

DOI: 10.12401/j.nwg.2022027

# 大兴安岭中部扎赉特旗晚三叠世 A 型花岗岩的发现及其地质意义

孙巍<sup>1,2</sup>, 许逢明<sup>1,2,\*</sup>, 吴大天<sup>1,2</sup>, 赵院冬<sup>1,2</sup>, 秦涛<sup>1,2</sup>, 马永非<sup>1,2</sup>,  
臧延庆<sup>1,2</sup>, 司秋亮<sup>1,2</sup>, 付俊彧<sup>1,2</sup>, 宋维民<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 辽宁 沈阳 110034)

**摘要:** 大兴安岭中部在三叠纪叠加了古亚洲洋和蒙古-鄂霍茨克洋的影响, 其构造背景存较大争议。笔者对大兴安岭中部扎赉特旗中粗粒正长花岗岩进行岩石学、岩石地球化学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年和 Lu-Hf 同位素分析。结果显示: 锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 (228.5±2.0) Ma (MSWD=2.8); 岩石高 Si、富 Fe、高 K、低 Sr 和 Eu, 相对富 Nb 和富 Zr, 高 10 000×Ga/Al (3.0~3.1); 全岩锆饱和温度平均值为 805 °C; 综合判定该套花岗岩为铝质 A 型花岗岩。该岩体的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 +5.28~+8.00, 二阶段 Hf 模式年龄 ( $T_{\text{DM2}}$ ) 为 683~832 Ma, 指示花岗岩可能形成于新增生地壳物质的部分熔融。综合区域已有研究成果, 表明扎赉特旗地区的古亚洲洋残余洋盆在二叠纪闭合并进入碰撞造山阶段, 晚三叠世 A 型花岗岩的出现, 标志着本区进入造山后伸展阶段。

**关键词:** 地球化学; 晚三叠世; A 型花岗岩; 古亚洲洋; 扎赉特旗; 大兴安岭中部

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0080-12

## Discovery and Geological Significance of Late Triassic A-Type Granite in Jalaid Banner, Middle of Great Xing'an Range

SUN Wei<sup>1,2</sup>, XU Fengming<sup>1,2,\*</sup>, WU Datian<sup>1,2</sup>, ZHAO Yuandong<sup>1,2</sup>, QIN Tao<sup>1,2</sup>, MA Yongfei<sup>1,2</sup>,  
ZANG Yanqing<sup>1,2</sup>, SI Qiuliang<sup>1,2</sup>, FU Junyu<sup>1,2</sup>, SONG Weimin<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China; 2. Northeast Science & Technology Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China)

**Abstract:** The middle of Great Xing'an Range superimposed the influence of the Paleo-Asian ocean and the Mongol-Okhotsk ocean in the Triassic, and its tectonic setting remains controversial. Taking the medium-coarse grained texture syenogranite in Jalaid Banner, middle of Great Xing'an Range as research object, the study on petrology, geochemistry, zircon LA-ICP-MS U-Pb age and Lu-Hf isotope compositions have been carried out. The results show that the weighted average zircon U-Pb age of the granite is (228.5±2.0) Ma (MSWD=2.8); The

收稿日期: 2021-07-22; 修回日期: 2022-03-25; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目“塞尔维亚铜金资源调查”(DD20201162), “内蒙古 1:5 万五家户、孟家沟、莫利根屯、扎赉特旗、巴彦高勒五幅区域地质调查”(DD20160048-03), “东北基础地质综合研究与片区总结”(1212011220435) 和“中国大地构造演化和国际亚洲大地构造图编制”(DD20190360) 联合资助。

作者简介: 孙巍(1987-), 男, 博士, 工程师, 主要从事区域地质矿产调查研究。E-mail: soohiboy@126.com。

\* 通讯作者: 许逢明(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事区域矿产地质调查。E-mail: 839381949@qq.com。

rocks are high in Si, Fe and K, depleted in Sr and EU, relatively rich in Nb and Zr, and high in  $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  (3.0~3.1); The average of zircon saturation temperature is 805 °C; It is comprehensively determined that the granite is considered to be the aluminous A-type granite. The granite  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values range from + 5.28 to + 8.00, and the  $T_{\text{DM2}}$  range from 683 Ma to 832 Ma, indicating that the granite may have been formed by partial melting of neoaccretionary crustal materials. Based on the regional research results, this paper holds that the residual ocean basin of the Paleo-Asian ocean in the Jalaid Banner closed and entered the collision orogeny stage in the Permian, and the appearance of A-type granite in the Late Triassic indicates that the area entered the post-orogenic extension stage.

**Keywords:** geochemistry; Late Triassic; A-type granite; Paleo-Asian ocean; Jalaid Banner; middle of Great Xing'an Range

大兴安岭中部在三叠纪叠加了古亚洲洋和蒙古-鄂霍茨克洋的影响,其构造背景存较大争议。Wu 等(2002)认为东北地区主要发育二叠纪、晚三叠世—早侏罗世、早白垩世 3 个阶段的 A 型花岗岩,各自具有不同的构造背景。其中,东北地区的二叠纪 A 型花岗岩在空间上与东准噶尔、蒙古南部以及内蒙古中部的花岗岩呈带状展布,与区域上的古亚洲洋缝合带走向一致,应形成于古亚洲洋闭合碰撞后的俯冲板片断离作用。近年,西准噶尔克西克早二叠世 A 型花岗岩(293 Ma)(焦光磊等, 2013)以及内蒙古西部甜水井中二叠世 A 型花岗岩(267 Ma)(贺锋等, 2004)的发现是对该岩浆岩带的进一步补充。晚三叠世—早侏罗世 A 型花岗岩分布很广,可能与晚二叠世—早三叠世陆块碰撞过程结束之后的大规模岩石圈拆沉有关(Wu et al., 2002)。孙德有等(2004, 2005)认为华北板块与北侧板块在晚二叠—早三叠世沿西拉木伦河—长春—延吉缝合带碰撞拼合后,发生的岩石圈伸展作用,形成了小兴安岭清水晚三叠世碱性 A2 型花岗岩(222 Ma)和吉林中部三道河铝质 A2 型花岗岩(216 Ma),标志古亚洲洋构造域的演化结束。葛文春等(2005)认为查干地区晚三叠世(235~225 Ma)A2 型花岗岩形成于晚古生代 A 型花岗岩代表的造山后作用(孙德有等, 2000)或板片断离作用(Wu et al., 2002)后岩石圈的继续伸展作用。Yang 等(2016)对大兴安岭中部中晚三叠世 I 型花岗岩(244~206 Ma)进行了研究,认为该区叠加了古亚洲洋沿贺根山—黑河缝合带闭合后板片断离引发的造山后伸展作用以及蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲体系的弧后伸展作用。马永非等(2017)对大兴安岭中段的晚三叠世中酸性火山岩(230~211 Ma)进行了研究,认为其形成于蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲

的弧后伸展作用。纪政等(2018)认为大兴安岭中段的晚三叠世安山岩(236 Ma)指示了与蒙古-鄂霍茨克大洋板片南向俯冲相关的安第斯型活动大陆边缘环境。Liu 等(2018)认为蒙古-鄂霍茨克大洋俯冲板片在晚三叠世(215~201 Ma)发生回卷,大洋板片由低角度俯冲逐渐转变为高角度俯冲,导致上部地壳伸展。许文良等(2019)认为兴安地块东缘的中晚三叠世钙碱性火山岩指示活动大陆边缘背景,与蒙古-鄂霍茨克洋板块南向俯冲有关,显示蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲作用影响到松辽盆地以西。综上所述,目前就大兴安岭中部地区三叠纪的构造背景主要有 2 大类观点,一类观点是与古亚洲洋闭合有关,可进一步细分为大兴安岭北部二叠纪造山后伸展的延续或与西拉木伦河—长春—延吉缝合带有关的三叠纪造山后伸展;另一类观点是与蒙古-鄂霍茨克洋有关,为蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲体系的弧后伸展或安第斯型活动大陆边缘背景。

近年来,学者们越发意识到岩浆岩对构造环境判别的多解性,基于岩浆岩得出的构造背景认识是否合理值得进一步深思。乌兰浩特出露有早白垩世高 Sr 花岗岩(葛文春等, 2005),被认为是拉张背景下不同深度源岩熔融的产物(葛文春等, 2005),这与大兴安岭地区早白垩世 A1 型花岗岩似乎矛盾。峨眉山玄武岩喷发的同时形成了 A 型和 I 型花岗岩(Zhong et al., 2006),华南同时同地产出侏罗纪 I 型、S 型和 A 型花岗岩(Li et al., 2007)。吴福元等(2007)认为在这些不同的花岗岩类型中,大多只有伸展背景才能满足形成 A 型花岗岩所需要的较高温度条件以及较浅的岩浆形成深度,因此 A 型花岗岩所指示的伸展背景是可能成立的。孙德有等(2000, 2004, 2005)通过 A 型花岗

岩对古亚洲洋闭合时限进行了有力制约。2016~2018年,笔者在扎赉特旗地区开展五家户等5幅1:5万区域地质调查工作,识别出晚三叠世A型花岗岩,试图通过开展年代学、地球化学和同位素研究对该区晚三叠世构造背景提供制约。

### 1 地质背景

扎赉特旗地区位于内蒙古自治区兴安盟扎赉特旗,在地理上处于大兴安岭中部东缘,区内多为低矮平缓山丘,研究区往东地势逐渐降低并进入松辽盆

地。在大地构造位置上,学者们在构造单元划分图中经常将兴安地块与松嫩地块之间的缝合带(一般指贺根山-黑河缝合带)划分至本区,但由于缺乏来自洋壳残片的直接证据,目前缝合带在本区的具体途径位置尚存争议(图1)。许文良等(2019)、李锦轶等(2019)对兴安地块和松嫩地块的属性、缝合带界线位置以及范围等问题进行了梳理,显示扎赉特旗地区应属于兴安地块。兴安地块主体是由奥陶纪至石炭纪的岛弧杂岩、古洋岩石圈残片和弧前增生杂岩组成的奥陶纪至石炭纪增生造山带(李锦轶等,2019)。

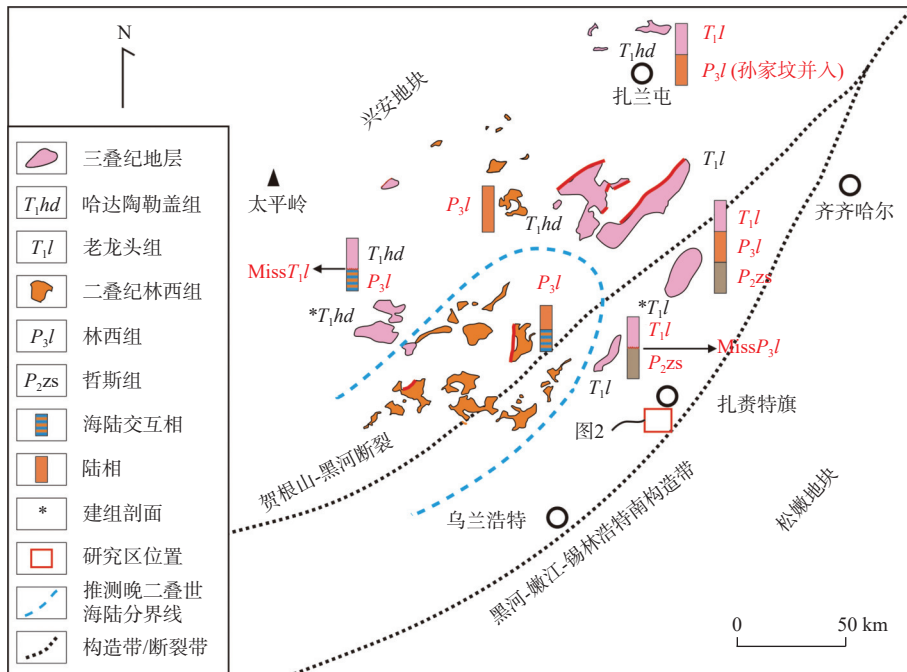


图1 大兴安岭中部晚二叠世—早三叠世沉积地层分布图(据李世超等,2017修改)

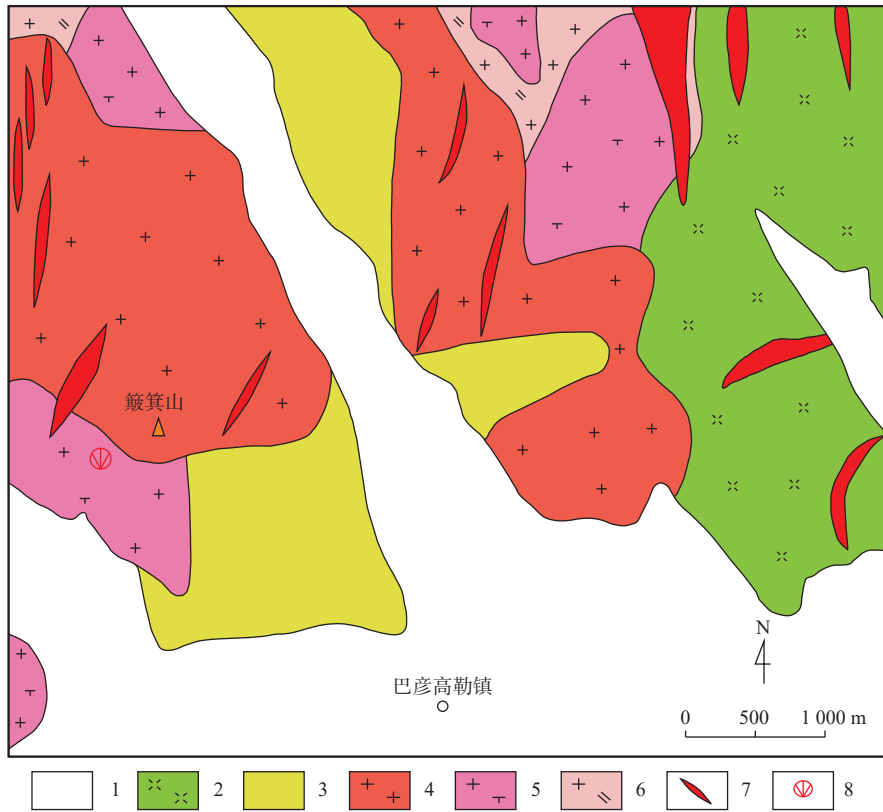
Fig. 1 Distribution map of sedimentary strata in Late Permian–Early Triassic in the middle of Great Xing’an Range

扎赉特旗地区的地质可见下石炭统火山岩,中二叠统哲斯组,中侏罗统土城子组,上侏罗统满克头鄂博组、玛尼吐组,下白垩统白音高老组、龙江组、光华组以及新生界沉积物;侵入岩出露有晚泥盆世糜棱岩化中粗粒花岗岩,早石炭世中粒二长花岗岩和中粒角闪辉长岩,晚石炭世早期中粒二长花岗岩和中粒石英闪长岩,晚石炭世晚期细粒角闪辉长岩、中粒二长花岗岩、中粒花岗闪长岩及中粒石英闪长岩,晚三叠世中粗粒正长花岗岩,早侏罗世中粒二长花岗岩以及早白垩世花岗岩。研究区内的晚三叠世中粗粒正长花岗岩主要分布于扎赉特旗南部的巴彦高勒镇附近(图2),包括簸箕山、花马山,在马咀窝堡西和建设六

队北也有零星分布。中粗粒正长花岗岩样品(5458TW)均采于出露最好的簸箕山岩体(图3)。

### 2 样品特征及分析方法

簸箕山岩体岩性单一稳定,为肉红色中粗粒正长花岗岩,具中粗粒、半自形结构,块状构造(图4)。其中,块状构造可以用以区分研究区北部的晚泥盆世糜棱岩化中粗粒花岗岩。岩石主要矿物为碱性长石(60%)+石英(25%)+斜长石(12%)+黑云母(3%)(图5)。碱性长石为正长石和条纹长石,呈半自形-他形板状,粒径为2.5~8 mm,可见卡氏双晶和条纹结构,



1.第四系; 2.白垩系; 3.二叠系; 4.白垩纪花岗岩; 5.三叠纪花岗岩; 6.石炭纪花岗岩; 7.脉岩; 8.采样点

图 2 扎赉特旗地区地质图

Fig. 2 Geological map of Jalaid Banner area



图 3 簸箕山中粗粒正长花岗岩野外照片

Fig. 3 Field photograph of the Bojishan medium-coarse grained texture syenogranite

条纹长石常与石英构成文象结构, 碱性长石矿物边缘多不平直, 常被 2 种长石的细小颗粒包围, 碱性长石可见黏土化; 石英呈他形粒状, 粒径为 2~3 mm; 斜长石呈半自形板状, 粒径为 3~7 mm, 聚片双晶纹较窄; 黑云母呈半自形片状, 粒径为 2~3 mm, 发育绿帘石化, 伴有不透明矿物析出; 绿帘石呈自形粒状, 粒径为 0.05~0.10 mm。副矿物可见锆石、磷灰石以及磁铁矿等。

岩石主、微量和稀土元素测试在自然资源部东北

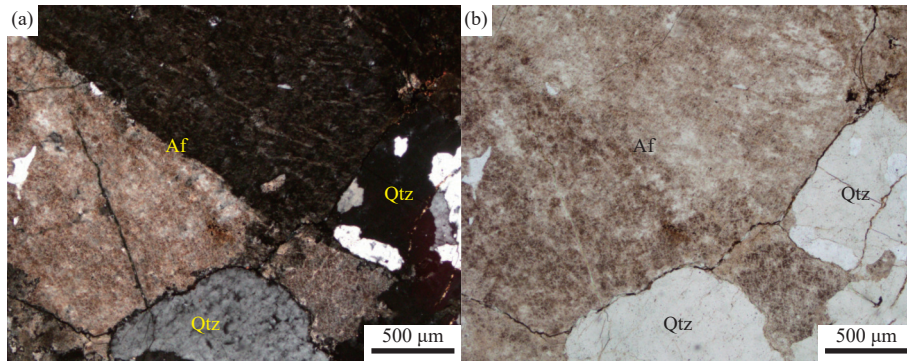


图 4 中粗粒正长花岗岩的中粗粒结构及块状构造

Fig. 4 Medium-coarse grained texture and massive structure

矿产资源监督检测中心完成。主量元素测试采用飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪测定, 分析精度优于 5%。微量元素利用 HR-ICP-MS(Element I)电感耦合等离子体质谱测试。分析精度: 当元素含量大于  $10 \times 10^{-6}$ , 精度优于 5%; 当含量小于  $10 \times 10^{-6}$  时, 精度优于 10%。

锆石定年样品采用常规方法进行粉碎, 经过淘洗、采用电磁法分离, 在双目镜下选出晶形和透明度好的单颗粒锆石, 并进行锆石制靶和阴极发光图像分析,



a.正交偏光; b.单偏光; Qtz.石英; Af.碱性长石

图5 簸箕山中粗粒正长花岗岩显微照片

Fig. 5 Photomicrograph of the Bojishan medium-coarse grained texture syenogranite

此项工作在廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析测试工作在中国科学院广州地球化学研究所完成,测试仪器为激光剥蚀多接收杯等离子质谱仪(LA-ICP-MS),剥蚀束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ 。详细的仪器操作条件和数据处理方法见文献(Liu et al., 2008; Hu et al., 2008)。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICP MS DataCal(Liu et al., 2008)完成。测试数据、加权平均年龄的误差均为  $1\sigma$ 。

锆石 Hf 同位素分析测试是使用南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的激光剥蚀多接收等离子质谱(LA-MC-ICP MS)完成。激光剥蚀系统为 193 nm 的气体准分子激光源的 UP193FX(New Wave, USA),质谱使用 Thermo Fisher 公司的 Neptune Plus 型多接收等离子质谱。分析时激光束直径为 44  $\mu\text{m}$ 。

### 3 分析结果

#### 3.1 主微量元素特征

簸箕山中粗粒正长花岗岩主、微量分析结果显示(表1),该花岗岩具有高 Si、高铁镁比、中等 Al、低 Fe、低 Mg、低 Ca、富碱的特征。其中,  $\text{SiO}_2$  含量为 73.65%~74.94%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.51%~13.50%, TFeO 含量为 1.52%~1.97%, MgO 含量为 0.04%~0.10%, TFeO/MgO 值为 17.22~40.87, CaO 含量为 0.57%~0.69%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 5.36%~5.60%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 3.64%~3.86%,  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  含量为 9.0%~9.46%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值为 1.45~1.47(表1)。在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解中,岩石样品落入高钾钙碱

性-钾玄质系列区(图6);样品的 A/NK 值为 1.01~1.11, A/CNK 值为 0.93~1.01,属于准铝质-弱过铝质岩石系列(图7)。

簸箕山花岗岩稀土总量较高,  $\Sigma(\text{REE})$  值为  $288.57\times 10^{-6}\sim 345.22\times 10^{-6}$ 。球粒陨石标准化的稀土配分图显示(图8),该花岗岩轻稀土富集,重稀土亏损,轻重稀土分异程度明显,呈右型倾,  $(\text{La}/\text{Yb})_N=10.08\sim 13.16$ ;强烈负 Eu 异常,  $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.06\sim 0.17$ 。

原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图9)显示,该套花岗岩相对亏损 Ba、Sr、P、Eu 和 Ti。其中, Ba 含量为  $132\times 10^{-6}\sim 397\times 10^{-6}$ , Sr 含量为  $51.4\times 10^{-6}\sim 111\times 10^{-6}$ , Rb 含量为  $176\times 10^{-6}\sim 183\times 10^{-6}$ , Zr 含量为  $179\times 10^{-6}\sim 253\times 10^{-6}$ , Nb 含量为  $14.3\times 10^{-6}\sim 18.8\times 10^{-6}$ , Ga 含量为  $20.1\times 10^{-6}\sim 21.2\times 10^{-6}$ , Ni 含量为  $1.70\times 10^{-6}\sim 2.97\times 10^{-6}$ , Co 含量为  $3.61\times 10^{-6}\sim 4.06\times 10^{-6}$ , Cr 含量为  $16.7\times 10^{-6}\sim 23.0\times 10^{-6}$ 。

#### 3.2 锆石 U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素特征

扎赉特旗中粗粒正长花岗岩(5458TW)锆石普遍较大,可达 200  $\mu\text{m}$ ,呈长柱状,锆石韵律环带发育,显示为岩浆锆石特征,未见残留的继承锆石(图10A);对 24 颗锆石进行了测试(表2),其中 1 个测点铅丢失,偏离谐和线,其余 23 个测点位于谐和线上及附近且集中分布,对 23 个测点进行加权平均年龄计算,其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(228.5\pm 2.0)$  Ma(MSWD=2.8)(图10B),指示该套中粗粒正长花岗岩形成时代为晚三叠世早期。

对 5458TW 样品代表性锆石进行了 Lu-Hf 同位素测试工作(图10A,表3),该岩体的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 +5.28~+8.00,二阶段 Hf 模式年龄( $T_{\text{DM}2}$ )为 683~832 Ma。

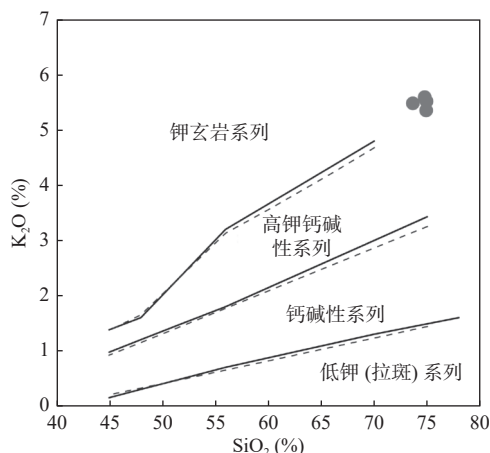


图 6 簸箕山中粗粒正长花岗岩  $K_2O-SiO_2$  图解

Fig. 6  $K_2O-SiO_2$  diagram of Bojishan medium-coarse grained texture syenogranite

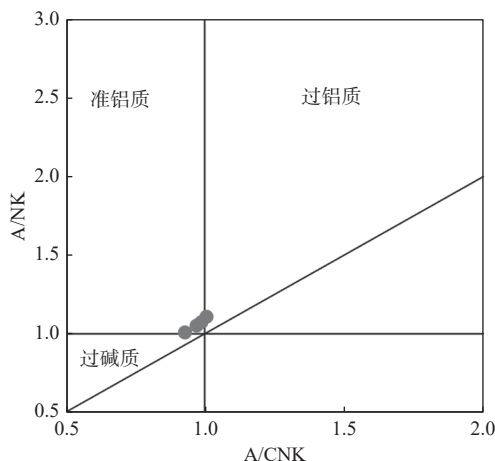


图 7 簸箕山中粗粒正长花岗岩含铝指数图解

Fig. 7 Aluminous index diagram of Bojishan medium-coarse grained texture syenogranite

表 1 簸箕山中粗粒正长花岗岩主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果

Tab. 1 Major (%) and trace ( $10^{-6}$ ) elements compositions of Bojishan medium-coarse grained texture syenogranite

样品号	5458TWYQ1	5458TWYQ2	5458TWYQ3	5458TWYQ4	样品号	5458TWYQ1	5458TWYQ2	5458TWYQ3	5458TWYQ4
SiO <sub>2</sub>	74.78	73.65	74.94	74.92	Tm	0.56	0.61	0.58	0.47
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.22	0.14	0.13	Yb	3.63	4.06	3.65	3.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.51	13.50	12.85	12.67	Lu	0.52	0.59	0.52	0.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.26	1.79	1.31	1.14	Y	32.86	37.17	34.98	27.27
FeO	0.54	0.36	0.54	0.49	∑REE	319.72	288.57	345.22	297.26
MnO	0.02	0.03	0.02	0.02	LREE	293.76	260.84	318.04	275.82
MgO	0.10	0.06	0.04	0.06	HREE	25.96	27.73	27.18	21.44
CaO	0.58	0.69	0.57	0.57	(La/Yb) <sub>N</sub>	11.97	10.08	13.16	13.04
Na <sub>2</sub> O	3.86	3.79	3.79	3.64	Eu*	0.07	0.17	0.08	0.06
K <sub>2</sub> O	5.60	5.49	5.52	5.36	Rb	179.94	175.58	182.96	178.48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.06	0.02	0.02	Ba	153.07	397.10	158.09	131.50
LOI	0.44	0.28	0.36	0.71	Th	15.92	23.35	20.13	13.44
Total	99.85	99.91	100.10	99.73	U	2.11	2.91	1.97	1.97
TFeO	1.67	1.97	1.72	1.52	Nb	16.16	18.82	15.47	14.29
TFeO/MgO	17.22	32.87	40.87	26.62	Ta	1.11	1.49	1.00	0.96
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.45	1.45	1.46	1.47	Sr	51.36	110.92	51.64	51.63
A/NK	1.01	1.11	1.05	1.07	Zr	216.01	253.37	194.14	178.82
A/CNK	0.93	1.01	0.97	0.99	Hf	7.18	8.31	7.59	6.64
La	64.33	60.65	71.11	58.60	Cr	20.42	23.03	16.70	22.82
Ce	150.29	120.81	157.44	146.66	Ga	20.09	21.19	20.83	20.44
Pr	15.22	15.03	17.16	13.66	Co	3.64	3.61	4.06	3.91
Nd	54.47	54.35	61.88	48.93	Ni	2.59	2.97	1.70	1.84
Sm	9.25	9.50	10.19	7.83	Li	2.80	4.41	2.50	2.35
Eu	0.20	0.49	0.26	0.15	Be	3.55	4.16	3.89	3.47
Gd	8.04	8.05	8.71	6.78	Sc	2.99	2.07	3.26	3.38
Tb	1.25	1.37	1.34	1.06	Zr-Nb-Ce-Y	415.32	430.17	402.03	367.04
Dy	7.09	7.58	7.34	5.66	10 000Ga/Al	3.03	2.97	3.06	3.05
Ho	1.18	1.34	1.24	0.98	锆石饱和温度	803	825	798	794
Er	3.69	4.11	3.80	3.04					

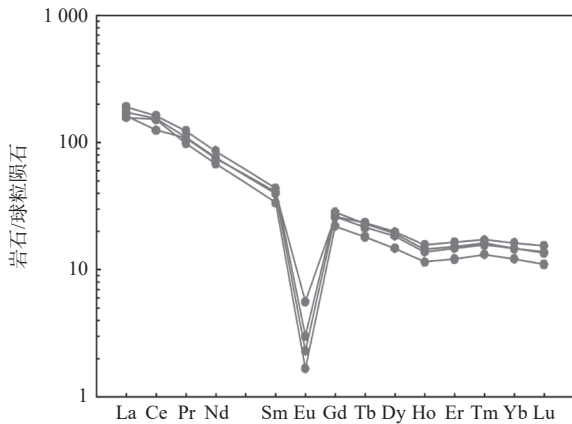


图8 球粒陨石标准化的REE图(标准化数值据 Taylor et al., 1985)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (Normalization values after Taylor et al., 1985)

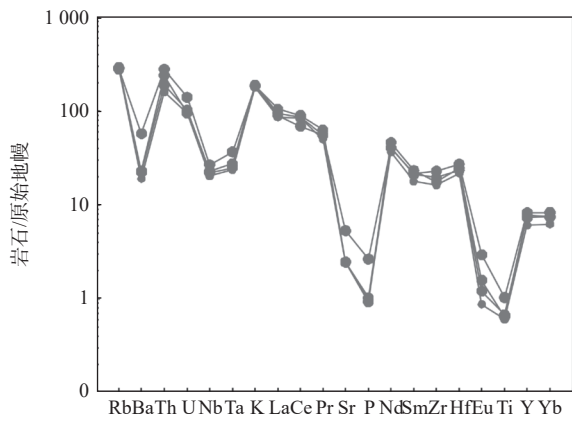


图9 原始地幔标准化的微量元素蛛网图(标准化数值据 Sun et al., 1989)

Fig. 9 Primitive mantle-normalized element spider diagram (Normalization values after Sun et al., 1989)

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

扎赉特旗晚三叠世中粗粒正长花岗岩为一套高硅、富铁、高钾的准铝质-弱过铝质花岗岩,同时具有低 Sr( $51.4 \times 10^{-6} \sim 111 \times 10^{-6}$ ),低 Eu( $Eu/Eu^* = 0.06 \sim 0.17$ ),相对富 Nb( $14.3 \times 10^{-6} \sim 18.8 \times 10^{-6}$ )和富 Zr( $179 \times 10^{-6} \sim 252 \times 10^{-6}$ ),高 Zr+Nb+Ce+Y( $367 \times 10^{-6} \sim 430 \times 10^{-6}$ )以及高  $10000 \times Ga/Al$ ( $3.0 \sim 3.1$ )等特征。吴福元等(2007)对 A 型花岗岩的判定进行了梳理,并认为由 Whalen 等(1987)提出的“ $10000 \times Ga/Al > 2.6$ 者为 A 型花岗岩”的标准仍是判定 A 型花岗岩最有效的指标。在 A 型花岗岩判别图解中(图 11),样品均落入 A 型花岗岩范围。进一步使用 Nb-Y-3Ga 图解进行判别(图 11),样品落入 A2 范围,显示为后造山型花岗岩。

通常认为高硅花岗岩( $SiO_2 > 74\%$ )是难以确定成因类型的。吴福元等(2007)对高分异花岗岩进行了讨论,认为对高分异花岗岩成因类型的判定几乎是不可能的,通常的判别图解也是失效的,并认为中国东北地区的高分异花岗岩有 2 种类型,一类含碱性暗色矿物,另一类含白云母和石榴子石;前者稀土和微量元素含量明显比正常花岗岩高出很多,而后者的稀土和微量元素含量比前者低 1~2 个数量级。李小伟等(2010)介绍了判断 A 型花岗岩是否为高分异花岗岩的定量指标,即当  $Rb > 250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$  时为高分异情况,且多具有低 Sr 特征。通过对比矿物组成以及稀土微量元素特征,笔者花岗岩明显不同于上述 2 类高分异花岗岩;相对低 Rb( $176 \times 10^{-6} \sim 183 \times 10^{-6}$ )和高 Sr( $51.4 \times 10^{-6} \sim 111 \times 10^{-6}$ ),不具有高分异花岗岩的特征。

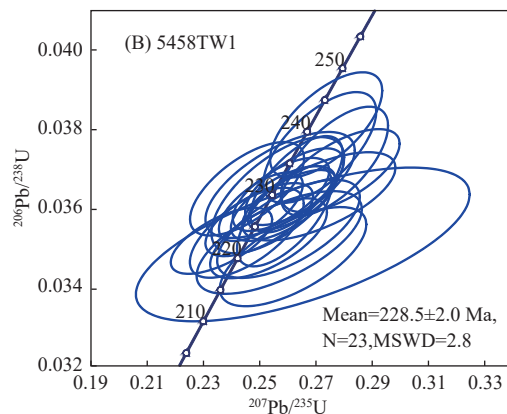
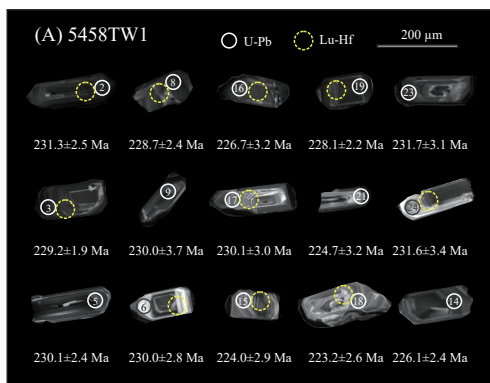


图 10 簸箕山中粗粒正长花岗岩锆石 CL 图像(A)及锆石谐和图(B)

Fig. 10 (A) CL images of zircons and (B) concordia plots showing LA-ICP-MS U-Pb dating results of the analysed zircons from the Bojishan medium-coarse grained texture syenogranite

表 2 簸箕山中粗粒正长花岗岩(样品 5458TW)锆石 LA-ICP-MS 定年分析结果

Tab. 2 Results of zircon LA-ICP-MS dating analysis of Bojishan medium-coarse grained texture syenogranite (Sample 5458TW)

测点号	Th U		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	(10 <sup>-6</sup> )			<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±1δ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±1δ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±1δ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±1δ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±1δ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±1δ
01	378	959	0.39	0.053 64	0.001 36	0.276 28	0.007 78	0.037 19	0.000 57	367	57	248	6	235	4
02	330	686	0.48	0.051 80	0.001 36	0.262 06	0.007 14	0.036 54	0.000 40	276	64	236	6	231	2
03	404	1 010	0.40	0.051 97	0.001 20	0.261 17	0.006 40	0.036 20	0.000 31	283	56	236	5	229	2
04	165	388	0.43	0.076 82	0.005 19	0.392 50	0.029 41	0.036 36	0.000 64	1 117	140	336	21	230	4
05	490	620	0.79	0.051 21	0.001 38	0.257 33	0.006 99	0.036 34	0.000 38	250	61	233	6	230	2
06	112	187	0.60	0.054 53	0.002 35	0.270 77	0.011 11	0.036 29	0.000 46	394	94	243	9	230	3
07	41	69	0.60	0.055 05	0.005 07	0.265 06	0.024 21	0.035 07	0.000 80	413	207	239	19	222	5
08	339	702	0.48	0.051 54	0.001 44	0.258 07	0.007 56	0.036 11	0.000 39	265	65	233	6	229	2
09	147	407	0.36	0.050 97	0.001 81	0.256 19	0.009 63	0.036 32	0.000 60	239	83	232	8	230	4
10	31	118	0.26	0.052 74	0.002 49	0.256 70	0.011 98	0.035 12	0.000 53	317	107	232	10	223	3
11	123	313	0.39	0.053 71	0.002 07	0.261 61	0.010 62	0.034 76	0.000 51	367	55	236	9	220	3
12	412	1 042	0.40	0.052 33	0.001 60	0.271 09	0.008 19	0.037 53	0.000 58	298	70	244	7	238	4
13	221	497	0.45	0.054 38	0.001 59	0.278 52	0.008 54	0.036 95	0.000 43	387	65	249	7	234	3
14	237	471	0.50	0.050 51	0.001 57	0.249 61	0.007 81	0.035 70	0.000 38	217	70	226	6	226	2
15	125	324	0.39	0.050 21	0.001 70	0.245 19	0.008 26	0.035 37	0.000 47	211	78	223	7	224	3
16	273	771	0.35	0.051 89	0.001 43	0.258 54	0.006 87	0.035 79	0.000 52	280	63	233	6	227	3
17	180	424	0.42	0.048 42	0.001 49	0.245 27	0.008 27	0.036 48	0.000 49	120	68	223	7	231	3
18	127	328	0.39	0.052 02	0.001 75	0.252 91	0.008 47	0.035 23	0.000 41	287	76	229	7	223	3
19	1 142	1 118	1.02	0.050 18	0.001 19	0.250 17	0.006 08	0.036 03	0.000 36	211	56	227	5	228	2
20	146	364	0.40	0.048 79	0.001 56	0.236 19	0.007 35	0.035 16	0.000 34	200	74	215	6	223	2
21	225	482	0.47	0.052 90	0.002 01	0.259 98	0.010 34	0.035 47	0.000 51	324	87	235	8	225	3
22	199	523	0.38	0.051 83	0.001 37	0.273 36	0.008 13	0.038 10	0.000 55	280	64	245	6	241	3
23	406	841	0.48	0.052 20	0.001 26	0.262 85	0.006 67	0.036 60	0.000 50	295	56	237	5	232	3
24	89	193	0.46	0.051 23	0.002 15	0.257 01	0.010 83	0.036 58	0.000 55	250	98	232	9	232	3

表 3 簸箕山中粗粒正长花岗岩(样品 5458TW)锆石 Hf 同位素数据分析结果

Tab. 3 Results of Lu-Hf isotopic compositions of Bojishan medium-coarse grained texture syenogranite (Sample 5458TW)

测点号	年龄 (Ma)	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	2σ	ε <sub>Hf</sub> (t)	T <sub>DM1</sub> (Ma)	T <sub>DM2</sub> (Ma)	f <sub>Lu/Hf</sub>
03	229	0.051 222	0.001 517	0.282 831	0.000 014	7.01	599	739	-0.95
06	230	0.034 238	0.001 078	0.282 791	0.000 016	5.69	649	814	-0.97
07	222	0.066 185	0.002 142	0.282 803	0.000 025	5.78	651	802	-0.94
08	229	0.054 429	0.001 638	0.282 860	0.000 019	8.00	560	683	-0.95
10	223	0.038 090	0.001 269	0.282 834	0.000 021	7.04	591	733	-0.96
12	238	0.036 658	0.001 139	0.282 815	0.000 014	6.69	617	764	-0.97
13	234	0.067 704	0.002 131	0.282 807	0.000 017	6.17	645	790	-0.94
15	224	0.047 940	0.001 589	0.282 785	0.000 017	5.28	667	832	-0.95
16	227	0.047 422	0.001 421	0.282 807	0.000 014	6.12	633	787	-0.96
17	231	0.040 945	0.001 259	0.282 813	0.000 016	6.47	621	771	-0.96
18	223	0.016 970	0.000 520	0.282 824	0.000 015	6.80	593	746	-0.98
19	228	0.076 378	0.002 346	0.282 837	0.000 020	7.07	605	735	-0.93
20	223	0.022 040	0.000 683	0.282 807	0.000 015	6.16	620	782	-0.98
24	232	0.046 200	0.001 469	0.282 831	0.000 016	7.10	598	737	-0.96



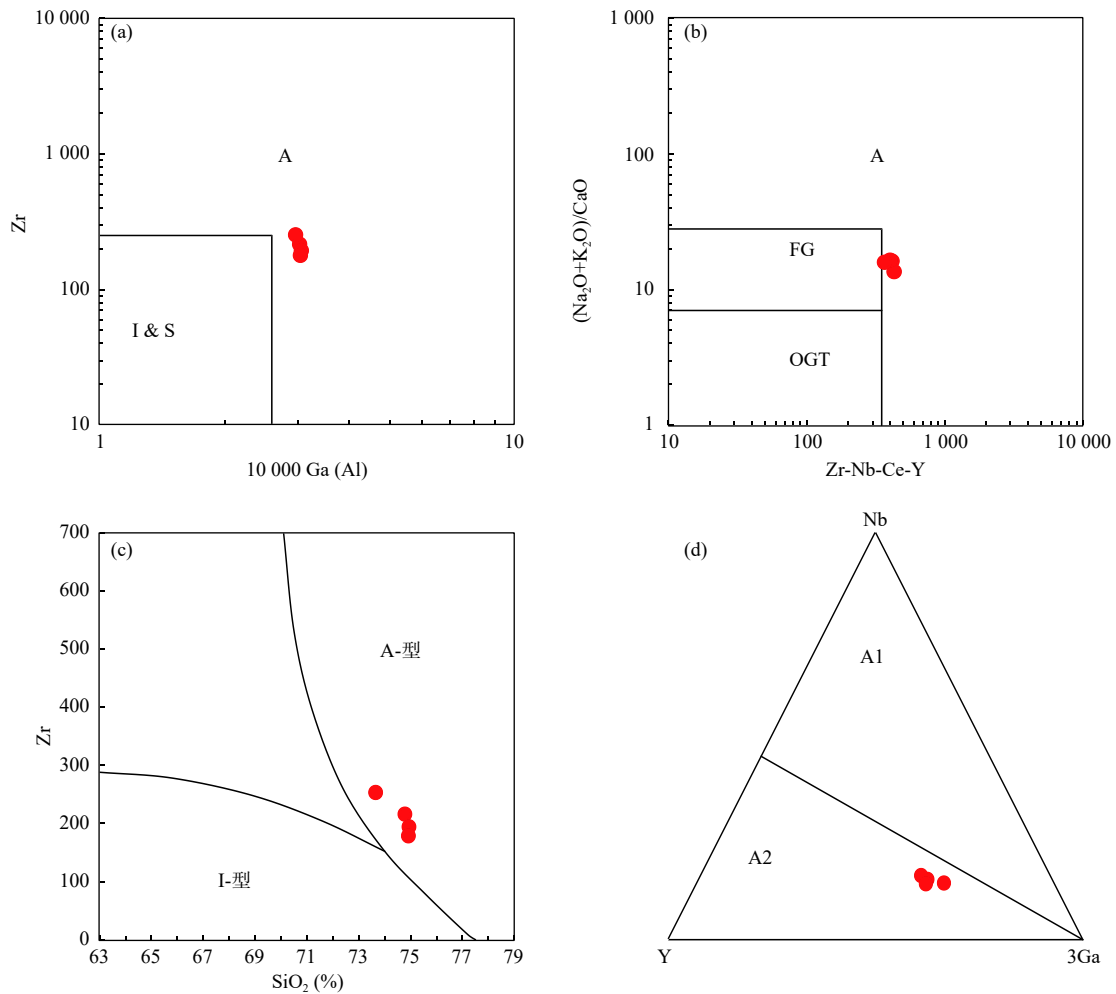


图 11 簸箕山中粗粒正长花岗岩 A 型花岗岩判别图(据 Whalen al., 1987; Eby, 1992)

Fig. 11 A-type granite discrimination diagram of Bojishan medium-coarse grained texture syenogranite (After Whalen al., 1987; Eby, 1992)

近年来,吴福元等(2007)指出 A 型花岗岩是高温的,而这一条件不可能是由 I 型花岗岩分异而来。李小伟等(2010)认为 A 型花岗岩最本质的特征在于它是一种高温花岗岩,相对于 I 型和 S 型花岗岩, A 型花岗岩的形成温度更高。张旗等(2012)提出由于 A 型花岗岩无水,所以需要高温条件。汪洋等(2013)提出准铝质和过铝质 A 型花岗岩的形成取决于是否具备高的地温梯度,与 I 型、S 型花岗岩类相比, A 型花岗岩最实质的化学特征是铁相对于镁的富集。张薇洁(2020)围绕 A 型花岗岩成因开展了热力学模拟工作,认为 A 型花岗岩的形成受制于源岩、温度和氧逸度的综合影响,源岩成分铁含量越高,温度越高,越容易形成 A 型花岗岩,制约生成 A 型花岗岩的并不是单一的温度或压力条件,很可能是地温梯度,认为 A 型花岗岩常形成于中高地温梯度。吴福元等(2007)指出相比于花岗岩浆起源的压力条件, A 型花岗岩形成的温

度信息更易获得;高温是判别 A 型花岗岩的重要标志。

该文花岗岩的锆饱和温度为 794 ~ 825 °C, 平均 805 °C, 明显高于辽东半岛的侏罗纪低温花岗岩(742 °C), 可对比于白垩纪高温花岗岩(799 °C)(吴福元等, 2007)。同时, 样品的温度也达到了铝质 A 型花岗岩的平均结晶温度的范畴(800 °C 以上)(李小伟等, 2010)。此外, 花岗岩在锆石中未见继承锆石, 指示了低压或高温的形成条件。综上所述, 认为扎赉特旗晚三叠世中粗粒正长花岗岩为铝质 A2 型花岗岩。锆石 Hf 同位素测试结果显示, 该岩体的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为正值 (+5.28 ~ +8.00),  $T_{\text{DM}2}$  值为 683 ~ 832 Ma, 指示花岗岩可能形成于新增生地壳物质的部分熔融。

#### 4.2 扎赉特旗地区石炭纪—三叠纪构造演化模式

综合扎赉特旗地区的研究成果, 笔者认为扎赉特旗地区在石炭纪—三叠纪具有如下的构造演化模式: ①早石炭世晚期俯冲背景; 扎赉特旗早石炭世晚期—

晚石炭世初期(329~317 Ma)辉长岩-闪长岩-石英二长闪长岩组合(汪岩等, 2013; Wang et al., 2014)具有弧火成岩的地球化学特征, 指示区域为古亚洲洋板片俯冲背景。②二叠纪残余海盆: 扎旗塔本毛都地区的中二叠统四甲山组和柳条沟组岩石组合显示了稳定的浅海相的碳酸盐台地环境(王俊涛等, 2011; 田树刚等, 2011); 扎旗乌兰哈达晚二叠世林西组海相核形石灰岩指示温暖、动荡的浅水环境, 说明晚二叠世早期存在海相或海陆交互环境(梁天意等, 2021)。③早—中三叠世碰撞造山: 扎旗德发屯下三叠统沉积岩显示为陆相沉积建造(张武等, 2006); 大兴安岭中部早三叠世 O 型埃达克岩指示区域年轻地壳的向北俯冲(李世超等, 2017); 扎旗老门山地区中三叠世(242~238 Ma)的高钾钙碱性火山岩和 I-A 型花岗岩, 指示碰撞造山晚期向伸展构造环境的转变(贺宏云等, 2020)。④晚三叠世造山后伸展: 扎赉特旗-乌兰浩特干旱晚三叠世(235~225 Ma)A2 型花岗岩(葛文春等, 2005; 本文), 标志着本区与古亚洲洋闭合有关的碰撞造山过程的结束。

该区出露的晚三叠世 A2 型花岗岩, 属于东北地区广泛出露的晚三叠世—早侏罗世 A2 型花岗岩的一员, 共同揭示了造山带规模的区域性岩石圈拆沉事件(Wu et al., 2002)。大兴安岭中晚三叠世具有大陆边缘弧性质的钙碱性火山岩的存在, 指示了蒙古-鄂霍茨克洋南向的俯冲背景, 而本区产出的洋壳俯冲(石炭纪弧火成岩+二叠纪海相地层)→闭合碰撞(下三叠陆相地层+早三叠世 O 型埃达克岩+中三叠世高钾钙碱性火山岩和 I-A 型花岗岩)→造山后伸展(晚三叠世 A2 型花岗岩)岩石地层序列则指示了与古亚洲洋闭合有关的完整造山过程。因此, 认为晚三叠世弧火成岩与 A2 型花岗岩所代表的 2 种构造背景可以通过一条界线分开, 这将更精细的刻画本区的地质演化历史, 这也是未来研究人员继续努力的方向。综上所述, 笔者认为扎赉特旗晚三叠世 A2 型花岗岩为古亚洲洋在本区残余洋盆闭合后的造山后伸展背景的产物。

#### 4.3 古亚洲洋东段闭合事件的时空迁移

大兴安岭北部早石炭世为古亚洲洋俯冲背景, 于早石炭世末完成闭合, 晚石炭世出现陆相沉积以及碰撞后岩浆岩(赵芝, 2011)。早二叠世 A2 型花岗岩(290~260 Ma)的出现指示大兴安岭北部进入造山后阶段(孙德有等, 2004)。在大兴安岭南部, 赤峰市敖汉旗地区在早石炭世早期处于伸展构造背景, 进入早石炭世晚期显示为大陆边缘的构造特征(李斌等,

2017)。大兴安岭南部地区二叠纪中晚期的沉积盆地具有陆间残余海洋盆地的特征, 古动物群的混生标志着中朝板块与西伯利亚板块沿索伦山-西拉木伦河北-长春-延吉一带碰撞的开始; 三叠纪中期(约 230 Ma)富钾花岗岩的出现说明碰撞的持续, 直到晚三叠世(约 220 Ma)具有幔源和壳源的双源特征的幔源杂岩、碱性岩、煌斑岩及碳酸岩的出现, 指示区域的动力学背景转变为以区域性伸展为主, 标志着古造山带生命的中止(李锦轶等, 2007)。

笔者建立了大兴安岭中部地区石炭纪—三叠纪与古亚洲洋闭合有关的构造演化模式, 对比大兴安岭北部和南部的造山演化过程, 大兴安岭中部在时间节点上晚于北部, 略早于南部, 显示出古亚洲洋在大兴安岭北部先闭合, 而后在中部扎赉特旗闭合, 最终在南部沿西拉木伦-长春-延吉一线闭合的时空迁移。这一古亚洲洋由北向南逐渐闭合的猜想与由古生物地层学资料支持的古亚洲洋东段(东北地区)主洋盆从古生代到晚古生代发生的由北向南的迁移(卜建军等, 2020)的认识一致。

## 5 结论

(1)扎赉特旗出露一套晚三叠世(228.5±2.0 Ma, MSWD=2.8)中粗粒正长花岗岩, 具有高 Si、富 Fe、高 K、低 Sr 和 Eu, 相对富 Nb 和富 Zr, 高 10 000×Ga/Al (3.0~3.1)等特征, 全岩锆饱和温度平均为 805 °C, 综合判定为铝质 A 型花岗岩。

(2)该岩体的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 +5.28~+8.00, 二阶段 Hf 模式年龄( $T_{\text{DM}2}$ )为 683~832 Ma, 指示花岗岩可能形成于新增生地壳物质的部分熔融。

(3)扎赉特旗地区的古亚洲洋残余洋盆在二叠纪闭合并进入碰撞造山阶段, 晚三叠世 A 型花岗岩的出现, 标志着该区进入造山后伸展阶段。

致谢: 在野外工作和实验测试中得到了五家户幅区调项目成员的帮助, 在成文过程中得到了沈阳地调中心境外室和塞尔维亚铜金资源项目同事的鼓励和支持, 与杨雅军教授高级工程师进行了有益探讨, 在此一并致谢!

## 参考文献(References):

- 卜建军, 何卫红, 张克信, 等. 古亚洲洋的演化: 来自古生物地层学方面的证据[J]. 地球科学, 2020, 45(3): 711-727.  
BU Jianjun, HE Weihong, ZHANG Kexin, et al. Evolution of the Pa-

- leo-Asian Ocean: Evidences from Paleontology and Stratigraphy[J]. *Earth Science*, 2020, 45(3): 711-727.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 749-762.
- GE Wenchun, WU Fuyuan, ZHOU Changyong, et al. Zircon U-Pb Ages and its Significance of the Mesozoic Granites in the Wulanhaote Region, Central Da Hinggan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 749-762.
- 贺锋, 徐立权, 苏宏伟, 等. 内蒙古西部甜水井地区中二叠世 A 型花岗岩[J]. *西北地质*, 2004, 37(3): 7-14.
- HE Feng, XU Liquan, SU Hongwei, et al. Characteristics and tectonic setting of Middle-Permian A-type granites in Tianshuijing area, west of Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 2004, 37(3): 7-14.
- 贺宏云, 李英雷, 刘汇川, 等. 大兴安岭东南段中三叠世岩浆岩年代学、地球化学特征及其对古亚洲洋构造演化时限的制约[J]. *地质通报*, 2020, 39(7): 1046-1061.
- HE Hongyun, LI Yinglei, LIU Huichuan, et al. Geochronology and Geochemistry of the Middle Triassic Magmatic Rocks in the Southeastern Part of the Da Hinggan Mountains and their Constraints on the Tectonic Evolution of Paleo-Asian Ocean[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(7): 1046-1061.
- 纪政, 葛文春, 杨浩, 等. 大兴安岭中段晚三叠世安第斯型安山岩: 蒙古-鄂霍茨克大洋板片南向俯冲作用的产物[J]. *岩石学报*, 2018, 34(10): 2917-2930.
- JI Zheng, GE Wenchun, YANG Hao, et al. The Late Triassic Andean-type Andesite from the Central Great Xing'an Range: Products of the Southward Subduction of the Mongol-Okhotsk Oceanic Plate[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(10): 2917-2930.
- 焦光磊, 李永军, 易善鑫, 等. 西准噶尔由后碰撞向板内体制转变的地质记录-来自克西克 A 型花岗岩的证据[J]. *西北地质*, 2013, 46(3): 39-49.
- JIAO Guanglei, LI Yongjun, YI Shanxin, et al. The Geological Record of the Post-collision Shift to Intraplate System in West Junggar: Evidence from Kexike A-type Granite[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(3): 39-49.
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. *岩石学报*, 2017, 23(3): 565-582.
- LI Jinyi, GAO Liming, SUN Guihua, et al. Shuangjingzi Middle Triassic Syn-collisional Crust-derived Granite in the East Inner Mongolia and its Constraint on the Timing of Collision Between Siberian and Sino-Korean Paleo-plates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 23(3): 565-582.
- 李锦轶, 刘建峰, 曲军峰, 等. 中国东北地区古生代构造单元: 地块还是造山带?[J]. *地球科学*, 2019, 44(10): 3157-3177.
- LI Jinyi, LIU Jianfeng, QU Junfeng, et al. Paleozoic Tectonic Units of Northeast China: Continental Blocks or Orogenic Belts?[J]. *Earth Science*, 2019, 44(10): 3157-3177.
- 李小伟, 莫宣学, 赵志丹, 等. 关于 A 型花岗岩判别过程中若干问题的讨论[J]. *地质通报*, 2010, 29(2/3): 278-285.
- LI Xiaowei, MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, et al. A Discussion on How to Discriminate A-type Granite[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(2/3): 278-285.
- 李世超, 张凌宇, 李鹏川, 等. 大兴安岭中段早三叠世 O 型埃达克岩的发现及其大地构造意义[J]. *地球科学*, 2017, 42(12): 2117-2128.
- LI Shichao, ZHANG Lingyu, LI Pengchuan, et al. Discovery and Tectonic Implications of Early Triassic O-Type Adakite in Middle of Great Xing'an Range[J]. *Earth Science*, 2017, 42(12): 2117-2128.
- 李斌, 陈井胜, 刘森, 等. 内蒙古敖汉旗斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. *西北地质*, 2017, 50(1): 227-238.
- LI Bin, CHEN Jingsheng, LIU Miao, et al. Zircon U-Pb Ages and Geochemical Characteristics of the Plagioclase Amphibolite in the Aohan Banner, Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(1): 227-238.
- 梁天意, 刘敬党, 李猛猛, 等. 大兴安岭中段上二叠统林西组核形石的发现及其地质意义[J]. *地质论评*, 2021, 67(3): 1-19.
- LIANG Tianyi, LIU Jingdang, LI Mengmeng, et al. Discovery of Oncolitic in the Upper Permian Linxi Formation in Central Great Xing'an Mountains and its Geological Significances[J]. *Geological Review*, 2021, 67(3): 1-19.
- 马永非, 刘永江, 温泉波, 等. 大兴安岭中段晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩成因及构造背景[J]. *地球科学*, 2017, 42(12): 2146-2173.
- MA Yongfei, LIU Yongjiang, WEN Quanbo, et al. Petrogenesis and Tectonic Settings of Volcanic Rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm. at Central Part of Great Xing'an Range[J]. *Earth Science*, 2017, 42(12): 2146-2173.
- 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系[J]. *科学通报*, 2000, 45(20): 2217-2222.
- SUN Deyou, WU Fuyuan, LI Huimin, et al. Emplacement Age of the Post-Orogenic A-type Granites in Northwestern Lesser Xing'an Ranges, and its Relationship to the Eastward Extension of Suolunshan-Hegenshan-Zhalaithe collisional suture zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(20): 2217-2222.
- 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(02): 213-218.
- SUN Deyou, WU Fuyuan, GAO Shan. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of the Qingshui Pluton in the East Xiao Hinggan Mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(02): 213-218.
- 孙德有, 吴福元, 高山, 等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. *地质前缘*, 2005, 12(2): 263-275.
- SUN Deyou, WU Fuyuan, GAO Shan, et al. Confirmation of Two Episodes of A-type Granite Emplacement During Late Triassic and Early Jurassic in the Central Jilin Province, and their Constraints on the Structural Pattern of Eastern Jilin-Heilongjiang Area, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 263-275.
- 田树刚, 张永生, 王俊涛, 等. 兴安-内蒙古地区晚古生代生物礁及其构造和油气意义[J]. *中国科学(地球科学)*, 2011,

- 41(4): 493–503.
- TIAN Shugang, ZHANG Yongsheng, WANG Juntao, et al. Late Paleozoic Reefs and their Significance for Tectonics and Oil-gas Exploration in the Hinggan-Inner Mongolia area[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 41(4): 493–503.
- 汪岩, 付俊彧, 那福超, 等. 内蒙古扎赉特旗辉长岩-闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 2013, 32(10): 1525–1535.
- WANG Yan, FU Junyu, NA Fuchao, et al. Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Age of the Gabbro-Diorite Jalaïd Banner of Inner Mongolia and their Geological Significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(10): 1525–1535.
- 汪洋, 焦永玲, 全立华, 等. 再论 A 型花岗岩的实质--与张旗先生等商榷[J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(2): 260–266.
- WANG Yang, JIAO Yongling, TONG Lihua, et al. The Essence of A-type Granitoids: A Discussion on the Opinions Held by Prof. Zhang Qi and Some other Researchers[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2013, 32(2): 260–266.
- 王俊涛, 张永生, 宋天锐, 等. 内蒙古扎赉特旗中二叠统岩石地层、生物地层特征及沉积环境分析[J]. *地层学杂志*, 2011, 35(4): 375–375.
- WANG Juntao, ZHANG Yongsheng, SONG Tianyue, et al. The Middle Permian Lithostratigraphy, Biostratigraphy and Sedimentary Environments of the Jalaïd Qi, Inner Mongolia[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2011, 35(4): 375–375.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the Petrogenesis of Granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等. 兴安造山带的基底属性与构造演化过程[J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1620–1646.
- XU Wenliang, SUN Chenyang, TANG Jie, et al. Basement Nature and Tectonic Evolution of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt[J]. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1620–1646.
- 张旗, 冉晔, 李承东. A 型花岗岩的实质是什么?[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(4): 621–626.
- ZHANG Qi, RAN Hao, LI Chengdong. D. A-type Granite: What is the Essence?[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(4): 621–626.
- 张薇洁. A 型花岗岩成因的热力学模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- ZHANG Weijie. Thermodynamic Modeling of the Origin of A-type Granites [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- 张武, 傅晓平, 丁秋红, 等. 内蒙古扎赉特旗德发屯地区下三叠统老龙头组的新发现[J]. *地层学杂志*, 2006, 30(1): 26–33.
- ZHANG Wu, FU Xiaoping, DING Qihong, et al. A New Knowledge of the Lower Triassic Laolongtou Formation in the Defatun Area, Jalaïd Qi, Inner Mongolia[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2006, 30(1): 26–33.
- 赵芝. 大兴安岭北部晚古生代岩浆作用及其构造意义[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- ZHAO Zhi. Late Paleozoic Magmatism and Its Tectonic Significance in the Northern Great Xing'an Range, Northeastern China [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- Eby G. Nelson. Chemical Subdivision of the A-type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641–644.
- Hu Zhaochu, Gao Shan, Liu Yongsheng, et al. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2008, 23: 1093–1101.
- Li, Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, et al. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr Nd Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I-and A-type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-slab?[J]. *Lithos*, 2007, 96: 186–204.
- Liu Huichuan, Li Yinglei, He Hongyun, et al. Two-phase Southward Subduction of the Mongol-Okhotsk Oceanic Plate Constrained by Permian-Jurassic Granitoids in the Erguna and Xing'an Massifs (NE China)[J]. *Lithos*, 2018, 304–307: 347–361.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, 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.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[A]. In: Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[M]. Geological Society Special Publications, 1989, 42: 313–345.
- Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- Wang Limin, Chi Xiaoguo, Zhao Zhi, et al. Zircon U–Pb Geochronology and Geochemistry of the Maoliger Quartz Monzodiorites, Inner Mongolia, China: Implications for Carboniferous Arc Magmatism and Closure of the Palaeo-Asian Ocean[J]. *International Geology Review*, 2014, 56(12): 1435–1449.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type Granites: Geochemical Characteristics, Discriminations and Petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407–419.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, et al. A-type Granites in Northeastern China: Age and Geochemical Constraints on their Petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(1–2): 143–173.
- Yang Hao, Ge Wenchun, Yu Qian, et al. Zircon U–Pb–Hf isotopes, Bulk-rock Geochemistry and Petrogenesis of Middle to Late Triassic I-type Granitoids in the Xing'an Block, Northeast China: Implications for Early Mesozoic Tectonic Evolution of the Central Great Xing'an Range[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 119: 30–48.
- Zhong Hong, Zhu Weiguang, Chu Zhuyin, et al. Shrimp U Pb Zircon Geochronology, Geochemistry, and Nd Sr Isotopic Study of Contrasting Granites in the Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 2006, 236: 112–133.