



移动阅读

罗伟, 彭静, 金廷福, 等. 2023. 川西李家沟锂多金属矿区晚三叠世花岗细晶岩脉的成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的证据[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 36–47. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09006](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09006)

LUO W, PENG J, JIN T F, et al., 2023. Petrogenesis of granite aplite in the Lijiagou lithium polymetallic ore district in western Sichuan: constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 36–47. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09006](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09006)

川西李家沟锂多金属矿区晚三叠世花岗细晶岩脉的成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的证据

罗伟¹, 彭静¹, 金廷福², 杨波³, 庞良武³

(1. 遵义师范学院工学院, 贵州 遵义 563006; 2. 贵州工程应用技术学院矿业工程学院, 贵州 毕节 551700;
3. 四川省地质矿产勘查开发局化探队, 四川 德阳 618000)

摘要: 李家沟锂多金属矿床位于松潘-甘孜褶皱造山带东南缘, 是近年来在区内发现的超大型锂多金属矿床, 矿区内广泛发育花岗细晶岩脉。本文对花岗细晶岩脉进行了全岩地球化学测试、锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析, 探讨其岩石成因及地质意义。花岗细晶岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为 200 ± 2 Ma, 属晚三叠世—早侏罗世。岩石具高硅 ($w(\text{SiO}_2) = 73.27\% \sim 75.14\%$)、富铝 ($w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 14.8\% \sim 15.25\%$)、富碱 ($w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = 4.86\% \sim 8.08\%$)、贫钙 ($w(\text{CaO}) = 0.45\% \sim 1.45\%$) 的特征, A/CNK 值均大于 1.1, 属中钾-高钾钙碱性强过铝质 S 型花岗岩。微量元素表现出 Rb、Th、U、K 的正异常和 Ba、Sr、P、Ti 相对负异常。稀土元素显示轻稀土富集、重稀土亏损及弱的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 0.81$)。岩石中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和对应的二阶模式年龄 (t_{DM2}) 较为均一, 分别为 $-6.36 \sim -3.39$ 和 $1424 \sim 1616$ Ma。研究表明, 花岗细晶岩脉形成的构造背景为松潘-甘孜洋 (古特提斯支洋) 闭合后的后碰撞造山阶段, 源岩为古老地壳变杂砂岩。结合前人研究成果, 认为锂矿化花岗伟晶岩与花岗细晶岩为同一源区不同源岩 (变泥质岩和变杂砂岩) 部分熔融的产物。

关键词: 锆石 U-Pb-Hf 同位素; S 型花岗岩; 后碰撞; 古特提斯; 李家沟锂多金属矿床; 四川可尔因地区
中图分类号: P581; P611.1+2 **文献标识码:** A

Petrogenesis of granite aplite in the Lijiagou lithium polymetallic ore district in western Sichuan: constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope

LUO Wei¹, PENG Jing¹, JIN Tingfu², YANG Bo³, PANG Liangwu³

(1. College of Engineering and Technology, Zunyi Normal University, Zunyi 563002, China; 2. College of Mining Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China; 3. Geochemical Exploration Brigade of Sichuan Provincial Geology & Mineral Resources Bureau, Deyang 618000, China)

Abstract: The Super-large Lijiagou lithium polymetallic deposit is a newly discovered deposit in the southeastern margin of Songpan-ganzi Fold Orogenic Belt and has widespread outcrops of granite aplite veins. whole-rock geochemical analysis, zircon U-Pb dating and zircon Hf isotopic analysis for granite aplite are performed to explore its petrogenesis and geological significance.

收稿日期: 2022-05-11; 改回日期: 2022-06-27; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 刘洪

作者简介: 罗伟 (1983—), 男, 博士, 副教授, 从事稀有金属矿床的勘查与研究工作, E-mail: luowei663840@163.com

资助项目: 贵州省省级科技计划项目 (黔科合基础-ZK[2021]一般 204)、贵州省教育厅项目 (黔教合 KY 字 [2020]100)、遵义师范学院项目 (遵师 BS[2020]5 号、遵师 XM[2020]1 号-01)、毕节市科学技术联合基金项目 (毕科合字 [2019]22 号) 联合资助

Zircons yielded weighted mean U-Pb age of 200 ± 2 Ma for granite aplite, indicating that it was emplaced in the Late Triassic to Early Jurassic. The rocks exhibit high SiO_2 concentration (73.27%~75.14%), high Al_2O_3 concentration (14.8%~15.25%), high total alkali concentration (4.86%~8.08%) and low CaO concentration (0.45%~1.45%) with A/CNK ratios >1.1 , which are defined as median-K to high-K calc-alkaline strongly peraluminous S-type granites. Trace elements of the granite aplite show positive anomalies for Rb, Th, U, K and relative negative anomalies for Ba, Sr, P, Ti. The granite aplite display enrichment of LREE, depletion of HREE, and weak negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.68\sim0.81$). zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from -6.36 to -3.39 with t_{DM2} varying from 1 424 Ma to 1 616 Ma. The study shows that the granite aplite veins were formed in the post-collision orogenic stage after the closure of the Songpan-Ganzi ocean (a branch of the Paleo-Tethys Ocean), and the source rocks are the ancient crustal meta-greywacke. Combined with the previous research results, it is considered that the lithium mineralized granitic pegmatites and the granite aplites are the products of partial melting of different source rocks (meta-argillite vs meta-greywacke) in the same source area.

Key words: zircon U-Pb-Hf isotopes; S-type granite; post-collisional; paleotethys; Lijiangou Li polymetallic deposit; Keeryin area in Sichuan

0 引言

李家沟锂多金属矿床位于松潘-甘孜褶皱造山带东南,四川西部(以下简称川西)的可尔因地区,是近年来新发现的超大型锂多金属矿床(古城会, 2014; 罗伟等, 2021),区域上与甲基卡、扎乌龙、大红柳滩具相似的地质地球化学特征及形成时代(Yan et al., 2020)。前人围绕可尔因地区稀有金属矿床的形成时代、成矿动力学背景、与可尔因复式花岗岩体的关系等方面进行了一定研究,指出矿床形成于晚三叠世—早侏罗世(211~199 Ma)(Fei et al., 2018, 2020; 邓运等, 2018; 费光春等, 2020; 许家斌等, 2020; 罗伟等, 2022a),与花岗片麻岩穹隆构造密切相关(许志琴等, 2018, 2019; Zhao et al., 2018; Xu et al., 2020; Zheng et al., 2020)。但对稀有金属矿床的成因也存在花岗岩浆分异作用(廖远安等和姚学良, 1992)和深熔作用(Fei et al., 2020)的不同认识。李家沟矿区内发育大量花岗细晶岩脉,其形成时代、成因尚不明确。另一方面,作为古特斯特构造域的重要组成部分,可尔因地区构造演化复杂,其在晚三叠世至早侏罗世究竟是处于后碰撞(De Sigoyer et al., 2014)还是俯冲(Deschamps et al., 2017)构造背景也存在争议。

本文对李家沟矿区内花岗细晶脉开展了全岩地球化学、锆石 U-Pb 同位素测年和 Hf 同位素测试,探讨了其侵位时代、成因及构造背景,在此基础上,结合前人研究成果,探讨了其与李家沟锂多金属矿床的关系,从而加深对可尔因地区构造演化及锂多金属矿床成矿机制的理解。

1 地质背景

松潘-甘孜褶皱造山带位于青藏高原东部,以玛沁断裂带、龙门山断裂带和金沙江缝合带分别与华北陆块、扬子陆块、羌塘-昌都陆块相邻(图 1a),呈一倒三角形展布,出露面积约 $2 \times 10^5 \text{ km}^2$,主要由发育一系列“西康式”褶皱的中—上三叠统西康群复理石建造(盖层:厚 5~15 km,岩性主要为变砂岩、板岩)组成。在该带南部的丹巴、理县零星出露有新元古代花岗岩、花岗混合岩、片麻岩结晶基底(Zhou et al., 2006; Roger et al., 2010)。该造山带见大量侵位时代为晚三叠纪至早侏罗纪的 I 型、A 型、S 型花岗岩(De Sigoyer et al., 2014; Deschamps et al., 2017)。

研究区位于松潘-甘孜褶皱造山带东部中段的可尔因地区(图 1a)。区内出露中—上三叠统西康群,岩性为变砂岩、板岩、角岩和片岩。可尔因复式花岗岩体呈“Y”字形,东西长约 33 km,南北宽约 15 km,侵位时代为 219~202 Ma(Deschamps et al., 2017; Fei et al., 2020; 罗伟等, 2022a),主要由黑云母二长花岗岩、二云母花岗岩、黑云母花岗岩、白云母花岗岩和黑云母钾长花岗岩组成(图 1b),构成了可尔因穹隆构造的核部(Zhao et al., 2018; 许志琴等, 2018, 2019; Xu et al., 2020)。太阳河中性岩体位于可尔因复式岩体的南西部,呈北东—南西展布,出露面积约 70 km^2 ,主要由二长岩和闪长岩组成,形成时代为 205 Ma(Yuan et al., 2010)。区内发育近东西走向的“西康式”褶皱和北东—南西向的走滑断层。

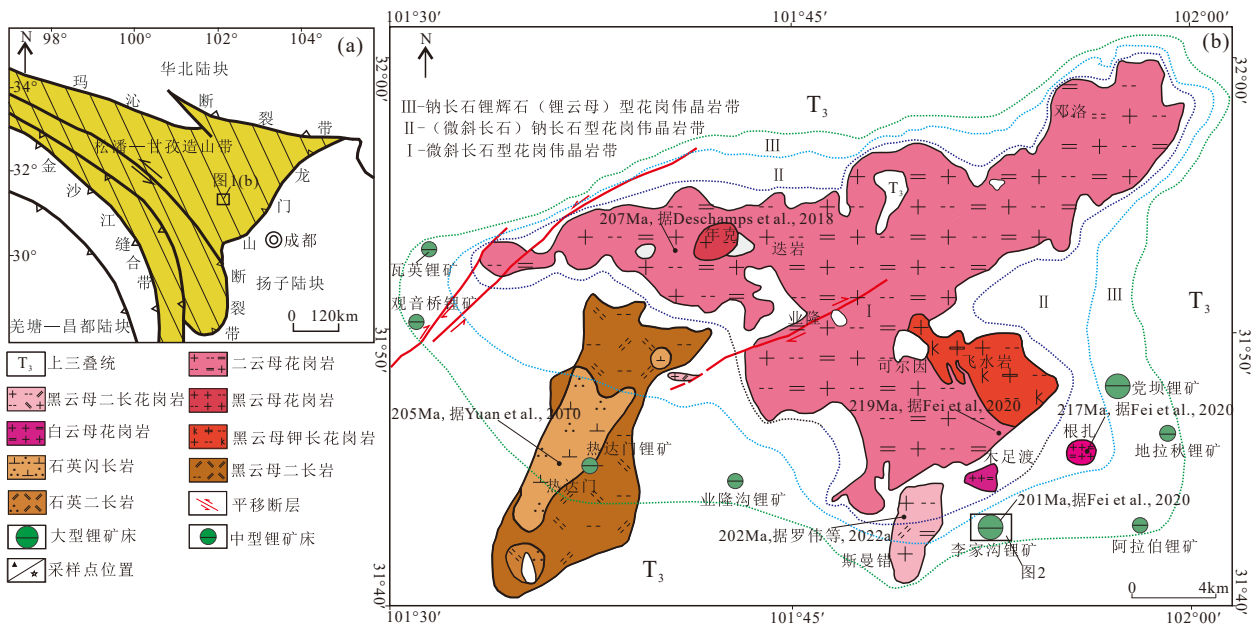


图1 松潘-甘孜褶皱造山带构造位置 (a) 及可尔因地区地质略图 (b) (据罗伟等, 2022b 修改)

Fig. 1 Tectonic map of Songpan-ganzi Fold Orogenic Belt (a) and geological sketch of Keeryin area (b) (modified after Luo et al., 2022b)

可尔因地区围绕可尔因复式花岗岩体发育有大量花岗伟晶岩脉体, 岩体从内向外(最远约 8 km), 花岗伟晶岩大致可分为三个带(古城会, 2014): 微斜长石型伟晶岩带 (I)、(微斜长石) 钠长石型伟晶岩带 (II) 和钠长石锂辉石(锂云母)型伟晶岩带 (III)。锂多金属矿床产于 III 带内, 其中超大型锂多金属矿床 2 处(党坝和李家沟)、大型锂多金属矿床 1 处(业隆沟)、中型锂多金属矿床 5 处(地拉秋、阿拉伯、热达门、观音桥和瓦英)(图 1b)。

2 矿区地质

李家沟锂多金属矿床位于可尔因复式花岗岩体东南(图 1b)。矿区出露第四系(Q_4)、上三叠统侏倭组(T_3zw)地层(图 2), 主要岩性为(含)红柱石、堇青石石英角岩、石英片岩以及二云母片岩。

矿区内花岗伟晶岩脉呈脉状、透镜状产出(图 2), 主要有钠长石花岗伟晶岩(无矿花岗伟晶岩)和锂辉石钠长石花岗伟晶岩(含矿花岗伟晶岩)两类。无矿花岗伟晶岩呈灰白色, 伟晶结构, 块状构造, 主要由石英(30%~35%)、钠长石(45%~50%)组成, 含少量微斜长石(5%~10%)、锂辉石(0~5%)和白云母(2%~5%)。含矿花岗伟晶岩呈灰白色, 伟晶结构, 块状构造, 主要由石英(30%~35%)、钠长石(30%~35%)和锂辉石(20%~25%)组成, 含少

量微斜长石(5%~10%)和白云母(2%~5%)。

含矿花岗伟晶岩几乎全脉 Li 矿化, 伴生 Be-Nb-Ta-Sn 矿化。区内共发现有 16 条工业矿体, 呈脉状或瘤状产出, 长 200~2 000 m, 厚 14~125 m。Li₂O 平均品位 1%~1.5%, 探明 Li₂O 资源量超过 50 万吨(古城会, 2014; 罗伟等, 2021)。

花岗细晶岩脉分布于矿区东部, 呈不规则脉状, 北东向或近南北向展布(图 2), 宽数 cm 至数 m 不等, 延伸数十 cm 至 200 m。花岗细晶岩脉不含矿, 与含矿花岗伟晶岩为侵入接触关系, 接触界限清晰, 常被含矿花岗伟晶岩穿插(图 2、图 3a)。花岗细晶岩呈灰白色, 块状构造, 细晶结构(0.2~0.8 mm), 主要由微斜长石(40%)、石英(35%)和斜长石(20%)组成, 次为黑云母(3%)、白云母(2%)(图 3b, c), 副矿物为磁铁矿、锆石、黝帘石, 次生矿物为绿泥石。

3 样品采集及测试方法

4 件花岗细晶岩样品采自李家沟矿区北西的花岗细晶岩脉中(图 2)。对所有样品均进行了野外及手标本观察、薄片鉴定和全岩主量、微量元素分析, 对其中的 1 件样品(xj-01)进行了锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析。

研究样品锆石 U-Pb 定年及原位 Lu-Hf 同位素测试均在诚谱检测技术有限公司完成。锆石 U-Pb

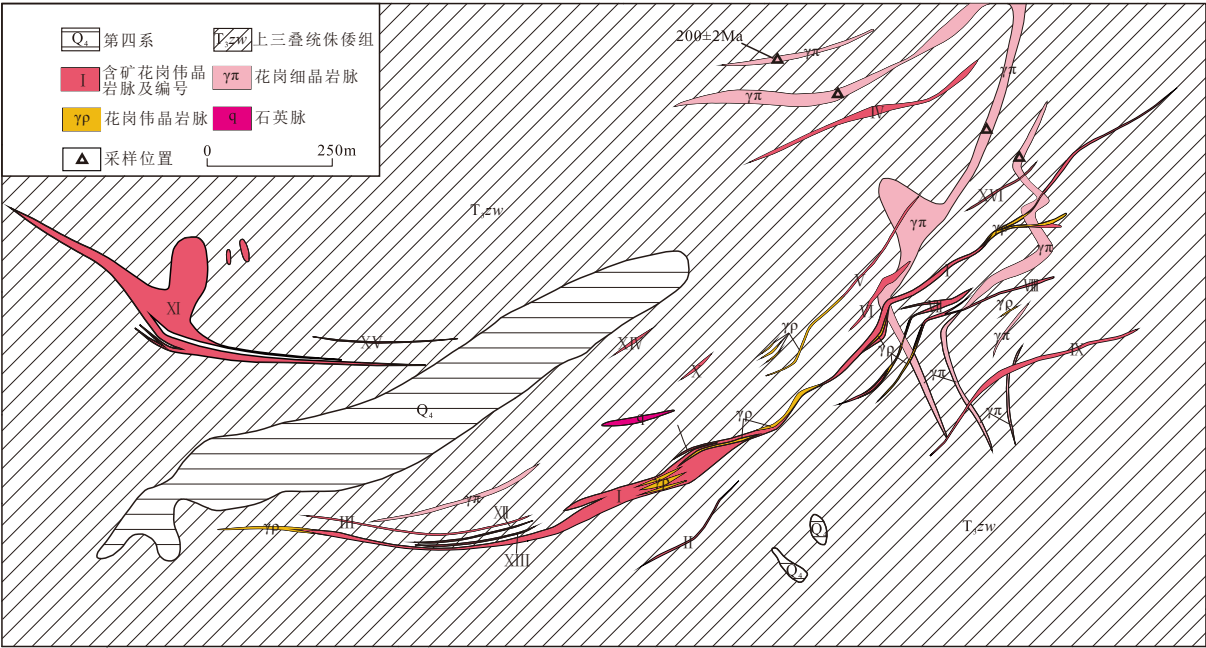
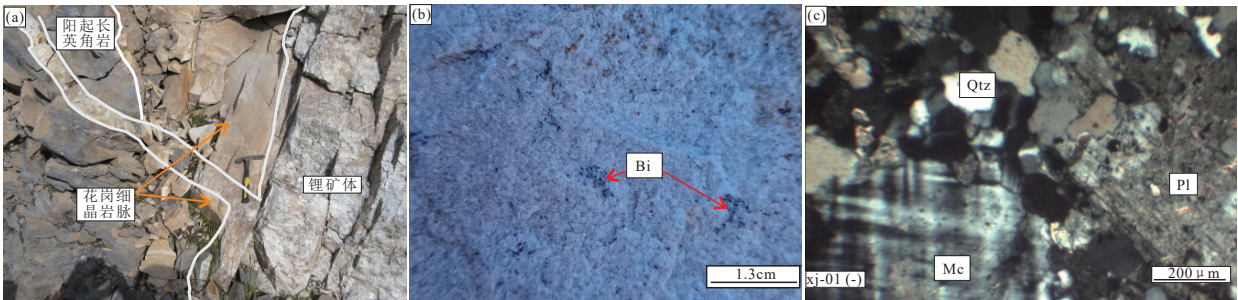


图 2 李家沟矿区地质图 (据罗伟等, 2021 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of Lijiagou ore district (modified after Luo et al., 2021)



Mc—微斜长石; Pl—斜长石; Qtz—石英; Bi—黑云母。

图 3 李家沟矿区花岗细晶岩的野外 (a, b) 及镜下特征 (c)

Fig. 3 Field (a, b) and microscopic (c) of granite aplite

定年采用 LA-ICP-MS 完成, 实验中采用 NWR193 型 ArF 准分子激光器进行剥蚀取样, PlasmaQuant MS elite 四级杆型 ICP-MS 测试离子信号强度。实验中以锆石 Plesovice (Sláma et al., 2008) 作为外标样, 锆石 SA01 (Huang et al., 2020) 为监控样, 分析步骤详见侯可军等 (2009)。本次分析采用的激光束斑为 25 μm 。分析数据处理采用 Glitter(ver4.0) 处理, U-Pb 协和图的绘制采用 Isoplot4.15 软件 (Ludwig, 2003)。锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在 U-Pb 定年相同或靠近点位开展, 采用带有 193 nm 激光的 LA-MC-ICP-MS 完成, 激光剥蚀系统为 RESOLUTION LR, MC-ICP-MS 为 Nu Plasma II。详细

的分析流程见 Yuan et al. (2008)。测试束斑直径为 50 μm , 每 5 个测点添加 1 个 GJ-1 锆石标样 (Morel et al., 2008) 进行监控。

主量、微量元素分析在廊坊市诚信地质服务有限公司完成。主量元素中 FeO 采用重铬酸钾容量法分析, 其余元素采用 PE 5300V ICP-OES 测定, 测试精度优于 2%。微量元素采用 Aglient 7700e ICP-MS 分析, 分析精度优于 5%。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

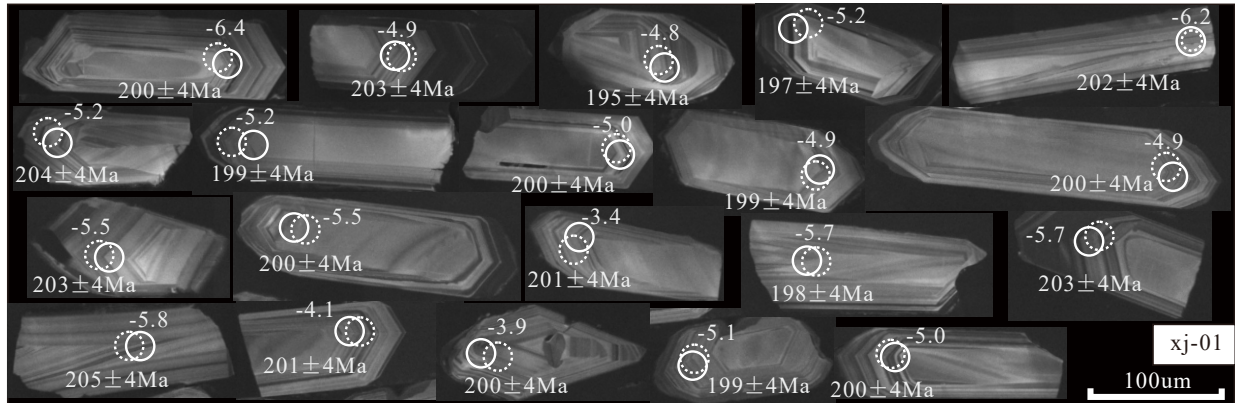
花岗细晶岩(xj-01)中锆石多呈自形长柱状,

其长在 100~210 μm 之间, 宽在 35~55 μm 之间。阴极发光(CL)图像(图 4)显示锆石中发育典型的振荡环带结构。选择分析的 20 粒锆石, 其 Th 含量为 $29\times 10^{-6}\sim 354\times 10^{-6}$, U 含量 $274\times 10^{-6}\sim 1813\times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.09~0.45(表 1)。锆石结构及 Th/U 比值指示其为岩浆成因(Wu and Zheng, 2004)。20 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄区间为 195~205 Ma, 加权

平均年龄为 200 ± 2 Ma(MSWD=0.35, $n=20$, 图 5)。

4.2 锆石 Hf 同位素

对上述 20 粒已测年的锆石进行了 Lu-Hf 同位素分析(表 2)。测试锆石的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化较小(介于 0.282 481~0.282 563 4, 平均值为 0.282 515), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值(介于 -6.36~-3.39, 平均值为 -5.11), 其对应的一阶段模式年龄(t_{DM})为 952~



实线圈代表 U-Pb 测年位置点, 虚线圈代表 Hf 同位素分析点。

图 4 李家沟矿区花岗细晶岩(xj-01) 锆石阴极发光(CL) 图像

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from granite aplite (xj-01) in Lijiagou ore district

表 1 李家沟矿区花岗细晶岩(xj-01) 中锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon U-Pb dating results of granite aplite (xj-01) in Lijiagou ore district

测点号	Pb	Th	U	Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	(×10 ⁻⁶)				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ Pb	1σ
1	123	109	942	0.12	0.049 11	0.001 04	0.212 83	0.004 71	0.031 53	0.000 67	153	49	196	4	200	4
2	62	88	464	0.19	0.049 41	0.001 1	0.217 22	0.005 05	0.031 98	0.000 68	168	51	200	4	203	4
3	84	112	662	0.17	0.048 91	0.001 05	0.206 27	0.004 62	0.030 68	0.000 65	143	50	190	4	195	4
4	88	135	630	0.21	0.049 84	0.001 09	0.212 68	0.004 83	0.031 03	0.000 65	188	50	196	4	197	4
5	61	196	439	0.45	0.051 13	0.001 13	0.223 98	0.005 1	0.031 86	0.000 67	247	50	205	4	202	4
6	87	199	637	0.31	0.047 98	0.001 01	0.212 3	0.004 6	0.032 17	0.000 67	97	50	196	4	204	4
7	60	116	441	0.26	0.050 43	0.001 09	0.217 86	0.004 84	0.031 4	0.000 65	215	50	200	4	199	4
8	69	152	525	0.29	0.052	0.001 13	0.225 06	0.005 01	0.031 45	0.000 65	286	49	206	4	200	4
9	96	125	693	0.18	0.048 56	0.001 03	0.209 35	0.004 54	0.031 33	0.000 65	127	49	193	4	199	4
10	256	354	1813	0.2	0.052 33	0.001 06	0.226 44	0.004 68	0.031 44	0.000 65	300	46	207	4	200	4
11	38	57	274	0.21	0.049 6	0.001 51	0.218 32	0.006 66	0.031 96	0.000 65	176	70	201	6	203	4
12	86	184	647	0.28	0.052 08	0.001 14	0.226 27	0.004 95	0.031 54	0.000 64	289	49	207	4	200	4
13	75	177	559	0.32	0.052 28	0.001 28	0.227 74	0.005 58	0.031 62	0.000 64	298	55	208	5	201	4
14	74	158	502	0.31	0.046 59	0.001 47	0.200 3	0.006 23	0.031 2	0.000 64	28	74	185	5	198	4
15	48	29	337	0.09	0.047 9	0.001 25	0.213 35	0.005 51	0.032 32	0.000 65	93	62	196	5	205	4
16	58	77	414	0.19	0.051 46	0.001 21	0.222 78	0.005 15	0.031 4	0.000 63	262	53	204	4	199	4
17	72	126	544	0.23	0.050 16	0.001 21	0.218 85	0.005 21	0.031 64	0.000 63	203	55	201	4	201	4
18	49	93	346	0.27	0.051 39	0.001 19	0.222 91	0.005 05	0.031 46	0.000 62	258	52	204	4	200	4
19	132	136	959	0.14	0.047 95	0.001 05	0.211 06	0.004 52	0.031 91	0.000 63	96	52	194	4	203	4
20	72	119	525	0.23	0.052 18	0.001 16	0.227 02	0.004 95	0.031 54	0.000 62	293	50	208	4	200	4

1 074 Ma, 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1 424~1 616 Ma。

4.3 全岩地球化学

花岗细晶岩全岩主量、微量和稀土元素分析结果见表 3。研究样品具如下特征: (1)富硅, SiO_2 含量 73.27%~75.14%, 平均值为 74.21%, 在 TAS 图解(图 6a)投到了花岗岩区; (2)富碱, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为 4.86%~8.08%, 平均值为 6.77%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.64~1.49, 在 SiO_2 - K_2O 图解(图 6b)投到了中钾钙碱性和高钾钙碱性区域; (3)高铝, Al_2O_3 含量为 14.8%~15.25%, 平均值为 14.96%, A/CNK 值为 1.22~1.59, 在 A/CNK-A/NK 图解(图 6c)上投到强过铝质区; (4)贫钙, CaO 含量为 0.45%~1.45%。计算得到的花岗细晶岩锆石饱和温度为 719~767°C, 平均 738°C。

研究样品 ΣREE 值为 73.75×10^{-6} ~ 78.71×10^{-6} , 平均值为 76.51×10^{-6} 。球粒陨石标准化稀土元素配分型式图(图 7a)显示相对富集轻稀土, 亏损重稀土的特征($(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 14.03~17.3, 平均为 15.84), 具弱的负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.68$ ~ 0.81 , 平均为 0.76)。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 7b), 花岗细晶岩相对富集 Rb、Th、U、K, 相对亏损 Ba、Sr、P、Ti。

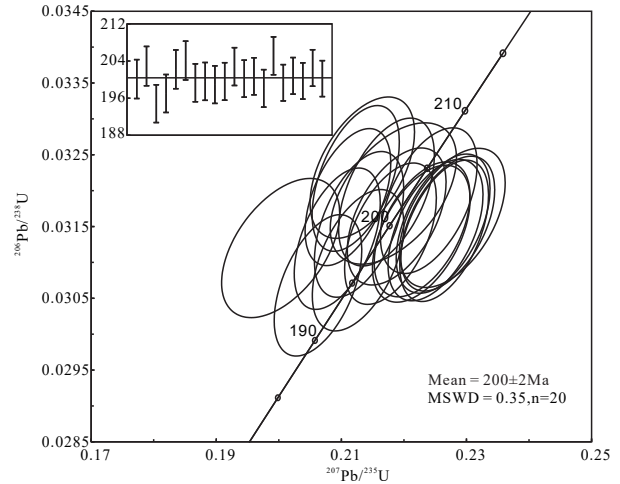


图 5 李家沟矿区花岗细晶岩中锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 5 Concordia diagram for U-Pb ages of zircons from granite aplite in Lijiagou ore district

表 2 李家沟矿区花岗细晶岩 (xj-01) 锆石 Hf 同位素数据

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of granite aplite (xj-01) in Lijiagou ore district

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	f_{LuHf}
1	0.282 481	0.000 017	0.014 354	0.000 672	0.000 439	0.000 019	0.282 479	-10.75	-6.36	1 074	1 611	-0.99
2	0.282 521	0.000 020	0.007 770	0.000 798	0.000 220	0.000 022	0.282 520	-9.34	-4.87	1 013	1 519	-0.99
3	0.282 526	0.000 018	0.008 295	0.000 204	0.000 245	0.000 007	0.282 526	-9.14	-4.85	1 006	1 512	-0.99
4	0.282 516	0.000 023	0.004 718	0.000 318	0.000 134	0.000 010	0.282 515	-9.53	-5.17	1 018	1 533	-1.00
5	0.282 484	0.000 018	0.010 793	0.000 542	0.000 299	0.000 015	0.282 483	-10.63	-6.18	1 066	1 601	-0.99
6	0.282 510	0.000 018	0.006 345	0.000 228	0.000 179	0.000 006	0.282 509	-9.74	-5.23	1 028	1 543	-0.99
7	0.282 514	0.000 021	0.005 888	0.000 196	0.000 162	0.000 006	0.282 514	-9.57	-5.16	1 021	1 535	-1.00
8	0.282 520	0.000 017	0.004 497	0.000 238	0.000 122	0.000 006	0.282 519	-9.37	-4.96	1 012	1 522	-1.00
9	0.282 523	0.000 020	0.007 043	0.000 043	0.000 211	0.000 003	0.282 522	-9.28	-4.89	1 011	1 517	-0.99
10	0.282 521	0.000 018	0.013 601	0.000 494	0.000 394	0.000 013	0.282 519	-9.34	-4.96	1 018	1 522	-0.99
11	0.282 503	0.000 018	0.009 039	0.000 236	0.000 313	0.000 015	0.282 502	-9.96	-5.50	1 040	1 559	-0.99
12	0.282 504	0.000 023	0.010 731	0.000 278	0.000 308	0.000 008	0.282 503	-9.93	-5.53	1 039	1 559	-0.99
13	0.282 563	0.000 022	0.003 525	0.000 136	0.000 094	0.000 003	0.282 563	-7.84	-3.39	952	1 424	-1.00
14	0.282 500	0.000 017	0.008 631	0.000 600	0.000 248	0.000 019	0.282 499	-10.07	-5.70	1 042	1 568	-0.99
15	0.282 493	0.000 018	0.007 729	0.000 204	0.000 232	0.000 005	0.282 492	-10.34	-5.81	1 052	1 580	-0.99
16	0.282 517	0.000 018	0.006 225	0.000 157	0.000 187	0.000 005	0.282 516	-9.48	-5.07	1 018	1 529	-0.99
17	0.282 545	0.000 018	0.010 369	0.001 418	0.000 294	0.000 036	0.282 543	-8.50	-4.08	983	1 468	-0.99
18	0.282 550	0.000 021	0.005 236	0.000 076	0.000 142	0.000 001	0.282 549	-8.31	-3.90	971	1 456	-1.00
19	0.282 499	0.000 020	0.010 168	0.000 750	0.000 300	0.000 022	0.282 497	-10.13	-5.67	1 046	1 569	-0.99
20	0.282 521	0.000 018	0.004 240	0.000 108	0.000 112	0.000 003	0.282 520	-9.35	-4.91	1 011	1 520	-1.00

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)=\frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{样}}-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}}{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}}\times 10\,000$; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=\frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{样}}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{样}}\times(e^{\lambda t}-1)}{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}\times(e^{\lambda t}-1)}\times 10\,000$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i=(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{样}}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{样}}\times(e^{\lambda t}-1)$; $t_{\text{DM2}}=t_{\text{DM}}-(t_{\text{DM}}-t)(f_{\text{CC}}-f_{\text{LuHf}})/(f_{\text{CC}}-f_{\text{DM}})$; $f_{\text{LuHf}}=\frac{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{样}}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}}$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.033\,6$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}=0.282\,785$ (Bouvier et al., 2008); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.038\,4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.283\,25$ (Griffin et al., 2000); $f_{\text{CC}}=-0.55$, $f_{\text{DM}}=0.16$, $\lambda=1.867\times 10^{-11}\text{y}^{-1}$ (Söderlund et al., 2004)。

表 3 李家沟矿区花岗细晶岩的主量 (%) 及微量 (10^{-6}) 分析结果表
Table 3 The major (%) and trace (10^{-6}) element data for granite aplite in Lijiagou ore district

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	C(刚玉)	A/CNK	Ge
xj-01	73.27	0.11	14.8	0.33	0.81	0.03	0.2	0.89	3.22	4.79	0.04	1.29	99.78	2.81	1.22	1.53
xj-02	73.71	0.12	14.9	0.55	0.6	0.03	0.24	0.45	3.51	4.57	0.04	1.06	99.78	3.48	1.29	1.48
xj-03	75.14	0.1	15.25	0.36	0.67	0.03	0.18	1.45	2.97	1.89	0.03	1.75	99.82	5.85	1.59	1.61
xj-04	74.71	0.11	14.89	0.31	0.79	0.05	0.18	0.98	3.68	2.46	0.05	1.39	99.6	4.57	1.42	1.69
样号	As	Be	Li	Sc	Rb	Sr	Y	Zr	Ba	Th	U	V	Cr	Co	Ni	Cu
xj-01	82.6	5.38	231.5	3.23	284	120	9.38	58.53	336.02	11.29	2.27	5.61	12.01	1.01	2.69	2.73
xj-02	75.21	3.92	81.2	3.21	248	131	9.63	71.65	654.15	12.49	4.4	6.21	12.25	2.95	6.55	4.58
xj-03	80.03	8.34	50	3.57	110	134	10.58	81.52	286.44	11.19	4.31	6.15	11.18	1.1	3.71	10.42
xj-04	82.1	17.06	948.7	3.42	793	112	9.71	55.14	310.3	11.44	2.39	5.65	11.33	1.16	2.64	2.6
样号	Ga	Nb	Mo	Cd	In	Sn	Sb	Te	Cs	Hf	Ta	W	Pb	Bi	La	Ce
xj-01	21.64	21.57	0.08	0.01	0.1	13.71	0.17	0.01	23.16	2.75	8.15	1.91	58.57	1.4	17.36	28.46
xj-02	21.76	18.97	0.12	0.18	0.08	9.12	0.09	0.03	14.5	2.83	3.94	1.57	58.35	1.39	17.55	32.59
xj-03	22.79	18.14	0.34	0.06	0.11	19.11	0.05	0.02	5.97	3.31	3.78	1.79	53.14	1.73	17.48	27.99
xj-04	22.07	17.95	0.11	0.13	0.3	80.55	0.16	0.01	243.22	2.24	4.09	7.58	31.93	0.9	18.99	30.58
样号	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Gd	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	(La/Yb) _N	δEu	T _{zr} (°C)
xj-01	3.49	13.18	3.32	0.54	0.44	2.88	2.01	0.32	0.82	0.11	0.72	0.1	73.75	16.26	0.78	719
xj-02	3.6	13.44	3.43	0.57	0.43	2.93	2.01	0.33	0.83	0.13	0.75	0.1	78.69	15.78	0.81	740
xj-03	3.41	13.58	3.53	0.55	0.46	3.29	2.22	0.36	0.91	0.13	0.84	0.12	74.87	14.03	0.75	767
xj-04	3.62	13.85	3.49	0.49	0.44	2.98	2.12	0.34	0.85	0.12	0.74	0.1	78.71	17.3	0.68	727

注：Zr饱和温度(T_z)计算方法据Watson and Harrison (2005)

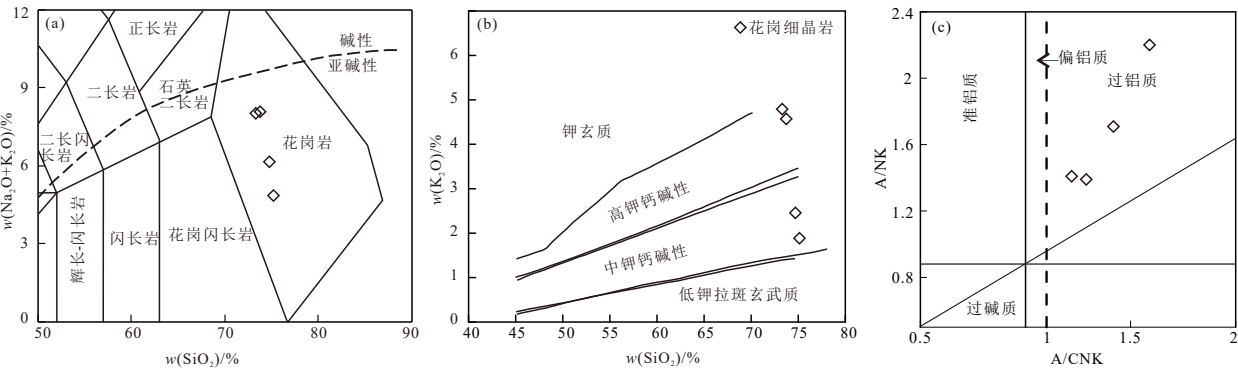


图 6 李家沟矿区花岗细晶岩分类图解 (底图据 Middlemost, 1994; Maniar and Piccoli, 1989; Rickwood, 1989)

Fig. 6 Classification diagram of granite aplite in Lijiagou ore district (after Middlemost, 1994; Maniar and Piccoli, 1989; Rickwood, 1989)

5 讨论

5.1 侵位时代

Fei et al.(2020)采用 LA-ICP-MS U-Pb 定年的方法获得李家沟矿区 I 号含矿花岗伟晶岩锡石 U-Pb 年龄为 211.4 Ma, 铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 211.1 Ma, 锆石 U-Pb 年龄为 200.1 Ma。费光春等(2020)研究指出, 党坝矿区Ⅷ号含矿花岗伟晶岩锡石 U-Pb 年龄为 208.1~199.3 Ma。以上 U-Pb 年龄数据表明,

可尔因地区含矿花岗伟晶岩形成于 211.4~199.3 Ma。本文获得的花岗细晶岩锆石 U-Pb 年龄为 (200±2) Ma, 为晚三叠世—早侏罗世, 与可尔因地区含矿花岗伟晶岩侵位结束年龄一致, 代表该地区稀有金属成矿作用的结束时限为早侏罗世早期。

5.2 岩石成因与源区判别

花岗细晶岩样品的 FeO^T/MgO (4.5~5.9, 平均 5.4)比值低, 与 A 型花岗岩富铁($FeO^T/MgO>10$, Whalen et al., 1987)的特征明显不同。其次, 花岗

细晶岩的 $Zr+Nb+Ce+Y$ 值为 $113.38 \times 10^{-6} \sim 138.23 \times 10^{-6}$, 平均为 125.60×10^{-6} , 同样低于 Whalen et al. (1987) 建议的典型 A 型花岗岩下限值 (350×10^{-6}), 在相应图解上样品均投到了非 A 型花岗岩区 (图 8a、b)。因此, 研究的花岗细晶岩不属 A 型花岗岩。再者, 花岗细晶岩与 M 型花岗岩所具典型的正 Eu 异常以及长石矿物仅含斜长石的特征 (Whalen et al., 1987) 也不同, 因此, 花岗细晶岩也不属 M 型花岗岩。

研究的花岗细晶岩样品中含少量白云母; SiO_2 含量高 ($73.27\% \sim 75.14\%$); CIPW 标准矿物刚玉分子均 >1 ($2.81 \sim 5.85$); A/CNK 值均 >1.1 ($1.22 \sim 1.59$); CaO 含量均 $<3.7\%$ ($0.45\% \sim 1.45\%$); 在 TiO_2-Zr 图 (图 8c) 上投到了 S 型花岗岩区; 前文计算得到的花岗细晶岩全岩锆饱和温度为 $719 \sim 767^\circ C$ (平均 $738^\circ C$), 位于 S 型花岗岩形成温度范围内 ($600 \sim 850^\circ C$), 低于 I 型花岗岩形成温度 ($>900^\circ C$) (张旗

等, 2007; 刘洪等, 2016)。综上, 认为研究的花岗细晶岩为强过铝质 S 型花岗岩。

研究表明 S 型花岗岩的源岩为变沉积岩 (变泥质岩或变杂砂岩) (Sylvester, 1998)。研究样品的 $(Na_2O+K_2O)/(MgO+FeO^T+TiO_2)$ 比值、molar K_2O/Na_2O 比值较低, 而 molar $CaO/(MgO+FeO^T)$ 比值却较高, 与变杂砂岩源岩部分熔融形成的花岗质岩浆特征类似, 在相应的图解上投到了变杂砂岩区 (图 9a、b)。用 $Rb/Sr-Rb/Ba$ 图解 (图 9c) 进一步判别, 得出相似的结论 (除 1 件样品, 可能其源岩黏土成分含量相对较高, 投到了分界线附近外)。研究样品的 $Al_2O_3/TiO_2 > 100$ ($124.17 \sim 152.5$), 表明源岩熔融时的温度较低 ($<875^\circ C$) (Sylvester, 1998)。

花岗细晶岩样品具 Rb 、 Th 、 K 的正异常和 Sr 、 P 、 Ti 负异常, 指示其源区为古老地壳 (He et al., 2016)。

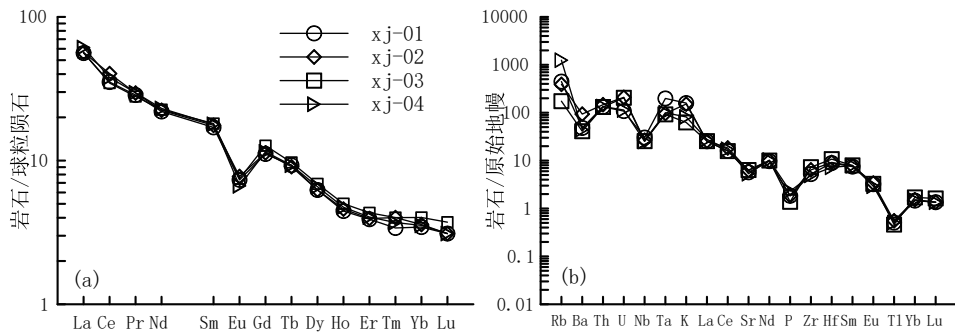
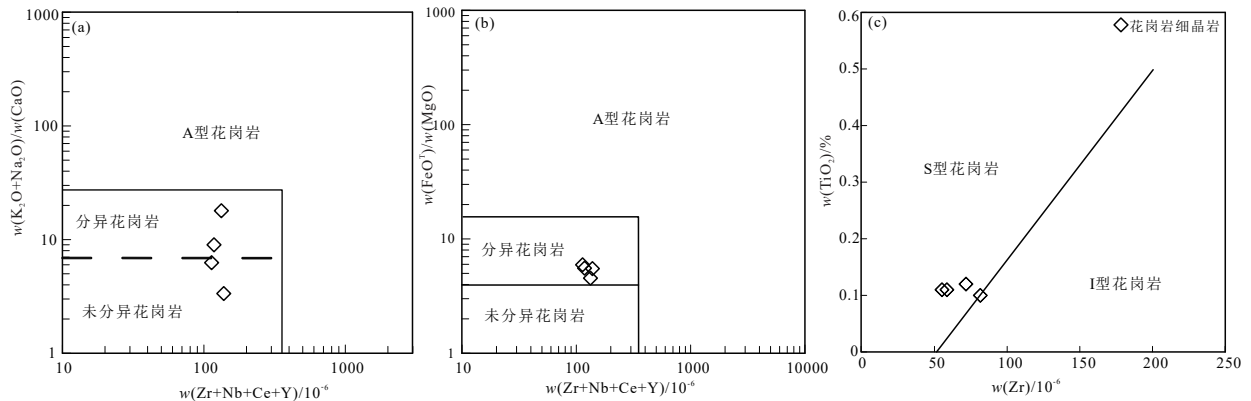


图 7 李家沟矿区花岗细晶岩稀土元素配分图及微量元素蛛网图 (球粒陨石值和原始地幔值源自 Boynton, 1984 和 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 7 REE distribution patterns and trace element spider diagrams (the chondrite and primitive mantle values after Boynton, 1984; McDonough and Sun, 1995)



其中 $FeO^T = FeO + 0.8998 \times Fe_2O_3$

图 8 花岗细晶岩类型判别图解 (底图据 Whalen et al., 1987; Jung and Pfänder, 2007)

Fig. 8 Rock type discrimination diagram for granite aplite (after Whalen et al., 1987; Jung and Pfänder, 2007)

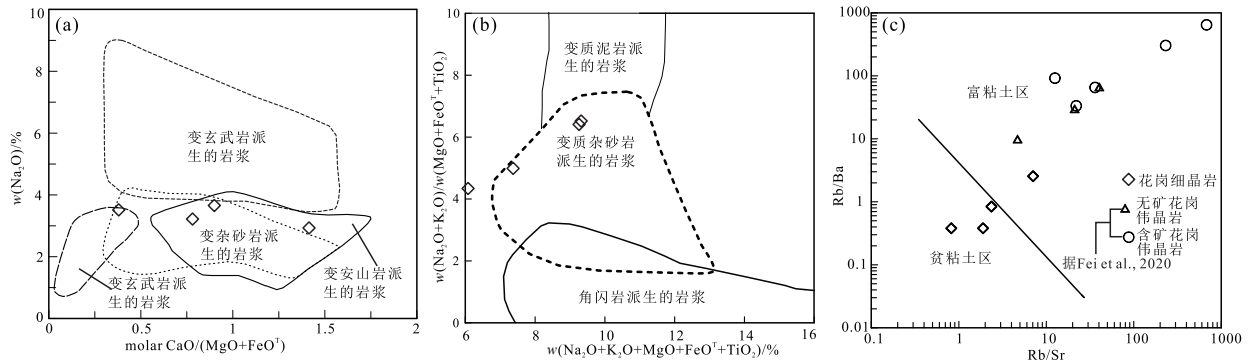


图9 花岗细晶岩源岩判别图解 (底图据 Sylvester,1998; Altherr and Siebel, 2002; Kaygusuz et al., 2008)

Fig. 9 Source discriminant diagrams for granite aplite (after Sylvester,1998; Altherr and Siebel, 2002; Kaygusuz et al., 2008)

花岗质岩石锆石 Hf 同位素常用于岩浆源区的判别 (吴福元等, 2007)。花岗细晶岩样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-6.36 \sim -3.39$, 进一步表明其源岩为循环的古老地壳物质, 其二阶段 Hf 模式年龄为 $1424 \sim 1616$ Ma, 表明其源岩组成物质从地幔储库中脱离的时间为中元古代。

李家沟矿区内花岗细晶岩、含矿花岗伟晶岩 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -4.92 \sim -2.4$, Fei et al., 2020)、无矿花岗伟晶岩 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.2 \sim -0.42$, Fei et al., 2020) 以及外围花岗岩 (二云母二长花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.7 \sim -2.9$; 白云母钠长花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -9.01 \sim -2.83$, Fei et al., 2020; 黑云母二长花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -6.44 \sim -3.83$, 罗伟等, 2022a) 具较为一致的 Hf 同位素组成 (图 10), 指示上述四者具相同的源区。然而, 相比花岗细晶岩, 无矿花岗伟晶岩、含矿花岗伟晶岩具较高的 Rb/Sr、Rb/Ba 比值, 指示其源岩与花岗细晶岩的源岩不同, 为富黏土的泥质岩 (图 9c)。

综上, 本文认为李家沟矿区花岗细晶岩与含矿花岗伟晶岩为同一源区不同岩性部分熔融的产物, 分别为变杂砂岩和变泥质岩。需要说明的是, 含矿花岗伟晶岩、无矿花岗伟晶岩均来源于同一源区的富黏土泥质岩。但是否成矿, 除与源岩条件相关外, 还与伟晶岩浆的演化时间有关。演化时间越长, 稀有金属元素越能进一步富集形成含矿花岗伟晶岩 (Thomas et al., 2012)。李家沟 I 号含矿花岗伟晶岩和党坝 VIII 号含矿花岗伟晶岩形成均持续了约 10 Ma (分别为 $211.4 \sim 200.1$ Ma 和 $208.1 \sim 199.3$ Ma), 含矿花岗伟晶岩中锆石普遍蜕晶化, 表明岩浆锆石经历了流体交代及重结晶的后期热液阶段, 这一阶段使锂元素进一步富集, 形成了品位高、规模大的含矿花岗伟晶岩。

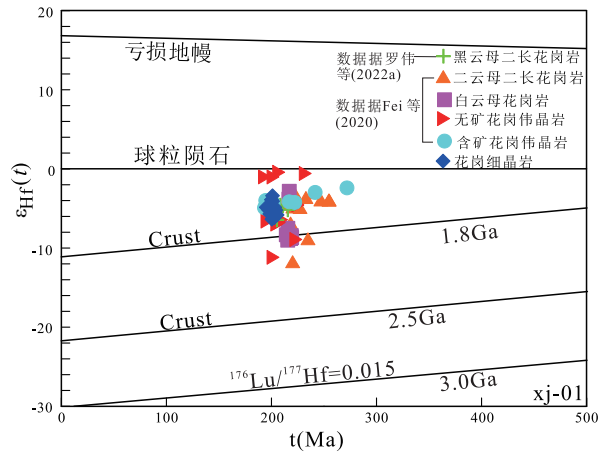


图10 李家沟矿区花岗细晶岩中锆石 $t(\text{Ma})-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解
Fig. 10 Age vs. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of zircons from the granite aplite in Lijiagou ore district

5.3 构造背景

可尔因地区位于松潘—甘孜褶皱造山带东部, 属古特提斯构造域。P—T₁ 时期, 松潘—甘孜洋盆 (古特提斯洋支洋盆) 沉积了巨厚的浊积岩; T₂—T₃ 时期, 松潘—甘孜洋盆在羌塘地块 (向北挤压) 和华北板块 (向南挤压) 的共同挤压下, 双向俯冲, 褶皱造山; T₃—J₁ 时期, 弧陆碰撞, 地壳进一步加厚, 在其东部与扬子陆块的边界附近形成了一系列 I、S、A 型花岗岩 (杨宗让, 2002; Roger et al., 2010) 以及花岗伟晶岩型稀有金属矿床。

李家沟矿区花岗细晶岩脉侵入位于上三叠统侏倭组强烈褶皱变形的片岩、角岩中, 野外及镜下观察均表明, 其未发生变形。同样, 矿区内的无矿花岗伟晶岩、含矿花岗伟晶岩及矿区外围的花岗岩均未变形。可尔因地区岩浆侵位年龄及稀有金属矿床成矿年龄均集中在 $219 \sim 200$ Ma (Yuan et al.,

2010; De Sigoyer et al., 2014; Deschamps et al., 2017; Fei et al., 2020; 邓运等, 2018; 许志琴等, 2018, 2019; Zhao et al., 2018; 费光春等, 2020; 许家斌等, 2020; Xu et al., 2020; Zheng et al., 2020; 罗伟等, 2022a; 本次研究), 与松潘-甘孜地体 220~205 Ma 时地壳碰撞增厚的年龄一致。以上特征表明, 可尔因地区花岗岩、花岗细晶岩、无矿花岗伟晶岩、含矿花岗伟晶岩均形成于松潘-甘孜褶皱造山作用的晚期。在 $(Y+Nb)-Rb$ 图解上(图 11a), 样品主要投到后碰撞与同碰撞重叠区域。在 $SiO_2-lg[CaO/(Na_2O+K_2O)]$ 图解(图 11b)中, 样品投到挤压型向伸展型转换的

区域。结合野外地质特征、镜下特征以及元素地球化学特征, 本文认为李家沟矿区花岗细晶岩脉形成于后碰撞阶段。

晚三叠世—早侏罗世, 可尔因地区处于造山后碰撞阶段的构造背景之下(由挤压向伸展转换), 加厚下地壳处于增温、降压条件, 来自剪切构造作用、放射性元素衰变以及玄武质岩浆的底侵作用(Yuan et al., 2010; De Sigoyer et al., 2014; Deschamps et al., 2017; 罗伟等, 2022a), 导致该地区深部古老地壳岩石发生部分熔融, 上侵形成不同类型岩浆岩、无矿花岗伟晶岩、含矿花岗伟晶岩和花岗细晶岩。

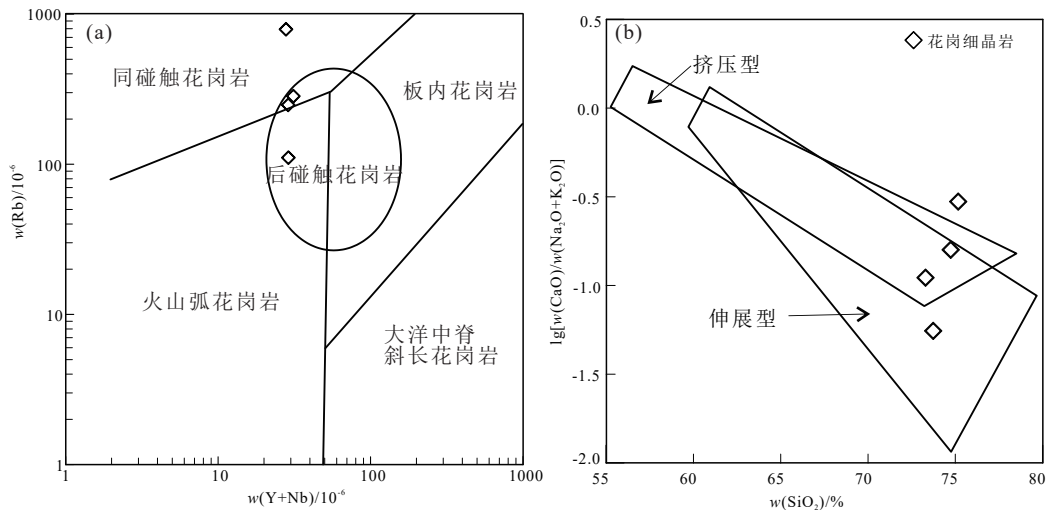


图 11 李家沟矿区花岗细晶岩构造环境判别图解(底图据 Brown, 1982; Pearce et al., 1984)

Fig. 11 Tectonic environment diagrams of granite aplite in Lijiagou ore district (after Brown, 1982; Pearce et al., 1984)

6 结论

(1)李家沟矿区花岗细晶岩脉锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (200 ± 2) Ma, 与含矿花岗伟晶岩近同时形成, 均为晚三叠世—早侏罗世岩浆活动的产物。

(2)花岗细晶岩属过铝质 S 型花岗岩, 形成于松潘-甘孜洋闭合后由挤压向伸展转换的后碰撞阶段, 其源岩为以变杂砂岩为主的古老地壳物。

(3)李家沟矿区花岗细晶岩与含矿花岗伟晶岩可能为同一源区不同源岩(变杂砂岩和变泥质岩)部分熔融的产物。

References

Altherr R, Siebel W, 2002. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean

Sea, Greece[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 143 (4): 397–415.

Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J, 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. Earth and Planetary Science Letters, 273 (1-2): 48–57.

Boynton W V, 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. Developments in Geochemistry, 2: 63–114.

Brown G C, 1982. Calc-alkaline intrusive rocks: Their diversity, evolution and relation to volcanic arcs. In: Thorpe R S, ed. Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks [M]. New York: John Wiley and Sons, 437–461.

De Sigoyer J, Vanderhaeghe O, Duchene S, 2014. Generation and emplacement of Triassic granitoids within the Songpan Ganze accretionary-orogenic wedge in a context of slab retreat accommodated by tear faulting, Eastern Tibetan plateau, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences: 88: 192–216.

Deng Y, Fei G C, Li J, et al., 2018. Study of C-H-O isotopes and

- geochronology of the Lijiagou pegmatite spodumene deposit in Sichuan Province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 38 (3) : 40–47. (in Chinese with English abstract) .
- Deschamps F, Duchêne S, De Sigoyer J, et al., 2017. Coeval mantle-derived and crust-derived magmas forming two neighbouring plutons in the Songpan Garze accretionary orogenic wedge (SW China) [J]. *Journal of Petrology*, 58 (11) : 2221–2256 .
- Fei G C, Li B H, Yang J Y, et al., 2018. Geology, fluid inclusion characteristics and H-O-C isotopes of large Lijiagou pegmatite Spodumene deposit in Songpan-Garze fold belt, Eastern Tibet: Implications for ore genesis [J]. *Resource Geology*, 68 (1) : 37–50 .
- 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: 105555 .
- Fei G C, Yang Z, Yang J Y, et al., 2020. New precise timing constraint for the Dangba granitic pegmatite type rare-metal deposit, Markam, Sichuan Province, evidence from cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb dating [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (3) : 836–849 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al., 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [J], 64 (1) : 133–147.
- Gu C H, 2014. Metallogenic regularity of spodumene deposits in the closely spaced pegmatite area in the southeastern Keeryin pegmatite field, Sichuan province [J]. *Contributions to geology and mineral resources research*, 29 (01) : 59–65 (in Chinese with English abstract).
- He D, Dong Y, Zhang F, et al., 2016. The 1.0 Ga S-type granite in the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau: Implications for the Meso- to Neoproterozoic tectonic evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130 (15) : 46–59 .
- Hou K J, Li Y H, Tian Y R. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 28 (4) : 481–492. (in Chinese with English abstract) .
- Huang C, Wang H, Yang J. H., et al., 2020. SA01 – a proposed zircon reference material for microbeam U-Pb age and Hf-O isotopic determination [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 44: 103–123 .
- Jung S, Pfänder J A, 2007. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: Constraints from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry [J]. *European Journal of Mineralogy*, 19 (6) : 859–870 .
- Kaygusuz A, Siebel W, Şen C, Satir M, 2008. Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: The composite Torul pluton, Eastern Pontides, NE Turkey [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 97 (4) : 739–764 .
- Liao Y A, Yao X L, 1992. Evolution feature and minerogenetic relations peraluminous granites from Jinchuan, Western Sichuan [J]. *Mineralogy and Petrology*, (1) : 12–22 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Zhang H, Li G M, et al., 2016. Petrogenesis of the Early Cretaceous Qingcaoshan Strongly Peraluminous S-Type Granitic Pluton, Southern Qiangtang, Northern Tibet: Constraints from Whole-Rock Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 52 (5) : 848–860 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R, 2003. User's Manual for isoplot 3.00: A Geochronological toolkit for Microsoft excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 1–70.
- Luo W, Yang B, Gu C H, et al., 2021. The Geological Characteristics and ore indicators of Lijiagou Super-large Spodumene Deposit in Jinchuan County, Western Sichuan [J]. *Sichuan Nonferrous Metas* (2) : 16–18+21. (in Chinese with English abstract) .
- Luo W, Peng J, Jin T F, et al., 2022a. Petrogenesis and Geological Significance of the Simancuo Biotite Monzogranite in the Kereryin Area, Western Sichuan, China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41 (3) : 526–539 (in Chinese with English abstract).
- Luo W, Yue X Y, Zhou X, et al., 2022b. Characteristics of soil geochemistry and its prospecting significance in Liemen Area, Jinchuan County, Sichuan [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (1) : 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101 (5) : 635–643 .
- McDonough W F, Sun S S, 1995. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 120 (3-4) : 223–253 .
- Middlemost E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 37 (3-4) : 215–224.
- Morel M L A, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, et al., 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS [J]. *Chemical Geology*, 255 (1-2) : 231–235 .
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G, 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal Petrology*, 25 (4) : 956–983 .
- Rickwood P C, 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 22 (4) : 247–263 .
- Roger F, Jolivet M, Malavieille J, 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garze (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: A synthesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39 (4) : 254–269 .
- Sláma J, Košler J, Condon D J, et al., 2008. Plešovice zircon — A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249 (1-2) : 1–35 .
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al., 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu–Hf and U–Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219 (3-4) : 311–324 .
- Sylvester P J, 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 45 (1) : 29–44 .
- Thomas R, Davidson P, Beurlen H, 2012. The competing models for the origin and internal evolution of granitic pegmatites in the light of

- melt and fluid inclusion research[J]. *Mineralogy and Petrology*, 106: 55–73.
- Watson E B, Harrison T M, 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth[J]. *Science*, 308 (5723): 841–844.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W, 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 95 (4): 407–419.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, et al., 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y B, Zheng Y F, 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49 (15): 1554–1569.
- Xu J B, Fei G C, Qin L Y, et al., 2020. LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of cassiterite from the Lijiagou pegmatite-type rare-metal deposit in the Ke'erqin orefield, Sichuan Province and its geological implication[J]. *Geology and Exploration*, 56 (2): 346–358 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Fu X F, Wang R C, et al., 2020. Generation of lithium-bearing pegmatite deposits within the Songpan-Ganze orogenic belt, East Tibet[J]. *Lithos*, 354-355: 105281.
- Xu Z Q, Fu X F, Zhao Z B, et al., 2019. Discussion on Relationships of Gneiss Dome and Metallogenic Regularity of Pegmatite-Type Lithium Deposits[J]. *Earth Science*, 44 (5): 1452–1463 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Wang R C, Zhao Z B, et al., 2018. On the Structural Backgrounds of the Large scale “Hard rock Type” Lithium Ore Belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92 (6): 1091–1106 (in Chinese with English abstract).
- Yan Q G, Li J K, Li X J, et al., 2020. Source of the Zhawulong granitic pegmatite-type lithium deposit in the Songpan-Ganze orogenic belt, Western Sichuan, China: Constraints from Sr-Nd-Hf isotopes and petrochemistry[J]. *Lithos*, 378–379 (3).
- Yang Z R, 2002. The formation and evolution of the Songpan-Garze forearc basin western Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, (3): 53–59 (in Chinese with English abstract).
- Yuan C, Zhou M F, Sun M, et al., 2010. Triassic granitoids in the eastern Songpan Ganzi Fold Belt, SW China: Magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 290 (3–4): 481–492.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al., 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 247: 100–118.
- Zhang Q, Pan G Q, Li C D, et al., 2007. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing: New viewpoints on granitic magma mixing process: some crucial questions on granite study (1) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (5): 1141–1152 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z B, Du J X, Liang F H, et al., 2018. Structure and Metamorphism of Markam Gneiss Dome from the Eastern Tibetan Plateau and Its Implications for Crustal Thickening, Metamorphism, and Exhumation[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 20 (1): 24–45.
- Zheng Y L, Xu Z Q, Li G W, et al., 2020. Genesis of the Markam gneiss dome within the Songpan-Ganzi orogenic belt, eastern Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 362-363: 105475.
- Zhou M Z, Yan D P, Wang C L, et al., 2006. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 248 (1-2): 271–285.

附中文参考文献

- 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.
- 费光春, 杨峥, 杨继忆, 等, 2020. 四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定: 来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据[J]. *地质学报*, 94 (3): 836–849.
- 古城会, 2014. 四川省可尔因伟晶岩田东南密集区锂辉石矿床成矿规律[J]. *地质找矿论丛*, 29 (01): 59–65.
- 侯可军, 李延河, 田有荣, 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 28 (4): 481–492.
- 廖远安, 姚学良, 1992. 金川—过铝多阶段花岗岩体演化特征及其与成矿关系[J]. *矿物岩石*, (1): 12–22.
- 刘洪, 张晖, 李光明, 等, 2016. 藏北羌塘南缘早白垩世青草山强过铝质 S 型花岗岩的成因: 来自地球化学和锆石 U-Pb 年代学的约束[J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 52 (5): 848–860.
- 罗伟, 杨波, 古城会, 等, 2021. 川西金川县李家沟超大型锂辉石矿床的地质特征及找矿标志[J]. *四川有色金属* (2): 16–18.
- 罗伟, 彭静, 金廷福, 等, 2022a. 川西可尔因地区斯曼错黑云母二长花岗岩成因及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 41 (3): 526–539.
- 罗伟, 岳相元, 周雄, 等, 2022b. 四川金川县列门地区土壤地球化学特征及找矿意义[J]. *矿产综合利用*, (1): 1–6.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23 (2): 185–220.
- 许家斌, 费光春, 覃立业, 等, 2020. 四川可尔因矿田李家沟伟晶岩型稀有金属矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义[J]. *地质与勘探*, 56 (2): 346–358.
- 许志琴, 付小方, 赵中宝, 等, 2019. 片麻岩穹窿与伟晶岩型锂矿的成矿规律探讨[J]. *地球科学*, 44 (5): 1452–1463.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等, 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. *地质学报*, 92 (6): 1091–1106.
- 杨宗让, 2002. 川西松潘-甘孜弧前盆地的形成及演化[J]. *沉积与特提斯地质*, (3): 53–59.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 等, 2007. 花岗岩混合问题: 与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一[J]. *岩石学报*, 23 (5): 1141–1152.