

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.050

小兴安岭翠峦地区早侏罗世 A 型 花岗岩成因与动力学背景

杨元江¹, 邓昌州², 李成禄¹, 杨文鹏¹, 符安宗¹,
郑 博¹, 袁茂文³, 张立东¹

(1. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081;
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 小兴安岭伊春翠峦地区地处洋陆转换关键位置, 受古亚洲洋和太平洋构造域的双重影响, 是研究区域构造演化的重要部位。该区域中生代花岗岩形成构造环境与动力学机制长期存在分歧, 一定程度上制约了区域构造演化历史的反演, 也影响区域找矿工作的部署。本文对伊春翠峦地区碱长花岗岩进行全岩元素组成以及锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素组成分析, 阐释岩石成因和源区属性, 并探讨成岩构造环境。结果显示, 岩浆锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(189.1 \pm 1.6) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.1, n = 20$), 指示岩体侵位于早侏罗世。岩石富 Si、K 和 Na 元素, 贫 Ca、Mg 元素; 富集 Th、Zr、Hf、Ce 和 Y 元素, 亏损 Ba、Sr、Eu 和 Ti 元素; 锆石饱和温度高 ($804 \sim 810^\circ\text{C}$), 显示岩石属于 A 型花岗岩。岩石稀土元素总量高 ($\sum \text{REE} = 192.60 \times 10^{-6} \sim 232.80 \times 10^{-6}$), Nb、Ta 和 Ti 等元素亏损, Th 元素富集, 指示其具壳源特征。锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 1.46 \sim 2.27$, 对应的地壳模式年龄 $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = 1133 \sim 1088 \text{ Ma}$, 表明岩浆源区物质主要为中元古代新生地壳。综合分析认为, 伊春地区早侏罗世岩浆活动与太平洋板块俯冲及伸展作用密切相关。本研究成果为深入理解小兴安岭地区早侏罗世构造演化提供了新的年代学与岩石学约束。

关键词: 小兴安岭; A 型花岗岩; Hf 同位素; 岩石地球化学; 构造意义

中图分类号: P581; P597.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2023)06-1597-12

Genesis and Tectonic Significance of Early Jurassic Cuiluan A-type Granite in the Lesser Hinggan Mountains

YANG Yuanjiang¹, DENG Changzhou², LI Chenglu¹, YANG Wenpeng¹,
FU Anzong¹, ZHENG Bo¹, YUAN Maowen³, ZHANG Lidong¹

(1. Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Harbin, Heilongjiang 150036, China;
2. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China;
3. School of Earth and Resources, China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Cuiluan area (Yichun) in the Lesser Hinggan Mountains is located at a critical location for land-sea transition, and is also affected by both the Paleo-Asian Ocean and Pacific tectonic domains. Hence, it has become an important part of the study of regional tectonic evolution. There are different viewpoints on the tectonic setting and geodynamic mechanism for the regional Mesozoic granite emplacement. This constrains the reconstruction of regional tectonic evolution, and hinder the advance of regional prospecting. Basing on the study in geochronology, lithogeochemistry and Hf isotope of the Early Jurassic Cuiluan alkali feldspar granite, we discussed the granitic genesis and its geological significance, which provides a new chronological constraint for better understanding the Early Jurassic regional tectonic evolution. Zircon U-Pb dating results show that the

收稿日期: 2022-09-14; 改回日期: 2023-04-17。

基金项目: 黑龙江省地质矿产局科研项目(HKY202301); 黑龙江省国土资源公益项目(GY-2018003)。

作者简介: 杨元江, 男, 高级工程师, 1982 年出生, 地质学专业, 主要从事地质矿产勘查及研究工作。Email: geolj@qq.com。

intrusive age of alkali feldspar granite is (189.1 ± 1.6) Ma (Early Jurassic). The granitic rock is rich in Si, K, and Na and poor in Ca and Mg. It is enriched in Th, Zr, Hf, Ce and Y, but depleted in Ba, Sr, Eu, Nb, Ta and Ti. The zircon saturation temperature is high ($804 - 810$ °C). The total REE content is high ($\Sigma\text{REE} = 192.60 \times 10^{-6} - 232.80 \times 10^{-6}$). These characteristics show that the granite is A-type, with crustal source affinity. The zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ranges from $+1.46$ to $+2.27$, with the corresponding crustal model age $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = 1133 - 1088$ Ma, indicating that the magma source consists mainly of the juvenile Mesoproterozoic crustal material. On the basis of previous works, we consider that the Early Jurassic magmatic activity at Yichun was closely related to the Paleo-Pacific subduction and attendant tectonic extension of the supra-subduction plate.

Key words: Lesser Hinggan Mountains; A-type granite; Hf isotope; lithogeochemistry; tectonic significance

0 引言

花岗岩的研究可以解决区域地质演化、大地构造环境以及成岩与成矿等问题^[1-2]。东北地区显生宙花岗岩广泛发育,被称为巨型花岗岩省^[3],其主要的岩石成因类型是 A 型和 I 型^[4]。小兴安岭地处兴蒙造山带东段,该地区花岗岩的时代主要划分出加里东期^[5]、印支期^[6]和燕山期^[7]。

前人对小兴安岭地区中生代花岗岩做了大量年代学与地球化学方面的研究^[8-10],取得了一些成果,研究内容有以下 4 个方面:(1) 松嫩地块与佳木斯地块之间拼合(裂解)演化历史。李伟明研究了区域 425 ~ 145 Ma 的演化历史,认为 185 ~ 145 Ma 佳木斯地块与松嫩地块碰撞拼合^[11];董玉研究了(250 ~ 160) Ma 的演化历史,认为(180 ~ 160) Ma 佳木斯与松嫩地块拼合^[10]。(2) 小兴安岭地区中生代 A 型花岗岩的形成所属大地构造背景。有学者认为主要与古亚洲洋闭合后伸展有关^[12-13],但更多学者认为与太平洋板块向西俯冲过程中的伸展更密切^[14-23]。(3) 古亚洲洋与太平洋构造域转换的时间是三叠纪或者中侏罗世^[24-26]。(4) 蒙古—鄂霍次克洋构造域的南向俯冲是否影响至该地区的问题^[27-28]。由此可见,前人对小兴安岭地区中生代花岗岩形成的构造环境及地球动力学机制的认识还存在分歧,一定程度上制约了区域构造演化历史的反演,也影响了区域找矿工作的部署。本文以鲜有报道的伊春翠峦地区碱长花岗岩为研究对象,通过研究其锆石年代学及全岩地球化学特征,结合锆石 Hf 同位素组成特征,探讨岩石形成时代、岩石成因与源区属性以及成岩动力学背景等。研究成果为加深对小兴安岭中生代构造演化及成岩成矿作用的理解提供新的数据支持。

1 地质背景

中亚造山带是西伯利亚板块与华北、塔里木板块之间的古亚洲洋消减而形成的巨型造山带(图 1(a))^[29],在中国境内的部分被学者定义为兴蒙造山带。自西向东主要由额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块和佳木斯地块等组成,分割其间的断裂有新林—喜桂图断裂、黑河—贺根山断裂和牡丹江—嘉荫断裂(图 1(b))^[11]。

小兴安岭地区已知的最古老地层为中—新元古界东风山岩群,岩浆活动主要有早古生代、晚古生代以及中生代,嘉荫—牡丹江断裂为松嫩地块与佳木斯地块的南北向分界(图 1(b)和 2(a)),该断裂活动时间为晚古生代—早中生代^[30]。研究区内地层由古生代铅山组灰岩、大理岩,土门岭组板岩、砂砾岩,五道岭组流纹岩、火山碎屑岩,中生代宁远村组流纹岩、火山碎屑岩及嫩江组细碎屑砂岩、泥岩等组成。侵入岩有中奥陶世花岗闪长岩、二长花岗岩,早侏罗世碱长花岗岩等(图 2(b))。

2 样品信息及测试分析

锆石 U—Pb 测年的样品编号为 CL3,采集坐标为 $128^{\circ}34'14''\text{E}$ 和 $47^{\circ}42'33''\text{N}$,平面位置见图 2(b);6 件地球化学测试样品采自翠峦碱长花岗岩体钻探岩心的不同位置。样品岩性为细中粒碱长花岗岩,花岗结构,块状构造(图 3(a)),由碱性长石(约 55%)、斜长石(约 17%)、石英(约 25%)和黑云母(约 3%)组成。其中碱性长石为半自形板状,主要为条纹长石和微斜长石,粒径 0.8 ~ 4.2 mm。斜长石呈自形、半自形板状,聚片双晶发育,粒径 1.2 ~ 3.5 mm;石英为它形粒状,粒径 0.5 ~ 3.1 mm;黑云母为黑褐色片状,粒径 0.4 ~ 2.5 mm(图 3(b)~(d))。

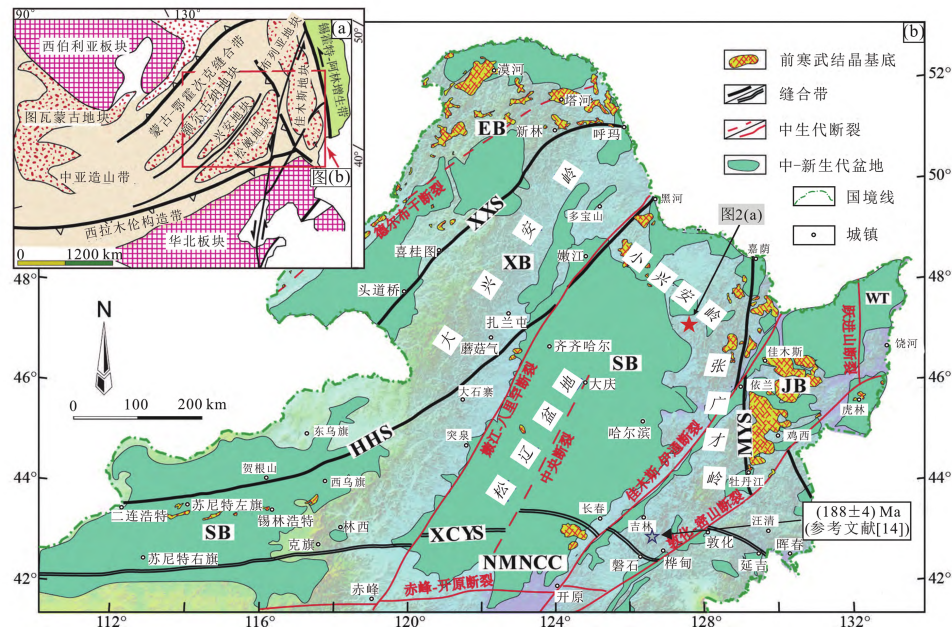


图1 中亚造山带构造简图(a)和中国东北地区大地构造单元划分图(b) (据文献[11]修改)

Fig. 1 Tectonic map of the Central Asian Orogenic Belt (a) and NE China (b) (modified after reference [11])

EB. 额尔古纳地块; HHS. 黑河—贺根山断裂; JB. 佳木斯地块; MYS. 嘉荫—牡丹江断裂; SB. 松嫩地块; XB. 兴安地块; XXS. 新林—喜桂图断裂

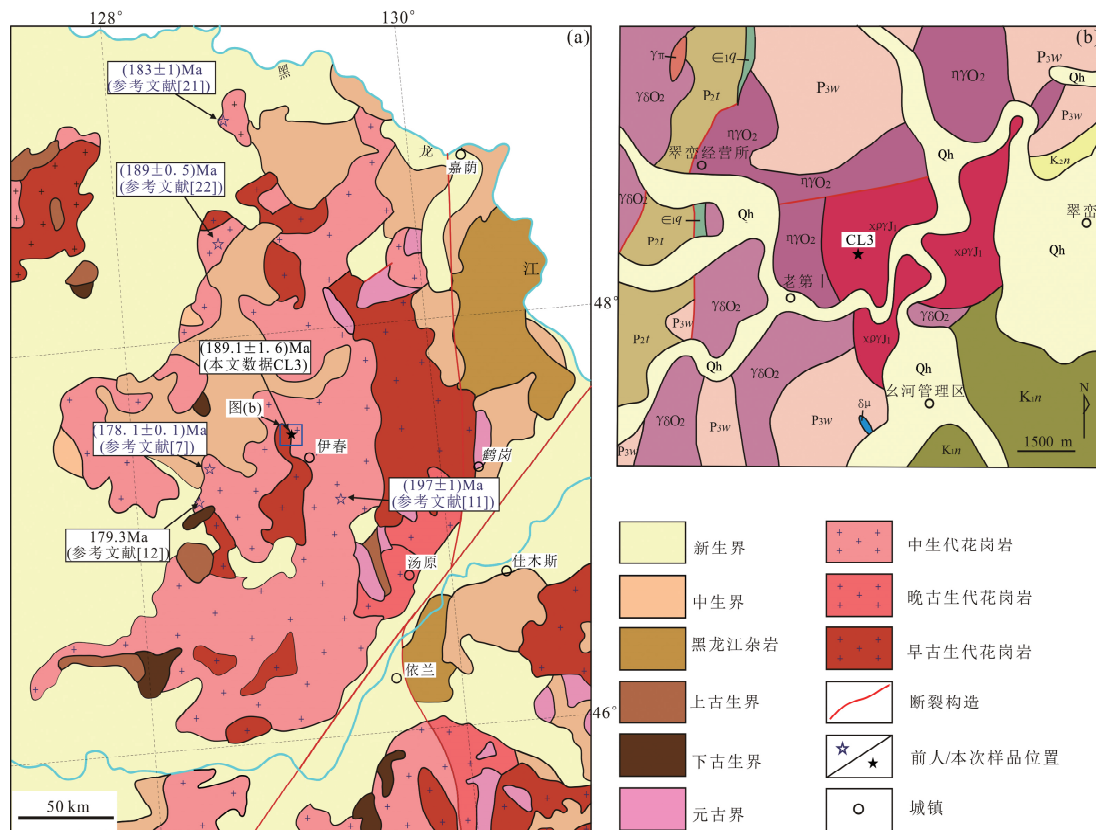


图2 伊春地区花岗岩分布简图(a) (据文献[31]修编)和研究区地质图(b)

Fig. 2 Distribution map of granite in Yichun area (a) (modified after reference [31]) and geological map of the study area (b)

Qh. 第四系; K_2n . 上白垩统嫩江组; K_1n . 下白垩统宁远村组; P_3w . 上二叠统五道岭组; P_2t . 中二叠统土门岭组; ϵ_1q . 下寒武统铅山组; $\chi\rho\gamma_1$. 早侏罗世碱长花岗岩; $\gamma\delta O_2$. 中奥陶世花岗闪长岩; $\eta\gamma O_2$. 中奥陶世二长花岗岩; $\gamma\pi$. 花岗斑岩脉; $\delta\mu$. 闪长玢岩脉

分析测试工作均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石制靶、U-Pb 同位素测年及微区原位 Lu-Hf 同位素分析测试方法见参考文献 [32-33], 主量元素分析测试过程见参考文献 [34]; 稀土微量元素测试利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成, 测试流程见参考文献 [35-37]。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石 U-Pb 同位素测试数据见表 1。阴极发光图像显示锆石为自形, 粒径 50~150 μm , 发育振荡环带(图 4), Th/U 值为 0.44~0.81, 指示锆石为岩浆成因。20 个锆石测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围为 $(182.6 \pm 2.0) \sim (194.4 \pm 3.3)$ Ma(图 5(a)), 谐和年龄为 (189.1 ± 1.4) Ma(MSWD = 4.7), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (189.1 ± 1.6) Ma(MSWD = 2.1)(图 5(b)), 二者在误差范围内基本一致, 反映该年龄为碱长花岗岩的结晶年龄, 与前人报道的同属松嫩地块东缘中生代花岗岩的侵位时代相近^[12-14, 38]。

3.2 全岩主微量元素

样品富 Si($\text{SiO}_2 = 72.39\% \sim 74.04\%$)、富 Na

($\text{Na}_2\text{O} = 3.44\% \sim 3.88\%$) 和富 K($\text{K}_2\text{O} = 4.85\% \sim 5.87\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.28 \sim 1.71$), 贫 Ca($\text{Ca}_2\text{O} = 0.94\% \sim 1.10\%$)、贫 Fe($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1.63\% \sim 2.00\%$)、贫 Mg($\text{MgO} = 0.29\% \sim 0.39\%$, $\text{Mg}^\# = 14.39 \sim 18.18$)、贫 P($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.05\% \sim 0.06\%$) 和贫 Ti($\text{TiO}_2 = 0.24\% \sim 0.28\%$)(表 2), 在花岗岩 TAS 图解中全部投点于亚碱性花岗岩区域(Ir 线之下)(图 6(a)), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 6(b))中均落入高钾钙碱性和钾玄岩系列区域。样品全碱含量较高($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.58\% \sim 8.89\%$), 铝含量较高($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.13\% \sim 13.91\%$, 碱度指数 $A/\text{NK} = 1.13 \sim 1.16$, 铝饱和指数 $A/\text{CNK} = 0.99 \sim 1.01$), 在 $A/\text{CNK}-A/\text{NK}$ 关系图中样品点位于偏铝质区域(图 6(c))。

碱长花岗岩稀土元素含量较高($\sum \text{REE} = 192.60 \times 10^{-6} \sim 232.80 \times 10^{-6}$), 轻重稀土元素分馏明显, 富集轻稀土元素($\text{LREE}/\text{HREE} = 8.50 \sim 11.54$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 8.49 \sim 11.88$), 可能是因为岩浆部分熔融源区存在石榴石相。钕强烈亏损($\delta\text{Eu} = 0.29 \sim 0.36$), Sr/Y 比值极低($\text{Sr}/\text{Y} = 2.65 \sim 3.60$), 表明岩浆在上升侵位过程中发生斜长石分离结晶。在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 7(a))

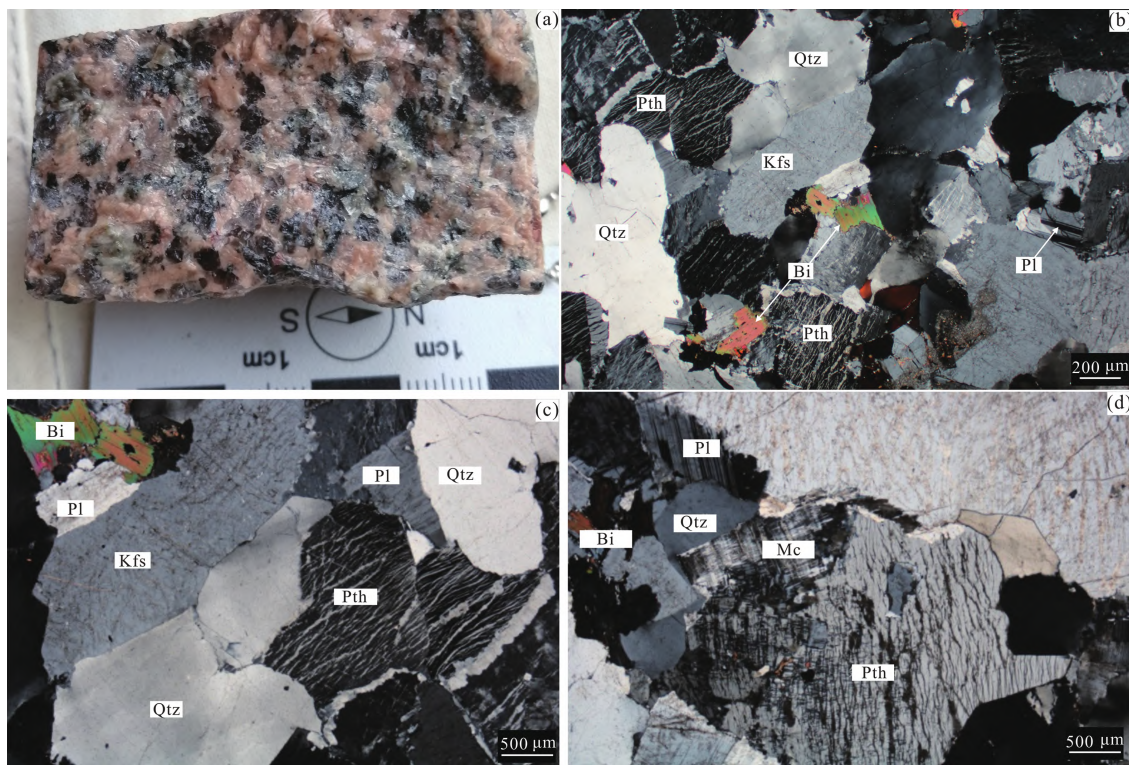


图 3 翠峦碱长花岗岩(CL3 号样品)岩石照片(a)和镜下图像(b)(c)(d)

Fig. 3 Rock specimen photos and microscopic photos of the Cuiluan alkali feldspar granite (Sample No. CL3)

Bi. 黑云母; Kfs. 钾长石; Me. 微斜长石; Pl. 斜长石; Pth. 条纹长石; Qtz. 石英

表 1 翠峦碱长花岗岩锆石 U-Pb 测年分析结果

Table 1 Zircon U-Pb dating results of the Cuiluan alkali feldspar granite

测点号	元素含量(10 ⁻⁶)				比值						年龄(Ma)							
	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	²⁰⁶ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁶ Pb/	1σ			
					²⁰⁶ Pb		²³⁵ U	²³⁸ U		²⁰⁶ Pb		²³⁵ U		²³⁸ U				
CL3-01	7.71	117.0	223	0.52	0.0554	0.0033	0.2212	0.0290	0.0004	427.8	133.3	200	202.9	10.8	979	184.6	2.4	853
CL3-02	7.06	103.0	202	0.51	0.0493	0.0028	0.2026	0.0302	0.0004	164.9	133.3	150	187.3	9.3	216	191.6	2.7	146
CL3-03	8.26	139.0	234	0.59	0.0529	0.0025	0.2161	0.0297	0.0003	327.8	105.5	425	198.6	8.1	512	188.7	2.1	670
CL3-04	6.80	90.5	199	0.45	0.0500	0.0027	0.2031	0.0296	0.0004	194.5	130.5	375	187.8	9.1	419	188.1	2.3	982
CL3-05	8.05	106.0	232	0.46	0.0514	0.0027	0.2143	0.0303	0.0004	257.5	122.2	050	197.2	9.2	817	192.3	2.4	385
CL3-06	8.72	146.0	241	0.61	0.0495	0.0024	0.2074	0.0305	0.0004	172.3	111.0	950	191.3	8.0	317	193.5	2.4	243
CL3-07	11.32	181.0	330	0.55	0.0537	0.0021	0.2123	0.0287	0.0003	366.7	95.3	600	195.5	6.7	753	182.6	1.9	873
CL3-08	6.86	94.7	197	0.48	0.0490	0.0026	0.2043	0.0302	0.0004	146.4	158.3	125	188.8	8.3	389	191.9	2.5	891
CL3-09	8.28	107.0	238	0.45	0.0510	0.0027	0.2089	0.0302	0.0004	239.0	128.6	850	192.6	8.4	208	191.8	2.4	298
CL3-10	17.11	307.0	482	0.64	0.0508	0.0018	0.2056	0.0293	0.0003	231.6	86.0	975	189.8	5.8	765	186.4	1.9	368
CL3-11	15.87	202.0	457	0.44	0.0513	0.0020	0.2141	0.0302	0.0003	253.8	90.7	275	197.0	6.8	858	191.7	2.0	755
CL3-12	12.97	212.0	361	0.59	0.0526	0.0021	0.2187	0.0300	0.0003	322.3	123.1	350	200.8	7.3	101	190.5	2.0	353
CL3-13	11.80	153.0	342	0.45	0.0517	0.0022	0.2138	0.0299	0.0004	276.0	98.1	325	196.8	7.7	240	189.8	2.2	624
CL3-14	7.20	97.1	205	0.47	0.0512	0.0027	0.2106	0.0300	0.0004	250.1	122.2	050	194.1	9.0	121	190.6	2.4	527
CL3-15	4.70	65.4	133	0.49	0.0484	0.0037	0.2034	0.0306	0.0005	120.5	179.6	000	188.0	12.0	015	194.4	3.2	822
CL3-16	8.01	144.0	211	0.68	0.0503	0.0027	0.2094	0.0303	0.0004	205.6	122.2	050	193.1	9.0	075	192.2	2.4	913
CL3-17	8.51	146.0	235	0.62	0.0500	0.0030	0.2018	0.0294	0.0004	198.2	140.7	225	186.6	9.8	710	186.5	2.7	089
CL3-18	7.45	103.0	211	0.49	0.0494	0.0025	0.2025	0.0301	0.0004	164.9	120.3	525	187.3	8.0	838	191.4	2.5	734
CL3-19	6.20	93.4	178	0.52	0.0462	0.0033	0.1820	0.0288	0.0004	5.7	166.6	500	169.7	10.4	249	183.0	2.4	091
CL3-20	10.24	215.0	265	0.81	0.0562	0.0028	0.2258	0.0295	0.0004	457.5	112.9	500	206.7	8.8	355	187.1	2.4	905

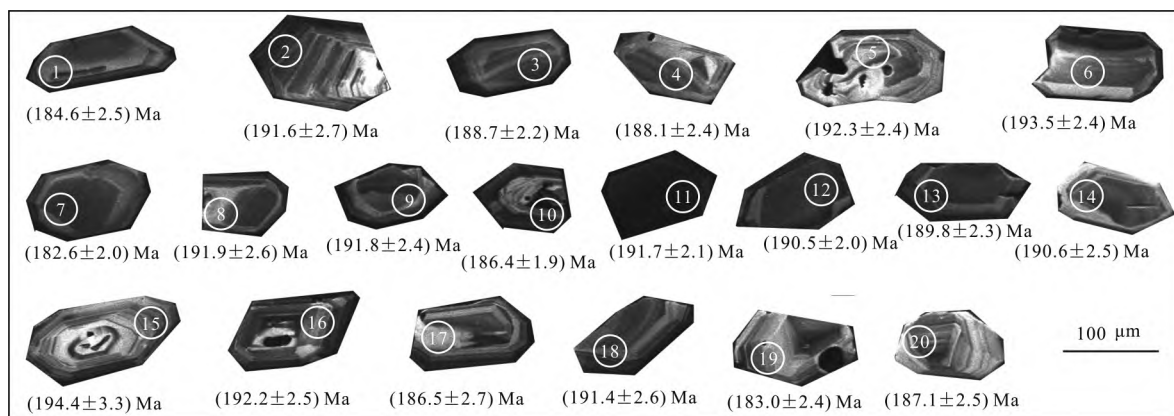


图 4 翠峦碱长花岗岩锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of zircon from the Cuiluan alkali feldspar granite

中呈现典型“V”字形和轻稀土较重稀土富集的右倾型, 微量元素原始地幔标准化图解(图 7(b))显示相对富集 K、Rb 和 Hf 等而亏损 Ti、Nb、P 和 Sr 等元素的特征。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素组成

在锆石定年基础上, 对其进行了微区 Hf 同位素测定, 结果见表 3。样品 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 1.46 \sim 2.27$, 数值集中分布于球粒陨石线附近, 显示源区包含大量

低 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的地壳物质。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值在 0.28270 ~ 0.28272 之间, 接近 EMI 型富集地幔值($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28260 \sim 0.28270$)^[42], 而明显有别于源自软流圈的亏损地幔值($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$)^[43]。 $f_{\text{La/Hf}}$ 的值为 $-0.98 \sim -0.96$, 对应的一阶段亏损地幔模式年龄 $T_{\text{DM1}} = 781 \sim 751 \text{ Ma}$, 地壳模式年龄 $T_{\text{DM}^{\text{C}}} = 1133 \sim 1088 \text{ Ma}$ 。

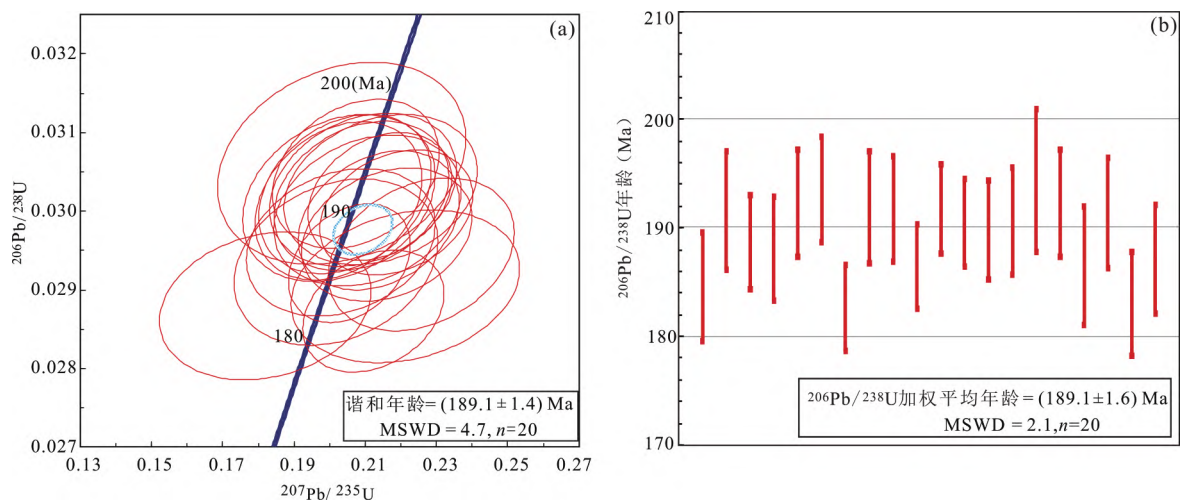


图 5 翠峦碱长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a) 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布图(b)

Fig. 5 U-Pb concordant diagram (a) and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age distribution diagram (b) of zircons from the Cuiluan alkali feldspar granite

表 2 翠峦碱长花岗岩主量元素(%) 和微量元素(10^{-6}) 分析结果及特征参数

Table 2 Major element(%) and trace element (10^{-6}) compositions and characteristic parameters of the Cuiluan alkali feldspar granites

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Mg [#]	
CL3-25	72.39	0.26	13.91	1.79	0.05	0.36	0.99	3.83	5.43	0.05	0.42	16.42	
CL3-31	72.70	0.28	13.71	2.00	0.05	0.39	1.10	3.88	5.11	0.06	0.63	16.21	
CL3-32	74.04	0.24	13.13	1.74	0.04	0.30	0.94	3.72	4.88	0.05	0.56	14.44	
CL3-33	73.80	0.26	13.38	1.83	0.03	0.36	1.00	3.79	4.87	0.05	0.49	16.16	
CL3-34	73.65	0.25	13.56	1.63	0.03	0.37	0.94	3.44	5.87	0.05	0.54	18.18	
CL3-35	73.97	0.24	13.20	1.73	0.04	0.29	0.94	3.71	4.85	0.05	0.56	14.39	
样品编号	Na ₂ O + K ₂ O	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	
CL3-25	9.26	4.81	3.09	9.37	0.75	1.64	1.05	18.00	271	109.0	30.4	212	
CL3-31	8.98	4.00	3.28	11.30	2.48	1.92	1.50	17.80	246	109.0	38.6	247	
CL3-32	8.59	4.28	2.55	8.67	1.04	1.48	1.22	17.00	243	87.7	30.8	204	
CL3-33	8.66	4.26	2.99	9.73	1.28	1.58	1.27	17.40	225	98.8	37.1	221	
CL3-34	9.32	3.64	3.16	9.51	1.90	1.66	1.79	17.30	264	101.0	34.5	221	
CL3-35	8.56	3.89	2.96	9.07	0.86	1.49	1.13	17.50	221	96.7	36.5	229	
样品编号	Nb	Sn	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	
CL3-25	13.5	2.40	6.14	531	51.1	105.0	11.5	38.9	7.02	0.72	4.92	0.80	
CL3-31	16.1	3.61	5.39	499	46.6	97.0	11.0	38.0	7.43	0.72	5.73	0.97	
CL3-32	13.0	1.87	4.57	410	41.2	84.6	9.4	32.2	6.14	0.65	4.80	0.78	
CL3-33	15.0	4.75	3.80	432	44.8	93.6	10.5	36.7	7.01	0.63	5.95	0.96	
CL3-34	13.5	3.73	3.58	470	48.7	98.6	10.8	36.7	6.73	0.66	5.20	0.87	
CL3-35	15.4	4.73	3.78	423	44.1	92.1	10.3	36.8	7.11	0.69	5.91	0.96	
样品编号	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Tl	Pb	Th	U	A/NK
CL3-25	5.13	0.99	2.91	0.46	2.90	0.45	6.23	1.08	1.94	21.1	30.9	11.3	1.14
CL3-31	6.22	1.21	3.58	0.60	3.64	0.53	7.32	1.44	1.73	18.9	39.4	14.7	1.15
CL3-32	5.07	0.97	2.91	0.46	3.02	0.42	6.24	1.14	1.76	18.5	55.1	15.1	1.15
CL3-33	6.30	1.22	3.62	0.59	3.53	0.56	6.62	1.19	1.56	15.3	35.9	12.1	1.16
CL3-34	5.31	1.11	3.31	0.54	3.43	0.53	6.48	1.14	1.87	17.3	37.3	12.9	1.13
CL3-35	6.00	1.21	3.74	0.59	3.50	0.54	7.05	1.17	1.46	15.0	36.7	12.3	1.16

(续) 表 2 翠峦碱长花岗岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果及特征参数
(Continued) Table 2 Major element(%) and trace element (10^{-6}) compositions and characteristic parameters of the Cuiluan alkali feldspar granites

样品编号	A/CNK	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	LREE/HREE	δEu	(La/Yb) _N	Zr + Nb + Ce + Y
CL3-25	1.00	232.80	214.24	18.56	11.54	0.36	11.88	361.23
CL3-31	0.99	223.23	200.75	22.48	8.93	0.33	8.63	398.70
CL3-32	1.00	192.60	174.17	18.43	9.45	0.35	9.20	332.22
CL3-33	1.00	215.97	193.24	22.73	8.50	0.29	8.56	366.38
CL3-34	0.99	222.49	202.19	20.30	9.96	0.33	9.57	367.37
CL3-35	1.01	213.55	191.10	22.45	8.51	0.32	8.49	373.19

注: TFe_2O_3 表示岩石中全铁含量; LOI 表示烧失量; 铝饱和指数 $A/\text{CNK} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (物质的量比); 碱度指数 $A/\text{NK} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (物质的量比); 镁铁指数 $\text{Mg}^\# = 100 \times \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$; ΣREE 表示稀土元素的总含量; LREE/HREE 表示轻重稀土元素含量比值; 铕异常 $\delta\text{Eu} = 2\text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 表示 La 和 Yb 两种元素含量球粒陨石标准化值之比。

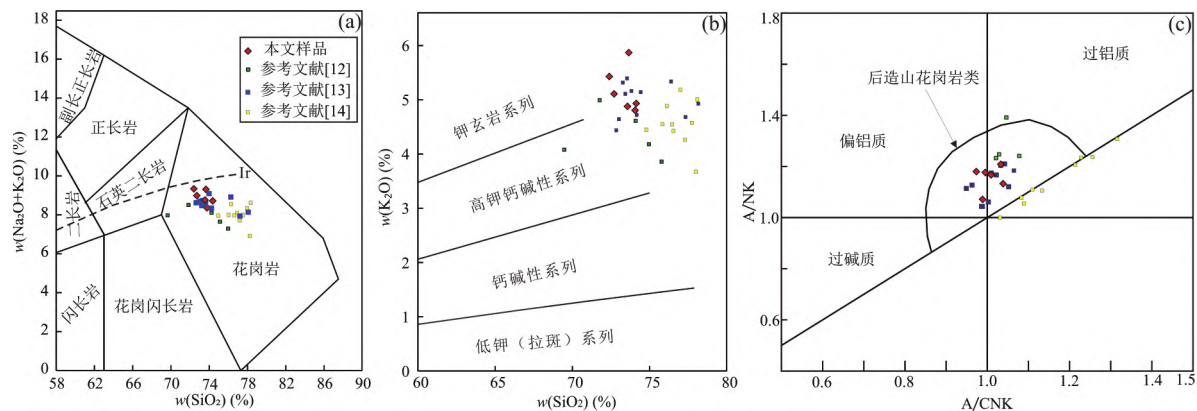


图 6 翠峦碱长花岗岩 TAS 图解(a) (底图据参考文献 [39])、 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(b) (底图据参考文献 [40]) 和 $A/\text{NK} - A/\text{CNK}$ 图解(c) (底图据参考文献 [41])
Fig. 6 TAS diagram (a) (modified after reference [39]), $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ diagram (b) (modified after reference [40]) and $A/\text{NK} - A/\text{CNK}$ diagram (c) (modified after reference [41]) of the Cuiluan alkali feldspar granite

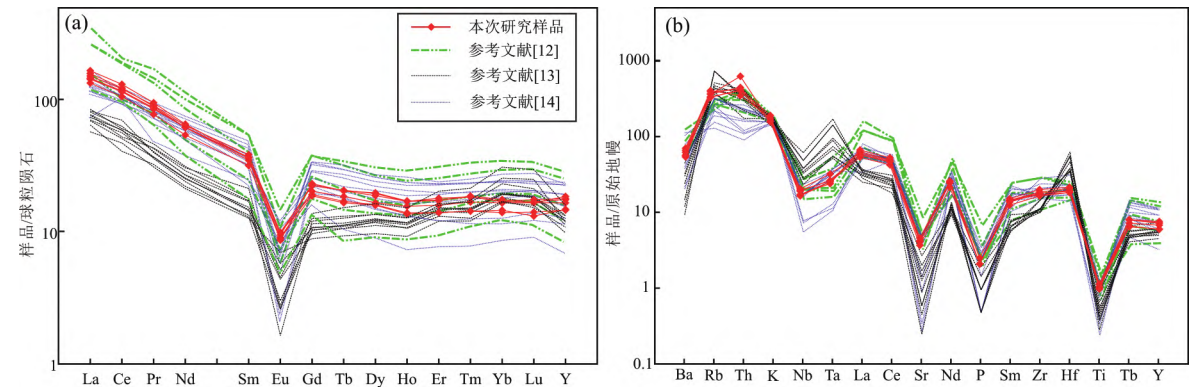


图 7 翠峦碱长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图(a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of the Cuiluan alkali feldspar granite

4 讨 论

4.1 岩石成因类型

Loiselle^[44]将 A 型花岗岩定义为形成于非造山环境,具有碱性、无水特征的花岗质岩石。Pitcher^[45]和 King 等^[46]又将其定义为富钾长石的花岗岩,并认为 A 型花岗岩以适度碱性及高的($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)与典型钙碱性 I 型花岗岩明显不同^[47]。

表 3 翠峦碱长花岗岩锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotope analysis results of the Cuiluan alkali feldspar granite

序号	点号	U - Pb 年 龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	T_{DM1} (Ma)	T_{DM}^{c} (Ma)	$f_{\text{La/Hf}}$
1	CL3-01	185	0.031048	0.000009	0.000889	0.000011	0.282712	0.000462	-2.11	1.840	16.36	763	1110	-0.973222
2	CL3-02	192	0.027737	0.000010	0.000824	0.000007	0.282720	0.000309	-1.84	2.268	10.92	751	1088	-0.975196
3	CL3-03	189	0.035169	0.000009	0.001000	0.000013	0.282715	0.000640	-2.02	2.000	22.65	762	1103	-0.969886
4	CL3-04	188	0.025450	0.000009	0.000738	0.000006	0.282707	0.000273	-2.28	1.757	9.66	767	1118	-0.977759
5	CL3-05	192	0.031139	0.000009	0.000875	0.000006	0.282716	0.000277	-1.98	2.132	9.81	758	1098	-0.973655
6	CL3-06	194	0.038944	0.000009	0.001091	0.000008	0.282718	0.000310	-1.91	2.200	10.98	759	1094	-0.967127
7	CL3-07	183	0.041288	0.000009	0.001171	0.000021	0.282704	0.000811	-2.41	1.463	28.68	781	1133	-0.964720
8	CL3-08	192	0.035492	0.000009	0.001001	0.000039	0.282718	0.001419	-1.91	2.179	50.21	757	1094	-0.969837
9	CL3-09	192	0.036861	0.000009	0.001050	0.000011	0.282711	0.000431	-2.15	1.929	15.25	768	1110	-0.968380
10	CL3-10	186	0.049822	0.000010	0.001389	0.000023	0.282708	0.001064	-2.26	1.663	37.63	779	1123	-0.958164

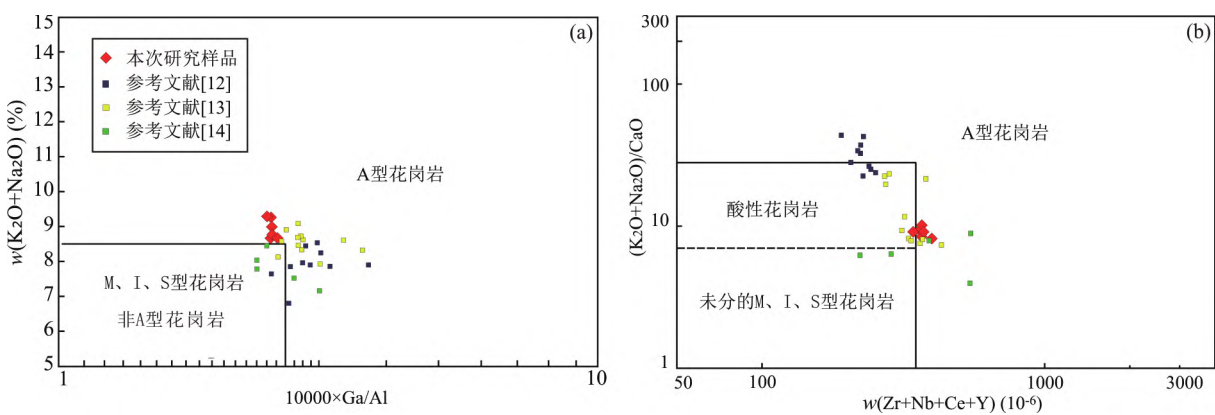


图 8 翠峦碱长花岗岩 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al} - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解 (a) 和 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解 (b) (底图据参考文献 [54])

Fig. 8 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al} - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ (a) and $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ (b) discrimination diagrams of the Cuiluan alkali feldspar granite (basemap modified after reference [54])

而现在人们对于 A 型花岗岩的定义更加宽泛, 包括了几乎所有的除典型 S 型花岗岩和 I 型花岗岩之外的花岗岩, 在化学成分上有时候与 I 型呈过渡特征, 同样化学成分上属于 S 型花岗岩的某些岩石也被划归 A 型花岗岩。从目前报道来看, A 型花岗岩主量元素特征均富 Si, 贫 Ca 和 Mg^[48], 微量元素一般都富集 Ga 和 Eu 以外的稀土元素(国内 A 型花岗岩 ΣREE 值平均为 219.03×10^{-6})和高场强元素, 亏损 Ba 和 Sr, 具有明显的 Eu 负异常^[49]。

本文样品以富 Si、Na 和 K, 贫 Ca、Fe 和 Mg 以及高的全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 值为特征, 结合投图显示样品属亚碱性富钾钙碱性 - 钾玄岩系列准铝质贫铁、镁岩石。在原始地幔标准化图中显示富集 HFSE (Th、Zr 和 Hf) 及 Ce、Y 元素, Ba、Sr、Eu、P 和 Ti 元素亏损, 为典型的 A 型花岗岩特征; 同样在 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al} - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解中,

全部投入 A 型花岗岩区域(图 8(a))。样品 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) = 332.22 \times 10^{-6} \sim 398.70 \times 10^{-6}$, 平均值 366.52×10^{-6} , 与 A 型花岗岩的 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 下限值 (350×10^{-6}) 相当^[50-51]。在 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - ((\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO})$ 图解中绝大部分投点于 A 型花岗岩区域(图 8(b))。利用锆石饱和温度计算方法^[52]得出岩体形成温度为 $804 \sim 810^\circ\text{C}$, 接近于铝质 A 型花岗岩的平均温度 800°C ^[53]。综上认为本次研究的碱长花岗岩成因类型为 A 型。

4.2 岩浆源区属性

关于 A 型花岗岩的物质来源, 前人主要提出以下几种认识: 幔源岩浆的分异或部分熔融^[55]、壳幔物质的混合熔融^[56]、壳源物质的部分熔融和再熔模式^[57]以及壳源物质的混染作用^[58]。样品的 Nb、Ta 和 Ti 等元素亏损和 Th 元素的富集, 显示

岩浆的壳源性质^[59]。稀土总量值高 ($\Sigma \text{REE} = 192.60 \times 10^{-6} \sim 232.80 \times 10^{-6}$, 平均值 216.77×10^{-6}), 高于大陆上地壳的丰度值 (146.37×10^{-6}), 为壳源岩浆特征; Rb/Sr 值为 $2.25 \sim 2.77$, Nb/Ta 值为 $9.64 \sim 13.05$, 符合壳源岩浆值 (分别为 > 0.50 和 ≈ 11)^[60]。Nd/Th = $0.59 \sim 1.26$, 其值接近壳源岩石 (约 3.0), 明显有别于幔源岩石值 (> 15); Ti/Y = $38.63 \sim 51.33$, 平均值 44.09 , Ti/Zr = $6.15 \sim 7.36$, 平均 6.84 , 均符合陆壳岩石值 (Ti/Y < 200 , Ti/Zr < 30)^[61]。

样品锆石具有较为均一的 Hf 同位素值组成, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28270 \sim 0.28272$, 接近 EM I 型富集地幔值 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.2826 \sim 0.2827$)^[42], 对应的一阶段亏损地幔模式年龄 $T_{\text{DM1}} = 781 \sim 751 \text{ Ma}$, 地壳模式年龄 $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = 1133 \sim 1088 \text{ Ma}$, 指示物源为中元古代源自 EM I 型富集地幔部分熔融形成的地壳物质, 也表明该地区存在中元古代的地壳增生事件。通常认为如果花岗岩锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$, 则表明岩浆源于亏损地幔或从亏损地幔中新生的年轻地壳的部分熔融^[62]。样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 1.46 \sim 2.27$, 变化幅度小且全部为正值, 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图解 (图 9(a)) 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} - t$ 图解 (图 9(b)) 中锆石的投点全部位于球粒陨石和亏损地幔演化线之间, 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值, 反映其源区物质不具有多种来源, 主要来源于年轻地壳组分, 在岩浆演化中遭受了少量古老地壳物质的混染, 也即主要源自新生地壳物质的部分熔融。

4.3 成岩动力学背景

小兴安岭中生代花岗岩所代表的构造环境方面的研究已有大量报道。东安金矿区出露的 183 Ma 的碱长花岗岩被认为是壳源物质部分熔融形成, 反映与洋陆俯冲有关的火山弧环境^[22]。鹿鸣钼矿区发现的 187 Ma 的富碱质二长花岗岩岩浆物质为壳幔混合来源, 其形成与地壳由挤压向拉伸转换的构造环境有关^[7]。伊春地区碱长花岗岩具有高的 I_{Sr} 值和低的 ε_{Nd} 值, 韩振哲^[8]认为主要与古老下地壳物质有关, 存在一定程度的壳幔岩浆混合作用, 形成于伸展动力学体制。另外关于该地区花岗岩的研究还有诸多报道^[12-13, 17], 以上花岗岩从岩石成因类型来看可以分为 A 型和 I 型。近年来在嘉荫—伊春—尚志一带发现了 186 ~ 182 Ma 的镁铁质—超镁铁质侵入岩^[31], 基性侵入岩的发育被认为与伸展背景下幔源岩浆大规模底侵作用有关, 反映地幔岩浆的上涌, 该基性—超基性侵入岩与同时期 I—A 型花岗岩构成了典型的双峰式花岗岩组合。本文认为早侏罗世小兴安岭区域伸展作用明显, 由此引起了地幔物质上涌, 形成了区域基性—超基性侵入岩的发育, 上覆地壳的熔融形成了 I—A 型花岗岩组合。翠峦碱长花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 1.46 \sim 2.27$, 一阶段亏损地幔模式年龄 $T_{\text{DM1}} = 781 \sim 751 \text{ Ma}$, 表明岩浆物质源自新生地壳物质的部分熔融, 微量元素分析同样也显示岩浆物质主要源自地壳, 与小兴安岭早侏罗世伸展背景下地幔物质上涌导致的地壳熔融事件相一致。从小兴安岭地区早侏罗世花岗岩的分布情况来看,

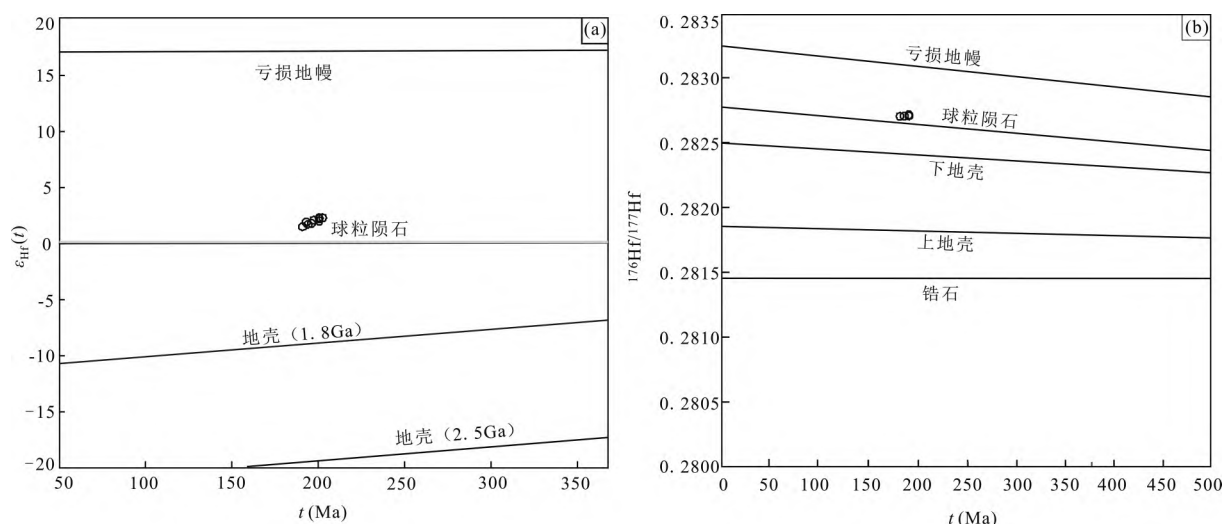


图9 翠峦碱长花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图解 (a) 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} - t$ 图解 (b)

Fig. 9 Zircon age vs. $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (a) and $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} - t$ (b) diagrams for the Cuiluan alkali feldspar granite

黑河东安—伊春翠宏山—吉林天桥岗一线分布大量早侏罗世 197 ~ 178 Ma 的 A 型花岗岩^[7, 12-14, 22-23], 呈明显北东向展布特征。综上分析, 本文认为小兴安岭早侏罗世岩浆活动与太平洋板块的俯冲过程中伸展作用相联系更加合理。

5 结 论

(1) 翠峦地区碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (189.1 ± 1.6) Ma, 为早侏罗世岩浆活动产物, 与小兴安岭地区大量早侏罗世岩浆活动时间一致。

(2) 碱长花岗岩的地球化学组成具有富 Si、富 K 以及贫 Ca、贫 Mg 特征, 样品富集高场强元素 Th、Zr 和 Hf 及 Sr, 亏损 Eu 和 Ba 元素, 锆石饱和温度 804 ~ 810 °C, 反映岩石成因类型为 A 型。

(3) 岩浆锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 1.46 \sim 2.27$, 反映岩浆主要源自新生地壳物质的部分熔融。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28270 \sim 0.28272$, 对应的地壳模式年龄 $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = 1133 \sim 1088 \text{ Ma}$, 指示物源为中元古代源自 EM I 型富集地幔的部分熔融, 也表明该地区存在中元古代地壳增生事件。

(4) 翠峦地区早侏罗世 A 型花岗岩的形成主要受太平洋板块西向俯冲过程中区域构造伸展作用控制。

致谢: 审稿专家和编辑对本文提出宝贵的修改意见使本文质量得到提升, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 周若. 花岗岩混合作用 [J]. 地学前缘, 1994, 1(增): 87-97.
- [2] 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 等. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究 [J]. 中国地质, 2005, 32(3): 343-352.
- [3] 陈会军, 付俊彧, 钱程, 等. 东北地区前中生代花岗岩类年龄与时空分布 [J]. 地质通报, 2021, 40(6): 827-844.
- [4] 吴福元, 孙德有, 林强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生 [J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 181-189.
- [5] 韩振新, 郝正平, 侯敏. 小兴安岭地区与加里东期花岗岩类有关的矿床成矿系列 [J]. 矿床地质, 1995, 14(4): 293-302.
- [6] 张海阳, 栾慧敏, 陈乐国. 黑龙江省印支期花岗岩的确定及其意义 [J]. 中国区域地质, 1991(1): 25-27, 9.
- [7] 谭红艳, 舒广龙, 吕骏超, 等. 小兴安岭鹿鸣大型钼矿 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(6): 1757-1770.
- [8] 韩振哲, 赵海玲, 苏士杰, 等. 小兴安岭东南金山屯一带晚三叠世二长花岗岩成因及其地质意义 [J]. 现代地质, 2008, 22(2): 197-206.

- [9] 许文良, 王枫, 孟恩, 等. 黑龙江省东部古生代—早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1378-1389.
- [10] 董玉. 佳木斯地块与松嫩—张广才岭地块拼合历史: 年代学与地球化学证据 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [11] 李伟民, 刘永江, 赵英利, 等. 佳木斯地块构造演化 [J]. 岩石学报, 2020, 36(3): 665-684.
- [12] 牛延宏, 王兴, 董国臣, 等. 伊春地区斑状二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 世界地质, 2012, 31(2): 247-254.
- [13] 姜浩杰. 伊春西部新第二林场—跃进林场中生代花岗岩特征及地质意义 [D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [14] 孙德有, 吴福元, 高山, 等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期钼质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约 [J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 263-275.
- [15] 王玉净, 樊志勇. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义 [J]. 古生物学报, 1997, 36(1): 58-69.
- [16] 赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 等. 吉黑东部构造格架及地壳演化 [M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1996.
- [17] 孙德有, 吴福元, 高山. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定 [J]. 地球学报, 2004, 25(2): 213-218.
- [18] 杨长江, 王亚春. 小兴安岭东南部伊春中生代花岗岩的锆石 U-Pb 测年及其地质意义 [J]. 吉林地质, 2010, 29(4): 1-5.
- [19] 梁本胜. 黑龙江省二股铁多金属矿田矿床地质特征及成因 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [20] 程国华, 王瑞良, 曾庆栋, 等. 黑龙江鹿鸣钼矿区花岗岩杂岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素、辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2015, 31(8): 2450-2464.
- [21] 陈静, 孙丰月, 潘彤, 等. 黑龙江霍吉河钼矿成矿地质特征及花岗闪长岩年代学、地球化学特征 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增): 207-215.
- [22] 刘瑞萍. 黑龙江伊春地区斑岩—浅成低温热液金矿床岩浆、流体与成矿作用 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [23] 孙喜德. 黑龙江省东安—汤旺河地区花岗岩地球化学及热年代学 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [24] 吴智平, 侯旭波, 李伟. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨 [J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(4): 385-399.
- [25] 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等. 松辽盆地南部中生代火山岩: 锆石 U-Pb 年代学及其对基底性质的制约 [J]. 地球科学, 2008, 33(5): 603-617.
- [26] 周建波, 张兴洲, WILDE Simon A, 等. 黑龙江杂岩的碎屑锆石年代及其大地构造意义 [J]. 岩石学报, 2009, 25(8): 1924-1936.
- [27] XU W L, JI W Q, PEI F P, et al. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin Provinces, NE China: Chronology, geochemistry and tectonic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(3): 392-402.

- [28] WU F Y, SUN D Y, GE W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1–30.
- [29] XIAO W J, WINDLEY B F, HAO J E, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1069–1087.
- [30] 翟明见. 依兰—伊通断裂新构造活动规律 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [31] YU J J, WANG F, XU W L, et al. Early Jurassic mafic magmatism in the lesser Xing'an-Zhangguangcai range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry [J]. *Lithos*, 2012, 142/143: 256–266.
- [32] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34–43.
- [33] 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. U–Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素 [J]. *科学通报*, 2004, 49(14): 1403–1410.
- [34] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分: 16 个主次成分量测定 (GB/T 14506.28—2010) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [35] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定 (GB/T 14506.30—2010) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [36] 杨元江, 邓昌州, 李成禄, 等. 大兴安岭大洋山钼矿区侵入岩年代学、岩石地球化学特征及岩石成因 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(4): 1064–1081.
- [37] 杨元江, 李成禄, 邓昌州, 等. 大兴安岭大洋山钼矿成矿岩体地球化学、锆石 U–Pb 年龄及构造背景 [J]. *现代地质*, 2020, 34(5): 1092–1102.
- [38] 韩振哲, 赵海玲, 王盘喜, 等. 黑龙江伊春地区晚三叠世—早侏罗世铝质 A 型正长—碱长花岗岩地球化学特征及其构造意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(2): 97–108.
- [39] MIDDLEMOST E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215–224.
- [40] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- [41] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247–263.
- [42] ZINDLER A, HART S. Chemical geodynamics [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1986, 14: 493–571.
- [43] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- [44] LOISELLE M C, WONES D R. Characteristics and origin of anorogenic granites [J]. *Geological Society of America*, 1979, 11: 468.
- [45] PITCHER W S. The Nature and Origin of Granite [M]. London: Chapman and Hall, 1993, 193–291.
- [46] KING P L, WHITE A J R, CHAPPELL B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(3): 371–391.
- [47] 肖庆辉, 邓晋福, 马大钲, 等. 花岗岩研究思维与方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [48] 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A 型花岗岩研究现状及其述评 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 57–66.
- [49] 苏玉平, 唐红峰. A 型花岗岩的微量元素地球化学 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24(3): 245–251.
- [50] 邱检生, 肖娥, 胡建, 等. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U–Pb 年代学、地球化学和 Nd–Hf 同位素制约 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(11): 2468–2484.
- [51] WU F Y, SUN D Y, JAHN B M, et al. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(5): 731–744.
- [52] BOEHNKE P, WATSON E B, TRAIL D, et al. Zircon saturation re-revisited [J]. *Chemical Geology*, 2013, 351: 324–334.
- [53] 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. A 型岩套的分类、判别标志和成因 [J]. *高校地质学报*, 2003, 9(4): 573–591.
- [54] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407–419.
- [55] EBY G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641.
- [56] DICKIN A P, HALLIDAY A N, BOWDEN P. A Pb, Sr and Nd isotope study of the basement and Mesozoic ring complexes of the Jos Plateau, Nigeria [J]. *Chemical Geology*, 1991, 94(1): 23–32.
- [57] LANDENBERGER B, COLLINS W J. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi complex, eastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(1): 145–170.
- [58] DICKIN A P. Nd isotope chemistry of Tertiary igneous rocks from Arran, Scotland: Implications for magma evolution and crustal structure [J]. *Geological Magazine*, 1994, 131(3): 329–333.
- [59] 杨帆, 肖荣阁, 李娜, 等. 内蒙古宝音图钼矿床花岗岩稀土元素地球化学特征及花岗岩成因 [J]. *现代地质*, 2013, 27(4): 831–840.
- [60] MCDONOUGH W F, SUN S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223–253.
- [61] HANS WEDEPOHL K. The composition of the continental crust

- [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1217 – 1232.
- [62] AMELIN Y, LEE D C, HALLIDAY A N. Early-Middle Archean an 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.
-

中国杰出的地质学家、地质教育家——王鸿祯



王鸿祯（1916—2010），《现代地质》第一任主编（1987—1990）。出生于山东苍山，地质学家、地质教育家，中国科学院院士。1939年毕业于北京大学地质系，1947年获英国剑桥大学博士学位。研究领域包括古生物学、地层学、古地理学、前寒武纪地质、大地构造学和地质学史。是中国地层古生物事业的开创者之一、新中国地层古生物教育事业的开拓者之一、历史大地构造学的奠基人之一。20世纪90年代研究层序地层与古大陆再造，提出地球节律的普遍性和全球大陆基底构造单元划分与泛大陆聚散周期，形成了全球构造的活动论与历史发展的点断前进阶段论相结合的地球史观。曾任《古生物学报》《地层学杂志》副主编，《中国大百科全书》（地质学卷）编委会副主任等。代表作有《中国古地理图集》和《中国古生代珊瑚分类演化及生物古地理》等。