

茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩锂矿化特征及 成矿时限

吕书俊¹, 董国臣¹, 罗志波¹, 吕云鹤¹, 梁景利²

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 华北地质勘查局 五一四地质大队,
河北承德 067000)

摘要: 锂是重要的战略金属矿产, 锂辉石花岗伟晶岩是锂矿资源的重要来源。近来柴北缘茶卡北山地区新发现锂辉石花岗伟晶岩脉群, 本文对区内锂辉石花岗伟晶岩进行了岩相学、矿物学、矿物化学、年代学研究工作, 确定了锂辉石花岗伟晶岩的矿化特征及矿化年限。锂辉石花岗伟晶岩存在两期矿物组合: 早期由粗粒锂辉石、粗粒钾长石、粗粒白云母、粗粒更(钠)长石、粗粒石英和铌钽铁矿等组成, 属熔体结晶阶段产物; 晚期由锂绿泥石、富锂云母、蠕虫状锂辉石和细粒他形石英等组成, 为岩浆期后热液交代产物。根据两期矿物组合判断存在两期锂矿化, 认为早期锂辉石的局部蚀变与晚期锂矿物的形成指示体系内存在锂的活化与再沉淀过程。测得与锂辉石伴生的铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 241.0 ± 1.3 Ma, 可代表锂辉石花岗伟晶岩熔体结晶年龄, 即为早期锂成矿年代, 矿床为印支期产物。

关键词: 茶卡北山; 锂辉石花岗伟晶岩; 矿化特征; 铌钽铁矿 U-Pb 定年

中图分类号: P618.71; P588.12⁺1; P597 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2023)03-0350-15

Lithium mineralization characteristics and chronology of spodumene granite pegmatite in the northern Chaka Mountain, Qinghai Province

LÜ Shu-jun¹, DONG Guo-chen¹, LUO Zhi-bo¹, LÜ Yun-he¹ and LIANG Jing-li²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. 514 Brigade of North China Geological Exploration Bureau, Chengde 067000, China)

Abstract: Lithium is an important strategic metal mineral, and spodumene granite pegmatite is an important source of lithium resources. Recently, the spodumene granite pegmatite group has been newly discovered in Chaka Mountain area of the northern margin of Qaidam. This paper determines the mineral formation, evolution and mineralization age of spodumene granite pegmatites through petrography, mineralogy and chronology. The spodumene granite pegmatite has two phases of mineral assemblages. In the early stage, there are coarse-grained spodumene, coarse-grained K-feldspar, coarse-grained muscovite, coarse-grained plagioclase, coarse-grained quartz and coltan, which belong to the product of the melt crystallization stage. The late stage is composed of cookeite, Li-rich mica, worm-like spodumene and fine allomorphic quartz, which is the product of post magmatic hydrothermal metasomatism. Therefore, it can be inferred that there are two stages of lithium mineralization, and the local alteration of early spodumene and the formation of later lithium minerals indicate that there is a process of lithium activation and

收稿日期: 2022-11-08; 接受日期: 2023-04-07; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(92062217)

作者简介: 吕书俊(1999-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 2969256514@qq.com; 通讯作者: 董国臣(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩浆作用与成矿研究, E-mail: donggc@cugb.edu.cn.

reprecipitation in the system. The coltan associated with spodumene gives a U-Pb age of 241.0 ± 1.3 Ma, indicating that the melt crystallization age of the spodumene granite pegmatite is the early lithium mineralization age, and the ore body is the product of Indosinian period.

Key words: the northern Chaka Mountain; spodumene granite pegmatite; mineralization characteristics; coltan U-Pb dating

Fund support: Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China(92062217)

锂是重要的战略金属,广泛应用于交通、航空、航天等领域(Linnen *et al.*, 2014; Nassar, 2017; Kaeter *et al.*, 2018),近年来随着新能源汽车和储能技术等新兴产业的快速发展,锂资源需求急剧上升(李杭等, 2020; Groves *et al.*, 2022)。花岗伟晶岩型锂矿是重要的锂矿类型(许志琴等, 2021),我国花岗伟晶岩型锂矿资源丰富,且分布较集中,主要分布在阿尔泰成矿带、川西-松潘甘孜成矿带、西昆仑-喀喇昆仑成矿带和华南成矿带(孙文礼等, 2021)和喜马拉雅淡色花岗岩带(秦克章等, 2021; 吴福元等, 2021)。而锂辉石花岗伟晶岩作为伟晶岩型锂矿中最重要的赋矿岩石类型,以产出大量的矿石矿物锂辉石而深受广大学者的关注。

柴北缘茶卡北山稀有金属矿床是近年来新发现的伟晶岩型锂-铍-铌-钽矿床,前人针对研究区内伟晶岩的地质背景(王秉璋等, 2020; 潘彤等, 2020, 2022)、地球化学特征(王秉璋等, 2020; 李善平等, 2022)、成岩成矿时代(王秉璋等, 2020; Pan *et al.*, 2021; 陈静等, 2022)、可能的源区和成因(王秉璋等, 2020; 李善平等, 2022)等方面进行了研究。然而由于不同测年方法得出的结果存在差异,目前对于区内锂辉石花岗伟晶岩的成矿时代尚存在争议,并且对于其中锂的赋存和演变规律的研究也相对匮乏。因此,本文对茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩进行了岩相学、矿物学、矿物化学和年代学研究,以探讨其锂矿化演变及其形成时限,为进一步的找矿勘查和研究工作提供依据。

1 地质背景

1.1 区域地质特征

茶卡北山地处青海南山西部,属于南祁连地块与全吉地块构造结合部位的宗务隆山构造带东段(图 1a)。区内断裂构造呈 NW-SE 向展布(图 1a),规模较大,横穿本区(王秉璋等, 2020)。区内地层主要为古元古界达肯大坂岩群、石炭系-二叠系甘家

组和下中三叠统隆务河组。达肯大坂岩群又分为片麻岩组、片岩组、大理岩组,前者主要为低角闪岩相长英质片麻岩,与少量云母片岩和斜长角闪岩互层;中间的片岩组主要为绿片岩相的云母片岩类变质岩;后者为碎裂中细粒大理岩等。甘家组下部为砂岩,上部为灰岩。隆务河组为碎屑岩相浊积岩,源岩主要为长英质岩石(赵文涛等, 2022)。区域上侵入岩以奥陶纪石英闪长岩为主,偶见奥陶纪辉长岩、三叠纪二长花岗岩和花岗斑岩(图 1b)。

1.2 矿床地质特征

矿区伟晶岩脉群总体沿宗务隆山断裂带呈 NW-SE 向带状展布(图 1c),单脉长短不一,大小不等,呈似层状,透镜状,按伟晶岩脉围岩的不同自北向南依次分为 I、II 和 III 共 3 个伟晶岩带,仅 I 号伟晶岩带发育锂辉石花岗伟晶岩。

I 号带伟晶岩脉呈大小不等的透镜状、榴状以及不规则脉状等,地表出露宽度 0.5~8 m,延长 55~340 m,主要为锂辉石花岗伟晶岩和白云母花岗伟晶岩,以前者为主,后者规模不大,厚度一般小于 1 m,常发育于伟晶岩脉边部。其围岩为奥陶纪石英闪长岩,两者呈突变接触(图 1d)。已有勘查工作在 I 号伟晶岩带圈定出 35 条花岗伟晶岩脉,其中 17 条为含矿伟晶岩脉,矿化类型主要为锂铍矿化,矿石矿物主要为锂辉石和绿柱石。脉体产状较复杂,分北东倾和北西倾两组(图 1d),经工程验证两组均可成矿。通过钻探工程深部验证,伟晶岩脉向深部有一定延伸,但多数迅速变薄并趋于尖灭,但个别脉体在深部有变薄后又见膨大特征。经初步测定, I 号带发育 24 条矿体,其 Li_2O 平均品位 0.58%~1.94%,伴生 BeO 品位 0.041%~0.076%(韩杰等, 2021)。

2 锂辉石花岗伟晶岩及其矿物学特征

锂辉石花岗伟晶岩呈浅灰白色,伟晶结构,块状构造(图 2a),主要矿物有锂辉石(15%~20%)、更(钠)长石(15%~25%)、钾长石(25%~35%)、石英

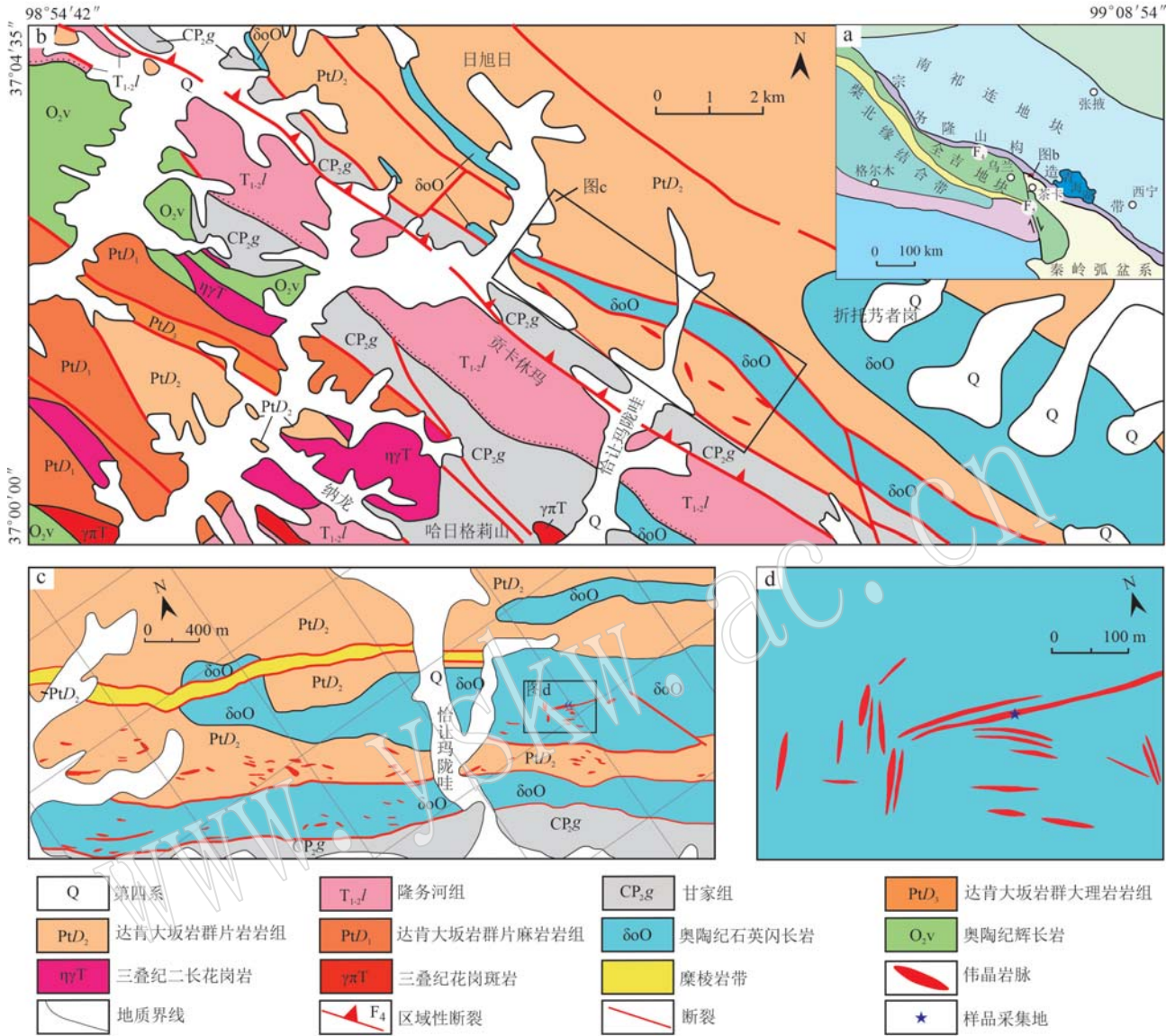


图 1 青藏高原东北缘构造分区略图(a)、茶卡北山地区地质图(b)、茶卡北山富锂伟晶岩分布图(c)和样品采集区地质图(d)[据潘桂棠等(2009)、Pan 等(2021)修改]

Fig. 1 Sketch geological map of the northeastern margin of the Tibetan Plateau (a), geological map of the northern Chaka Mountain(b), geological map of the lithium-rich pegmatite area in the northern Chaka Mountain(c) and the map of the sample collection area (d) (after Pan Guitang *et al.*, 2009; Pan *et al.*, 2021)

(20%~30%)、白云母(5%~10%)、石榴子石(0~5%)、绿柱石(0~5%)、铌钽铁矿(0~3%)和少量电气石。
锂辉石呈浅绿色,少数显黑色(图 2b),自形-半自形柱状,大小 0.5 cm×1 cm~2 cm×9 cm 不等,纵切面发育一组完全解理,横切面有两组近直交的完全解理。根据产状锂辉石可分为两种:第 1 种呈伟晶产出,偶见简单双晶,与粗粒钾长石、粗粒更(钠)长石和石英共生,沿其裂隙常见石英、云母和锂绿泥

石等矿物;第 2 种为蠕虫状,粒径小于 0.1 mm,常发育在粗粒锂辉石边部,表现为锂辉石和石英交互生长(图 2c)。
斜长石呈灰白色,自形板状,镜下可见细密的聚片双晶,为更(钠)长石。更(钠)长石可分为两种:第 1 种呈自形粗粒,粒径>2 mm,与粗粒钾长石和锂辉石共生,含石榴子石包裹晶(图 2d);第 2 种为半自形-他形细粒,粒径 0.05~0.3 mm,出现在矿物粒间及其他矿物裂隙内。

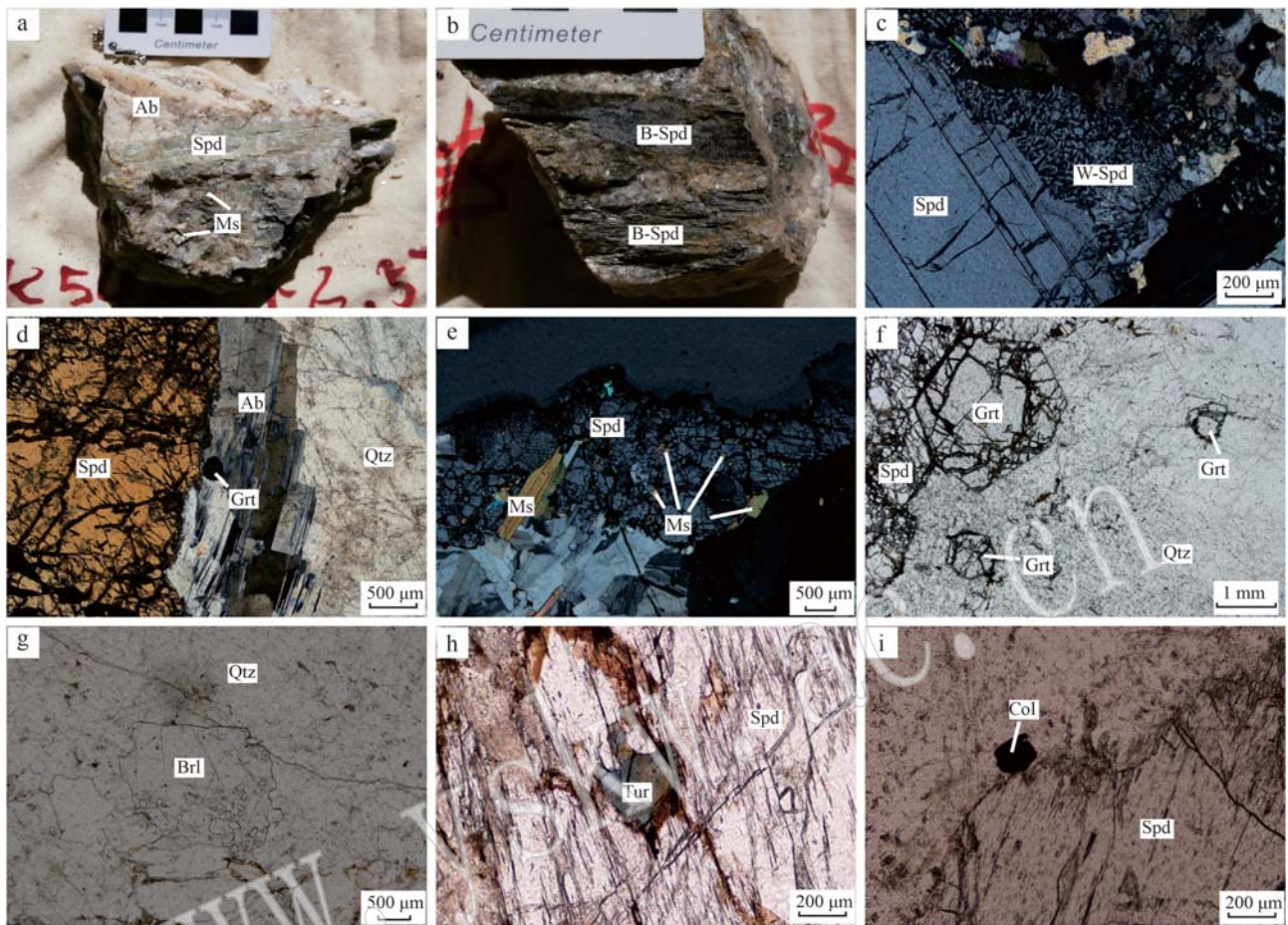


图2 锂辉石花岗伟晶岩手标本及显微镜下照片

Fig. 2 Photographs of hand specimens and microscopic photos of spodumene granitic pegmatite

a—锂辉石花岗伟晶岩; b—黑色锂辉石; c—粗粒锂辉石及其边部蠕虫状锂辉石(正交偏光); d—钠长石中捕获的石榴子石(正交偏光); e—白云母与锂辉石共生(正交偏光); f—不同颗粒大小的石榴子石(单偏光); g—交代残余状绿柱石(单偏光); h—锂辉石中的电气石(单偏光); i—铌钽铁矿与锂辉石共生(单偏光); Spd—锂辉石; B-Spd—黑色锂辉石; W-Spd—蠕虫状锂辉石; Ab—钠长石; Ms—白云母; Qtz—石英; Grt—石榴子石; Brl—绿柱石; Tur—电气石; Col—铌钽铁矿

a—spodumene granite pegmatite; b—black spodumene; c—coarse-grained spodumene and its edge vermicular spodumene(orthogonal polarized); d—garnet trapped in albite(orthogonal polarized); e—muscovite and spodumene symbiotic(orthogonal polarized); f—garnets of different particle sizes(single polarized); g—metasomatic residual beryl(single polarized); h—tourmaline in spodumene(single polarized); i—coltan symbiotic with spodumene(single polarized); Spd—spodumene; B-Spd—black spodumene; W-Spd—wormlike spodumene; Ab—albite; Ms—muscovite; Qtz—quartz; Grt—garnet; Brl—beryl; Tur—tourmaline; Col—coltan

钾长石呈黄白色,板状或他形粒状,镜下可见格子双晶和条纹结构,以条纹结构为主,为微斜条纹长石。可分为两种:第1种粗大自形,粒径>2 mm,与锂辉石和粗粒更(钠)长石等共生;第2种为他形细粒,粒径<0.1 mm,主要以不规则微细脉状、网脉状充填在锂辉石的细小裂隙内。

石英呈无色透明粒状晶体,可分为两种:第1种为半自形粗粒,粒径>1 mm,与锂辉石等矿物共生;第2种为他形细粒,粒径0.05~0.2 mm,主要充填在

其他矿物解理和裂隙中及矿物粒间。

白云母呈片状,发育一组极完全解理,最高干涉色二级蓝绿,可分为两种:第1种粗粒自形,粒径>1 mm,主要与锂辉石等矿物共生;第2种细粒他形,粒径0.05~0.2 mm,多产出在锂辉石裂隙或边缘处(图2e)。

石榴子石呈红棕色、暗红色,粒径在0.2~2.0 mm不等,单偏光镜下无色透明,正高突起,自形-半自形粒状晶体,正交下全消光,根据其产状可分

为两种:第1种呈细粒,他形,常产在粗粒更(更)长石中,可能为捕获成因(图2d);第2种粗粒自形,裂隙较发育,主要与锂辉石等共生(图2f)。

绿柱石无色透明,细粒他形短柱状,粒度在0.1~1.5 mm之间,具正中突起,干涉色一级灰,多被长英质矿物交代,表现出交代残余特征(图2g)。

电气石呈黑色,他形粒状,具淡蓝色到深蓝色多色性,颗粒较小,粒径0.2 mm左右,分布在锂辉石矿物颗粒内(图2h),干涉色分布不均匀,呈二级蓝绿。

铌钽铁矿呈黑色,短柱状,不透明矿物,粒径在0.1~0.3 mm之间,与锂辉石紧密共生(图2i),前人数据显示其以铌锰矿为主,含少量钽锰矿(Pan *et al.*, 2021)。

3 样品及测试方法

样品采自矿区I矿带(图1d),其中,21CK50、21CK51、21CK53、21CK57采自地表伟晶岩,21CK75取自钻孔岩芯,其岩性均为锂辉石花岗伟晶岩。将样品磨制成探针片,在偏光显微镜下观察矿物学特征及其相互关系,对细小难辨矿物进行扫描电镜能谱分析,选择代表性的含锂矿物利用电子探针测定其成分,同时从21CK51样品中挑选出铌钽铁矿单矿物,制靶进行铌钽铁矿U-Pb定年。

电子探针成分分析在中国地质科学院地质研究所完成,使用日本电子公司生产的电子探针显微分析仪(型号JXA-8100)进行测试分析,加速电压15 kV,束流20 nA,摄谱时间10 s,束斑5 μm ,小矿物束斑1~3 μm 不等,最终测试结果采用ZAF校正和SPI组合标样校正。

铌钽铁矿制靶和抛光在河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成,并拍摄BSE、透射和反射照片。在BSE图像下选取表面干净、远离裂隙和空隙的点进行U-Pb年代测试。测试地点为中国地质大学(北京)矿物激光微区实验室(Milma Lab),测试仪器为Agilent7900四极杆等离子体质谱仪,激光剥蚀系统为ASI RESOLUTION S155LR高能激光分子激光剥蚀系统,激光束斑直径为33 μm ,能量密度为6 J/cm²,频率为5 Hz。分析元素的驻留时间分别是:²³²Th和²⁰²Hg为10 ms,²³⁸U和²⁰⁸Pb为15 ms,²⁰⁴Pb和²⁰⁶Pb为20 ms,²⁰⁷Pb为30 ms。每轮分析过程中包括待测样品8个,铌钽铁矿Coltan139标样2个、NP-2标样2个,并且每两轮加测1个标准玻璃

NIST 610。其中Coltan139作为外标用来校正U-Pb同位素比值,NP-2作为监测标用于监测测试中仪器状态及实验结果,NIST 610用来校正微量元素含量,详细的分析步骤参见Che等(2015)。采用Iolite软件进行离线数据处理,Isoplot V4.15软件用于绘制Tera-Wasserburg图,并计算²⁰⁷Pb校正后的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄(Ludwig, 2003)。

4 测试结果

4.1 扫描电镜分析

在单偏光显微镜下发现部分锂辉石解理和裂隙中存在较多的细小难辨矿物,利用扫描电镜对这些矿物进行能谱分析,结果表明,在锂辉石解理和裂隙中的矿物成分主要为锂绿泥石、钾长石、白云母和石英。锂绿泥石呈他形,粒径0.1~0.3 mm不等,BSE图像下比锂辉石暗,主要和石英共同产出在锂辉石的裂隙内(图3a);钾长石在部分锂辉石中分布较广泛,主要呈微细脉状不规则地充填在锂辉石内,同时可见锂绿泥石与石英共同组成的细脉横切钾长石的现象(图3a)。白云母呈他形片状,粒径0.05~0.15 mm,在锂辉石裂隙内与石英、钾长石共生(图3b),但裂隙内不见锂绿泥石与白云母共生的现象。

同时在扫描电镜下发现在原生白云母的边部发育更亮的环带,能谱分析表明,更亮的边部环带更加富F,根据Tischendorf等(1997)提出的云母中Li含量与F含量的关系式可知,其更加富锂,应为富锂白云母(图4)。

4.2 含锂矿物化学成分特征

4.2.1 锂辉石

茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩中锂辉石电子探针分析结果(表1)中Li₂O含量由理想化学式配比和类质同象置换原理计算得到(胡军亮等, 2020)。通过电子探针分析及Li₂O含量的计算可以看到,锂辉石主要元素含量均接近于理想化学式,SiO₂含量为63.75%~64.43%,Al₂O₃含量为26.27%~27.14%,Li₂O含量为7.82%~7.92%,其中Fe为主要的杂质元素(TFeO含量为0.37%~0.95%),同时含有少量的MnO(0.08%~0.28%)、Na₂O(0.15%~0.23%)等。蠕虫状锂辉石化学成分与粗粒锂辉石化学成分相近,但含有相对较高的FeO含量。

4.2.2 锂绿泥石

锂绿泥石的电子探针成分分析结果见表2,其中

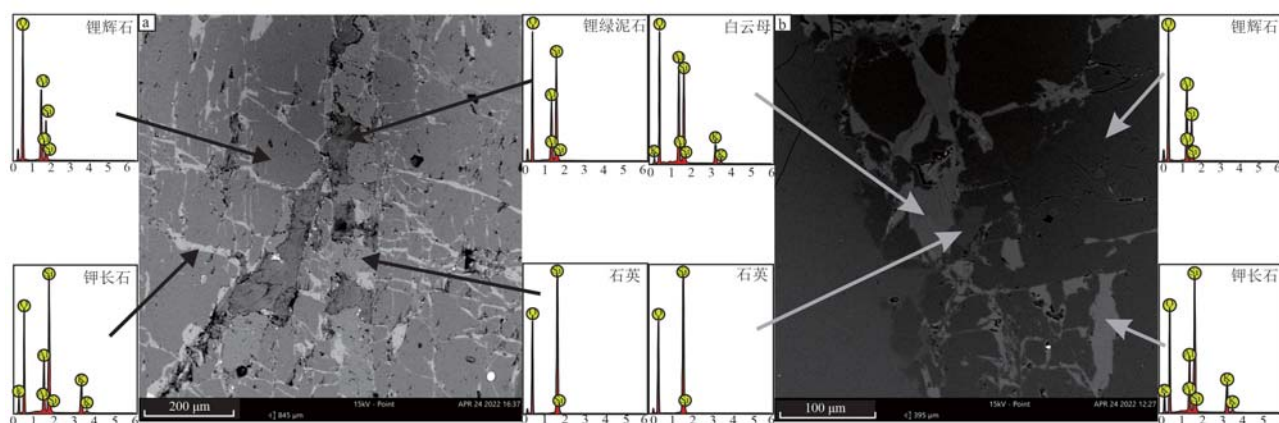


图3 锂辉石内锂绿泥石和钾长石(a)、白云母和钾长石(b)的背散射图和矿物能谱图

Fig. 3 BSE photos and energy spectra of cookeite and K-feldspar (a), muscovite and K-feldspar (b) in spodumene

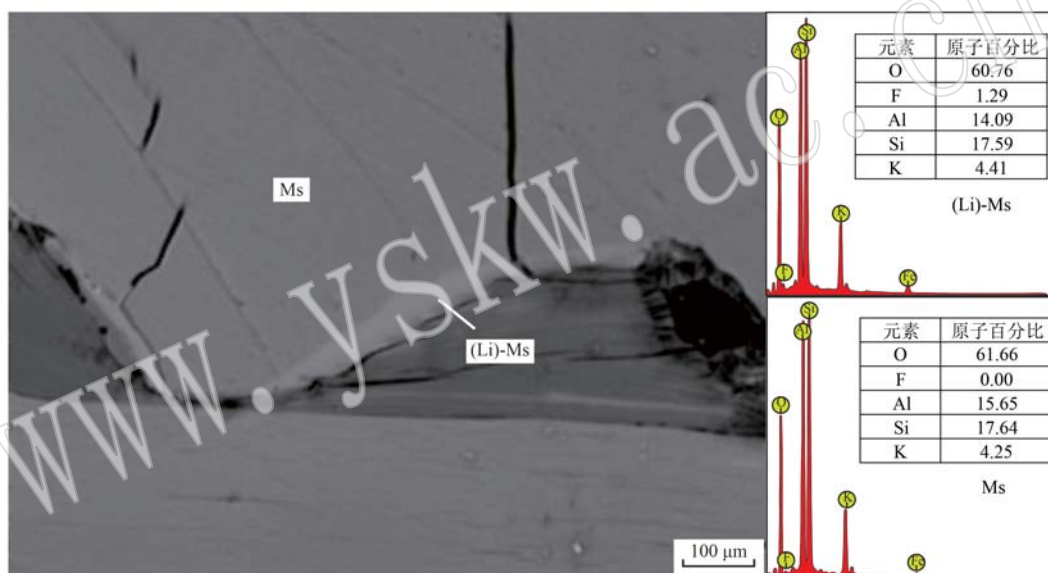


图4 原生白云母发育富锂云母边的扫描电镜照片及其能谱图

Fig. 4 SEM photo of lithium-rich mica edge developed from primary muscovite and their energy spectra

Ms—白云母; (Li)-Ms—富锂白云母

Ms—muscovite; (Li)-Ms—Li-rich muscovite

Li_2O 含量由理想化学式配比和类质同象置换原理计算得到。锂绿泥石中 SiO_2 含量为 35.57% ~ 37.94%, Al_2O_3 含量为 41.76% ~ 43.02%, Li_2O 含量为 2.67% ~ 2.79%, TFeO 含量为 2.73% ~ 4.69%, MnO 含量为 0.63% ~ 1.35%, 同时含有少量的 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 等。

4.3 铌钽铁矿 U-Pb 年龄

锂辉石花岗伟晶岩样品(21CK51)中铌钽铁矿多为自形-半自形短柱状晶体,大小 80~250 μm ,长宽比 1:1~2:1。背散射图像显示大部分铌钽铁矿内

部成分较均一,明亮程度变化不大,表现为暗灰或明亮;少数内部成分较复杂,呈斑杂状或呈现出韵律环带,同时部分铌钽铁矿中可见裂隙发育(图5)。铌钽铁矿的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 变化范围为 0.037 45 ~ 0.038 70, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 变化范围为 0.252 0 ~ 0.308 2, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 变化范围为 0.049 2 ~ 0.058 3 (表3)。在 Tera-Wasserburg 图中,14 个测点得出反谐和年龄为 $241.5 \pm 1.2 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.73$, $n=14$), 经 ^{207}Pb 校正后的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $241.0 \pm 1.3 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.62$, $n=14$) (图6)。

表 1 茶卡北山代表性锂辉石电子探针分析结果 $w_B/\%$
Table 1 Electron probe analysis results of representative spodumene in the northern Chaka Mountain

组分	21CK50	21CK53	21CK75-1	21CK75-2	21CK75-2
	粗粒	粗粒	粗粒	粗粒	蠕虫状
SiO ₂	63.81	63.92	64.43	63.75	63.98
TiO ₂	—	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	26.87	26.83	26.60	27.14	26.27
Cr ₂ O ₃	—	—	0.04	—	0
TFeO	0.71	0.73	0.56	0.37	0.95
MnO	0.16	0.08	0.13	0.28	0.21
MgO	0.01	0.01	—	—	—
CaO	0.01	0.02	0.01	0.01	—
Na ₂ O	0.23	0.18	0.19	0.16	0.15
K ₂ O	0.01	0.01	—	0.01	0.01
P ₂ O ₅	—	—	—	0.02	—
Li ₂ O *	7.82	7.85	7.92	7.84	7.88
Total	99.69	100.45	99.88	99.58	100.62
O = 6, Na+K+Ca+Li = 1					
Si	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.993	0.989	0.981	1.003	0.968
Cr	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Fe	0.019	0.019	0.015	0.010	0.025
Mn	0.004	0.002	0.004	0.007	0.006
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Na	0.014	0.011	0.011	0.010	0.009
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Li	0.985	0.988	0.988	0.990	0.990

* 为计算值,TFeO 为全铁含量,—为低于检测限。

表 2 茶卡北山代表性锂绿泥石电子探针分析结果 $w_B/\%$
Table 2 Electron probe analysis results of representative cookeite from the northern Chaka Mountain

组分	COK53-1	COK53-2	COK57-1	COK57-2
SiO ₂	37.94	37.04	36.95	35.57
TiO ₂	—	0.06	0.03	0.05
Al ₂ O ₃	42.47	42.04	43.02	41.76
TFeO	3.55	4.69	2.75	2.73
CaO	0.02	0.02	0.05	0.08
MnO	0.63	0.98	1.35	1.28
Na ₂ O	0.09	0.03	0.04	0.05
K ₂ O	0.05	0.02	0.02	0.05
F	—	0.01	0.01	0.02
O≡F	—	-0.00	-0.00	-0.01
Li ₂ O *	2.78	2.79	2.78	2.67
H ₂ O *	13.72	13.61	13.63	13.13
Total	101.25	101.29	100.63	97.38
O = 14, Na+K+Ca+Li = 1				
Si	3.316	3.265	3.252	3.246
Ti	0.000	0.004	0.002	0.004
Al	4.374	4.367	4.461	4.491
Fe	0.259	0.346	0.203	0.208
Ca	0.001	0.002	0.005	0.008
Mn	0.047	0.073	0.101	0.099
Na	0.015	0.005	0.006	0.008
K	0.006	0.002	0.002	0.005
F	0.000	0.001	0.001	0.007
Li	0.978	0.992	0.986	0.978
OH	8.000	7.999	7.999	7.993

* 为计算值,TFeO 为全铁含量,—为低于检测限。

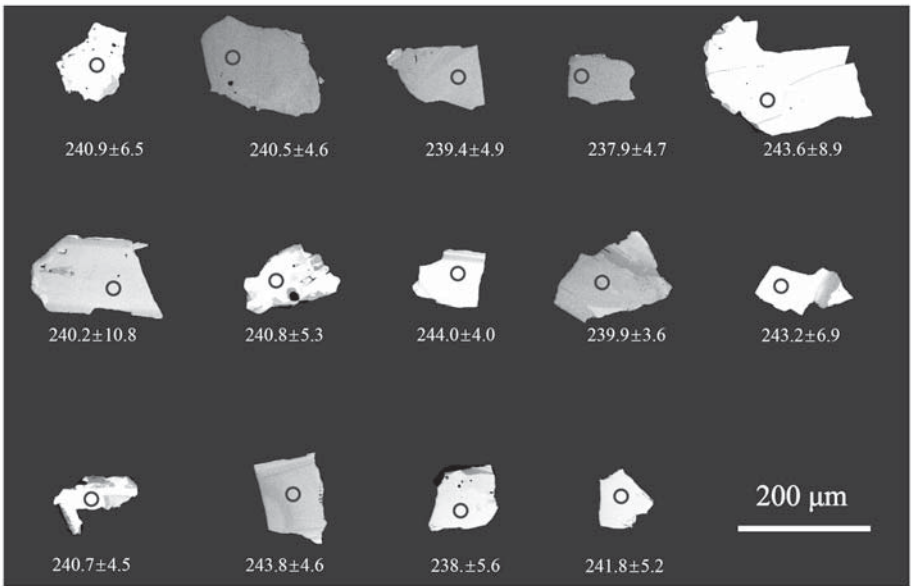
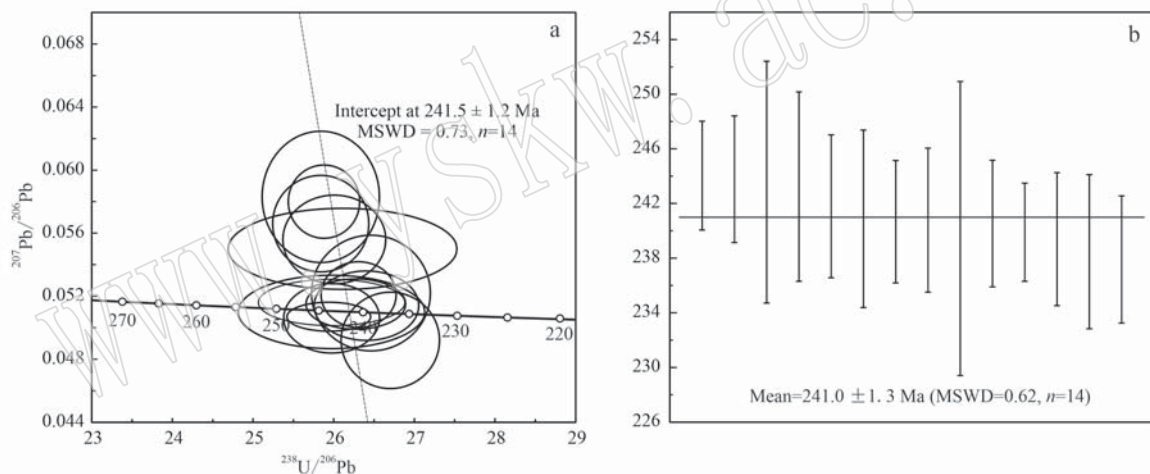


图 5 铌钽铁矿测点及各测点年龄
Fig. 5 Coltan measuring points and their ages

表3 茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩 LA-ICP-MS 铌钽铁矿 U-Pb 定年结果

Table 3 LA-ICP-MS dating results of coltan from spodumene granite pegmatite in the northern Chaka Mountain

测点	同位素比值及误差						年龄及误差/Ma				^{207}Pb 校正后年龄	
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ
X21CK51-1	0.051 0	0.001 9	0.276 0	0.014 0	0.038 50	0.001 40	245.0	11.0	243.4	8.6	243.6	8.9
X21CK51-2	0.058 3	0.003 4	0.308 0	0.016 0	0.038 70	0.000 89	271.0	13.0	244.8	5.5	240.9	6.5
X21CK51-3	0.055 6	0.002 3	0.295 0	0.014 0	0.038 45	0.000 77	263.0	11.0	243.2	4.8	240.8	5.3
X21CK51-5	0.058 0	0.001 9	0.308 2	0.009 7	0.038 64	0.000 54	272.0	7.5	244.3	3.4	240.7	4.5
X21CK51-6	0.051 6	0.001 2	0.273 6	0.009 5	0.038 50	0.001 10	244.7	7.6	243.7	6.8	243.2	6.9
X21CK51-7	0.051 5	0.001 3	0.269 4	0.008 2	0.038 06	0.000 73	241.6	6.5	240.7	4.6	240.5	4.6
X21CK51-8	0.051 4	0.001 8	0.265 0	0.010 0	0.037 87	0.000 76	238.4	8.1	239.6	4.8	239.4	4.9
X21CK51-10	0.049 2	0.002 5	0.252 0	0.014 0	0.037 45	0.000 70	227.0	11.0	237.0	4.3	237.9	4.7
X21CK51-24	0.052 1	0.001 7	0.272 8	0.009 3	0.038 01	0.000 55	244.3	7.4	240.5	3.4	239.9	3.6
X21CK51-28	0.055 0	0.002 1	0.286 0	0.015 0	0.038 30	0.001 70	254.0	12.0	242.0	10.0	240.2	10.8
X21CK51-30	0.050 6	0.001 8	0.267 7	0.009 7	0.038 50	0.000 72	240.2	7.8	243.5	4.4	243.8	4.6
X21CK51-31	0.056 6	0.002 5	0.303 0	0.014 0	0.038 70	0.000 73	267.0	11.0	244.7	4.6	241.8	5.2
X21CK51-32	0.052 2	0.003 0	0.271 0	0.017 0	0.037 79	0.000 86	242.0	13.0	239.1	5.4	238.5	5.6
X21CK51-37	0.050 7	0.000 8	0.268 9	0.005 1	0.038 55	0.000 63	241.6	4.1	243.8	3.9	244.0	4.0

图6 铌钽铁矿 U-Pb 同位素 Tera-Wasserburg 图(a)和经 ^{207}Pb 校正后 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄图解(b)Fig. 6 Coltan U-Pb Tera-Wasserburg curve (a) and weighted mean ages of ^{207}Pb -corrected $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages (b)

5 讨论

5.1 矿物生成顺序及矿化分期

根据矿物产状及其相互关系,锂辉石花岗伟晶岩中矿物可以明显地分出两种矿物组合:一种由粗粒锂辉石、钾长石、更(钠)长石、粗粒白云母、粗粒石英、粗粒石榴石、绿柱石、铌钽铁矿等组成;另一种包括蠕虫状锂辉石、细粒钠长石、细脉状钾长石、细粒他形石英、富锂白云母及锂绿泥石等。对比发现,两者具有明显的世代关系,相对于后者前者明显生成较早,它们可代表不同的生成阶段,即早期的熔体结

晶阶段和晚期的热液交代阶段(图7)。熔体结晶阶段主要形成了伟晶矿物,如粗粒的锂辉石、钾长石、更(钠)长石、石英、白云母等,还有一些与这些伟晶矿物紧密共生的绿柱石、铌钽铁矿、粗粒石榴子石等;热液交代阶段主要产生一些晚期次生矿物,如锂绿泥石、富锂白云母、蠕虫状锂辉石和充填在伟晶矿物裂隙内的钾长石、石英等(图7)。

两期矿物组合中均存在含锂矿物,即早期的粗粒锂辉石和晚期的蠕虫状锂辉石、锂绿泥石和富锂白云母,由此可见,锂辉石花岗伟晶岩存在两期锂矿化,早期岩浆气液熔体结晶阶段为主要锂矿化期,以结晶出大量的粗粒锂辉石为特征,晚期热液交代阶



图 7 锂辉石花岗伟晶岩矿物生成顺序

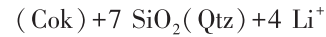
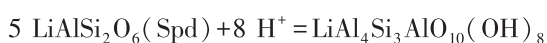
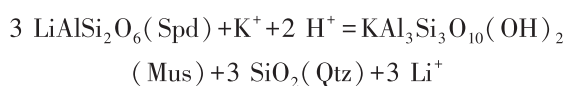
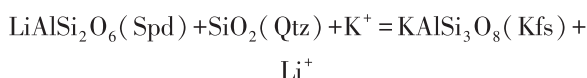
Fig. 7 Sequence of formation of the spodumene pegmatite minerals

段为次要锂矿化期,以形成少量蠕虫状锂辉石、锂绿泥石和富锂白云母为特征。

5.2 锂辉石花岗伟晶岩中锂矿物的演变

锂为碱金属元素,在岩浆过程中属于中度不相容元素 (Ryan and Langmuir, 1987; Sauzéat *et al.*, 2015),在岩浆分异演化的晚期大量富集,并在存在挥发分和一定的温压条件下可从熔体中结晶出颗粒粗大的锂辉石 (Linnen *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2015a; Yin *et al.*, 2020)。锂辉石后期在不同的热液交代环境中可以形成不同的热液蚀变矿物 (London and Burt, 1982a; Charoy *et al.*, 2001; Bobos *et al.*, 2007; Rao *et al.*, 2012),在碱性流体的作用下可形成钠长石或钾长石 (Charoy *et al.*, 2001),在酸性流体的作用下可形成云母和石英或锂绿泥石和石英 (Charoy *et al.*, 2001; Bobos *et al.*, 2007),同时随着所处环境温压条件的改变可以转变成其他的锂铝硅酸盐矿物 (London and Burt, 1982b; London, 1984)。

根据扫描电镜观察和能谱分析可知,部分锂辉石经历了热液交代作用,并在热液交代作用下生成了次生钾长石、次生白云母+石英、锂绿泥石+石英的组合 (图 3),其经流体交代作用蚀变的反应方程式如下 (Charoy *et al.*, 2001; Yin *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022):



这些矿物作为新生矿物组合产于锂辉石裂隙或者解理缝中,矿物相发生了转变,同时可见锂绿泥石穿插后期形成的钾长石 (图 3a),这指示锂辉石花岗伟晶岩在形成之后,经历了由碱交代向酸交代转变的蚀变过程。而这也与 London 等 (1982a) 提出的伟晶岩体系内整体的蚀变序列相符 (王臻, 2021)。

5.3 锂辉石花岗伟晶岩中锂元素的迁移和演变

化学成分分析表明,茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩中锂辉石的 Li_2O 、 SiO_2 和 Al_2O_3 含量均较稳定 (表 1),且较我国其他典型伟晶岩矿床中锂辉石的化学成分也具有更窄的变化范围 (图 8),同时 Fe 作为锂辉石中的主要杂质元素,FeO 含量较低,最高仅有不到 1%,表明锂辉石形成时体系内的环境较稳定。而从锂辉石到锂绿泥石,其 Al_2O_3 、FeO 含量明显增高, Li_2O 、 SiO_2 含量明显降低 (图 9)。 Al_2O_3 是不活泼成分,锂绿泥石中的含量增加可能是继承了原有矿物的成分; SiO_2 含量的降低则是形成了石英; FeO 含量的增加可能代表了晚期体系内杂质元素含量的增加,这一点也从蠕虫状锂辉石中 FeO 含量比粗粒锂辉石中 FeO 的含量高 (表 1) 得到佐证; Li_2O 含量的降低则显示出了体系内 Li 含量的贫化过程。上述现象表明晚期体系内锂含量主要受控于热液作用,随着热液交代作用的进行,锂辉石反应后释放在体系内的 Li 和主要杂质元素 Fe 在锂绿泥石中得到了一定的富集。同时原生白云母的边部出现了次生交

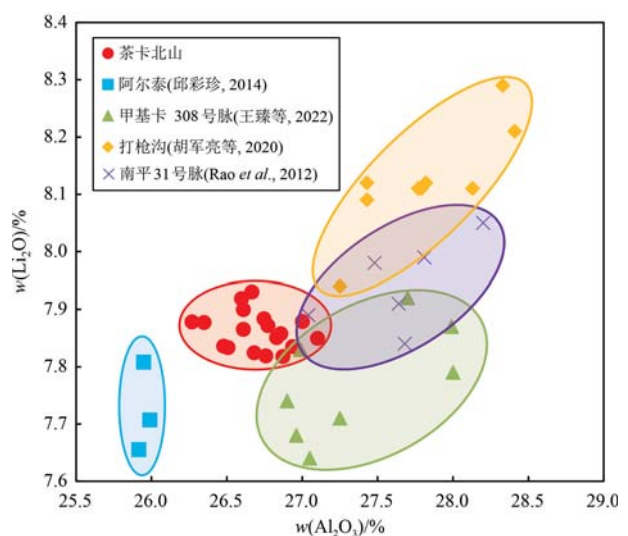


图 8 我国不同伟晶岩矿床锂辉石化学成分对比图

Fig. 8 Comparison of chemical composition of spodumene from different pegmatite deposits in China

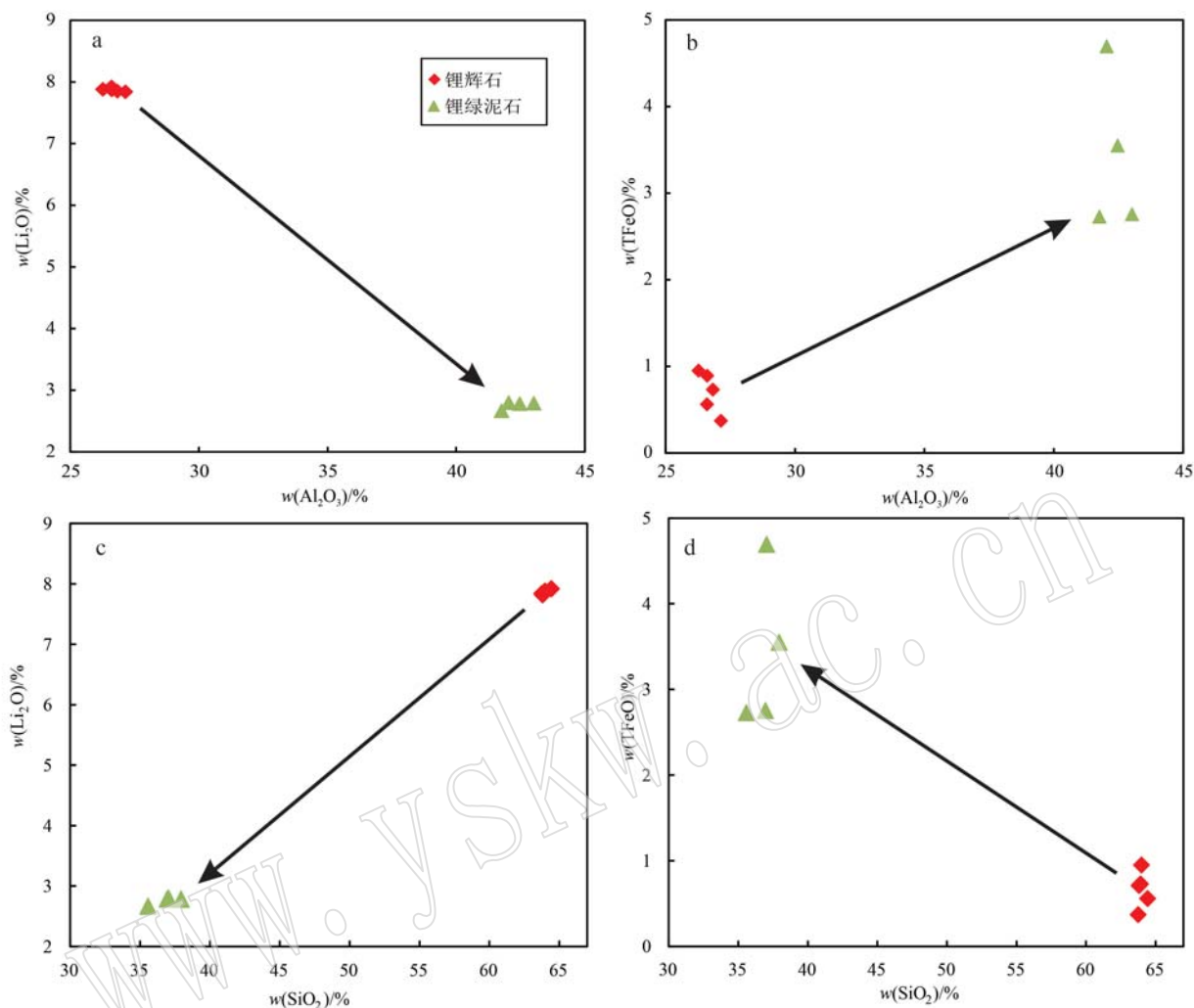


图9 锂辉石和锂绿泥石的 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ (a)、 $\text{TFeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ (b)、 $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (c) 和 $\text{TFeO}-\text{SiO}_2$ (d) 图解

Fig. 9 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ (a), $\text{TFeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ (b), $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (c) and $\text{TFeO}-\text{SiO}_2$ (d) diagrams of spodumene and cookeite

代成因的富锂白云母(图4),指示经热液交代作用释放在体系中的Li部分进入了白云母的晶格内,使得体系内的Li在富锂白云母中再次富集,显示了锂辉石花岗伟晶岩中存在Li的活化和再沉淀过程。

锂辉石镜下特征表明,锂辉石的蚀变较局限,蚀变部分体积占锂辉石总体积的8%左右,其他锂辉石总体还保持着较新鲜的特征。这说明体系内晚期热液交代作用整体上并不强烈,有很大的局限性,暗示茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩经历了一定的岩浆热液演化过程,但热液交代作用的规模有限,使得此处大部分的锂辉石得以保存(王臻等,2022)。

5.4 锂辉石花岗伟晶岩成矿时限

近年来较多的同位素定年方法被应用于伟晶岩矿床的定年,如白云母 Ar-Ar 法、锆石 U-Pb 法、铌钽

铁矿 U-Pb 法、锡石 U-Pb 法等(李杭等,2020;刘涛等,2020;张立平等,2021;Xiong *et al.*, 2020; Fei *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020)。白云母 Ar-Ar 体系由于其较低的封闭温度,往往会受到后期热液事件的影响,使得其年龄普遍比其他方法得出的年龄年轻(Zhou *et al.*, 2015b; 李杭等,2020; 蒋少涌等,2021)。锆石 U-Pb 法是火成岩中常用的定年方法,且其定年技术成熟,但是伟晶岩中的锆石往往具有高 U 含量,易发生蜕晶化甚至重结晶,同时继承成因和捕获锆石的存在,给锆石 U-Pb 法准确定年带来了较大困难(Tomaschek *et al.*, 2003; Rayner *et al.*, 2005; 李秋立,2016; 蒋少涌等,2021)。而由于铌钽铁矿和锡石是伟晶岩中的常见矿物,具有较低普通 Pb 值和较高 U 含量,同时不易受后期热液交代的

影响,因而可以很好地限定伟晶岩的成岩成矿时代(赵俊兴等, 2021)。

茶卡北山伟晶岩已有部分年代学研究(王秉璋等, 2020; Pan *et al.*, 2021; 陈静等, 2022)。王秉璋等(2020)利用锆石 U-Pb 定年得出锂辉石花岗伟晶岩脉成岩年代为 217.0 ± 1.8 Ma, 但由于其所测锆石均表现出热液锆石的特点, 同时“高 U 效应”和 Pb 丢失现象也严重影响了其锆石 U-Pb 年龄的准确性。Pan 等(2021)利用铌钽铁矿 U-Pb 定年得出锂辉石花岗伟晶岩脉年龄为 240.6 ± 1.5 Ma, 但其 BSE 图像中不同亮度颗粒得出的年龄不一致, 且未见铌钽铁矿与其他矿物之间的关系, 难以确定该年龄的具体意义。陈静等(2022)利用云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法得出锂辉石花岗伟晶岩边部白云母花岗伟晶岩年龄为 212.6 ± 0.64 Ma, 认为该年龄可代表晚期锂成矿(锂云母形成)时间。本文利用铌钽铁矿 U-Pb 法对茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩年龄进行了测定, 14 粒铌钽铁矿的反谱和年龄为 241.5

± 1.2 Ma, MSWD=0.73, ^{207}Pb 校正后加权平均年龄为 241.0 ± 1.3 Ma, MSWD=0.62, 与 Pan 等(2021)得到的较暗铌钽铁矿颗粒年龄近乎一致, 并且 BSE 图像中不同亮度铌钽铁矿所得出的年龄接近, 不存在明显变化(图 5)。前人采用云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法和锆石 U-Pb 法得出的年龄较接近, 且小于本文采用铌钽铁矿 U-Pb 法测年得出的年龄, 而这种现象在我国其他典型伟晶岩型锂矿床也普遍存在(图 10)。目前较多的学者认为伟晶岩中高 U 锆石 U-Pb 年龄与云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄更多地代表着晚期热液交代的年龄。茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩中铌钽铁矿属于岩浆阶段晚期的伟晶岩阶段早期矿物组合(图 7), 因此, 该加权平均年龄可代表伟晶岩早期熔体结晶阶段年龄, 而前人得出的热液锆石 U-Pb 年龄和云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄代表了晚期锂成矿时间, 暗示茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩的成矿时限开始于 241 Ma 左右, 成矿时间下限为 212 Ma 左右, 整个矿床为印支期产物。

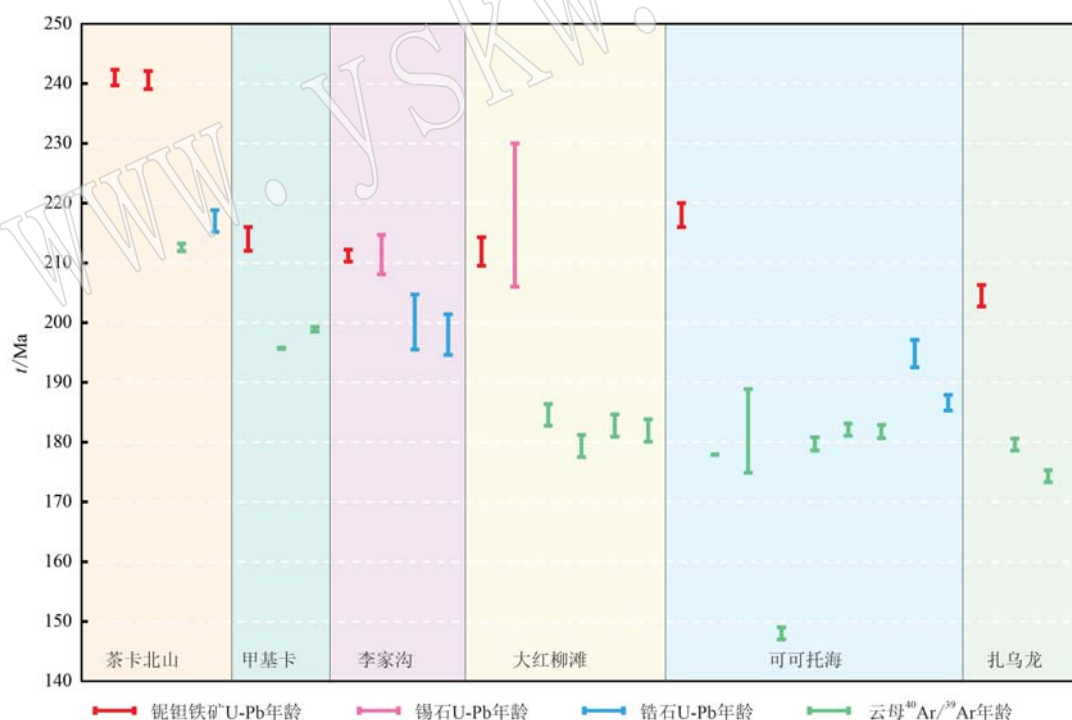


图 10 全国典型伟晶岩型锂矿床不同测年方法年龄统计图

Fig. 10 Age statistics of typical pegmatite lithium deposits in China by different dating methods

数据来源: Chen 等(2000)、王登红等(2005)、郝雪峰等(2015)、Che 等(2015)、Zhou 等(2015b)、邓运等(2018)、Yan 等(2018)、王秉璋等(2020)、Li 等(2019)、Fei 等(2020)、Pan 等(2021)、陈静等(2022)、李永等(2022)

data source: Chen *et al.*, 2000; Wang Denghong *et al.*, 2005; Hao Xuefeng *et al.*, 2015; Che *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2015b; Deng Yun *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2018; Wang Bingzhang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2019; Fei *et al.*, 2020; Pan *et al.*, 2021;

Chen Jing *et al.*, 2022; Li Yong *et al.*, 2022

6 结论

(1) 青海茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩存在两期锂矿化,早期岩浆气液熔体结晶矿化阶段矿石矿物主要为锂辉石,晚期热液交代矿化阶段矿石矿物有锂绿泥石、富锂白云母和少量蠕虫状锂辉石。

(2) 锂辉石及其中发育的次生矿物指示锂辉石花岗伟晶岩在成岩成矿后经历了碱性热液向酸性热液转变的交代作用,使得其中的Li经历二次分配,但整体上较局限的蚀变现象表明其经历的热液交代作用并不强烈。

(3) 锂辉石花岗伟晶岩中铌钽铁矿 U-Pb 年代学分析结果表明其伟晶阶段熔体结晶年龄为 241.0 ± 1.3 Ma,代表了其成矿开始时限,整个矿床为印支期产物。

致谢 感谢中国地质科学院地质所电子探针实验室毛小红老师和李青林助理在电子探针测试期间的指导与帮助,同时衷心感谢各位专家和编辑在审稿过程中对本文提出的宝贵修改意见。

References

- Bobos I, Vieillard P, Charoy B, *et al.* 2007. Alteration of spodumene to cookeite and its pressure and temperature stability conditions in li-bearing aplite-pegmatites from northern Portugal [J]. *Clays and clay Minerals*, 55(3): 295~310.
- Charoy B, Noronha F and Lima A. 2001. Spodumene-petalite-eucryptite: Mutual relationships and pattern of alteration in Li-rich aplite-pegmatite dykes from northern Portugal [J]. *The Canadian Mineralogist*, 39(3): 729~746.
- Che X D, Wu F Y, Wang R C, *et al.* 2015. In situ U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS [J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 979~989.
- Chen F W, Li H Q, Wang D H, *et al.* 2000. New chronological evidence for Yanshanian diagenetic mineralization in China's Altay orogenic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(2): 108~114.
- Chen Jing, Han Jie, Yu Fucheng, *et al.* 2022. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of muscovite in Chaka Beishan Li-polymetallic deposit in Qinghai province and the geological significance [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 37(2): 142~147 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yun, Fei Guangchun, Li Jian, *et al.* 2018. Study of C-H-O isotopes and geochronology of the Lijiagou pegmatite spodumene deposit in Sichuan province [J]. *J. Mineral. Petrol.*, 38(3): 40~47 (in Chinese with English abstract).
- Fei G C, Menuge J F, Li Y Q, *et al.* 2020. Petrogenesis of the Lijiagou spodumene pegmatites in Songpan-Garze Fold Belt, West Sichuan, China: Evidence from geochemistry, zircon, cassiterite and coltan U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions [J]. *Lithos*, 364~365 (3): 105555.
- Groves D I, Zhang L, Groves I M, *et al.* 2022. Spodumene: The key lithium mineral in giant lithium-cesium-tantalum pegmatites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(1): 1~8.
- Han Jie, Cao Hongliang, Wang Tao, *et al.* 2021. Report on Pre-survey of Lithium Rare and Rare Earth Metal Ore in Chakabeishan Area, Tianjun County, Qinghai Province [R]. Qinghai: Qinghai Geological Survey Institute (in Chinese with English abstract).
- Hao Xuefeng, Fu Xiaoliang, Liang Bin, *et al.* 2015. Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 34(6): 1 199~1 208 (in Chinese with English abstract).
- Hu Junliang, Tan Hongqi, Zhou Xiong, *et al.* 2020. A study of mineralogy and mineral chemistry of ore-bearing pegmatites in the Daqianggou lithium-beryllium deposit, western Sichuan [J]. *Geological Bulletin of China*, 39(12): 2 013~2 028 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoyong, Wang Chunlong, Zhang Lu, *et al.* 2021. In situ trace element tracing and isotopic dating of pegmatite type lithium deposits: An overview [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3 017~3 038 (in Chinese with English abstract).
- Kaeter D, Barros R, Menuge J F, *et al.* 2018. The magmatic-hydrothermal transition in rare-element pegmatites from Southeast Ireland: LA-ICP-MS chemical mapping of muscovite and columbite-tantalite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 240: 98~13.
- Li Hang, Hong Tao, Yang Zhiquan, *et al.* 2020. Comparative studying on zircon, cassiterite and coltan U-Pb dating and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite rare-metal granitic pegmatites: A case study of the northern Tugeman lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9): 2 869~2 892 (in Chinese with English abstract).
- Li P, Li J K, Chou I M, *et al.* 2019. Mineralization epochs of granitic rare-metal pegmatite deposits in the Songpan-Ganze orogenic belt and their implications for orogeny [J]. *Minerals*, 9(5): 280.

- Li Qiuli. 2016. "High-U effect" during SIMS zircon U-Pb dating[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 35(3): 405~412, 401(in Chinese with English abstract).
- Li Shanping, Pan Tong, Yan Xingpeng, *et al.* 2022. REE geochemical characteristics and provenance analysis of Chaka North Mountain pegmatite in the eastern part of the Northern Margin of Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. Chinese Rare Earths, 43(4): 88~99(in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Wang Wei, Du Xiaofei, *et al.* 2022. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite of pegmatite type rare metal deposit in western 509 Daoban, Dahongliutan, West Kunlun and its limitation to regional mineralization[J/OL]. Global Geology, 1~6(in Chinese with English abstract). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220311.1218.006.html>
- Linnen R L, Trueman D L and Burt R. 2014. Tantalum and niobium [C]//Gunn G. Critical Metals Handbook. Chichester, UK: Wiley, 361~384.
- Linnen R L, Lichtervelde M V and Černý P. 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals[J]. Elements, 8(4): 275~280.
- Liu C, Wang R C, Wu F Y, *et al.* 2020. Spodumene pegmatites from the Pusila pluton in the higher Himalaya, South Tibet: Lithium mineralization in a highly fractionated leucogranite batholith[J]. Lithos, 358~359: 105421.
- Liu Tao, Tian Shihong, Wang Denghong, *et al.* 2020. Genetic relationship between granite and pegmatite in Kalu'an hard-rock-type lithium deposit in Xinjiang: Results from zircon U-Pb dating, Hf-O isotopes and whole-rock geochemistry[J]. Acta Geologica Sinica, 94(11): 3 293~3 334(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: 995~1 004.
- London D and Burt D M. 1982a. Lithium aluminosilicate occurrences in pegmatites and the lithium aluminosilicate phase diagram[J]. American Mineralogist, 67: 483~493.
- London D and Burt D M. 1982b. Alteration of spodumene, montebrasite and lithiophilite in pegmatites of the White Picacho District, Arizona [J]. American Mineralogist, 67: 97~113.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 1~39.
- Nassar N T. 2017. Shifts and trends in the global anthropogenic stocks and flows of tantalum[J]. Resources, Conservation and Recycling, 125: 233~250.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, *et al.* 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 36(1): 1~28(in Chinese with English abstract).
- Pan T, Ding Q F, Zhou X, *et al.* 2021. Columbite-tantalite group mineral U-Pb geochronology of Chaqiabeishan Li-rich granitic pegmatites in the Quanji massif, NW China: Implications for the genesis and emplacement ages of pegmatites [J]. Frontiers in Earth Science, 8: 606951.
- Pan Tong, Li Shanping, Ren Hua, *et al.* 2020. Metallogenic conditions and prospecting potential of lithium polymetallic deposits in North Qaidam Basin[J]. Mineral Exploration, 11(6): 1 101~1 116(in Chinese with English abstract).
- Pan Tong, Li Shanping, Wang Tao, *et al.* 2022. Metallogenic characteristics and prospecting potential of lithium deposits in the Qinghai Province[J]. Acta Geological Sinica, 96(5): 1 827~1 854(in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Zhao Junxing, He Changtong, *et al.* 2021. Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(11): 3 277~3 286(in Chinese with English abstract).
- Qiu Caizhen. 2014. Study on Mineralogical Characteristics of the Spodumene in the Altay Orogen, Xinjiang[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Rao C, Wang R C, Zhang A C, *et al.* 2012. The corundum + tourmaline nodules related to hydrothermal alteration of spodumene in the nanning No. 31 pegmatite dyke, Fujian Province, southeastern China [J]. The Canadian Mineralogist, 50(6): 1 623~1 635.
- Rayner N, Stern R A and Carr S D. 2005. Grain-scale variations in trace element composition of fluid-altered zircon, Acasta Gneiss Complex, northwestern Canada[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 148(6): 721~734.
- Ryan J G and Langmuir C H. 1987. The systematics of lithium abundances in young volcanic rocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 51(6): 1 727~1 741.
- Sauzéat L, Rudnick R L, Chauvel C, *et al.* 2015. New perspectives on the Li isotopic composition of the upper continental crust and its weathering signature[J]. Earth and Planetary Science Letters, 428: 181~192.
- Sun Wenli, Ma Yeqing and Song Qingwei. 2021. Characteristics and research progress of granitic pegmatite type lithium deposits in China [J]. Geology and Exploration, 57(3): 478~496(in Chinese with English abstract).
- Tischendorf G, Gottesmann B, Forster H J, *et al.* 1997. On Li-bearing

- micas: Estimation Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation[J]. *Mineralogical Magazine*, 61: 809~834.
- Tomaschek F, Kennedy A K, Igor M, *et al.* 2003. Zircon from Syros, Cyclades, Greece—Recrystallization and mobilization of zircon during high-pressure metamorphism[J]. *Journal of Petrology*, 44(11): 1 977.
- Wang Bingzhang, Han Jie, Xie Xianglei, *et al.* 2020. Discovery of the Indosinian (beryl-bearing) spodumene pegmatitic dike swarm in the Chaka-Beishan area in the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Implications for Li-Be mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(1): 69~79(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Jiangkang and Fu Xiaofang. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan and its significance[J]. *Geochimica*, (6): 3~9(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhen. 2021. Mineralogical Tracing of Magmatic-hydrothermal Revolution and Mineralization of Jiajika Pegmatite Type Lithium Deposit, Western Sichuan, China[D]. Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Wang Zhen, Chen Zhenyu, Li Jiangkang, *et al.* 2022. Mineralogical characteristics and their constraints on the magmatic-hydrothermal evolution for the Jiajika No. 308 pegmatite, western Sichuan, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 2 039~2 061(in Chinese with English abstract).
- Wang Z, Li J K, Chen Z Y, *et al.* 2022. Evolution and Li mineralization of the No. 134 pegmatite in the Jiajika rare-metal deposit, Western Sichuan, China: Constrains from critical minerals. [J]. *Minerals*, 12(1): 45.
- Wu Fuyuan, Wang Rucheng, Liu Xiaochi, *et al.* 2021. New breakthroughs in the studies of Himalayan rare-metal mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3 261~3 276(in Chinese with English abstract).
- Xiong Y Q, Jiang S Y, Wen C H, *et al.* 2020. Granite-pegmatite connection and mineralization age of the giant Renli Ta-Nb deposit in South China: Constraints from U-Th-Pb geochronology of coltan, monazite, and zircon[J]. *Lithos*, 358~359: 105422.
- Xu Zhiqin, Zhu Wenbin, Zheng Bihai, *et al.* 2021. New energy strategy for lithium resource and the continental dynamics research celebrating the centenary of the school of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2 937~2 954(in Chinese with English abstract).
- Yan Q H, Qiu Z W, Wang H, *et al.* 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from L-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite(Article)[J]. *Ore Geology Reviews*, 100: 561~573.
- Yin R, Huang X L, Xu Y G, *et al.* 2020. Mineralogical constraints on the magmatic-hydrothermal evolution of rare-elements deposits in the Bailongshan granitic pegmatites, Xinjiang, NW China[J], *Lithos*, 352~353: 105208.
- Zhang Liping, Li Peng, Huang Zhibiao, *et al.* 2021. Geochemical characteristics and metallogenic age of the No. 206 spodumene pegmatite vein in Renli rare metal orefield, Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 40(6): 1 267~1 284(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junxing, He Changtong, Qin Kezhong, *et al.* 2021. Geochronology, source features and the characteristics of fractional crystallization in pegmatite at the Qongjiagang giant pegmatite-type lithium deposit, Himalaya, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3 325~3 347(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wentao, Liu Shaofeng, Chen Min, *et al.* 2022. Detrital zircon characteristics of the Triassic Longwuhe Formation in the western segment of the Zongwulong tectonic belt and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(3): 569~591(in Chinese with English abstract).
- Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, *et al.* 2015a. Mineralogy of the Koktokay No. 3 pegmatite, Altai, NW China: Implications for evolution and melt-fluid processes of rare-metal pegmatites[J]. *European Journal of Mineralogy*, 27(3): 433~457.
- Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, *et al.* 2015b. Formation age and evolution time span of the Koktokay No. 3 pegmatite, Altai, NW China: Evidence from U-Pb zircon and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ muscovite ages[J]. *Resource Geology*, 65(3): 210~231.

附中文参考文献

- 陈 静, 韩 杰, 余福承, 等. 2022. 青海茶卡北山锂稀有多金属矿床白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义[J]. *地质找矿论丛*, 37(2): 142~147.
- 邓 运, 费光春, 李 剑, 等. 2018. 四川李家沟伟晶岩型锂辉石矿床碳氢氧同位素及成矿时代研究[J]. *矿物岩石*, 38(3): 40~47.
- Groves D I, 张 良, Groves I M, 等. 2022. 锂辉石: 巨型花岗伟晶岩锂-铯-钽矿床中关键含锂矿物[J]. *岩石学报*, 38(1): 1~8(英文).
- 韩 杰, 曹红亮, 王 涛, 等. 2021. 青海省天峻县茶卡北山地区锂

- 稀有稀土金属矿预查报告[R]. 青海: 青海省地质调查院.
- 郝雪峰, 付小方, 梁 斌, 等. 2015. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义[J]. 矿床地质, 34(6): 1 199~1 208.
- 胡军亮, 谭洪旗, 周 雄, 等. 2020. 川西九龙打枪沟锂铍矿床赋矿伟晶岩矿物学和矿物化学特征[J]. 地质通报, 39(12): 2 013~2 028.
- 蒋少涌, 王春龙, 张 璐, 等. 2021. 伟晶岩型锂矿中矿物原位微区元素和同位素示踪与定年研究进展[J]. 地质学报, 95(10): 3 017~3 038.
- 李 杭, 洪 涛, 杨智全, 等. 2020. 稀有金属花岗伟晶岩锆石、锡石与钼钽铁矿 U-Pb 和白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年对比研究——以阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床为例[J]. 岩石学报, 36(9): 2 869~2 892.
- 李秋立. 2016. 离子探针锆石 U-Pb 定年的“高 U 效应”[J]. 矿物岩石地球化学通报, 35(3): 405~412, 401.
- 李善平, 潘 彤, 严兴鹏, 等. 2022. 柴北缘东段茶卡北山伟晶岩稀土元素地球化学特征及物源分析[J]. 稀土, 43(4): 88~99.
- 李 永, 王 威, 杜晓飞, 等. 2022. 西昆仑大红柳滩 509 道班西伟晶岩型稀有金属矿白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年及其对区域成矿的限定[J/OL]. 中国地质: 1~6. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220311.1218.006.html>.
- 刘 涛, 田世洪, 王登红, 等. 2020. 新疆卡鲁安硬岩型锂矿床花岗岩与伟晶岩成因关系: 锆石 U-Pb 定年、Hf—O 同位素和全岩地球化学证据[J]. 地质学报, 94(11): 3 293~3 334.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1~28.
- 潘 彤, 李善平, 任 华, 等. 2020. 柴达木盆地北缘锂多金属矿成矿条件及找矿潜力[J]. 矿产勘查, 11(6): 1 101~1 116.
- 潘 彤, 李善平, 王 涛, 等. 2022. 青海锂矿成矿特征及找矿潜力[J]. 地质学报, 96(5): 1 827~1 854.
- 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 等. 2021. 喜马拉雅带琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义[J]. 岩石学报, 37(11): 3 277~3 286.
- 邱彩珍. 2014. 新疆阿尔泰伟晶岩锂辉石矿物学特征研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 孙文礼, 马叶情, 宋庆伟. 2021. 中国花岗伟晶岩型锂矿特征和研究进展[J]. 地质与勘探, 57(3): 478~496.
- 王秉璋, 韩 杰, 谢祥镭, 等. 2020. 青藏高原东北缘茶卡北山印支期(含绿柱石)锂辉石伟晶岩脉群发现及 Li-Be 成矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(1): 69~79.
- 王登红, 李建康, 付小方. 2005. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义[J]. 地球化学, (6): 3~9.
- 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]. 中国地质科学院.
- 王 臻, 陈振宇, 李建康, 等. 2022. 川西甲基卡 308 号脉的矿物学特征及其岩浆-热液演化示踪[J]. 地质学报, 96(6): 2 039~2 061.
- 吴福元, 王汝成, 刘小驰, 等. 2021. 喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破[J]. 岩石学报, 37(11): 3 261~3 276.
- 许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 等. 2021. 新能源锂矿战略与大陆动力学研究——纪念南京大学地球科学与工程学院 100 周年华诞[J]. 地质学报, 95(10): 2 937~2 954.
- 张立平, 李 鹏, 黄志飏, 等. 2021. 湖南仁里稀有金属矿田 206 号锂辉石伟晶岩脉地球化学特征及成矿时代[J]. 矿床地质, 40(6): 1 267~1 284.
- 赵俊兴, 何畅通, 秦克章, 等. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩锂矿的形成时代、源区特征及分异特征[J]. 岩石学报, 37(11): 3 325~3 347.
- 赵文涛, 刘少峰, 陈 敏, 等. 2022. 宗务隆构造带西段三叠系隆务河组碎屑锆石特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 41(3): 569~591.