



川西甲基卡伟晶岩石英微量元素特征 及高纯石英原料潜力

郝雪峰¹⁾, 唐屹¹⁾, 梁斌²⁾, 杨振²⁾, 潘蒙¹⁾, 王永洪²⁾, 李琴友²⁾, 付小方¹⁾

1) 四川省综合地质调查研究所, 成都, 610081;

2) 西南科技大学环境与资源学院, 四川绵阳, 621000

内容提要:川西甲基卡矿区是目前我国已发现的规模最大的以锂为主的花岗伟晶岩型稀有金属矿区,广泛分布有不同类型的伟晶岩脉。花岗伟晶岩型高纯石英原料是目前全球生产高纯石英最重要的原料。石英是伟晶岩中主要的造岩矿物,其微量元素组成、含量是评价伟晶岩型高纯石英硅质原料的关键指标,前人对矿区内伟晶岩石英微量元素组成的研究基本没有涉及。笔者等以矿区不同类型伟晶岩为研究对象,采用微区 LA-ICP-MS 方法分析了石英微量元素组成及含量,对其作为高纯石英原料的潜力进行了评价,指出寻找伟晶岩型高纯石英硅质原料的方向,提出了甲基卡稀有金属矿产开发中对石英资源综合利用的建议。结果表明,不同类型伟晶岩脉石英中 Al、Li 等微量元素含量较高, Li 含量为 $59.6 \times 10^{-6} \sim 181 \times 10^{-6}$, Al 含量 $254 \times 10^{-6} \sim 672 \times 10^{-6}$, 13 个主要的杂质元素含量 $\Sigma_{13} = 340 \times 10^{-6} \sim 1005 \times 10^{-6}$, 除 1 件样品外, 石英 $\text{SiO}_2 \geq 99.9\%$ (3N), 仅达到了低端高纯石英或高纯级别石英原料标准。在 5 种类型的伟晶岩中, 锂辉石型伟晶岩是目前开采的工业矿床类型, 石英中的杂质元素相对较低, SiO_2 含量 $> 99.95\%$ (3N5), 在稀有金属资源开发中应高度重视石英的高效利用。川西地区稀有金属矿区岩浆结晶分异形成的伟晶岩 Al、Li 等杂质元素含量较高, 难以作为优质高纯石英硅质原料, 未来寻找优质伟晶岩型高纯石英原料应着眼于丹巴地区变质成因的白云母花岗伟晶岩。

关键词:花岗伟晶岩;高纯石英;潜力评价;甲基卡

川西康定甲基卡稀有金属矿区是目前我国已发现的规模最大的以锂为主的花岗伟晶岩型稀有金属矿区,不同类型的伟晶岩脉围绕二云母花岗岩成带分布,形成了 Li-Be-Nb-Ta 完整的成矿系列(付小方等,2017)。近年来,依据野外地质特征(代鸿章等,2018;许志琴等,2023)、成矿物质来源(侯江龙等,2018)、成矿流体特征(李建康等,2008,2023)、成岩成矿年代(王登红等,2005;郝雪峰等,2015;梁斌等,2016)等,对稀有金属矿床的地质特征及成矿机制进行了深入的研究。在这些研究中,除利用了伟晶岩中云母的微量元素组成分析了伟晶岩分异演化及锂成矿过程外(韩志辉等,2024),对伟晶岩中主要的造岩矿物—石英的微量元素特征及其对岩浆演化、成矿过程的指示几乎没有涉及。石英是花岗伟晶岩中的主要造岩矿物,其微量元素能够提供关于岩浆演化、稀有金属成矿过程的重要线索(Larsen

et al., 2004; Müller et al., 2021; 秦克章等, 2024)。另外,从高纯石英硅质原料的角度上,其微量元素含量、组成以及赋存状态决定了其是否能作为高纯石英原料的关键因素之一。

高纯石英是硅质原料提纯加工而成的高品质石英,是半导体、光伏、光纤通信、光学、电光源等战略性新兴产业的关键基础材料(张海啟等,2022;张亮,2024;王九一,2021)。由于高纯石英对杂质元素、包裹体、羟基、粒度等有严格要求,目前全球可以加工高纯石英的矿床非常稀少,且主要分布在美国、挪威、俄罗斯、印度、安哥拉等国家(张亮等,2024)。在高纯石英原料矿石中,花岗伟晶岩型高纯石英矿床规模大、品质好,是目前全球最重要矿床类型,如美国 Spruce Pine 地区的花岗伟晶岩,供给了全球 90% 以上的高纯石英原料需求量(Swanson et al., 2010;张海啟等,2022;张亮,2024)。我国是全球最

注:本文为四川省科技厅揭榜挂帅科技计划项目(编号:2025YFNZH003),自然资源部“新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目”(编号:ZKKJ202412),四川省自然科学基金资助项目(编号:24NSFSC0093)和四川省自然资源厅重大科技项目(编号:ZDKJ-2024-003)的成果。

收稿日期:2025-09-14;改回日期:2025-12-20;网络首发:2026-02-15;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.021

作者简介:郝雪峰,男,1972年生,硕士,正高级工程师,主要从事稀有稀土稀散资源勘查与评价工作;Email: himalaya1979@163.com。通讯作者:唐屹,男,1989年生,硕士,高级工程师,主要从事关键矿产普查与评价工作;Email: 497190800@qq.com。

大高纯石英消费国,4N5级及以上的高纯石英原料矿石基本依赖进口,对外依存度超过95%(张亮等,2024)。高纯石英资源短缺的严峻形势对高纯石英地质找矿和评价提出了更高的要求,科学评价高纯石英资源、保障高纯石英资源安全供给迫在眉睫。

甲基卡稀有金属矿区具有一定规模的花岗伟晶岩脉有500余条,这些不同类型、不同规模伟晶岩中的石英杂质元素组成及含量如何?是否具有潜在高纯石英原料的潜力?这些问题是人们关注的、也是迫切需要回答的问题之一。因此,开展伟晶岩型高纯石英硅质原料的评价,是一个深耕甲基卡稀有金属矿区,获得更多紧缺关键战略性矿产资源的重要地质找矿方向,这对于川西高原类似稀有金属矿区高纯石英硅质原料的评价也具有重要的指示意义。笔者等以甲基卡稀有金属矿区不同类型具有代表性伟晶岩为研究对象,采用LA-ICP-MS原位微区分析方法,系统分析了不同类型伟晶岩中石英的微量元素特征,确定不同类型伟晶岩石英微量元素含量的差异,结合有关高纯石英原料杂质元素含量指标,对甲基卡稀有金属矿区伟晶岩型高纯石英硅质原料进行了评价,为伟晶岩中石英的综合利用提供依据,也对川西高原类似地区伟晶岩型高纯石英原料地质找矿及评价提供指导。

1 矿区地质特征

甲基卡稀有金属矿区位于松潘-甘孜造山带东侧(图1a),四川省西部康定、雅江、道孚三县的交界处,是我国规模最大的稀有金属矿化集中区(付小方等,2017)。甲基卡矿区受岩浆底劈穹窿控制,穹窿由三叠系西康群砂、泥岩以及二云母花岗岩体组成(图1b),形成于印支末-燕山早期大规模滑脱-推覆造山阶段。穹窿中心的二云母花岗岩出露面积约5.3 km²,为高钾钙碱性强过铝质S型花岗岩(梁

斌等,2016),形成于晚三叠世晚期(223~214 Ma)(郝雪峰等,2016)。受岩浆底劈穹窿作用的影响,岩体周围的西康群砂、泥岩发生动热变质作用,形成透辉石带、十字石带、红柱石-十字石带、红柱石带和黑云母带5个较完整的渐进变质带。在岩浆底劈穹窿的控制下,富Li-F花岗质岩浆以脉动式多期次充填-交代形成了不同类型的花岗伟晶岩脉。

围绕穹窿中心的花岗岩侵入体分布有千余条花岗伟晶岩脉,规模较大(>20 m²)的伟晶岩脉有509条,其中工业矿体和矿化伟晶岩脉有114条(付小方等,2017)。伟晶岩脉大多侵位于三叠系中,仅少部分位于岩体顶部,脉体主要为似层状、透镜状、分支复合状产出。伟晶岩的造岩矿物主要为微斜长石、钠长石、石英和白云母,稀有金属矿物包括锂辉石、绿柱石、铌钽铁矿等,副矿物有磷灰石、石榴石、电气石、锡石等。依据伟晶岩的矿物组成及含量,将其划分为: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)和白(锂)云母型(V),主要的矿物组成及含量见(表1)。在空间上,以花岗岩侵入体为中心向外不同类型的伟晶岩在空间上呈现出良好的分带性(图1b)。

微斜长石型伟晶岩(I),集中于花岗岩岩体内部及边缘,主要由微斜长石、钠长石、石英、白云母组成。微斜长石-钠长石型(II),集中于岩体外接触带0.7 km范围内,主要由微斜长石、钠长石、石英、白云母和绿柱石组成,是绿柱石产出最主要的伟晶岩类型。钠长石型(III),集中于岩体外接触带0.2~1.4 km范围内,主要由钠长石、石英、白云母、绿柱石和锂辉石组成,Be和Li矿化达到工业品位。锂辉石型(IV),集中于岩体外接触带0.5~2.6 km范围内,主要由钠长石、锂辉石、石英和白云母组成,为锂矿化的主要伟晶岩类型。白(锂)云母型(V),集中于岩体外接触带1.2~3.0 km范围内,主要由

表1 甲基卡矿区伟晶岩脉类型划分及特征(据唐国凡等[1984]^①)

Table 1 Classification and characteristics of pegmatite veins in the Jiajika mining area (from Tang Guofan et al. [1984#])^①

伟晶岩类型 定量指标		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)	白(锂)云母型(V)
		微斜长石≥40	微斜长石≥20, 钠长石≥20	钠长石≥40	锂辉石≥10	白云母≥10或锂云母>5
主要 矿物 (%)	微斜长石	40~60	20~40	<10	10±	0~15
	钠长石	<20	20~40	40~60	25~45	30~50
	石英	20~35	25~35	30~40	25~40	30~40
	白云母	3~7	3~7	2~5	2~10	10±
	锂辉石	0	<5	<10	15~25	<15
特征碱性元素		K	K, Na	Na	Na, Li	Li, Cs

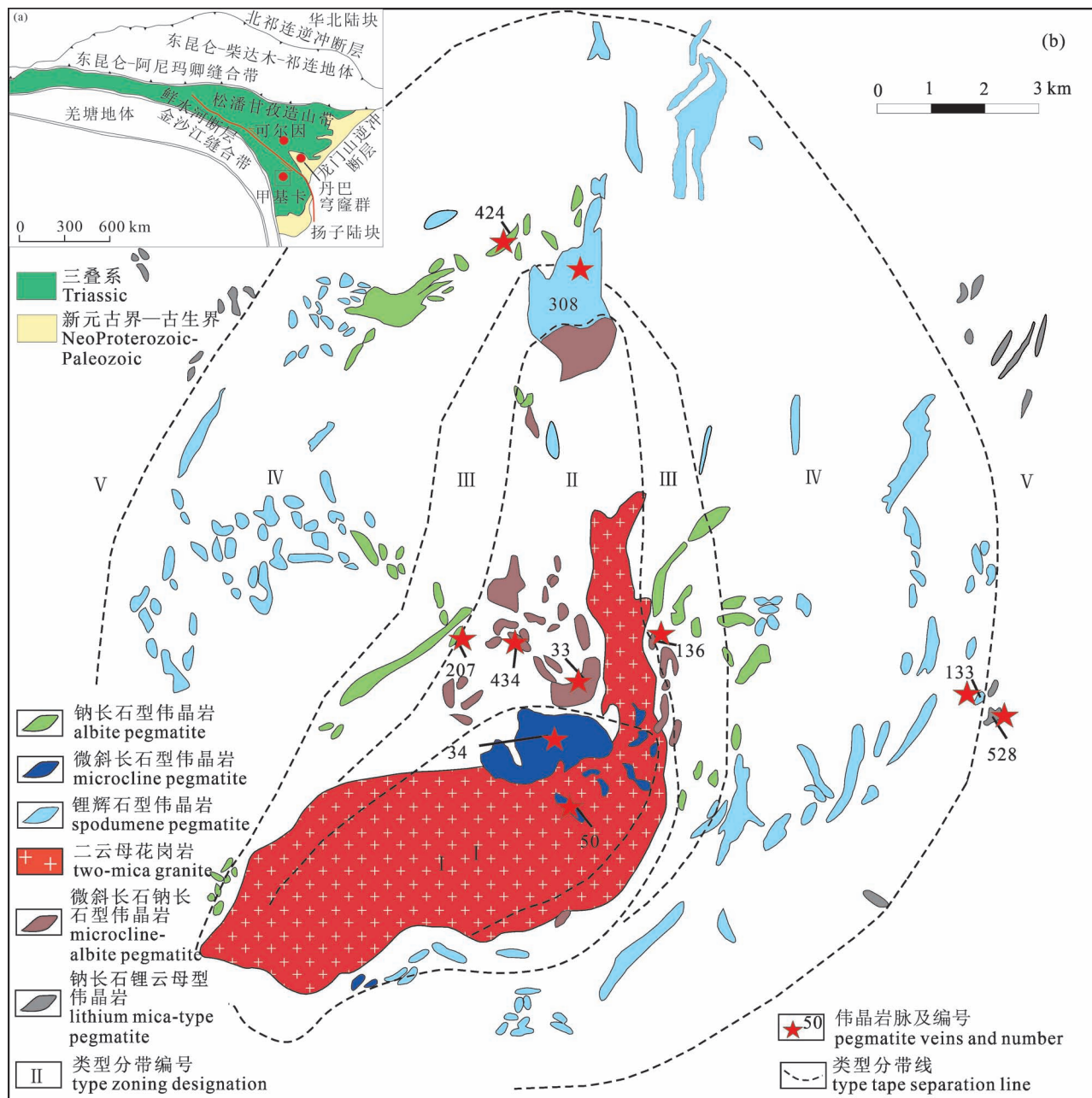


图1 甲基卡稀有金属矿区大地构造位置、川西穹窿分布图(a) (据许志琴等,2018 修改)及地质简图(b) (据付小方等,2017 修改)

Fig. 1 Tectonic location of the Jiajika deposit and distribution of domes in the Western Sichuan (modified from Xu Zhiqin et al., 2018&) (a), and geological sketch map (modified from Fu Xiaofang et al., 2017&) (b)

石英、白云母和钠长石组成。在空间上,稀有成矿元素由中心向外,呈现出 Be (I 型至 II 型)→Be + Li (III 型)→Li (IV 型)→Nb + Ta (V 型)的分带特征。

2 样品采集及分析方法

本次研究以甲基卡矿区不同类型中具有代表性的伟晶岩脉为研究对象, I 类型(34, 50 号伟晶岩脉)、II 类型(33, 434 号伟晶岩脉)、III 类型(207、

136、424 号伟晶岩脉)、IV 类型(133、308 号脉)、V 类型(528 号伟晶岩脉)(图 1), 各类伟晶岩脉基本地质特征见(表 2、图 2)。在此基础上, 选取代表性手标本制成薄片, 结合显微镜选择石英矿物进行原位微量元素分析测试。

激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)在中国科学院地球化学研究所激光剥蚀微区原位分析实验室, 采用 GeolasPro 193nm 激光剥蚀系统

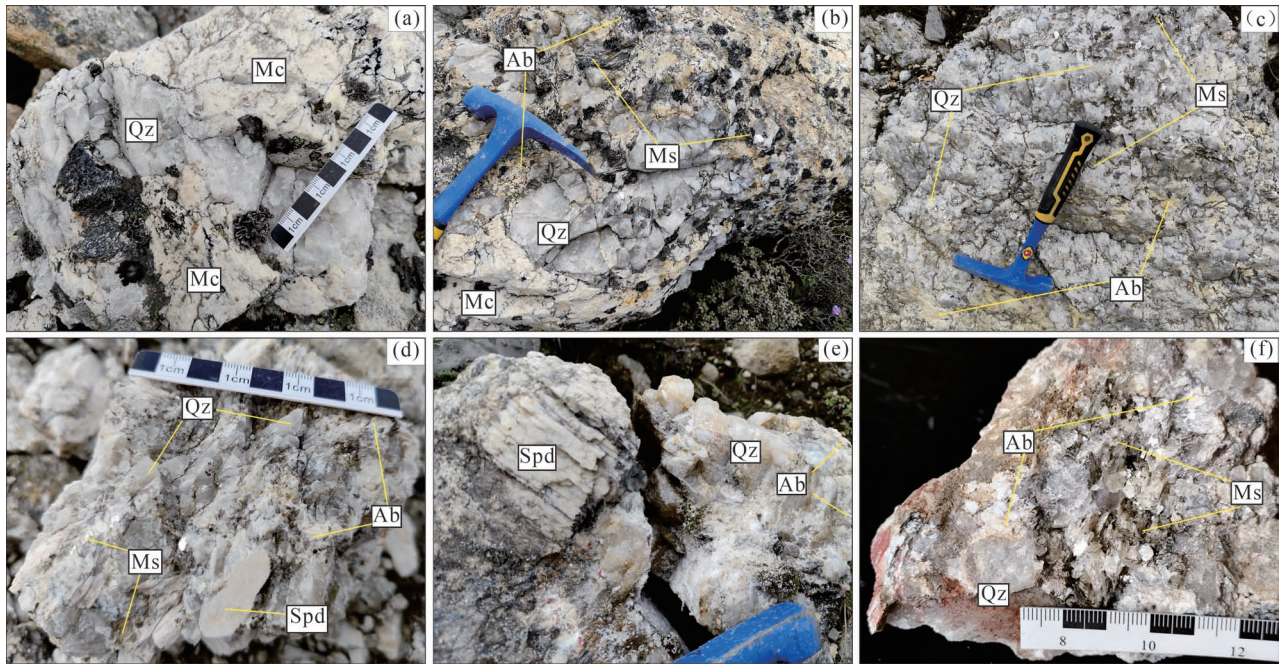


图2 甲基卡稀有金属矿区代表性伟晶岩地质特征

Fig. 2 Geological characteristics of representative pegmatites in the Jiajika rare metal mining area

- (a) 微斜长石型(I), No. 34; (b) 微斜长石—钠长石型(II), No. 33; (c) 钠长石型(III), No. 424; (d)、(e) 锂辉石型(IV), No. 133、No. 308; (f) 白(锂)云母型(V), No. 528; Qz—石英; Mc—微斜长石; Ab—钠长石; Ms—白云母; Spd—锂辉石
 (a) microcline type pegmatite (I), No. 34; (b) microcline-albite type pegmatite (II), No. 33; (c) albite type pegmatite (III), No. 424; (d)、(e) spodumene type pegmatite (IV), No. 133, No. 308; (f) muscovite (lepidolite) type pegmatite (V), No. 528; Qz—quartz; Mc—microcline; Ab—albite; Ms—mica; Spd—spodumene

+ Agilent 7900 质谱仪进行分析。在测试之前用 SRM610 对 ICP-MS 性能进行优化,使仪器达到最佳的灵敏度和电离效率、尽可能小的氧化物产率和低的背景。剥蚀束斑为 $44\ \mu\text{m}$, 激光剥蚀频率为 10 Hz, 能量密度为 $10\ \text{J}/\text{cm}^2$, 采用 NIST RAM610 作为分析外标。每 15 个测点分析 1 组标样。数据处理采用 ICPMS DataCal 软件完成。

3 分析结果

3.1 伟晶岩的矿物特征

甲基卡矿区各类型伟晶岩脉矿物成分变化较大,主要矿物为石英、微斜长石、钠长石、锂辉石、白云母和锂云母等(表 1)。

微斜长石:白色,少量微红。粒度一般较大,相差悬殊,约 0.5~100 cm, 常为早期结晶阶段的产物,常见格子状双晶,部分显条纹构造,可与石英形成文象结构(图 2a、b)。

钠长石:多呈白色,自形、半自形晶体,常见聚片双晶。大致可分 3 种形态:板状钠长石,粒度 5~10 mm; 叶片状钠长石,粒度 1~5 mm(图 2c、d); 糖粒状钠长石,粒度 <1 mm(图 2e、f)。

石英:5 种类型的伟晶岩脉中石英的含量均在 20% 以上,钠长石型、白(锂)云母型伟晶岩石英含量在 30% 以上。白色、半透明,呈它形粒状,边界清

表 2 甲基卡稀有金属矿区各类型伟晶岩代表性脉体特征

Table 2 Characteristics of representative veins of various types of pegmatites in the Jiajika rare metal mining area

伟晶岩类型	脉号	形态	长(m)	厚(m)	矿化类型及特征
微斜长石型(I)	34	岩盘状	1000.4	15.3	不均匀绿柱石矿化
	50	脉状	383.8	3.2	绿柱石矿化
微斜长石—钠长石型(II)	33	岩盆状	739.7	387.2	绿柱石矿化
	136	不规则脉状	130.4	49.8	见锂辉石矿化
	434	不规则脉状	230.1	4.5	绿柱石矿化
钠长石型(III)	207	不规则脉状	190.4	14.7	零星绿柱石矿化
	424	脉状	320.3	30.3~20.4	不均匀锂辉石矿化
锂辉石型(IV)	133	规则脉状	300.8	13.5	锂辉石矿化
	308	分枝脉状	1450.2	499.7	不均匀锂辉石矿化
白(锂)云母型(V)	528	脉状	234.8	2.6	铌钽铁矿矿化

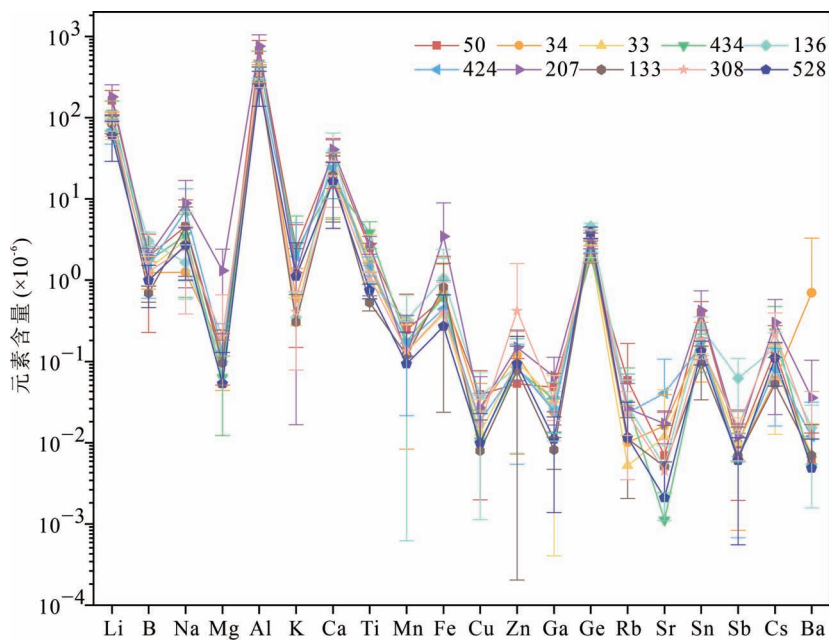


图3 石英微量元素含量蛛网图

Fig. 3 Spider diagram of trace elements in quartz

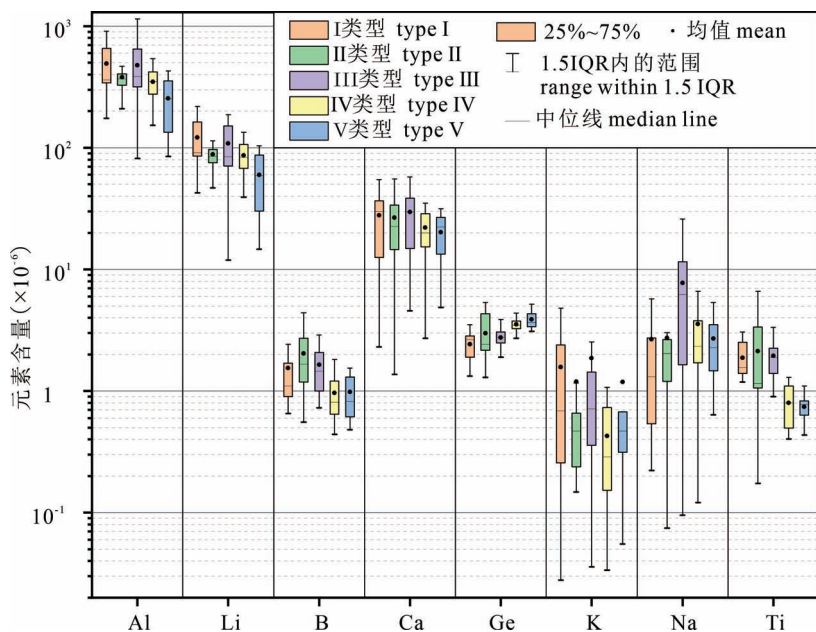


图4 石英微量元素含量箱线图

Fig. 4 Boxplot of trace element content in quartz

晰,表面光滑,颗粒多 $>10\text{ mm}$ (图2a、b),少量为 $3\sim 10\text{ mm}$ (图2c、d),常见波状消光,是各类型伟晶岩中的贯通矿物。

白云母:白色,叠片状、鳞片状集合体,片径大于钠长石而小于微斜长石,一般 $10\sim 20\text{ mm}$ (图2b、f)。

锂辉石:主要产于IV类型伟晶岩内,构成特征造

岩矿物,部分III、V类型伟晶岩含有少量,其他类型偶见。多为灰白,偶见浅红色;半自形及自形的板状、柱状、针状晶体系,与微斜长石、钠长石、石英等共生,粒度相差悬殊,一般 $5\sim 30\text{ mm}$ (图2d、e)。

3.2 石英中微量元素含量特征

伟晶岩脉石英LA-ICP-MS分析结果见表3,完整数据参照附表1。

分析结果表明(表3,图3),石英Al元素含量最高,其次为Li。Al、Li、Ca含量均值大于 10×10^{-6} ;B、Na、K、Ti、Mn、Fe、Ge、Sn、Cs等元素的含量在 0.1×10^{-6} 到 1×10^{-6} 之间波动;Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Sb、Ba含量相对较低,均值小于 0.1×10^{-6} ,同一样品不同点位元素含量变化较大。

不同类型伟晶岩石英中含量相对较高元素的箱线图见(图4)。Al在I类型(平均 493×10^{-6})与III类型(平均 478×10^{-6})中含量接近,II类型(平均 381×10^{-6})与IV类型(平均 349×10^{-6})中含量接近,V类型(254×10^{-6})中含量最低,总体上从I类型~V类型中Al含量依次递减。Li含量变化与Al相似,I类型~IV类型含量接近,平均为 $122\times 10^{-6}\sim 86.5\times 10^{-6}$,V类型Li含量显著降低,平均为 59.6×10^{-6} 。Ge在II类型中平均为 2.99×10^{-6} ,略高于III类型(平均为 2.75×10^{-6}),整体从I类型到V类型含量逐渐增加(平均 $2.42\times 10^{-6}\sim 3.87\times 10^{-6}$)。Ti在I、II、III类型中含量基本接近,为 $1.87\times 10^{-6}\sim 2.13\times 10^{-6}$,高于IV、V类型中的含量 $0.74\times 10^{-6}\sim 0.80\times 10^{-6}$ 。不同类型伟晶岩中B含量波动较小($0.97\times 10^{-6}\sim 2.03\times 10^{-6}$)。Ca含量相对较高,不同类型伟晶岩石英中的平均含量变化不大($16.2\times 10^{-6}\sim 29.5\times 10^{-6}$),从I至V含量逐渐降低。Na在III类型伟晶岩中含量最高(平均 7.97×10^{-6}),其他类型含量较低(平均 $2.70\times 10^{-6}\sim 3.53\times 10^{-6}$)。K在IV类型伟晶岩中含量最低(平均 0.35×10^{-6}),其他类型含量接近(平均 $1.01\times 10^{-6}\sim 1.59\times 10^{-6}$)。

表3 甲基卡稀有金属矿区伟晶岩石英微量元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)

类型	I 类型			II 类型			III 类型			IV 类型			V 类型		
	50-1-B2 (n=11)	34-4-B1 (n=15)	33-3-B1 (n=14)	434-1-B1 (n=12)	136-1-B2 (n=13)	424-1-B2 (n=15)	207-1-B3 (n=8)	133-1-B2 (n=15)	308-B7 (n=14)	528-1-B2 (n=15)					
元素	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	
Li	42.7~220	91.7	40.5~89.3	115	48.6~107	84.2	82.6~284	181	53.3~134	89.3	39.3~134	89.3	14.7~104	59.6	
B	0.65~5.68	1.24	0.71~3.05	1.71	1.56~4.40	3.01	1.46~2.85	1.98	0.49~1.82	0.69	0.49~1.82	1.26	0.48~2.50	0.99	
Na	0.81~17.4	1.25	0.28~15.5	3.53	0.07~3.03	1.64	0.10~26.0	8.80	0.12~13.6	4.55	0.86~9.58	2.51	0.64~6.79	2.70	
Mg	0.03~0.23	0.14	0.02~0.28	0.06	bdl~0.51	0.10	bdl~2.70	1.31	0.00~0.57	0.096	bdl~1.77	0.20	bdl~0.26	0.09	
Al	175~911	672	259~630	361	210~457	367	363~1156	761	221~478	341	153~541	358	85~428	254	
K	bdl~7.82	2.47	bdl~0.90	0.30	bdl~1.34	0.45	0.04~4.04	1.23	bdl~1.07	0.30	bdl~0.98	0.40	bdl~5.51	1.11	
Ca	bdl~76.4	34.4	4.87~47.9	21.9	bdl~94.5	39.6	19.1~57.4	40.4	bdl~49.2	19.4	bdl~33.7	18.5	bdl~31.5	16.2	
Ti	1.66~3.07	2.46	1.18~2.00	1.44	0.17~1.25	0.93	1.96~3.71	2.76	0.40~0.80	0.53	0.82~1.29	1.09	0.43~1.10	0.74	
Mn	bdl~1.27	0.24	bdl~0.39	0.14	bdl~0.95	0.33	bdl~0.73	0.12	bdl~0.43	0.12	bdl~0.50	0.13	bdl~0.46	0.09	
Fe	bdl~4.58	0.61	bdl~1.38	0.72	bdl~3.82	1.05	bdl~16.1	3.46	bdl~2.31	1.12	bdl~1.59	0.40	bdl~1.12	0.27	
Cu	bdl~0.11	0.04	bdl~0.10	0.03	bdl~0.07	0.04	bdl~0.11	0.03	bdl~0.03	0.01	bdl~0.08	0.02	bdl~0.03	0.01	
Zn	bdl~0.14	0.05	bdl~0.41	0.12	bdl~0.32	0.10	0.04~0.35	0.15	bdl~0.21	0.08	bdl~4.49	0.42	bdl~0.32	0.09	
Ge	1.33~2.13	1.86	2.51~3.51	2.83	3.86~5.33	4.60	2.15~3.28	2.81	2.72~4.08	3.39	3.24~4.38	3.66	3.09~5.17	3.87	
Ga	0.00~0.09	0.05	bdl~0.04	0.02	bdl~0.06	0.03	0.02~0.14	0.07	0.00~0.01	0.01	0.02~0.06	0.03	bdl~0.03	0.01	
Rb	bdl~0.37	0.06	bdl~0.06	0.01	0.00~0.13	0.03	bdl~0.09	0.03	bdl~0.03	0.01	0.00~0.08	0.02	bdl~0.07	0.01	
Sr	bdl~0.06	0.01	bdl~0.13	0.01	bdl~0.01	0.01	0.01~0.03	0.02	bdl~0.04	0.01	bdl~0.02	0.00	bdl~0.01	0.00	
Sn	0.19~0.74	0.39	0.11~0.22	0.16	0.12~0.38	0.26	0.19~1.15	0.42	0.01~0.18	0.09	0.09~0.22	0.15	0.07~0.23	0.13	
Sb	bdl~0.02	0.01	bdl~0.04	0.01	0.01~0.18	0.06	bdl~0.02	0.01	bdl~0.03	0.01	bdl~0.03	0.02	bdl~0.02	0.01	
Cs	0.03~0.53	0.13	0.00~0.38	0.06	0.07~0.37	0.15	0.02~0.83	0.30	0.00~0.19	0.05	0.07~0.64	0.23	0.03~0.25	0.11	
Ba	bdl~0.02	0.01	bdl~10.07	0.70	bdl~0.04	0.02	bdl~0.20	0.04	bdl~0.03	0.01	bdl~0.12	0.01	bdl~0.02	0.00	
Σ13	222~1249	883	332~864	483	264~679	503	471~1556	1005	278~669	455	198~735	476	104~587	340	
Σo	0.21~1.83	0.66	0.07~11.24	0.99	0.20~1.16	0.55	0.23~2.49	0.88	0.01~0.52	0.19	0.17~1.17	0.47	0.10~0.63	0.28	

注: bdl—低于检出限, Σ₁₃=Li+B+Na+Mg+Al+K+Ca+Ti+Mn+Fe+Cu+Zn+Ge, Σ_o=Ba+Cs+Sb+Sn+Sr+Rb+Ga

Al、Li、Ti 等元素是影响高纯石英品质的关键元素之一 (Müller et al., 2018; 张亮等, 2024)。不同类型伟晶岩石英中 Σ Al+Li+Ti 平均含量变化较大, I、III 类型为 647×10^{-6} 、 671×10^{-6} , II、IV 类型为 477×10^{-6} 、 437×10^{-6} , 最低为 V 类型 314×10^{-6} 。这些元素占到杂质元素总量的 90% 以上, 是甲基卡矿区伟晶岩石英中最主要的杂质元素。

4 讨论

4.1 伟晶岩的结晶温度与杂质元素含量

石英中的 Ti 含量与其结晶温度密切相关, 利用石英中 Ti^{4+} 与 Si^{4+} 替换关系建立的温度计 (TitaniQ) 被广泛应用于估计花岗岩或伟晶岩岩浆形成的平均温度 (Wark and Watson, 2006)。依据 Wark 和 Watson (2006) 提出的温度与 Ti 含量之间的拟合函数方程:

$$\frac{T}{K} = \frac{-3765}{\lg \frac{w(Ti)}{10^{-6}} - 5.69}$$

式中 $w(Ti)$ 为石英中的 Ti 含量, 采用 LA-ICP-MS 石英微区分析 Ti 含量, 计算出不同类型伟晶岩脉结晶温度平均值为 $440 \sim 357^{\circ}\text{C}$, 总体上表现为从 I ~ V 类型不断降低的趋势 (图 5)。与同一类型、同一样品石英杂质元素含量相对比 (图 5), 可以看出石英中的杂质元素含量与结晶温度具有较好的相关性, 总体上显示杂质元素含量随着结晶温度的降低而减少, 而且 IV、V 类型伟晶岩中石英的杂质元素含量显著低于其他类型的伟晶岩。

4.2 微量元素的赋存状态

石英中常见的晶格杂质元素有 Al、Ti、Li、Na、K 等, 这些晶格杂质是对高纯石英提纯影响最大的一种赋存类型, 特别是 Al、Ti 是其中影响提纯的标志性元素 (Müller,

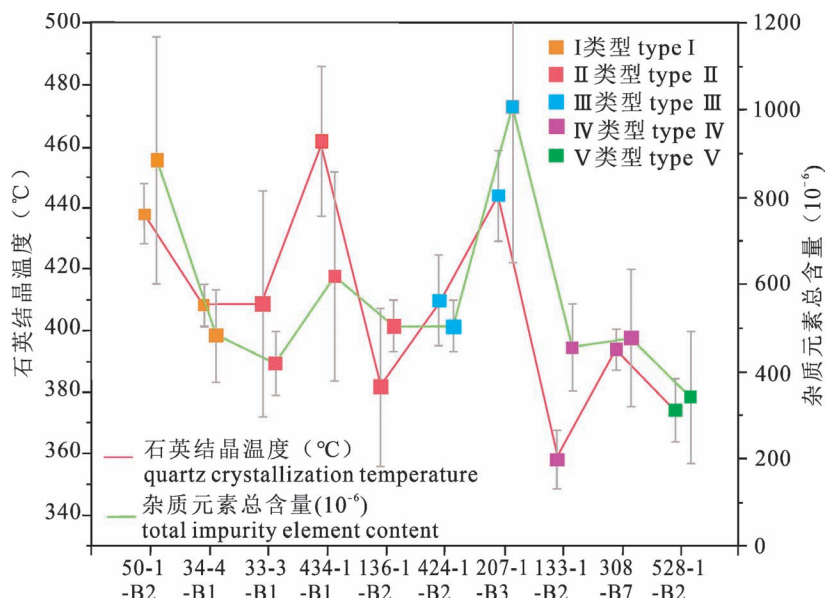


图5 不同类型伟晶岩结晶温度与石英杂质元素含量对比图

Fig. 5 Comparison diagram of crystallization temperature and impurity element content in quartz for different types of pegmatites

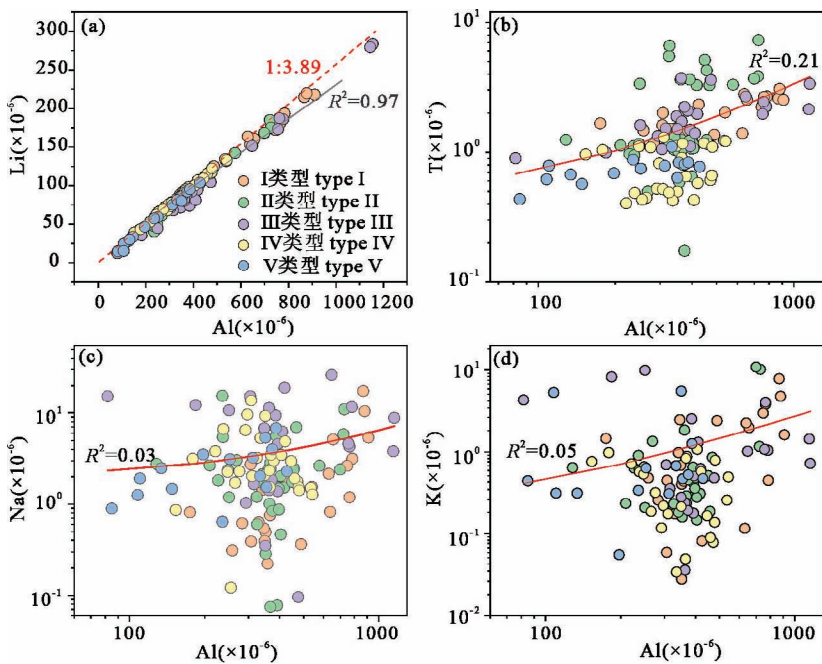


图6 伟晶岩中石英主要杂质元素相关性图

Fig. 6 Correlation diagram of the main impurity elements in the Jiajika vein quartz

2012;王九一, 2024)。晶格中的 Al 是难去除的杂质元素, Al^{3+} 可以类质同像的方式替代 Si^{4+} , 为使电荷保持平衡, 会在石英晶格中吸引 Li^+ 、 K^+ 、 Na^+ 等补偿配位离子, 将会导致当石英晶格中 Al 含量提升时, Li、K、Na 等杂质元素的含量也会随之提升; Ti 在石英矿物中一般以晶格替代或以金红石包裹体形式

存在。

Al 与 Li、Ti、K、Na 等元素含量的相关性分析见(图 6)。结果表明, Al 元素与 Li 元素有极显著的正相关($R=0.985, P<0.01$), Al 与 Ti 之间具有一定的正相关性($R=0.458$), 与 Na、K 等元素相关性差。因此, Al、Li、Ti 等元素主要以类质同像的形式存在于石英的晶格内, Na、K 等元素一部分以晶格杂质形式存在于石英, 其余主要赋存于包裹体或云母等独立矿物之中。

4.3 高纯石英潜力原料评价

高纯石英是以天然石英矿为原料, 经过提纯工艺加工获得的 SiO_2 纯度极高的石英砂产品, 但针对高纯石英的技术界定, 目前行业内还未有统一的共识。一种观点认为: SiO_2 含量 $> 99.9\%$ 的石英即可称之为高纯石英(王九一, 2021; 汪灵, 2022; 张海敏等, 2022; 王云月等, 2022), 并结合我国高纯石英产品生产及应用情况(汪灵, 2022), 按 SiO_2 纯度或产品中 Al、Li、Ti 等 13 种杂质元素总量, 将高纯石英产品划分为 4 个等级, 即高端 $SiO_2 \geq 99.998\%$ (4N8)、中高端 $SiO_2 \geq 99.995\%$ (4N5)、中端 $SiO_2 \geq 99.99\%$ (4N)、低端 $SiO_2 \geq 99.9\%$ (3N), 或以产品中 Al、Li、Ti 等 13 种杂质元素总量进行划分, 即高端 $\leq 20 \times 10^{-6}$, 中高端 $\leq 50 \times 10^{-6}$, 中端 $\leq 100 \times 10^{-6}$, 低端 $\leq 1000 \times 10^{-6}$ 等; 另一种观点是 SiO_2 含量 $> 99.99\%$ (或 99.995%), 且对杂质元素等有特定要求的石英产品(Harben, 2002; Müller et al, 2012; 张佩聪等, 2012; 张亮等, 2024; 地质矿产行业标准《高纯石英用硅质原料评价工作指南(DZ/T0467-2024)》), 这种观点通常认为高纯石英是应用于特定领域的石英。

由于对高纯石英的界定有不同认识, 因而对所研究的硅质原料是否具备高纯石英潜力原料存在分歧。汪灵(2022)以高纯石英原料的提纯加工试验结果为依据, 将高纯石英原料划分为与高纯石英砂

系列产品等级相对应的4个品级:A级矿(优质矿或优质原料,可用于提纯加工4N8的高端高纯石英砂产品);B级矿(上等矿或上等原料,可用于提纯加工4N5的中高端高纯石英砂产品);C级矿(中等矿或中等原料,可用于提纯加工4N的中端高纯石英砂产品);D级矿(下等矿或下等原料,3N的低端高纯石英砂产品);张亮等(2024)认为Al和Ti为高纯石英晶格杂质元素评价最为关键的标志性元素,通常要求天然石英矿物中 $Al < 50 \times 10^{-6}$ 和 $Ti < 10 \times 10^{-6}$;唐春花等(2023,2024)根据工业应用要求和原料适用面应更为广泛的原则,结合原矿特点,提出了适用于石英原料的评价方法,认为: SiO_2 含量 $\geq 99.995\%$,Al含量 $\leq 35 \times 10^{-6}$, $(Li+Ti)$ 含量 $\leq 10 \times 10^{-6}$ 的石英原料为超纯级别; SiO_2 含量 $\geq 99.9\%$,Al含量 $\leq 700 \times 10^{-6}$, $(Li+Ti)$ 含量 $\leq 200 \times 10^{-6}$ 的作为高纯级别。

对高纯石英潜力原料除应着重考察其杂质元素含量外,石英矿物特征、包裹体特征和类型、杂质元素赋存状态等也是确定高纯石英潜力原料的重要方面(DZ/T0467-2024^②)。笔者等着重从甲基卡矿区不同类型伟晶岩石英的微量元素特征方面,来分析其是否具备高纯石英潜力原料。

分析结果表明(表3),甲基卡矿区不同类型伟晶岩石英中对高纯石英品质影响较大的杂质元素含量($\sum_{13} = Li+B+Na+Mg+Al+K+Ca+Ti+Mn+Fe+Cu+Zn+Ge$)为 $340 \times 10^{-6} \sim 1005 \times 10^{-6}$,其他杂质元素($\sum_0 = Ba+Cs+Sb+Sn+Sr+Rb+Ga$)含量都很低($< 1 \times 10^{-6}$),扣除杂质元素,除1件样品(207-1-B3)石英 SiO_2 含量略微低于99.9%外,其余样品 SiO_2 含量为99.91~99.97%,均大于99.9%(3N),达到了低端高纯石英的标准($SiO_2 \geq 99.9\%$ (3N))(汪灵,2022)。在 SiO_2 含量 $\geq 99.9\%$ 的样品中,Al含量为 $254 \times 10^{-6} \sim 761 \times 10^{-6}$ ($\leq 700 \times 10^{-6}$), $Li+Ti$ 含量为 $6010^{-6} \sim 184 \times 10^{-6}$ ($\leq 200 \times 10^{-6}$),达到了唐春花等(2024)高纯级别石英原料标准。

Al是影响高纯石英原料品质的重要因素之一(Müller et al.,2012)。甲基卡矿区不同类型伟晶岩石英中Al含量高,为 $254 \times 10^{-6} \sim 761 \times 10^{-6}$ (平均 423×10^{-6})远高于张亮等(2024)高纯石英原料Al $< 50 \times 10^{-6}$ 的标准;高于赣西北Ta-Nb-Li白云母花岗岩矿床石英(3N)Al平均含量 289×10^{-6} ,低于Ta-Nb-Li花岗伟晶岩矿床石英(2N8)Al平均含量 873×10^{-6} (Zhang Yong et al.,2023)。不同类型伟晶岩

脉石英中Li含量高,为 $59.6 \times 10^{-6} \sim 1801 \times 10^{-6}$ (平均 101×10^{-6}),远高于赣西北Ta-Nb-Li白云母花岗岩矿床石英(3N)Li平均含量 36.02×10^{-6} ,显示出甲基卡以锂为主的稀有金属矿区的特征。除Al、Li外,Ti也是判断高纯石英矿物原料品质的重要标志物之一。Ti在石英矿物中一般以晶格替代或以金红石包裹体形式存在,由于Ti-O键非常稳定,无论是晶格间Ti还是包裹体中的含Ti矿物,均很难通过常规的选矿手段和化学提纯方式经济合理除去(马亚梦等,2022),通常高纯石英要求Ti含 $< 10 \times 10^{-6}$ (张亮等,2024;DZ/T0467-2024^②)。甲基卡不同类型伟晶岩石英中Ti含量相对较低,为 $0.53 \times 10^{-6} \sim 3.81 \times 10^{-6}$ (1.71×10^{-6}),其中IV、V中的Ti含量相对更低,为 $0.53 \times 10^{-6} \sim 1.09 \times 10^{-6}$ 。国内外优质高纯石英矿床,如美国Spruce Pine(SP)花岗伟晶岩石英(4N5)Ti平均含量为 1.73×10^{-6} ,我国东秦岭花岗伟晶岩石英(4N5)Ti平均含量为 $2.67 \times 10^{-6} \sim 9.45 \times 10^{-6}$ (Zhang Yong et al.,2023),与之相比甲基卡伟晶岩石英中Ti元素含量相对更低。

上述基于甲基卡矿区不同类型伟晶岩石英微量元素特征分析表明,伟晶岩石英中Al、Li等杂质元素含量相对较高,Ti含量低, $SiO_2 \geq 99.9\%$,达到3N级别,属于低端高纯石英原料(汪灵,2022)或高纯级别石英原料(唐春花等,2024)。

4.4 伟晶岩中石英的综合利用

甲基卡稀有金属矿区是我国规模最大的以锂为主的稀有金属矿区,也是我国唯一立项的锂能源基地,锂辉石型伟晶岩(IV)是矿区内最主要的稀有金属矿床类型,也是目前开采的工业类型。矿区 Li_2O 资源量在215万吨(付小方等,2017),目前进行工业化开采的仅134脉, Li_2O 资源量51.2万吨,已进行了近十年开采。随着对锂等稀有金属需求的强劲增加,甲基卡稀有金属矿区具有一定规模的锂矿床将被开采利用。

X03号脉是甲基卡矿区近年来发现的规模最大的以锂为主的稀有金属矿床,目前正在进行勘探,预计将开发利用。矿体 Li_2O 平均品位1.46%, Li_2O 资源量88.6万吨,矿石资源量6321万吨(付小方等,2017),按照矿体石英含量35%,矿体含有石英2171万吨。另外,甲基卡还有134号、308号、618号等矿体锂辉石矿体正在或将要开发利用,因此石英资源量是十分巨大的。

在行业标准《矿产地质勘查规范硅质原料类》(中华人民共和国自然资源部,DZ/T0207-2020^③)

技术要求中,对硅质原料矿石的 SiO_2 含量要求最高的是石英玻璃用硅质原料($\text{SiO}_2 \geq 99.95\%$),其次是器皿玻璃用硅质原料($\text{SiO}_2 > 99.9\%$)。本次研究表明,锂辉石型伟晶岩石英中的杂质元素相对较低,主要杂质元素含量(Σ_{13})为 $455 \times 10^{-6} \sim 476 \times 10^{-6}$, SiO_2 含量大于 99.95% (3N5),已经满足石英玻璃用硅质原料的要求。因此,在未来锂矿床的开采利用过程中,除对锂等稀有金属矿物的利用外,还应该高度重视对其中非金属矿物,特别是石英的综合利用。

4.5 川西地区寻找花岗伟晶岩型高纯石英原料的方向

花岗伟晶岩型高纯石英原料矿石是目前全球生产高纯石英最重要的原料(Götze, 2012)。我国在阿尔泰、秦岭、江西等地区的伟晶岩中已发现了4N5级以上伟晶岩型高纯石英原料矿石(张海敏, 2022b;唐春花, 2024; Zhang Yong et al., 2023)。在青藏高原北部的长达2800 km的松潘—甘孜锂矿链(许志琴等, 2024),分布有大量的含矿和不含矿的伟晶岩带,未来是否会是我国高纯石英原料矿石(特别是优质高纯石英4N或4N5以上)的潜在产区是一个值得关注的问题。笔者等对甲基卡矿区不同类型伟晶岩石英微量元素特征的研究,为回答这一问题提供了一定的依据,也为在川西地区寻找花岗伟晶岩型优质高纯石英原料指出了方向。

川西康定、马尔康地区是我国的松潘—甘孜锂矿链的重要组成部分,在甲基卡、可尔因、扎乌龙等地发现了大型—超大型花岗岩—伟晶岩型矿床(许志琴等, 2024),这些稀有金属矿集区具有相似的成矿地质背景及成矿过程:赋存在由核部高分异S型花岗岩和幔部中晚三叠世浊积岩组成的穹隆构造中,经历了巴罗—巴肯变质作用、含锂伟晶岩脉由花岗质岩浆的高度分异及岩浆不混溶作用形成、侵位在花岗岩体上部的伸展空间(许志琴等, 2024),伟晶岩矿化类型为LCT型(付小方等, 2017)。国外多数伟晶岩型高纯石英矿床产于太古宙—元古宙黑云母片麻岩、片岩等变质岩系中,伟晶岩类型多为NYF型,并遭受了一定程度的变质作用影响(王九一, 2021; Müller et al., 2022; Zhou Haoyang et al., 2023)。因此,根据对甲基卡稀有金属矿区不同类型伟晶岩石英中微量元素的研究,大致可以推测川西地区的可尔因、扎乌龙等地的不同类型伟晶岩石英中Al、Li等杂质元素含量较高,可能难以作为高品质高纯石英硅质原料。在这些稀有金属矿区外围的不含矿的伟晶岩,石英中的Al、Li等杂质元素含

量可能要低于矿区内的伟晶岩。基于以上认识,今后在川西地区寻找高品质的伟晶岩型高纯石英原料,应关注无稀有金属成矿、与变质作用有关的伟晶岩分布区。

笔者注意到,在与甲基卡、可尔因相邻的丹巴地区分布有片麻岩穹窿群(图1a),穹窿由新元古代混合岩化变质基底组成核部,周缘为早古生代—泥盆纪巴罗式(Barrovian)变质岩系,表现为夕线石带—蓝晶石带—十字石—石榴石带—黑云母带,伟晶岩脉主要分布于在志留系变质岩中(许志琴等, 2018)。在约800 km²的范围内发现不具稀有金属矿化的花岗伟晶岩脉4755条,其中白云母伟晶岩脉1133条。白云母花岗伟晶岩脉一般长30~150 m,厚3~7 m,最厚20余米,石英含量为30%~55%(1:20万丹巴幅)。依据伟晶岩形成的地质背景及分布特征,推测其为变质深熔作用形成的。

笔者在丹巴片麻岩穹窿周缘的4条白云母伟晶岩脉上采集了样品,在中国科学院地球化学研究所激光剥蚀微区原位分析实验室,采用LA-ICP-MS对石英的微量元素组成进行了分析。4个样品共计32个点位分析结果表明,16个杂质元素总和($\Sigma_{16} = \text{Al} + \text{Ti} + \text{Na} + \text{K} + \text{Li} + \text{Ca} + \text{Fe} + \text{B} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ni} + \text{Cr} + \text{Cu} + \text{Zn} + \text{Zr} + \text{Co}$)为 $(39.3 \sim 51.7) \times 10^{-6}$, Al+Li+Ti含量为 $(20.85 \sim 27.96) \times 10^{-6}$ (未发表资料),与东秦岭白云母花岗伟晶岩高纯石英原料(N05号脉,4N5)的Al+Li+Ti含量 24.27×10^{-6} 接近(Zhang Yong et al., 2023)。上述结果显示,在丹巴片麻岩穹窿区具有寻找高品质花岗伟晶岩型高纯石英原料的良好前景,是今后值得重点开展高纯石英原料地质找矿及科学研究的地区。

5 结论

笔者等采用微区LA-ICP-MS方法,分析了甲基卡稀有金属矿区不同类型石英中的微量元素组成及含量,对其作为高纯石英硅质原料的潜力进行了评价,得出了如下结论:

(1) 不同类型伟晶岩石英中Al、Li等微量元素含量高,主要以类质同象的形式存在于石英的晶格内,13个主要的杂质元素含量 $\Sigma_{13} = 340 \times 10^{-6} \sim 1005 \times 10^{-6}$,除1件样品外石英 $\text{SiO}_2 \geq 99.9\%$ (3N),仅达到了低端高纯石英或高纯级别石英原料标准。

(2) 锂辉石型伟晶岩是甲基卡矿区目前开采的工业矿床类型,石英中的杂质元素相对较低, SiO_2 含量 $> 99.95\%$ (3N5),已经满足石英玻璃用硅质原

料的要求石英资源量是十分巨大的,在稀有金矿资源开发中应高度重视石英的高效利用。

(3)川西地区稀有金属矿区岩浆结晶分异形成的伟晶岩脉 Al、Li 等杂质元素含量较高,难以作为高品质高纯石英硅质原料,未来寻找高品质伟晶岩型高纯石英原料应着眼于丹巴地区片麻岩穹窿区的变质深熔作用形成的白云母花岗伟晶岩。

注 释 / Note

- 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: 1~104.
- ①Tang Guofan, Wu Shengxian. 1984#. Kangding county Jiajika granitic pegmatite lithium deposit geological research Report, Sichuan Province; 1~104.
- ②中华人民共和国自然资源部. 2024. 高纯石英用硅质原料评价工作指南(DZ/T0467-2024).
- ②Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2024 #. Guideline for Evaluation of Siliceous Raw Materials for High-Purity Quartz (DZ/T 0467-2024).
- ③中华人民共和国自然资源部, 2020. 矿产地质勘查规范硅质原料类(DZ/T0207-2020).
- ③Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2020 #. Specifications for Mineral Geological Exploration of Siliceous Raw Materials; DZ/T 0207-2020.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 代鸿章,王登红,刘丽君,于扬,代晶晶,付小方. 2018. 川西甲基卡 308 号伟晶岩脉年代学和地球化学特征及其地质意义. 地球科学, 43(10): 3664~3681.
- 付小方,侯立伟,梁斌. 2017. 甲基卡式花岗伟晶岩型锂矿床成矿模式与三维勘查找矿模型. 北京: 科学出版社: 1~230.
- 韩志辉,熊欣,李建康,严清高,姜鹏飞. 2024. 川西甲基卡区域伟晶岩分异演化及锂成矿过程: 来自白云母矿物学的约束. 岩石学报, 40(2): 499~509.
- 郝雪峰,付小方,梁斌,袁简平,潘蒙,唐屹. 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.
- 侯江龙,李建康,张玉洁,李超. 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.
- 李建康,张德会,王登红,张文淮. 2008. 富氟花岗岩浆液态不混溶作用及其成岩成矿效应. 地质论评, 54(2): 175~183.
- 李建康,李鹏,严清高,王登红,任广利,丁欣. 2023. 松潘-甘孜-西昆仑花岗岩伟晶岩型稀有金属成矿带成矿规律. 中国科学: 地球科学, 53(8): 1718~1740.
- 梁斌,付小方,唐屹,潘蒙,袁简平,郝雪峰. 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.
- 马亚梦,张海敏,谭秀民,刘广学,伊跃军,刘磊. 2022. 某矿区高纯石英化学深度提纯技术研究. 矿产保护与利用, 42(5): 22~27.
- 秦克章,刘宇超,赵俊兴,赵永能,周起凤,施睿哲,朱丽群,何畅

- 通,李俊瑜,曹明坚. 2024. 花岗伟晶岩分异演化与含矿性评价——从造岩矿物组构视角. 地质学报, 98(5): 1527~1549.
- 唐春花,楼法生,潘家永,袁晶,张瑞洋,唐泉. 2023. 高纯石英用硅质原料地质勘查中的基本概念和关键技术及江西资源前景. 东华理工大学学报(自然科学版), 46(5): 437~445.
- 唐春花,楼法生,潘家永,袁晶,张勇,张瑞洋,唐泉. 2024. 江西高纯石英用硅质原料综合评价研究. 地质论评, 70(S1): 84~86.
- 汪灵. 2022. 高纯石英的概念及其原料品级划分. 矿产保护与利用, 42(5): 55~63.
- 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.
- 王九一. 2021. 全球高纯石英原料矿的资源分布与开发现状. 岩石矿物学杂志, 40(1): 131~141.
- 王九一. 2025. 印度北部某 4N8 级高纯石英原料研究及其对我国的找矿启示. 岩石矿物学杂志, 44(1): 152~166.
- 王云月,邓宇峰,詹建华,袁峰,杨治,李光惠,郝文俊. 2021. 高纯石英原料特征和矿床成因研究现状综述. 地质论评, 67(5): 1465~1477.
- 许志琴,王汝成,赵中宝,付小方. 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景. 地质学报, 92(6): 1091~1106.
- 许志琴,郑碧海,朱文斌,魏海珍,洪涛,高建国,舒良树,马绍宣,赵宇涵. 2024. 基墨里造山与松潘-甘孜锂矿链成因的探讨. 地质学报, 98(5): 1333~1357.
- 许志琴,朱文斌,郑碧海,李广伟,魏海珍,章荣清,车旭东,李伟强,王国光,高建国,闫浩瑜. 2023. 川西甲基卡伟晶岩型锂矿的“多层次穹状花岗岩席”控矿新理论——记“川西甲基卡锂矿科学钻探”创新成果. 地质学报, 97(10): 3133~3146.
- 张海敏,谭秀民,马亚梦,陈丛林,张生辉,王利,刘磊,朱黎宽,郭理想,张宏丽,刘广学. 2022. 新疆阿尔泰伟晶岩型高纯石英矿床地质特征及 4N8 级产品制备技术. 矿产保护与利用, 42(5): 1~7.
- 张海敏,张亮,刘磊,曹飞. 2022. 全球高纯石英资源开发利用现状及供需分析. 矿产保护与利用, 42(5): 49~54.
- 张亮,刘磊,朱黎宽,王红杰,原垭斌. 2024. 关于高纯石英原料矿床地质学评价方法的探讨. 岩石学报, 40(4): 1311~1326.
- 张佩聪,刘岫峰,李峻峰,邓苗,刘素田. 2012. 高纯石英矿物资源工程研究. 矿物岩石, 32(2): 38~44.
- 中华人民共和国自然资源部. 2020. 矿产地质勘查规范硅质原料类: DZ/T0207-2020. 北京: 中国标准出版社.
- Dai Hongzhang, Wang Denghong, Liu Lijun, Yu Yang, Dai Jingjing, Fu Xiaofang. 2018#. Geochronology, geochemistry and their geological significances of No. 308 pegmatite vein in the jiajika deposit, western Sichuan, China. Earth Science 43(10): 3664~3681.
- Fu Xiaofang, Hou Liwei, Liang Bin. 2017#. Metallogenic Model of the Jiajika-Type Granitic Pegmatite Lithium Deposit and 3D Exploration-Prospecting Model. Beijing: Science Press: 1~230.
- Götze J, Mückel R. 2012. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Han Zhihui, Xiong Xin, Li Jiankang, Yan Qinggao, Jiang Pengfei. 2024 #. Muscovite as a potential tool for magmatic differentiation and identifying Li mineralization in the Jiajika regional pegmatites, West Sichuan. Acta Petrologica Sinica, 40(2): 499~509.
- Hao Xuefeng, Fu Xiaofang, Liang Bin, Yuan Linping, Pan Meng, Tang Yi. 2015#. Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance. Mineral Deposits, 34(6): 1199~1208.
- Harben P W. 2002. The industrial mineral handybook - a guide to

- markets, specifications and prices, 4th edn. Industrial Mineral Information. Worcester Park; 412.
- Hou Jianglong, Li Jiankang, Zhang Yujie, Li Chao. 2018&. Li isotopic composition and its constrains on rare metal mineralization of jiajika two-mica granite, Sichuan Province. *Earth Science*, 43(6): 2042~2054.
- Larsen R B, Henderson I, Ihlen P M, Jacamon F. 2004. Distribution and petrogenetic behaviour of trace elements in granitic pegmatite quartz from South Norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(5): 615~628.
- Li Jiankang, Li Peng, Yan Qinggao, Wang Denghong, Ren Guangli, Ding Xin. 2023. Geology and mineralization of the Songpan-Ganze-West Kunlun pegmatite-type rare-metal metallogenic belt in China: An overview and synthesis. *Scientia Sinica (Terrae)*, 53(8): 1718~1740.
- Li Jiankang, Li Peng, Yan Qinggao, Wang Denghong, Ren Guangli, Ding Xin. 2023&. Geology and mineralization of the Songpan-Ganze-West Kunlun pegmatite-type rare-metal metallogenic belt in China: An overview and synthesis. *Science China Earth Sciences*, 53(8): 1718~1740.
- Li Jiankang, Zhang Dehui, Zhang Dehui, Wang Denghong, Zhang Wenhui. 2008&. Liquid immiscibility of fluorine-rich granite magma and its diagenesis and metallogeny. *Geological Review*, 54(2): 175~183.
- Liang Bin, Fu Xiaofang, Tang Yi, Pan Meng, Yuan Linping, Hao Xuefeng. 2016&. Granite geochemical characteristics in Jiajika rare metal deposit, western Sichuan. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 42~49.
- Ma Yameng, Zhang Haiqi, Tan Xiumin, Liu Guangxue, Yi Yuejun, Liu Lei. 2022&. Research on chemical deep purification technology of high-purity quartz in a mining area. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 22~27.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2020#. Specifications for Mineral Geological Exploration of Siliceous Raw Materials: DZ/T 0207-2020. Beijing; China Standards Press.
- Müller A, Wanvik J E, Ihlen P M. 2012. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway. In: *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. Berlin, Heidelberg; Springer; 71~118.
- Qin Kezhang, Liu Yuchao, Zhao Junxing, Zhao Yongneng, Zhou Qifeng, Shi Ruizhe, Zhu Liqun, He Changtong, Li Junyu, Cao Mingjian. 2024&. Indication of magma evolution and ore-bearing potential on granitic pegmatite in the view of texture-composition of rock-forming minerals. *Acta Geologica Sinica*, 98(5): 1527~1549.
- Swanson S E, Veal W B. 2012. Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the spruce pine district, north Carolina, USA. *Journal of GEOsciences*; 27~42.
- Tang Chunhua, Lou Fasheng, Pan Jiayong, Yuan Jing, Zhang Ruiyang, Tang Xiao. 2023&. Basic concepts and key technologies for geological exploration of silicon material for high-purity quartz and potential resources in Jiangxi Province. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 46(5): 437~445.
- Tang Chunhua, Lou Fasheng, Pan Jiayong, Yuan Jing, Zhang Yong, Zhang Ruiyang, Tang Xiao. 2024&. Comprehensive evaluation of siliceous materials for high purity quartz in Jiangxi Province. *Geological Review*, 70(S1): 84~86.
- Wang Denghong, Li Jiankang, Fu Xiaofang. 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.
- Wang Jiuyi. 2021&. Global high purity quartz deposits: Resources distribution and exploitation status. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 131~141.
- Wang Jiuyi. 2025&. Investigation on a 4N8 grade high purity quartz deposit from northern India; Implications for ore prospecting in China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 44(1): 152~166.
- Wang Ling. 2022&. Concept of high purity quartz and classification of its raw materials. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 55~63.
- Wang Yunyue, Deng Yufeng, Zhan Jianhua, Yuan Feng, Yang Zhi, Li Guanghui, Hao Wenjun. 2021&. Review on the research of characteristics and ore deposit genesis of high purity raw quartz. *Geological Review*, 67(5): 1465~1477.
- Wark D A, Watson E B. 2006. TitanQ: A titanium-in-quartz geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(6): 743~754.
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhao Zhongbao, Fu Xiaofang. 2018&. On the structural backgrounds of the large-scale "hard-rock type" lithium ore belts in China. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091~1106.
- Xu Zhiqin, Zheng Bihai, Zhu Wenbin, Wei Haizhen, Hong Tao, Gao Jianguo, Shu Liangshu, Ma Xuxuan, Zhao Yuhan. 2024&. The Cimmeride orogeny and the genesis of the Songpan-Ganze "lithium deposit chain". *Acta Geologica Sinica*, 98(5): 1333~1357.
- Xu Zhiqin, Zhu Wenbin, Zheng Bihai, Li Guangwei, Wei Haizhen, Zhang Rongqing, Che Xudong, Li Weiqiang, Wang Guoguang, Gao Jianguo, Yan Haoyu. 2023&. New ore-controlling theory of "multilayered domal granitic sheets" of the Jiajika pegmatite-type lithium deposit: The major discoveries of the "Jiajika Pegmatite-type Lithium Deposit Scientific Drilling Project (JSD)". *Acta Geologica Sinica*, 97(10): 3133~3146.
- Zhang Haiqi, Tan Xiumin, Ma Yameng, Chen Conglin, Zhang Shenghui, Wang Li, Liu Lei, Zhu Likuan, Guo Lixiang, Zhang Hongli, Liu Guangxue. 2022&. Geological characteristics of pegmatite-type high purity quartz in Altay, Xinjiang and preparation technology of 4N8 grade products. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 1~7.
- Zhang Haiqi, Zhang Liang, Liu Lei, Cao Fei. 2022&. Development, utilization, supply and demand of global high purity quartz resources: A systematic review and meta-analysis. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 49~54.
- Zhang Liang, Liu Lei, Zhu Likuan, Wang Hongjie, Yuan Yabin. 2024&. Discussion on the geological evaluation for high purity quartz raw material. *Acta Petrologica Sinica*, 40(4): 1311~1326.
- Zhang Liang, Liu Lei, Zhu Likuan, Wang Hongjie, Yuan Yabin. 2024. Discussion on the geological evaluation for high purity quartz raw material. *Acta Petrologica Sinica*, 40(4): 1311~1326.
- Zhang Peicong, Liu Xiufeng, Li Junfeng, Deng Miao, Liu Sutian. 2012&. Study on high-purity quartz mineral resource engineering. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 32(2): 38~44.
- Zhang Yong, Pan Jiayong, Xia Fei, Zhao Haibo, Xu Zhe, Liu Guoqi, Zhong Fujun, Zhang Xiaotian, Liu Ying, Du Gaofeng, Zhang Xia, Zhang Jianjun, Tang Chunhua. 2023. Textures and chemical compositions of muscovite and quartz: Implications for granite-hosted high-purity quartz mineralization and exploration in South China. *Ore Geology Reviews*, 161: 105635.

Quartz trace–element geochemistry in pegmatites of the west Sichuan Jiajika and its potential as high–purity raw material

HAO Xuefeng¹⁾, TANG Yi¹⁾, LIANG Bin²⁾, YANG Zhen²⁾,
PAN Meng¹⁾, WANG Yonghong²⁾, LI Qinyou²⁾, FU Xiaofang¹⁾

1) *Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey, Chengdu, 610081;*

2) *School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan, 621000*

Objective: The Jiajika rare–metal mining area is currently the largest lithium–dominated granite–pegmatite type rare–metal field discovered in China, hosting a wide range of pegmatite dike types. Granite–pegmatite type high–purity quartz (HPQ) serves as one of the most important raw materials for global HPQ production. Quartz, as the principal rock–forming mineral in pegmatites, has trace–element compositions and concentrations that are critical indicators for evaluating its potential as a granite–pegmatite type HPQ siliceous raw material. However, previous studies have scarcely addressed the trace–element geochemistry of quartz in this field.

Methods: In this study, quartz from representative pegmatite types was analyzed using in–situ LA–ICP–MS to determine trace–element concentrations and compositions, allowing evaluation of its potential as high–purity siliceous feedstock, identification of promising targets for HPQ exploration, and recommendations for the integrated utilization of quartz resources during rare–metal development.

Results: The results indicate that quartz in different pegmatite types contains relatively high concentrations of trace elements such as Al and Li ($\text{Li} = 59.6 \times 10^{-6} \sim 181 \times 10^{-6}$; $\text{Al} = 254 \times 10^{-6} \sim 672 \times 10^{-6}$), with the total concentration of 13 major impurity elements ($\Sigma 13$) ranging from 340×10^{-6} to 1005×10^{-6} . Except for one sample, quartz exhibits a SiO_2 content $\geq 99.9\%$ (3N), corresponding to the lower limit of HPQ or high–purity quartz feedstock standards. Among the five pegmatite types, the spodumene–type pegmatite, currently exploited as an industrial deposit, is characterized by relatively low impurity concentrations in its quartz, with SiO_2 content exceeding 99.95% (3N5). Consequently, the efficient utilization of this quartz should be given high priority during rare–metal resource development.

Conclusions: Pegmatites formed through magmatic differentiation in the Western Sichuan rare–metal fields generally display elevated Al and Li concentrations, reducing their suitability as high–quality HPQ siliceous feedstock. Therefore, future exploration for high–grade granite–pegmatite type HPQ should focus on muscovite granite–pegmatites of metamorphic origin in the Danba area.

Keywords: granite pegmatite; high–purity quartz (HPQ); potential evaluation; Jiajika

Acknowledgements: This work was funded by the Science and Technology Program of Sichuan Province (No. 2025YFNZH003), the Ministry of Natural Resources Project (No. ZKKJ202412), the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 24NSFSC0093), and the the Sichuan Department of Natural Resources Project (Grant No. ZDKJ–2024–003).

First author: HAO Xuefeng, born in 1972, male, holds a master’s degree and is a professor–level senior engineer. He is primarily engaged in the exploration and evaluation of rare, rare–earth, and scattered metal resources. Email: himalaya1979@163.com

Corresponding author: TANG Yi, born in 1989, male, holds a master’s degree and is a senior engineer. He mainly focuses on the survey and evaluation of critical minerals. Email: 497190800@qq.com.

Manuscript received on: 2025-09-14; Accepted on: 2025-12-20; Published online on: 2026-02-15

Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.021

Edited by: LIU Zhiqiang

