

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.595



四川甲基卡锂矿床花岗岩体 Li 同位素组成及其对稀有金属成矿的制约

侯江龙¹, 李建康^{1*}, 张玉洁^{1,2}, 李超³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所国土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

3. 国家地质实验测试中心, 北京 100037

摘要:四川康定甲基卡超大型锂矿是我国最大的硬岩型锂矿床之一, 矿区中南部呈岩株状出露的二云母花岗岩常被认为是成矿伟晶岩的“矿源岩”, 对其开展 Li 同位素地球化学研究, 对探讨矿区稀有金属的来源与演化具有重要意义。研究工作基于详细的野外地质调查, 采用 MC-ICP-MS 方法对岩体锂同位素组成开展了研究。研究结果显示, 岩体 Li 含量介于 $192 \times 10^{-6} \sim 470 \times 10^{-6}$, 均值为 309×10^{-6} , $\delta^7\text{Li}$ 值介于 $-1.56\text{‰} \sim +0.90\text{‰}$, 均值为 -0.24‰ , 与平均上地壳值基本一致, 具有高 Li 低 $\delta^7\text{Li}$ 的特征。 $\delta^7\text{Li}$ 与 Li、Rb、Ga、 SiO_2 及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 不存在明显的相关性, 岩体锂同位素组成反映了其形成时的源区特征, 未受岩浆结晶分异作用和蚀变作用的影响。岩体岩石地球化学、同位素地球化学资料表明, 岩浆来源以三叠系西康群砂泥岩的部分熔融为主, 可能有部分深源物质的加入。此外, 岩体 Li 同位素的变化规律表明伟晶岩的成矿流体来源于二云母花岗岩。岩体 Li 含量与 Li 同位素组合不仅可用来划分锂矿床类型, 而且对稀有金属找矿具有一定的指导意义。

关键词: 二云母花岗岩; 伟晶岩; 锂同位素; 甲基卡; 矿床; 岩石学。

中图分类号: P597.2

文章编号: 1000-2383(2018)06-2042-13

收稿日期: 2018-01-15

Li Isotopic Composition and Its Constrains on Rare Metal Mineralization of Jiajika Two-Mica Granite, Sichuan Province

Hou Jianglong¹, Li Jiankang^{1*}, Zhang Yujie^{1,2}, Li Chao³

1. MLR 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

3. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China

Abstract: Jiajika superlarge hard rock type lithium deposit is one of the most abundant lithium mineral resources in China. The two-mica granite outcropped in the southern Jiajika orefield is generally regarded as source rocks of the ore-bearing pegmatites. Li isotopic composition is a useful tool to explore the origin and evolution of rare metal. Based on the detailed field work, the lithium isotopic composition of granite was tested by MC-ICP-MS in this study. The results show that the lithium content of the granite is from 192×10^{-6} to 470×10^{-6} , and the mean value is 309×10^{-6} ; the value of $\delta^7\text{Li}$ ranges from -1.56‰ to 0.90‰ , and the mean value is -0.24‰ , which is closed to the average value of upper crust. Jiajika two-mica granite apparently has higher content of lithium and lower value of $\delta^7\text{Li}$, and the $\delta^7\text{Li}$ and Li, Rb, Ga, SiO_2 and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ have no obvious correlation.

基金项目: 华南重点矿集区稀有分散和稀土矿产调查项目 (No. DD20160056); 川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价项目 (No. DD20160055); 中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务 (矿产地质志) 项目 (No. DD20160346)。

作者简介: 侯江龙 (1988-), 男, 博士研究生, 主要从事矿床学及构造成矿学研究, ORCID: 0000-0003-2872-5022, E-mail: houjianglong1988@126.com

* **通讯作者:** 李建康, E-mail: li9968@126.com

引用格式: 侯江龙, 李建康, 张玉洁, 等, 2018. 四川甲基卡锂矿床花岗岩体 Li 同位素组成及其对稀有金属成矿的制约. 地球科学, 43(6): 2042-2054.

Lithium isotopic composition of granite reflects its characteristics of source rock, and it has not been influenced by crystallization differentiation of magma and alteration. The geochemical and isotope geochemistry data indicate that the source of magma is mainly composed of partial melting of Triassic Xikang sand-mudstone, which may have been mixed with materials from deep source. In addition, variations of lithium content and Li isotopic composition show that the fluid of magma migrated from center to the north and south, and the metallogenic fluid of pegmatite is derived from Jiajika two-mica granite. The content of lithium and Li isotopic composition can not only be used to classify the types of lithium deposits, but also can facilitate the prospecting of rare metals.

Key words: two-mica granite; pegmatite; lithium isotope; Jiajika; deposit; petrology.

0 引言

四川甲基卡锂矿床目前已探明的 Li_2O 储量超过 200 万 t(王登红和付小方, 2013; 付小方等, 2014, 2015; 王登红等, 2017), 为一超大型伟晶岩型稀有金属矿床。矿区出露的花岗伟晶岩脉有上千条, 工业矿体和矿化伟晶岩脉近 120 条, 均围绕矿区中南部岩株状产出的二云母花岗岩呈离心带状成群、成组分布。二云母花岗岩形成于印支末期, 而伟晶岩的形成略晚于二云母花岗岩, 二云母花岗岩作为区内出露的唯一岩体, 被认为是稀有伟晶岩的矿源岩(郝雪峰等, 2015; 梁斌等, 2016; 唐屹, 2016)。根据地球化学特征, 岩体与伟晶岩具有相似的稀土元素配分曲线, 且 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的值分别为 0.7088 ± 0.0011 和 0.7238 ± 0.0450 , 均属地壳重熔成因。尽管岩体与伟晶岩成矿密切相关, 但是已有研究大部分聚焦于伟晶岩(王登红等, 2005; 李建康等, 2006a, 2006b, 2008; 苏媛娜等, 2010b; 李胜虎, 2015; 刘丽君等, 2015, 2017a, 2017b; 秦宇龙等, 2015; 赵玉祥等, 2015; 潘蒙等, 2016), 对岩体的研究明显滞后, 尤其对岩体成因及源区特征的研究还主要依据全岩地球化学组成, 缺乏系统的同位素地球化学资料。

Sr、Nd 同位素作为典型的放射性同位素, 常用于花岗岩物质来源的判别上, 仅能反映源区的总体特征, 而 Li 同位素作为一种新兴的非传统稳定同位素示踪工具, 在精确示踪花岗岩源区方面具有独特优势(Gao *et al.*, 2015)。花岗质岩石的地球化学特征是源区过程和岩浆过程的综合反映, 有效识别源区性质需要剥离岩浆过程对岩石地球化学的影响, 而 Li 同位素在地壳的深熔作用、高温条件下的结晶分异作用及变质事件中几乎不发生分馏, $\delta^7\text{Li}$ 主要受源区或原岩的控制(Teng *et al.*, 2004, 2006, 2007), 因此, Li 同位素的研究可以为源区性质提供重要线索。为进一步揭示矿区稀有金属的成矿机制, 同时为矿区地质找矿提供基础资料和科学指导, 本

文在岩体地球化学组成的基础上, 结合 Sr、Nd 同位素资料, 对岩体的 Li 同位素组成、分馏机制及其对稀有金属成矿的指示作用进行了探讨。

1 地质概况

四川甲基卡花岗伟晶岩型锂矿地处康定、雅江、道孚三县交界处, 大地构造位置处于松潘—甘孜造山带主体南东部(图 1)。矿区地层主要是遭受不同程度变质作用的三叠系西康群泥岩、砂岩和粉砂岩等。矿区构造主要是甲基卡穹隆状背斜, 该背斜轴面直立, 轴部地层平缓, 背斜轴附近发育的纵向张断裂带及两翼发育的共轭扭性断裂群控制着伟晶岩脉的产出, 是主要的控脉构造。矿区出露的唯一岩体是呈岩株状产出的二云母花岗岩(图 1)。平面上, 岩体呈“马颈子状”, 长约为 3 km, 宽约为 1.2 km, 出露面积约为 5.3 km², 呈北东 70°~80°方向延伸, 岩体东侧向正北方向伸出长约为 3 km、平均宽为 0.4 km 的岩舌。岩体与围岩接触面倾角较陡, 东、西侧倾角介于 55°~60°, 南、北侧倾角多超过 60°, 岩舌倾角较缓, 多介于 17°~38°。岩体与围岩接触带见云英岩化, 具细粒冷凝边结构, 自岩体向围岩依次发育云英岩化堇青石电气石角闪岩带、十字石带、红柱石—十字石带、红柱石带和黑云母动热变形变质带。岩体与围岩接触带有时可见部分岩体呈细脉穿入围岩, 局部向细晶岩、伟晶岩演化过渡, 显示出由花岗岩分异演化出伟晶岩的特征。岩体顶部尚残留有堇青石、电气石角闪岩组成的残余顶盖, 暗示岩体剥蚀尚浅。

二云母花岗岩为灰白色, 局部肉红色, 细粒花岗岩结构, 块状构造, 主要矿物成分为石英(45%)、钠长石(25%)、微斜长石(15%)、白云母(10%)、黑云母(3%), 副矿物包括磷灰石、石榴子石、电气石、锆石、钛铁矿、磁铁矿等(图 2)。显微镜下, 钾长石为板状、柱状, 格子双晶较发育, 几乎全属微斜长石; 钠长石为板状, 聚片双晶较发育, 部分属更长石; 白云母

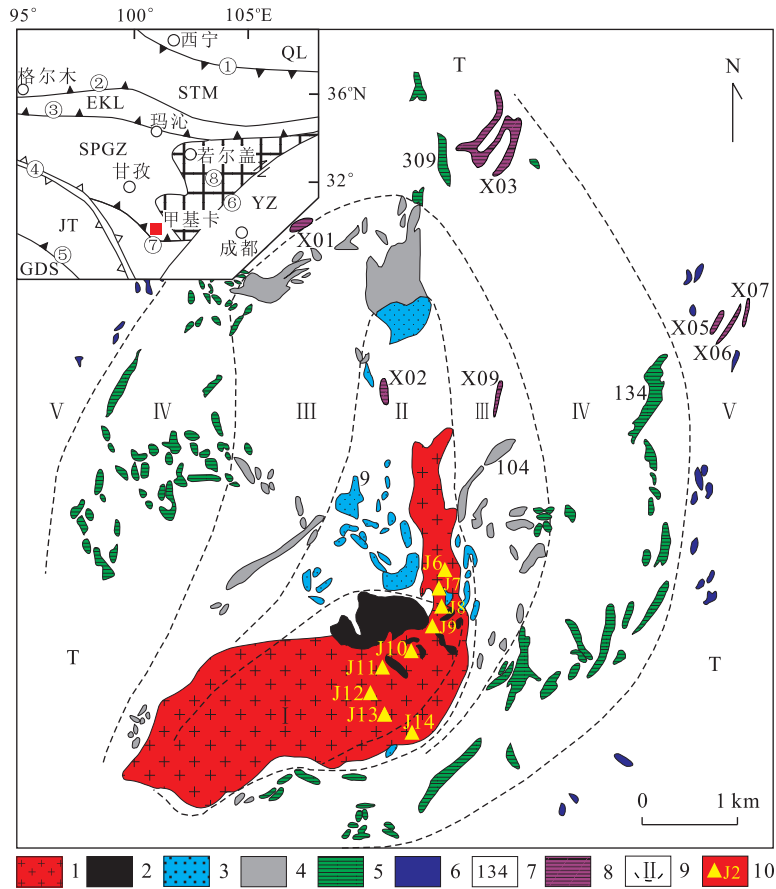


图 1 甲基卡矿区地质简图

Fig.1 Geological sketch of the Jiajika ore deposit

SPGZ.松潘—甘孜褶皱带;EKL.东昆仑构造带;STM.柴达木地块;YZ.扬子地块;JT.羌塘地块;GDS.冈底斯地块;QL.祁连构造带;①柴北缘蛇绿杂岩带;②昆中蛇绿杂岩带;③昆南—阿尼玛卿蛇绿杂岩带;④可可西里—金沙江缝合线;⑤班公湖—怒江蛇绿杂岩带;⑥龙门山断裂;⑦理塘蛇绿杂岩带;⑧若尔盖地块;T.上三叠统西康群地层;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.新发现矿脉;9.类型分带线及编号;10.采样位置;I.微斜长石伟晶岩带;II.微斜长石—钠长石带;III.钠长石带;IV.锂辉石带;V.锂(白)云母带;据 Li *et al.* (2013)

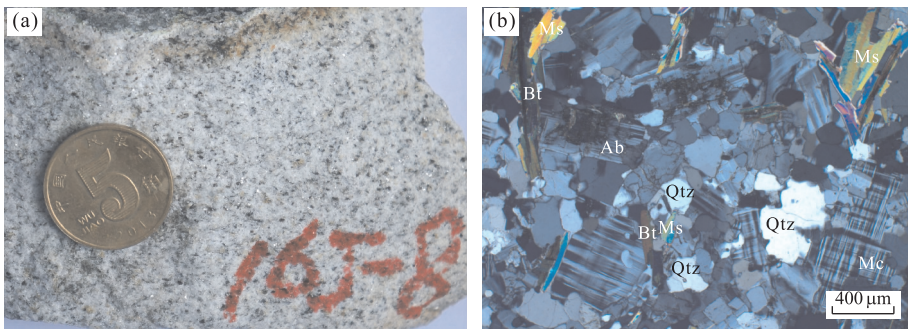


图 2 甲基卡二云母花岗岩野外(a)及镜下特征(b)

Fig.2 Photo (a) and micrograph (b) of Jiajika two-mica granite

Qtz.石英;Ms.白云母;Bt.黑云母;Mc.微斜长石;Ab.钠长石

为自形片状,正交光下呈 2~3 级干涉色;黑云母为自形一半自形片状,显褐色.此外,云母均未见与其他造岩矿物如石英、长石等呈交代反应关系,部分白

云母还可见黑云母残体,且二者界线截然而清晰,云母的矿物学、地球化学研究表明黑云母、白云母均属原生云母(待发表数据).

在甲基卡矿区,可清楚地看到上百条含矿伟晶岩脉围绕二云母花岗岩呈离心带状成群、成组分布,自岩体向外可划分出 5 种伟晶岩类型,分别是:微斜长石型(I)、微斜长石钠长石型(II)、钠长石型(III)、锂辉石型(IV)和锂(白)云母型(V)(图 1)。5 种伟晶岩中除微斜长石型伟晶岩(I)产于岩体边缘及接触带外,其他 4 种伟晶岩主要产于岩体外接触带的二云母片岩中。伟晶岩脉的形态受构造裂隙控

制,一般微斜长石型(I)、微斜长石钠长石型(II)和钠长石型(III)形态较多样,锂辉石型(IV)和锂(白)云母型(V)形态单一,以脉状为主。

2 样品采集与测试方法

2.1 样品采集

本次野外地质调查自北向南穿越岩体,沿线系

表 1 甲基卡二云母花岗岩主量、微量、稀土元素和 Li 同位素测试结果

Table 1 Major, trace, rare earth elements and Li isotope compositions of Jiajika two-mica granite

样号	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14
主量元素(%)									
SiO ₂	74.55	73.92	73.66	74.47	74.02	73.65	73.03	74.16	74.64
TiO ₂	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.05
Al ₂ O ₃	14.90	15.10	14.89	14.82	14.7	14.76	14.78	14.70	14.95
Fe ₂ O ₃	0.18	0.07	0.10	0.03	0.07	0.13	0.12	0.11	0.20
FeO	0.62	0.64	0.79	0.75	0.82	0.69	0.74	0.67	0.54
MnO	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04
MgO	0.19	0.20	0.17	0.21	0.18	0.23	0.20	0.24	0.16
CaO	0.60	0.80	0.60	0.71	0.59	0.63	0.66	0.71	0.54
Na ₂ O	3.41	3.46	3.63	3.19	3.30	3.22	3.21	3.31	3.45
K ₂ O	5.00	5.07	4.65	5.05	4.83	4.88	4.90	4.76	4.84
P ₂ O ₅	0.16	0.24	0.13	0.17	0.20	0.20	0.23	0.22	0.19
H ₂ O ⁺	0.79	0.67	0.87	1.00	1.11	0.74	1.08	0.96	0.90
CO ₂	0.13	0.28	0.19	0.19	0.27	0.26	0.26	0.19	0.30
Total	100.61	100.53	99.77	100.68	100.19	99.46	99.3	100.13	100.8
微量元素(10 ⁻⁶)									
Li	264.00	327.00	470.00	298.00	340.00	192.00	301.00	266.00	320.00
Be	14.00	10.00	10.00	8.00	30.00	6.00	12.00	8.00	8.00
Ga	17.80	17.20	19.10	15.50	17.50	15.95	15.70	17.70	17.70
Rb	313.00	354.00	475.00	308.00	388.00	299.00	334.00	320.00	315.00
Sr	33.50	31.50	21.40	29.30	28.90	33.75	25.80	33.80	32.10
Cs	47.10	51.70	136.00	44.80	70.15	32.65	61.30	56.00	35.40
Ba	57.70	53.40	37.30	63.40	48.30	62.80	44.60	56.00	58.40
Pb	43.80	41.40	37.20	43.20	40.30	45.15	40.90	44.30	40.50
Th	3.60	3.17	2.75	3.86	3.04	3.34	3.42	3.99	3.52
U	3.72	3.13	2.48	3.36	2.99	4.01	3.10	3.02	8.73
Nb	14.70	14.00	26.60	16.40	19.55	7.76	16.50	15.80	19.20
Ta	4.27	3.09	10.70	3.50	6.11	1.65	3.60	3.58	4.22
Zr	29.10	29.30	24.90	32.50	28.00	29.60	31.00	32.40	29.40
Hf	1.52	1.49	1.44	1.70	1.47	1.44	1.62	1.65	1.58
W	375.00	380.00	6.00	433.00	196.00	219.00	409.00	381.00	325.00
Sc	2.45	2.16	2.43	2.28	2.45	2.41	1.78	2.68	2.80
Sn	19.10	20.50	37.50	24.20	30.35	14.95	25.20	19.50	20.70
稀土元素(10 ⁻⁶)									
La	6.40	6.03	4.52	7.64	5.70	6.62	5.94	7.10	6.39
Ce	13.00	12.00	8.96	15.60	11.25	13.35	13.50	14.50	13.00
Pr	1.43	1.35	0.97	1.68	1.25	1.50	1.31	1.62	1.37
Nd	4.88	4.70	3.28	5.81	4.33	5.18	4.63	5.74	4.83
Sm	1.53	1.46	1.09	1.66	1.34	1.62	1.39	1.76	1.42
Eu	0.29	0.25	0.17	0.30	0.23	0.30	0.25	0.32	0.28
Gd	1.51	1.43	1.09	1.66	1.33	1.62	1.28	1.73	1.46
Tb	0.26	0.25	0.22	0.27	0.25	0.30	0.22	0.28	0.27
Dy	1.09	1.11	1.03	1.27	1.13	1.31	0.88	1.20	1.26
Ho	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.16	0.09	0.15	0.17
Er	0.21	0.25	0.29	0.25	0.28	0.30	0.16	0.27	0.33
Tm	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04
Yb	0.17	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21	0.12	0.18	0.25
Lu	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04
Y	3.49	3.88	3.96	3.79	4.11	4.44	2.61	3.89	4.85

Li 同位素(%)

$\delta^7\text{Li} \pm 2\delta$ -1.21±0.03 +0.29±0.02 +0.52±0.03 -1.56±0.03 +0.90±0.02 +0.00±0.02 -0.07±0.02 -1.31±0.02 +0.07±0.02

表 2 甲基卡二云母花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素测试结果

Table 2 Whole-rock Sr-Nd isotopic compositions of Jiajika two-mica granite

样号	年龄(Ma)	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	Rb/Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm(10^{-6})
J9	223	182.9	3.1	58.5	19.250 4	0.771 71	0.710 66	0.41
J10	223	233.6	3.5	67.6	21.257 6	0.777 39	0.709 97	0.37
J11	223							0.57
J13	223							0.37
J14	223							0.16

样号	年龄(Ma)	Nd(10^{-6})	Sm/Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
J9	223	1.45	0.28	0.170 0	0.512 17	0.511 92	-8.41
J10	223	1.29	0.28	0.172 1	0.512 08	0.511 82	-10.29
J11	223	2.06	0.28	0.168 0	0.511 98	0.511 74	-11.94
J13	223	1.26	0.29	0.175 6	0.512 00	0.511 75	-11.83
J14	223	0.65	0.24	0.145 5	0.512 13	0.511 91	-8.52

注:223 Ma 据郝雪峰等(2015);由于全岩 Rb 含量较高,Sr 明显亏损,Rb/Sr 比较高,放射性 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 不能准确扣除,导致送出的 5 件 Sr 同位素样品仅成功 2 件。

统采集了二云母花岗岩样品 9 件,样品编号依次为 J6~J14,具体采样位置见图 1.所采样品岩性均一,均为灰白色,细粒花岗岩结构、块状构造,主要矿物为石英、钠长石、微斜长石、白云母和黑云母.据观察,自岩体北侧向南侧,钠长石、白云母含量呈降低趋势,微斜长石、黑云母含量呈增高趋势,副矿物以电气石最为常见。

2.2 测试方法

主量、微量、稀土元素地球化学及 Sr、Nd 同位素测试均在国家地质实验测试中心完成.主量元素采用 X 荧光光谱仪测定,仪器型号为 PE8300;微量元素采用 ICP-MS 测定,仪器型号为 PE300D;稀土元素样品预处理采用 HF+HNO₃ 酸溶法,分析仪器为 ICP-MS;Sr、Nd 同位素分析流程基本相似,经化学前处理的 Sr、Nd 溶液采用 Thermo Fisher Scientific 多接收电感耦合等离子体质谱仪 Neptune Plus MC-ICP-MS 分别测定 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值,用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (8.373 209)和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.721 8)对 Sr 和 Nd 作质量分馏校正。

锂同位素分析的化学前处理和 MC-ICP-MS 质谱分析均在国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成.化学前处理的详细流程如下:首先称取 10 mg 二云母花岗岩 200 目样品,加入 HNO₃:HF=1:5 于 PFA 敞口溶样瓶中,然后置于超声波中震荡 10 min,转移至加热板,在 100~120 °C 条件下加热 24 h 直到小米粒大小,再加入一定量的浓 HNO₃,再次转移至加热板,在 100~120 °C 条件下加热 24 h(一般加 2~4 次浓 HNO₃),加入 3 mL 浓 HCl 并加热 24 h 蒸干,再加入适量 4 mol/L HCl 备用.经上述化学前处理的样品,再用 3 根阳离子交换树脂(AG 50W-

X8)进行化学分离和提纯,然后用 MC-ICP-MS 测试 $\delta^7\text{Li}$ 值.实验室 3 件国际标样 BHVO-2、AGV-2 和 IRMM-016 的 $\delta^7\text{Li}$ 值分别为 $+4.33\% \pm 0.76\%$ (2σ , $n=18$)、 $+5.68\% \pm 1.04\%$ (2σ , $n=18$)、 $-0.01\% \pm 0.72\%$ (2σ , $n=15$) (Tian *et al.*, 2012),分析精度与国际同类实验室水平相当(Zack *et al.*, 2003; Jeffcoate *et al.*, 2004; Magna *et al.*, 2004; Marschall *et al.*, 2007; Qiu *et al.*, 2009).锂同位素分析详细实验流程和质谱测试参见苏媛娜等(2010b)、Tian *et al.* (2012) 及赵悦等(2015)。

3 测试结果

甲基卡二云母花岗岩代表性主量、微量、稀土元素及 Li 同位素分析结果见表 1,岩体 Sr-Nd 同位素分析结果见表 2。

据表 1 和表 2 可知,9 件全岩样品的 Li 含量介于 $192 \times 10^{-6} \sim 470 \times 10^{-6}$,均值为 309×10^{-6} ,中位数为 301×10^{-6} ; $\delta^7\text{Li}$ 值介于 $-1.56\% \sim +0.90\%$,均值为 -0.24% ,中位数为 0.00% ; 2 件全岩样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 分别为 0.710 66 和 0.709 97,均值为 0.710 32; 5 件全岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 $-11.94 \sim -8.41$,均值为 -10.20 。

4 讨论

4.1 岩体 Li 同位素组成

表 1 数据与已发表的世界花岗岩锂同位素均值数据(Li 含量均值为 66.8×10^{-6} ,中位数为 $34.5 \times$

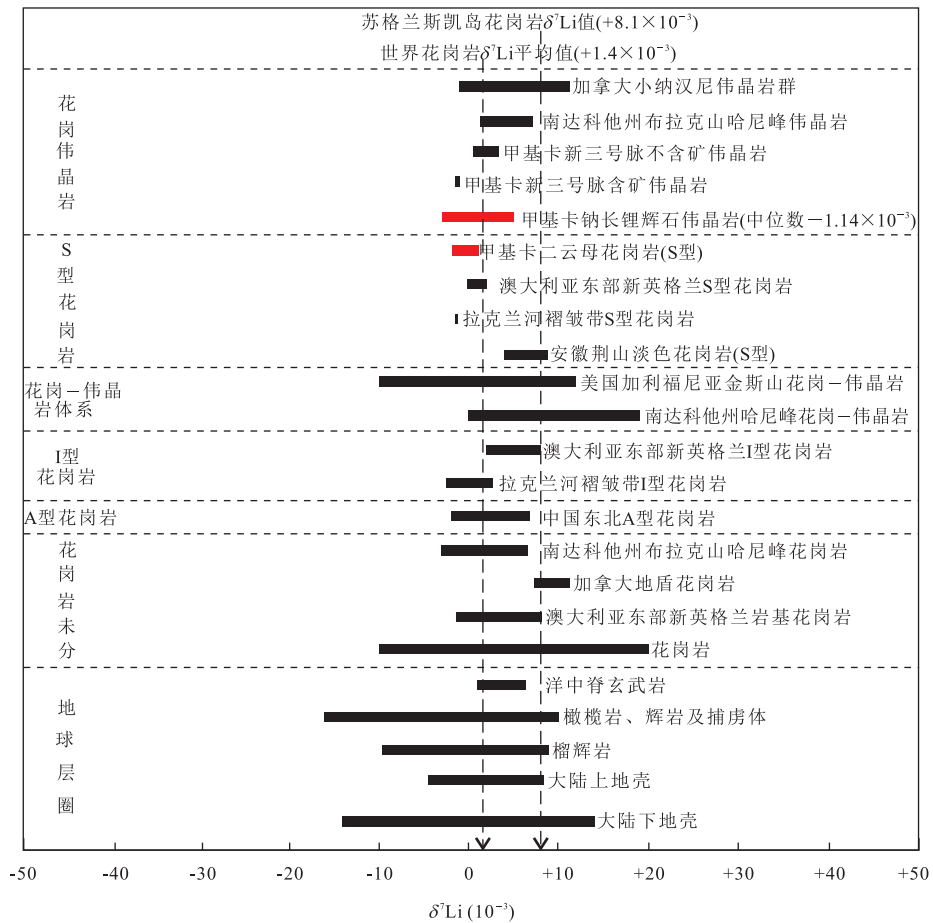


图 3 花岗岩和伟晶岩中锂同位素分布

Fig.3 Li isotopic compositions of different granites and pegmatites

花岗岩未分中花岗岩数据转引自苏媛娜等(2010a);安徽荆山淡色花岗岩(S型)数据来自 Sun *et al.*(2016);拉克兰河褶皱带 S 型花岗岩和 I 型花岗岩数据来自 Teng *et al.*(2004);大陆下地壳数据来自 Teng *et al.*(2008);中国东北 A 型花岗岩和和世界花岗岩 $\delta^7\text{Li}$ 来自 Teng *et al.*(2009);澳大利亚东部新英格兰岩基花岗岩、S 型花岗岩、I 型花岗岩数据引自 Tomascak(2004);加拿大地盾花岗岩数据引自 Tomascak(2004);苏格兰斯凯岛花岗岩数据来自 Pistiner and Henderson(2003);加利福尼亚金斯山花岗岩-伟晶岩和南达科他州哈尼峰花岗岩-伟晶岩数据引自 Tomascak(2004);四川甲基卡钠长锂辉石伟晶岩数据来自项目组未发表数据;四川甲基卡新三号脉含矿伟晶岩和不含矿伟晶岩数据来自刘丽君等(2017a);南达科他州布拉克山哈尼峰花岗岩和伟晶岩数据来自 Teng *et al.*(2006);加拿大小纳汉尼伟晶岩群数据来自 Barnes *et al.*(2012)

10^{-6} , $\delta^7\text{Li}$ 均值为 $+1.4\text{‰}$, 中位数为 $+1.2\text{‰}$; Bryant *et al.*, 2004; Teng *et al.*, 2004, 2006, 2009; Magna *et al.*, 2010; Romer *et al.*, 2014) 相比, 甲基卡二云母花岗岩具有相对高的 Li 含量 ($192 \times 10^{-6} \sim 470 \times 10^{-6}$) 和相对低的 $\delta^7\text{Li}$ 值 ($-1.56\text{‰} \sim +0.90\text{‰}$)。据统计, 自然界花岗岩的 $\delta^7\text{Li}$ 值变化介于 $-10\text{‰} \sim +20\text{‰}$ (Tomascak, 2004), 其中 I 型花岗岩 $\delta^7\text{Li}$ 值变化介于 $-2.5\text{‰} \sim +8.0\text{‰}$, A 型花岗岩 $\delta^7\text{Li}$ 值变化于 $-1.8\text{‰} \sim +6.9\text{‰}$, S 型花岗岩 $\delta^7\text{Li}$ 值变化介于 $-1.56\text{‰} \sim +9\text{‰}$ 。甲基卡二云母花岗岩 $\delta^7\text{Li}$ 值与上地壳 $\delta^7\text{Li}$ 均值 ($0 \pm 2\text{‰}$) 相当 (Teng *et al.*, 2004), 但相比世界其他 S 型花岗岩 (如安徽荆山淡色花岗岩、澳大利亚东部新英格兰 S

型花岗岩等), 其 $\delta^7\text{Li}$ 值明显偏负, 表明岩体富集 ^6Li 。与花岗岩具有密切时空联系的伟晶岩 $\delta^7\text{Li}$ 值变化介于 $-2.99\text{‰} \sim +11.36\text{‰}$ (图 3), 围绕甲基卡花岗岩分布的钠长锂辉石伟晶岩的 $\delta^7\text{Li}$ 值变化介于 $-2.99\text{‰} \sim +5.13\text{‰}$, 中位数为 -1.14‰ (项目组未发表数据), 与世界其他花岗岩伟晶岩 (如加拿大小纳汉尼伟晶岩群、南达科他州布拉克山哈尼峰伟晶岩) 相比, 其 $\delta^7\text{Li}$ 值亦偏负, 表明伟晶岩脉亦富集 ^6Li 。综上所述, 在锂同位素组成上, 甲基卡花岗岩-伟晶岩体系显然具有明显富集 ^6Li 的典型特征。

4.2 岩体 Li 同位素分馏

自然界中锂同位素的变化较大, $\delta^7\text{Li}$ 值变化介于 $-45\text{‰} \sim +45\text{‰}$ (Tomascak, 2004)。锂同位素的

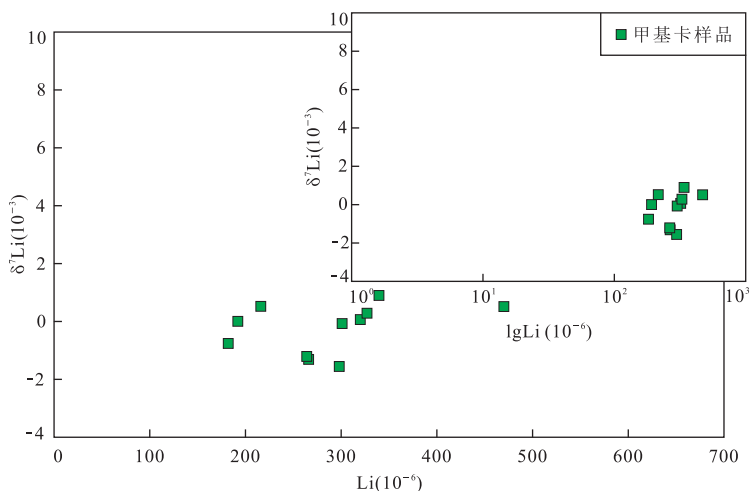


图 4 二云母花岗岩 $\delta^7\text{Li}$ 与 Li 、 $\lg\text{Li}$ 的关系

Fig.4 Plots of $\delta^7\text{Li}$ versus Li and $\lg\text{Li}$ for two-mica granites

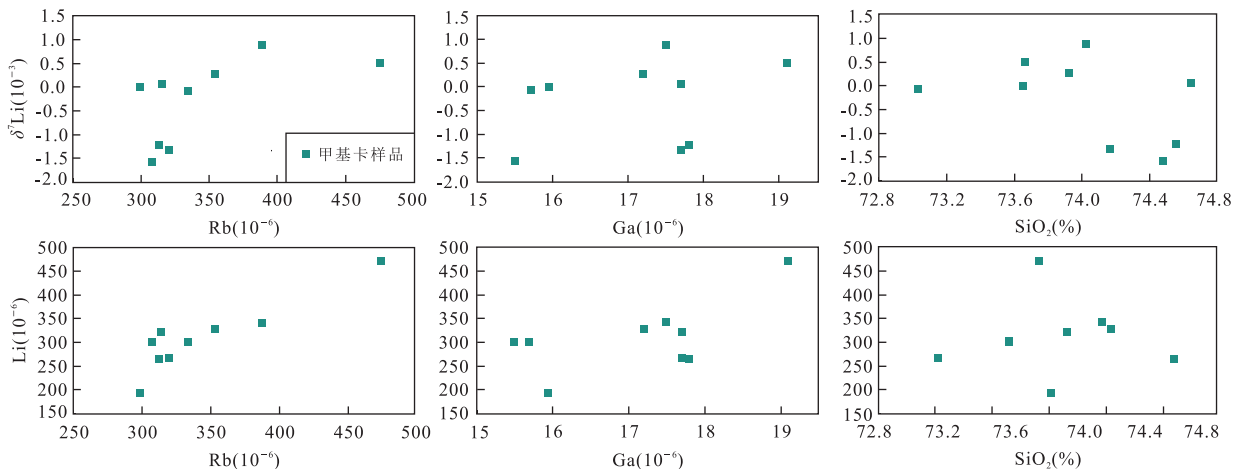


图 5 二云母花岗岩 Li 、 $\delta^7\text{Li}$ 与 Rb 、 Ga 、 SiO_2 的关系

Fig.5 Plots of Li and $\delta^7\text{Li}$ versus Rb , Ga , SiO_2 for two-mica granites

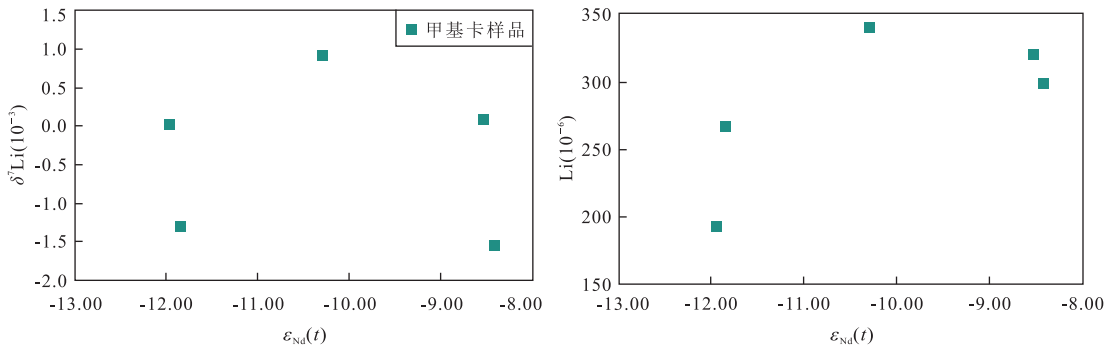


图 6 二云母花岗岩 Li 、 $\delta^7\text{Li}$ 与 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的关系

Fig.6 Plots of Li and $\delta^7\text{Li}$ versus $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ for two-mica granite

分馏与温度、扩散作用等有关,但对其分馏机制尚存在不同认识(Richter *et al.*, 2009, 2014; 汤艳杰等, 2009). 锂同位素在高温岩浆作用过程 (Halama

et al., 2007, 2008) 和地壳深熔作用 (Bryant *et al.*, 2004; Teng *et al.*, 2004) 中的平衡分馏几乎可以忽略不计($\leq 1.0\%$), 但风化作用过程 (Rudnick *et al.*,

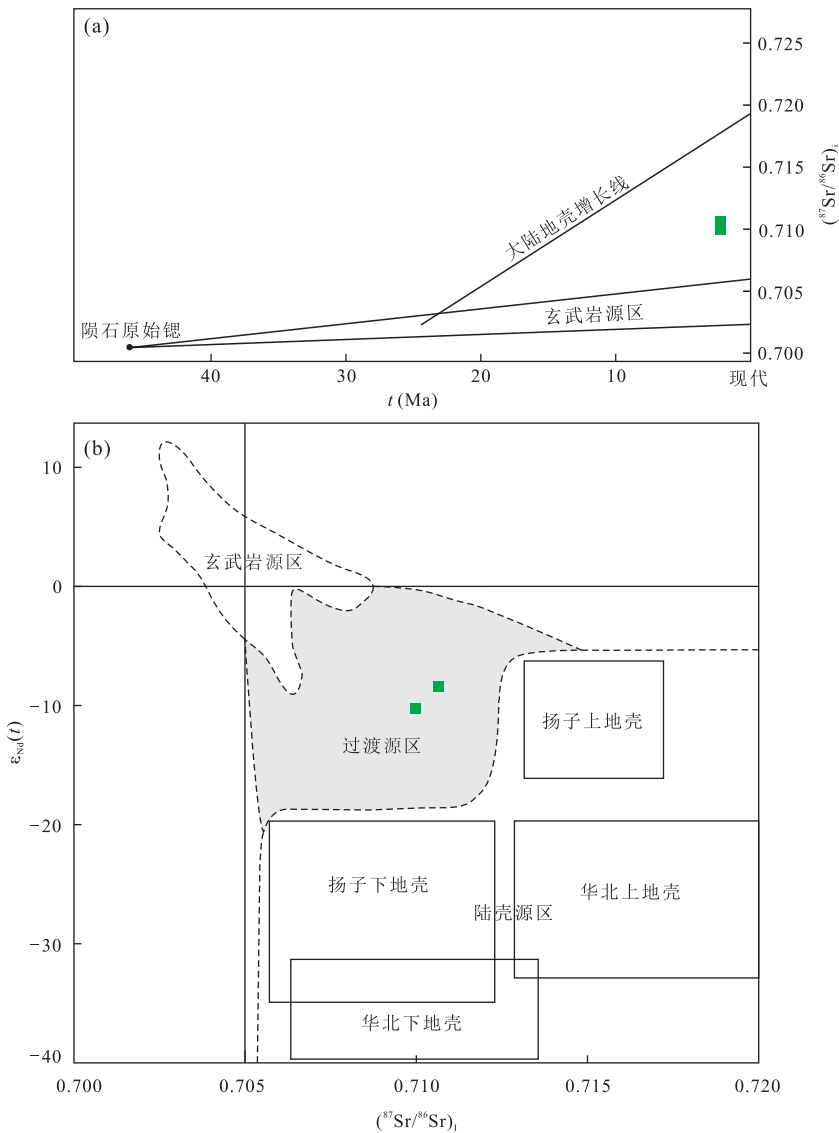


图 7 岩体 $t-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (b) 图解

Fig.7 Diagram of $t-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (b) for two-mica granites

华北上地壳和下地壳范围引自 Jahn *et al.* (1999); 扬子上地壳和下地壳范围引自 Chen *et al.* (2001); 图例同上图

2004)、岩浆-围岩相互作用过程及 340~600 °C 之间的花岗岩结晶分异和伟晶岩形成 (Teng *et al.*, 2006) 过程等均存在锂同位素分馏。

根据岩体野外地质概况, 岩体与围岩接触带见部分岩体呈细脉穿入围岩, 表现出岩浆贯入特征, 加上岩体矿物组成变化不大 (仅云母、电气石等矿物含量稍有变化), 亦未见暗色包体, 表明围岩同化和混染作用、扩散作用等对岩体锂同位素的组成影响较小。据 Teng *et al.* (2006) 研究, 如果 $\delta^7\text{Li}$ 与 Li、Rb、Ga、 SiO_2 等成分存在一定的相关性, 则表明存在锂同位素的分馏作用, 然而, $\delta^7\text{Li}$ 与 Li、Rb、Ga、 SiO_2 等 (图 4 和图 5) 显然不具备这种相关性。此外, $\delta^7\text{Li}$ 与 Nd 同位素 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (图 6) 也不存在明显相关性。综

上所述, 岩体在结晶分异过程中并没有发生明显的锂同位素分馏, 岩体锂同位素组成反映了其形成时的源区特征, 未受到岩浆结晶分异作用和蚀变作用的影响。

4.3 岩体成因及源区特征

据岩体地球化学组成特征 (表 1), 岩体具有强过铝质特征 (梁斌等, 2016), 而强过铝质花岗岩的源区主要来自地壳中碎屑沉积岩和变质沉积岩 (Sylvester, 1998); 岩体微量元素 Nb/Ta 比值介于 2.49~4.70, 平均为 4.07, 比值相对靠近大陆地壳的比值 (10~14) (Sun and McDonough, 1989), 暗示岩浆主要为地壳部分熔融形成; 全岩 Sr-Nd 同位素 $t-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (图 7a) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解 (图 7b)

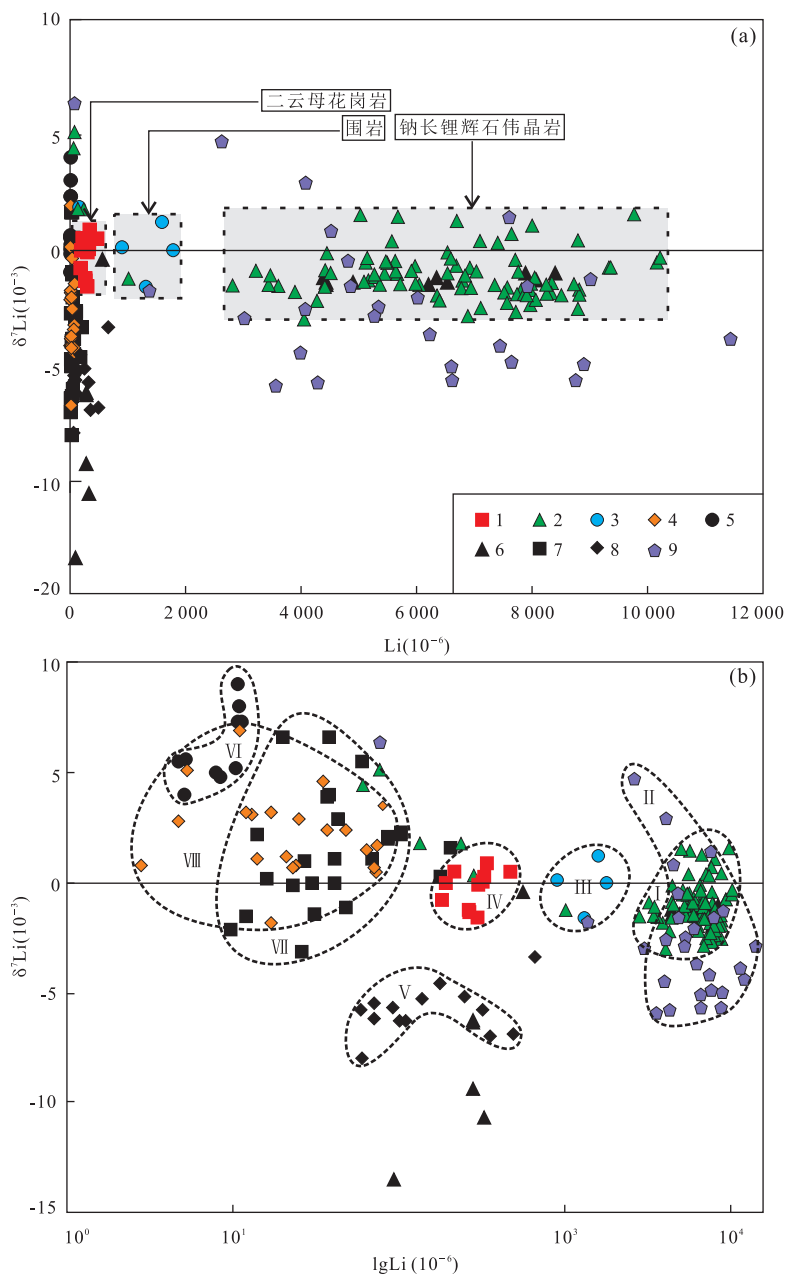


图 8 花岗岩和伟晶岩 $\delta^7\text{Li}-\text{Li}$ 和 $\delta^7\text{Li}-\lg\text{Li}$ 的关系

Fig.8 Plots of $\delta^7\text{Li}$ versus Li and $\delta^7\text{Li}$ versus $\lg\text{Li}$ diagram for granite and pegmatite

1. 甲基卡二云母花岗岩(S型); 2. 甲基卡钠长锂辉石伟晶岩; 3. 甲基卡伟晶岩脉围岩; 4. 中国东北 A 型花岗岩; 5. 荆山淡色花岗岩(S型); 6. 甲基卡 ZK1101 含矿伟晶岩; 7. 布拉克山哈尼峰花岗岩; 8. 厄尔士山花岗岩; 9. 加拿大小纳汉尼伟晶岩群; I. 甲基卡钠长锂辉石伟晶岩(项目组未发表数据); II. 加拿大小纳汉尼伟晶岩群(Barnes *et al.*, 2012); III. 甲基卡伟晶岩脉围岩(刘丽君等, 2017a); IV. 甲基卡二云母花岗岩(本文自测数据); V. 厄尔士山花岗岩(Romer *et al.*, 2014); VI. 荆山淡色花岗岩(Sun *et al.*, 2016); VII. 布拉克山哈尼峰花岗岩(Teng *et al.*, 2006); VIII. 中国东北 A 型花岗岩(Teng *et al.*, 2009); a 和 b 图例一致

显示岩浆主要来源于陆壳, 可能有部分深源物质的加入; 岩体 $\delta^7\text{Li}$ 的变化范围仅为 $0\sim 2.46\text{‰}$, 与上地壳 $\delta^7\text{Li}$ 均值($0\pm 2\text{‰}$)相当(Teng *et al.*, 2004), 暗示岩浆源区以壳源为主. 综合岩石地球化学、同位素地球化学的相关资料, 结合矿区地层分布、地层厚度等情况, 认为岩浆来源以三叠系西康群砂泥岩的部分熔融为

主, 可能有部分深源物质的加入.

4.4 Li 同位素与稀有金属成矿

锂同位素对成矿物质来源有一定的指示意义, 据相关研究(Chan *et al.*, 1992; Huh *et al.*, 1998, 2001; Rudnick *et al.*, 2004), ^6Li 偏向于保留在固相中, 而 ^7Li 易于进入溶液中, 且 ^6Li 的扩散速度比 ^7Li

快约 3%。据伟晶岩 $\delta^7\text{Li}$ 数据, 12 个钻孔中除 ZK201 和 ZK501 的 $\delta^7\text{Li}$ 均值为正值外(可能受到流体或风化作用的影响), 其余 10 个钻孔的 $\delta^7\text{Li}$ 均值都为负值($\delta^7\text{Li}$ 值介于 -2.99% ~ $+1.79\%$), 这与二云母花岗岩的 $\delta^7\text{Li}$ 值(-1.56% ~ $+0.90\%$)相差不超过 1.43%, 均具有明显富集 ^6Li 的特征, 这表明伟晶岩的成矿流体来源于二云母花岗岩。此外, 锂含量与锂同位素组合还可用于划分锂矿类型, 如甲基卡花岗—伟晶岩体系明显具有高 Li 低 $\delta^7\text{Li}$ 的特征, 而中国东北 A 型花岗岩则具有低 Li 高 $\delta^7\text{Li}$ 的特征(图 8)。锂同位素组成在地域上的差异, 是否可以稀有金属找矿提供有益指导值得深入探讨。

5 结论

(1) 甲基卡二云母花岗岩 Li 含量介于 192×10^{-6} ~ 470×10^{-6} , 均值为 309×10^{-6} ; $\delta^7\text{Li}$ 值介于 -1.56% ~ $+0.90\%$, 均值为 -0.24% , 与平均上地壳值基本一致, 相比世界花岗岩锂同位素均值数据, 具有高 Li 低 $\delta^7\text{Li}$ 的特征。

(2) 甲基卡二云母花岗岩 $\delta^7\text{Li}$ 与 Li、Rb、Ga、 SiO_2 及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 不存在明显的相关性, 岩体锂同位素组成反映了其形成时的源区特征, 未受岩浆结晶分异作用和蚀变作用的影响。

(3) 甲基卡二云母花岗岩的主量元素、微量元素、Sr-Nd 同位素、Li 同位素资料表明, 岩浆来源以三叠系西康群砂泥岩的部分熔融为主, 可能有部分深源物质的加入。

(4) 甲基卡二云母花岗岩 Li 同位素的变化规律表明, 伟晶岩的成矿流体来源于二云母花岗岩, 而锂含量与锂同位素组合不仅可用来划分锂矿床类型, 而且对稀有金属找矿具有一定的指导意义。

致谢: 国家地质实验测试中心樊兴涛老师、屈文俊老师在全岩样品的磨制、化学分析过程中给予了诸多帮助; 中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室田世洪老师、侯可军老师、赵悦老师等在锂同位素的化学前处理过程中给予了大量支持和帮助, 在此一并表示感谢! 最后由衷感谢匿名审稿专家对本文提出的极其宝贵的意见和建议!

References

Barnes, E.M., Weis, D., Groat, L.A., 2012. Significant Li Isotope Fractionation in Geochemically Evolved Rare

Element-Bearing Pegmatites from the Little Nahanni Pegmatite Group, NWT, Canada. *Lithos*, 132–133: 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.014>

Bryant, C.J., Chappell, B.W., Bennett, V.C., et al., 2004. Lithium Isotopic Compositions of the New England Batholith: Correlations with Inferred Source Rock Compositions. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 95(1–2): 199–214. <https://doi.org/10.1017/s0263593300001012>

Chan, L.H., Edmond, J.M., Thompson, G., et al., 1992. Lithium Isotopic Composition of Submarine Basalts: Implications for the Lithium Cycle in the Oceans. *Earth and Planetary Science Letters*, 108(1–3): 151–160. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(92\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0012-821x(92)90067-6)

Chen, J.F., Yan, J., Xie, Z., et al., 2001. Nd and Sr Isotopic Compositions of Igneous Rocks from the Lower Yangtze Region in Eastern China: Constraints on Sources. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9–10): 719–731. [https://doi.org/10.1016/s1464-1895\(01\)00122-3](https://doi.org/10.1016/s1464-1895(01)00122-3)

Fu, X.F., Hou, L.W., Wang, D.H., et al., 2014. Achievements in the Investigation and Evaluation of Spodumene Resources at Jiajika in Sichuan, China. *Geological Survey of China*, 1(3): 37–43(in Chinese with English abstract).

Fu, X.F., Yuan, L.P., Wang, D.H., et al., 2015. Mineralization Characteristics and Prospecting Model of Newly Discovered X03 Rare Metal Vein in Jiajika Orefield, Sichuan. *Mineral Deposits*, 34(6): 1172–1186(in Chinese with English abstract).

Gao, Y.Y., Li, X.H., Griffin, W.L., et al., 2015. Extreme Lithium Isotopic Fractionation in Three Zircon Standards (Plešovice, Qinghu and Temora). *Scientific Reports*, 5: 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep16878>

Halama, R., McDonough, W.F., Rudnick, R.L., et al., 2007. The Li Isotopic Composition of Oldoinyo Lengai: Nature of the Mantle Sources and Lack of Isotopic Fractionation during Carbonatite Petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(1–2): 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.11.022>

Halama, R., McDonough, W.F., Rudnick, R.L., et al., 2008. Tracking the Lithium Isotopic Evolution of the Mantle Using Carbonatites. *Earth and Planetary Science Letters*, 265(3–4): 726–742. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.11.007>

Hao, X.F., Fu, X.F., Liang, B., et al., 2015. Formation Ages of Granite and X03 Pegmatite Vein in Jiajika, Western Sichuan, and Their Geological Significance. *Mineral Deposits*, 34(6): 1199–1208(in Chinese with English abstract).

- Huh, Y., Chan, L. H., Edmond, J. M., 2001. Lithium Isotopes as a Probe of Weathering Processes; Orinoco River. *Earth and Planetary Science Letters*, 194(1–2): 189–199. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00523-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00523-4)
- Huh, Y., Chan, L. H., Zhang, L. B., et al., 1998. Lithium and Its Isotopes in Major World Rivers; Implications for Weathering and the Oceanic Budget. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(12): 2039–2051. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00126-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00126-4)
- Jahn, B. M., Wuab, F., Loc, C. H., et al., 1999. Crust-Mantle Interaction Induced by Deep Subduction of the Continental Crust: Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence from Post-Collisional Mafic-Ultramafic Intrusions of the Northern Dabie Complex, Central China. *Chemical Geology*, 157(1–2): 119–146. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00197-1)
- Jeffcoate, A. B., Elliott, T., Thomas, A., et al., 2004. Precise/Small Sample Size Determinations of Lithium Isotopic Compositions of Geological Reference Materials and Modern Seawater by MC-ICP-MS. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 161–172. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01053.x>
- Li, J. K., Wang, D. H., Chen, Y. C., 2013. The Ore-Forming Mechanism of the Jiajika Pegmatite-Type Rare Metal Deposit in Western Sichuan Province: Evidence from Isotope Dating. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87(1): 91–101. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12033>
- Li, J. K., Wang, D. H., Liu, S. B., et al., 2008. SRXRF Microprobe Study of Fluid Inclusions for Pegmatite Deposits in Western Sichuan Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3): 332–337 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. K., Wang, D. H., Zhang, D. H., et al., 2006a. The Source of Ore-Forming Fluid in Jiajika Pegmatite Type Lithium Polymetallic Deposit, Sichuan Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 45–52 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. K., Wang, D. H., Zhang, D. H., et al., 2006b. The Discovery of Silicate Daughter Mineral-Bearing Inclusions in the Jiajika Pegmatite Deposit, Western Sichuan, and Its Significance. *Mineral Deposits*, 25 (Suppl.): 131–134 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. H., 2015. Ore-Forming Mechanisms and Prospecting Models of Typical Granite Type Rare Metal Deposits in South China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liang, B., Fu, X. F., Tang, Y., et al., 2016. Granite Geochemical Characteristics in Jiajika Rare Metal Deposit, Western Sichuan. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 42–49 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. J., Fu, X. F., Wang, D. H., et al., 2015. Geological Characteristics and Metallogeny of Jiajika-Style Rare Metal Deposits. *Mineral Deposits*, 34(6): 1187–1198 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. J., Wang, D. H., Dai, H. Z., et al., 2017a. Geochemical Characteristics of REE and Its Implications to X03 Super-Large Lithium Pegmatite Vein, Jiajika, Sichuan. *Earth Science*, 42(10): 1674–1683 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. J., Wang, D. H., Hou, K. J., et al., 2017b. Application of Lithium Isotope to Jiajika New No.3 Pegmatite Lithium Polymetallic Vein in Sichuan. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 168–171 (in Chinese with English abstract).
- Magna, T., Janoušek, V., Kohút, M., et al., 2010. Fingerprinting Sources of Orogenic Plutonic Rocks from Variscan Belt with Lithium Isotopes and Possible Link to Subduction-Related Origin of Some A-Type Granites. *Chemical Geology*, 274(1–2): 94–107. <https://doi.org/10.13039/501100001824>
- Magna, T., Wiechert, U. H., Halliday, A. N., 2004. Low-Blank Isotope Ratio Measurement of Small Samples of Lithium Using Multiple-Collector ICPMS. *International Journal of Mass Spectrometry*, 239(1): 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2004.09.008>
- Marschall, H. R., Pogge von Strandmann, P. A. E., Seitz, H. M., et al., 2007. The Lithium Isotopic Composition of Orogenic Eclogites and Deep Subducted Slabs. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3–4): 563–580. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.08.005>
- Pan, M., Tang, Y., Xiao, R. Q., et al., 2016. The Discovery of the Superlarge Li Ore Vein X03 in the Jiajika Ore District. *Acta Geologica Sichuan*, 36(3): 422–425 (in Chinese with English abstract).
- Pistiner, J. S., Henderson, G. M., 2003. Lithium-Isotope Fractionation during Continental Weathering Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1–2): 327–339. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00348-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00348-0)
- Qin, Y. L., Hao, X. F., Xu, Y. F., et al., 2015. Metallogenic Regularity and Prospecting Criteria of Granite Type Rare Metal Deposits in Jiajika Area, Sichuan Province. *Geological Survey of China*, 2(7): 35–39 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, L., Rudnick, R. L., McDonough, W. F., et al., 2009. Li and $\delta^7\text{Li}$ in Mudrocks from the British Caledonides; Metamorphism and Source Influences. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(24): 7325–7340. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.08.017>

- Richter, F. M., Dauphas, N., Teng, F. Z., 2009. Non-Traditional Fractionation of Non-Traditional Isotopes: Evaporation, Chemical Diffusion and Soret Diffusion. *Chemical Geology*, 258 (1–2): 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.011>
- Richter, F., Watson, B., Chaussidon, M., et al., 2014. Lithium Isotope Fractionation by Diffusion in Minerals. Part 1: Pyroxenes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 126(2): 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.11.008>
- Romer, R. L., Meixner, A., Förster, H. J., 2014. Lithium and Boron in Late-Orogenic Granites—Isotopic Fingerprints for the Source of Crustal Melts? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 131(4): 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.01.018>
- Rudnick, R. L., Tomascak, P. B., Njo, H. B., et al., 2004. Extreme Lithium Isotopic Fractionation during Continental Weathering Revealed in Saprolites from South Carolina. *Chemical Geology*, 212(1–2): 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.08.008>
- Su, A. N., Li, Z. Z., Tian, S. H., et al., 2010a. Lithium Isotope: Analytical Methods and Its Application to Carbonatite in Continental Rift Environment. *Mineral Deposits*, 29(5): 827–842 (in Chinese with English abstract).
- Su, A. N., Li, Z. Z., Tian, S. H., et al., 2010b. High-Precision Measurement of Lithium Isotope Using MC-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 29(Suppl.): 835–836 (in Chinese with English abstract).
- Sun, H., Gao, Y. J., Xiao, Y. L., et al., 2016. Lithium Isotope Fractionation during Incongruent Melting: Constraints from Post-Collisional Leucogranite and Residual Enclaves from Bengbu Uplift, China. *Chemical Geology*, 439: 71–82. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00024-3)
- Tang, Y., 2016. Characteristic and Prospecting Significance of Granite in the Jiajika Rare Metal Mining Area of the West Sichuan (Dissertation). Southwest University of Science and Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. J., Zhang, H. F., Ying, J. F., 2009. Discussion on Fractionation Mechanism of Lithium Isotopes. *Earth Science*, 34(1): 43–55 (in Chinese with English abstract).
- Teng, F. Z., McDonough, W. F., Rudnick, R. L., et al., 2004. Lithium Isotopic Composition and Concentration of the Upper Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4167–4178. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.03.031>
- Teng, F. Z., McDonough, W. F., Rudnick, R. L., et al., 2006. Lithium Isotopic Systematics of Granites and Pegmatites from the Black Hills, South Dakota. *American Mineralogist*, 91(10): 1488–1498. <https://doi.org/10.2138/am.2006.2083>
- Teng, F. Z., McDonough, W. F., Rudnick, R. L., et al., 2007. Limited Lithium Isotopic Fractionation during Progressive Metamorphic Dehydration in Metapelites: A Case Study from the Onawa Contact Aureole, Maine. *Chemical Geology*, 239(1–2): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.12.003>
- Teng, F. Z., Roberta, L., Rudnick, et al., 2008. Lithium Isotopic Composition and Concentration of the Deep Continental Crust. *Chemical Geology*, 255: 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.009>
- Teng, F. Z., Rudnick, R. L., McDonough, W. F., et al., 2009. Lithium Isotopic Systematics of A-Type Granites and Their Mafic Enclaves: Further Constraints on the Li Isotopic Composition of the Continental Crust. *Chemical Geology*, 262(3): 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.02.009>
- Tian, S. H., Hou, Z. Q., Su, A. N., et al., 2012. Separation and Precise Measurement of Lithium Isotopes in Three Reference Materials Using Multi Collector-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86(5): 1297–1305. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2012.00749.x>
- Tomascak, P. B., 2004. Developments in the Understanding and Application of Lithium Isotopes in the Earth and Planetary Sciences. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 55(1): 153–195. <https://doi.org/10.2138/gsrms.55.1.153>
- Wang, D. H., Fu, X. F., 2013. The Breakthrough of Lithium Prospecting in the Periphery of Jiajika Mining Area, Sichuan. *Rock and Mineral Analysis*, 32(6): 987 (in Chinese).
- Wang, D. H., Li, J. K., Fu, X. F., 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating for the Jiajika Pegmatite-Type Rare Metal Deposit in Western Sichuan and Its Significance. *Geochimica*, 34(6): 541–547 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Liu, L. J., Dai, H. Z., et al., 2017. Discussion on Particularity and Prospecting Direction of Large and Super-Large Spodumene Deposits. *Earth Science*, 42(12): 2243–2257 (in Chinese with English abstract).

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.142>

- Zack, T., Tomascak, P. B., Rudnick, R. L., et al., 2003. Extremely Light Li in Orogenic Eclogites: The Role of Isotope Fractionation during Dehydration in Subducted Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 208(3-4): 279-290. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00035-9](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00035-9)
- Zhao, Y., Hou, K. J., Tian, S. H., et al., 2015. Study on Measurements of Lithium Isotopic Compositins for Common Standard Reference Materials Using Multi-Collector Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Rock and Mineral Analysis*, 34(1): 28-39 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. X., Zhao, G. M., Zeng, Y. F., 2015. Geological Features and Genetic Model for the Granitic Pegmatite Type (Jiajika Type) Li Deposits in West Sichuan—By the Example of the Jiajika Li Deposit. *Acta Geologica Sichuan*, 35(3): 391-395 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 付小方, 侯立玮, 王登红, 等, 2014. 四川甘孜甲基卡锂辉石矿产调查评价成果. *中国地质调查*, 1(3): 37-43.
- 付小方, 袁瀚平, 王登红, 等, 2015. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与勘查模型. *矿床地质*, 34(6): 1172-1186.
- 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. *矿床地质*, 34(6): 1199-1208.
- 李建康, 王登红, 刘善宝, 等, 2008. 川西伟晶岩型矿床中流体包裹体的 SRXRF 分析. *大地构造与成矿学*, 32(3): 332-337.
- 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. *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. *矿床地质*, 25(增刊): 131-134.
- 李胜虎, 2015. 华南典型花岗岩型稀有金属矿床的成矿机制与找矿模式研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.

- 梁斌, 付小方, 唐屹, 等, 2016. 川西甲基卡稀有金属矿区花岗岩岩石地球化学特征. *桂林理工大学学报*, 36(1): 42-49.
- 刘丽君, 付小方, 王登红, 等, 2015. 甲基卡式稀有金属矿床的地质特征与成矿规律. *矿床地质*, 34(6): 1187-1198.
- 刘丽君, 王登红, 代鸿章, 等, 2017a. 四川甲基卡新三号超大型锂矿脉稀土元素地球化学. *地球科学*, 42(10): 1673-1683.
- 刘丽君, 王登红, 侯可军, 等, 2017b. 锂同位素在四川甲基卡新三号矿脉研究中的应用. *地学前缘*, 24(5): 167-171.
- 潘蒙, 唐屹, 肖瑞卿, 等, 2016. 甲基卡新 3 号超大型锂矿脉找矿方法. *四川地质学报*, 36(3): 422-425.
- 秦宇龙, 郝雪峰, 徐云峰, 等, 2015. 四川甲基卡地区花岗岩型稀有金属矿找矿规律及标志. *中国地质调查*, 2(7): 35-39.
- 苏媛娜, 李真真, 田世洪, 等, 2010a. 锂同位素分析方法及其在大陆裂谷环境碳酸岩研究中的应用. *矿床地质*, 29(5): 827-842.
- 苏媛娜, 李真真, 田世洪, 等, 2010b. MC-ICP-MS 高精度测定 Li 同位素分析方法. *矿床地质*, 29(增刊): 835-836.
- 唐屹, 2016. 川西甲基卡稀有金属矿区花岗岩特征及找矿意义(硕士学位论文). 成都: 西南科技大学.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰, 2009. 锂同位素分馏机制讨论. *地球科学*, 34(1): 43-55.
- 王登红, 付小方, 2013. 四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破. *岩矿测试*, 32(6): 987.
- 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. *地球化学*, 34(6): 541-547.
- 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 等, 2017. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向. *地球科学*, 42(12): 2243-2257. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.142>
- 赵悦, 侯可军, 田世洪, 等, 2015. 常用锂同位素地质标准物质的多接收器电感耦合等离子体质谱分析研究. *岩矿测试*, 34(1): 28-39.
- 赵玉祥, 赵光明, 曾毅夫, 2015. 川西甲基卡式锂矿地质特征及成矿模式——以甲基卡锂矿床为例. *四川地质学报*, 35(3): 391-395.