

符安宗,李成禄,石国明,等.黑龙江多宝山地区晚泥盆世A型花岗斑岩年代学、地球化学特征及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):811-827,doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220262.

Fu Anzong, Li Chenglu, Shi Guoming, et al. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Late Devonian A-Type Granite Porphyry in the Duobaoshan Area, Heilongjiang Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3): 811-827, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220262.

黑龙江多宝山地区晚泥盆世A型花岗斑岩年代学、地球化学特征及其地质意义

符安宗,李成禄,石国明,杨文鹏,杨元江,郑博,李金明

黑龙江省自然资源调查院,哈尔滨 150036

摘要:黑龙江多宝山地区位于兴蒙造山带东段,为兴安地块与松嫩地块的拼合部位,是研究嫩江—黑河洋(古亚洲洋分支)构造演化的关键地段。对嫩江市多宝山地区西侧出露的花岗斑岩开展岩石学、年代学和元素地球化学等方面的研究,以期限定其形成时代,探讨岩石成因及构造背景,为嫩江—黑河洋构造岩浆演化提供依据。花岗斑岩呈肉红色,具多斑状结构,块状构造,斑晶由钾长石、石英和少量的斜长石组成,基质主要由微晶结构的长英质矿物和少量黑云母组成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (365.1 ± 2.6) Ma, 形成于晚泥盆世晚期。岩石地球化学具有高质量分数的 SiO_2 、 K_2O , 低质量分数的 CaO 、 MgO 和 Al_2O_3 , 高 TFeO/MgO 和 Rb/Sr 值, 富集 Rb、Th、Zr 和 Hf 元素, 贫 Sr、Ba、Eu、Ti 和 P 元素, REE 配分曲线呈燕式分布, 负锆异常明显, 表现出 A 型花岗岩的特征。以高的 Zr/Hf 值, Na_2O 、 TFeO 质量分数和相对低的 P_2O_5 、Rb 质量分数区别于高分异 I 型、S 型花岗岩。特征微量元素比值与大陆地壳相应值相近, 且岩石具有较低的 MgO 、Cr 质量分数和 $\text{Mg}^\#$ 值, 指示其源区主要来自地壳。综合分析表明, 该期花岗斑岩为非典型 A1 亚类花岗岩, 兼具火山弧和板内花岗岩的元素地球化学特征, 形成于嫩江—黑河洋北向俯冲挤压体系下派生的局部拉张环境。

关键词:晚泥盆世; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; A 型花岗岩; 花岗斑岩; 黑龙江多宝山地区

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220262

中图分类号: P59; P588.12

文献标志码: A

Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Late Devonian A-Type Granite Porphyry in the Duobaoshan Area, Heilongjiang Province

Fu Anzong, Li Chenglu, Shi Guoming, Yang Wenpeng, Yang Yuanjiang, Zheng Bo, Li Jinming

Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Harbin 150036, China

收稿日期: 2022-09-17

作者简介: 符安宗(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事区域地质矿产调查方面的研究, E-mail: 116861157@qq.com

基金项目: 黑龙江省重点研发计划项目(GA21A204); 黑龙江省地质矿产局科研项目(HKY202302); 中国地质调查局项目(DD20160047-07)

Supported by the Key R&D Project in Heilongjiang Province (GA21A204), the Research Projects of Bureau of Geology & Mineral Resource of Heilongjiang Province (HKY202302) and the Project of China Geological Survey (DD20160047-07)

Abstract: The Duobaoshan area, situated within the contact zone between the Xing'an and Songnen blocks in the eastern part of Xing'an-Mongolia orogenic belt, holds significant importance in the study the tectonic evolution of Nenjiang-Heihe Ocean, which is the north branch of Paleo-Asian Ocean. In this paper, we present a detailed investigation of petrology, geochronology and geochemistry of the granite porphyries exposed in the western Duobaoshan area with the aims to identify their geochronology and petrogenesis, and further to reveal the tectonic-magmatic evolution associated with the Nenjiang-Heihe Ocean. The investigated granite porphyries are flesh red, with multi porphyry structure and massive structure. Their phenocrysts predominantly comprise potassium feldspar, quartz and a small amount of plagioclase. The matrix is mainly composed of felsic minerals with microcrystalline structure and minor biotites. The LA-ICP-MS U-Pb zircon age suggest the granite porphyry formed at Late Devonian (365.1 ± 2.6 Ma). Moreover, the granite porphyries are geochemically characterized by high SiO_2 and K_2O contents, along with low CaO , MgO and Al_2O_3 compositions, and high TFeO/MgO and Rb/Sr ratios. They are enriched in Rb, Th, Zr and Hf, and depleted in Sr, Ba, Eu, Ti, P, with swallow-like REE patterns and negative Eu anomalies, showing the characteristics of A-type granite. Distinguished from highly differentiated I-type and S-type granites, they display a high Zr/Hf ratio, Na_2O , TFeO content and relatively low P_2O_5 , Rb content. The low MgO , and Cr contents and $\text{Mg}^\#$ values, together with their characteristic trace element ratios, indicated the predominant crustal source contribution. Based on the regional geology and the geochemical characteristics of the studied rocks, we concluded that the granite porphyry is an A1 subtype granite, which has the geochemical characteristics of both volcanic arc and intraplate granite. Furthermore, we infer that the granite porphyry should be formed in the local extensional environment during the northward subduction of Nenjiang-Heihe Ocean.

Key words: Late Devonian; zircon U-Pb age; geochemistry; A-type granite; granite porphyry; the Duobaoshan area, Heilongjiang Province

0 引言

黑龙江多宝山地区位于大兴安岭与小兴安岭结合部,属兴蒙造山带东段,为兴安地块和松嫩地块的拼合部位,自古生代以来经历了古亚洲洋、环太平洋、蒙古-鄂霍茨克洋三大构造域的地质构造演化^[1-3],构造岩浆活动频繁,成矿地质作用复杂。该地区目前已发现多宝山斑岩型铜钼矿床、铜山斑岩型铜矿床、三矿沟砷卡岩型铁矿床、争光低温热液型金矿床和二道坎低温热液型银矿床等,成矿潜力巨大。特别是黑龙江省首个大型独立银矿二道坎银矿床的发现,为多宝山地区增加了新的找矿方向。因此,查清多宝山地区成矿地质背景尤为重要。近年来,众多学者围绕上述矿床及其外围开展了较为详尽的研究,报道了多期构造岩浆事件,基本理清了多宝山地区成矿地质背景^[3-12]。然而该地区晚泥盆世岩浆事件未见报道,其地质构造演化缺乏晚泥盆世岩浆记录,该时期地质构造背景尚不明确。

A型花岗岩富硅富碱贫水,地球化学上以贫Al、Sr、Eu、Ba、Ti、P等为特征,形成于低压高温条

件下,大多产于伸展环境或挤压、剪切体制下派生的局部拉张环境^[13-17]。尽管A型花岗岩类仅占花岗岩类的一小部分,但该类花岗岩具有重要的地球化学意义,探讨其产出的动力学背景可以限定区域构造演化^[18]。

鉴于此,本文在多宝山地区1:5万区域地质调查工作的基础上,通过对新发现的A型花岗岩斑岩进行详细的岩石学、年代学和元素地球化学研究,准确量定其形成时代,揭示其岩石成因,探讨其构造环境,为研究多宝山地区晚泥盆世构造环境及嫩江-黑河洋的构造演化提供新的可靠素材和地质依据,进一步完善多宝山地区的成矿地质背景。

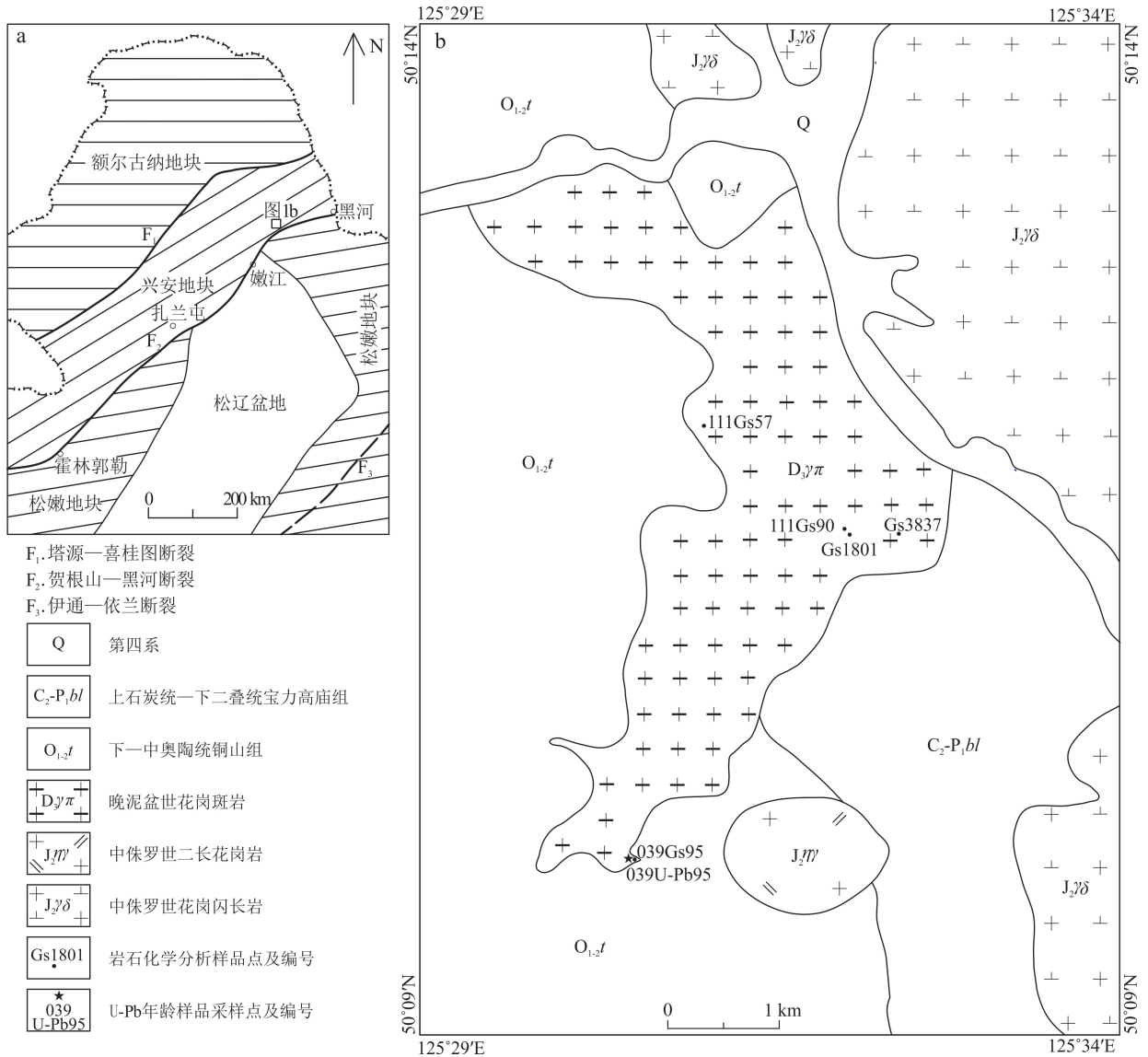
1 地质概况

研究区位于黑龙江省嫩江市多宝山地区西侧,属兴蒙造山带东段兴安地块东北边缘(图1a),经历了三大构造域的叠加演化,岩浆活动强烈,变质作用复杂,发育古生代弧盆系火山-沉积建造、岩浆弧和中生代火山-沉积盆地^[21]。

研究区古生代海相火山-沉积地层和中生代陆

相火山-沉积地层发育,地层由老到新依次为:下一中奥陶统铜山组($O_{1-2}t$)浅海一半深海—深海陆源碎屑沉积岩夹火山碎屑岩、多宝山组($O_{1-2}d$)岛弧型钙碱性火山岩夹大理岩透镜体,上奥陶统裸河组(O_3l)浅海—滨海相沉积岩夹凝灰岩和结晶灰岩透镜体、爱辉组(O_3ah)浅海一半深海相沉积岩,下志留统黄花沟组(S_1h)浅海一半深海相沉积岩,中志留统八十里小河组(S_2b)浅海相沉积岩夹火山岩,上志留统卧都河组(S_3w)浅海—滨海相沉积岩,下泥盆统泥鳅河组(D_1n)浅海相沉积岩夹火山岩,中—上泥盆统

根里河组($D_{2-3}g$)浅海相沉积岩,上石炭统一下二叠统宝力高庙组(C_2-P_1bl)中酸性陆相火山岩夹正常沉积碎屑岩,下白垩统龙江组(K_1l)陆相中性火山岩、光华组(K_1gn)陆相酸性火山岩、九峰山组(K_1j)山间半地堑式断陷盆地沉积岩、甘河组(K_1g)陆相基性火山岩和第四系冲洪积物。区域上岩浆活动频繁,由老到新发育中奥陶世花岗闪长岩和花岗闪长斑岩、早石炭世正长花岗岩、晚石炭世—早二叠世碱长花岗岩、中—晚三叠世花岗闪长岩、早侏罗世闪长岩、中侏罗世花岗闪长岩和二长花岗岩。



a 据文献[19-20]修编。

图 1 中国东北地区构造简图(a)和研究区地质简图(b)

Fig.1 Tectonic framework of NE China (a) and geological diagram of the study area (b)

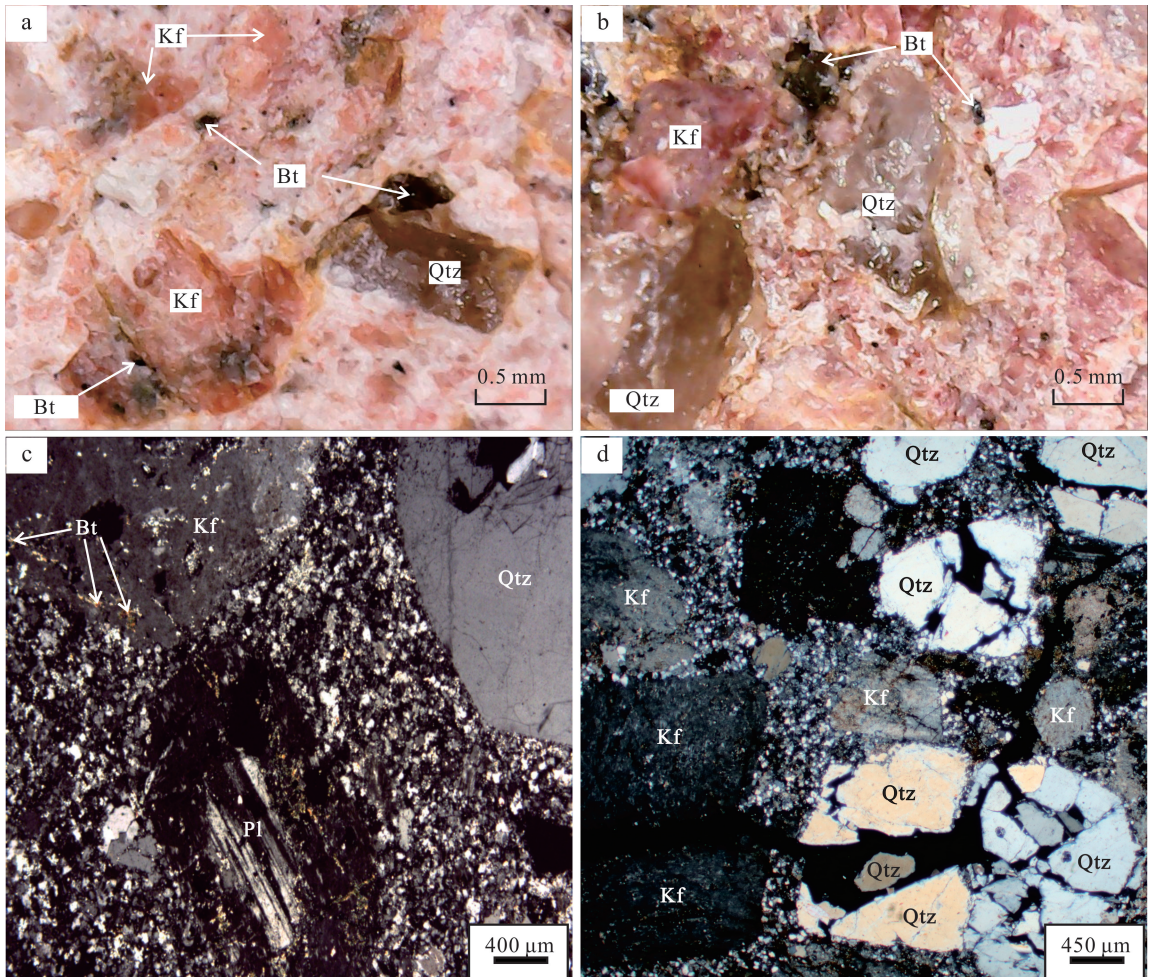
本文研究的花岗斑岩呈不规则小岩株状产出,总体呈近北东向展布,出露面积约 10 km²,侵位于下一中奥陶统铜山组海相沉积岩中,被上石炭统一下二叠统宝力高庙组陆相火山岩不整合覆盖(图 1b)。其岩相学特征揭示:岩石呈肉红色,具多斑状结构,块状构造。岩石由斑晶和基质组成,斑晶约占岩石的 50%(图 2)。斑晶由钾长石、石英和少量的斜长石组成,粒径多为 0.5~4.0 mm。钾长石呈半自形柱状、粒状,负低突起,平行消光,具黏土化,体积分数约为 25%;石英呈他形粒状、熔蚀斑状,晶面平坦,波状消光,裂纹发育,体积分数约为 20%;斜长石呈半自形柱状,具聚片双晶,成分为更长石,绢云母化发育,体积分数约为 5%。基质主要由微晶结构的长英质矿物和少量黑云母组成,黑云母具绿泥石化、白云母化,部分黑云母镶嵌在长石、

石英斑晶上,斜长石具绢云母化,钾长石具黏土化。副矿物为磁铁矿、锆石。

2 分析方法

本文对 1 件样品进行锆石 U-Pb 法年龄测定,对 5 件样品进行岩石地球化学分析测试。样品较为新鲜,采样位置见图 1b 和表 1。

锆石 U-Pb 测年:在野外采集新鲜岩石样品,选送至河北省区域地质矿产调查研究所实验室进行单矿物锆石分选工作。以常规方法将样品粉碎至 80~100 目,并用淘洗、电磁选等方法进行单矿物锆石分选;然后在双目镜下挑选透明度较好、晶形较好、裂纹和包体较少的锆石用于 U-Pb 年龄测定。锆石制靶、阴极发光(CL)图像的采集由北京锆年领航科技有限公司完成。锆石 U-Th-Pb 同位素分



a, b. USB 数码显微镜下照片; c, d. 光学显微镜下照片(+). Kf. 钾长石; Qtz. 石英; Bt. 黑云母; Pl. 斜长石。

图 2 研究区晚泥盆世花岗斑岩显微镜下特征

Fig. 2 Micrograph of Late Devonian granite porphyry in the study area

表1 研究区晚泥盆世花岗斑岩样品

Table 1 Sample table of Late Devonian granite porphyry in the study area

样品编号	取样坐标	主要矿物组合
039U - Pb95	50°09'55.17"N 125°30'27.79"E	
039Gs95		
Gs1801	50°11'26.60"N 125°32'08.74"E	钾长石+石英+
Gs3837	50°11'27.13"N 125°32'31.27"E	斜长石
111Gs57	50°12'03.24"N 125°31'00.00"E	
111Gs90	50°11'28.90"N 125°32'08.16"E	

析在中国地质调查局天津地质调查中心完成。锆石 U - Th - Pb 分析在天津地质调查中心 LA - MC - ICPMC 仪器上完成,所用仪器由 NEW WAVE 193 nm FX 激光器和 NEPTUNE 型多接收等离子质谱组成,激光剥蚀的斑束直径为 35 μm ,能量密度为 13~14 J/cm²,频率为 8~10 Hz,采用 91500 和 GJ - 1 标准锆石作为锆石定年外标,详细的实验原理和测试方法见参考文献[22]。采用 Liu 等^[23]研发的 ICPMSDataCal 程序和 Ludwig^[24]的 Isoplot 程序进行数据处理、年龄谐和图绘制和加权平均年龄计算,利用 NIST SRM 612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 质量分数。

主量、微量和稀土元素分析测试:在野外采集新鲜岩石样品,选送不含包体和岩脉的样品送至自然资源部哈尔滨矿产资源监督检测中心进行岩石地球化学分析测试。其中主量元素分析采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)完成,所用仪器型号为 PW2400/40 型,分析误差优于 5%;微量元素和稀土元素分析采用电感耦合等离子体质谱法(ICP - MS)测定,所用仪器型号为 X Series II 型,分析误差优于 10%,具体分析测试流程详见参考文献[25]。

3 测试结果

3.1 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄

本次研究对多宝山地区 1 个花岗斑岩样品(039U - Pb95)进行了 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 同位素测年,测试结果见表 2。CL 阴极发光图像(图 3)显示用于测试的锆石内部结构清晰,为自形一半自形晶体,以短柱状、等轴状为主,少数锆石因溶蚀形态不规则,粒径大小多在 90~180 μm 之间,长宽比在 2 : 1~1 : 1 之间。阴极发光图像中大多数锆石可见明显的岩浆韵律环带结构,Th/U 值

较高,介于 0.33~0.64 之间,具典型岩浆成因锆石特征^[26]。

样品 039U - Pb95 共测试 25 个锆石点,其中有 4 个点(9、16、21、23 点)的谐和度小于 90%,偏离谐和线,可能发生了²⁰⁴Pb 的丢失,所以未参与锆石年龄的计算;3 个点(4、19、22 点)的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄在 392~388 Ma 之间,明显大于其他 18 个锆石点的年龄,可能为捕获锆石,因此未参与锆石年龄的计算;其他 18 个锆石点位于 U - Pb 谐和线上及其附近(图 4),²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 374~356 Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(365.1 \pm 2.6)Ma($n=18$,MSWD=0.83),时代为晚泥盆世晚期。所有锆石点²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 值非常接近,变化于 0.051 4~0.060 3 之间,表明该批锆石为同期岩浆锆石。因此,该加权平均年龄代表本次研究的花岗斑岩结晶年龄,其形成于晚泥盆世晚期。

3.2 岩石地球化学特征

本次研究于多宝山地区共采集花岗斑岩 5 件新鲜岩石样品用于岩石地球化学分析,其主量、微量和稀土元素分析结果列于表 3。

从表 3 可以看出,研究区花岗斑岩样品具有高硅($w(\text{SiO}_2)=73.38\%\sim77.12\%$)、高钾($w(\text{K}_2\text{O})=4.73\%\sim5.43\%$)、富碱($w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=7.58\%\sim9.02\%$)、低钛($w(\text{TiO}_2)=0.09\%\sim0.20\%$)、低钙($w(\text{CaO})=0.18\%\sim0.44\%$)、贫镁($w(\text{MgO})=0.04\%\sim0.12\%$)、低 Al_2O_3 ($w(\text{Al}_2\text{O}_3)=11.87\%\sim13.64\%$)和高 TFeO/MgO 值(12.37~49.49)的地球化学特征。在 $R_2 - R_1$ 图解(图 5a)中,所有样品均落入碱性花岗岩区域。花岗斑岩的 AR 值介于 2.61~3.22 之间,属碱性系列(图 5b);在 $w(\text{K}_2\text{O}) - w(\text{SiO}_2)$ 图解(图 5c)中落入高钾钙碱性系列;在 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}) - w(\text{SiO}_2)$ 图解(图 5d)中落入碱性系列和碱钙性系列;在 $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO}) - w(\text{SiO}_2)$ 图解(图 5e)中落入铁质(Fenoan)区域;在 $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图解(图 5f)上落入过铝质区域,属弱过铝质花岗岩;在 $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO})/(\text{TFeO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}) - 100(\text{MgO}+\text{TFeO}+\text{TiO}_2)$ 图解(图 5g)上除 1 个点落入高分异花岗岩区域外,其余 4 个点均落入碱性花岗岩区域。

样品中稀土总量较高且变化较大, $w(\sum\text{REE})=(144.67\sim388.93)\times 10^{-6}$,平均值为 296.68×10^{-6} ;相对富集轻稀土元素,亏损重稀土元素,LREE/HREE

表 2 研究区晚泥盆世花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试结果

Table 2 U-Pb age test results of zircon LA-ICP-MS from Late Devonian granite porphyry in the study area

点号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						年龄/Ma							
	Pb	Th	U	Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ			
1	191	956	2 874	0.33	0.054 9	0.000 9	0.445 1	0.012 2	0.058 8	0.001 1	406	44	374	9	368	7	
2	59	397	859	0.46	0.054 6	0.000 9	0.446 8	0.010 0	0.059 4	0.001 0	398	37	375	7	372	6	
3	162	1 295	2 286	0.57	0.054 8	0.000 7	0.450 6	0.009 1	0.059 7	0.001 1	467	28	378	6	374	7	
4	124	957	1 652	0.58	0.053 3	0.000 8	0.456 1	0.008 0	0.062 1	0.000 9	343	33	382	6	388	5	
5	16	138	230	0.60	0.057 1	0.002 3	0.470 2	0.024 7	0.059 4	0.001 2	494	58	391	17	372	7	
6	81	551	1 155	0.48	0.056 8	0.001 3	0.463 1	0.013 5	0.059 0	0.000 9	483	84	386	9	370	5	
7	8	71	110	0.64	0.051 5	0.003 0	0.410 1	0.022 9	0.058 4	0.000 9	261	135	349	16	366	6	
8	63	356	940	0.38	0.053 6	0.000 9	0.431 1	0.010 2	0.058 3	0.001 1	367	39	364	7	365	6	
9	31	274	450	0.61	0.053 5	0.001 4	0.429 1	0.013 9	0.058 2	0.001 1	1 813	58	649	13	369	4	
10	97	528	1 439	0.37	0.056 1	0.000 7	0.455 6	0.009 8	0.059 0	0.001 1	350	55	363	10	365	7	
11	49	286	731	0.39	0.054 1	0.001 0	0.439 3	0.010 5	0.059 0	0.001 1	457	25	381	7	369	7	
12	180	1 280	2 601	0.49	0.052 5	0.000 7	0.427 4	0.008 3	0.059 0	0.000 9	376	36	370	7	369	7	
13	94	772	1 374	0.56	0.053 1	0.000 9	0.420 6	0.008 3	0.057 5	0.000 8	309	31	361	6	370	6	
14	111	867	1 587	0.55	0.054 1	0.000 8	0.428 3	0.007 4	0.057 4	0.000 7	345	39	356	6	360	5	
15	46	306	664	0.46	0.060 3	0.001 2	0.483 0	0.012 6	0.058 0	0.000 9	376	31	362	5	360	4	
16	141	1 108	2 039	0.54	0.052 2	0.000 9	0.416 0	0.010 7	0.057 7	0.000 9	613	41	400	9	363	6	
17	61	473	854	0.55	0.051 4	0.001 0	0.411 7	0.009 6	0.058 2	0.000 9	295	37	353	8	361	5	
18	71	472	971	0.49	0.057 4	0.001 4	0.497 8	0.017 1	0.062 7	0.001 4	257	46	350	7	365	6	
19	43	302	636	0.47	0.053 9	0.001 3	0.435 3	0.011 9	0.058 6	0.000 9	506	56	410	12	392	9	
20	225	1 419	3 139	0.45	0.057 3	0.001 3	0.495 3	0.014 7	0.062 7	0.001 1	369	49	367	8	367	5	
21	59	410	898	0.46	0.053 6	0.001 1	0.427 7	0.010 3	0.057 9	0.001 0	1 220	79	585	23	434	10	
22	57	462	839	0.55	0.055 5	0.001 1	0.434 7	0.009 8	0.056 8	0.000 7	502	50	409	10	392	7	
23	191	956	2 874	0.33	0.054 9	0.000 9	0.445 1	0.012 2	0.058 8	0.001 1	709	55	414	10	362	5	
24	59	397	859	0.46	0.054 6	0.000 9	0.446 8	0.010 0	0.059 4	0.001 0	354	44	362	7	363	6	
25	162	1 295	2 286	0.57	0.054 8	0.000 7	0.450 6	0.009 1	0.059 7	0.001 1	432	43	366	7	356	4	

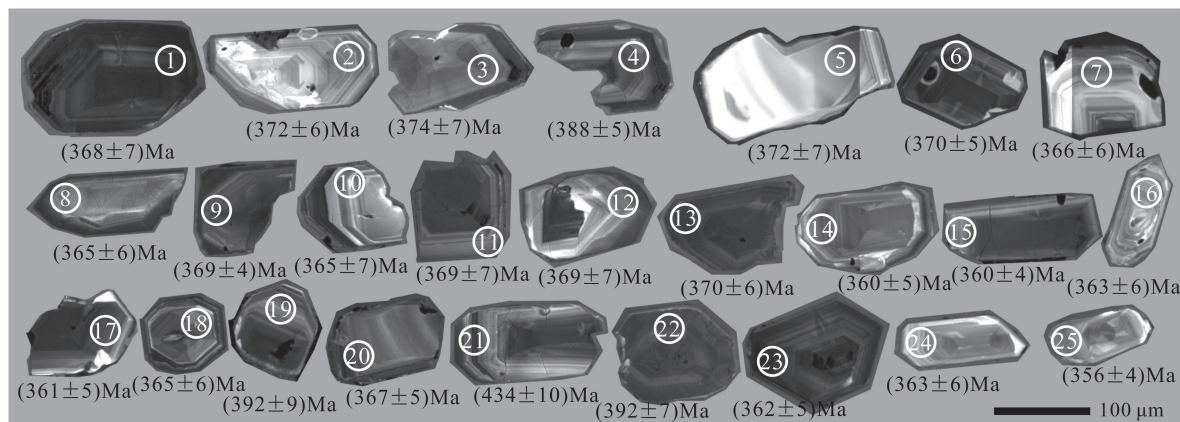


图 3 研究区晚泥盆世花岗斑岩锆石阴极发光图像

Fig.3 Zircon CL images of Late Devonian granite porphyry in the study area

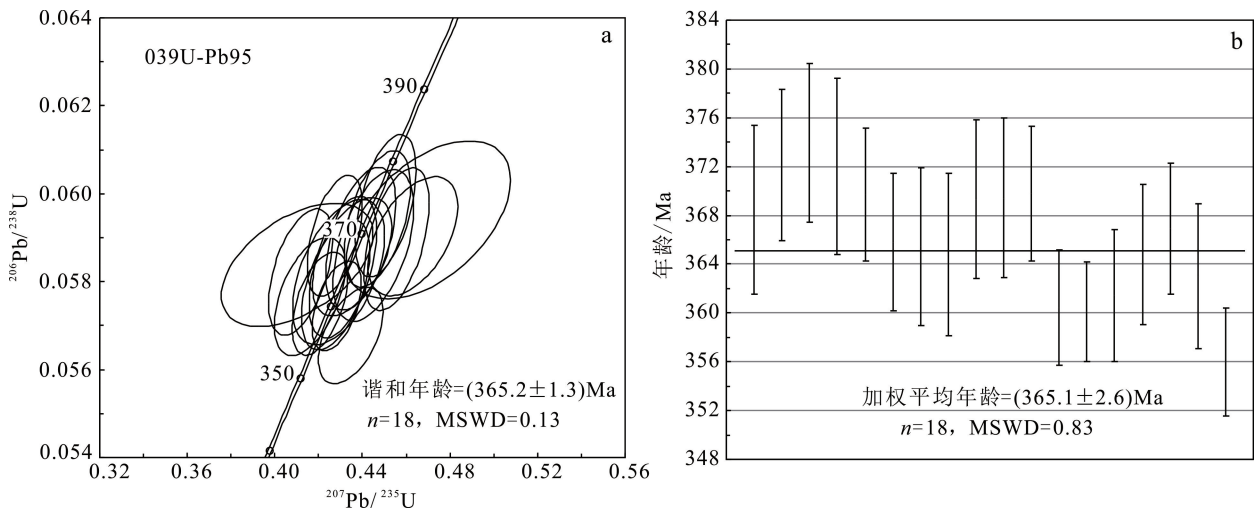


图 4 研究区晚泥盆世花岗斑岩 U - Pb 年龄谐和图 (a) 及加权平均年龄图 (b)

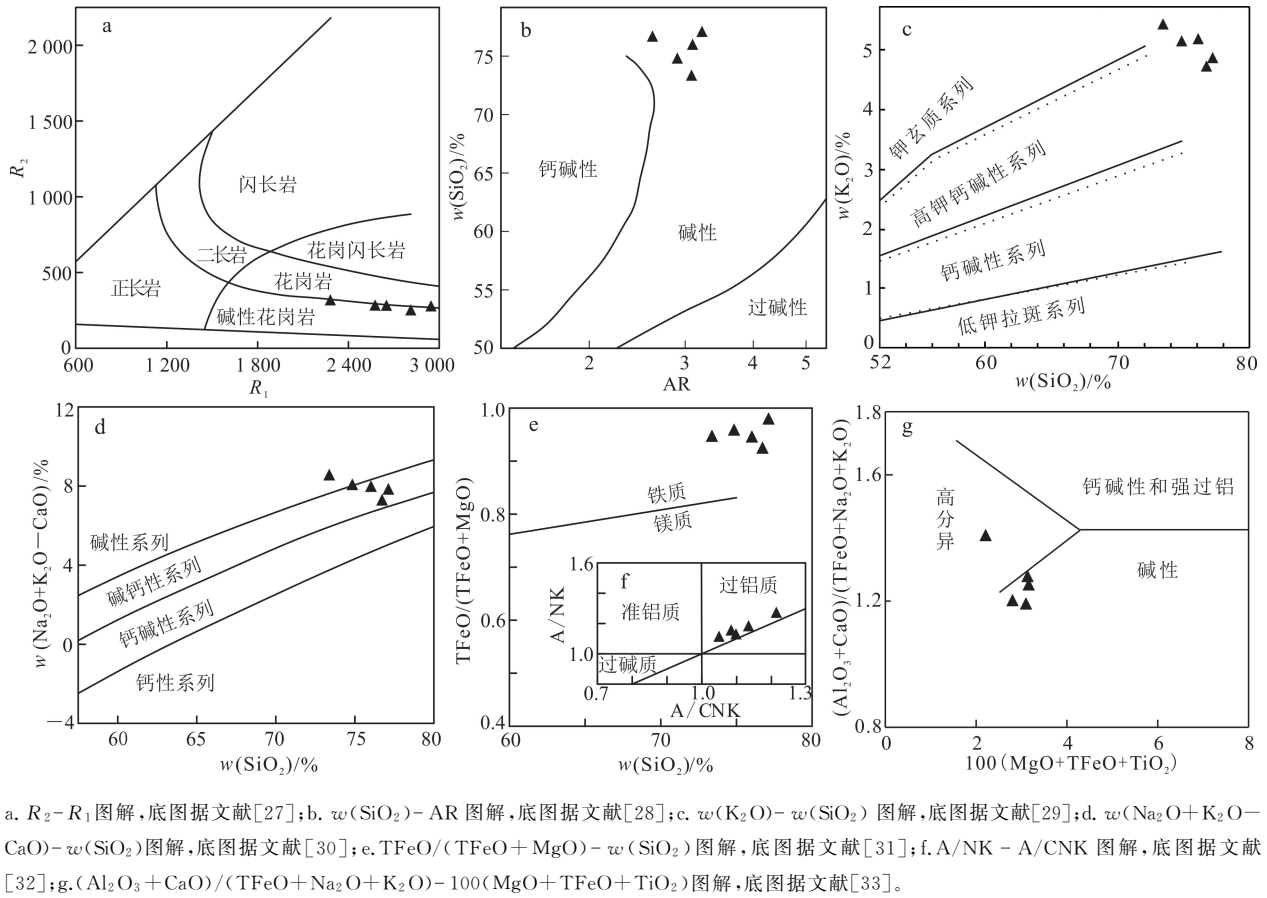
Fig.4 Maps showing U - Pb concordia diagrams (a) and mean age (b) for Late Devonian granite porphyry in the study area

表 3 研究区晚泥盆世花岗斑岩主量、稀土与微量元素分析结果

Table 3 Data table of major elements and trace elements of Late Devonian granite porphyry in the study area

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总和	Na ₂ O+K ₂ O	A/CNK
039Gs95	76.72	0.09	12.50	1.08	0.57	0.02	0.12	0.27	2.85	4.73	0.06	0.88	99.89	7.58	1.21
Gs1801	77.12	0.14	11.87	2.05	0.15	0.02	0.04	0.18	3.17	4.87	0.02	0.20	99.83	8.04	1.10
Gs3837	76.02	0.12	12.13	1.66	0.69	0.02	0.12	0.38	3.20	5.18	0.03	0.18	99.73	8.38	1.05
111Gs57	74.84	0.15	12.86	1.64	0.72	0.06	0.09	0.27	3.20	5.16	0.04	0.34	99.37	8.36	1.13
111Gs90	73.38	0.20	13.64	1.67	0.54	0.04	0.11	0.44	3.59	5.43	0.03	0.32	99.39	9.02	1.08
样品号	A/NK	TFeO	TFeO/MgO	R ₁	R ₂	AR	Mg [#]	Sc	Cr	Rb	Sr	Y	Nb	Ba	La
039Gs95	1.27	1.48	12.37	2 946	280.0	2.61	14.49	5.24	30.0	170	46	35.20	36.3	82	21.8
Gs1801	1.13	1.98	49.49	2 812	254.1	3.22	4.07	5.66	13.7	98	21	8.68	17.2	23	75.9
Gs3837	1.12	2.11	17.62	2 651	284.6	3.09	10.64	5.98	35.6	108	38	11.70	18.1	92	65.2
111Gs57	1.19	2.12	23.59	2 576	285.6	2.90	8.16	5.26	18.8	109	38	23.90	20.8	116	84.8
111Gs90	1.16	1.99	18.08	2 280	320.1	3.08	10.39	5.46	23.8	119	38	22.70	21.4	104	58.7
样品号	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Zr	Hf
039Gs95	63.3	6.09	23.2	5.32	0.11	5.65	1.09	7.02	1.45	4.37	0.63	3.99	0.65	162	5.9
Gs1801	148.0	13.50	41.4	5.07	0.12	3.20	0.35	1.92	0.36	1.11	0.16	1.05	0.19	217	5.3
Gs3837	194.0	13.40	42.7	5.95	0.17	4.02	0.48	2.58	0.50	1.50	0.23	1.50	0.26	217	5.4
111Gs57	196.0	19.10	61.4	9.15	0.20	6.24	0.93	4.62	0.86	2.54	0.39	2.37	0.33	238	6.0
111Gs90	187.0	13.40	43.3	6.57	0.18	4.91	0.75	3.97	0.78	2.40	0.37	2.36	0.30	231	5.8
样品号	Ta	Th	U	δEu	LREE	HREE	LREE/HREE	∑REE	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	Nb/Ta	Zr/Hf	T _{Zr} /°C	
039Gs95	3.58	18.7	2.04	0.06	119.82	24.85	4.82	144.67	3.92	2.65	1.17	10.14	27.46	807.87	
Gs1801	1.35	12.2	0.67	0.08	283.99	8.34	34.05	292.33	51.85	9.66	2.52	12.74	40.94	825.41	
Gs3837	1.14	11.7	1.31	0.10	321.42	11.07	29.04	332.49	31.18	7.07	2.22	15.88	40.19	819.25	
111Gs57	1.10	14.2	1.55	0.08	370.65	18.28	20.28	388.93	25.67	5.98	2.18	18.91	39.67	834.73	
111Gs90	1.16	13.0	1.29	0.09	309.15	15.84	19.52	324.99	17.84	5.77	1.72	18.45	39.83	824.62	

注:主量元素质量分数单位为%;微量、稀土元素质量分数单位为 10⁻⁶。R₁ = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti), R₂ = 6Ca + 2Mg + Al, 式中元素为千阳离子。



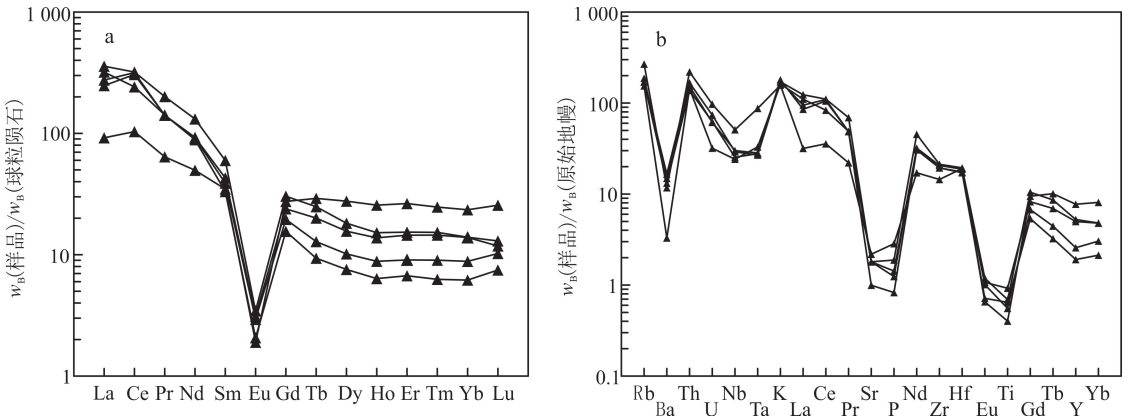
a. $R_2 - R_1$ 图解, 底图据文献[27]; b. $w(\text{SiO}_2) - \text{AR}$ 图解, 底图据文献[28]; c. $w(\text{K}_2\text{O}) - w(\text{SiO}_2)$ 图解, 底图据文献[29]; d. $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - w(\text{SiO}_2)$ 图解, 底图据文献[30]; e. $\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO}) - w(\text{SiO}_2)$ 图解, 底图据文献[31]; f. $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图解, 底图据文献[32]; g. $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO})/(\text{TFeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - 100(\text{MgO} + \text{TFeO} + \text{TiO}_2)$ 图解, 底图据文献[33]。

图 5 研究区晚泥盆世花岗斑岩主量元素图

Fig.5 Diagrams of major elements of Late Devonian granite porphyry in the study area

值除 1 个样品为 4.82 外, 其余为 19.52~34.05, 平均值为 21.54; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 17.84~51.85 (仅 1 个样品为 3.92), 平均值为 26.09, 在稀土元素配分曲线图上

呈富 LREE 的右倾型曲线 (图 6a); $(\text{La}/\text{Sm})_N = 2.65 \sim 9.66$ (平均值为 6.23), $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.17 \sim 2.52$ (平均值为 1.96), 显示轻稀土元素分馏程度高于



球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值据文献[34]。

图 6 研究区晚泥盆世花岗斑岩稀土元素球粒陨石标准化配分图 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b)
Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) for Late Devonian granite porphyry in the study area

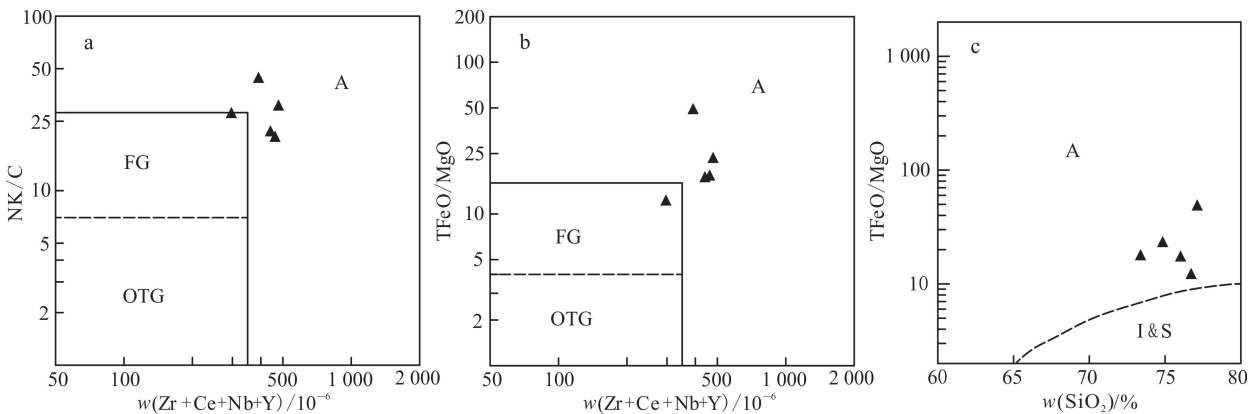
重稀土元素;δEu 值介于 0.06~0.10 之间,平均值为 0.08,显示明显的负铕异常,表明源区残留有大量的斜长石或成岩过程经历了斜长石的分离结晶作用^[18,35]。在微量元素蛛网图(图 6b)上,所有花岗斑岩样品均富集大离子亲石元素 Rb、Th、K 和高场强元素 Nd、Zr、Hf,而强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti 等元素。

4 讨论

4.1 岩石成因

I 型、S 型、A 型、M 型花岗岩是目前常用的花岗岩岩石成因分类方案^[36]。其中真正由地幔岩浆衍生的 M 型花岗岩较为少见,一般产于大洋火山岛弧,岩石组合为大洋斜长花岗岩、辉长岩, $w(K_2O) < 0.6\%$ ^[37-38]。多宝山区晚泥盆世花岗斑岩 $w(K_2O) = 4.73\% \sim 5.43\%$,远大于 0.6% ,不可能为 M 型花岗岩。该期花岗斑岩主要由碱性长石、石英及斜长石等矿物组成,在 $R_2 - R_1$ 图解(图 5a)中落入碱性花岗岩区域,具有高 Si 和 K,低 Ca 和 Al,富 Rb、Th、Zr 和 Hf,贫 Sr、Ba、Eu、Ti 和 P,高 TFeO/MgO 值和 Rb/Sr 值(2.84~4.67),REE 分布具有明显的负铕异常,在稀土元素配分曲线图上表现出右倾的燕式分布型式。以上几点明显不同于 I 型和 S 型花岗岩,而表现出 A 型花岗岩的特征^[36-41]。Whalen 等^[40]对比研究了大量 M、I、S、A 型花岗岩地球化学数据,提出一系列相关判别图解,如 $(Na_2O + K_2O)/CaO(NK/C) - w(Zr + Ce + Nb + Y)$ 和 $TFeO/MgO - w(Zr + Ce + Nb + Y)$ 图解,对 A 型花岗岩的判定较为准确。Eby^[42]的研究表明,对于高硅的 ($w(SiO_2) > 74\%$) I、S、A 型花岗岩,利用 $TFeO/MgO - w(SiO_2)$ 图解能有效地把大多数 A 型花岗岩区别出来。在这些图解(图 7a、b、c)中,晚泥盆世花岗斑岩除 1 个样品点在 $TFeO/MgO - w(Zr + Ce + Nb + Y)$ 图解中未落入 A 型花岗岩区域外,其余样品点均落入 A 型花岗岩区域。但是,A 型花岗岩与 $w(SiO_2) > 72\%$ 的高分异 I 型、S 型花岗岩具有一定的相似性^[40,43-45]。相对于未分异花岗岩,高分异花岗岩具有低的 Zr/Hf 值(< 38)^[45]。相对于 A 型花岗岩,高分异 S 型花岗岩具有低的 $w(Na_2O)$ (平均值为 2.81%) 和高的 $w(P_2O_5)$ (平均值为 0.14%)^[46],高分异 I 型花岗岩具有相对低的 $w(TFeO)$ (一般 $< 1\%$) 和高的 $w(Rb)$ ($> 270 \times 10^{-6}$)^[47]。多宝山区晚泥盆世花岗斑岩具有高的 Zr/Hf 值、高的 $w(Na_2O)$ 和 $w(FeO)$ 、低的 $w(P_2O_5)$ 和 $w(Rb)$ (表 3),与高分异 I 型、S 型花岗岩明显不同,且在 $(Al_2O_3 + CaO)/(TFeO + Na_2O + K_2O) - 100(MgO + TFeO + TiO_2)$ 图解(图 5g)上,仅有 1 个样品点落入高分异花岗岩区域,说明该期花岗斑岩不是高分异 I 型、S 型花岗岩,但可能经历一定的分离结晶作用。

低压和高温是 A 型花岗岩形成的重要条件^[13-15,39-40]。张旗等^[48-49]在分析归纳大量资料的基础上,将中酸性花岗岩按 Sr、Yb 的质量分数和反映的源区压力划分为埃达克岩型花岗岩($w(Sr) > 300 \times$



a. $(Na_2O + K_2O)/CaO(NK/C) - w(Zr + Ce + Nb + Y)$ 图解,底图据文献^[40]; b. $TFeO/MgO - w(Zr + Ce + Nb + Y)$ 图解,底图据文献^[40]; c. $TFeO/MgO - w(SiO_2)$ 图解,底图据文献^[42]。FG. 分异的 I、S、M 型花岗岩;OTG. 未分异的 I、S、M 型花岗岩。

图 7 研究区晚泥盆世花岗斑岩岩石类型判别图解

Fig.7 Rock type discrimination diagrams for Late Devonian granite porphyry in the study area

10^{-6} , $w(\text{Yb}) < 2.5 \times 10^{-6}$, 最小压力 > 1.2 GPa)、喜马拉雅型花岗岩 ($w(\text{Sr}) < 300 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) < 2 \times 10^{-6}$, 压力为 $0.8 \sim 1.4$ GPa)、浙闽型花岗岩 ($w(\text{Sr}) = (40 \sim 400) \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) > 1.5 \times 10^{-6}$, 压力为 $0.8 \sim 1.0$ GPa)、广西型花岗岩 ($w(\text{Sr}) > 400 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) > 2 \times 10^{-6}$, 压力尚不明确) 和南岭型花岗岩 ($w(\text{Sr}) = (2 \sim 100) \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) = (1 \sim 30) \times 10^{-6}$, 压力 < 0.8 GPa) 等五类。多宝山区晚泥盆世花岗斑岩 $w(\text{Sr}) = (21 \sim 46) \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) = (1.05 \sim 3.99) \times 10^{-6}$, 属南岭型花岗岩, 其源区压力小于 0.8 GPa, 反映了与 A 型花岗岩一致的低压特征。对于长英质岩浆, 锆石饱和温度 (T_{Zr}) 近似于熔体的分离温度, 可以通过锆石饱和温度计算来获取岩浆初始温度^[50]。计算公式: $T_{\text{Zr}} = 12900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496000 / Z_{\text{r}}^{\text{熔体}})]$, 式中温度为绝对温度, $M = [(Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)]^{[50-51]}$ 。经计算, 本文花岗斑岩样品的锆石饱和温度介于 $807.87 \sim$

834.73 °C 之间(平均值为 822.38 °C), 明显高于 I 型花岗岩的饱和温度 (764 °C 和 781 °C) 和 S 型花岗岩的饱和温度 (703 °C 和 779 °C), 而与澳大利亚 Lachlan 褶皱带 A 型花岗岩的平均温度 (839 °C) 相近^[43, 52]。

综上, 多宝山区晚泥盆世花岗斑岩属于 A 型花岗岩, 可能经历一定的分离结晶作用。

多宝山区晚泥盆世花岗斑岩样品在微量元素原始地幔标准化蛛网图上显示 Nb、Ta、P、Ti 的贫化, 指示其源区主要来自地壳。表 4 中可见, 样品的 Rb/Sr 值 > 0.5 , Ti/Zr 值 < 20 , Ti/Y 值 < 100 , 属于壳源岩浆^[55-56]。另外, 样品的 Rb/Y、Rb/Nb、Rb/U、Ba/Sr、La/Yb、La/Sm、La/Nb、Sm/Nd、Y/Nb、Yb/Ta、Nb/Th、Nd/Th、Th/La、Th/Yb 等 14 个特征微量元素比值与大陆地壳相应的元素比值相近, 而与原始地幔的相应值相差较远, 加之较低的 MgO ($0.04\% \sim 0.12\%$)、Cr ($13.7\% \sim 35.6\%$) 质量分数和

表 4 研究区晚泥盆世花岗斑岩、原始地幔、大陆地壳特征微量元素对比值计算结果

Table 4 Data table of major elements and trace elements of Late Devonian granite porphyry in the study area

样品号	Rb/Sr	Ti/Zr	Ti/Y	Rb/Y	Rb/Nb	Rb/U	Ba/Sr	La/Yb	La/Sm	La/Nb
039Gs95	3.70	3.33	15.33	4.83	4.68	83.33	1.78	5.46	4.10	0.60
Gs1801	4.67	3.87	96.68	11.29	5.70	146.27	1.10	72.29	14.97	4.41
Gs3837	2.84	3.31	61.48	9.23	5.97	82.44	2.42	43.47	10.96	3.60
111Gs57	2.87	3.78	37.62	4.56	5.24	70.32	3.05	35.78	9.27	4.08
111Gs90	3.13	5.19	52.81	5.24	5.56	92.25	2.74	24.87	8.93	2.74
平均值	3.44	3.90	52.78	7.03	5.43	94.92	2.22	36.37	9.65	3.09
原始地幔	0.03	116.07	285.71	0.14	0.89	30.24	0.33	1.39	1.55	0.96
大陆地壳 A	0.12	54.00	270.00	1.60	2.91	35.16	0.96	7.27	4.57	1.45
大陆地壳 B	0.15	31.82	221.05	2.58	6.13	37.69	1.43	10.53	5.13	2.50
样品号	Sm/Nd	Y/Nb	Yb/Ta	Nb/Th	Nd/Th	Th/La	Th/Yb	Nb/Ta	Nb/U	
039Gs95	0.23	0.97	1.11	1.94	1.24	0.86	4.69	10.14	17.79	
Gs1801	0.12	0.50	0.78	1.41	3.39	0.16	11.62	12.74	25.67	
Gs3837	0.14	0.65	1.32	1.55	3.65	0.18	7.80	15.88	13.82	
111Gs57	0.15	1.15	2.15	1.46	4.32	0.17	5.99	18.91	13.42	
111Gs90	0.15	1.06	2.03	1.65	3.33	0.22	5.51	18.45	16.59	
平均值	0.16	0.87	1.48	1.60	3.19	0.32	7.12	15.22	17.46	
原始地幔	0.33	6.38	12.02	8.39	15.93	0.12	0.17	17.39	33.95	
大陆地壳 A	0.22	1.82	2.20	3.14	4.57	0.22	1.59	11.00	12.09	
大陆地壳 B	0.20	2.38	2.71	1.43	3.57	0.28	2.95	11.43	6.15	

注: 原始地幔数据引自文献[34]; 大陆地壳 A 数据引自文献[53]; 大陆地壳 B 数据引自文献[54]。

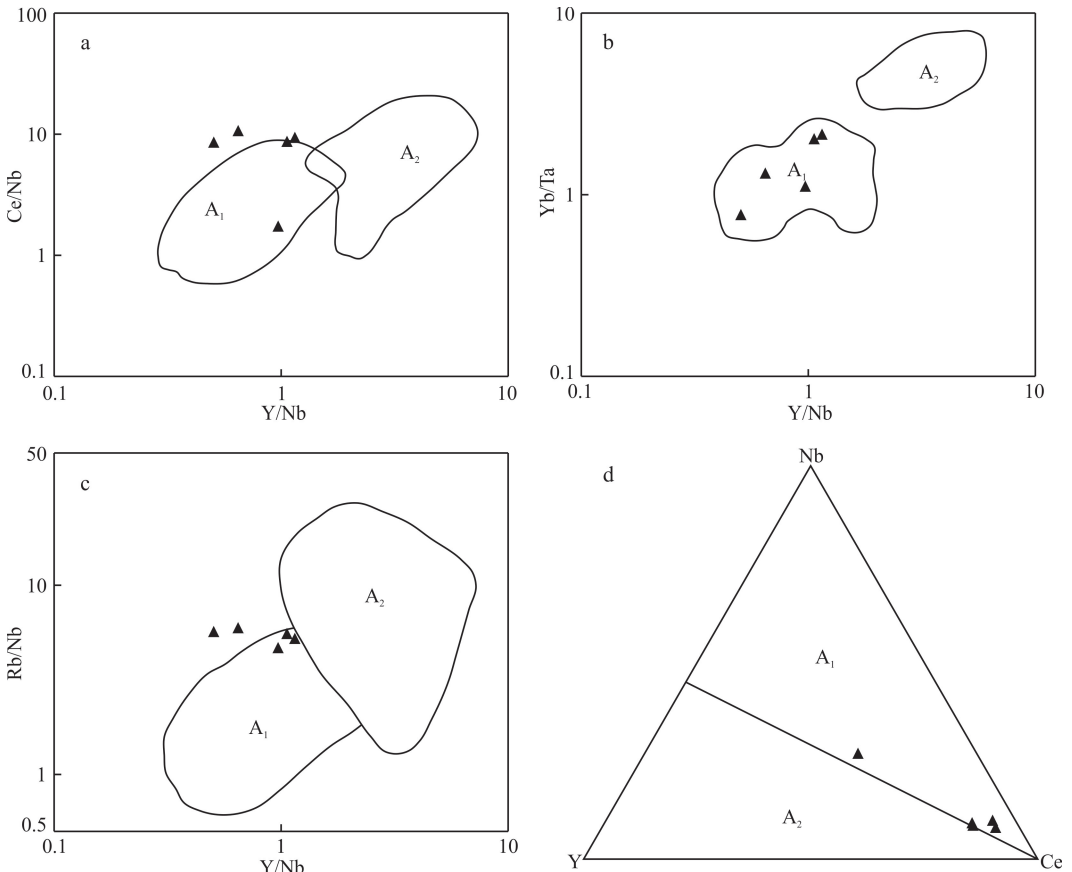
$Mg^\#$ 值(4.07~14.49),也显示壳源岩石的特征。然而,Nb/Ta、Nb/U 值介于大陆地壳与原始地幔相应值之间,表明其岩浆源区有地幔物质的参与。基于上述研究成果,多宝山地区晚泥盆世花岗斑岩应是有幔源物质贡献的新生下地壳部分熔融的产物。

4.2 构造环境与地质意义

A 型花岗岩具有一定的构造指示意义,几乎都是构造伸展背景或挤压、剪切体制下派生的局部拉张环境的产物^[13-16]。Eby^[13] 根据不相容元素比值将 A 型花岗岩分为 A₁ 和 A₂ 两个亚类。A₁ 亚类中不相容元素的比值与洋岛玄武岩相似,其岩浆来源以地幔为主,主要形成于地幔柱或裂谷环境;A₂ 亚类中不相容元素比值变化较大,其相似范围从大陆地壳平均值到岛弧玄武岩平均值,其岩浆来源主要是地壳,主要形成于弧后、碰撞后或造山期后的张性环境。多宝山地区晚泥盆世花岗斑岩在 Ce/Nb - Y/Nb、Yb/Ta - Y/Nb 和 Rb/Nb - Y/Nb 图解(图 8a、b、c)中均落入 A₁ 型花岗岩区域及其附近,在

Nb - Y - Ce 图解(图 8d)中落入 A₁ 型花岗岩与 A₂ 型花岗岩界线附近,显示其为 A₁ 型花岗岩,兼具 A₂ 型花岗岩特征。岩石在 R₂ - R₁ 构造环境判别图解(图 9a)中落入非造山和造山后期区域,反映该期花岗斑岩形成于伸展构造背景下的拉张环境中。在微量元素 $w(Rb) - w(Y + Nb)$ 、 $w(Rb) - w(Yb + Ta)$ 和 $w(Nb) - w(Y)$ 构造环境判别图解(图 9b、c、d)上,样品落入火山弧和板内花岗岩区域。然而,多宝山地区晚泥盆世花岗斑岩的岩浆来源主要是地壳,可能有地幔物质的参与,这与典型的 A₁ 亚类花岗岩不同。因此,本文认为该期花岗斑岩形成的构造环境也有别于 A₁ 亚类花岗岩,其构造环境需结合区域数据进行综合分析。

多宝山地区早奥陶世至晚泥盆世早期为海相化石丰富的地层,晚泥盆世晚期的地层开始出现陆相化石,标志着多宝山海盆于晚泥盆世开始闭合;晚石炭世一早二叠世沉积地层的缺失标志着多宝山地区此时处于碰撞造山阶段^[60]。本区南部霍龙门、嫩江



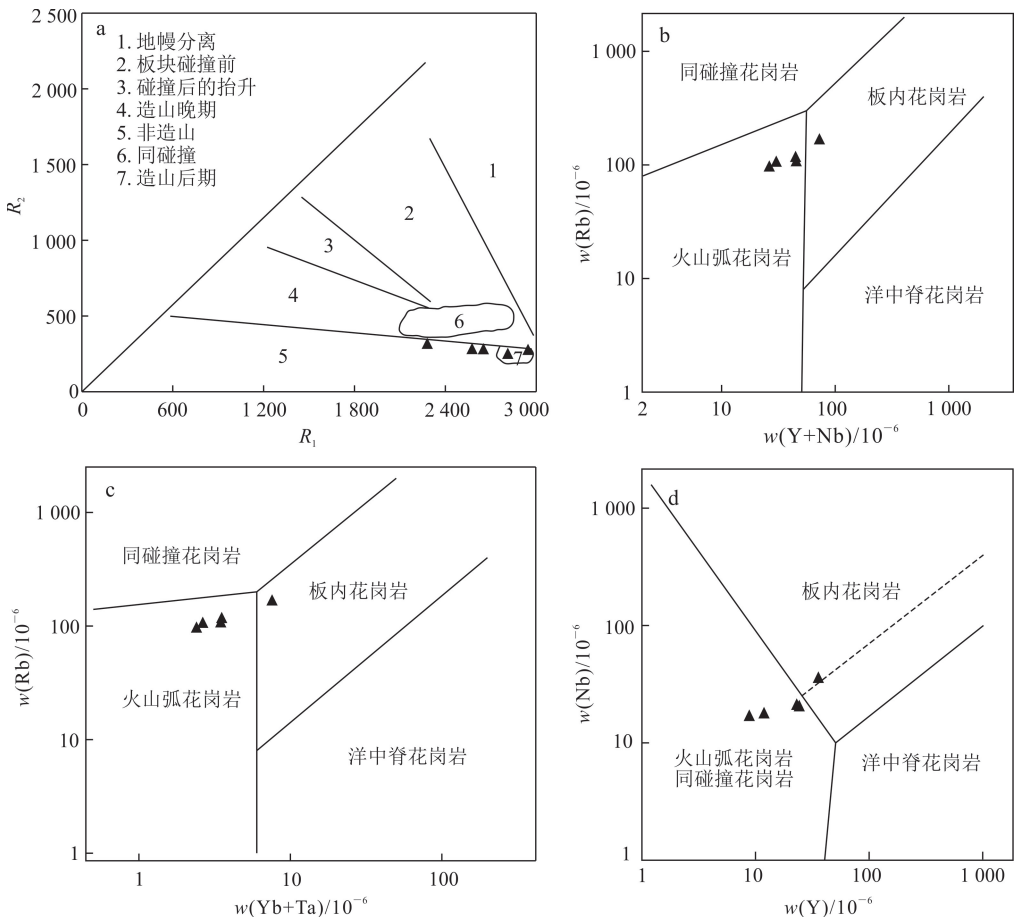
底图据文献[13]。

图 8 研究区晚泥盆世花岗斑岩 A₁、A₂ 型花岗岩判别图解

Fig.8 Discrimination diagrams of A₁ and A₂ type granites of Late Devonian granite porphyry in the study area

等地发育的早石炭世—晚石炭世早期(351~322 Ma)的花岗岩具有板块碰撞前—碰撞的地球化学特征^[61-64],反映兴安地块与松嫩地块的拼贴时间应为早石炭世—晚石炭世早期;扎兰屯地区发育的晚古生代早期(405~325 Ma)花岗岩类可能与兴安地块和松嫩地块的碰撞拼合作用有关,其拼合时限可能为早石炭世中期^[65]。本文中 A 型花岗岩形成于(365.1±2.6)Ma,属晚泥盆世晚期,不可能是碰撞后花岗岩。有学者在本区南部哈达阳地区和扎兰屯地区发现具有火山弧型玄武岩特征的镁铁—超镁铁质岩石和具有火山弧性质的中酸性火山岩,形成于晚泥盆世晚期(363.3~362.1 Ma)^[66-67];在本区东北部三道湾子金矿发现晚泥盆世((363.3±2.6)、(369.2±2.3)、(377.0±3.0)Ma)埃达克岩和 I 型花岗岩,形成于由洋壳俯冲的岛弧环境向洋壳闭合陆陆碰撞的挤压造山的过渡阶段^[68]。由此可见,晚泥

盆世时期,兴安地块和松嫩地块之间的黑河洋尚未消失,正处于俯冲消减阶段。另外,Gou 等^[69]在本区西部满洲里—额尔古纳地区发现一套晚泥盆世(360±4)Ma 的 A₂ 型花岗岩,可能形成于弧后伸展环境;Li 等^[70-72]在额尔古纳地块中南部识别出形成于弧后伸展环境的晚泥盆世(365.2±3.9)Ma 的流纹岩,说明晚泥盆世额尔古纳地块处于伸展环境。本文研究的 A 型花岗斑岩位于兴安地块东北缘的多宝山地区,离满洲里—额尔古纳地区较远,而离嫩江—黑河洋较近,受嫩江—黑河洋北向俯冲的影响较大。因此,多宝山地区在晚泥盆世时期应总体处于洋壳俯冲的挤压背景。结合上述 A 型花岗岩的分析,本文认为多宝山地区晚泥盆世 A 型花岗斑岩应形成于嫩江—黑河洋北向俯冲挤压体制下派生的局部拉张环境。



a 底图据文献^[57];b,c,d 底图据文献^[58-59]。

图 9 研究区晚泥盆世花岗斑岩构造环境判别图解

Fig.9 Discrimination diagrams of tectonic setting for Late Devonian granite porphyry in the study area

5 结论

1) 多宝山区晚泥盆世花岗斑岩的锆石 LA-ICP-MS 定年显示,其锆石加权平均年龄为(365.1±2.6)Ma,表明本期花岗斑岩的侵位年龄为晚泥盆世晚期。

2) 岩石学、地球化学特征显示,多宝山区晚泥盆世花岗斑岩为弱过铝质 A 型花岗岩,是有幔源物质贡献的新生下地壳部分熔融的产物。

3) 多宝山区晚泥盆世花岗斑岩为非典型的 A₁ 亚类花岗岩,兼具火山弧和板内花岗岩的元素地球化学特征,形成于嫩江—黑河洋北向俯冲挤压体制下派生的局部拉张环境,表明多宝山区约 365 Ma 处于挤压背景下的局部伸展环境。

参考文献(References):

- [1] Hao Y J, Ren Y S, Duan M G, et al. Metallogenic Events and Tectonic Setting of the Duobaoshan Ore Field in Heilongjiang Province, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97:442-458.
- [2] Wu G, Chen Y C, Sun F Y, et al. Geochronology, Geochemistry, and Sr-Nd-Hf Isotopes of the Early Paleozoic Igneous Rocks in the Duobaoshan Area, NE China, and Their Geological Significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97:229-250.
- [3] 刘宝山,程招勋,钱程,等.大兴安岭多宝山晚三叠世双峰式侵入岩年代学及地球动力学背景[J].*地球科学*, 2021,46(7):2311-2328.
- Liu Baoshan, Cheng Zhaoxun, Qian Cheng, et al. Geochronology and Geodynamic Background Study of the Late Triassic Bimodal Pattern Intrusive Rock in Da Hinggan Mountains Duobaoshan Area [J]. *Earth Science*, 2021, 46(7): 2311-2328.
- [4] Zhao C, Qin K Z, Song G X, et al. The Triassic Duobaoshan Appinite-Granite Suite, NE China: Implications for a Water-Fluxed Lithospheric Mantle and an Extensional Setting Related to the Subduction of the Mongol-Okhotsk Ocean[J]. *Lithos*, 2021, 394/395: 106169.
- [5] Cai W Y, Wang K Y, Li J, et al. Geology, Geochronology and Geochemistry of Large Duobaoshan Cu-Mo-Au Orefield in NE China: Magma Genesis and Regional Tectonic Implications [J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(1): 265-292.
- [6] Liu J, Zhou Z H, He Z F, et al. Ircon U-Pb Dating and Geochemistry of Ore-Bearing Tonalite in Tongshan

- Copper Deposit, Heilongjiang Province [J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(2): 289-308.
- [7] Chu S X, Zeng Q D, Liu J M, et al. Early-Middle Jurassic Magmatism and Skarn-Porphyry Mineralization in NE China: Geochronological and Geochemical Constraints from the Sankuanggou Skarn Fe-Cu-(Mo) Deposit, and Tectonic Implications[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 200: 84-103.
- [8] Gao R Z, Xue C J, Lu X B, et al. Genesis of the Zhengguang Gold Deposit in the Duobaoshan Ore Field, Heilongjiang Province, NE China: Constraints from Geology, Geochronology and S-Pb Isotopic Compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 84: 202-217.
- [9] Yuan M W, Li L, Li S R, et al. Bitumen Sm-Nd, Pyrite Rb-Sr and Zircon U-Pb Isotopes Constrain Timing of Ore Formation and Hydrocarbon Deposition in the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 134: 104161.
- [10] 冷亚星,王建平,任纪舜.黑龙江多宝山斑岩铜矿赋矿岩体侵位深度及其对成矿的约束[J].*地质通报*, 2022,41(4):642-656.
- Leng Yaxing, Wang Jianping, Ren Jishun. The Emplacement Depth of Ore-Hosting Rock Body and Its Constraints on Mineralization in Duobaoshan Porphyry Copper Deposit, Heilongjiang Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(4): 642-656.
- [11] 李玉洁,李成禄,杨元江,等.大兴安岭东北部多宝山矿集区二道坎银铅锌矿床磁铁矿地球化学特征[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2023,53(2):436-449.
- Li Yujie, Li Chenglu, Yang Yuanjiang, et al. Geochemical Characteristics of Magnetite in Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit, Duobaoshan Ore Concentration Area, Northeastern Great Xing'an Range[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023,53(2):436-449.
- [12] 符安宗,李金明,吕石佳,等.黑龙江多宝山区裸河岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J].*中国地质调查*,2023,10(1):52-61.
- Fu Anzong, Li Jinming, Lü Shijia, et al. Zircon U-Pb Ages, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Luohe Pluton in Duobaoshan Area, Heilongjiang Province [J]. *Geological Survey of China*, 2023,10(1):52-61.
- [13] Eby G N. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications

- [J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641 - 644.
- [14] Martin R F. A - Type Granites of Crustal Origin Ultimately Result from Open-System Fertilization-Type Reactions in an Extensional Environment[J]. *Lithos*, 2006, 91(1): 125 - 136.
- [15] 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.
Wu Suoping, Wang Meiyang, Qi Kaijing. Present Situation of Researches on A - Type Granites: A Review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(1): 57 - 66.
- [16] 张旗. A 型花岗岩的标志和判别: 兼答汪洋等对“A 型花岗岩的实质是什么”的质疑[J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(2): 267 - 274.
Zhang Qi. The Criteria and Discrimination for A - Type Granites: A Reply to the Question Put Forward by Wang Yang and Some Other Persons for “A - Type Granite: What is the Essence?” [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2013, 32(2): 267 - 274.
- [17] Deng C Z, Sun D Y, Sun G Y, et al. Age and Geochemistry of Early Ordovician A - Type Granites in the Northeastern Songnen Block, NE China[J]. *Acta Geochimica*, 2018, 37(6): 805 - 819.
- [18] 李金超, 国显正, 孔会磊, 等. 东昆仑浪麦滩地区 A 型花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(5): 1508 - 1522.
Li Jinchao, Guo Xianzheng, Kong Huilei, et al. Geochronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of A - Type Granite from the Langmaitan Area, East Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1508 - 1522.
- [19] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 2009, 36(1): 1 - 28.
Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. Subdivision of Tectonic Units in China [J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 1 - 28.
- [20] 符安宗, 杨文鹏, 刘渊, 等. 大兴安岭中段碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩的发现及其地质意义[J]. *现代地质*, 2022, 36(1): 266 - 281.
Fu Anzong, Yang Wenpeng, Liu Yuan, et al. Discovery of Late Triassic Adakitic Rocks at Nianzishan in the Central Great Xing'an Range and Its Geological Significance [J]. *Geoscience*, 2022, 36(1): 266 - 281.
- [21] 张昱, 杜兵盈, 张铁安, 等. 黑龙江省嫩江-黑河地区古、中生代洋陆转换的岩浆岩记录及相关的矿床类型[J]. *地球科学*, 2020, 45(7): 2360 - 2378.
Zhang Yu, Du Bingying, Zhang Tien, et al. Record of Magmatic Rocks and Related Type of Deposit for Paleozoic and Mesozoic Ocean-Land Transition in Nenjiang-Heihe Area, Heilongjiang Province [J]. *Earth Science*, 2020, 45(7): 2360 - 2378.
- [22] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U - Pb Zircon Geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1/2): 47 - 69.
- [23] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and Refinement of Zircon U - Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA - ICP - MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535 - 1546.
- [24] Ludwig K R. ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- [25] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of Trace Elements in Granites by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry[J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507 - 513.
- [26] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic Zircon Formation by Solid: Late Recrystallization of Protolith Igneous Zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18(4): 423 - 439.
- [27] De la Roche H, Leterrier J, Grandclaude P, et al. A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks Using R_1 R_2 -Diagram and Major-Element Analyses: Its Relationships with Current Nomenclature [J]. *Chemical Geology*, 1980, 29(1/2/3/4): 183 - 210.
- [28] Wright J B. A Simple Alkalinity Ratio and Its Application to Questions of Non-Orogenic Granite Genesis[J]. *Geological Magazine*, 1969, 106(4): 370 - 384.
- [29] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1976, 58(1): 63 - 81.
- [30] Frost C D, Frost B R. On Ferroan (A - Type) Granitoids: Their Compositional Variability and Modes of Origin[J]. *Journal of Petrology*, 2011, 52(1): 39 - 53.
- [31] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks [J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2033 - 2048.
- [32] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic Discrimination of Granitoids[J]. *Geol Soc Am Bull*, 1989, 101(5):

- 635 - 643.
- [33] Sylvester P J. Post-Collisional Alkaline Granites[J]. *Journal of Geology*, 1989, 97(3): 261 - 280.
- [34] 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.
- [35] 支倩, 李永军, 段丰浩, 等. 新疆西准噶尔乌尔禾地区早二叠世A1型花岗岩成因及其地质意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(8): 2453 - 2470.
- Zhi Qian, Li Yongjun, Duan Fenghao, et al. Petrogenesis and Its Geological Implications of Early Permian A - Type Granite in Urho Area, Western Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(8): 2453 - 2470.
- [36] 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.
- [37] 马鸿文. 花岗岩成因类型的判别分析[J]. *岩石学报*, 1992, 8(4): 341 - 350.
- Ma Hongwen. Discrimination of Genetic Types of Granitoid Rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1992, 8(4): 341 - 350.
- [38] Gerlach D C, Hans G A, Leeman W P. An Island Arc Origin for the Canyon Mountain Ophiolite Complex, Eastern Oregon, USA [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1981, 53(2): 255 - 265.
- [39] 张旗, 冉焱, 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. A - Type Granite: What Is the Essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(4): 621 - 626.
- [40] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A - Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1987, 95(4): 407 - 419.
- [41] 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.
- [42] Eby G N. The A - Type Granitoids: A Review of Their Occurrence and Chemical Characteristics and Speculations on Their Petrogenesis[J]. *Lithos*, 1990, 26(1): 115 - 134.
- [43] 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(3): 371 - 391.
- [44] 王楠, 刘治博, 宋扬, 等. 西藏班戈地区早白垩世高分异花岗岩年代学及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2020, 36(2): 409 - 425.
- Wang Nan, Liu Zhibo, Song Yang, et al. Geochronology and Petrogenesis of Highly Fractionated Early Cretaceous Granite in Baingoin Area, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(2): 409 - 425.
- [45] Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, et al. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2017, 60(7): 1201 - 1219.
- [46] Chappell B W, White A J R. I - and S - Type Granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1992, 83(1/2): 1 - 26.
- [47] 王强, 赵振华, 熊小林. 桐柏—大别造山带燕山晚期A型花岗岩的厘定[J]. *岩石矿物学杂志*, 2000, 19(4): 297 - 306, 315.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin. The Ascertainment of Late-Yanshanian A - Type Granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2000, 19(4): 297 - 306, 315.
- [48] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的Sr - Yb分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2249 - 2269.
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, et al. Granite Classification on the Basis of Sr and Yb Contents and Its Implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9): 2249 - 2269.
- [49] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 再论花岗岩按照Sr - Yb的分类: 标志[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 985 - 1015.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, et al. Revisiting the New Classification of Granitic Rocks Based on Whole-Rock Sr and Yb Contents: Index [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 985 - 1015.
- [50] Miller C F, Mcdowell S M, Mapes R W. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance [J]. *Geology*, 2003, 31(6): 529 - 532.
- [51] Watson E B, Harrison T M. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a

- Variety of Crustal Magma Types [J]. *Earth & Planetary Ence Letters*, 1983, 64(2):295 - 304.
- [52] King P L, Chappell B W, Allen C M, et al. Are A - Type Granites the High-Temperature Felsic Granites? Evidence from Fractionated Granites of the Wangrah Suite [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48(4):501 - 514.
- [53] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution, an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks* [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [54] Rudnick R L, Gao Shan. Composition of the Continental Crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3:1 - 64.
- [55] Tischendorf G, Paelchen W. Zur Klassifikation von Granitoiden [J]. *Zeitschrift Fuer Geologische Wissenschaften*, 1985, 13(5):615 - 627.
- [56] Wilson M. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach* [M]. Dordrecht: Springer, 1989.
- [57] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1):43 - 55.
- [58] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4):956 - 983.
- [59] Pearce J. Sources and Settings of Granitic Rocks [J]. *Episodes*, 1996, 19(4):120 - 125.
- [60] 赵焕利, 刘旭光, 刘海洋, 等. 黑龙江多宝山古生代海盆闭合的岩石学证据 [J]. *世界地质*, 2011, 30(1): 18 - 27.
Zhao Huanli, Liu Xuguang, Liu Haiyang, et al. Petrological Evidence of Paleozoic Marine Basin Closure in Duobaoshan of Heilongjiang [J]. *Global Geology*, 2011, 30(1):18 - 27.
- [61] 代宇, 刘江领, 刘旭光, 等. 黑龙江多宝山地区大岔子正长花岗岩锆石 U - Pb 年龄及其地质意义 [J]. *地质与资源*, 2012, 21(2):188 - 193.
Dai Yu, Liu Jiangling, Liu Xuguang, et al. Zircon U - Pb Age of the Dachazi Syenogranite in Duobaoshan Area, Heilongjiang Province: Geological Implication [J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(2): 188 - 193.
- [62] 崔芳华, 郑常青, 徐学纯, 等. 大兴安岭全胜林场地区晚石炭世岩浆活动研究: 对兴安地块与松嫩地块拼合时间的限定 [J]. *地质学报*, 2013, 87(9):1247 - 1263.
Cui Fanghua, Zheng Changqing, Xu Xuechun, et al. Late Carboniferous Magmatic Activities in the Quanshenglinchang Area, Great Xing' an Range: Constrains on the Timing of Amalgamation Between Xing' an and Songnen Massifs [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(9):1247 - 1263.
- [63] 李成禄, 曲晖, 赵忠海, 等. 黑龙江霍龙门地区早石炭世花岗岩的锆石 U - Pb 年龄、地球化学特征及构造意义 [J]. *中国地质*, 2013, 40(3):859 - 868.
Li Chenglu, Qu Hui, Zhao Zhonghai, et al. Zircon U - Pb Ages, Geochemical Characteristics and Tectonic Implications of Early Carboniferous Granites in Huolongmen Area, Heilongjiang Province [J]. *Geology in China*, 2013, 40(3):859 - 868.
- [64] 汪岩, 付俊彧, 杨帆, 等. 嫩江—黑河构造带收缩与伸展: 源自晚古生代花岗岩类的地球化学证据 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(2):374 - 388.
Wang Yan, Fu Junyu, Yang Fan, et al. Contraction and Extension in Nenjiang - Heihe Tectonic Belt: Evidence from the Late Paleozoic Granitoid Geochemistry [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(2):374 - 388.
- [65] 钱程, 陆露, 秦涛, 等. 大兴安岭北段扎兰屯地区晚古生代早期花岗岩岩浆作用: 对额尔古纳—兴安地块和松嫩地块拼合时限的制约 [J]. *地质学报*, 2018, 92(11):2190 - 2214.
Qian Cheng, Lu Lu, Qin Tao, et al. The Early Late-paleozoic Granitic Magmatism in the Zalantun Region, Northern Great Xing' an Range, NE China: Constraints on the Timing of Amalgamation of Erguna-Xing' an and Songnen Blocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(11):2190 - 2214.
- [66] 付俊彧, 汪岩, 那福超, 等. 内蒙古哈达阳镁铁—超镁铁质岩锆石 U - Pb 年代学及地球化学特征: 对嫩江—黑河地区晚泥盆世俯冲背景的制约 [J]. *中国地质*, 2015, 42(6):1740 - 1753.
Fu Junyu, Wang Yan, Na Fuchao, et al. Zircon U - Pb Geochronology and Geochemistry of the Hadayang Maficultramafic Rocks in Inner Mongolia: Constraints on the Late Devonian Subduction of Nenjiang-Heihe Area, Northeast China [J]. *Geology in China*, 2015, 42(6):1740 - 1753.
- [67] 张渝金, 张超, 吴新伟, 等. 大兴安岭北段扎兰屯地区晚古生代海相火山岩年代学和地球化学特征及其构造意义 [J]. *地质学报*, 2016, 90(10):2706 - 2720.

- Zhang Yujin, Zhang Chao, Wu Xinwei, et al. Geochronology and Geochemistry of Late Paleozoic Marine Volcanic from the Zhalantun Area in Northern Da Hinggan Mountains and Its Geological Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(10): 2706 - 2720.
- [68] 刘佳宜. 黑龙江省三道湾子地区花岗岩年代学和地球化学研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
Liu Jiayi. The Geochronological and Geochemical Research of Granites in Sandaowanzi, Heilongjiang Province[D].Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2016.
- [69] Gou J, Sun D Y, Ren Y S, et al. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Neoproterozoic and Late Paleozoic Magmatism in the Manzhouli-Erguna Area of Inner Mongolia, China: Geochronological, Geochemical and Hf Isotopic Evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*,2013,67/68: 114 - 137.
- [70] Li Y, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and Geochemistry of Late Paleozoic-Early Mesozoic Igneous Rocks of the Erguna Massif, NE China: Implications for the Early Evolution of the Mongol-Okhotsk Tectonic Regime[J].*Journal of Asian Earth Sciences*,2017,144: 205 - 224.
- [71] 王之晟,高天栋,王洪志,等.大兴安岭阿尔山地区宝力高庙组浅变质岩年代学、地球化学特征及原岩建造探讨[J].*世界地质*,2024,43(1):1 - 18.
Wang Zhisheng, Gao Tiandong, Wang Hongzhi, et al. Chronology, Geochemical Characteristics and Protolith Formation of Low-Grade Metamorphic Rocks from Baoligaomiao Formation in Aershan Area, Da Hinggan Ling (Mts.) [J]. *World Geology*, 2024,43(1):1 - 18.
- [72] 王楚杰,武振,王国君.兴安地块阿力格亚林场早二叠世石英闪长岩的成因及构造意义[J].*世界地质*, 2023,42(1):1 - 10.
Wang Chujie, Wu Zhen, Wang Guojun. Petrogenesis and Tectonic Implications of Early Permian Quartzdiorite in Aligya Forest Farm, Xing'an Block [J]. *World Geology*,2023,42(1):1 - 10.