

川西甲基卡花岗伟晶岩型锂矿床中熔体、流体包裹体固相物质研究

熊欣^{1,2}, 李建康¹, 王登红¹, 刘丽君^{1,2}, 代洪章¹

(1. 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; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 川西甲基卡二云母花岗岩和伟晶岩内发育大量原生熔体包裹体和富晶体流体包裹体。为了查明甲基卡成矿熔体、流体性质与演化特征, 运用激光拉曼光谱和扫描电镜鉴定了甲基卡花岗伟晶岩型锂矿床中二云母花岗岩及伟晶岩脉不同结构带内的原生熔体、流体包裹体的固相物质。分析结果表明, 甲基卡二云母花岗岩石英内熔体包裹体的矿物组合为磷灰石 + 白云母、白云母 + 钠长石、白云母 + 石墨; 伟晶岩绿柱石内富晶体流体包裹体的矿物组合主要为刚玉、富铝铁硅酸盐 + 刚玉 + 锂辉石、锂辉石 + 石英 + 锂绿泥石; 伟晶岩锂辉石内富晶体流体包裹体的矿物组合主要为磷灰石、锡石、磁铁矿、石英 + 钠长石 + 锂绿泥石、萤石、富钙镁硅酸盐 + 富铁铝硅酸盐 + 富铁硅酸盐 + 石英; 花岗岩浆熔体与伟晶岩浆熔体(流体)具有一定的差异, 成矿熔体、流体成分总体呈现出碱质元素(Na、Si、Al)、挥发分(F、P、CO₂)含量增高及基性元素(Fe、Mg、Ca)降低的特征; 包裹体中子矿物与主矿物的化学成分具有一定的差别, 揭示出伟晶岩熔体(流体)存在局部岩浆分异作用, 具不混溶性及非均匀性。因此认为, 伟晶岩熔浆(流体)为岩浆分异与岩浆不混溶共同作用的产物, 挥发分含量的增高(F、P、CO₂)使伟晶岩能够与稀有金属组成各类络合物或化合物, 这对于稀有金属成矿起到了至关重要的作用。

关键词: 固相物质; 花岗伟晶岩; 锂矿床; 激光拉曼光谱; 扫描电镜; 局部岩浆分异

中图分类号: P618.71; P611

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)02-0241-13

A study of solid minerals in melt inclusions and fluid inclusions from the Jiajika pegmatite-type lithium deposit

XIONG Xin^{1,2}, LI Jian-kang¹, WANG Deng-hong¹, LIU Li-jun^{1,2} and DAI Hong-zhang¹

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A large number of primary melt inclusions and crystal-rich fluid inclusions are developed in two-mica granites and pegmatites in Jiajika deposit, western Sichuan. In this study, the authors identified the mineral types of glass from melt inclusions of quartz in two-mica granite and daughter minerals from fluid inclusions of beryl and spodumene in pegmatites by means of laser Raman and scanning electron microscopy. According to the experimental results, Jiajika glass from melt inclusions of quartz in two-mica granite consists mainly of apatite + muscovite, muscovite + albite and muscovite + graphite. Crystals from fluid inclusions of beryl comprise mainly corundum,

收稿日期: 2018-03-14; 接受日期: 2019-01-04; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41703048); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(YYWF201520); 中国地质调查局地质矿产调查评价专项项目(DD20160055)

作者简介: 熊欣(1989-), 女, 助理研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: XiongXin_1989@163.com; 通讯作者: 李建康(1976-), 研究员, 博士生导师, 主要从事成矿流体研究, E-mail: li9968@126.com。

alumina-rich ferrosilicate + corundum + spodumene, spodumene + quartz + lithium chlorite. Crystals from fluid inclusions of spodumene are composed mainly of apatite, cassiterite, magnetite, quartz + albite + lithium chlorite, fluorite, calcium-magnesium-rich silicate + alumina-rich ferrosilicate + ferrosilicate + quartz. From early granite to pegmatite, the melts and fluids in the metallogenic melt and fluid in general showed high values of Na, Si, Al and F, and decrease of Fe, Mg and Ca. The ore-forming fluid of early granitic pegmatite magma to beryl and spodumene subminerals showed inheritance and some differences, with the existence of local pegmatite magma, magma immiscibility and non-uniformity. The increase of volatilization content of F, P and CO₂ in pegmatite played an important role in the mineralization of rare metals.

Key words: solid minerals; granitic pegmatite; lithium deposit; laser Raman spectrum; scanning electron microscope; local magma differentiation

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41573038); Fundamental Research Funds for Central Public Welfare Research Institutes (YYWF201520); Project of China Geological Survey (DD20160055)

作为岩浆-热液阶段的产物,花岗伟晶岩型矿床的成矿熔体、流体通常经历了岩浆、岩浆-热液和热液3个阶段的演化(Cuney *et al.*, 1992; Schwartz, 1992; Raimbault *et al.*, 1995; Yin *et al.*, 1995; Helba *et al.*, 1997; 李建康等, 2007; Li and Chou, 2016),花岗岩-伟晶岩内往往发育大量熔体、富晶体的多相流体包裹体(London, 1986; 卢焕章等, 1996; 朱金初等, 2000; 李兆麟等, 2000; 李建康等, 2006, 2007; Li and Chou, 2016, 2017),如加拿大Tanco锂铍矿床(London, 1984, 1986, 2018; Anderson *et al.*, 2001)、川西可尔因锂矿床(李建康等, 2007)、新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉(卢焕章等, 1996; 朱金初等, 2000)。花岗岩内的熔体包裹体及伟晶岩内的富晶体流体包裹体分别直接记录了花岗岩熔体及分异作用形成的富挥发分的伟晶岩流体(熔体)的物理化学条件与化学组成(London, 1986; Thomas *et al.*, 2000, 2006),是研究伟晶岩流体(熔体)形成、迁移、变化及其伴随地球化学过程的最直接样品(胡圣虹等, 2001; Stefanova *et al.*, 2014)。因此,弄清熔体、流体包裹体成分对于认识花岗伟晶岩型矿床的成矿熔体、流体的迁移与富集过程具有重要意义。

川西甲基卡花岗伟晶岩型锂矿田因规模大(超大型)、共伴生矿产多(Be、Nb、Ta、Rb、Cs、Sn)、找矿潜力好,近年来备受国内矿床学家的关注(张云湘等, 1996; 李建康等, 2007; 王登红等, 2013; 刘丽君等, 2016)。前人研究成果表明,甲基卡矿田花岗岩-伟晶岩体系内石英、绿柱石、锂辉石发育大量的

熔体和流体包裹体,较为完整地记录了岩浆活动与成矿作用过程的许多信息,是研究花岗伟晶岩型锂矿床成矿过程的理想对象(李建康等, 2006a, 2006b, 2007; Li and Chou, 2016; Li *et al.*, 2017)。但是,已有的甲基卡成矿流体的研究工作主要聚焦在流体包裹体的温压性质方面,对成矿流体的固相物质的研究较为薄弱。本次工作主要利用激光拉曼光谱(LRM)和扫描电镜-能谱仪(SEM-EDS)方法,分析了甲基卡内不同寄主矿物(不同期次)的熔体、流体包裹体内的固相物质。本研究将有助于查明成矿熔体、流体性质与演化特征,从而揭示甲基卡花岗伟晶岩型锂矿田的富集机制与成矿过程,同时对于丰富花岗伟晶岩型成矿理论具有重要的意义,从而为指导区域的进一步找矿提供理论依据。

1 矿床地质特征

甲基卡花岗伟晶岩型锂矿田位于四川西部(唐国凡等, 1984)^①,矿田规模大(超大型),共伴生矿产多(Be、Nb、Ta、Rb、Cs、Sn),是川西伟晶岩型锂辉石矿床的典型代表(王登红等, 2013, 2016)。矿区出露地层为三叠系西康群砂页岩经区域变质和接触变质作用而形成的黑云母石英片岩、二云母石英片岩和红柱石十字石石英片岩等中浅变质岩系。二云母花岗岩岩体是矿区出露的唯一侵入岩体(图1, 李建康等, 2007),岩体的Rb-Sr等时线年龄为 214.65 ± 1.66 Ma(唐国凡等, 1984)^①,属于印支晚期的产物。

空间上,甲基卡花岗伟晶岩脉环绕二云母花岗

① 唐国凡, 吴盛先. 1984. 四川省康定县甲基卡花岗伟晶岩锂矿床地质研究报告.

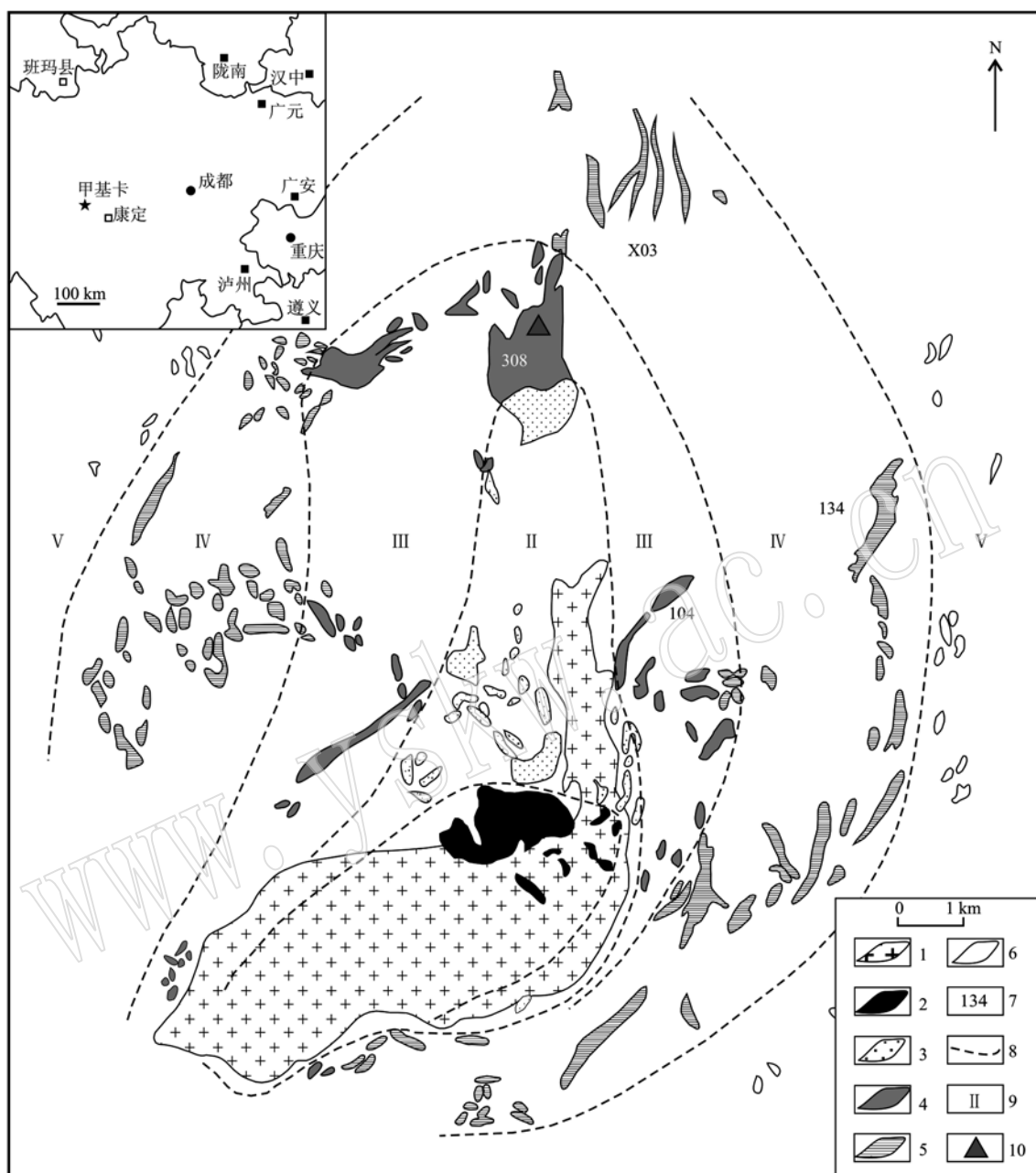


图1 川西甲基卡矿田地质简图(Li and Chou, 2016)

Fig. 1 Geological sketch map of the Jiajika orefield in western Sichuan Province (Li and Chou, 2016)

1—二云母花岗岩; 2—微斜长石型伟晶岩; 3—微斜长石-钠长石型伟晶岩; 4—钠长石型伟晶岩; 5—钠长石-锂辉石型伟晶岩; 6—钠长石-锂云母型伟晶岩; 7—伟晶岩脉编号; 8—类型分带线; 9—类型分带编号: I—微斜长石伟晶岩带; II—微斜长钠长石带; III—钠长石带; 石-IV—锂辉石带; V—锂(白)云母带; 10—采样位置

1—two-mica granite; 2—microcline pegmatite; 3—microcline-albite pegmatite; 4—albite pegmatite; 5—albite-spodumene pegmatite; 6—albite-lepidolite pegmatite; 7—pegmatite vein number; 8—type zoning line; 9—serial number of type zoning line: I—microcline pegmatite belt; II—microcline-albite zone; III—albite zone; IV—spodumene zone; V—lepidolite (muscovite) zone; 10—sampling location

岩成群、成组分布。花岗伟晶岩与二云母花岗岩在地球化学上具有一定的相似性与继承性,花岗伟晶岩是二云母花岗岩分异演化的派生物(鞠天应等,

2016)。自岩体接触带向外,依次出现微斜长石型伟晶岩(I)→微斜长石-钠长石型伟晶岩(II)→钠长石型伟晶岩(III)→钠长石-锂辉石型伟晶岩(IV)→

钠长石-锂(白)云母型伟晶岩(V)→石英脉,具有良好的矿田分带性(图1)。锂辉石主要分布在钠长石型和锂辉石型伟晶岩脉内,这两种伟晶岩脉通常可以大致分为两个带,即内部钠长石-锂辉石带和外部钠长石-微斜长石带。

308号伟晶岩脉是甲基卡矿区最大的钠长石-锂辉石型伟晶岩脉,长约1090 m,宽约700 m(李建康等,2007),围绕二云母花岗岩体分布,距岩体约为0.5 m。308号伟晶岩脉具有一定的分带性,从脉边部至内主要可以分为两个带:微斜长石-钠长石带和钠长石-锂辉石带,主体为钠长石-锂辉石带(约占整条伟晶岩脉的90%)。绿柱石于微斜长石-钠长石带和钠长石-锂辉石带内均有产出,呈浅绿色粒状,主要与石英、钠长石共生(李建康等,2007)。锂辉石主要产于钠长石-锂辉石带内,呈浅绿色或灰白色板状,通常与石英、钠长石、白云母共生。

2 含硅酸盐子矿物包裹体的特征

本次工作主要针对甲基卡二云母花岗岩体及伟晶岩308号脉开展,分别于二云母花岗岩及308号伟晶岩脉内的微斜长石-钠长石带和钠长石-锂辉石带采样,采样位置见图1。

按常温下包裹体中各相态成分、比例、组合关系及均一时相态,可在二云母花岗岩及伟晶岩的绿柱石、锂辉石中观察到熔体、富晶体(L+V+S)流体包裹体,具体描述如下。

在二长花岗岩的石英颗粒内,主要发育熔体包裹体。熔体包裹体大小一般在5~20 μm之间,主要成群规则分布于石英颗粒的中心,具原生熔体包裹体的特征。包裹体内常可见明显脱玻璃化呈网状结晶相,没有明显的气泡(图2a)。

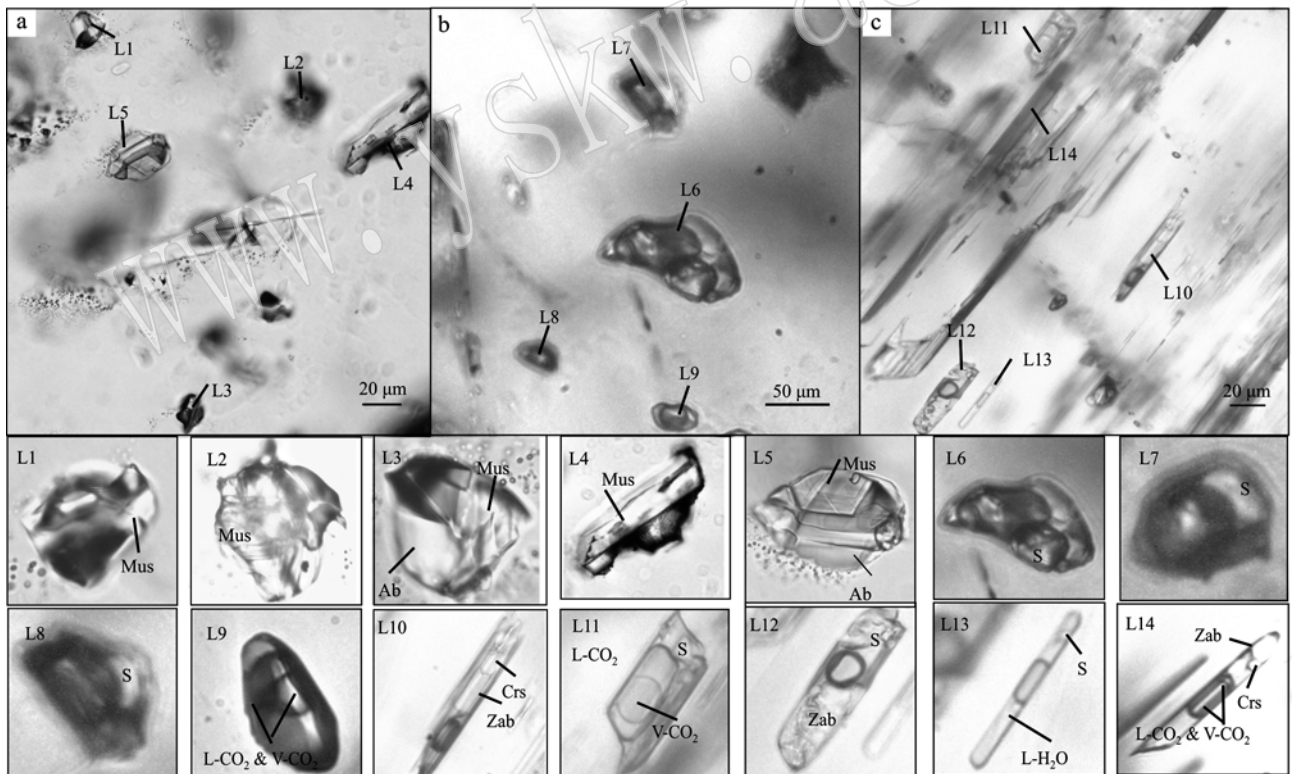


图2 甲基卡伟晶岩型锂矿田花岗岩伟晶岩体系内石英熔体-流体包裹体显微照片

Fig. 2 Photos of melt inclusion and fluid inclusions under microscope in Jiajika pegmatite type lithium deposit

a—二云母花岗岩石英内熔体包裹体;b—伟晶岩脉内绿柱石的流体包裹体,其中富子晶的流体包裹体(L6)与NaCl-CO₂-H₂O流体包裹体(L9)共存;c—伟晶岩脉内锂辉石的流体包裹体,其中富子晶的流体包裹体(L10、L12)与NaCl-CO₂-H₂O流体包裹体(L11)共存;

S—待测定的子矿物;Ab—钠长石;Ms—白云母;Qtz—石英;Zab—扎布耶石;Crs—方石英;Spd—锂辉石

a—melt inclusions hosted in quartz of two-mica granite; b—fluid inclusions hosted in beryl of pegmatite vein, showing the crystal-rich fluid inclusions (L6) coexistent with the NaCl-CO₂-H₂O fluid inclusions (L9); c—fluid inclusions hosted in spodumene, showing the crystal-rich fluid inclusions (L10, L12) coexistent with the NaCl-CO₂-H₂O fluid inclusions (L11); S—the crystal to be determined; Ab—albite; Ms—muscovite; Qtz—quartz;

Zab—zabuyelite; Crs—cristobalite; Spd—spodumene

绿柱石内常发育富晶体包裹体,包裹体成群分布,大小不一,主要约为 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ 。在室温下,呈现出固体硅酸盐矿物、气态 CO_2 、液态 CO_2 和水溶液四相。晶体矿物一般自形程度较好,主要呈圆形、椭圆形或立方体形生长在包裹体中,占包裹体的体积比多小于 20% (图 2b), CO_2 相所占比例为 20% ~ 60%。虽然并非所有包裹体都显示出相同的晶体/流体比和 CO_2 体积比,但是在同一个包裹体组 (FIA) 中,含晶体流体包裹体通常具有相似的晶体/流体比和 CO_2 体积比,具原生包裹体的特征。

在锂辉石节理面内常发育富晶体的包裹体,室温下呈现出固相硅酸盐矿物、气态 CO_2 、液态 CO_2 和水溶液四相。晶体矿物一般自形程度较好,呈圆形、椭圆形或立方体形生长在包裹体中,占包裹体的体积比多小于 20%,多位于包裹体边缘, CO_2 相所占比例为 20% ~ 60% (图 2c)。虽然并非所有包裹体都显示出相同的晶体/流体比和 CO_2 体积比,但是在同一个包裹体组 (FIA) 中,富晶体流体包裹体通常具有相似的晶体/流体比和 CO_2 体积比,具原生包裹体的特征。富晶体流体包裹体的均一温度约为 $500 \sim 720^\circ\text{C}$ (Li and Chou, 2016, 2017)。

3 实验方法

本文主要对甲基卡典型花岗岩、308 号伟晶岩脉不同结构带的代表性岩石样品为研究对象,分别磨制光薄片开展熔体、流体包裹体的固相物质分析。通过镜下观察后,选取二云母花岗岩石英、伟晶岩锂辉石内的原生熔体、流体包裹体进行激光拉曼测试。由于大部分绿柱石和锂辉石内原生富晶体流体包裹体内的固相物质在拉曼光谱测试过程中信号较弱,所以选择对其进行扫描电镜的测试。

3.1 激光拉曼分析

激光拉曼探针 (LRM) 分析在中国地质科学院矿产资源研究所成矿流体实验室进行,分析仪器为英国 Renishaw 公司产 System 2000 型显微共焦激光拉曼光谱仪,激光波长 514.53 nm ,激光功率 20 mW ,最小激光束斑直径 $1 \mu\text{m}$,扫描范围 $100 \sim 4500 \text{ cm}^{-1}$,分辨率 $1 \sim 2 \text{ cm}^{-1}$,分析样品为双面抛光薄片。

3.2 扫描电镜-能谱仪分析

SEM/EDS 测试在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点实验室进行,测试仪器为场发射扫描电子显微镜,电镜分辨率 1.0 nm ,加

速电压 30 kV ,最大放大倍数 30 万倍;能谱仪为 Oxford X-Max 20 型电制冷能谱仪,精度 $0.1\% \sim 0.3\%$ 。

选择含熔体包裹体及流体包裹体的石英、绿柱石、锂辉石包裹体片,将熔体及流体包裹体抛光至表面,通过显微镜对包裹体进行详细观察,了解其相态特征,作为实验分析参考。

将包裹体片镀完碳后固定在样品台上并放入扫描电镜样品室,分析时首先在较低倍数 (500 倍左右) 下沿样品表面从左到右、从上到下的方向观察,寻找矿物 (石英、绿柱石和锂辉石) 表面的空洞,发现空洞后提高放大倍数 ($2000 \sim 8000$ 倍) 确定空洞内是否有固相物质。发现空洞内的固相物质后,仔细观察其外形及其与空洞壁的接触关系,初步判断其是否为流体包裹体的固相物质。初步确定其可能为固相物质后先进行能谱分析,然后再利用扫描电镜进行照相。进行能谱分析时,对空洞内矿物、周围固体颗粒及主矿物分别进行分析。

4 实验结果

4.1 二云母花岗岩石英熔体包裹体中的固相物质

对样品 JY-3 进行了拉曼光谱扫描,发现除了主矿物石英 (465 cm^{-1}) 的峰值外,还分别出现了磷灰石 (特征峰为 964 cm^{-1}) 和白云母 (284 和 352 cm^{-1}) 的峰值 (图 3a)。

对样品 JY-6 进行了拉曼光谱扫描,发现除了主矿物石英 (465 cm^{-1}) 的峰值外,还分别出现了白云母 (284 和 352 cm^{-1}) 和钠长石 (647 、 669 和 749 cm^{-1}) 的峰值 (图 3b)。

对样品 JY-12-2 进行了拉曼光谱扫描,发现除了主矿物石英 (465 cm^{-1}) 的峰值外,还分别出现了白云母 (284 和 352 cm^{-1}) 和石墨 (1367 和 1568 cm^{-1}) 的峰值 (图 3c)。

据此得出石英中熔体包裹体的脱玻化结晶相组合主要为磷灰石 + 白云母、白云母 + 钠长石和白云母 + 石墨等。

4.2 伟晶岩脉绿柱石包裹体中的子矿物

对样品 YG-163-8-1 点 1、点 2、点 3、点 4 进行测试,排除主矿物点 1 绿柱石的干扰后,点 2 的 Al: Si 值近似为 1:2,据此判断其为锂辉石;点 3 的 Si: O 值近似为 1:2,据此判断其为石英;点 4 的 Al: Si 值为 1:1 (表 1、图 4a),推测其可能为锂绿泥石。

对样品 YG141-4-1 点 1、点 2 进行测试,排除点

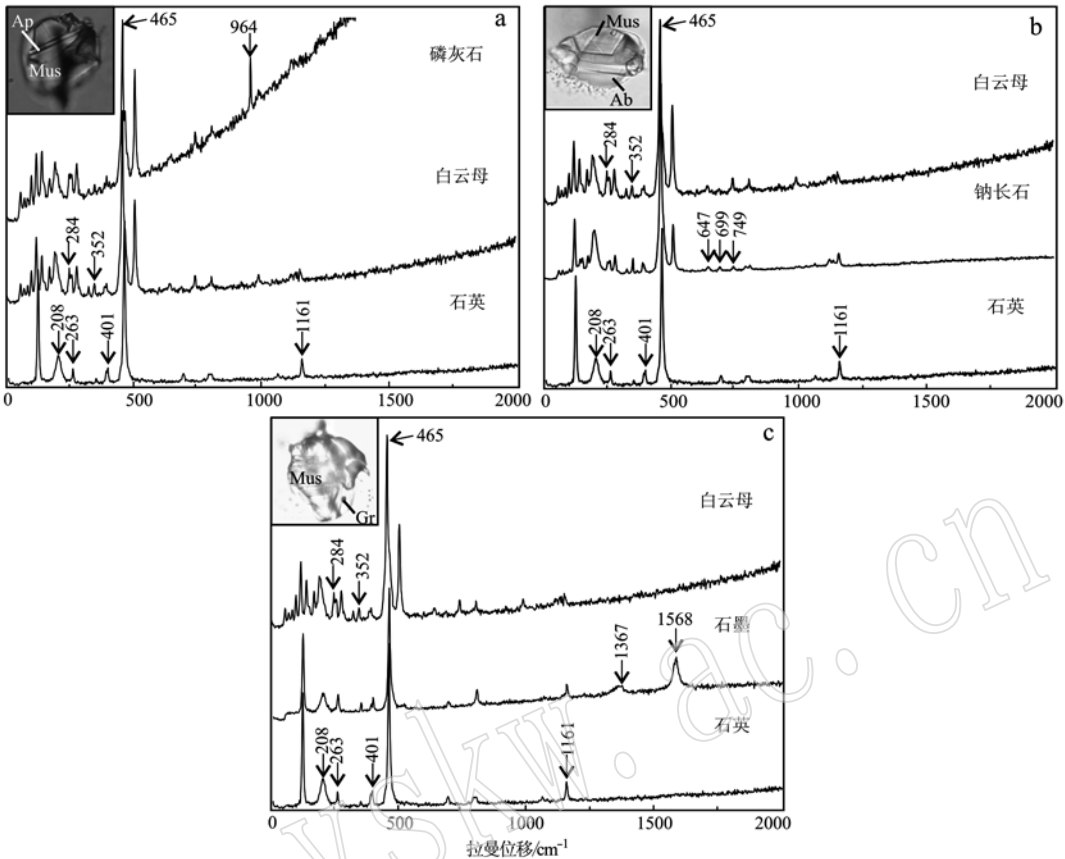


图 3 甲基卡白云母二长花岗岩内熔体包裹体激光拉曼分析结果
Fig. 3 Laser Raman spectra of melt inclusions in quartz of muscovite granite in the Jiajika lithium deposit
Mus—白云母; Ap—锂辉石; Ab—钠长石; Gr—石墨
Mus—muscovite; Ap—apatite; Ab—albite; Gr—graphite

1 绿柱石的干扰, 得出 Al: O 值近似为 2: 3, 据此判断其为刚玉(表 1、图 4b)。
对样品 YG-163-8-2 点 1、点 2、点 3、点 4、点 5、点

6 进行测试, 排除主矿物点 1 绿柱石的干扰后, 点 2、点 3、点 4 均存在一定的 Al、Fe、Si、O(表 1、图 4c), 可以确定其为富铝铁硅酸盐, 但无法进一步确定具体矿

表 1 伟晶岩绿柱石矿物中流体包裹体子矿物扫描电镜分析结果
Table 1 Microprobe analyses of daughter minerals in fluid inclusions of beryl from Jiajika pegmatite

样品号	主矿物	序号	Na	Al	Si	O	S	Ca	Fe	合计	矿物定名
YG-163-8-1	绿柱石	1		6.15	19.05	74.80				100.00	绿柱石
		2		8.17	16.81	68.47				93.45	锂辉石
		3			29.13	70.87				100.00	石英
		4		17.47	18.71	63.82				100.00	锂绿泥石
YG141-4-1	绿柱石	1		8.49	23.82	61.20	6.49			100.00	绿柱石
		2		31.63		68.37				100.00	刚玉
YG-163-8-2	绿柱石	1		8.80	26.97	64.23				100.00	绿柱石
		2	1.39	5.10	23.50	55.24			3.53	88.76	富铝铁钠硅酸盐
		3	1.26	5.50	23.43	59.61			3.20	93.00	富铝铁钠硅酸盐
		4		6.04	28.13	44.25			4.70	83.12	富铝铁硅酸盐
		5	1.85	28.15	2.35	51.37				83.72	刚玉
		6	0.92	7.59	24.24	56.96				89.71	锂辉石

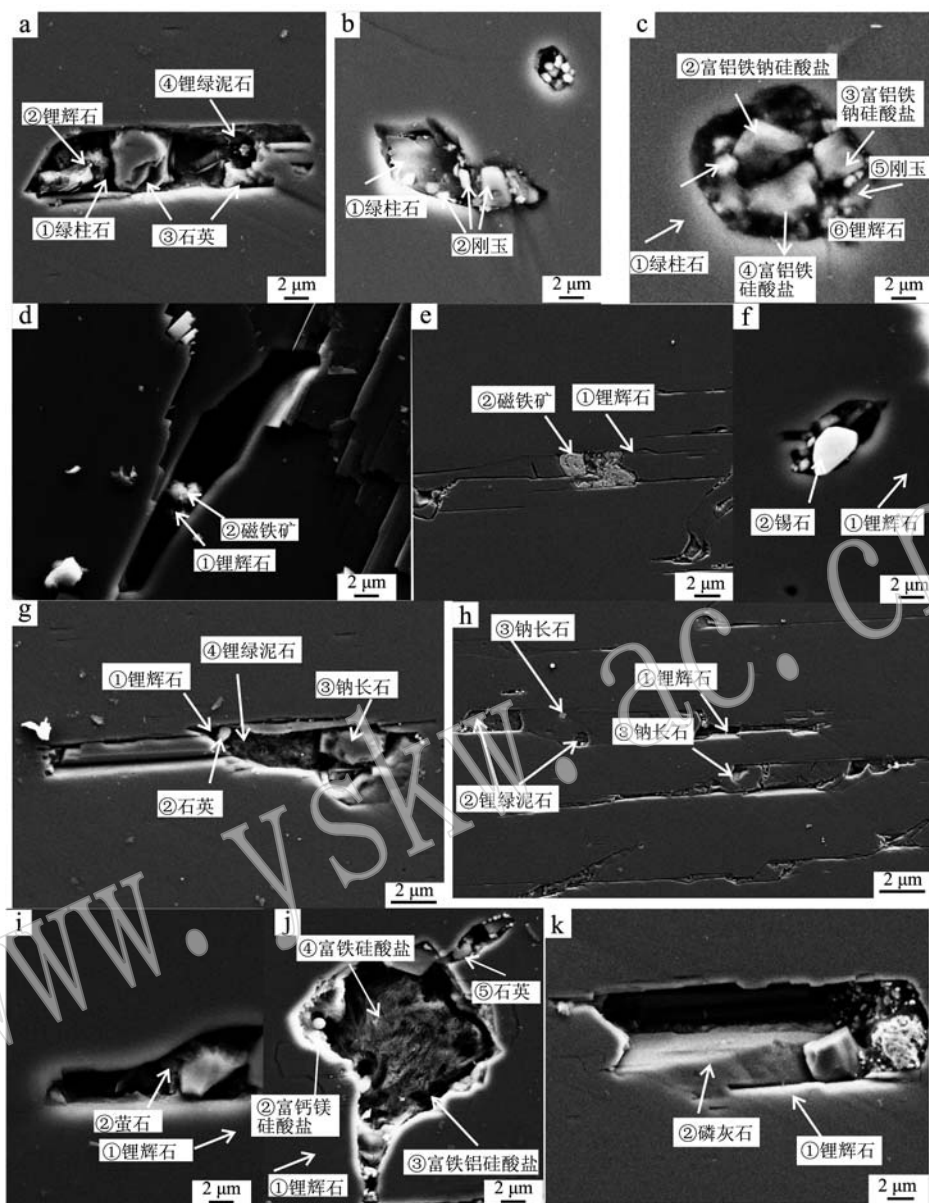


图4 甲基卡伟晶岩绿柱石、锂辉石中富晶体包裹体的电子背散射照片

Fig. 4 The back scatter electron image for crystal-rich fluid inclusions in beryl and spodumene of pegmatite

a—伟晶岩绿柱石内流体包裹体，晶体矿物为锂辉石、石英、锂绿泥石（样品 YG-163-8-1）；b—伟晶岩绿柱石内流体包裹体，晶体矿物为刚玉（样品 YG141-4-1）；c—伟晶岩绿柱石内流体包裹体，晶体矿物为富铝铁硅酸盐+刚玉+锂辉石（样品 YG163-8-2）；d—伟晶岩锂辉石内流体包裹体，晶体矿物为磁铁矿（样品 Y-2-2）；e—伟晶岩锂辉石内流体包裹体，晶体矿物为磁铁矿（样品 YG-89-22）；f—伟晶岩锂辉石内流体包裹体，晶体矿物为锡石（样品 YG-89-22）；g—伟晶岩锂辉石内流体包裹体，晶体矿物为石英、锂绿泥石、钠长石（样品 YG-89-22）；h—伟晶岩锂辉石内流体包裹体，晶体矿物为钠长石、锂绿泥石（样品 YG-89-22）；i—伟晶岩锂辉石内流体包裹体，晶体矿物为萤石（样品 Y-3-1）；j—伟晶岩锂辉石内流体包裹体，晶体矿物为石英、富钙镁硅酸盐、富铁铝硅酸盐、富铁硅酸盐（样品 Y-3-2）；k—伟晶岩锂辉石内流体包裹体，晶体矿物为磷灰石（样品 YG-308-1）

a—the crystals of fluid inclusions in beryl are spodumene, quartz and lithium chlorite (sample YG-163-8-1); b—the crystal of fluid inclusions in beryl is corundum (sample YG141-4-1); c—the crystals of fluid inclusions in beryl are alumina-rich ferrosilicate, corundum and spodumene (sample YG163-8-2); d—the crystal of fluid inclusion in spodumene is magnetite (sample Y-2-2); e—the crystal of fluid inclusion in spodumene is magnetite (sample YG-89-22); f—the crystals of fluid inclusion in spodumene are cassiterite (sample YG-89-22); g—the crystals of fluid inclusion in spodumene are quartz, lithium chlorite and albite (sample YG-89-22); h—the crystals of fluid inclusion in spodumene are lithium chlorite and albite (sample YG-89-22); i—the crystals of fluid inclusion in spodumene in fluorite (sample Y-3-1); j—the crystal of fluid inclusion in spodumene are quartz, calcium-magnesium-rich silicate, alumina-rich ferrosilicate and ferrosilicate (sample Y-3-2); k—the crystal of fluid inclusion in spodumene is apatite (sample YG-308-1)

物类型;点 5 的 Al: O 值近似为 2: 3, 据此判断其为刚玉;点 6 的 Al: Si 值近似为 1: 2, 据此判断其为锂辉石。

本文对甲基卡伟晶岩绿柱石具有原生特征的富晶体流体包裹体进行的扫描电镜分析结果显示, 绿柱石流体包裹体内矿物组合为锂辉石 + 石英 + 锂绿

泥石、刚玉、富铝铁硅酸盐 + 刚玉 + 锂辉石。

4.3 伟晶岩脉锂辉石包裹体中的子矿物

对样品 Y-2-2 和 YG-89-22 点 1、点 2 进行测试, 排除主矿物点 1 锂辉石的干扰后, 点 2 的 Fe: O 值近似为 3: 4, 据此推测其为磁铁矿(图 4d、4e、表 2)。

表 2 伟晶岩锂辉石矿物中流体包裹体子矿物扫描电镜分析结果
Table 2 Microprobe analyses of daughter minerals in fluid inclusions of spodumene from Jiajika pegmatite w_B/%

样品号	主矿物	序	Na	Mg	Al	Si	O	F	S	Ca	Sn	K	Fe	P	合计	矿物定名
Y-2-2	锂辉石	1			7.36	15.07	64.54								86.97	锂辉石
		2			1.62	2.45	75.34						19.88		99.29	磁铁矿
YG-89-22	锂辉石	1			8.93	19.73	71.34								100.00	锂辉石
		2					32.75				64.54				97.29	锡石
YG-89-22	锂辉石	1			9.30	19.69	71.01								100.00	锂辉石
		2				60.28	39.72								100.00	石英
		3	6.74		7.01	16.96	69.30								100.01	钠长石
		4			13.67	13.86	72.46								99.99	锂绿泥石
YG-89-22	锂辉石	1			8.93	19.73	71.34								100.00	锂辉石
		2			17.12	16.30	66.57								99.99	锂绿泥石
		3	6.67		6.98	17.18	69.17								100.00	钠长石
Y-3-1	锂辉石	1			11.00	23.63	65.38								100.01	锂辉石
		2			2.61	4.38	14.31	53.79		24.92					100.01	萤石
Y-3-2	锂辉石	1		2.17	10.9	25.33	57.24			1.57			2.79		100.00	锂辉石
		2		10.33	0.96	2.03	50.54			36.14					100.00	富钙镁硅酸盐
		3		1.96	14.97	37.00	29.78			5.24			11.04		99.99	富铁铝硅酸盐
		4	2.02	0.71	1.18	14.17	50.21		5.48		0.95	4.37	20.90		99.99	富铁硅酸盐
		5				60.75	39.25								100.00	石英
YG-308-1	锂辉石	1			7.95	16.20	75.85								100.00	锂辉石
		2				0.43	63.87	7.70		16.18				11.83	100.01	磷灰石

对样品 YG89-22 点 2 进行测试, Sn: O 比值为 1: 2(表 2), 判断其为锡石(SnO₂)(图 4f)。

对样品 YG89-22 点 1、点 2、点 3、点 4 进行测试, 排除主矿物点 1 锂辉石的干扰后, 点 2 的 Si: O 值为 1: 2, 据此判断其为石英; 点 3 的 Na: Al: Si 值近似为 1: 1: 3(图 4g、表 2), 据此判断其为钠长石; 点 4 的 Al: Si 值为 1: 1(表 2), 据此推测其可能为锂绿泥石。

对样品 YG89-22 点 1、点 2、点 3 进行测试, 排除主矿物点 1 锂辉石的干扰后, 点 2 的 Al: Si 值为 1: 1(表 2), 推测其可能为锂绿泥石; 点 3 的 Na: Al: Si 值近似为 1: 1: 3(图 4h、表 2), 据此判断其为钠长石。

对样品 Y-3-1 点 1、点 2 进行测试, 排除主矿物点 1 锂辉石的干扰后, 点 2 的 Ca: F 值近似为 1: 2,

据此判断其为萤石(图 4i、表 2)。

对样品 Y-3-2 点 1、点 2、点 3、点 4、点 5 进行测试, 排除主矿物点 1 锂辉石的干扰后, 根据点 2、点 3、点 4 的元素比值, 可以确定其为富钙镁硅酸盐 + 富铁铝硅酸盐 + 富铁硅酸盐, 但无法确定具体的矿物类型; 点 5 的 Si: O 值近似于 1: 2, 据此推断其为石英(图 4j、表 2)。

对样品 YG-308-1 点 1、点 2 进行测试, 排除主矿物点 1 锂辉石的干扰后, 点 2 的 Ca: P: O 值约为 5: 3: 12(表 2), 据此判断其为磷灰石(图 4k)。

总的来看, 锂辉石流体包裹体内矿物组合为磁铁矿、萤石、富钙镁硅酸盐 + 富铁铝硅酸盐 + 富铁硅酸盐 + 石英、石英 + 钠长石 + 锂绿泥石、钠长石 + 锂绿泥石、锡石、磷灰石(表 3)。

表 3 甲基卡熔体包裹体、富晶体流体包裹体的固相物质组合

Table 3 Mineral assemblages in melt and fluid-melt inclusion from the Jiajika lithium deposit

岩性分带	样品号	主矿物	矿物组合	来源
二云母花岗岩	JY-3	石英	磷灰石+白云母	本文
	JY-6	石英	白云母+钠长石	
	JY-12-1	石英	白云母+石墨	
钠长石-微斜长石带、长石-钠长石带	YG141-4-1	绿柱石	锂辉石+石英+锂绿泥石	本文
	YG163-8-2	绿柱石	刚玉	
	YG-163-8-1	绿柱石	富铝铁硅酸盐+刚玉+锂辉石	
钠长石-锂辉石带	Y-2-2、YG-89-22	锂辉石	磁铁矿	本文
	Y-3-1	锂辉石	萤石	
	Y-3-2	锂辉石	富钙镁硅酸盐+富铁铝硅酸盐+富铁硅酸盐+石英	
	YG89-22	锂辉石	钠长石+锂绿泥石	
	YG89-22	锂辉石	锡石	
	YG89-22	锂辉石	石英+钠长石+锂绿泥石	
	YG-308-1	锂辉石	磷灰石	
	134-1	锂辉石	锂绿泥石+方石英+钠长石	

Li and Chou, 2016

5 讨论

5.1 花岗伟晶岩岩浆熔体性质

伟晶岩的形成可以分为岩浆阶段和岩浆-热液阶段。这两个阶段与花岗岩-伟晶岩通过岩浆结晶分异形成的内部矿物共生结构带基本上是对应的,其中花岗岩对应于岩浆阶段,岩浆-热液过渡阶段对应于微斜长石-钠长石带、钠长石-锂辉石带。因此,甲基卡矿床的花岗岩内的熔体包裹体为岩浆阶段产物,而伟晶岩微斜长石-钠长石带的绿柱石、钠长石-锂辉石带的锂辉石富晶体流体包裹体为岩浆-热液过渡阶段的产物。

根据实验结果,熔体包裹体、富晶体包裹体内均发育石英、磷灰石、钠长石等矿物,刚玉、锂辉石只出现在绿柱石为主矿物的富晶体流体包裹体中,萤石、磁铁矿、锡石只出现在主矿物为锂辉石的包裹体中,锂绿泥石、硅酸盐矿物在绿柱石、锂辉石富晶体包裹体中均有发育。因此,由二云母花岗岩→伟晶岩微斜长石-钠长石带→伟晶岩钠长石-锂辉石带,随着温度、压力缓慢下降,发生了岩浆结晶分异作用,在包裹体中首先析出的是熔点高的矿物如绿柱石、云母、刚玉、磷灰石、磁铁矿、锂辉石等,其后为石英及钠长石,最后为岩浆残余物质即不同成分的锂绿泥石、铝硅酸盐。这反映了伟晶岩为二云母花岗岩岩浆结晶分异作用的产物(李兆麟等,1999,2000)。

同一结构带内同一种矿物产出的包裹体中晶体

矿物组成不同,如绿柱石可产出石英+富钙镁铝硅酸盐和石英+锂绿泥石的矿物组合,锂辉石可产出锡石、磁铁矿等不同的矿物。样品中一个包裹体群中不同包裹体内的固相物质种类繁多,如样品 YG-89-22 中出现钠长石+锂绿泥石、磁铁矿、锡石等不同种类的晶体矿物。

伟晶岩绿柱石、锂辉石的富晶体包裹体内均发育有大量的硅酸盐矿物,它们在包裹体中多呈不规则状分布,大部分无完好晶面,表面不平。硅酸盐矿物成分变化很大,流体内捕获的铝硅酸盐熔融体按其主要成分可分为富钙铝硅酸盐(Ca 达 36.14%)、富铁铝硅酸盐(FeO 达 20.90%)及富铝硅酸盐(Al_2O_3 达 14.17%)。它属于包裹体捕获伟晶岩岩浆结晶分异后的残余岩浆成分,在包裹体中常与结晶质的晶体形成不同矿物组合。伟晶岩矿物(主矿物)与包裹体中晶体矿物及铝硅酸盐玻璃的化学成分存在一定的差异,与包裹体中主矿物(锂辉石)成分相比,一般含 Fe、Mg、Ca 较高,而 Na、Si、Al 含量较低,具早期岩浆性质(表 2、表 3)。以上表明包裹体捕获熔体时熔体成分呈现不均一性,即熔体或流体为不混溶状态。因此,岩浆结晶分异作用和岩浆的不混溶共同控制了伟晶岩脉各带成矿熔体、流体的形成。

5.2 成矿熔体、流体组分演化

结合前人对甲基卡成矿流体性质的分析(李建康等,2006a,2006b,2007; Li *et al.*, 2009, 2013),本文认为花岗岩-伟晶岩体系成矿熔体、流体主要经历了以下两个阶段:

(1) 岩浆阶段, 主要温度为 600 ~ 850°C (Sowerby and Keppler, 2002), 表现为伟晶岩熔体(流体)从花岗岩内分离。由于二云母花岗岩内脱玻化结晶相主要为钠长石、石英、白云母、磷灰石、石墨, 参考前人甲基卡二云母花岗岩的地球化学分析结果(李建康等, 2007), 推断早期花岗岩浆以高温、富铁镁、富硅酸盐为特征。

(2) 岩浆-流体过渡阶段, 主要温度为 300 ~ 700°C (李建康等, 2007), 形成伟晶岩绿柱石富晶体的流体(500 ~ 700°C)和锂辉石富晶体的流体(500 ~ 600°C)及伟晶岩石英中的 CO_2 -NaCl- H_2O (300 ~ 450°C) (李建康等, 2006a, 2006b, 2007; Li *et al.*, 2009, 2013)。伟晶岩脉内绿柱石的晶体矿物主要为刚玉、石英、钠长石、含硅铝酸盐, 表明了成矿流体具富 Al、Ca、Fe 的特征; 伟晶岩脉内锂辉石的晶体矿物主要为方石英、钠长石、萤石、锡石、锂绿泥石、磁铁矿、磷灰石, 以富 Al、Sn、P, 高 Li, 富硅酸盐, 富 F 为特征。

因此, 早期花岗岩浆→富 Be、Li 伟晶岩岩浆→富 Li 伟晶岩岩浆, 成矿熔体、流体总体呈现出 Na、Si、Al 含量增高, Fe、Mg、Ca 降低的特征, 这与人人在可可托海、哀牢山的研究成果(冷成彪等, 2007; 李兆麟等, 2000)一致。

实验岩石学表明, 挥发分对于花岗伟晶岩型稀有金属矿床的迁移、富集与沉淀至关重要(Keppler, 1993; Thomas *et al.*, 2005; 张德会, 2005; 李建康等, 2008)。本次分析结果显示, 绿柱石、锂辉石内的矿物组合内存在磷灰石和萤石, 因此可以推断稀有金属伟晶岩熔体相对 Cl 更富集 F (Fenn, 1986; London, 1986)。因此, 甲基卡内 Li^+ 在热液中呈可能呈 LiF 或 LiBeF_3 化合物或络合物迁移(牟保垒, 1999), 但这不排除成矿熔体或流体也可能存在 Cl 的络合物运移。同时, 富 F 贫 Cl 特征也可能是甲基卡成矿熔体在高压条件下出溶的流体盐度不高的原因(盐度 < 7%)。包括甲基卡在内的许多花岗伟晶岩型锂矿床的成矿流体富含 CO_2 (London, 1985; Ruggieri and Lattanzi, 1992; Smerekanicz and Dudás, 1999; Fuertes-Fuente *et al.*, 2000; Thomas *et al.*, 2011; Weselucha-Birczyńska *et al.*, 2011; Li and Chou, 2016, 2017), 甚至可在富晶体包裹体内检测到扎布耶石(Li_2CO_3)和方解石(CaCO_3) (Anderson *et al.*, 2001; Ackerman *et al.*, 2007; Alfonso and Melgarejo, 2008; Li and Chou, 2016)。前人关于 CO_2 与

花岗伟晶岩型稀有金属矿床的关系研究较少, 也不确定 CO_2 在花岗伟晶岩熔体中的存在形式(Higgins, 1980; Keppler and Wyllie, 1990), 通常认为硅酸盐熔体中 CO_2 的溶解度有限(Walther and Orville, 1983), CO_2 对成矿熔体内稀有金属溶解度可能影响不大(Ridley and Diamond, 2000)。Lowenstern (2001)认为 CO_2 可加强成矿岩浆的不混溶作用和独立气相分离作用, 可调节成矿熔体或流体体系中的酸碱度, 使得金属发生迁移沉淀。

因此, 花岗伟晶岩阶段矿质元素的富集条件主要是: ① 相对封闭的条件, 有利于挥发组分含量增加(如 H_2O 、F、Cl、 CO_2 等), 从而有利于锂的迁移和重新分配; ② 碱金属 Na 元素浓度的增加。

6 结论

(1) 运用扫描电镜对甲基卡伟晶岩锂矿床熔融包裹体及流体包裹体进行的成分分析结果显示, 甲基卡花岗岩石英内熔体包裹体的矿物组合主要为磷灰石+白云母、白云母+钠长石、白云母+石墨; 伟晶岩绿柱石富晶体流体包裹体内的矿物组合主要为刚玉、富铝铁硅酸盐+刚玉+锂辉石、锂辉石+石英+锂绿泥石; 伟晶岩锂辉石富晶体流体包裹体内的子矿物主要为磷灰石、锡石、磁铁矿、石英+钠长石+锂绿泥石、萤石、富钙镁硅酸盐+富铁铝硅酸盐+富铁硅酸盐+石英。

(2) 矿物中熔融包裹体及流体包裹体中捕获的伟晶岩浆, 其结晶过程存在局部岩浆分异作用, 在同一矿物的熔融包裹体或流体-熔融包裹体中存在不同的矿物组合及化学成分上的差异, 表明岩浆具不混溶性和非均匀性。

(3) 甲基卡成矿熔体、流体相对富集 F、 CO_2 , 贫 Cl, 成矿熔体、流体可能处于碱性环境, 以 LiF 或 LiBeF_3 化合物或络合物形式迁移。

References

- Ackerman L, Zachariáš J and Pudilová M. 2007. *P-T* and fluid evolution of barren and lithium pegmatites from Vlastějovice, Bohemian Massif, Czech Republic[J]. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch)*, 96: 623 ~ 638.
- Alfonso P and Melgarejo J C. 2008. Fluid evolution in the zoned rare-element pegmatite field at cap de creus, catalonia, Spain[J]. *The Ca-*

- nadian Mineralogist, 46: 597 ~ 617.
- Anderson A J, Clark A H and Gray S. 2001. The occurrence and origin of zabuyelite (Li_2CO_3) in spodumene-hosted fluid inclusions: implications for the internal evolution of rare-element granitic pegmatites [J]. The Canadian Mineralogist, 39: 1 513 ~ 1 527.
- Cuney M, Marignac C and Weisbrod A. 1992. The Beauvoir topaz-lepidolite-albite granite (Massif Central, France): The disseminated magmatic Sn-Li-Ta-Nb-Be mineralization [J]. Econ. Geol., 87: 1 766 ~ 1 794.
- Fenn P M. 1986. On the origin of graphic granite [J]. Am. Mineral., 71: 325 ~ 330.
- Fuertes-Fuente M, Martin-Izard A, Boiron M C, *et al.* 2000. *P-T* path and fluid evolution in the franqueira granitic pegmatite, Central Galicia, Northwestern Spain [J]. The Canadian Mineralogist, 38: 1 163 ~ 1 175.
- Helba H, Trumbull R B, Morteani G, *et al.* 1997. Geochemical and petrographic studies of Ta mineralization in the Nuweibi albite granite complex, Eastern Desert, Egypt [J]. Miner. Depos., 32: 164 ~ 179.
- Higgins N C. 1980. Fluid inclusion evidence for the transport of carbonate complexes in hydrothermal solutions [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 17(7): 823 ~ 830.
- Hu Shenghong, Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, *et al.* 2001. New techniques of major and minor elemental analysis in individual fluid inclusion—Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) [J]. Earth Science Frontiers, 8(4): 434 ~ 440 (in Chinese with English abstract).
- Keppeler H. 1993. Influence of fluorine on the enrichment of high field strength trace elements in granitic rocks [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 114: 479 ~ 488.
- Keppeler H and Wyllie P J. 1990. Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes [J]. Nature, 348: 531 ~ 533.
- Ju Tianying and Zhou Xiaobo. 2016. Ore genesis of the Jiajika rare-metal granitic pegmatite deposit in West Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 36(1): 42 ~ 46 (in Chinese with English abstract).
- Leng Chengbiao, Wang Shouxu, Gou Tizhong, *et al.* 2007. A review of the research on the Koktokay No. 3 granitic pegmatite dyke, Altai, Xinjiang [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 89(1): 14 ~ 20 (in Chinese with English abstract).
- Li J and Chou I M. 2016. An occurrence of metastable cristobalite in spodumene-hosted crystal-rich inclusions from Jiajika pegmatite deposit, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 171: 29 ~ 36.
- Li J and Chou I M. 2017. Homogenization experiments of crystal-rich inclusions in spodumene from Jiajika lithium deposit, China, under elevated external pressures in a hydrothermal diamond-anvil cell [J]. Geofluids (3 ~ 4): 1 ~ 12.
- Li J K, Chou I M, Yuan S D, *et al.* 2009. Homogenization temperature measurements in hydrothermal diamond-anvil cell for melt and fluid inclusions from the Jiajika pegmatite deposit, China [J]. Eos Trans. AGU, 90(52): Fall Meet. Suppl., Abstract: V43B-2 234.
- Li J, Liu Y, Zheng Z, *et al.* 2018. Roles of carbonate/ CO_2 in the formation of quartz-vein wolframite deposits: Insight from the crystallization experiments of huebnerite in alkali-carbonate aqueous solutions in a hydrothermal diamond-anvil cell [J]. Ore Geology Reviews, S0169136817309654.
- Li J K, Wang D and Chen Y. 2013. The ore-forming mechanism of the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan Province: Evidence from isotope dating [J]. Acta Geologica Sinica, 87(1): 91 ~ 101.
- Li Jiankang, Wang Denghong, Zhang Dehui, *et al.* 2006a. The source of ore-forming fluid in Jiajika pegmatite type lithium polymetallic deposit, Sichuan Province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(1): 45 ~ 52 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Denghong, Zhang Dehui, *et al.* 2006b. The discovery of silicate daughter mineral-bearing inclusions in the Jiajika pegmatite deposit, western Sichuan, and its significance [J]. Mineral Deposits, (s1): 131 ~ 134 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Denghong, Zhang Dehui, *et al.* 2007. Formation Mechanism and Continental Dynamic Background of Typical Pegmatite-type Deposits in Western Sichuan [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1 ~ 182 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Zhang Dehui, Wang Denghong, *et al.* 2008. Liquid immiscibility of fluorine-rich granite magma and its diagenesis and metallogeny [J]. Geological Review, 54(2): 33 ~ 41 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhaolin, Zhang Wenlan, Li Wen, *et al.* 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).
- Li Zhaolin, Zhang Wenlan, Yang Rongyong, *et al.* 1999. Electron probe analyses of melt inclusions in beryl of pegmatite and the discovery of zinc spinel [J]. Chinese Science Bulletin, 44(6): 649 ~ 662 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Yang Yueqing, *et al.* 2016. Metallogenic

- characteristics of X03 rare metal vein in Jiajika of Sichuan[J]. Journal of Guilin University of Technology, 36(1): 50 ~ 59 (in Chinese with English abstract).
- London D. 1984. Experimental phase equilibria in the system $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$: A petrogenetic grid for lithium-rich pegmatites[J]. American Mineralogist, 69(11 ~ 12): 995 ~ 1 004.
- London D. 1985. Origin and significance of inclusions in quartz: A cautionary example from the Tanco Pegmatite, Manitoba[J]. Economic Geology, 80: 1 988 ~ 1 995.
- London D. 1986. The magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare-element pegmatite: Evidence from fluid inclusions and phase equilibrium experiments[J]. Am. Mineral., 71: 376 ~ 395.
- London D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. Ore Geology Reviews, S0169136818300283.
- Lowenstern J B. 2001. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systems[J]. Mineralium Deposita, 36: 490 ~ 502.
- Lu Huanzhang, Wang Zhonggang and Li Yuansheng. 1996. Magma-fluid transition and genesis of pegmatite dike No. 3 at Altay, Xinjiang [J]. Acta Mineralogica Sinica, 16: 1 ~ 7 (in Chinese with English abstract).
- Mou Baolei. 1999. Elemental Geochemistry[M]. Peking University Press (in Chinese).
- Raimbault L, Cuney M, Azencott C, *et al.* 1995. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central[J]. Econ. Geol., 90: 548 ~ 576.
- Ridley J R and Diamond L W. 2000. Fluid chemistry of lode-gold deposits, and implications for genetic models[A]. Hagemann S G and Brown P E. Gold in 2000: Reviews in Economic Geology[C], 13: 141 ~ 162.
- Ruggieri G and Lattanzi P. 1992. Fluid inclusion studies on Mt. Capanne pegmatites, Isola d'Elba, Tuscany, Italy[J]. European Journal of Mineralogy, 4: 1 085 ~ 1 096.
- Schwartz M O. 1992. Geochemical criteria for distinguishing magmatic and metasomatic albite-enrichment in granitoids-examples from the Ta-Li granite Yichun (China) and the Sn-W deposit Tikus (Indonesia)[J]. Miner. Depos., 27: 101 ~ 108.
- Smerekanica J R and Dudas F O. 1999. Reconnaissance fluid inclusion study of the Morefield pegmatite, Amelia County, Virginia [J]. American Mineralogy, 84: 746 ~ 753.
- Spry P G and Spry S D. 1986. The stability of zincian spinels in sulfide systems and their potential as exploration guides for metamorphosed massive sulfide deposits[J]. Economic Geology, 81: 1 446 ~ 1 463.
- Sowerby J R and Keppler H. 2002. The effect of fluorine, boron and excess sodium on the critical curve in the albite- H_2O system[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 143(1): 32 ~ 37.
- Stefanova E, Driesner T, Zajacz Z, *et al.* 2014. Melt and fluid inclusions in hydrothermal veins: The magmatic to hydrothermal evolution of the elatite porphyry Cu-Au deposit, Bulgaria[J]. Economic Geology, 109(5): 1 359 ~ 1 381.
- Thomas R, Davidson P and Schmidt C. 2011. Extreme alkali bicarbonate- and carbonate-rich fluid inclusions in granite pegmatite from the Precambrian Ronne granite, Bornholm Island, Denmark [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 161: 315 ~ 329.
- Thomas R, Förster H J, Rickers K, *et al.* 2005. Formation of extremely F-rich hydrous melt fractions and hydrothermal fluids during differentiation of highly evolved tin-granite magmas: A melt/fluid-inclusion study[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 148(5): 582 ~ 601.
- Thomas R, Webster J D and Heinrich W. 2000. Melt inclusions in pegmatite quartz: Complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 139(4): 394 ~ 401.
- Thomas R, Webster J D, Rhede D, *et al.* 2006. The transition from peraluminous to peralkaline granite melts: Evidence from melt inclusions and accessory minerals[J]. Lithos, 91: 137 ~ 149.
- Walther J V and Orville P M. 1983. The extraction-quench technique for determination of the thermodynamic properties of solute complexes: application to quartz solubility in fluid mixtures[J]. American Mineralogist, 68(68): 731 ~ 741.
- Wang Denghong and Fu Xiaofang. 2013. Breakthrough of lithium prospecting on the periphery of Jiajika, Sichuan[J]. Geology in China, 32(6): 987 ~ 987 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Fu Xiaofang, *et al.* 2016. A discussion on the major problems related to geological investigation and assessment for energy metal resources base: A case study of the Jiajika large lithium mineral resource base[J]. Acta Geoscientia Sinica, (4): 471 ~ 480 (in Chinese with English abstract).
- Weselucha-Birczyńska A, Słowakiewicz M, Natkaniec-Nowak L, *et al.* 2011. Raman microspectroscopy of organic inclusions in spodumenes from Nilaw (Nuristan, Afghanistan)[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 79(4): 789.
- Yin L, Pollard P J, Hu S, *et al.* 1995. Geologic and geochemical characteristics of the Yichun Ta-Nb-Li deposit, Jiangxi Province, China [J]. Econ. Geol., 90: 577 ~ 585.
- Zhang Dehui. 2005. Some problems on the geochemistry of ore-forming

- processes[J]. Geological Bulletin of China, 24(10): 885~891(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunxiang, Hu Zhenggang, Luo Yaonan, *et al.* 1996. The Discovery of Mineral Deposit of China • Sichuan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 131~135(in Chinese).
- Zhu Jinchu, Wu Changnian, Liu Changshi, *et al.* 2000. Magmatic-hydrothermal evolution and genesis of Koktokay No. 3 rare metal pegmatite dyke, Altai, China[J]. Geological Journal of China Universities, 6(1): 40~52(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 胡圣虹, 胡兆初, 刘勇胜, 等. 2001. 单个流体包裹体元素化学组成分析新技术——激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)[J]. 地学前缘, 8(4): 434~440.
- 鞠天应, 周晓波. 2016. 四川甲基卡稀有金属花岗伟晶岩矿床成因[J]. 四川地质学报, 36(1): 42~46.
- 冷成彪, 王守旭, 苟体忠, 等. 2007. 新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉研究[J]. 华南地质与矿产, 89(1): 14~20.
- 李建康, 王登红, 张德会, 等. 2006a. 四川甲基卡伟晶岩型锂多金属矿床成矿流体来源研究[J]. 岩石矿物学杂志, 25(1): 45~52.
- 李建康, 王登红, 张德会, 等. 2006b. 川西甲基卡伟晶岩型矿床中含硅酸盐矿物包裹体的发现及其意义[J]. 矿床地质, (s1): 131~134.
- 李建康, 王登红, 张德会, 等. 2007. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机理及其大陆动力学背景[M]. 北京: 原子能出版社, 1~182.
- 李建康, 张德会, 王登红, 等. 2008. 富氟花岗岩浆液态不混溶作用及其成岩成矿效应[J]. 地质论评, 54(2): 175~183.
- 李兆麟, 张文兰, 李文, 等. 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.
- 李兆麟, 张文兰, 杨荣勇, 等. 1999. 伟晶岩绿柱石熔融包裹体电子探针成分分析及锌尖晶石的发现[J]. 科学通报, 44(6): 649~662.
- 刘丽君, 王登红, 杨岳清, 等. 2016. 四川甲基卡新三号稀有金属矿脉成矿特征的初步研究[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 50~59.
- 卢焕章, 王中刚, 李院生. 1996. 岩浆-流体过渡和阿尔泰三号伟晶岩脉之成因[J]. 矿物学报, 16: 1~7.
- 牟保磊. 1999. 元素地球化学[M]. 北京大学出版社.
- 王登红, 王瑞江, 付小方, 等. 2016. 对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨——以四川甲基卡大型锂矿基地为例[J]. 地球学报, (4): 471~480.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 等. 2013. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. 中国地质, 40(2): 361~370.
- 张德会. 2005. 关于成矿作用地球化学研究的几个问题[J]. 地质通报, 24(z1): 885~891.
- 张云湘, 胡正纲, 骆耀南, 等. 1996. 中国矿床发现史·四川卷[M]. 北京: 地质出版社, 131~135.
- 朱金初, 吴长年, 刘昌实, 等. 2000. 新疆可可托海3号伟晶岩脉岩浆-热液演化和成因[J]. 高校地质学报, 6(1): 40~52.