

尹志刚,李萌萌,吴子杰,等.辽宁本溪地区新太古代晚期钾质花岗岩的发现及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 125–139. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220150.

Yin Zhigang, Li Mengmeng, Wu Zijie, et al. The Discovery and Geological Implications of Late Neoarchean Kaligranites in Benxi Area, Liaoning Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 125–139. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220150.

辽宁本溪地区新太古代晚期钾质花岗岩的发现及其地质意义

尹志刚¹, 李萌萌¹, 吴子杰^{2, 3}, 陈军典⁴, 姜 然¹, 张凯强¹, 姜 琦¹, 郭 浩¹

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000

2. 辽宁省地质勘查院有限责任公司, 辽宁 大连 116100

3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580

4. 辽宁省物测勘查院有限责任公司, 沈阳 110031

摘要: 辽宁本溪地区位于华北克拉通东部陆块东北部, 区内广泛发育新太古代深成侵入岩和变质表壳岩, 尚无钾质花岗岩的报道。钾质花岗岩的形成过程是早期陆壳发育成熟和稳定的重要标志, 本次钾质花岗岩的发现对系统的研究华北克拉通早期陆壳的形成与演化具有重要的价值。本文对本溪地区马家沟的钾质花岗岩进行了岩石学、成岩年代学、岩石地球化学的研究, 探讨了岩石成因和形成的构造背景。马家沟岩体为片麻状中细粒黑云母二长花岗岩。锆石 U–Pb 测年数据显示, 岩石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $(2\,490 \pm 21)\text{Ma}$, 形成于新太古代晚期。该岩体属弱过铝质、高钾钙碱性系列钾质岩石; 主要富集高场强元素 La、Zr、Th 及大离子亲石元素 K、Nd 等元素, 亏损 P 元素、高场强元素 Nb 和大离子亲石元素 Sr、Ti 等; REE 曲线为右倾型, 负 Eu 异常, 属于 S 型花岗岩。研究区钾质花岗岩岩浆主要来源于地壳, 是变质泥岩部分熔融的产物, 形成于活动大陆边缘碰撞造山后的伸展环境, 代表华北太古宙克拉通固结基底形成之前的最后一次岩浆活动, 标志着在新太古代晚期本溪地区微陆块已拼贴完成, 并与其他地区一起构成稳定的华北太古宙克拉通。

关键词: 新太古代晚期; 岩石地球化学; 锆石 U–Pb 年代学; 钾质花岗岩; 本溪地区

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220150

中图分类号: P588.12; P597

文献标志码: A

The Discovery and Geological Implications of Late Neoarchean Kaligranites in Benxi Area, Liaoning Province

Yin Zhigang¹, Li Mengmeng¹, Wu Zijie^{2, 3}, Chen Jundian⁴, Jiang Ran¹,
Zhang Kaiqiang¹, Jiang Qi¹, Guo Hao¹

收稿日期: 2022–05–18

作者简介: 尹志刚(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事区域地质矿产资源方面的研究, E-mail: yzg63@163.com

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011120734); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD–14)

Supported by the Project of China Geological Survey (1212011120734) and the Project Supported by Discipline Innovation Team of Liaoning Technical University (LNTU20TD–14)

1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China
2. Liaoning Provincial Institute of Geological Exploration Co., Ltd., Dalian 116100, Liaoning, China
3. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China
4. Geophysical Measuring Exploration Institute of Liaoning Province, Shenyang 110031, China

Abstract: The Benxi area of Liaoning Province is located in the northeastern part of the eastern North China craton, where Neoarchean plutonic intrusive rocks and metamorphic supracrustal rocks are widely developed, but no kaligranites have been reported. The formation process of kaligranites is an important symbol of the maturation and stability of the early continental crust. The discovery of kaligranites is significant for the systematic study of the formation and evolution of the early continental crust in the North China craton. In this paper, the petrology, diagenetic age, and petrogeochemistry of kaligranites in Majiagou, Benxi area are studied, and the petrogenesis and tectonic setting of formation are discussed. Majiagou pluton is a gneissic medium-fine-grained biotite monzogranite. The zircon U-Pb dating data show that the $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ weighted average age is $(2\,490 \pm 21)$ Ma, suggesting the kaligranites formed in the Late Neoarchean. The granite is weakly peraluminous and high potassium calc alkaline kaligranite. The high field strength elements La, Zr, Th and large ion lithophile elements K, Nd are enriched, while high field elements P, strength elements Nb and large ion lithophile elements Sr, Ti are depleted. The REE partition curve is rightward with negative Eu anomalies, indicating S-type granite. The magma originated from the crust and the product of partial melting of metamorphic mudstone, which formed in an extensional environment after collisional orogenesis at active continental margins. It represents the last magmatic activity before the formation of the consolidated basement of the Archean craton in North China, and marks the completion of the collage of micro-blocks in Benxi area in the Late Neoarchean, and together with other regions, forming a stable North China Archean craton.

Key words: Late Neoarchean; rock geochemistry; zircon U-Pb chronology; kaligranite; Benxi area

0 引言

华北克拉通是迄今为止世界上发现的最古老的克拉通之一,也是中国已知的最大古陆块,拥有超过 3.8 Ga 地质演化历史^[1-2]。与现今世界上已知的其他大多数广泛发育(约 2.7 Ga)的克拉通有所不同,华北克拉通不仅保留了新太古代早期岩浆活动的原始记录,而且其独特之处在于也存在新太古代晚期强烈的构造岩浆活动^[3-4]。约 2.5 Ga 华北克拉通岩浆是以高温富含钠元素的 TTG 岩系为主,并伴有大量低温富钾花岗质岩类,包括二长花岗岩类以及钾质花岗岩。新太古代晚期大陆地壳性质的转变是目前学者们关注的前沿课题。部分学者提出,新太古代晚期大量花岗岩类岩浆的侵位是导致大陆地壳性质转变的关键原因^[5-6]。与新太古代早期以 TTG 片麻岩为主不同,新太古代晚期花岗岩类岩浆作用表现出明显的成分多样化特点,尤其是产出规模较大的富钾花岗岩类岩石^[6-7]。这些富钾花岗岩类岩

石为我们深入探讨新太古代晚期大陆地壳的地质构造和演化过程提供了重要依据^[8]。

钾质花岗岩既是陆壳岩浆再循环的直接结果,也是华北太古宙克拉通岩浆循环终止的证据,对科学研究地球早期壳幔演化的形成历史和地壳构造的运动规律都具有十分重要的理论研究价值。从目前国内获得的有关资料及研究来看,分布在不同地点的钾质花岗岩,它们各自的地球矿物组成、构造环境类型以及地球化学特征等方面均有非常明显的成因变化。一般认为,尽管它们可能属于陆壳部分熔融过程的产物,但实际上它们包含的岩石类型十分多样,既有 A 型也有 I 型、S 型,充分的说明了其原岩结构性质以及形成地质构造背景中的复杂性。通过详细的野外填图工作,笔者在辽宁本溪地区发现了新太古代晚期钾质花岗岩体。本文通过对钾质花岗岩的岩石学、锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学等深入研究,系统讨论本溪地区钾质花岗岩的形成时代、岩石成因、构造环境以及地质意义,以期对早期华北

克拉通的形成及演化提供直接的证据。

1 区域地质背景及岩石学特征

1.1 区域地质背景

前人资料通常将华北克拉通基底划分为 3 块:东部陆块、西部陆块和位于二者中间的中央造山带,认为华北克拉通基底是由东、西陆块沿中央造山带碰撞拼合而成,并实现克拉通化,而新太古代晚期—古元古代早期是克拉通化非常重要的一个地壳生长发育阶段^[9-12]。研究表明^[13],鞍山—本溪地区太古宙早期古老岩石记录了多期地壳生长和再循环事件,可能与大量花岗岩类岩浆的侵位有关。在鞍山—本溪地区存在着古老的太古宙地体,是由花岗—绿岩带(或变质表壳岩)组成的北东向太古宙古陆块,经历了复杂、漫长的地质演化历史,对于研究前寒武纪地质构造形成及发展具有重要的地质意义^[14]。华北克拉通新太古代晚期—古元古代早期钾质花岗岩的出露范围比较广泛,包括赞皇杂岩中营等钾质花岗岩、冀西北淮安钾质花岗岩、鞍山齐大山钾质花岗岩、中条山涑水杂岩、太行山王屋山钾质花岗岩和中条山烟庄钾质花岗岩^[15-20]等(表 1)。研究区位于华北克拉通东部陆块东北部(图 1a),区内共有 6 个侵入体,分布于马家沟一带(图 1b),出露的新太古代地层为鞍山岩群的茨沟岩组和大峪沟岩组,主要由斜长角闪岩、二长变粒岩、石英片岩和片麻岩等岩性组成,构成古老的结晶基地^[22]。区内发现的新太古代晚期钾质花岗岩体岩性为片麻状中细粒黑云母二长花岗岩,分布面积约为 37.55 km²,又称马家沟岩体。在平面上呈北西、北东向的不规则条带状分布,侵入茨沟岩组、大峪沟岩组,内部可见磁铁矿石英岩及斜长角闪岩包体。

1.2 岩石学特征

马家沟岩体(图 2):片麻状中细粒黑云母二长花岗岩,颜色呈灰粉色—肉红色,为中细粒似斑状花岗结构,片麻状构造。斑晶为钾长石(约 7%),粒径多集中在 4.00~7.00 mm 之间;主要组成矿物成分为斜长石(28%~40%)、钾长石(25%~37%)、石英(20%~30%)、黑云母(3%~15%)及白云母(0~2%)等,偶见角闪石。斜长石一般为更长石,多数呈半自形或不规则状,少数呈集合体分布,粒径多集中在 0.15~3.10 mm 之间,具聚片双晶结构且发育相对较好,多已绢云母化或钠黝帘石化,部分具定向分布趋势;钾长石为微斜长石,不规则粒状,个别呈半自形,部分充填于其他矿物颗粒之间,部分沿长轴呈条带状交错分布,粒径在 0.30~5.00 mm 之间,部分微斜长石发生泥化;石英多呈不规则细粒状,集合体呈条带状或豆荚状分布,粒径在 0.10~3.50 mm 之间;黑云母颜色大多呈黄色—黄绿色,集合体为片状或细小片状,粒径在 0.15~1.50 mm 之间,多数出现了绿泥石化和脱铁化现象,且都呈断续条带状定向分布;白云母呈片状,有沿长轴定向分布的趋势,分布不均匀;角闪石呈柱状,零星分布,粒径约为 1.00 mm。

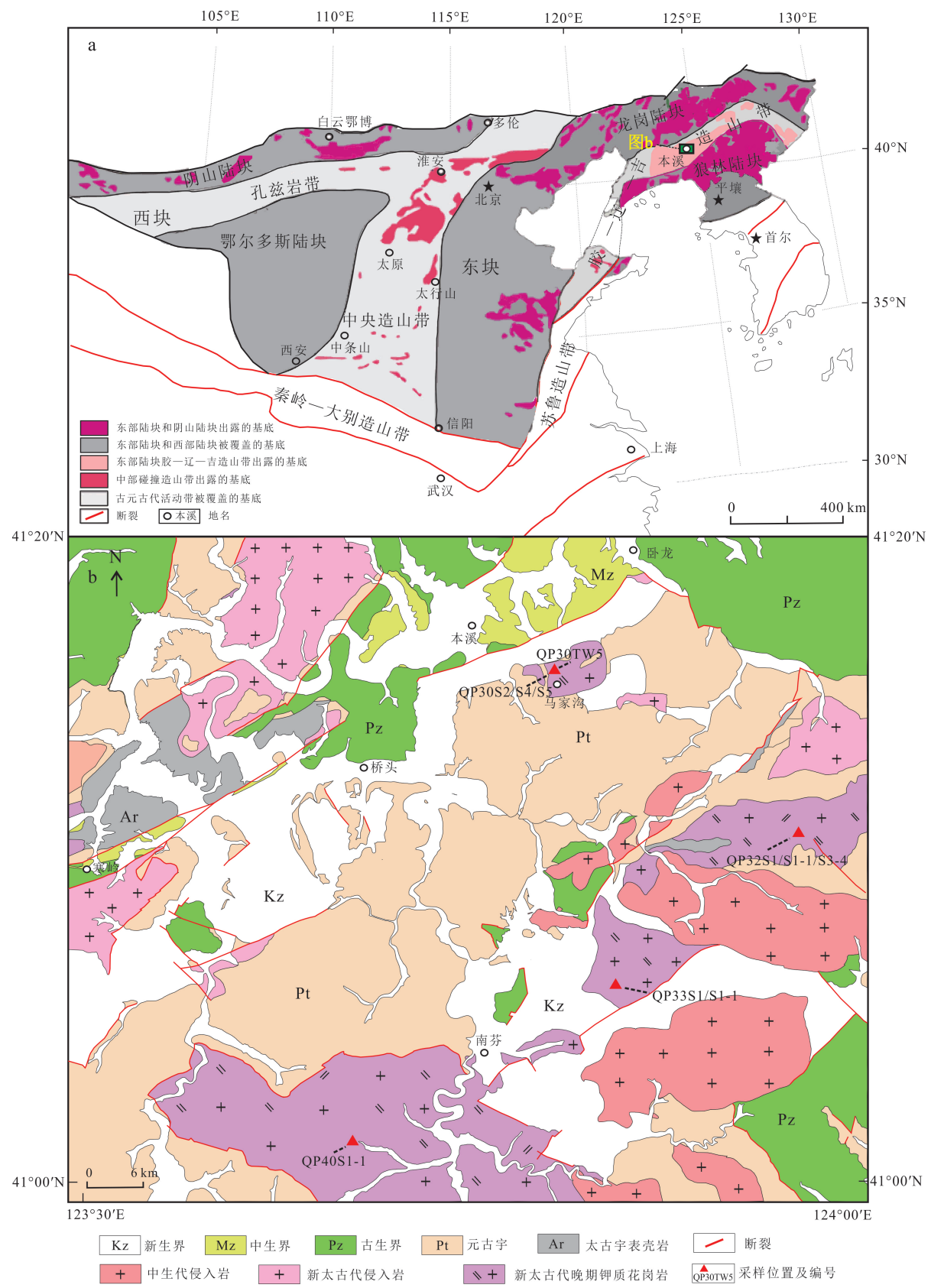
2 SHRIMP 锆石 U—Pb 测年

样品(QP30TW5)采自辽宁省本溪市平山区附近的新立屯—大峪村马家沟岩体(图 2),从中挑选分离并提取出颗粒形态相似且晶体粒度均匀、晶形较好的锆石,准备进一步确定岩石形成的年代。在北京离子探针中心完成了标准锆石测年。首先在 SHRIMP II 上进行了分析和标定,对标准锆石中的 TEM(417 Ma)质量分数进行了分馏法的校正,

表 1 华北克拉通新太古代晚期—古元古代早期钾质花岗岩简表

Table 1 Late Neoarchean - Early Paleoproterozoic kaligranites in the North China craton

地区	岩性	测年结果/Ma	形成时期	资料来源
赞皇杂岩中营等	钾长花岗岩	2 490±13	新太古代晚期	[15]
冀西北淮安	正长花岗岩	2 493±6	新太古代晚期	[16]
	二长花岗岩	2 437±10	新太古代晚期	
鞍山齐大山	正长花岗岩	约 2 475	新太古代晚期	[17]
中条山涑水杂岩	二长花岗岩	2 351±37	古元古代早期	[18]
太行山王屋山	钾质花岗岩	约 2 490	新太古代晚期	[19]
中条山烟庄	正长花岗岩	2 515±7	新太古代晚期	[20]



a 据文献[21]修编。

图 1 华北克拉通基底岩体分布(a)及本溪地区地质简图(b)

Fig.1 Distribution of basement rock mass in the North China craton (a) and geological sketch of the Benxi area (b)

运用标准锆石 BR266(559 Ma)标定测量 TEM 样品中的 U、Th 和 Pb 质量分数;其次用标准锆石 TEM 和 M257(U 质量分数为 840×10^{-6})分别校正样品中的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 U、Th 的质量分数;再次,标准锆石(TEM)和待检测的样品比值一般为 1:3,每个数据点测年采用 5 组扫描,使用 ^{204}Pb 进行年龄校正;最后采用 SQUID 和 Isoplot 程序^[23]分别进行数据处理。每个数据误差都控制在 $\pm 1\sigma$,加权平均年龄误差都控制在 95% 置信度,详细的测试方法、实验过程、相关参数和误差校正见文献[24]。

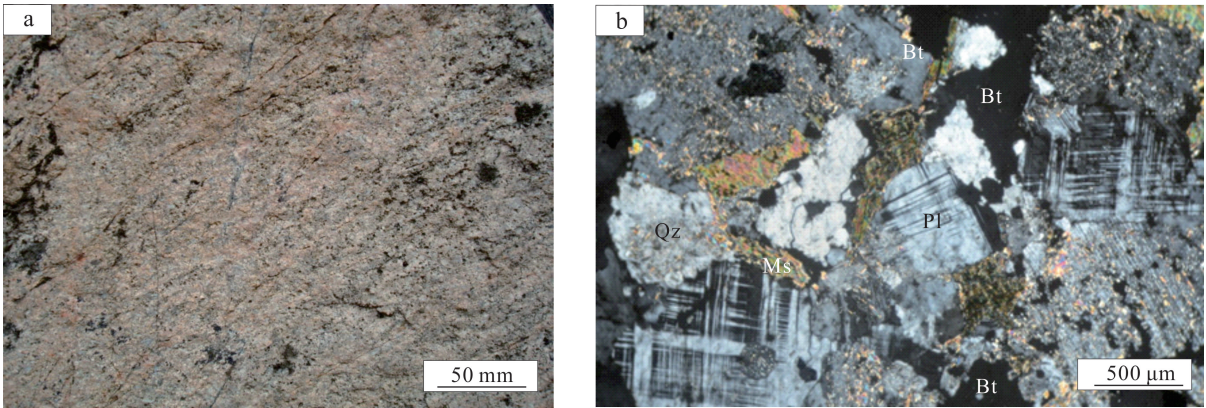
这些锆石颗粒晶体多以浑圆柱状的结晶为主,在阴极发光图像中显示出较好的结晶振荡环带(图 3)。对马家沟岩体样品锆石年龄测定(表 2),其中 4 个锆石数据受到岩石变质作用影响较大,故只选取 15 个较为和谐的锆石数据。根据锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图(图 4)所示,其上交点年龄为

(2 491 $\pm$ 17) Ma,置信度为 95%(MSWD=4.3, $n=15$)。选取的样品中岩浆锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄分布于(2 560 $\pm$ 11)~(2 028 $\pm$ 24) Ma 之间,通过计算可得到其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为(2 490 $\pm$ 21) Ma,与上交点表面年龄值在误差限定范围内一致,可以代表马家沟岩体的形成年龄,确定其形成时代为新太古代晚期。

3 岩石地球化学特征

3.1 分析测试方法

主量元素测定由辽宁地勘局第一实验室完成,微量元素和稀土元素测定由吉林大学科学实验中心完成。其中,主量元素分析采用压片法 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定,分析准确度和精度优于 $\pm 2\%$,其中 FeO 质量分数通过湿化学方法测试。测试仪器型号规格为 72-G 型分光光度计和 6410 火



Qtz.石英;Pl.斜长石;Bt.黑云母;Ms.白云母。

图 2 研究区新太古代黑云母二长花岗岩宏观(a)和显微照片(b)

Fig.2 Macrophotographs (a) and microphotographs (b) of Neoarchean biotite monzogranite in the study area

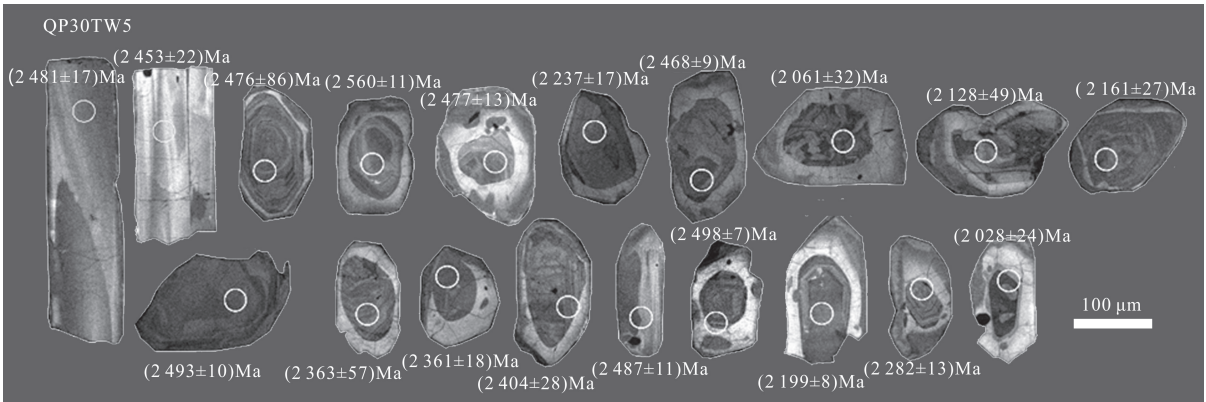


图 3 研究区新太古代黑云母二长花岗岩锆石阴极发光图像

Fig.3 Zircon CL images of Neoarchean biotite monzogranite in the study area

表 2 研究区新太古代黑云母二长花岗岩 (QP30TW5) SHRIMP 锆石 U-Pb 定年数据

Table 2 SHRIMP zircon U-Pb date of Neoproterozoic biotite monzogranite (QP30TW5) in the study area

测点号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值						年龄/Ma			
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
1	59	55	1.10	0.436 2	0.000 2	9.770 0	0.000 2	0.164 1	0.000 1	2 334	30	2 481	17
2	34	36	0.97	0.394 2	0.000 3	8.680 0	0.000 3	0.162 6	0.000 1	2 142	46	2 453	22
3	103	280	0.38	0.335 8	0.000 1	7.497 0	0.000 1	0.163 5	0.000 1	1 866	20	2 476	86
4	78	244	0.33	0.224 8	0.000 1	5.277 0	0.000 1	0.171 9	0.000 1	1 307	15	2 560	11
5	71	129	0.56	0.357 5	0.000 2	7.980 0	0.000 2	0.164 9	0.000 1	1 970	27	2 477	13
6	52	830	0.06	0.110 1	0.000 1	2.137 0	0.000 2	0.146 6	0.000 1	673	9	2 237	17
7	49	227	0.22	0.334 3	0.000 1	7.430 0	0.000 1	0.162 8	0.000 1	1 859	22	2 468	9
8	476	1 113	0.44	0.234 6	0.000 1	4.118 0	0.000 2	0.165 8	0.000 1	1 359	14	2 061	32
9	54	392	0.14	0.126 3	0.000 1	2.304 0	0.000 3	0.158 7	0.000 1	767	10	2 128	49
10	299	1 264	0.24	0.110 8	0.000 1	2.059 0	0.000 2	0.155 7	0.000 1	677	8	2 161	27
11	86	114	0.78	0.468 7	0.000 1	10.570 0	0.000 2	0.164 0	0.000 1	2 478	27	2 493	10
12	151	579	0.27	0.223 5	0.000 1	4.670 0	0.000 4	0.153 4	0.000 3	1 300	14	2 363	57
13	210	730	0.30	0.156 0	0.000 2	3.255 0	0.000 2	0.169 4	0.000 1	934	14	2 361	18
14	48	68	0.72	0.335 9	0.000 2	7.190 0	0.000 2	0.160 9	0.000 1	1 867	29	2 404	28
15	40	106	0.39	0.472 4	0.000 1	10.610 0	0.000 2	0.163 8	0.000 1	2 494	29	2 487	11
16	121	275	0.45	0.371 0	0.000 1	8.390 0	0.000 1	0.164 7	0.000 1	2 034	22	2 498	7
17	551	565	1.01	0.254 0	0.000 1	4.825 0	0.000 1	0.140 4	0.000 1	1 459	15	2 199	8
18	277	780	0.37	0.166 7	0.000 1	3.322 0	0.000 1	0.152 2	0.000 1	994	11	2 282	13
19	40	536	0.08	0.131 5	0.000 1	2.264 0	0.000 2	0.136 5	0.000 1	796	10	2 028	24

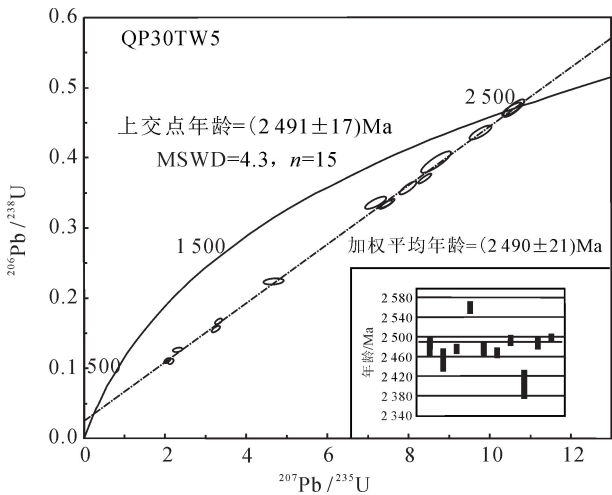


图 4 研究区新太古代黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 Concordian U-Pb diagrams of Neoproterozoic biotite monzogranite in the study area

焰光度计,检测试验结果依据国家规定标准为 GB/T14506.3—2010^[25](硅酸盐岩石化学分析方法)。

微量元素、稀土元素化学分析采用电感耦合等离子体质谱法测定,准确度和精度优于±10%。测试的仪器型号为 ICP-MS,检测依据文献[26]。

3.2 主量元素

本次共完成 9 件岩石地球化学样品分析。研究区马家沟岩体主量元素分析结果见表 3。数据显示: $w(\text{SiO}_2)$ 为 66.62%~75.08%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 3.94%~6.46%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 2.75%~4.94%, $w(\text{CaO})$ 为 0.22%~1.75%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 13.62%~14.89%;铝饱和指数 A/CNK 值在 1.02~1.15 之间,平均值为 1.10。 $w(\text{MgO})$ 为 0.34%~1.63%, $w(\text{TiO}_2)$ 仅为 0.10%~0.73%, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为 0.03%~0.43%,岩石固结指数(I_s)为 3.10~11.00,分异指数

表 3 研究区新太古代黑云母二长花岗岩样品主量、微量和稀土元素分析结果

Table 3 Analysis results of Neoproterozoic biotite monzogranite main, trace and rare earth elements 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	总量	A/CNK
QP30S2	67.88	0.68	14.19	3.18	1.54	0.06	1.63	0.73	3.58	5.41	0.36	99.24	1.09
QP30S4	66.62	0.73	13.82	3.90	1.69	0.04	1.63	1.75	3.71	3.94	0.43	98.26	1.02
QP30S5	68.18	0.69	14.71	2.74	1.80	0.08	1.52	1.32	3.46	4.31	0.41	99.22	1.14
QP40S1-1	75.08	0.10	13.81	0.68	1.19	0.01	0.50	0.22	3.91	4.70	0.04	100.24	1.15
QP32S1	74.48	0.10	14.07	0.53	0.47	0.02	0.34	0.37	4.21	5.31	0.05	99.95	1.05
QP32S1-1	74.22	0.11	14.45	0.54	0.50	0.02	0.64	0.37	4.94	4.28	0.03	100.10	1.08
QP32S3-4	72.32	0.13	14.89	0.41	0.86	0.02	0.66	0.44	4.21	5.01	0.04	98.99	1.13
QP33S1	73.50	0.29	13.62	0.84	1.37	0.02	0.77	0.37	2.75	6.46	0.12	100.11	1.12
QP33S1-1	73.34	0.37	13.64	1.12	1.26	0.02	0.53	0.41	2.87	6.46	0.12	100.14	1.10
样品号	I _S	I _D	σ	Li	P	Sc	Co	Cr	Ni	V	Rb	Sr	Ba
QP30S2	10.60	84.44	3.20	29.90	16.54	14.03	9.62	27.76	17.19	70.42	170.9	180.70	1 407.00
QP30S4	11.00	78.41	2.50	45.27	19.76	18.98	14.30	40.70	23.86	96.73	186.9	331.90	1 382.00
QP30S5	11.00	80.95	2.40	41.09	18.84	16.57	20.69	53.82	32.84	89.54	258.4	264.90	2 844.00
QP40S1-1	4.60	93.00	2.30	0.36	1.88	1.15	2.98	5.60	4.46	16.99	171.0	112.20	780.10
QP32S1	3.10	94.83	2.90	2.49	2.30	0.50	2.62	19.88	13.54	7.16	133.2	148.60	1 161.00
QP32S1-1	5.90	93.80	2.70	1.75	1.38	1.63	2.68	10.93	4.44	5.47	152.7	208.00	1 266.00
QP32S3-4	5.90	92.02	2.90	0.51	1.84	0.77	2.26	4.15	2.81	3.29	122.5	181.00	673.40
QP33S1	6.30	91.41	2.80	12.32	5.51	2.73	3.49	7.19	3.58	17.81	242.8	73.40	569.50
QP33S1-1	4.30	92.02	2.90	2.93	5.51	2.37	3.43	7.73	5.68	18.43	257.3	120.90	694.40
样品号	Y	Zr	Hf	Nb	Ta	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
QP30S2	17.16	448.80	10.24	22.13	1.13	16.26	2.36	70.13	164.00	13.65	46.01	6.01	1.01
QP30S4	13.52	491.20	10.61	22.63	1.56	13.28	3.59	88.68	165.40	15.07	47.41	6.07	1.29
QP30S5	39.49	524.60	11.48	21.97	1.46	18.02	2.98	177.60	318.20	36.16	121.50	16.19	3.13
QP40S1-1	12.42	154.20	6.80	7.72	2.04	21.37	1.36	30.24	52.58	5.00	16.20	2.35	0.45
QP32S1	1.81	76.60	3.23	3.00	0.85	12.35	1.34	8.19	15.36	1.78	6.88	1.25	0.24
QP32S1-1	4.13	97.20	4.40	2.90	1.71	10.86	2.79	6.37	12.72	1.21	4.57	0.85	0.32
QP32S3-4	6.77	66.90	3.04	3.00	0.88	6.53	1.74	10.00	15.92	1.76	6.43	1.18	0.31
QP33S1	27.38	283.40	11.82	23.18	2.36	71.27	6.46	27.76	106.20	6.03	21.40	4.14	0.25
QP33S1-1	38.51	292.03	12.26	23.38	2.79	69.73	7.71	73.44	136.70	16.17	57.50	10.53	0.59
样品号	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	(La/Yb) _N	δEu
QP30S2	4.70	0.59	3.34	0.64	1.95	0.30	2.06	0.32	331.87	317.21	14.66	22.90	0.56
QP30S4	4.64	0.59	3.05	0.56	1.62	0.24	1.67	0.26	350.07	336.94	13.13	35.89	0.72
QP30S5	12.46	1.55	8.10	1.45	4.03	0.55	3.54	0.51	744.44	710.45	33.99	33.78	0.65
QP40S1-1	2.11	0.28	2.13	0.39	1.48	0.16	1.40	0.17	127.35	118.37	8.98	14.60	0.60
QP32S1	0.95	0.05	0.44	0.05	0.22	0.02	0.20	0.03	37.41	35.39	2.02	27.23	0.64
QP32S1-1	0.91	0.07	0.70	0.12	0.39	0.02	0.50	0.05	32.92	29.77	3.15	8.63	1.10
QP32S3-4	1.23	0.14	1.16	0.22	0.74	0.08	0.77	0.08	46.77	41.61	5.16	8.72	0.77
QP33S1	4.62	0.79	5.38	1.07	3.22	0.46	2.99	0.39	212.08	190.35	21.73	6.26	0.17
QP33S1-1	9.50	1.39	8.01	1.44	4.18	0.60	3.73	0.48	362.77	329.97	32.80	13.26	0.18

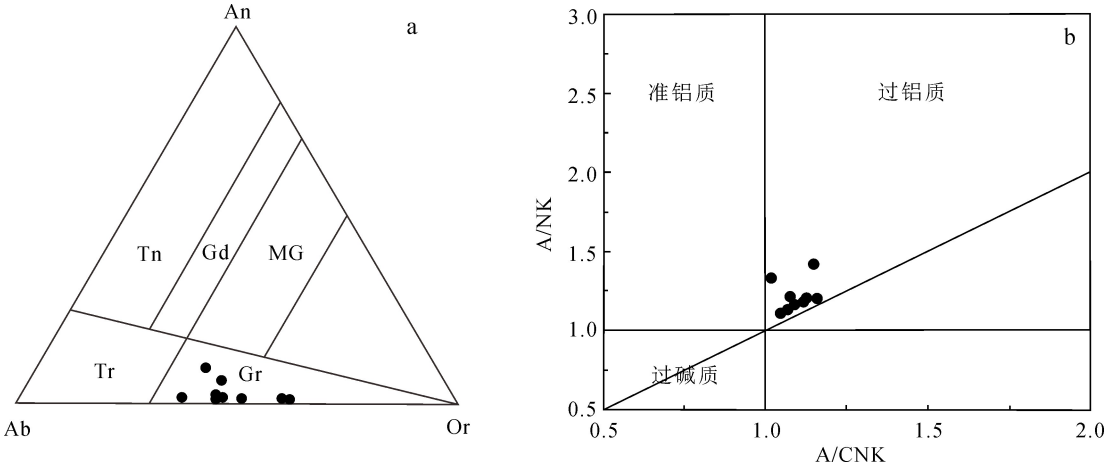
注:主量元素质量分数单位为%;微量和稀土元素质量分数单位为10⁻⁶。

(I_D) 为 78.41~94.83, 表明岩石分异程度较高; 里特曼指数(σ) 为 2.30~3.20。在 An-Ab-Or 图解(图 5a) 上, 样品点多数落入花岗岩区域中; 在 A/NK-A/CNK 铝饱和指数图解(图 5b) 上, 样品点均落入弱过铝质区; 在 $w(K_2O)-w(SiO_2)$ 图解(图 6a) 上, 样品点多数落入高钾钙碱性系列, 少数落入钾玄岩系列范围内; 在 $w(K_2O)-w(Na_2O)$ 图解(图 6b) 上, 样品点多数落入钾质区, 少数落入高钾质区。综上所述, 新太古代晚期马家沟岩体为弱过铝质、高钾钙碱性系列钾质岩石。

3.3 微量和稀土元素

岩石微量和稀土元素质量分数测定结果见表 3。马家沟岩体样品 $w(\sum REE)$ 为 $32.92 \times 10^{-6} \sim 744.44 \times 10^{-6}$, 平均值为 249.52×10^{-6} ; $w(LREE)$

值为 $29.77 \times 10^{-6} \sim 710.45 \times 10^{-6}$, $w(HREE)$ 值为 $2.02 \times 10^{-6} \sim 33.99 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE$ 值为 8.07~25.66; $(La/Yb)_N$ 值为 6.26~35.89, 变化范围较大, δEu 值为 0.17~0.77(除 QP32S1-1 样品为 1.10 之外), 均小于 1, 具负 Eu 异常。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图 7a) 显示: 马家沟岩体曲线斜率较大, 轻稀土元素曲线向右下方陡倾, 指示岩体可能经历了相对较强的轻稀土元素分异作用; 而重稀土元素曲线向右下方缓倾, 可能表明矿物的分异对重稀土元素的影响较小。以上数据表明马家沟岩体稀土配分模式为轻稀土富集、重稀土相对平坦向右倾斜和 Eu 亏损的右倾型。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7b) 中, 可以明显看出马家沟岩体微量元素质量分数变化较大, 富集高场强元素 La、Zr、



Tr. 奥长花岗岩; Tn. 英云闪长岩; Gd. 花岗闪长岩; MG. 二长花岗岩; Gr. 花岗岩。

图 5 研究区新太古代黑云母二长花岗岩 An-Ab-Or (a) 和 A/NK-A/CNK (b) 图解

Fig.5 An-Ab-Or (a) and A/NK-A/CNK (b) diagram of Neoproterozoic biotite monzogranite in the study area

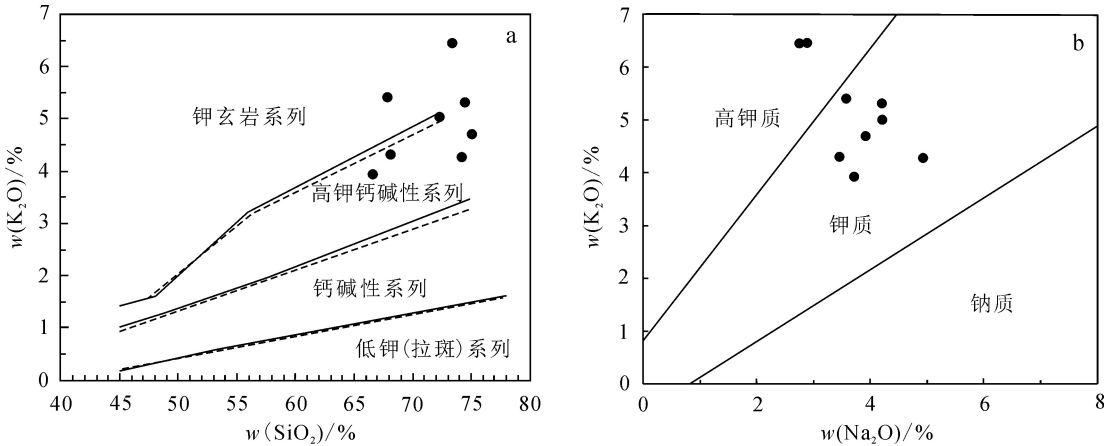


图 6 研究区新太古代黑云母二长花岗岩的 $w(K_2O)-w(SiO_2)$ (a) 和 $w(K_2O)-w(Na_2O)$ (b) 图解

Fig.6 $w(K_2O)-w(SiO_2)$ (a) and $w(K_2O)-w(Na_2O)$ (b) diagram of Neoproterozoic biotite monzogranite in the study area

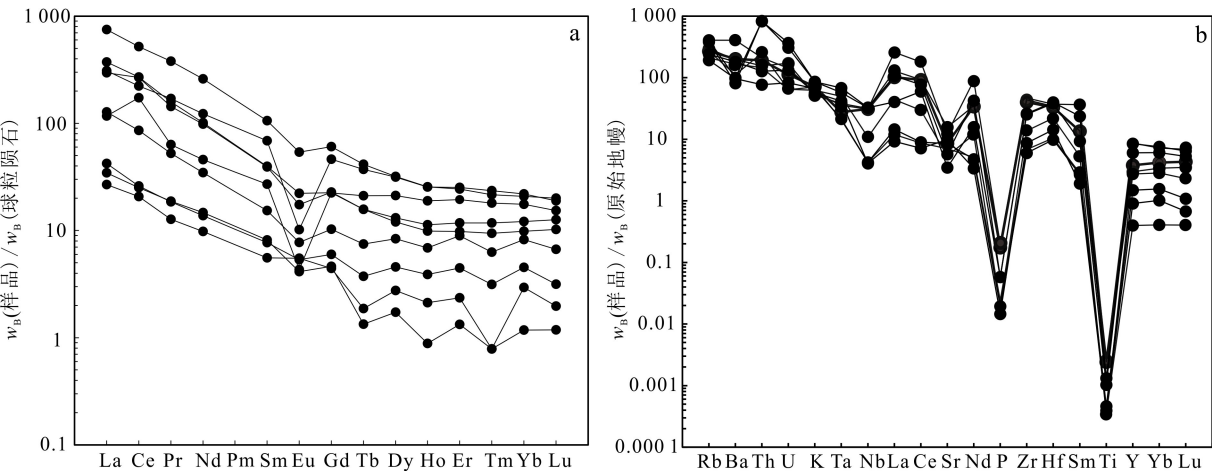


图 7 研究区新太古代黑云母二长花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b)

Fig.7 Rare earth element chondrite standardization model (a) and trace element original mantle standardization spider diagram (b) of Neoproterozoic biotite monzogranite in the study area

Th 和大离子亲石元素 K、Nd 等, 亏损 P 元素、高场强元素 Nb 和大离子亲石元素 Sr、Ti 等。

4 讨论

4.1 岩石成因类型及岩浆源区性质

根据岩石的成因, 花岗岩可以划分为 4 种类型: M 型、I 型、S 型和 A 型。其中: M 型花岗岩较为少见; A 型花岗岩通常是以碱性花岗岩为主; I 型花岗岩最显著的特点是含有角闪石、磁铁矿等矿物, $Na_2O/K_2O > 1$, $A/CNK < 1.10$; 而 S 型花岗岩多具有白云母、堇青石、石榴子石等矿物, 铝饱和指数 $A/CNK > 1.10$, 刚玉 (C) > 1 ^[27]。无论是 A 型、I 型或是 S 型, 在经历过高度的结晶分异后, 其矿物组成和化学成分都发生了低共结的变化, 因此对于鉴定这 3 种花岗岩类型变得尤为困难。我们可以综合分析它们的地球化学特征和其存在的标志性矿物来进行判定。

本文数据显示, 马家沟岩体为弱过铝质、高钾钙碱性系列钾质岩石, 无碱性矿物出现, 区别于 A 型花岗岩; 铝饱和指数 A/CNK 值在 1.02~1.15 之间, 平均值为 1.10, $w(Na_2O + K_2O)$ 值为 7.65%~9.52%, 平均值为 8.84%。 Na_2O/K_2O 值除了 QP32S1-1 外其他均小于 1, 不同于其他典型的 I 型花岗岩 ($Na_2O/K_2O > 1$); CIPW 标准矿物出现刚玉 (分子量为 1.21~2.84, 平均值为 1.87 (> 1)) 以及样品中含有富铝矿物白云母, 均显示 S 型花岗岩的特征。另外, 大多数 S 型花岗岩贫 Sr ($w(Sr) <$

300×10^{-6}), 且 $w(Yb)$ 大多介于 $1 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6}$ 之间^[28], 样品中 $w(Sr)$ 为 $73.49 \times 10^{-6} \sim 331.90 \times 10^{-6}$, 平均值为 180.18×10^{-6} , $w(Yb)$ 为 $0.20 \times 10^{-6} \sim 3.73 \times 10^{-6}$, 平均值为 1.87×10^{-6} 。由 A-C-F 图解 (图 8) 所示, 样品点均落在“S 型”区。综上所述, 马家沟岩体应为 S 型花岗岩。

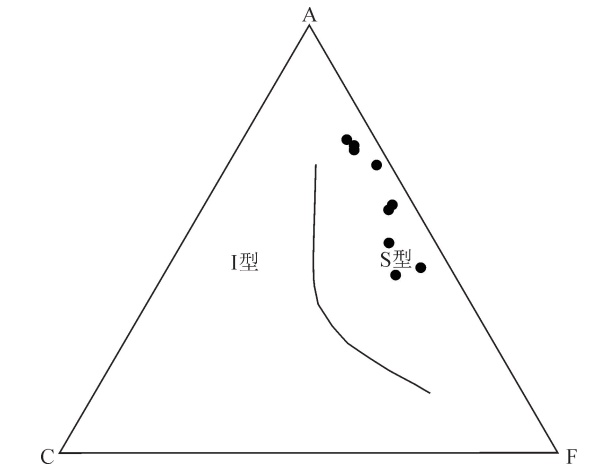


图 8 研究区新太古代黑云母二长花岗岩的 A-C-F 图解

Fig.8 A-C-F diagram of Neoproterozoic biotite monzogranite in the study area

对于花岗质岩石的成因目前一般有以下 3 种观点: 基性幔源岩浆的结晶分异、岩浆混合作用和地壳物质的部分熔融。从图 9a 可以看出, 马家沟岩体样品多投入变质沉积岩区; Rb/Sr 值分布在 $0.56 \sim$

3.31 之间,平均值为 1.31,属于壳源岩浆的分布范围之内(>0.50);Nb/Ta 值为 0.03~19.58,平均值为 8.10,接近地壳平均值 7.35^[29];Zr/Hf 值为 22.00~46.30,平均值为 30.50,稍低于地壳的 Zr/Hf 值 37,说明样品源区与地壳组分相近;从以上特征来看,岩浆物质可能来源于地壳。一般认为 S 型花岗岩是地壳物质发生了部分熔融,变质泥岩和杂砂岩主要为其源岩^[30-31]。有研究数据表明,源区不同则形成的 S 型花岗岩的 CaO/Na₂O 值也不同,CaO/Na₂O ≥ 0.30 是杂砂岩的部分熔融;CaO/Na₂O <0.30 是泥质岩的部分熔融^[32]。马家沟岩体样品 CaO/Na₂O 值平均为 0.16(<0.30),说明它的源岩可能为泥质岩的部分熔融。从 A/MF-C/MF 图解(图 9b)中可以看出,绝大多数投影点都在变质泥岩部分熔融区域内。综上所述,马家沟岩体应来源于陆壳沉积的泥质岩,由变质泥岩部分熔融形成。

4.2 构造背景及其地质意义

大部分学者认为在华北克拉通地区新太古代晚期发生的大规模岩浆活动主要有两种模式:一是板底垫托模式,即地幔柱底侵^[33-34];二是板块俯冲碰撞模式^[35-36]。之前,许多学者认为板块运动主要出现于新元古代,如 Fu 等^[7,37-39]认为新太古代晚期岩浆活动主要是由于地幔柱底侵造成的。最近,Zhai 等^[40]提出新太古代晚期岩浆活动可能是弧(陆)-陆碰撞的产物。前寒武纪岩浆活动最频繁的时候就是在华北克拉通新太古代晚期,同时在这一时期往往

还伴有变质作用现象的发生^[41-42]。根据以往资料分析来看,新太古代晚期—古元古代早期的华北克拉通东部陆块岩浆活动主要是由富钠花岗岩逐渐向富钾花岗岩发育演化形成的^[43-45]。基于全球不同克拉通 TTG 和钾质花岗岩类岩浆作用的时空演化规律,Laurent 等^[46]提出了类似显生宙的俯冲-碰撞模型,即认为全球太古宙晚期钾质花岗岩岩石形成于碰撞造山构造环境。需要注意的是,与俯冲阶段大规模岩浆作用过程相比,碰撞造山阶段岩浆作用规模通常较小^[47-48]。

华北克拉通东部陆块记录了至少 3 期太古宙晚期富钾花岗岩类岩浆作用:3.0~2.9 Ga 钾质花岗岩主要产出于鞍山—本溪的弓长岭—铁架山地区,以二长-正长花岗质片麻岩为主,它们可能起源于古老陆壳物质(特别是变质沉积岩)的壳内再造过程^[49-50];新太古代早期(约 2.7 Ga)富钾花岗岩类岩石仅出露在鲁山地区和胶北地体^[51],结合 TTG 片麻岩强烈分馏的稀土配分模式,鲁山地区的新太古代早期钾质花岗岩可能形成于碰撞造山过程^[52];近期,Wang 等^[53]在华北克拉通东部陆块东北缘辽北地体发现了新太古代晚期(约 2.5 Ga)多期次富钾花岗岩,这些新太古代晚期富钾花岗岩可能形成于后撤型增生造山体系。此外,冀东—辽西南部地区发现了大量富钾花岗岩类,这些岩石构成了一条大规模新太古代晚期富钾花岗岩带,它们的形成过程被认为与活动大陆边缘的俯冲增生、弧-陆碰撞以及碰

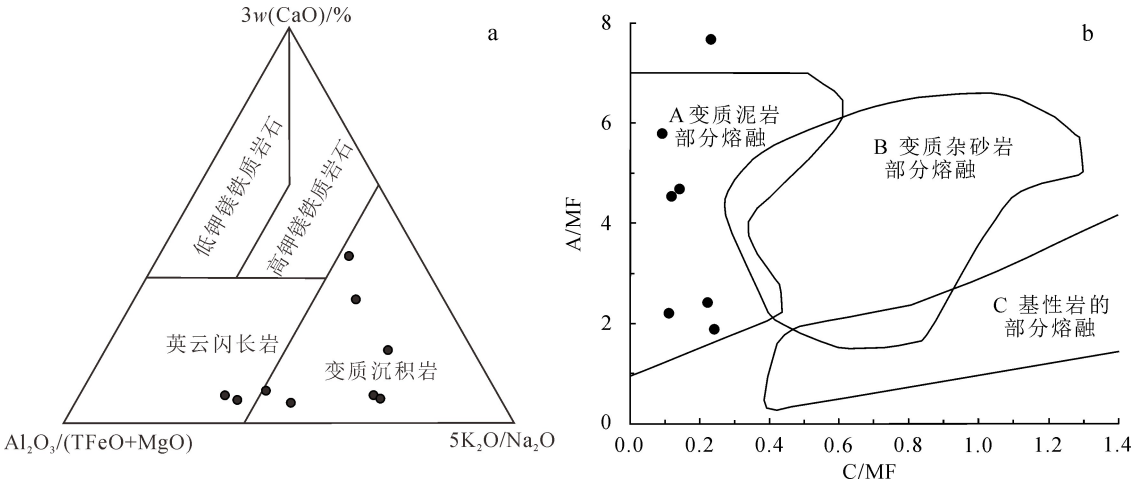


图 9 研究区新太古代黑云母二长花岗岩的 3w(CaO)-Al₂O₃/(TFeO+MgO)-5K₂O/Na₂O 图解(a)和 A/MF-C/MF 图解(b)
Fig.9 3w(CaO)-Al₂O₃/(TFeO+MgO)-5K₂O/Na₂O (a) and A/MF-C/MF (b) diagram of Neoproterozoic biotite monzogranite in the study area

撞后伸展过程密切相关^[6-7]。本文马家沟岩体矿物组成上含有白云母,主量元素具有富硅、高钾、低镁、低钙等特征,微量元素方面富集 LREE、La、Th、Nd 等,亏损 P、Nb、Ti 等,具有明显的 S 型花岗岩特征,是由变质沉积岩部分熔融形成的,属弱过铝质、高钾钙碱性系列钾质岩石,前人的研究结果也已经证实过铝质花岗岩的形成与造山作用中的碰撞有关^[54]。马家沟岩体样品低 Sr、Yb,这种类型的花岗岩极有可能来自于加厚地壳的构造深部^[55]。在 $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$ 图解(图 10a)中,大多数的投影点都在火山弧+同碰撞花岗岩区域中。在 $w(\text{Rb})-w(\text{Yb}+\text{Nb})$ 图解(图 10b)中,投影点绝大部分落在同碰撞花岗岩

区域,表明研究区可能处于碰撞造山带环境。在 R_2-R_1 图解(图 11a)中,样品点大多数落在造山晚期区域中,表明其可能形成于造山后的伸展环境。在 F-A-M 图解(图 11b)中,样品点均落入活动陆缘区。综合以上,马家沟岩体应该形成于碰撞造山后伸展的活动陆缘环境^[56]。

研究区位于华北克拉通东部陆块东北部,龙岗和狼林微陆块之间的碰撞造山带上。许多学者证实在新太古代晚期东部陆块中的龙岗和狼林微陆块俯冲碰撞拼合为整体,并导致龙岗微陆块沿碰撞拼合带出现了基性岩墙事件和延伸巨大的钾质花岗岩带,形成增生造山体系;随后,在约 2.2 Ga 开始裂解,通

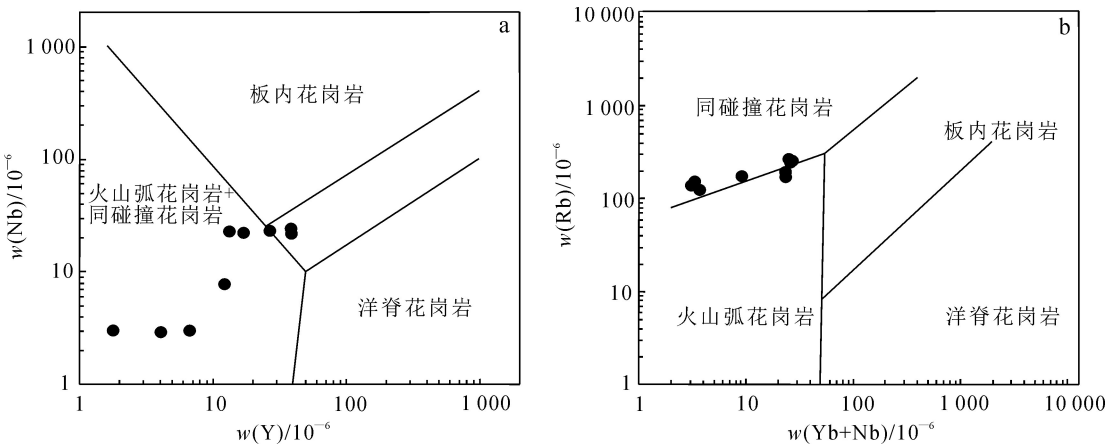
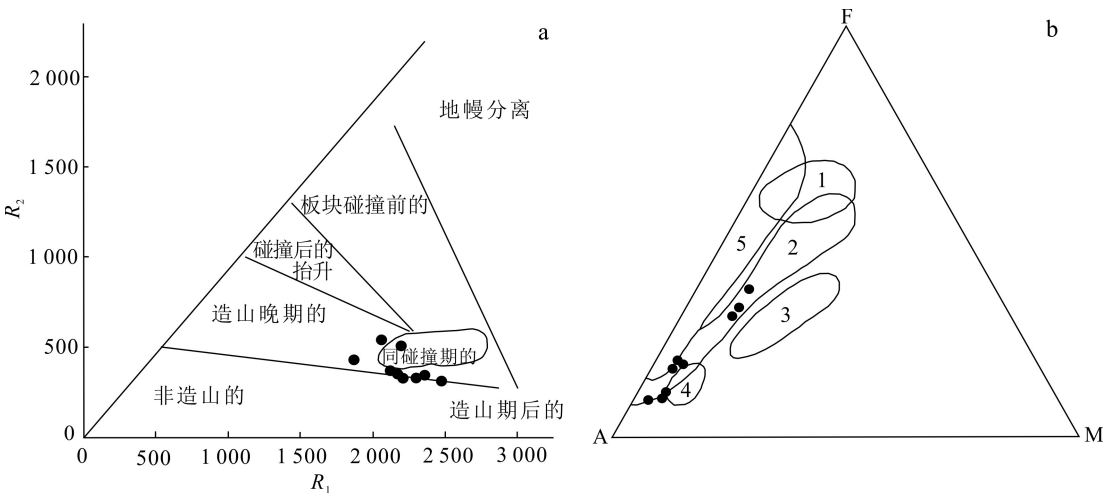


图 10 研究区新太古代黑云母二长花岗岩的 $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$ 图解(a)和 $w(\text{Rb})-w(\text{Yb}+\text{Nb})$ 图解(b)

Fig.10 $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$ (a) and $w(\text{Rb})-w(\text{Yb}+\text{Nb})$ (b) diagram of Neoproterozoic biotite monzogranite in the study area



1. 塞浦路斯、阿曼大洋斜长花岗岩(幔源);2. I 型科迪勒拉花岗岩(活动陆缘);3. I 型加里东花岗岩(碰撞隆起);4. 澳大利亚二云母基石英花岗岩(壳源、同碰撞);5. 澳大利亚东南褶皱带造山后 A 型花岗岩、尼日利亚非造山带 A 型花岗岩。

图 11 研究区新太古代黑云母二长花岗岩的 R_2-R_1 图解(a)和 F-A-M 图解(b)

Fig.11 R_2-R_1 (a) and F-A-M(b) diagram of Neoproterozoic biotite monzogranite in the study area

常称为胶—辽—吉裂谷带;于约 2.17 Ga 生成的 A 型辽吉花岗岩,是弧后盆地伸展环境下的产物;胶—辽—吉造山带主要的造山运动发生在 1.94 ~ 1.88 Ga,裂谷封闭、收缩变形,之后于约 1.85 Ga 与华北克拉通中部带一起完成华北克拉通的最终拼合,形成统一结晶基底的集结^[57]。新太古代晚期—古元古代早期钾质花岗岩正是龙岗和狼林微陆块第一次碰撞后的产物,结合本文研究的马家沟岩体的成因和构造背景,笔者认为该地区在新太古代由于陆块俯冲作用导致俯冲板片内的岩浆发生了部分熔融,从而形成了 TTG 岩系;由于俯冲作用的持续导致了陆块的碰撞,在新太古代晚期后造山时期地壳物质发生了部分熔融,从而产生了钾质花岗岩岩浆;最后在大陆伸展的背景下,由于岩浆侵位最终形成了 S 型钾质花岗岩,标志着造山作用的终结,代表了华北太古宙克拉通固结基底形成之前的最后一次岩浆活动。即在新太古代晚期本溪地区微陆块已拼贴完成,并与其他地区一起构成稳定的华北太古宙克拉通。

5 结论

1) 辽宁本溪地区马家沟岩体为片麻状中细粒黑云母二长花岗,SHRIMP 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (2490 ± 21) Ma,形成于新太古代晚期。

2) 马家沟岩体属弱过铝质、高钾钙碱性系列钾质岩石;主要富集轻稀土元素, Eu 负异常,富集高场强元素 La、Zr、Th 和大离子亲石元素 K、Nd 等元素,亏损 P 元素、高场强元素 Nb 和大离子亲石元素 Sr、Ti 等,为 S 型钾质花岗岩。岩浆来源于地壳,可能由变质泥岩部分熔融形成。

3) 辽宁本溪地区马家沟岩体形成于活动大陆边缘碰撞造山后的伸展环境,代表了华北太古宙克拉通固结基底形成之前的最后一次岩浆活动,标志着在新太古代晚期本溪地区微陆块已拼贴完成,并与其他地区一起构成稳定的华北太古宙克拉通。

参考文献 (References):

- [1] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of 3 800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton[J]. *Geology*, 1992, 20(4): 339 - 342.
- [2] Wan Y S, Liu S J, Xie H Q, et al. Formation and Evolution of the Archean Continental Crust of China: A Review[J]. *China Geology*, 2018, 1(1): 109 - 136.
- [3] 刘强, 李大鹏, 张岩, 等. 蓬莱黑岚沟金矿区岩浆作用对成矿制约: 岩石地球化学、年代学证据[J]. *黄金*, 2023, 44(9): 93 - 102.
Liu Qiang, Li Dapeng, Zhang Yan, et al. Constraints of Magmatism on Mineralization in Heilangou Gold Deposit, Penglai: Evidence from Lithogeochemistry and Chronology[J]. *Gold*, 2023, 44(9): 93 - 102.
- [4] Kusky T M, Polat A, Windley B F, et al. Insights into the Tectonic Evolution of the North China Craton Through Comparative Tectonic Analysis: A Record of Outward Growth of Precambrian Continents [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 162: 387 - 432.
- [5] Heilimo E, Halla J, Andersen T, et al. Neoproterozoic Crustal Recycling and Mantle Metasomatism: Hf - Nd - Pb - O Isotope Evidence from Sanukitoids of the Fennoscandian Shield[J]. *Precambrian Research*, 2013, 228: 250 - 266.
- [6] Fu J, Liu S, Zhang B, et al. A Neoproterozoic K-Rich Granitoid Belt in the Northern North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2019, 328: 193 - 216.
- [7] Fu J, Liu S, Zhang B, et al. A Neoproterozoic Magmatic Arc in the Western Liaoning Province, Northern North China Craton: Geochemical and Isotopic Constraints from Sanukitoids and Associated Granitoids[J]. *Lithos*, 2018, 322: 296 - 311.
- [8] Wan Y S, Xie S W, Yang C H, et al. Early Neoproterozoic (~ 2.7 Ga) Tectono-Thermal Events in the North China Craton: A Synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2014, 247: 45 - 63.
- [9] Zhao G C. Tectonic Subdivision of the North China Craton[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014: 1 - 14.
- [10] 耿元生, 沈其韩, 任留东. 华北克拉通晚太古代末—古元古代初的岩浆事件及构造热体制[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 1945 - 1966.
Geng Yuansheng, Shen Qihan, Ren Liudong. Late Neoproterozoic to Early Paleoproterozoic Magmatic Events and Tectonothermal Systems in the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(7): 1945 - 1966.
- [11] 翟明国. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. *地质学报*, 2012, 86(9): 1335 - 1349.
Zhai Mingguo. Evolution of the North China Craton and Early Plate Tectonic [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9): 1335 - 1349.
- [12] 万渝生, 董春艳, 颜颖强, 等. 华北克拉通太古宙研究若干进展[J]. *地球学报*, 2015, 36(6): 685 - 700.
Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, et al.

- Some Advances in Archean Studies of the North China Craton[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(6):685-700.
- [13] 田毅,余超,王广伟,等.鞍山一本溪—抚顺地区新太古代地质演化探讨[J]. *地质与资源*, 2015, 24(4):301-308.
- Tian Yi, Yu Chao, Wang Guangwei, et al. Discussion on the Neoproterozoic Geological Evolution in Anshan-Benxi-Fushun Region [J]. *Geology and Resources*, 2015, 24(4):301-308.
- [14] Zhao G C, Cawood P A. Precambrian Geology of China [J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223:13-54.
- [15] 杨崇辉,杜利林,任留东,等.赞皇杂岩中太古宙末期岩等钾质花岗岩的成因及动力学背景[J]. *地学前缘*, 2011, 18(2):62-78.
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, et al. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Jiangdeng Potassic Granite at the end of the Neoproterozoic in Zanhuang Complex, North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2):62-78.
- [16] Zhang H F, Zhai M G, Santosh M, et al. Geochronology and Petrogenesis of Neoproterozoic Potassic Meta-Granites from Huai'an Complex: Implications for the Evolution of the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1):82-105.
- [17] Wan Y S, Dong C Y, Liu D Y, et al. Zircon Ages and Geochemistry of Late Neoproterozoic Syenogranites in the North China Craton: A Review [J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223:265-289.
- [18] 张瑞英,张成立,第五春荣,等.中条山前寒武纪花岗岩地球化学年代学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11):3559-3573.
- Zhang Ruiying, Zhang Chengli, Diwu Chunrong, et al. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Its Geological Implications for the Precambrian Granitoids in Zhongtiao Mountain, Shanxi Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11):3559-3573.
- [19] Zhao Y, Li N B, Jiang Y H, et al. Petrogenesis of the Late Archean (~2.5 Ga) Na and K Rich Granitoids in the Zhongtiao Wangwu Region and Its Tectonic Significance for the Crustal Evolution of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2017, 303:590-603.
- [20] 杨崇辉,杜利林,宋会侠,等.中条山地区涑水杂岩新太古代烟庄正长花岗岩年龄及成因:对华北克拉通地壳演化的制约[J]. *地球科学*, 2020, 45(9):3161-3178.
- Yang Chonghui, Du Lilin, Song Huixia, et al. Geochronology and Petrogenesis of Neoproterozoic Yanzhuang Syenogranites from Sushui Complex in the Zhongtiao Mountains: Implications for the Crustal Evolution of the North China Craton [J]. *Earth Science*, 2020, 45(9):3161-3178.
- [21] Zhai M G. Multi-Stage Crustal Growth and Cratonization of the North China Craton [J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5(4):457-469.
- [22] 辽宁省地质矿产局.辽宁省区域地质志[M].北京:地质出版社,1989.
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Liaoning Province. Regional Geology of Liaoning Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.
- [23] Ludwig K R. User's Manual for ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 2003:1-74.
- [24] 宋彪,张玉海,万渝生,等.锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 2002, 48(增刊1):26-30.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, et al. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating [J]. *Geological Review*, 2002, 48(Sup.1):26-30.
- [25] 中国国家标准化管理委员会.硅酸盐岩石化学分析方法第3部分:二氧化硅量测定:GB/T 14506.3—2010 [S].北京:中国标准出版社,2010.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Methods for Chemical Analysis of Silicate Rocks Part 3: Determination of Silicon Dioxide Content: GB/T 14506.3—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [26] 赵振华.微量元素地球化学原理[M].北京:科学出版社,1997.
- Zhao Zhenhua. Principle of Geochemistry of Trace Elements [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [27] 肖庆辉,邱瑞照,邢作云,等.花岗岩成因研究前沿的认识[J]. *地质论评*, 2007, 53(增刊1):17-27.
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Xing Zuoyun, et al. Understanding of the Frontiers of Granite Genesis Research [J]. *Geological Review*, 2007, 53(Sup.1):17-27.
- [28] 贺元凯,吴泰然,罗红玲,等.华北板块北缘中段新太古代的陆-陆碰撞事件:来自合教S型花岗岩的证据[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(4):571-

580.
He Yuankai, Wu Tairan, Luo Hongling, et al. Late Archean Continent-Continent Collision Event of Middle Segment of North Margin of North China Plate: Evidence from S-Type Granite of Hejiao Area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(4): 571 - 580.
- [29] Green T H. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 347 - 359.
- [30] Villaros A, Stevens G, Buick I S. Origins of the S-Type Cape Granites (South Africa) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(18): A673.
- [31] Liu C H, Liu S W, Li Q G, et al. Petrogenesis of the Paleo-Prot Erozoic Guandishan Granitoids in Shanxi Province: Constraints from Geochemistry and Nd Isotopes [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(6): 925 - 935.
- [32] 甘保平, 第五春荣, 王伯隆, 等. 贺兰山古元古代花岗岩年代学及地球化学特征: 对华北克拉通西部孔兹岩带形成和演化的制约 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(8): 2325 - 2343.
Gan Baoping, Diwu Chunrong, Wang Bolong, et al. Geochronology and Geochemistry of the Paleoproterozoic Granites from the Helanshan Region: Constrains on the Formation and Evolution of Khondalite Belt in the Western North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(8): 2325 - 2343.
- [33] Li Z, Wei C J. Two Types of Neoarchean Basalts from Qingyuan Greenstone Belt, North China Craton: Petrogenesis and Tectonic Implications [J]. *Precambrian Research*, 2017, 292: 175 - 193.
- [34] 王跃, 周奇明, 张金龙, 等. 鲁西地区新太古代地壳增生事件: 来自花岗岩和二长花岗岩 U - Pb 年代学、Hf 同位素和岩石地球化学的证据 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(2): 463 - 485.
Wang Yue, Zhou Qiming, Zhang Jinlong, et al. Neoarchean Crustal Accretion in Western Shandong Province: Evidence from Granite and Monzogranite U - Pb Chronology, Hf Isotope and Rock Geochemistry [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(2): 463 - 485.
- [35] Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, et al. Amalgamation of the North China Craton: Key Issues and Discussion [J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 55 - 76.
- [36] Zhao G C, Zhai M G. Lithotectonic Elements of Precambrian Basement in the North China Craton: Review and Tectonic Implications [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1207 - 1240.
- [37] 彭游博. 辽北开原地区新太古代变质深成岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄及地球化学特征 [J]. *地质通报*, 2020, 39(5): 670 - 680.
Peng Youbo. LA - ICP - MS Zircon U - Pb Age and Geochemical Characteristics of Neoarchean Metamorphic Plutonic Rocks in Kaiyuan Area of Northern Liaoning Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(5): 670 - 680.
- [38] 郑常青, 耿志忠, 段东, 等. 辽北开原地区晚古生代一早中生代混杂岩的厘定及其地质意义 [J]. *世界地质*, 2023, 42(3): 444 - 460.
Zheng Changqing, Geng Zhizhong, Duan Dong, et al. Determination and Geological Significance of Late Paleozoic-Early Mesozoic Melanges in Kaiyuan Area, Northern Liaoning Province [J]. *World Geology*, 2023, 42(3): 444 - 460.
- [39] 万渝生, 董春艳, 任鹏, 等. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述 [J]. *岩石学报*, 2017, 33(5): 1405 - 1419.
Wan Yusheng, Dong Chunyan, Ren Peng, et al. Spatial and Temporal Distribution, Compositional Characteristics and Formation and Evolution of Archean TTG Rocks in the North China Craton: A Synthesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5): 1405 - 1419.
- [40] Zhai M G, Santosh M. The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: A Synoptic Overview [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 6 - 25.
- [41] Wang W, Cawood P A, Liu S, et al. Cyclic Formation and Stabilization on of Archean Lithosphere by Accretionary Orogenesis: Constraints from TTG and Potassic Granitoids, North China Craton [J]. *Tectonics*, 2017, 36(9): 1724 - 1742.
- [42] 石强, 李晨, 周煜欣, 等. 华北克拉通北缘孔兹岩带两期深熔石榴花岗岩地球化学特征及其地质意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(4): 1090 - 1116.
Shi Qiang, Li Chen, Zhou Yuxin, et al. Geochemistry and Geological Significance of the Two Episodes of Anatectic Garnet Granites in the Khondalite Belt, Northern Margin of the North China Craton [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(4): 1090 - 1116.
- [43] Diwu C R, Sun Y, Guo A L, et al. Crustal Growth in

- the North China Craton at ~ 2.5 Ga: Evidence from in Situ Zircon U - Pb Ages, Hf Isotopes and Whole-Rock Geochemistry of the Dengfeng Complex [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 149 - 170.
- [44] 陈斌, 李壮, 王家林, 等. 辽东半岛 ~ 2.2 Ga 岩浆事件及其地质意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2016, 46(2): 303 - 320.
- Chen Bin, Li Zhuang, Wang Jialin, et al. The ~ 2.2 Ga Magmatic Event in Liaodong Peninsula and Its Geological Significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(2): 303 - 320.
- [45] 王惠初, 陆松年, 初航, 等. 辽阳河栏地区辽河群中变质基性熔岩的锆石 U - Pb 年龄与形成构造背景 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2011, 41(5): 1322 - 1334, 1361.
- Wang Huichu, Lu Songnian, Chu Hang, et al. Zircon U - Pb Age and Tectonic Setting of Meta-Basalts of Liaohe Group in Helan Area, Liaoyang, Liaoning Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1322 - 1334, 1361.
- [46] Laurent O, Martin H, Moyen J F, et al. The Diversity and Evolution of Late-Archean Granitoids: Evidence for the Onset of "Modern-Style" Plate Tectonics Between 3.0 and 2.5 Ga [J]. *Lithos*, 2014, 205: 208 - 235.
- [47] 段雪鹏, 田永飞, 王宁, 等. 辽东地区大石湖沟铜矿化构造背景: 来自闪长玢岩锆石成因的指示 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2023, 53(1): 140 - 160.
- Duan Xuepeng, Tian Yongfei, Wang Ning, et al. Tectonic Setting of Dashihugou Copper Mineralization in Eastern Liaoning Province: Implications from Zircon Genesis of Diorite Porphyry [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1): 140 - 160.
- [48] 郑培玺. 辽西地区台子里花岗质片麻岩锆 U - Pb 年龄及其地质意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2009, 39(3): 455 - 460.
- Zheng Peixi. Zircon U - Pb Age and Geological Significance of the Taizili Granitic Gneiss in Western Liaoning Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(3): 455 - 460.
- [49] Bao H, Liu S W, Wang M J, et al. Mesoproterozoic Geodynamic Regime Evidenced from Diverse Granitoid Rocks in Anshan-Benxi of the North China Craton [J]. *Lithos*, 2020, 366: 105574.
- [50] Dong C Y, Wan Y S, Xie H Q, et al. The Mesoproterozoic Tiejiaoshan-Gongchangling Potassic Granite in the Anshan-Benxi Area, North China Craton: Origin by Recycling of Paleo to Eoarchean Crust from U - Pb - Nd - Hf - O Isotopic Studies [J]. *Lithos*, 2017, 290/291: 116 - 135.
- [51] Zhou Y Y, Zhao T P, Zhai M G, et al. Petrogenesis of the Archean Tonalite-Trondhjemite-Tranodiorite (TTG) and Tranites in the Lushan Area, Southern Margin of the North China Craton: Implications for Crustal Accretion and Transformation [J]. *Precambrian Research*, 2014, 255: 514 - 537.
- [52] Wang X, Huang X L, Yang F. Revisiting the Lushan-Taihua Complex: New Perspectives on the Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic Crustal Evolution of the Southern North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2019, 325: 132 - 149.
- [53] Wang K, Liu S W, Wang M J, et al. Geochemistry and Zircon U - Pb - Hf Isotopes of the Late Neoproterozoic Granodiorite-Monzogranite-Quartz Syenite Intrusions in the Northern Liaoning Block, North China Craton: Petrogenesis and Implications for Geodynamic Processes [J]. *Precambrian Research*, 2017, 295: 151 - 171.
- [54] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩 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.
- [55] 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.
- [56] 韩宝福. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性 [J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 64 - 72.
- Han Baofu. Diversity of Post-Collisional Granitoids and Complexity of Tectonic Environment Discrimination [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 64 - 72.
- [57] 李三忠, 李玺瑶, 戴黎明, 等. 前寒武纪地球动力学 (VI): 华北克拉通形成 [J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 77 - 96.
- Li Sanzhong, Li Xiyao, Dai Liming, et al. Precambrian Geodynamics (VI): Formation of North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(6): 77 - 96.