4): 739-750.
- 叶琳. 2010. 新疆、内蒙两地伟晶岩中绿柱石流体包裹体研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 赵可含. 2021. 湖南平江绿柱石的矿物学及地球化学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 周天怡, 陈衍景, 张辉. 2014. 新疆阿尔泰伟晶岩中绿柱石拉曼光谱特征研究——以可可托海 3 号脉与阿祖拜 328、528 号脉为例[J]. 岩石矿物学杂志, 33(S2): 77-84.
- 邹天人. 1996. 新疆阿斯喀尔特似伟晶岩型海蓝宝石-绿柱石矿床[J]. 矿床地质, 15(S1): 38-40.

References:

- BARTON M D, YOUNG S. 2002. Non-pegmatitic Deposits of Beryllium: Mineralogy, Geology, Phase Equilibria and Origin[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 50(1): 591-691.
- CHEN Zhi-jun, WAN Shi-ming, LV Xin-biao, WANG Wen-kui. 2002. Study on fluid inclusions in beryl from Pingwu, Sichuan Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 21(3): 65-68, 73(in Chinese with English abstract).
- DAI Hong-zhang, WANG Deng-hong, LIU Li-jun, HUANG Fan, WANG Cheng-hui. 2018. Study on emerald-level beryl from Zhen'an W-Be polymetallic deposit in Shaanxi Province by electron probe microanalyzer and micro X-ray diffractometer[J]. Rock and Mineral Analysis, 37(3): 336-345(in Chinese with English abstract).
- DAI Hong-zhang, WANG Deng-hong, LIU Li-jun, HUANG Fan, WANG Cheng-hui. 2019. Metallogenic epoch and metallogenic model of the Hetaoping W-Be deposit in Zhen'an County, South Qinling[J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1342-1358(in Chinese with English abstract).
- DING Xin, LI Jian-kang, DING Jian-gang, WANG Sai, LIU Yong-chao, WANG Xian. 2016. Molybdenite Re-Os isochron age and geological implication in Asikaerte Be-Nb-Mo deposit of Xinjiang[J]. Journal of Guilin University of Technology, 36(1): 60-65(in Chinese with English abstract).
- DING Xin. 2016. Ore-forming mechanism of the asikaerte granite type beryllium deposit in Xinjiang, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- DING Zi-long, JIANG Ying, YU Lang, YANG Yuan-ming, ZUO Yu, TANG Yu-tong. 2022. Study on the spectral characteristics of aquamarine from Renli, Hunan Province[J]. World Nonferrous Metals, (6): 152-155(in Chinese with English abstract).
- FENG Jing, JIA Hong-xu, XU Shi-qi, CHEN Jian-zhong, TAN Ke-bin, WANG Hou-fang, ZHANG Peng. 2021. Prospecting Model and Significance of Pegmatite type lithium beryllium Deposit in Dahongliutan Ore concentration Area, West Kunlun[J]. Xinjiang Geology, 39(03): 410-417(in Chinese).
- GUO Bi-jun. 2016. Study on paragenetic association of minerals in Malipo emerald deposit from Yunnan province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).

English abstract).

- HAN Ke. 2021. Ore-controlling structure-magma- fluid-metallogenetic regularity and prospecting prediction in the W-Mo-Au polymetallic ore concentration area in Ning-shan-Zhen'an area, South Qinling[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- HU Zhi-kang. 2019. Fluid inclusions features and genesis of beryls from Cuonadong gneiss dome, southern Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- HUANG Wen-qing, NI Pei, SHUI Ting, YANG Pei. 2015. Mineralogical characteristics of emerald from Malipo, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(1): 103-109(in Chinese with English abstract).
- HUANG Wen-qing. 2014. Mineralogical and fluid inclusion study on the Malipo emerald deposit in Yunnan Province, China[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese with English abstract).
- JIANG Xue, YU Xiao-yan, GUO Bi-jun, XU Chun. 2019. A study of mineral inclusions in emeralds from Malipo, Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(2): 279-286(in Chinese with English abstract).
- KHILLER V V. 2017. Detection of beryllium in oxides and silicates by electron-probe microanalysis[J]. *News of the Ural State Mining University*, 4: 52-56.
- LI Jian-kang, ZOU Tian-ren, WANG Deng-hong, DING Xin. 2017. A review of beryllium metallogenic regularity in China[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 951-978(in Chinese with English abstract).
- LI Qiang, YANG Fu-quan, YANG Cheng-dong. 2019. Geochronology and geochemical characteristics of Dakalasu granite in Altay of Xinjiang, China and their tectonic significance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(4): 396-413(in Chinese with English abstract).
- LI Shang, LIANG Ting, GAO Jing-gang, ZHOU Yi, REN Wen-qin, LI Cong, DING Liang, CHEN Yong-kang. 2018. Study on the Characteristics and Metallogenic Age of the Ascalte Beryllium Deposit in Xinjiang Province[J]. *World Nonferrous Metals*, (23): 110-111(in Chinese with English abstract).
- LI Zhao-lin, YANG Rong-yong, LI Wen, ZHAI Wei, MAO Yan-hua. 1998. Forming physicochemical condition of different genetic pegmatites in China[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 17(S1): 30-35(in Chinese with English abstract).
- LI Zhao-lin, ZHANG Wen-lan, LI Wen, ZHAI Wei, SHI Gui-yong. 2000. Electronic microprobe study on the melt inclusions in pegmatite minerals from Ailaoshan and Keketuohai pegmatite deposits[J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(4): 509-522(in Chinese with English abstract).
- LIANG Fei. 2018. General situation, supply and demand forecast and development strategy of beryllium resources in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- LIANG Ting. 1999. Comparative study on the characteristics of emeralds in Yunnan and Colombia[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- LIN Long-hua, XU Jiu-hua, WEI Hao, CHEN Dong-liang, XU Wei, LIU Ze-qun, WANG Yan-hai. 2012. SRXRF study of fluid inclusions in beryl from the Keketokay No.3 pegmatite vein, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 603-611(in Chinese with English abstract).
- LIU Bin, SHEN Kun. 2000. Characteristics, formation conditions and distinguishing specialization of inclusions in the aquamarines in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 633-638(in Chinese with English abstract).
- LIU Yan, DENG Jun, CAI Ke-qin, ZHOU Yan, WANG Qing-fei, ZHOU Ying-hua, GAO Bang-fei, LI De-xiu, XU Fu-yu, ZHU Yue-rong. 2005. Mineralogical characteristics of beryl in Pingwu County, Sichuan Province, south-west China[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 324-331(in Chinese with English abstract).
- LU Huan-zhang, WANG Die, SHAN Qiang. 2015. The time to study magmatic melt inclusions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 607(in Chinese).
- LU Huan-zhang. 2014. Fluid inclusion petrography: A discussion[J]. *Geological Journal of China Universities*, 20(2): 177-184(in Chinese with English abstract).
- LUM J E, VILKOEN F, CAIRNCROSS B, FREI D. 2016. Mineralogical and geochemical characteristics of beryl (aquamarine) from the Erongo Volcanic Complex, Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 124: 104-125.
- MICHALLIK R M, WAGNER T, FUSSWINKEL T. 2021. Late-stage fluid exsolution and fluid phase separation processes in granitic pegmatites: Insights from fluid inclusion studies of the Luumäki gem beryl pegmatite (SE Finland)[J]. *Lithos*, 380-381: 105852.
- QIN Ke-zhang, ZHOU Qi-feng, TANG Dong-mei, WANG Chun-long, ZHU Li-qun. 2021. The emplacement mechanism, melt-fluid evolution, rare-element metallogenesis and puzzles of the Koktokay No.3 pegmatite rare elemental deposit, Altai[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3039-3053(in Chinese with English abstract).
- RUAN Qing-feng, ZHANG Liang-ju, ZHANG Chang-long, LEI Wei, RAO Can, LIAO Bao-li, ZENG Wei-lai. 2008. Genesis and characteristics of beryl[J]. *Mineral Resources and Geology*, (3): 265-269(in Chinese with English abstract).
- SHAN Qiang, NIU He-cai, YU Xue-yuan, LUO Yong, ZENG Qiao-song. 2007. Research on melting inclusions of the Keketuohai No.3 pegmatite die in Xinjiang[C]//International

- Academic Conference on Geological Fluids and Fluid Inclusions and the 15th National Fluid Inclusion Experience Argumentative Proceedings: 163-164(in Chinese).
- TAO Xiang-yuan, XIE Lei, WANG Ru-cheng, ZHANG Rong-qing, HU Huan, LIU Chen. 2020. Mineralogical characteristics of beryl: A case study of the beryls from Cuona and Qomolangma district in Himalaya[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 56(6): 815-829(in Chinese with English abstract).
- THOMAS R, DAVIDSON P, BADANINA E. 2009. A melt and fluid inclusion assemblage in beryl from pegmatite in the Orlovka amazonite granite, East Transbaikalia, Russia: implications for pegmatite-forming melt systems[J]. Mineralogy and Petrology, 96: 129-140.
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, ZOU Tian-ren, XU Zhi-gang, LI Hua-qin, CHEN Wen, CHEN Fu-wen, TIAN Feng. 2000. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the Azubai rare metal-gem deposit in Altay, Xinjiang——New evidence for Yanshanian mineralization of rare metals[J]. Geological Review, 46(3): 307-311(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhen. 2021. Mineralogical tracing of magmatic-hydrothermal evolution and mineralization of Jiajika pegmatite type lithium deposit, Western Sichuan, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- XIONG Xin, DING Xin, LI Jian-kang, LI Peng, DENG Jing-yi, ZHANG Jia-ming. 2022. Metallogenic process of the Jiajika Li-Be deposit in West Sichuan: Constraints from fluid inclusions of No.308 pegmatite[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(2): 323-340(in Chinese with English abstract).
- YAN Li-jun, WANG Sheng-jiang, CHEN Cao-jun, YAN Zhi-an, SHE Zhong-ming, DENG Zhi-xiang, WU Qing-hua, YIN Wei. 2021. Petrochemical characteristics and metallogenic process of the newly discovered Na'e beryllium deposit in the Lianghe area, western Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 57(4): 739-750(in Chinese with English abstract).
- YE Lin. 2010. Study on fluid inclusions in beryl from pegmatite of Xinjiang and Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Ke-han. 2021. Mineralogy and metallogenic characteristics of beryl in Pingjiang, Hunan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Tian-yi, CHEN Yan-jing, ZHANG Hui. 2014. Comparative laser Raman spectroscopy study of green beryls from Azubai and Kokotokay pegmatite veins in Altay, Xinjiang[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(S2): 77-84(in Chinese with English abstract).
- ZOU Tian-ren. 1996. Ascalte pegmatite-like aquamarine-beryl deposit in Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 15(S1): 38-40(in Chinese).