

叶亚康, 周家云, 周雄. 川西塔公松林口岩体 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄与地球化学特征[J]. 岩矿测试, 2020, 39(6): 921 - 933.

YE Ya - kang, ZHOU Jia - yun, ZHOU Xiong. Zircon LA - ICP - MS U - Pb Age and Geochemical Features of the Songlinkou Pluton, Western Sichuan[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(6): 921 - 933. 【DOI: 10.15898/j.cnki.11 - 2131/td.202005060008】

川西塔公松林口岩体 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄与地球化学特征

叶亚康^{1,2}, 周家云^{1,2}, 周雄^{1,3}

- (1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041;
2. 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川 成都 610041;
3. 中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究中心, 四川 成都 610041)

摘要: 松林口岩体出露于松潘—甘孜造山带东缘, 紧邻甲基卡超大型稀有金属伟晶岩型锂矿床, 为确定松林口岩体侵位时代与物质来源, 探讨该岩体与甲基卡成矿岩体的地球化学和含矿性差异, 本文对采集的 11 件岩体样品, 采用 X 射线荧光光谱法、电感耦合等离子体质谱法(ICP - MS)、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA - ICP - MS)和多接收电感耦合等离子体质谱法(MC - ICP - MS), 对岩石的主量和微量元素组成、锆石 U - Pb 年龄和锆石 Lu - Hf 同位素进行分析。结果表明: 松林口岩体中富含闪长质暗色包体, SiO₂ 含量介于 56.56% ~ 68.99% 之间, 全碱含量 3.78% ~ 6.82%, K₂O/Na₂O = 1.02 ~ 1.93, 里特曼指数 σ = 1.01 ~ 1.93, Mg[#] 值总体为 46.73 ~ 61.27, 岩石属于高钾钙碱性 I 型花岗岩系列, 具有轻稀土富集的特点, LREE/HREE = 2.67 ~ 8.31, La_N/Yb_N 值为 2.11 ~ 9.74, 所有岩石样品均具有明显的负 Eu 异常; 总体上松林口岩体及其包体富集 LILE 元素, Ta、Nb、P、Ti 等 HFSE 元素相对亏损。松林口边部花岗闪长岩、中部二长花岗岩的锆石 U - Pb 年龄分别为 212.6 ± 1.0 Ma (MSWD = 0.55)、222.4 ± 1.1 Ma (MSWD = 0.39), 岩浆侵位时代为晚三叠世; 二长花岗岩锆石 Lu - Hf 同位素结果 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 -9.09 ~ -6.86, 二阶段模式年龄 (T_{DM}^{C}) 在 1524.874 ~ 1666.002 Ma 之间, 岩体物质来源是中元古代扬子克拉通基底物质部分熔融, 并混有部分富集上地幔物质。甲基卡 S 型花岗岩为上地壳部分熔融形成的, 与松林口岩体属不同的物质来源, 且岩浆演化程度和成矿构造条件不同, 这可能是松林口岩体不具有锂稀有金属成矿的主要原因。

关键词: 松林口岩体; 锆石 U - Pb 年代学; 锆石 Lu - Hf 同位素; 地球化学; 稀有金属成矿

- 要点:**
- (1) LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄限定松林口岩体侵位时代为晚三叠世。
(2) MC - ICP MS 锆石 Lu - Hf 同位素结果指示物源为中元古代基底物质。
(3) 松林口高钾钙碱性 I 型花岗岩不具有稀有金属成矿条件。

中图分类号: P574; O657.63 **文献标识码:** A

松潘—甘孜造山带位于扬子地台西缘、西藏板块东北部、昆仑板块南部, 其形成的大地构造背景为古特提斯洋的闭合阶段^[1-2]。在经过诺利期短暂的

沉积以后, 松潘甘孜盆地迅速发生海退, 地层褶皱隆起, 诺利期末—瑞替期, 地壳开始逐渐抬升, 松潘—甘孜造山运动至此开始^[3]。由于造山带处于特殊

收稿日期: 2020 - 04 - 17; 修回日期: 2020 - 08 - 03; 接受日期: 2020 - 09 - 19

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“格陵兰岛西南部稀土 - 铀矿产资源潜力评价”(DD20190446); 中国地质调查局地质调查项目“四川九龙—可尔因大型锂资源基地综合调查评价”(DD20190185)

作者简介: 叶亚康, 硕士, 助理工程师, 主要从事矿床学、岩石学及相关研究。E - mail: 835143358@qq.com。

的构造位置(多个板块汇聚)且经历了复杂的构造演化,一直是中外学者研究的热点,也被称为中国的“地质百慕大”^[4]。造山带内广泛出露的中生代花岗岩多侵入三叠系地层中,不仅作为松潘—甘孜造山带复杂地壳的重要组成部分,也反映了带内构造发展过程。对松潘—甘孜造山带进行研究可以为造山带岩浆产生机制、大陆碰撞过程、壳幔相互作用方式、地壳加厚隆升、造山带的伸展垮塌、裂谷—盆地演化及成矿作用等领域提供重要启示和依据^[5]。在青藏高原东缘的松潘甘孜造山带内发育大量的稀有金属花岗伟晶岩,其中以川西可尔因^[6-7]和甲基卡稀有金属矿田^[8-10]为代表,稀有金属伟晶岩与邻近的印支晚期—燕山早期的中—酸性花岗岩具有直接或者间接的成因联系,岩浆侵位与成矿伟晶岩脉之间具有结晶分异演化关系,通常稀有金属伟晶岩是成母岩岩浆演化晚期的产物,成矿时代要比成母岩晚。在松林口岩体以西约20km的甲基卡稀有金属矿田,探明的 Li_2O 资源量已超过200万吨,矿床规模达超大型^[11]。对于甲基卡超大型锂矿床的成因与概况,目前已开展了大量地质年代学、同位素地球化学等研究工作,确认马颈子二云母花岗岩为甲基卡成母岩^[12-14],伟晶岩是二云母花岗岩高度结晶分异的产物^[15]。而本次研究的松林口岩体,出露规模较马颈子岩体更大,成岩时代为印支晚期,围岩岩性也基本一致,却未发现与之类似的含稀有金属伟晶岩脉出露,因此需要对松林口岩体作更详细的研究,以探讨其与成矿岩体之间的异同。

目前对松林口岩体的形成时代普遍认为是 $209 \pm 1.0\text{Ma} \sim 227.1 \pm 5.0\text{Ma}$ ^[16-20],但前人对该岩体的含矿性与物质来源研究程度较低,为了进一步确定岩体的岩性特征、侵位时代和物质来源,本文对松林口岩体作了详细研究,旨在通过对岩体详细的野外地质调查、结合镜下薄片观察、岩体的锆石U—Pb年代学、岩石地球化学和Lu—Hf同位素研究,探讨松林口岩体的成因、岩浆物质来源和构造意义。并从大地构造背景、岩体地球化学特征、年代学证据等方面与邻区成矿花岗岩进行比较,探讨对该地区同类型岩浆岩的物质来源、成因演化甚至松潘—甘孜造山带的基底物质组成的意义。

1 地质概况及岩石学特征

松林口岩体位于松潘—甘孜造山带中东部,为近东西向展布的椭圆形复式岩体,出露面积约96平方千米,岩体中部和边部的岩性差异明显,总体上中

心比边部更偏酸性,岩体中部岩性为二长花岗岩,靠近边部岩体岩性为花岗闪长岩。野外地质调查中发现岩体内发育大量的暗色闪长质包体,岩体侵入强烈变形的晚三叠系地层,内部未见构造变形现象。在野外调查中,未发现伟晶岩脉出露,仅见沿岩石中的节理裂缝发育有少量石英脉,脉体规模均较小。本次工作采集了全岩化学分析样品11件,其中暗色包体样品1件(SLK-01),岩体中部样品5件(SLK-01~SLK-05),在岩体西北边样品5件(SLK-07~SLK-11),岩石样品新鲜,采样具有代表性。岩石样品及对应镜下特征见图1。

二长花岗岩体呈深灰色,中—细粒花岗结构,块状构造(图1a),主要矿物组成为斜长石、微斜长石、钠长石、角闪石、黑云母和石英等。斜长石半自形—自形板状,聚片双晶发育,可见两期斜长石,晚期斜长石切断早期斜长石,二者聚片双晶近于垂直(图1d);微斜长石镜下可见典型的格子状双晶(图1e)。花岗闪长岩体呈灰黑色(图1b),可见斜长石环带发育(图1f);普通角闪石矿物蚀变严重,呈残留他形粒状,被黑云母、长石、石英等矿物交代(图1g)。暗色闪长质包体(图1c)由斜长石、普通辉石、状角闪石、黑云母和粒状石英等矿物组成,普通角闪石可见两组斜交解理发育,多被黑云母和石英交代(图1h);另可见细小针状磷灰石矿物分散分布(图1i)。

2 实验部分

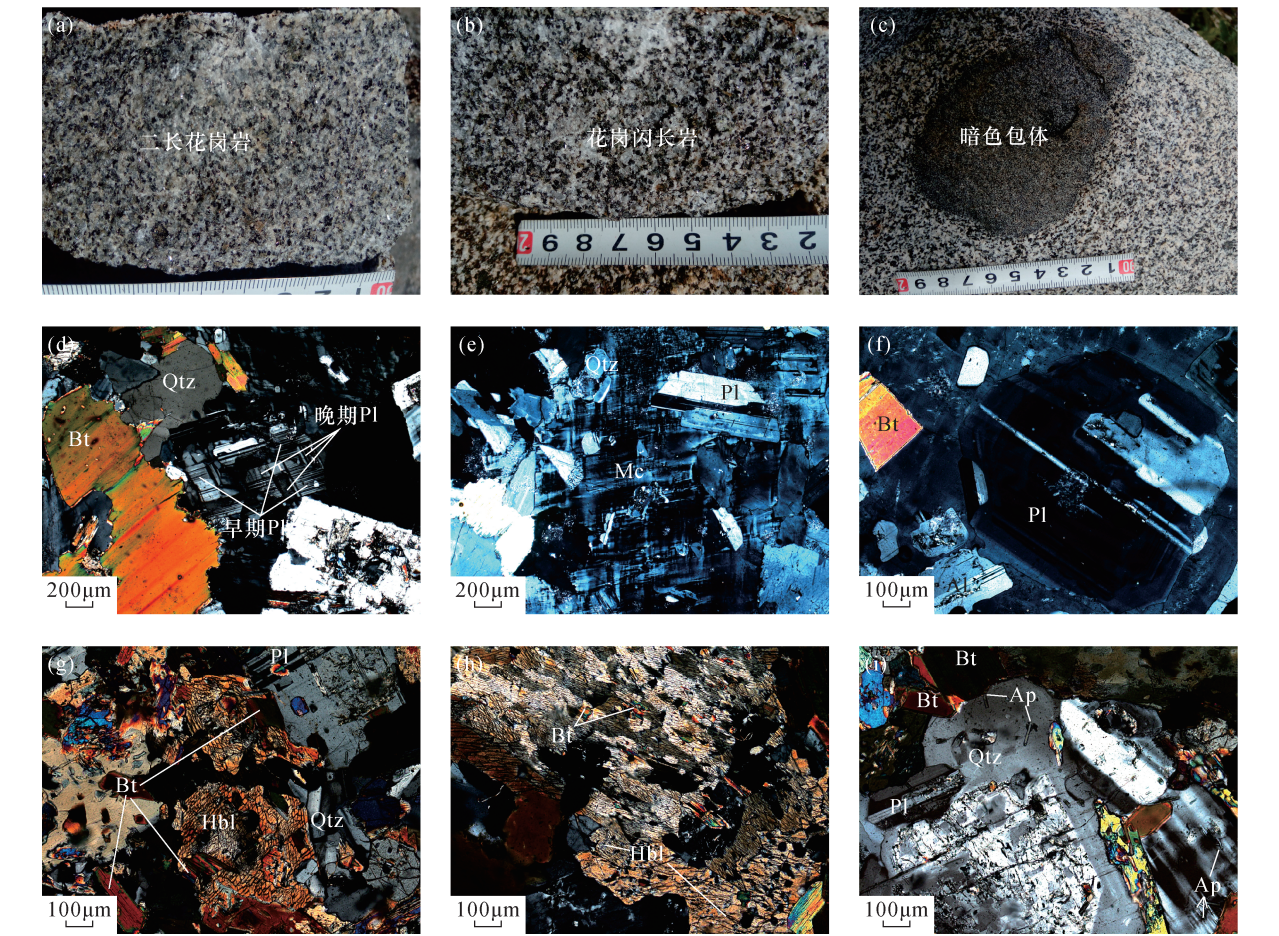
2.1 实验样品

本次工作采集了全岩化学分析样品11件,在中部二长花岗岩中采集暗色闪长岩包体样品1件(SLK-1H),在岩体中部采集二长花岗岩样品5件(SLK-2H~SLK-6H),在岩体西北边采集花岗闪长岩样品5件(SLK-7H~SLK-11H);同时对SLK-6H和SLK-11H两个样品进行锆石U—Pb同位素定年,分析时外部校正使用GBW-91500标准锆石;锆石微区原位Lu—Hf同位素分析样品为SLK-6H,校正使用GBW-91500标准锆石,样品采集具有代表性。

2.2 样品分析方法

岩石主量、微量元素和稀土元素分析由中国地质科学院矿产综合利用研究所分析测试中心完成。

主量元素采用传统化学分析方法和仪器分析结合的测试方案,硅酸盐岩石化学分析方法参考GB/T 14506—2010系列,如Si等12个主量元素采用熔片—X射线荧光光谱法;SiO₂的测定采用动物胶凝聚



Al—钠长石; Ap—针状磷灰石; Bt—黑云母; Hbl—普通角闪石; Mc—微斜长石; Pl—斜长石; Qtz—石英。
a—岩体中部; b—岩体边部花岗闪长岩; c—岩体中的暗色闪长质包体; d—二长花岗岩中发育两期斜长石, 聚片双晶近于垂直; e—二长花岗岩中微斜长石格子状双晶; f—花岗闪长岩中斜长石发育环带结构; g—花岗闪长岩中角闪石被斜长交代; h—暗色包体中角闪石被黑云母交代后残留结构; i—暗色包体中石英包裹角闪石残留晶体, 可见针状磷灰石。

图1 二长花岗岩、花岗闪长岩、暗色包体手标本及其镜下特征

Fig. 1 Monzogranite, granodiorite and enclave samples and their microscopic features

法; Al_2O_3 采用容量法; CaO 采用 EDTA 容量法; K_2O 和 Na_2O 采用原子吸收光谱、火焰原子吸收分光光度法; TiO_2 采用分光光度法等。仪器为: AXIOS X 射线荧光光谱仪(荷兰帕纳科公司)、Opima 8300 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 PerkinElmer 公司)、UH5300 紫外可见分光光度计(日本日立公司)、原子吸收分光光度计 ice3500(美国 ThermoFisher 公司)。

Hf、Y 等微量和 La、Ce 等 15 个稀土元素的测定采用电感耦合等离子体质谱法(NexION 350X 型, 美国 PerkinElmer 公司)、电感耦合等离子体发射光谱法(Opima 8300 型, 美国 PerkinElmer 公司), 分析方法参考《硅酸盐岩石化学分析方法 第 29 部分: 稀土等 22 个元素量测定 电感耦合等离子体质谱法》(GB/T 14506. 29—2010) 和《硅酸盐岩石化学分析

方法 第 30 部分: 44 个元素量测定—电感耦合等离子体质谱法》(GB/T 14506. 30—2010)。Sr、Ba、Ga、Zr 等微量元素的测定采用 X 射线荧光光谱法(AXIOS 型, 荷兰帕纳科公司), 分析方法参考《区域地球化学样品分析方法 第 1 部分: 三氧化二铝等 24 个成分量测定 粉末压片—X 射线荧光光谱法》(DZ/T 0279. 1—2016), 总体分析误差小于 5%。

选取的锆石测年样品送至河北省廊坊市宏信地质勘查技术服务有限公司进行破碎及锆石单矿物挑选; 锆石制靶与阴极发光(CL)图像由西安瑞石地质科技有限公司完成; 锆石测年采用 LA-ICP-MS 方法, 由西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石 U-Pb 定年采用 Varian820-MS(四极杆电感耦合等离子体质谱仪), 激光剥蚀系统为 GeoLas2005。采用单点剥蚀, 用 NIST610 对仪器进

行调校,在数据分析前将仪器最佳化,分析时外部校正使用 91500 标准锆石。普通铅校正方法按照 Andersen^[21],详细实验过程见袁洪林等^[22]。分析处理数据使用 Glitter 软件进行^[23],通过 ISOPLLOT (V3.0) 程序获得锆石 U-Pb 谐和图及加权平均值。在进行年龄计算过程中需对样品进行同位素分馏校正,本次使用的是 91500 标准锆石来进行校正。

本研究中锆石微区原位 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。激光剥蚀系统是 193nm 准分子激光剥蚀系统 (RESOLUTION M-50, ASI), 包含一台 193nm ArF 准分子激光器、一个双室样品室和电脑控制的高精度 X-Y 样品台移动、定位系统。双室样品池能有效避免样品间交叉污染,减少样品吹扫时间,同时装载样品能力大大提高,减少了频繁换样过程中人为因素的影响。激光能量密度为 6J/cm², 频率为 5Hz, 斑束为 43μm, 载气为高纯氦气, 流速为 280mL/min。Lu-Hf 同位素分析采用多接收电感耦合等离子体质谱 (Nu Plasma II MC-ICPMS), 该设备是 Nu Instrument 公司的最新一代双聚焦多接收等离子体质谱仪, 具有 16 个法拉第杯和 5 个全尺寸不连续打拿级电子倍增器 (FTP, 其中 2 路具有阻滞过滤器 RPQ)。其专利的 zoom 电子光学透镜系统可实现在不同同位素之间分析时快速切换 (只需改变电场而无需改变检测器位置)。法拉第杯 H4、H3、H2、H1、Ax、L1、L2、L3、L4、L5 分别接收 ¹⁸⁰Hf、¹⁷⁹Hf、¹⁷⁸Hf、¹⁷⁷Hf、¹⁷⁶Hf + ¹⁷⁶Yb + ¹⁷⁶Lu、¹⁷⁵Lu、¹⁷⁴Yb、¹⁷³Yb、¹⁷²Yb、¹⁷¹Yb。Lu-Hf 同位素分馏校正采用指数法则计算, 采用 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0.02656 和 ¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb = 0.78696 比值扣除 ¹⁷⁶Lu 和 ¹⁷⁶Yb 对 ¹⁷⁶Hf 的干扰, 获得准确的 ¹⁷⁶Hf 信号值。Hf 和 Lu 同位素比值采用 ¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf = 0.7325 进行仪器质量歧视效应校正, Yb 同位素比值采用 ¹⁷³Yb/¹⁷¹Yb = 1.12346 进行仪器质量歧视效应校正。在分析过程中, 国际标准锆石样品 91500 和 Mudtank 作为监控样品, 每 8 个样品插入一组国际标样, 数据采集模式为 TRA 模式, 积分时间为 0.2s, 背景采集时间为 30s, 样品积分时间为 50s, 吹扫时间为 40s, 详细的分析方法见 Yuan 等^[24] 和仪器参数见 Bao 等^[25]。

3 结果与讨论

3.1 主微量元素特征

本次分析的 11 件样品主量、微量元素测试结果见表 1 (表中甲基卡二云母花岗岩数据引自文献 [26])。暗色包体 SiO₂ 含量为 54.24%, 全碱含量

7.34%, K₂O/Na₂O = 4.24, σ (里特曼指数) = 4.63, 镁指数 (Mg[#]) 为 57.22, 铝饱和指数 A/CNK = 0.675。

二长花岗岩的 SiO₂ 含量介于 63.89% ~ 68.99%, 全碱含量 5.86% ~ 6.82%, K₂O/Na₂O = 1.66 ~ 1.93, 平均值为 1.77, σ (里特曼指数) 介于 1.62 ~ 1.93, 平均值为 1.768, 为高钾钙碱性岩; 铝饱和指数 A/CNK = 1.006 ~ 1.046, 为弱过铝质岩石; MgO 含量 1.49% ~ 2.7%, Mg[#] 介于 46.73 ~ 51.41。

花岗闪长岩的 SiO₂ 含量介于 56.56% ~ 61.97%, 全碱含量 3.78% ~ 5.38%, K₂O/Na₂O = 1.02 ~ 1.68, 平均值为 1.32, σ (里特曼指数) 介于 1.01 ~ 1.53, 平均值为 1.274, 为高钾钙碱性岩; 铝饱和指数 A/CNK = 0.736 ~ 0.958, 为准铝质岩石; MgO 含量 3.51% ~ 6.92%, Mg[#] 介于 50.97 ~ 61.27, 花岗闪长岩更富含镁铁质成分。

稀土元素配分曲线呈现右倾特点 (图 2a), 轻稀土元素富集、重稀土元素亏损。暗色包体轻稀土 LREE 为 68.83 × 10⁻⁶, 重稀土 HREE 为 25.77 × 10⁻⁶。二长花岗岩 LREE 介于 131.24 × 10⁻⁶ ~ 147.54 × 10⁻⁶, HREE 介于 17.47 × 10⁻⁶ ~ 19.03 × 10⁻⁶, LREE/HREE 值在 7.21 ~ 8.31 之间, La_N/Yb_N 值为 6.61 ~ 9.74, 轻、重稀土分异显著; δEu 平均值为 0.612, 显示较强的负铕异常; δCe 平均值为 1.12, 显示弱的正铈异常。花岗闪长岩 LREE 介于 88.06 × 10⁻⁶ ~ 170.27 × 10⁻⁶, HREE 介于 16.87 × 10⁻⁶ ~ 23.87 × 10⁻⁶, LREE/HREE 值在 5.22 ~ 7.13 之间, La_N/Yb_N 值为 6.12 ~ 8.96, 轻、重稀土分异显著; δEu 平均值为 0.688, δCe 平均值为 0.738, 铕和铈的负异常明显。

在微量元素蛛网图标准化曲线总体上也是右倾的 (图 2b), 相对富集 LILE (大离子亲石元素), 而相对亏损 HFSE (高场强元素) 如 Ta、Nb、P、Ti。暗色包体显示明显 Th、Nb、Ta、P、Ti 元素的负异常, Hf 则表现为轻微的负异常; Rb、K、Nd、Sm、Y 等元素为正异常。二长花岗岩表现为低 Sr, 高 Y、Yb, 其中 Sr 含量为 242 × 10⁻⁶ ~ 291 × 10⁻⁶, Y 含量为 24.8 × 10⁻⁶ ~ 29.2 × 10⁻⁶, Yb 含量为 2.68 × 10⁻⁶ ~ 2.94 × 10⁻⁶; 花岗闪长岩表现为高 Sr, 高 Y、Yb, 其中 Sr 含量为 579 × 10⁻⁶ ~ 683 × 10⁻⁶, Y 含量为 29 × 10⁻⁶ ~ 37.5 × 10⁻⁶, Yb 含量为 2.56 × 10⁻⁶ ~ 3.61 × 10⁻⁶。花岗闪长岩表现出较为一致的微量元素分布特征, 总体显示较强的 Nb、Ta、P、Ti 负异常, Ba、U、Hf 为弱的负异常; Rb、Th、K、La、Sr、Sm 为正异常; Nb 平均含量 12.09 × 10⁻⁶, Ta 平均含量 1.1 × 10⁻⁶, Nb/Ta 平均

表 1 松林口岩体的主量元素(%)和微量元素测试结果(×10⁻⁶)

Table 1 Analytical results of major elements (%) and trace elements (×10⁻⁶) in Songlinkou Pluton

元素	暗色包体	二长花岗岩					花岗闪长岩					甲基卡 二云母花岗岩
	SLK – 1H	SLK – 2H	SLK – 3H	SLK – 4H	SLK – 5H	SLK – 6H	SLK – 7H	SLK – 8H	SLK – 9H	SLK – 10H	SLK – 11H	JJK
SiO ₂	54.24	63.89	65.29	65.65	67.01	68.99	61.93	60.88	61.97	56.97	56.56	74.29
TiO ₂	0.64	0.64	0.58	0.56	0.46	0.36	0.74	0.71	0.66	0.68	0.76	0.07
Al ₂ O ₃	15	15.83	15.78	15.66	15.58	15.25	15.84	16.09	15.78	14.65	15.34	14.51
Fe ₂ O ₃	1.15	0.79	0.8	0.55	0.88	0.34	1.41	1.12	1.32	1.77	1.41	0.47
FeO	6.68	4.33	3.96	3.75	3.11	2.66	4.75	5.19	4.81	6.32	6.53	0.4
MnO	0.29	0.12	0.11	0.11	0.095	0.076	0.095	0.096	0.087	0.12	0.12	0.03
MgO	5.79	2.7	2.41	2.52	1.92	1.49	3.51	3.93	3.71	6.79	6.92	0.24
CaO	7.42	4.3	4.06	4.14	3.38	3.46	5.51	5.96	5.34	8.13	8.01	0.48
Na ₂ O	1.4	2.2	2.28	2.15	2.44	2.54	2.21	2.03	1.95	1.84	1.91	3.23
K ₂ O	5.94	3.66	4	4.16	4.38	4.28	3.17	2.86	3.28	1.94	1.95	4.79
P ₂ O ₅	0.16	0.14	0.14	0.12	0.097	0.086	0.17	0.17	0.16	0.16	0.18	0.22
Mg [#]	57.22	48.84	47.86	51.41	46.73	47.24	50.97	53.06	52.44	60.47	61.27	34.21
烧失量	0.87	0.97	0.9	0.63	0.73	0.49	0.67	0.89	0.83	0.26	0.13	1.02
总量	99.58	99.57	100.31	100	100.08	100.02	100	99.92	99.9	99.63	99.82	100.56
A/CNK	0.675	1.028	1.021	1.006	1.046	1.01	0.927	0.932	0.958	0.736	0.774	1.27
Li	46.2	51.2	51.0	49.8	63.3	57.8	42.8	33.3	27.3	46.1	26.5	447
Cs	12.0	14.2	14.0	13.8	15.9	16.2	10.7	8.63	6.05	9.75	5.86	42.4
Rb	244	180	182	184	186	190	155	144	134	82.5	83.1	401
Ba	1380	642	584	581	617	604	704	620	698	559	600	107
Th	7.08	15.1	21	21.9	25.8	23.5	14.5	12.3	14.2	6.9	8.02	3.56
U	2.7	2.66	1.72	2.11	2.82	3.12	1.87	1.72	1.92	1.25	1.6	3.94
Ta	1.06	1.36	1.25	1.32	1.55	1.59	1.31	1.12	1.44	0.76	0.89	4.93
Nb	10.6	13.2	12	12.6	12.8	11.4	15.2	12.9	13.2	9.36	9.79	18.9
Sr	261	274	247	242	291	285	612	618	579	658	683	104
Zr	121	155	150	164	156	132	135	130	120	72	70	35
Hf	2.78	5.01	5.25	5.43	4.42	3.83	1.62	1.61	2.17	1.51	1.81	3.34
Y	43.4	28	29.2	28.5	28.2	24.8	37.5	35.3	32.7	29	32.6	9.58
Ga	16.3	19.5	17.8	18.5	18.4	18	18.9	18.7	18.9	20.6	20.1	22.3
La	12	37.2	26.9	35.8	28.4	32	42.6	32	37.3	22.6	30.8	7.02
Ce	23.4	67.5	70.2	68.2	74.6	71.4	72.2	49.6	48.1	30.5	46.6	11.40
Pr	4.47	7.9	5.9	7.8	6.28	7.3	8.91	7.52	7.78	5.16	7.1	1.92
Nd	20.9	28.4	22.4	27.4	21.8	28.1	38.6	35.5	37	24.4	34.3	6.78
Sm	6.74	5.44	4.78	5.54	5.12	5.4	6.6	5.88	6	4.31	5.93	1.80
Eu	1.32	1.1	1.06	1.08	1.04	0.98	1.36	1.36	1.41	1.09	1.39	0.36
Gd	6.48	4.92	4.9	5.28	5.36	5.22	7.15	6.34	6.41	4.68	5.62	2.19
Tb	1.15	0.79	0.78	0.82	0.87	0.77	1.07	0.95	1.05	0.79	0.89	0.43
Dy	7.22	4.68	4.82	4.99	5.2	4.46	6.36	5.23	5.95	4.51	5.76	2.12
Ho	1.38	0.93	0.94	0.94	0.96	0.86	1.23	1.05	1.35	0.92	1.17	0.32
Er	4.14	2.84	2.87	2.92	2.78	2.64	3.57	3.27	3.75	2.59	3.57	0.61
Tm	0.71	0.48	0.5	0.5	0.5	0.45	0.55	0.55	0.54	0.41	0.59	0.08
Yb	4.07	2.74	2.92	2.91	2.94	2.68	3.41	3.08	3.57	2.56	3.61	0.45
Lu	0.62	0.44	0.44	0.46	0.42	0.39	0.53	0.52	0.57	0.42	0.6	0.07
ΣREE	94.6	165.36	149.41	164.64	156.27	162.65	194.14	152.85	160.77	104.93	147.93	35.56
LREE	68.83	147.54	131.24	145.82	137.24	145.18	170.27	131.86	137.59	88.06	126.12	–
HREE	25.77	17.82	18.17	18.82	19.03	17.47	23.87	20.99	23.18	16.87	21.81	–
LREE/ HREE	2.67	8.28	7.22	7.75	7.21	8.31	7.13	6.28	5.94	5.22	5.78	4.66
La _N /Yb _N	2.11	9.74	6.61	8.82	6.93	8.56	8.96	7.45	7.49	6.33	6.12	–
δEu	0.6	0.64	0.66	0.6	0.6	0.56	0.6	0.68	0.69	0.74	0.73	0.55
δCe	0.78	0.92	1.31	0.96	1.31	1.1	0.86	0.76	0.66	0.67	0.74	–

注: SiO₂至 A/CNK 第一部分为主量元素(%),Li 至 Ga 第二部分为微量元素(×10⁻⁶),La 至 δCe 第三部分为稀土元素(×10⁻⁶)。

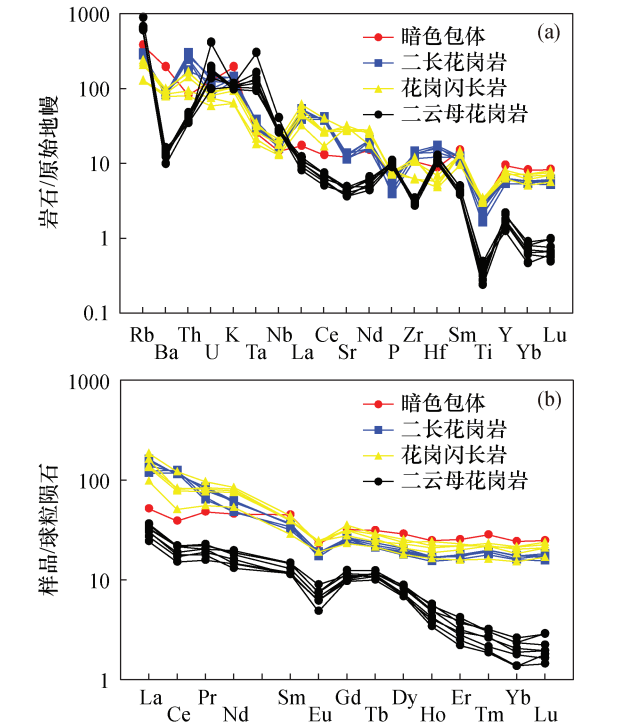


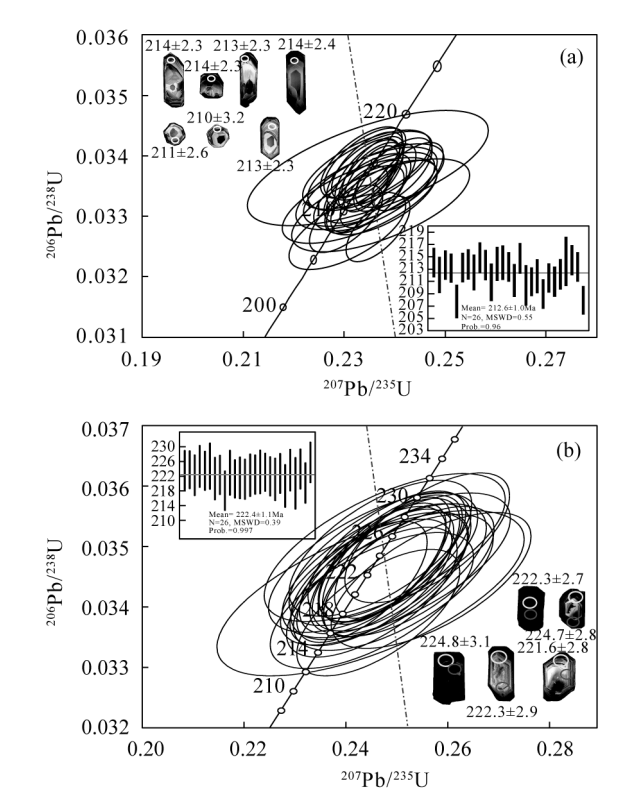
图2 (a)微量元素蛛网图和(b)稀土元素配分模式图(甲基卡二云母花岗岩数据引自文献[26],原始地幔标准化值与球粒陨石标准化值引自文献[27])

Fig. 2 (a) Primitive mantle normalized spidergrams of Songlinkou pluton; (b) Chondrite normalized REE patterns for Songlinkou pluton (The dates of Jiajika two - mica granite quoted from Reference [26], primitive mantle normalized value and chondrite normalized values quoted from Reference [27])

比值为11.13;Zr 平均含量 105.4×10^{-6} ,Hf 平均含量 1.744×10^{-6} ,Zr/Hf 平均比值为61.15,Rb/Sr 平均值0.19。二长花岗岩有相似的微量元素分布特征,总体显示较强 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 负异常;Rb、Th、La、Ce、Nd、Zr、Hf、Y 为正异常;Nb 平均含量 12.4×10^{-6} ,Ta 平均含量 1.414×10^{-6} ,Nb/Ta 平均比值为8.77;Zr 平均含量 151.4×10^{-6} ,Hf 平均含量 4.788×10^{-6} ,Zr/Hf 平均比值为31.89,Rb/Sr 平均值为0.69。

3.2 锆石 U - Pb 测试结果

本次挑选边部花岗闪长岩样品(SLK - 11)和中部二长花岗岩样品(SLK - 06)进行 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 定年,共分析了30个测点,测试结果见表2。花岗闪长岩样品中挑选的锆石为自形柱状,长宽比在1:1~3:1内,锆石阴极发光图像(图3a)显示锆石震荡环带发育。本次所有测点的 Th/U 比值介于0.18~0.76之间,结合锆石阴极发



a—松林口边部花岗闪长岩; b—松林口中部二长花岗岩。
黄色圈为锆石 U - Pb 测点及编号;红色圈为锆石 Lu - Hf 同位素测点及编号。

图3 松林口岩体锆石 U - Pb 谐和图

Fig. 3 Zircon U - Pb concordia diagrams of Songlinkou Pluton

光图像,本次挑选的锆石全部为岩浆锆石。获得锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄 在 185~433Ma 之间,除去5号、9号、15号、29号4个不谐和点,获得26个测点的加权平均年龄值为 $212.6 \pm 1.0\text{Ma}$ (MSWD = 0.55),谐和图曲线接近一致(图3a),解释为花岗闪长岩的结晶年龄。

二长花岗岩样品中挑选的锆石为自形长柱状,锆石颗粒大小150~400μm,长宽比多在1.5:1~3:1左右,锆石 CL 图像显示锆石表面干净(图3b),裂纹少、震荡环带结构发育,所有测点的 Th/U 比值介于0.28~0.56之间,均为岩浆锆石。获得锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄在201.6~246.7Ma 之间,除去3号、11号、26号、28号4个不谐和点,获得26个测点的加权平均年龄值为 $222.4 \pm 1.1\text{Ma}$ (MSWD = 0.39),谐和图曲线接近一致(图3b),解释为二长花岗岩的结晶年龄。

3.3 锆石 Hf 同位素测试结果

对 SLK - 06 样品进行 Lu - Hf 分析测试,共分析了10个测点,分析结果见表3。10颗锆石的

$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.0143 ~ 0.0331,平均值为 0.0241。

$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000384 ~ 0.000872,平均值为 0.000645, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282515 ~ 0.282578,平均值为 0.282544。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值,介于 -9.09 ~

-6.86,平均值为 -8.07。一阶段模式年龄(T_{DM1})介于 945.7365 ~ 1032.515Ma之间,平均值 992.4757Ma。二阶段模式年龄(T_{DM}^{C})为 1524.874 ~ 1666.002Ma,平均值1601.2783Ma。

表 2 松林口岩体锆石 U – Pb 同位素分析结果

Table 2 LA – ICP – MS zircon U – Pb isotopic compositions of Songlinkou Pluton

分析点号	Pb * 含量 ($\times 10^{-6}$)	Th 含量 ($\times 10^{-6}$)	U 含量 ($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素比值					
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 1σ		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 1σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 1σ	
SLK – 11 – 01	56.64	150.87	353.98	0.43	0.05063	0.00125	0.23573	0.00406	0.03376	0.00037
SLK – 11 – 02	29.21	65.61	185.87	0.35	0.05083	0.00223	0.23451	0.00924	0.03346	0.00045
SLK – 11 – 03	46.68	101.61	295.63	0.34	0.05047	0.00128	0.23455	0.00424	0.03370	0.00037
SLK – 11 – 04	83.23	179.68	528.79	0.34	0.05074	0.00118	0.23523	0.00357	0.03362	0.00036
SLK – 11 – 05	33.486	72.69	218.87	0.33	0.05107	0.00194	0.23069	0.00765	0.03276	0.00042
SLK – 11 – 06	106.98	123.53	693.50	0.18	0.05131	0.00127	0.23804	0.00409	0.03364	0.00037
SLK – 11 – 07	38.821	144.58	235.26	0.61	0.05159	0.00142	0.23987	0.00501	0.03372	0.00038
SLK – 11 – 08	35.00	86.43	221.44	0.39	0.05103	0.00222	0.23588	0.00922	0.03352	0.00045
SLK – 11 – 09	61.10	318.89	420.06	0.76	0.05075	0.00211	0.20386	0.00754	0.02913	0.00039
SLK – 11 – 10	40.422	148.99	245.40	0.61	0.04994	0.00145	0.23343	0.00531	0.03389	0.00039
SLK – 11 – 11	37.153	84.32	234.42	0.36	0.05027	0.00137	0.23371	0.00478	0.03371	0.00038
SLK – 11 – 12	21.54	58.71	136.11	0.43	0.0508	0.00242	0.23304	0.01012	0.03326	0.00047
SLK – 11 – 13	24.96	57.98	156.93	0.37	0.05052	0.00198	0.23509	0.00809	0.03375	0.00043
SLK – 11 – 14	25.957	73.91	161.14	0.46	0.05035	0.00202	0.23444	0.0083	0.03377	0.00043
SLK – 11 – 15	18.849	50.24	108.83	0.46	0.05102	0.00227	0.25419	0.01023	0.03613	0.00049
SLK – 11 – 16	57.82	222.12	350.44	0.63	0.05069	0.00128	0.23532	0.00421	0.03366	0.00037
SLK – 11 – 17	30.219	84.20	189.56	0.44	0.05169	0.00184	0.23744	0.00722	0.03331	0.00041
SLK – 11 – 18	27.533	65.75	171.62	0.38	0.05011	0.00145	0.23412	0.00533	0.03388	0.00038
SLK – 11 – 19	104.42	158.77	676.60	0.23	0.05184	0.00275	0.23723	0.01164	0.03318	0.00051
SLK – 11 – 20	55.72	185.00	346.59	0.53	0.05078	0.00121	0.23304	0.00375	0.03328	0.00036
SLK – 11 – 21	41.054	149.45	248.96	0.60	0.05122	0.00196	0.23599	0.00788	0.03341	0.00043
SLK – 11 – 22	74.34	344.04	451.63	0.76	0.05069	0.00139	0.23041	0.0048	0.03296	0.00037
SLK – 11 – 23	82.25	322.94	501.36	0.64	0.05123	0.00131	0.23574	0.00433	0.03337	0.00037
SLK – 11 – 24	29.707	93.44	184.54	0.51	0.05100	0.00146	0.23402	0.00521	0.03328	0.00037
SLK – 11 – 25	33.925	110.45	209.54	0.53	0.05084	0.00153	0.23457	0.00567	0.03346	0.00038
SLK – 11 – 26	48.34	177.72	292.96	0.61	0.05036	0.00356	0.23471	0.01576	0.03380	0.00063
SLK – 11 – 27	65.99	216.38	402.21	0.54	0.05029	0.00135	0.2346	0.00471	0.03383	0.00037
SLK – 11 – 28	39.081	81.65	245.39	0.33	0.05224	0.00137	0.24249	0.00466	0.03366	0.00037
SLK – 11 – 29	169.72	169.25	515.19	0.33	0.05676	0.00136	0.54385	0.00879	0.06948	0.00075
SLK – 11 – 30	81.29	345.48	500.64	0.69	0.05236	0.00131	0.23671	0.00418	0.03279	0.00036
SLK – 06 – 01	151.87	266.79	885.26	0.30	0.05113	0.00149	0.24902	0.00584	0.03531	0.00043
SLK – 06 – 02	173.20	329.11	1005.81	0.33	0.05122	0.00130	0.24950	0.00468	0.03532	0.00041
SLK – 06 – 03	95.64	200.62	615.96	0.33	0.04999	0.00165	0.21905	0.00613	0.03177	0.00040
SLK – 06 – 04	63.17	157.03	363.30	0.43	0.05218	0.00171	0.25251	0.00695	0.03509	0.00044
SLK – 06 – 05	56.47	122.37	324.75	0.38	0.05049	0.00176	0.24703	0.00740	0.03548	0.00046
SLK – 06 – 06	101.41	225.69	586.61	0.38	0.05113	0.00147	0.2488	0.00570	0.03528	0.00042
SLK – 06 – 07	46.086	108.19	264.22	0.41	0.05066	0.00220	0.24793	0.00973	0.03549	0.00050
SLK – 06 – 08	72.29	170.67	420.51	0.41	0.05335	0.00193	0.25708	0.00807	0.03494	0.00046
SLK – 06 – 09	105.57	209.11	618.89	0.34	0.05109	0.00150	0.24735	0.00583	0.03510	0.00042
SLK – 06 – 10	82.54	162.46	492.95	0.33	0.05198	0.00166	0.24668	0.00659	0.03441	0.00043
SLK – 06 – 11	39.019	80.67	203.85	0.40	0.05106	0.00221	0.27473	0.01074	0.03901	0.00055
SLK – 06 – 12	56.83	152.75	325.63	0.47	0.05155	0.00212	0.25021	0.00920	0.03519	0.00049
SLK – 06 – 13	101.06	200.54	596.58	0.34	0.05054	0.00140	0.24339	0.00526	0.03492	0.00041
SLK – 06 – 14	55.41	136.95	322.98	0.42	0.05096	0.00181	0.24575	0.00757	0.03497	0.00045
SLK – 06 – 15	72.44	162.12	424.80	0.38	0.05093	0.00163	0.24520	0.00654	0.03491	0.00043
SLK – 06 – 16	58.02	119.70	339.89	0.35	0.05139	0.00188	0.24867	0.00791	0.03509	0.00046
SLK – 06 – 17	95.81	212.55	559.18	0.38	0.05070	0.00151	0.24555	0.00591	0.03512	0.00043

(续表 2)

分析点号	Pb * 含量 (×10 ⁻⁶)	Th 含量 (×10 ⁻⁶)	U 含量 (×10 ⁻⁶)	Th/U	同位素比值					
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
SLK-06-18	57.07	127.08	331.51	0.38	0.05055	0.00197	0.24566	0.00845	0.03524	0.00047
SLK-06-19	163.87	370.36	956.33	0.39	0.05102	0.00135	0.24779	0.00499	0.03522	0.00041
SLK-06-20	85.69	190.97	502.85	0.38	0.05176	0.00151	0.25010	0.00583	0.03504	0.00042
SLK-06-21	59.90	194.13	344.10	0.56	0.05185	0.00193	0.24960	0.00810	0.03491	0.00046
SLK-06-22	128.26	272.28	752.88	0.36	0.05141	0.00160	0.24927	0.00640	0.03516	0.00043
SLK-06-23	68.42	117.02	412.09	0.28	0.05140	0.00195	0.24537	0.00820	0.03461	0.00046
SLK-06-24	54.49	122.56	317.91	0.39	0.05072	0.00176	0.24693	0.00737	0.03530	0.00045
SLK-06-25	80.62	188.64	477.69	0.39	0.05117	0.00278	0.24506	0.01242	0.03473	0.00056
SLK-06-26	61.29	145.86	394.04	0.37	0.05063	0.00272	0.22409	0.01118	0.03209	0.00051
SLK-06-27	71.59	154.31	418.06	0.37	0.05091	0.00159	0.24831	0.00639	0.03537	0.00043
SLK-06-28	48.96	98.41	260.17	0.38	0.05205	0.00179	0.27804	0.00820	0.03874	0.00049
SLK-06-29	57.52	133.24	341.54	0.39	0.05119	0.00170	0.24531	0.00690	0.03475	0.00044
SLK-06-30	81.30	155.89	474.66	0.33	0.05212	0.00163	0.25625	0.00665	0.03565	0.00044

表 3 松林口岩体锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Hf isotopic compositions of zirconium in Songlinkou Pluton

分析点号	U - Pb 年龄		同位素比值						模式年龄 (Ma)		
	(Ma)	1σ	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (t)	T _{DM1}	T _{DM} ^C
SLK-06-01	222.3	2.7	0.0331	0.000491	0.000872	0.000012	0.282525	0.000021	-8.74	1025.0300	1643.900
SLK-06-02	224.7	2.8	0.0285	0.000176	0.000742	0.000004	0.282552	0.000018	-7.79	983.9629	1583.523
SLK-06-03	223.5	2.6	0.0238	0.000197	0.000643	0.000004	0.282515	0.000016	-9.09	1032.515	1666.002
SLK-06-04	224.8	3.1	0.0281	0.000340	0.000730	0.000008	0.282531	0.000016	-8.52	1012.696	1630.259
SLK-06-05	221.3	2.6	0.0143	0.000017	0.000384	0.000001	0.282551	0.000015	-7.83	976.3242	1586.131
SLK-06-06	221.6	2.8	0.0182	0.000057	0.000491	0.000001	0.282558	0.000022	-7.56	968.4969	1569.008
SLK-06-07	222.3	2.9	0.0207	0.000095	0.000561	0.000002	0.282517	0.000014	-9.01	1027.225	1661.096
SLK-06-08	223.1	2.6	0.0243	0.000326	0.000671	0.000008	0.282578	0.000018	-6.86	945.7365	1524.874
SLK-06-09	222.0	2.6	0.0221	0.000041	0.000595	0.000001	0.282548	0.000016	-7.94	986.1739	1593.243
SLK-06-10	221.2	2.9	0.0276	0.000476	0.000762	0.000014	0.282565	0.000022	-7.33	966.5966	1554.746

3.4 松林口岩体成因类型

从研究区花岗岩岩石矿物组成来看,缺少白云母、石榴石等富铝的矿物,而含有 I 型花岗岩典型的角闪石和黑云母矿物。微量元素方面,岩石样品具有轻稀土富集、重稀土亏损的特点,轻、重稀土分异明显(LREE/HREE 为 2.67~8.31)。岩石相对富集 LILE,而亏损 P、Ta、Nb、Ti 等 HFSE。在 Zr-SiO₂ 图解(图 4a)和 Y-SiO₂ 图解(图 4b)中,样品均位于 I 型花岗岩区域内。元素 Rb 在成熟度高的地壳中富集,Sr 元素在成熟度低的地壳中富集,因此可以应用 Rb/Sr 值来反映岩浆源区物质的性质,王德滋等^[29]认为 S 型花岗岩的 Rb/Sr>0.9;I 型花岗岩 Rb/Sr<0.9。本次样品的 Rb/Sr 值除了暗色包体外,其余均为 0.12~0.76,平均 0.44,具有 I 型花岗岩的特点。从主要矿物组成、主微量元素特征来看,松林口岩体属于高钾钙碱性 I 型花岗岩。

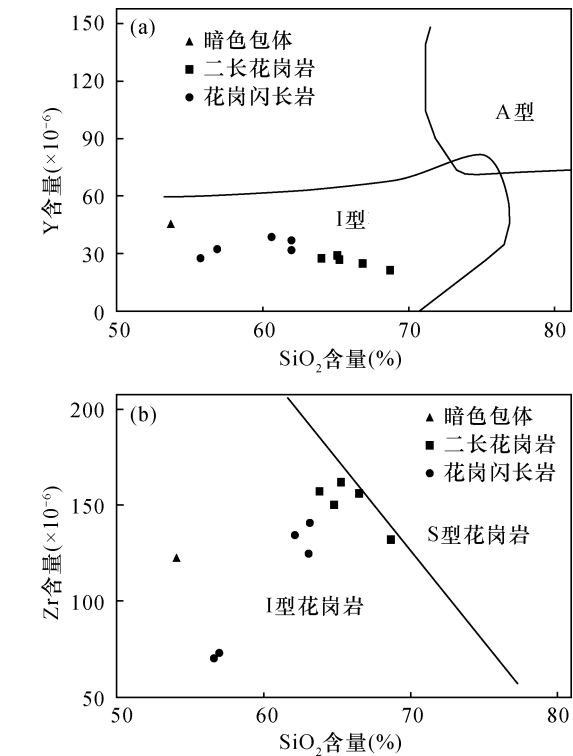
3.5 松林口岩体物质来源

吴福元等^[30]认为当 f_{Lu/Hf} 值小于 -0.72(硅铝质

地壳)和 -0.34(铁镁质地壳^[31])时,应采用二阶段模式年龄才能真实反映壳幔分异时源区物质分离的时代,本次二长花岗岩样品锆石 f_{Lu/Hf} 介于 -0.99~-0.97,故采用二阶段模式年龄。

锆石的 Hf 同位素亏损地幔模式年龄 T_{DM} 代表了锆石寄主岩源区物质脱离亏损地幔进入地壳的时间。如果 T_{DM} 等于或接近锆石 U-Pb 年龄,即 ε_{Hf}(t)>0,代表源区物质来源于亏损地幔或新生地壳;反之,如果 T_{DM} 大于锆石 U-Pb 年龄,即 ε_{Hf}(t)<0,说明该锆石是古老地壳岩石重熔作用的产物;ε_{Hf}(t) 值范围变化很大时,则可能是不同源区物质的混合^[32]。岩体与包体的锆石 Hf 模式年龄(T_{DM}^C) 远大于成岩年龄,表明源岩来自中元古界陆壳物质的部分熔融。

幔源岩石的 Nb/Ta 平均值为 17.4^[27],而下地壳岩石的 Nb/Ta 平均值是 8.3^[33]。本次研究的二长花岗岩和花岗闪长岩的 Nb/Ta 比值分别为 7.17~9.71(平均值 8.86)、9.17~12.35(平均值 11.13),二者的 Nb/Ta 特征更符合下地壳岩石成



a—Y-SiO₂图解; b—Zr-SiO₂图解。
图4 松林口岩体岩石类型图解(底图引自文献[28])
Fig. 4 Diagram of formation type of Songlinkou Pluton (Base map quoted from Reference [28])

分。赖绍聪等^[34]获得松林口中部岩体的 Nd 模式年龄 $T_{DM}(Nd)$ 为 1.33 ~ 1.41Ga,这一结果与岩体的 Hf 模式年龄较为一致,暗示岩体物源具有中元古代扬子克拉通的物质成分特点。

松林口二长花岗岩的 MgO 含量 1.49% ~ 2.7%, $Mg^\#$ 介于 46.73 ~ 51.41;花岗闪长岩 MgO 含量 3.51% ~ 6.92%, $Mg^\#$ 介于 50.97 ~ 61.27。岩体具高 MgO 和高 $Mg^\#$ 值特点,高于下地壳部分熔融 ($Mg^\#$ 通常 <40)^[35],反映了岩浆来源并非仅仅是下地壳的熔融,可能还有基性的幔源成分加入。松林口岩体具有高 Ba 值(岩体平均值 620×10^{-6} ,暗色包体为 1380×10^{-6}),明显高于陆壳的钡值(Ba 含量 390×10^{-6})^[36],王中亮等^[37]认为花岗岩中高 Ba-Sr 可能是壳幔岩浆混合的结果。

Nb/Ta 和 Rb/Sr 比值将花岗闪长岩和二长花岗岩划分为两个不同区域,二长花岗岩 Nb/Ta 平均值为 8.86,与下地壳的值接近(Nb/Ta = 8.3);而花岗闪长岩 Nb/Ta 平均值为 11.13,明显高于下地壳值。岩体和包体中的 Cr(26.1×10^{-6} ~ 263×10^{-6})和 Ni (9.46×10^{-6} ~ 75.6×10^{-6})与橄榄岩幔源岩浆相比(Cr 含量 $>1000 \times 10^{-6}$,Ni 含量为 200×10^{-6} ~ 450

$\times 10^{-6}$)要低得多^[38],所以松林口岩体可能是富集的上地幔岩浆混入,而并非超基性的原始地幔岩浆。因此,作者认为松林口岩体主要是由松潘-甘孜造山带下部的扬子板块中元古代的结晶基底部分熔融形成的,并且可能混有少量的富集上地幔物质。

3.6 与甲基卡二云母花岗岩的对比

3.6.1 成岩时代

关于甲基卡矿区岩体与伟晶岩脉的测年工作,前人已开展了大量研究。唐国凡等^[12]采用全岩-Rb-Sr 法测得甲基卡二云母花岗岩年龄为 $214.65 \pm 1.6Ma$,花岗伟晶岩年龄为 $189.49 \pm 3.14Ma$;周雄等采用锡石 U-Pb 定年测得甲基卡 134 号伟晶岩脉的年龄为 $203.7 \pm 4.6Ma$ (数据暂未发表);郝雪峰等^[39]采用锆石 U-Pb 定年测得二云母花岗岩年龄为 $223 \pm 1Ma$,含矿伟晶岩锆石 U-Pb 年龄为 $216 \pm 2Ma$,含矿伟晶岩中铌钽氧化物 U-Pb 年龄为 $214 \pm 2Ma$ 。

前人对松林口岩体作了部分测年工作,胡健民等^[16]采用锆石 U-Pb 定年结果为 $214.8 \pm 2.5Ma$;王全伟^[17]采用锆石 LA-ICP-MS 测年结果为 $227.1 \pm 5.0Ma$;Xiao 等^[18]测得松林口黑云母石英闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 $223.6 \pm 4Ma$;Chen 等^[19]认为松林口岩体年龄为 $209 \pm 1Ma$;邓红等^[20]采用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果为 $214 \pm 1Ma$ 。本次测得松林口花岗闪长岩、二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $212.6 \pm 1.0Ma$ 、 $222.4 \pm 1.1Ma$,松林口二长花岗岩的年龄与甲基卡二云母花岗岩的年龄较为接近,而花岗闪长岩则相对甲基卡二云母花岗岩更年轻,二者相差约 10Ma。锡石与伟晶岩同期结晶生长,是含锡石伟晶岩稀有金属矿床直接定年的理想矿物,可以较为准确地作为伟晶岩的成矿年龄,因此将 $203.7 \pm 4.6Ma$ 作为甲基卡 134 号伟晶岩脉的成矿年龄较为稳妥。从成岩成矿年龄可以看出,甲基卡成矿伟晶岩脉经历了较长时间(约 20Ma)的结晶分异与岩浆演化,Li、Be 等不相容元素倾向于进入演化后期的岩浆中聚集。

3.6.2 地球化学特征

甲基卡二云母花岗岩属高钾钙碱性强过铝质岩石,SiO₂ 平均含量为 74.57%, $Mg^\#$ 值较低(29.85 ~ 37.94),具有较高含量的 K₂O,Na₂O/K₂O 值小于 1,A/CNK 值均大于 1.1,Li 元素平均含量为 356.5×10^{-6} , $\Sigma REE = 31.18 \times 10^{-6}$ ~ 41.67×10^{-6} ,表现出 Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta 等元素富集,稀土总量较低的特征。松林口岩体 SiO₂ 含量在 56.56% ~ 68.99% 之间,全碱平均含量 5.52%,K₂O/Na₂O = 1.02 ~ 1.93, $Mg^\#$ 值总体为 46.73 ~ 61.27,相较于甲基卡岩体而言,松林口

岩体更偏中性。松林口岩体中 Li 元素平均含量为 45.03×10^{-6} , 远低于甲基卡岩体中 Li 元素平均含量, Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素相对亏损。

二长花岗岩表现为低 Sr、Rb, 高 Y、Yb 的特点; 花岗闪长岩表现为高 Sr、Y、Yb, 低 Rb 的特点。甲基卡二云母花岗岩表现为低 Sr、Y、Yb, 高 Rb; 其中 Sr 平均含量为 91×10^{-6} , Y 平均含量为 8.25×10^{-6} , Yb 平均含量为 0.4×10^{-6} , Rb 平均含量为 401×10^{-6} , 伟晶岩中 Rb 含量 $> 1000 \times 10^{-6}$ 。

岩石微量元素结果表明, 甲基卡二云母花岗岩较松林口岩体具有低 Sr、Y、Yb, 高 Nb、Ta、Rb 值的特点, 其低 Nb/Ta 值和高 Rb/Sr 值显示甲基卡二云母花岗岩体的结晶分异演化可能较松林口岩体更成熟。

4 结论

本文以松潘—甘孜造山带内的松林口岩体为研究对象, 对其开展了详细的野外地质调查、岩石学、地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和 MC-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素等研究工作。证实松林口岩体为中酸性的复式岩体, 岩体的 SiO_2 含量为 56.56% ~ 68.99%, 全碱含量为 3.78% ~ 6.82%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 介于 1.02 ~ 1.93, σ 为 1.01 ~ 1.93, 岩石属于高钾钙碱性岩系列, A/CNK 值小于 1.1。其锆石 U-Pb 年龄显示边部花岗闪长岩结晶年龄为 $212.6 \pm 1.0\text{Ma}$ 、中部二长花岗岩结晶年龄为 $222.4 \pm 1.1\text{Ma}$; 甲基卡二云母花岗岩成岩年龄是 $223 \pm 1\text{Ma}$, 岩浆演化晚期的伟晶岩脉年龄为 $203.7 \pm 4.6\text{Ma}$ 。二长花岗岩的锆石 Hf 同位素结果为: $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 介于 -9.09 ~ -6.86 之间, 二阶段模式年龄 T_{DM}^{C} 为 $1524.9 \sim 1666\text{Ma}$ 。

通过对比松林口岩体与甲基卡二云母花岗岩的成岩时代和岩石地球化学之间的差异, 松林口岩体为高钾钙碱性 I 型花岗岩, 而甲基卡花岗岩为 S 型花岗岩, 两个岩体侵位时代为晚三叠世。松林口岩体锆石 Hf 同位素、高 $\text{Mg}^\#$ 值和 Nb/Ta 等微量元素特征指示岩浆物质可能来源于中元古代扬子克拉通基底部分熔融并混有富集上地幔物质, 而甲基卡岩体的岩浆物质更可能来源于增厚上地壳西康群部分熔融, 并且成矿伟晶岩脉与甲基卡穹窿构造紧密联系。二个岩体的物质来源、岩浆演化程度和成矿构造条件的不同, 可能是松林口岩体不具有甲基卡式锂稀有金属成矿的主要原因。可以认为该地区 S 型花岗岩的成矿可能性较 I 型花岗岩更高, 进一步加强该地区 S 型花岗岩的研究工作对总结区域性稀有金属成矿具有重要意义。

致谢: 本文在野外工作中, 得到四川省地质调查院秦宇龙高级工程师、李名则博士的帮助, 论文的撰写与修改得到了中国地质科学院矿产综合利用研究所朱志敏研究员的指导和建议, 两位匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见, 在此一并致谢。

5 参考文献

- [1] Bruguier O, Lancelot J R, Malavieille J. U-Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan-Ganze flysch (Central China): Provenance and tectonic correlations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 152(1): 217-231.
- [2] Harrowfield M J, Wilson C J L. Indosinian deformation of the Songpan Garzê Fold Belt, northeast Tibetan Plateau[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(1): 101-117.
- [3] 秦宇龙, 李名则, 熊昌利, 等. 川西甲基卡地区侏倭组沉积物源分析——来自碎屑锆石 U-Pb 年龄证据[J]. *地质学报*, 2020, 94(8): 2400-2409.
Qin Y L, Li M Z, Xiong C L, et al. Depositional provinces and tectonic background of the Zhuwo Formation in the Jiajika Region, western Sichuan Province: Evidence from detrital zircon U-Pb ages[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(8): 2400-2409.
- [4] 许志琴. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-190.
Xu Z Q. The orogenic process of Songpan-Ganzi orogenic belt, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-190.
- [5] 蔡宏明. 松潘—甘孜褶皱带印支期花岗岩类和火山岩类成因及深部作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
Cai H M. Petrogenesis of Indosinian granitoids and volcanic rocks in Songpan-Garze fold belt: Constrains for deep geologic processes[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [6] 费光春, 杨峥, 杨继忆, 等. 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*, 2020, 94(3): 836-849.
Fei G C, Yang Z, Yang J Y, et al. New precise timing constrain 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*, 2020, 94(3): 836-849.
- [7] 岳相元, 张贻, 周雄, 等. 川西可尔因矿集区稀有金属矿床成矿规律与找矿方向[J]. *矿床地质*, 2019, 38(4): 867-876.
Yue X Y, Zhang Y, Zhou X, et al. Metallogenic regularity and prospecting direction of rare metal deposits in Keeryin ore concentration area, western Sichuan[J].

- Mineral Deposits, 2019, 38(4): 867-876.
- [8] 王登红, 刘丽君, 侯江龙, 等. 初论甲基卡式稀有金属矿床“五层楼+地下室”勘查模型[J]. 地学前缘, 2017, 24(5): 1-7.
- Wang D H, Liu L J, Hou J L, et al. A preliminary review of the application of “Five levels + Basement” model for Jiajika-style rare metal deposits [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(5): 1-7.
- [9] 刘丽君, 王登红, 杨岳清, 等. 四川甲基卡新三号稀有金属矿脉成矿特征的初步研究[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(1): 50-59.
- Liu L J, Wang D H, Yang Y Q, et al. Metallogenic characteristics of X03 rare metal vein in Jiajika of Sichuan [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(1): 50-59.
- [10] 王登红, 李建康, 付小方. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义[J]. 地球化学, 2005, 34(6): 541-547.
- Wang D H, Li J K, Fu X F. The metallogenic times and significance of the rare metal deposits of Jiajika pegmatite in Sichuan [J]. Geochimica, 2005, 34(6): 541-547.
- [11] 杨岳清, 王登红, 刘善宝, 等. 四川甲基卡两类锂辉石矿体共存机制及其找矿意义[J]. 地质学报, 2020, 94(1): 287-302.
- Yang Y Q, Wang D H, Liu S B, et al. The co-occurrence mechanism of two types spodumene ore bodies and their prospecting significance in Jiajikan, Sichuan Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(1): 287-302.
- [12] 唐国凡, 吴盛先. 四川省康定县甲基卡花岗伟晶岩矿床地质研究报告[R]. 1984: 1-104.
- Tang G F, Wu S X. Geological study on Jiajika granite pegmatite deposit in Kangding County of Sichuan Province [R]. 1984: 1-104.
- [13] 于扬, 王登红, 于泓, 等. 川西甲基卡大型锂资源基地绿色调查及环境评价指标体系的建立[J]. 岩矿测试, 2019, 38(5): 534-544.
- Yu Y, Wang D H, Yu F, et al. Study on the index system of green investigation and environmental evaluation for the Jiajika large lithium mineral resource base, western Sichuan, China [J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(5): 534-544.
- [14] 高娟琴, 于扬, 王登红, 等. 川西甲基卡锂资源富集区根系土壤重金属含量水平及时空分布特征[J]. 岩矿测试, 2019, 38(6): 681-692.
- Gao J Q, Yu Y, Wang D H, et al. The content and distribution characteristics of heavy metals in root soils in the Jiajika lithium resource area, western Sichuan Province [J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(6): 681-692.
- [15] 李贤芳, 田世洪, 王登红, 等. 川西甲基卡锂矿床花岗岩与伟晶岩成因关系: U-Pb 定年、Hf-O 同位素和地球化学证据 [J]. 矿床地质, 2020, 39(2): 273-304.
- Li X F, Tian S H, Wang D H, et al. Genetic relationship between pegmatite and granite in Jiajika lithium deposit in western Sichuan: Evidence from zircon U-Pb dating, Hf-O isotope and geochemistry [J]. Mineral Deposits, 2020, 39(2): 273-304.
- [16] 胡健民, 孟庆任, 石玉若, 等. 松潘—甘孜地体内花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 867-880.
- Hu J M, Meng Q R, Shi Y R, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan—Ganzi terrane and its implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 867-880.
- [17] 王全伟. 川西地区花岗岩及其成矿系列 [M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- Wang Q W. Granite and its metallogenic series in western Sichuan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [18] Xiao L, Zhang H F, Clemens J D, et al. Late Triassic granitoids of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Geochronology, petrogenesis and implications for tectonic evolution [J]. Lithos, 2007, 96(3-4): 436-452.
- [19] Chen Q, Sun M, Zhao G C, et al. Origin of the mafic microgranular enclaves (MMEs) and their host granitoids from the Tagong Pluton in Songpan—Ganze terrane: An igneous response to the closure of the Paleo-Tethys ocean [J]. Lithos, 2017, 290-291: 1-17.
- [20] 邓红, 唐渊, 骆志红, 等. 松潘—甘孜造山带东缘塔公岩体岩石学、同位素年代学特征及其构造意义 [J/OL]. 地球科学, 1-26 [2020-09-25].
- Deng H, Tang Y, Luo Z H, et al. Petrology and isotope geochronology of the Tagong granite in the eastern part of Songpan—Ganzi fold belt and its tectonic significance, China [J/OL]. Earth Science, 1-26 [2020-09-25].
- [21] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1-2): 59-79.
- [22] 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析 [J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511-1520.
- Yuan H L, Wu F Y, Gao S, et al. Age determination and composition analysis of rare earth elements U-Pb zircon laser probe for new generation invader in northeast China [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1511-1520.
- [23] Ludwig K R. ISOPLLOT 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- [24] Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. 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, 2008, 247: 100 – 118.
- [25] Bao Z A, Chen L, Zong C L, et al. Development of pressed sulfide powder tablets for *in situ*, sulfur and lead isotope measurement using LA – MC – ICP – MS [J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2017, 421: 255 – 262.
- [26] 李名则, 秦宇龙, 李峥, 等. 川西甲基卡二云母花岗岩与伟晶岩脉地球化学特征及其地质意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(3): 366 – 378.
- Li M Z, Qin Y L, Li Z, et al. Geochemical characteristics of two – mica granite and granite pegmatite in Jiajika area, western Sichuan, and their geological implications [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(3): 366 – 378.
- [27] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313 – 345.
- [28] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A – type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1982, 80(2): 189 – 200.
- [29] 王德滋, 刘昌实. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比 [J]. 岩石学报, 1993, 9(1): 44 – 54.
- Wang D Z, Liu C S. Comparison between Tonglu I – type and Xiangshan S – type lava [J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9(1): 44 – 54.
- [30] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu – Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185 – 220.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, et al. Lu – Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 185 – 220.
- [31] Amelin Y, Lee D, Halliday A N. Early – middle archaean crustal evolution deduced from Lu – Hf and U – Pb isotopic studies of single zircon grains [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(24): 4205 – 4225.
- [32] Kröner A, Kovach V, Belousova E, et al. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Gondwana Research, 2014, 25(1): 103 – 125.
- [33] Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(7): 1217 – 1232.
- [34] 赖绍聪, 赵少伟. 川西北塔公石英闪长岩地球化学特征和岩石成因 [J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(3): 1 – 13.
- Lai S C, Zhao S W. Geochemistry and petrogenesis of Quartz diorite in Tagongarea of northwest Sichuan [J]. Journal of Geoscience and Environment, 2015, 37(3): 1 – 13.
- [35] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium – rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. Nature, 1993, 362: 144 – 146.
- [36] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [M] // Holland H D, Turekian K K. Treatise on geochemistry (2nd edition), 2014: 1 – 52.
- [37] 王中亮, 赵荣新, 张庆, 等. 胶西北高 Ba – Sr 郭家岭型花岗岩岩浆混合成因: 岩石地球化学与 Sr – Nd 同位素约束 [J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2595 – 2608.
- Wang Z L, Zhao R X, Zhang Q, et al. Magma mixing for the high Ba – Sr Guojialing – type granitoids in northwest Jiaodong Peninsula: Constraints from petrogeochemistry and Sr – Nd isotopes [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(9): 2595 – 2608.
- [38] Karsli O, Chen B, Aydin F, et al. Geochemical and Sr – Nd – Pb isotopic compositions of the Eocene Dolek and Sariqeqek Plutons, eastern Turkey: Implications for magma interaction in the genesis of high – K calc – alkaline granitoids in a postcollision extensional setting [J]. Lithos, 2007, 98: 67 – 96.
- [39] 郝雪峰, 付小方, 梁斌, 等. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义 [J]. 矿床地质, 2015, 34(6): 1199 – 1208.
- Hao X F, Fu X F, Liao B, et al. Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance [J]. Mineral Deposits, 2015, 34(6): 1199 – 1208.

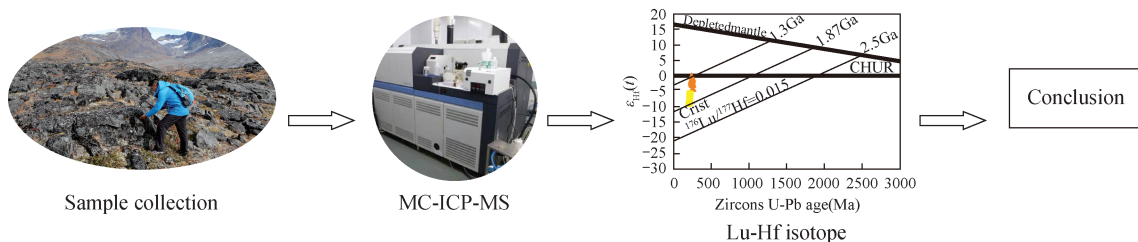
Zircon LA – ICP – MS U – Pb Age and Geochemical Features of the Songlinkou Pluton, Western Sichuan

YE Ya – kang^{1,2}, ZHOU Jia – yun^{1,2}, ZHOU Xiong^{1,3}

- (1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 610041, China;
2. Technology Innovation Center of Rare Earth Resources Development and Utilization, China Geological Survey, Chengdu 610041, China;
3. Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610041, China)

HIGHLIGHTS

- (1) Zircon LA-ICP-MS U-Pb age indicated that the emplacement of the Songlinkou pluton was in the late Triassic period.
- (2) Zircon MC-ICP-MS Lu-Hf isotope results indicated that the source of pluton was Mesoproterozoic basement.
- (3) The high potassium, calcium-alkaline I-type granite of the Songlinkou pluton lacked favorable geological conditions for rare metal mineralization.



ABSTRACT

BACKGROUND: The Songlinkou pluton is located in the eastern margin of the Songpan—Ganzi orogenic belt, which is adjacent to the pegmatite-lithium deposit of Jiajika.

OBJECTIVES: To explore the similarities and differences between Songlinkou pluton and Jiajika mineralized intrusive rocks, and to study geological conditions of mineralization and magma sources of the pluton.

METHODS: Major and trace elements were determined by X-ray fluorescence spectrometry (XRF) and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), respectively. Zircon U-Pb age and Hf isotopes were analyzed by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) and multiple collector-inductively coupled plasma-mass spectrometry (MC-ICP-MS), respectively.

RESULTS: The Songlinkou pluton contained diorite enclaves, and has SiO_2 contents of 56.56%–68.99%, total alkali of 3.78%–6.82%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ of 1.02–1.93, and Rittmann indices of 1.01–1.93. The rock has relative high $\text{Mg}^\#$ values ($\text{Mg}^\# = 46.73\text{--}61.27$). The rock belongs to the high-potassium calcium-alkaline type I granite series showed light rare earth enrichment with LREE/HREE ratios of 2.67–8.31, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ of 2.11–9.74. All samples have strongly negative Eu anomaly. It was rich in LILE, and depleted in Ta, Nb, P and Ti. The zircon U-Pb results of the granodiorite and monzogranite were $212.6 \pm 1.0\text{Ma}$ (MSWD=0.55) and $222.4 \pm 1.1\text{Ma}$ (MSWD=0.39), respectively. The $\varepsilon_\text{Hf}(t)$ of zircon in monzogranite ranged from -9.09 to -6.86 , and T_DM^C ranged from 1524.874Ma to 1666.002Ma.

CONCLUSIONS: The Songliankou pluton is produced by the partial melting of the middle Proterozoic Yangtze craton basement mixed with the enriched upper mantle. The Jiajika S-type granite is formed by partial melting of the upper crust, and is different from Songliankou pluton in terms of magma sources, evolution and mineralization tectonic conditions; this may be the main reason why the Songlinkou pluton does not have lithium rare metal mineralization.

KEY WORDS: Songlinkou pluton; zircon U-Pb chronology; zircon Lu-Hf isotope; geochemistry; rare metal mineralization