

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.350



河北围场朝阳地中泥盆世高 Sr/Y 花岗岩成因 及对兴蒙造山带演化的约束

王树庆, 胡晓佳, 赵华雷, 刘文刚, 杨泽黎

中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

摘要: 兴蒙造山带位于华北板块和西伯利亚板块之间, 具有复杂的构造演化历史, 其构造格局和拼合机制一直存在较大争议。本次在兴蒙造山带南部的朝阳地识别出一套形成于伸展背景的中泥盆世高 Sr/Y 花岗岩, 可对早古生代末期弧陆拼贴过程进行约束。朝阳地花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 386.8 ± 2.9 Ma, 属于中泥盆世。岩石地球化学分析显示高 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 含量, 中等 CaO、 K_2O 含量, 较低 FeO_t 、MgO 含量的特征, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值均大于 1, 属于中钾钙碱性 I 型花岗岩; A/CNK 范围为 1.02~1.08, 属于弱过铝质系列; 微量元素具有富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素及 Sr, 弱亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素的特征, Sr/Y 比值高 (103~146); 具有轻稀土富集的配分模式 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 9.9 \sim 14.6$), 重稀土分馏较弱, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 范围为 1.45~1.97, 具有弱 Eu 正异常 (δEu 值 1.31~1.80), 地球化学分析表明, 高 Sr/Y 比值继承自岩浆源区而非加厚地壳的熔融。朝阳地侵入岩均具有富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值 (范围分别为 $-18.6 \sim -17.9$, $-38.30 \sim -23.59$), 锆石 Hf 模式年龄范围为 2 825~3 745 Ma, 集中于 2 800~3 000 Ma, Nd 模式年龄较集中 (2 584~2 642 Ma)。综合岩石学、元素及同位素地球化学分析, 朝阳地高 Sr/Y 侵入岩是中泥盆世在区域伸展背景下, 由具有高 Sr/Y 比值的古老基性下地壳物质受减压和上涌软流圈加热共同作用发生部分熔融形成, 代表泥盆纪白乃庙岛弧与华北陆块碰撞后区域伸展背景。

关键词: 中泥盆世; 高 Sr/Y 花岗岩; 弧陆碰撞; 下地壳源区; 华北陆块北部; 兴蒙造山带; 地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)01-0145-16

收稿日期: 2018-07-06

Petrogenesis of Middle Devonian Chaoyangdi High Sr/Y Granite and Constraints on the Evolution of Xing-Meng Orogeny

Wang Shuqing, Hu Xiaojia, Zhao Hualei, Liu Wengang, Yang Zeli

Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Abstract: Xing-Meng orogeny is the accretionary orogeny between Siberia and North China plates with complex multi-stage subduction and accretion, and its tectonic evolution, has remained controversial for a long time. To reveal the arc-continent collision in the end of Early Paleozoic, this paper presents a study on Chaoyangdi Middle Devonian high Sr/Y granite in southern part of Xing-Meng orogeny. Zircon U-Pb dating results yield a formation age of 386.8 ± 2.9 Ma, with the corresponding age of Middle Devonian (D2). Geochemical data shows that these rocks have high SiO_2 , Al_2O_3 and Na_2O , moderate CaO and K_2O , but low FeO_t and MgO contents with the $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ and calc-alkaline series signature. The A/CNK ratios range from 1.02 to 1.08, indicating these samples are weak peraluminous series. Trace element analysis results display enrichment of LILEs, such as Rb, Ba, K and Sr, but depletion of HFSE, i.e., Nb, Ta, P and Ti, with high Sr/Y ratios (103–146), similar with adakitic-affinity. These rocks have strong fractionation between LREE and HREE ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 9.9 \sim 14.6$), no obvious HREE fractionation ($(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.45 \sim 1.97$) and weak positive Eu anomaly.

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. DD20160041, 12120114020401)。

作者简介: 王树庆 (1983-), 男, 高级工程师, 硕士, 从事岩石学、地球化学研究及地质调查工作, 主要从事造山带构造-岩浆作用研究。ORCID: 0000-0002-4973-7535. E-mail: 89617984@qq.com

引用格式: 王树庆, 胡晓佳, 赵华雷, 等, 2019. 河北围场朝阳地中泥盆世高 Sr/Y 花岗岩成因及对兴蒙造山带演化的约束. 地球科学, 44(1): 145–160.

lies ($\delta\text{Eu}=1.31-1.80$). All these geochemical characteristics suggest that high Sr/Y signature is inherited from magma source. Sr-Nd-Hf analyses show enriched isotopic signatures—both $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ are negative (-38.30 to -23.59 and -18.6 to -17.9) with old two-stage model age (2 825 to 3 745 Ma for Hf, 2 584 to 2 642 Ma for Nd), indicating an old enriched crustal source. Based on petrology, geochemistry and Hf-Sr-Nd isotopic characteristics, we conclude that the Chaoyangdi Middle Devonian intrusive rocks were formed by partial melting of ancient basic lower crust with high Sr/Y ratios and formed by post-collisional extension and heating of asthenosphere upwelling, indicating the regional extension after collision between the Bainaimiao arc and the North China Block.

Key words: Middle Devonian; high Sr/Y granite; arc-continent collision; lower continental crust source; northern part of North China Craton; Xing-Meng orogeny; geochemistry.

华北陆块是中国最古老的古陆,自从古元古代形成基底—盖层的双层结构以后保持长期稳定(Zhao *et al.*, 2001; Zhai *et al.*, 2011; Wan *et al.*, 2015),古生代经历了周缘造山带的改造后中生代遭受岩石圈减薄并诱发大规模的岩浆作用和成矿作用(吴福元等, 2008; 徐义刚等, 2009; 朱日祥等, 2012).华北陆块北部在古生代受北部古亚洲洋向南俯冲的影响,发育一条奥陶纪—志留纪东西向包尔汗图—白乃庙岛弧(刘敦一等, 2003; 许立权等, 2003; Jian *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013, 2014; 钱筱嫣等, 2017),并于晚志留世与华北陆块发生弧陆碰撞,主要地质记录为与碰撞相关的岩浆作用、早古生代沉积岩和岩浆岩的变质变形作用等(Zhang and Tang, 1989; Tang and Yan, 1993; Jian *et al.*, 2008; 张维和简平, 2008; 刘建峰等, 2013; Zhang *et al.*, 2013, 2014),而后发生区域性伸展沉积了晚志留世—早泥盆世西别河组,与下伏包尔汗图组火山岩之间呈角度不整合接触(张允平等, 2010),区域伸展作用的岩浆响应主要包括华北陆块北部沿东西向发育的泥盆纪(409~373 Ma)碱性岩、A型花岗岩和少量基性—超基性岩等(Jiang, 2005; Zhang *et al.*, 2007, 2009, 2010; Shi *et al.*, 2010; 徐博文等, 2015; Huang *et al.*, 2017),均代表北部早古生代末期弧陆碰撞后的区域伸展背景。

华北陆块北部河北围场北东 40 km 处的朝阳地镇出露一套中泥盆世的二长花岗岩,前人认为其形成于大陆边缘弧背景下(中国地质科学院地质研究所, 2009, 1: 25 万西老府(K50C002003)地调报告),本次工作通过锆石年代学、岩石学、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素等工作,认为这套侵入岩是具有高 Sr/Y 比值的 I 型花岗岩,源于高 Sr/Y 比值的古老基性下地壳物质的部分熔融,形成于北部白乃庙岛弧与华北陆块碰撞之后的区域伸展背景,指示了早古生代弧陆拼贴的过程,可对兴蒙造山带南部构造演化过程进行约束。

1 地质背景及岩石特征

研究区位于河北省围场县东北部约 40 km 处的朝阳地镇,大地构造位置位于白云鄂博—赤峰断裂和尚义—平泉断裂之间的华北陆块北缘东段(图 1),这一区域发育的泥盆纪岩浆作用主要分布于赤峰一带,包括赤峰市红山公园 A 型花岗岩(Shi *et al.*, 2010)、鸡冠山和红庙子 A 型花岗岩(徐博文等, 2015)以及赤峰敖汉旗朝吐沟晚泥盆世双峰式火山岩(孙立新等, 2015)等。

朝阳地岩体位于围场县朝阳地镇北侧,根据前人区域地质调查资料及野外调查(中国地质科学院地质研究所, 2009, 1: 25 万西老府(K50C002003)地调报告),朝阳地侵入体呈近椭圆状,出露面积约 113 km²,侵入到新太古代基底岩系中,包括单塔子群黑云斜长片麻岩(图 2b)和新太古代花岗闪长质片麻岩,西侧与早二叠世三面井组呈断层接触,北部及东部被早—中侏罗世和早白垩世正长花岗岩侵入(图 2a)。根据野外观察,这套侵入岩均未发生区域变质变形,呈块状构造,经历较弱的风化呈球状,未见暗色包体(图 2c),主要岩石类型为中细粒二长花岗岩,岩体部分发生轻微蚀变呈帘石化。

二长花岗岩,新鲜呈浅灰白色,局部呈浅肉红色,局部碎裂化(图 2a),镜下观察岩石受轻微脆性变形作用,碎裂明显,少量微粒状长英质沿裂隙分布,中细粒花岗结构,粒度 1~3 mm,矿物成分包括斜长石(45%~50%)、钾长石(25%~30%)、石英(20%~25%)、黑云母(约 5%),斜长石杂乱分布,呈半自形板状,具聚片双晶,轻绢云母化、少量高岭土化、帘石化,个别可见双晶弯曲、波状消光等特征,局部与钾长石接触处具交代蠕虫状结构、交代净边状结构,用上(010)晶带最大消光角法粗略测得牌号 An=29,为更长石;钾长石呈半自形宽板状—他形粒状,杂乱分布,为正条纹长石,轻高岭土化,有的粒内嵌布板状斜长石等包体,局部交代斜长石;石英呈他形粒状,填隙状

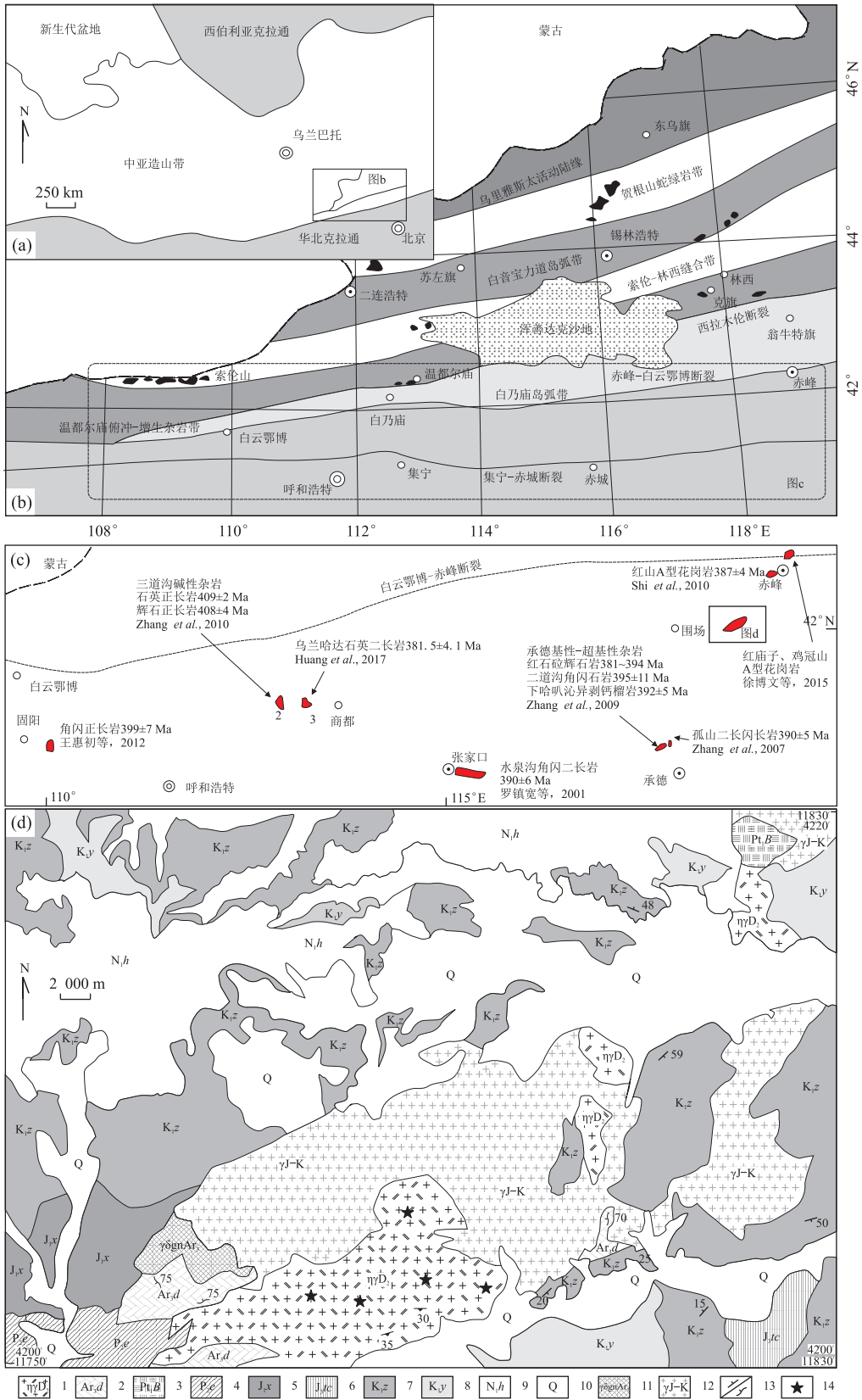


图 1 河北围场朝阳地地区地质简图

Fig.1 Geological sketch of Chaoyangdi region, Weichang County, Hebei

1.中泥盆世二长花岗岩;2.晚太古代单塔子岩群;3.古元古代宝音图岩群;4.中二叠世额里图组;5.早侏罗世下花园组;6.晚侏罗世土城子组;7.早白垩世张家口组;8.早白垩世义县组;9.中新世汉诺坝组;10.第四系;11.新太古代花岗闪长质片麻岩;12.侏罗纪-白垩纪花岗岩;13.层理/片麻岩产状;14.采样点.图 1b 据 Jian et al.(2008)修改;图 1d 据中国地质科学院地质研究所,2009,1:25 万西老府(K50C002003)地调图修改

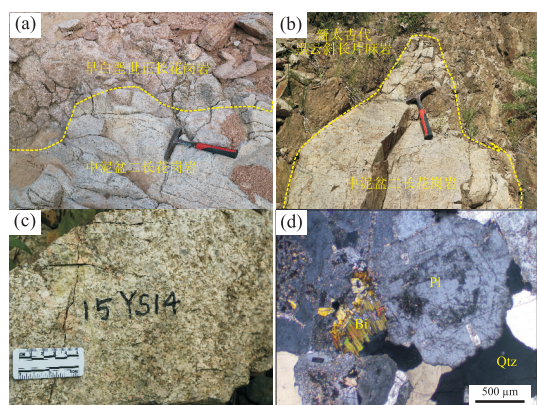


图 2 朝阳地侵入岩野外及镜下照片

Fig. 2 Field and microscope photographs of Chaoyangdi intrusive rocks

a. 中泥盆世二长花岗岩被早白垩世正长花岗岩侵入; b. 中泥盆世二长花岗岩侵入新太古代单塔子群黑云斜长片麻岩中; c. 二长花岗岩露头; d. 二长花岗岩镜下照片, 矿物代号: Qtz, 石英; Pl, 斜长石; Kf, 钾长石; Bt, 黑云母

分布, 粒内可见轻波状、带状消光, 少量发育裂纹, 边界不规则; 黑云母呈叶片状, 呈散状分布, 绿泥石化明显、少量帘石化呈假像产出(图 2d)。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素分析

将新鲜岩石样品破碎至 80 目, 然后经水粗淘、强磁分选、电磁分选和酒精细淘之后, 在实体显微镜下手工挑选出锆石, 将待测锆石颗粒用环氧树脂制靶, 然后磨至锆石颗粒的一半并抛光, 阴极发光照相在北京铀年领航科技有限公司的日本电子 JSM_6510 型扫描电镜上进行。锆石原位 U-Pb 年龄测试及原位 Hf 同位素测试是在中国地质调查局天津地质调查中心实验室利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)完成, 将 NEW WAVE 193-FX-ArF 准分子激光器与 Thermo Fisher 公司的 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪联接, 采用 He 气作为剥蚀物质的载气, 锆石 U-Pb 年龄测定采用的激光束斑直径为 35 μm , 剥蚀时间为 30 s, 采用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐标准参考物质 NIST610, 锆石年龄计算采用 GJ-1; 锆石原位微区 Hf 同位素分析采用与 U-Pb 年龄测定相同的激光器与质谱仪, 激光剥蚀束斑直径为 50 μm , 剥蚀时间为 30 s, 采用 GJ-1 作为外标计算 Hf 同位素比值, 具体仪器配置和实验流程参见李怀坤等(2010)和耿建珍等(2011)。U-Pb 测年和 Hf 同位素数据处理采用

ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2010), 锆石 U-Pb 年龄谐和图采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)绘制。

2.2 岩石地球化学

野外采集新鲜无蚀变的岩石样品, 首先用水将样品表面冲洗干净并晾干, 机械破碎至 200 目后送实验室分析。岩石主微量元素分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成, 主量元素用熔片法 X 射线荧光光谱法(XRF)测试, FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法, 分析精度优于 2%。

微量元素分析: 准确称取 0.5 g 样品于密闭聚四氟乙烯溶样器中, 加入 1 mL 氢氟酸和 0.5 mL 硝酸, 放入钢套进烘箱于 190 $^{\circ}\text{C}$ 保温 48 h, 后开盖置于 180 $^{\circ}\text{C}$ 电热板蒸干, 加入 0.5 mL 硝酸蒸干, 并重复一次。加入 5 mL 50% 硝酸, 置于钢套进烘箱于 130 $^{\circ}\text{C}$ 保温 3 h, 准确定容至 50 mL, 与空白样品一同使用 ICP-MS 测试。标样(GBW07103)分析值、标准值、相对偏差及允许误差均列于表 1, 测试精度均符合要求。

2.3 Sr-Nd 同位素分析

取 200 目全岩样品粉末(具体称样量以估计可取得 1.0 μg 以上纯 Nd 为标准), 用 HF + HClO₄ + HNO₃ 溶解, 在密闭 Teflon 溶样器中于高温条件下反应 7 d。利用 AG50W \times 12 强酸性阳离子交换树脂分离 Rb、Sr 得到总稀土, 然后采用 HEHEHP 树脂(P507)技术分离纯化 Nd, 全流程空白本底稳定在 Sm = 3.0×10^{-11} g; Nd = 5.4×10^{-11} g。Sr、Nd 同位素比值测试均在 Triton 热电质谱仪上完成, Sr 的质谱标准样 NBS987 Sr 的结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710\ 245 \pm 0.000\ 030$, LRIG 质谱标准样的结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 202 \pm 0.000\ 030$, 国家一级标准 Sm-Nd 岩石样 GBS04419 的结果是: Sm = 3.017×10^{-6} g, Nd = 10.066×10^{-6} g, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 739 \pm 0.000\ 005$, 国际标准岩石样 BCR-2 的结果是: Rb = $(46.5 \pm 0.93) \times 10^{-6}$ g, Sr = $(336.00 \pm 6.72) \times 10^{-6}$ g, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704\ 958 \pm 0.000\ 030$, Sr 分馏的内校正因子均采用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375\ 209$, Sm = $(6.70 \pm 0.14) \times 10^{-6}$ g, Nd = $(28.00 \pm 0.56) \times 10^{-6}$ g, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 633 \pm 0.000\ 030$, Nd 分馏的内校正因子均采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\ 9$ 。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

本文对 1 件二长花岗岩样品进行了锆石测年, 结果见表 1、图 3 和图 4。锆石呈自形短柱状, 长宽比

表 1 朝阳地侵入岩锆石 U-Pb 测年分析结果

Table 1 Zircon LA-MC-ICPMS U-Pb dating data of Chaoyangdi intrusive rocks

点号	Pb (10 ⁻⁶)	U (10 ⁻⁶)	Th/U	同位素比值				年龄(Ma)				谐和度 (%)
				²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	
1	16	271	0.27	0.061 7	0.000 7	0.463 1	0.009 3	386	4	386	8	100
2	8	121	0.59	0.064 1	0.000 7	0.497 0	0.018 1	400	4	410	15	98
3	11	186	0.25	0.063 0	0.000 7	0.484 7	0.018 2	394	4	401	15	98
4	12	188	0.96	0.061 4	0.000 7	0.482 9	0.013 4	384	4	400	11	96
5	7	80	0.25	0.091 7	0.002 2	0.861 1	0.060 2	565	13	631	44	88
6	7	116	0.54	0.061 4	0.000 7	0.461 3	0.016 7	384	4	385	14	100
7	11	184	0.19	0.062 3	0.001 0	0.471 1	0.018 6	390	6	392	16	99
8	8	135	0.46	0.062 8	0.000 7	0.476 8	0.014 7	393	4	396	12	99
9	7	126	0.22	0.061 7	0.001 0	0.474 4	0.031 8	386	6	394	26	98
10	9	128	0.31	0.068 9	0.000 9	0.583 8	0.017 2	430	6	467	14	91
11	16	277	0.31	0.061 6	0.000 7	0.466 1	0.008 3	386	4	388	7	99
12	8	145	0.20	0.061 2	0.000 7	0.461 5	0.023 8	383	4	385	20	99
13	11	180	0.29	0.061 6	0.000 7	0.478 3	0.013 8	385	4	397	11	97
14	19	322	0.25	0.060 5	0.000 7	0.453 0	0.012 1	379	4	379	10	100
15	18	299	0.24	0.061 5	0.000 7	0.474 0	0.008 5	385	4	394	7	98
16	12	206	0.27	0.061 5	0.000 7	0.465 4	0.014 2	384	4	388	12	99
17	7	119	0.29	0.062 7	0.000 8	0.516 1	0.038 0	392	5	423	31	92
18	6	105	0.32	0.061 2	0.000 7	0.484 6	0.029 8	383	5	401	25	95
19	15	243	0.37	0.062 3	0.000 7	0.470 9	0.011 1	390	4	392	9	99

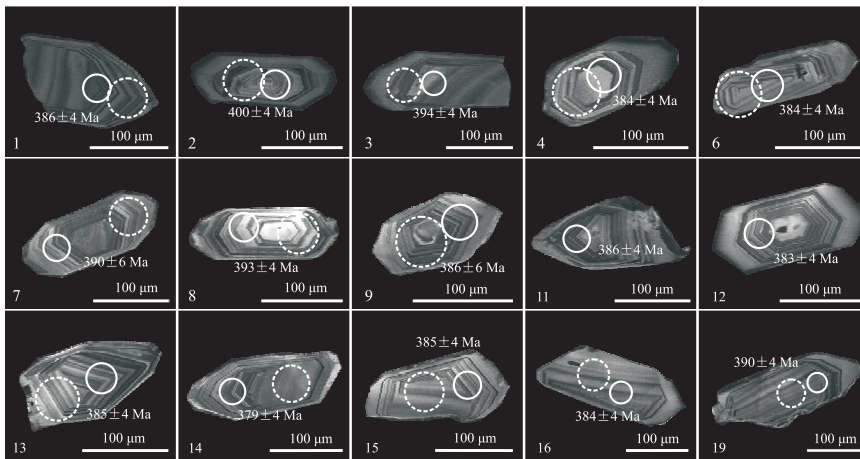


图 3 锆石阴极发光及 LA-MC-ICPMS 测年、Hf 同位素分析点位

Fig.3 Cathodoluminescence images and analysis spots of zircons

左下角数字为点号;实心圆圈为测年;虚线圈为 Hf 同位素分析

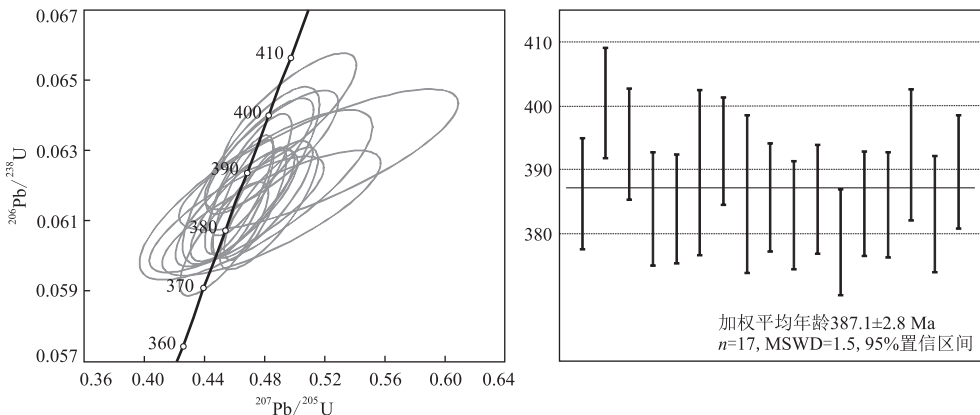


图 4 朝阳地侵入岩锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 测年谐和图

Fig.4 Concordia diagrams for LA-MC-ICPMS zircon U-Pb dating of Chaoyangdi intrusive rocks

表 2 朝阳地侵入岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果Table 2 Major (%) and trace (10^{-6}) elements data of Chaoyangdi intrusive rocks

样品号	15YS12	15YS13	15YS14	15YS15	15YS17	15YS18	标样测试值	标样推荐值	相对偏差	允许误差
SiO ₂	71.17	69.62	70.19	71.23	71.5	69.51	73.18	72.83	0.24	0.33
Al ₂ O ₃	15.69	16.08	15.95	15.71	15.45	16.31	13.43	13.4	0.11	1.91
Fe ₂ O _{3t}	1.85	2.22	2.21	1.32	1.76	2.33	—	—	—	—
CaO	2.32	2.36	2.21	1.42	2.26	2.5	1.53	1.55	0.65	4.2
MgO	0.49	0.56	0.54	0.27	0.35	0.56	0.4	0.42	2.44	5.92
K ₂ O	2.89	3.3	2.76	2.91	2.72	2.85	5.06	5.01	0.5	2.87
Na ₂ O	4.63	4.51	4.72	5.4	4.95	4.73	3.13	3.13	0	3.38
TiO ₂	0.21	0.23	0.24	0.15	0.2	0.27	0.29	0.29	0	6.46
P ₂ O ₅	0.08	0.1	0.094	0.059	0.067	0.098	0.092	0.093	0.54	8.3
MnO	0.055	0.053	0.057	0.046	0.054	0.064	0.06	0.06	0	9.08
烧失量	0.63	0.95	1.03	1.49	0.69	0.78	0.69	0.69	0	0
Na ₂ O/K ₂ O	1.6	1.37	1.71	1.86	1.82	1.66	—	—	—	—
Cr	4.03	3.97	5.31	1.17	3.27	5.01	3.95	3.6	4.64	22.25
Ni	2.28	2.26	3.15	0.79	2.26	2.58	1.63	2.3	17.05	23.86
Co	2.09	2.07	2.49	0.92	1.46	2.57	2.7	3.4	11.48	22.45
Rb	58	60.4	64.6	66.8	44.2	52.4	—	466	—	—
Cs	1.23	1.23	1.46	1.59	1.14	0.92	36.9	38.4	1.99	15.1
Sr	823	689	883	714	638	886	—	106	—	—
Ba	1 150	1 240	1 240	1 060	1 200	1 020	286	343	9.06	10.14
Nb	7.35	7.54	7.79	10.6	6.89	9.14	42.7	40	3.26	14.99
Ta	0.38	0.39	0.36	0.58	0.34	0.51	6.29	7.2	6.75	19.93
Zr	95.9	112	126	94.7	95.7	128	176	167	2.62	11.62
Hf	2.47	3	3.13	2.47	2.39	2.96	6.26	6.3	0.32	20.36
U	0.54	0.52	0.55	1.01	0.46	0.64	18.2	18.8	1.62	17.03
Th	1.5	2.08	1.89	1.93	1.39	2.51	45.7	54	8.32	14.23
La	9	13.7	12.7	12.1	9.51	18.3	51	54	2.86	14.23
Ce	24.2	26.2	27.4	25.2	22.3	32.8	106	108	0.93	12.59
Pr	2.04	2.86	2.52	2.29	2.04	3.51	12.8	12.7	0.39	18.17
Nd	7.94	10.8	9.5	8.31	7.76	13	46.1	47	0.97	14.58
Sm	1.47	1.91	1.61	1.4	1.4	2.16	7.58	9.7	12.27	18.99
Eu	0.79	0.95	0.87	0.71	0.77	0.92	0.69	0.85	10.39	27.78
Gd	1.32	1.79	1.48	1.35	1.22	2.14	7.71	9.3	9.35	19.12
Tb	0.19	0.24	0.21	0.19	0.16	0.26	1.33	1.65	10.74	25.11
Dy	0.98	1.14	1.02	1.06	0.88	1.32	8.15	10.2	11.17	18.84
Ho	0.19	0.23	0.2	0.21	0.18	0.27	52.7	62	8.11	13.89
Er	0.56	0.68	0.59	0.62	0.52	0.78	1.76	2.05	7.61	24.29
Tm	0.09	0.11	0.095	0.1	0.088	0.13	5.32	6.5	9.98	20.26
Yb	0.65	0.76	0.65	0.77	0.59	0.9	1.03	1.06	1.44	26.87
Lu	0.11	0.12	0.11	0.13	0.097	0.14	6.99	7.4	2.85	19.84
Y	5.8	6.69	6.03	5.66	5.59	8.04	1.1	1.15	2.22	26.53
ΣREE	49.53	61.49	58.955	54.44	47.515	76.63	—	—	—	—
Sr/Y	142	103	146	126	114	110	—	—	—	—
δEu	1.73	1.57	1.72	1.58	1.8	1.31	—	—	—	—

1.0~2.5, 无色透明, 包裹体少. 阴极发光图像显示, 锆石具有较细密的振荡环带, 指示典型的岩浆成因(图 3). 从表 1 可见, 所有 19 个测点均具有高的 Th、U 含量并且 Th/U 比值均大于 0.1(0.29~0.97), 同样指示岩浆成因. 在图 4 中, 大部分测点均成群落在谐和线上, 其中点 5、10、17 的谐和度低于 95%, 可能经历过 Pb 丢失, 在计算时剔除这些样品, 其余 16 个测点

的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄范围为 379~400 Ma, 加权平均值为 386.8 ± 2.9 Ma ($n=16$, MSWD=1.5).

3.2 岩石地球化学

朝阳地侵入岩主微量元素分析结果列于表 2, 根据野外观察, 岩石新鲜未发生明显变质变形, 地球化学分析结果显示烧失量较低(0.63%~1.49%), 这均表明岩石未遭受明显风化及蚀变作用的影响, 数据可

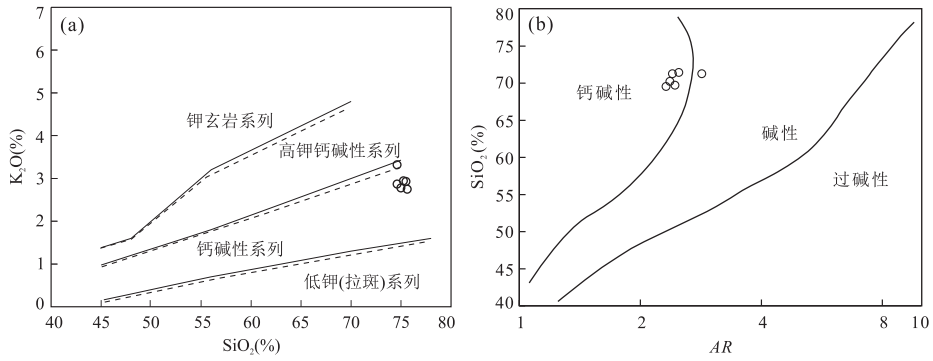


图 5 朝阳地侵入岩 SiO₂-K₂O 图解(a)和 AR-SiO₂ 图解(b)

Fig.5 SiO₂-K₂O (a) and AR-SiO₂ (b) diagram of Chaoyangdi intrusive rocks

图 a 据 Le Maitre *et al.*(1989); 图 b 据 Wright(1969)

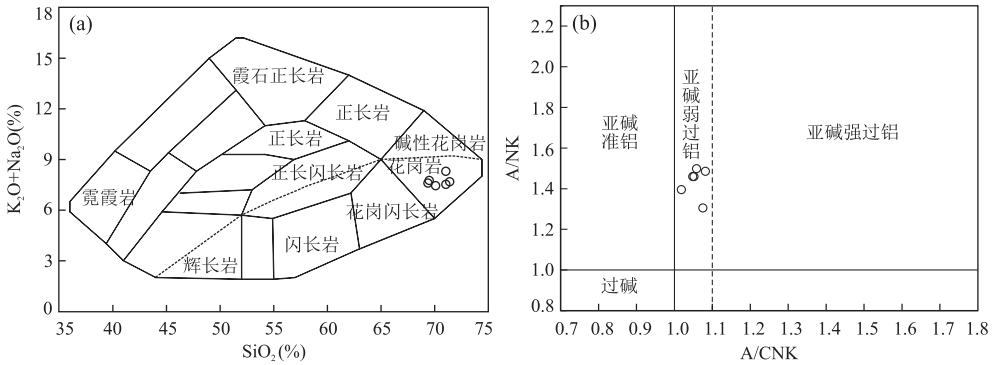


图 6 朝阳地侵入岩 SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解(a)和 A/CNK-A/NK 图解(b)

Fig.6 SiO₂-(K₂O+Na₂O) (a) and A/CNK-A/NK (b) diagram of Chaoyangdi intrusive rocks

图 a 据 Wilson(1989); 图 b 据 Maniar and Piccoli(1989)

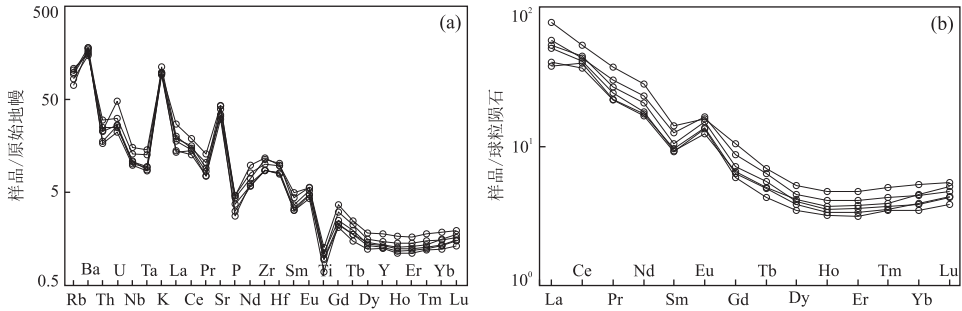


图 7 朝阳地侵入岩原始地幔标准化微量元素蛛网图和稀土配分模式

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Chaoyangdi intrusive rocks

原始地幔标准化数据根据 Sun and McDonough(1989)

以用来分析岩石成因. 主要元素显示, 样品均具有高 SiO₂ (69.51%~71.50%)、Al₂O₃ (15.45%~16.31%)、Na₂O (4.51%~5.40%) 含量, 中等 CaO (1.42%~2.50%)、K₂O (2.72%~3.30%) 含量, 较低 FeO_t (1.9%~2.1%)、MgO (0.27%~0.56%)、TiO₂、P₂O₅ 含量, Na₂O/K₂O 比值均大于 1 (1.37~1.86, 平均值为 1.67); 在图 5a 上大多落在钙碱性系列区域, 碱度率指

数较低 (2.35~2.88); 在图 5b 上均落在钙碱性区域, 属于钙碱性系列; 在图 6a 上落在花岗岩区域, 与薄片鉴定一致. A/CNK 范围为 1.02~1.08, 在图 6b 上, 样品落在弱过铝质系列区域. 样品均具有低 Mg[#] 值 (31.7~38.2, 平均值为 35.2).

如图 7a 所示, 这套侵入岩具有 Cs、Rb、Ba、K 等大离子亲石元素富集特征, Th、U 含量弱富集, Nb、Ta

表 3 朝阳地侵入岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of Chaoyangdi intrusive rocks

样品	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$
15YS12	0.203 905	0.707 643	6	0.706 519	0.117 081	0.511 483	7	0.511 186	-18.6	2 642
15YS13	0.253 640	0.707 674	5	0.706 276	0.111 840	0.511 481	7	0.511 197	-18.4	2 626
15YS14	0.211 674	0.707 545	7	0.706 378	0.107 175	0.511 482	6	0.511 210	-18.2	2 606
15YS15	0.270 703	0.708 021	6	0.706 529	0.106 541	0.511 494	4	0.511 224	-17.9	2 584
15YS17	0.200 447	0.707 638	7	0.706 534	0.114 092	0.511 481	3	0.511 192	-18.5	2 633
15YS18	0.171 117	0.707 553	7	0.706 610	0.105 075	0.511 470	4	0.511 204	-18.3	2 616

表 4 朝阳地侵入岩锆石 Hf 同位素组成

Table 4 Zircon Hf isotopic compositions of Chaoyangdi intrusive rocks

No.	$t(\text{Ma})$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
2	400	0.030 536	0.001 203	0.281 788	0.000 017	-26.7	0.6	3 039	-0.96
3	394	0.031 291	0.001 223	0.281 753	0.000 017	-28.1	0.6	3 120	-0.96
4	384	0.029 097	0.001 067	0.281 819	0.000 019	-25.9	0.7	2 978	-0.97
7	390	0.066 219	0.002 441	0.281 860	0.000 021	-24.7	0.7	2 905	-0.93
8	393	0.029 832	0.001 065	0.281 807	0.000 022	-26.1	0.8	2 999	-0.97
9	386	0.023 872	0.000 808	0.281 466	0.000 029	-38.3	1.0	3 745	-0.98
13	385	0.023 579	0.000 941	0.281 799	0.000 018	-26.6	0.6	3 020	-0.97
14	379	0.031 442	0.001 161	0.281 891	0.000 016	-23.5	0.6	2 825	-0.97
15	385	0.025 350	0.001 005	0.281 777	0.000 022	-27.4	0.8	3 069	-0.97
16	384	0.038 599	0.001 452	0.281 827	0.000 024	-25.7	0.8	2 966	-0.96
18	383	0.034 149	0.001 240	0.281 824	0.000 023	-25.8	0.8	2 969	-0.96
19	390	0.042 098	0.001 537	0.281 872	0.000 024	-24.0	0.8	2 865	-0.95

注: Hf 同位素计算所用的参数有: $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\ 2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\ 772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\ 4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.283\ 25$, 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$, $f_{\text{DM}} = 0.16$, $f_{\text{CC}} = -0.55$.

含量明显亏损, 相容元素 Cr、Co、Ni 含量很低, 与陆壳岩石特征类似(Gao *et al.*, 1998), P 和 Ti 也具有明显低谷, 指示磷灰石、磁铁矿等矿物分离结晶, 总体具有高 Sr($638 \times 10^{-6} \sim 886 \times 10^{-6}$, 均大于 400×10^{-6})、低 Y($5.59 \times 10^{-6} \sim 8.04 \times 10^{-6}$, 小于 18×10^{-6}) 和 Yb($0.59 \times 10^{-6} \sim 0.90 \times 10^{-6}$, 小于 1.9×10^{-6}) 含量, 具有较高 Sr/Y 比值(103~146, 远大于 20~40); 不同样品间稀土含量变化较小, 稀土元素总量较低, ΣREE 范围为 $47.52 \times 10^{-6} \sim 76.63 \times 10^{-6}$, 平均值为 58.09×10^{-6} , 在图 7b 中, 所有样品具有一致的配分模式, 显示轻稀土富集, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 大于 1, 范围为 9.93~14.59, 轻稀土分馏较明显, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 范围为 3.95~5.58, 重稀土分馏较弱, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 范围为 1.45~1.98, 具有弱 Eu 正异常(δEu 值 1.2~1.8).

3.3 全岩 Sr-Nd 及锆石 Hf 同位素组成

全岩 Sr-Nd 同位素分析结果见表 3, 初始同位素比值根据加权锆石年龄 387 Ma 计算, 朝阳地侵入岩具有相对均一的 Sr-Nd 同位素组成, 其中 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 范围为 0.706 276~0.706 610, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 范围为 0.511 186~0.511 224, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为负值(-18.6~-17.9), 二阶段 Nd 模式年龄 T_{DM}^{C} 较集中, 为新太古

代晚期(2 584~2 642 Ma).

锆石原位 Hf 同位素测定, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及二阶段模式年龄采用每颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄计算, 分析结果列于表 4. 共分析了 12 个测点, 所有测点 Hf 同位素组成比较一致, 并且除个别点外, 绝大多数 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 说明锆石在形成后具有很少放射性成因 Hf 积累(徐义刚等, 2007), 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 可以用来分析源区特征, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 范围为 0.281 466~0.281 891, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值(-38.3~-23.59), 二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM}^{C} 范围为 2 825~3 745 Ma, 集中于 2 800~3 000 Ma.

4 讨论

4.1 时代

前人在二长花岗岩中获得单颗粒锆石年龄为 369.7 ± 1.3 Ma(核工业二四三大队, 2015, 1: 5 万朝阳地(K50E012017)区调查报告), 获得的 SHRIMP 锆石年龄为 382.7 ± 8.7 Ma(中国地质科学院地质研究所, 2009, 1: 25 万西老府幅区域地质调查报告). 本次工作通过锆石 LA-ICPMS 测年在朝阳地二长花岗岩获

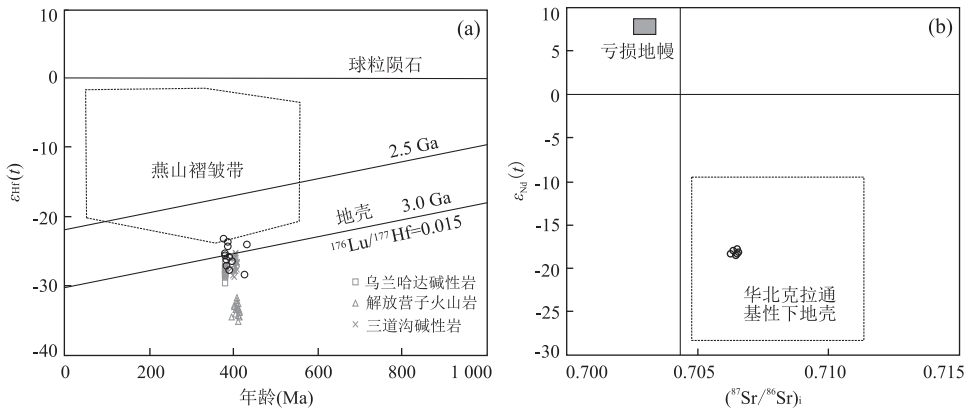


图 8 朝阳地侵入岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解(a)和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr})_i$ 图解(b)

Fig.8 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ (a) and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr})_i$ (b) diagrams of Chaoyangdi intrusive rocks

图 a 据 Yang *et al.* (2006); 图 b 中华北克拉通基性下地壳同位素组成据 Jiang *et al.* (2013)

得锆石 U-Pb 年龄为 386.8 ± 2.9 Ma, 与前人获得的年龄在误差范围内一致, 表明该岩体形成于中泥盆世晚期, 相当于吉维特期, 这与区域上华北北缘分布的泥盆纪岩浆事件属于同期岩浆作用。

4.2 岩浆源区

朝阳地侵入岩属于二长花岗岩, 具有高 SiO_2 、 K_2O 含量, 低 $\text{Mg}^\#$ 、 MgO 及 Cr、Co、Ni 等相容元素含量, 并且相容元素与 SiO_2 不相关, 指示岩浆来源于地壳物质。另外朝阳地侵入岩普遍具有 Th、U 亏损, 这与华北克拉通下地壳麻粒岩和太古宙基性火山岩相似, 反映华北克拉通下地壳的原始特征(刘勇胜等, 1999)。

锆石 Hf 同位素分析表明样品具有富集 Hf 同位素组成, 并且具有较大二阶段模式年龄。在图 8a 上, 样品落在燕山褶皱带附近区域, 落在 2.5~3.0 Ga 地壳演化线附近, 表明其源于古老地壳物质。Sr-Nd 同位素分析也表明样品具有富集的同位素组成, 在图 8b 中, 朝阳地高 Sr/Y 侵入岩落在华北东部基性下地壳区域, 并具有古老 Nd 模式年龄(2 600 Ma 左右), 这与区域上报道的华北地区基底岩石年龄(Kusky and Li, 2003; Kusky *et al.*, 2007; 翟明国和彭澎, 2007; Zhai *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017; Kusky *et al.*, 2018; 刘树文等, 2018) 及华北克拉通新太古代岩浆作用时代一致(耿元生等, 2002, 2010), 表明朝阳地侵入岩源岩与华北新太古代岩浆作用共同代表了重要地壳增生事件(Wan *et al.*, 2015; 耿元生等, 2018)。至于朝阳地侵入岩的源岩具体是来自中酸性还是基性下地壳物质还需进一步分析, 因为 Bohlen and Mezger(1989)认为下地壳不仅是由基性岩(玄武岩/辉长岩)组成, 也包括大量奥长花岗岩在内的平均

成分为英云闪长质麻粒岩相的岩石。

高场强元素 Nb、Ta 在岩浆作用过程中具有相似的地球化学行为, 在部分熔融或分离结晶过程中 Nb/Ta 比值保持恒定(赵振华等, 2008), 能反映岩浆源区特征。朝阳地侵入岩 Nb/Ta 比值相对比较集中, 反映一致的源区特征, 范围为 17.92~21.64 (平均值为 19.46), 低于华北克拉通中、酸性麻粒岩的 Nb/Ta 比值(分别为 32.66 和 35.89), 而与基性麻粒岩(平均为 17.42)和太古宙基性火山岩(22.6~26.6)相近, 表明源区为基性下地壳物质。另外, 在图 9 上也可以看出, 朝阳地二长花岗岩与角闪岩相基性下地壳的熔融曲线一致, 也反映出源区为基性下地壳。虽然样品均具有较高 SiO_2 含量, 但 SiO_2 与 $(^{87}\text{Sr}/^{87}\text{Sr})_i$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 并无明显相关关系, 反映并无明显的古老酸性下地壳物质的混染。

因此, 基于岩石学、元素地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素组成综合分析, 朝阳地泥盆纪侵入岩源于新太古代基性下地壳物质。

4.3 岩石成因

朝阳地中泥盆世侵入岩具有高 Sr/Y (>40) 及 La/Yb (>7.6~15) 比值及轻重稀土分异的特征, 这明显区别于区域上同时代侵入岩(碱性岩、A 型花岗岩等), 类似于埃达克岩特征。并且在图 9 上样品点均落在埃达克岩区域, 但 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 2$, 且具有富集同位素组成, 表明侵入岩来自于古老再循环物质的部分熔融, 类似于 C 型埃达克岩, 但与加厚地壳熔融形成的埃达克岩相比, HREE 分馏不明显 ($(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 较小, 1.45~1.98), 表明在部分熔融形成岩浆过程中石榴石不作为残留相存在, 这与俯冲板片熔融的 O 型及加厚地壳熔融的 C 型埃达克岩都不同, 不是典型埃达克

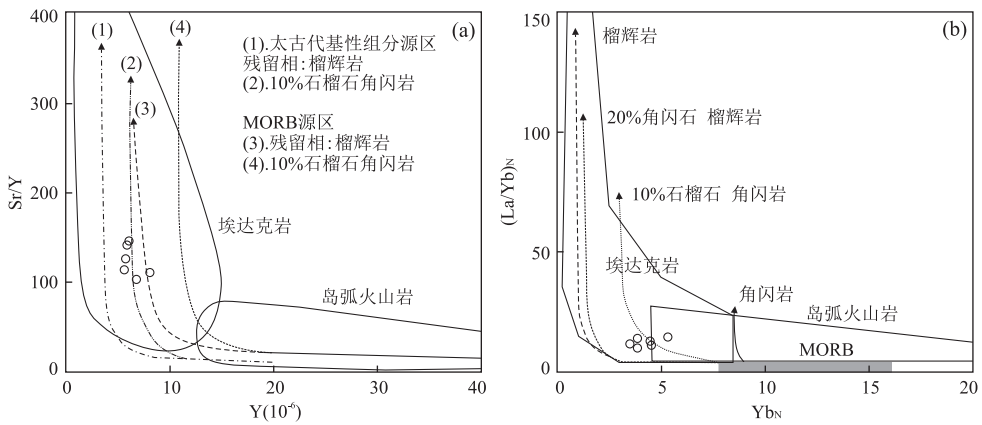


图 9 朝阳地侵入岩埃达克岩判别图解

Fig.9 Adakite discrimination diagrams of Chaoyangdi intrusive rocks

图 a 据 Defant and Drummond(1990);图 b 据 Martin *et al.*(2005)

岩,只是高 Sr/Y 比值岩浆岩。

对于高 Sr/Y 岩浆岩/埃达克岩,主要有以下几种成因模式:(1)俯冲板片熔融(Defant and Drummond, 1990; Martin *et al.*, 2005);(2)拆沉下地壳部分熔融(Xu *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004);(3)玄武质岩浆在高压环境下结晶分异(Castillo *et al.*, 1999);(4)被板片熔体交代的地幔楔橄榄岩部分熔融(Jiang *et al.*, 2006; Martin *et al.*, 2005);(5)岩浆混合(Guo *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2013);(6)加厚中基性下地壳部分熔融(Atherton and Petford, 1993; 张旗等, 2001; Chung *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2005; 熊小林等, 2011);(7)高 Sr/Y 比值特征继承自源区(Moyen, 2009; Ma *et al.*, 2012)。

朝阳地侵入岩具有相对高 K_2O 含量和 K/Na 比值,并且具有富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成,表明并非来自俯冲板片熔融;这套侵入岩具有低 MgO (<1.47%)、Cr、Co、Ni 含量和 $Mg^\#$ (31.7~40.3),远低于拆沉进入地幔的下地壳熔融物质,并与地幔交代形成了具有高 MgO 含量(>3%)和 $Mg^\#$ (>60)的埃达克岩(Xu *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004),因此本文不属于这种模式;基性岩浆高压分异形成埃达克岩,需要高度的分离结晶作用,会在区域上形成具有成因联系的基性—中性—酸性岩石系列(Castillo *et al.*, 1999),虽然在南侧承德地区出露少量泥盆纪基性—超基性杂岩(Zhang *et al.*, 2009),但缺少中性岩组分,并且在朝阳地地区未见伴生的同期中基性岩;另外,在 La/Sm-La 图解上(图略),样品形成部分熔融而非分离结晶的趋势线,因此朝阳地中泥盆世高 Sr/Y 二长花岗岩并非来自基性岩浆结晶分异;板片熔体交代的地幔楔部分熔融形成的岩浆,同样具有高 MgO、高

相容元素含量及高 $Mg^\#$,与朝阳地侵入岩的地球化学特征不符;对于岩浆混合作用,在野外观察并未见岩浆混合形成的暗色包体,镜下未见矿物环带等不平衡结构,且地球化学分析表明朝阳地侵入岩组成较均一未显示混合的特征,因此并非来自岩浆混合作用。

虽然朝阳地侵入岩具有高 Sr/Y 及 La/Yb 比值,低 MgO、Cr、Co、Ni 含量及低 $Mg^\#$,与加厚下地壳部分熔融形成的埃达克岩和实验岩石中由变玄武岩和榴辉岩/石榴角闪岩形成的熔体成分类似(张旗等, 2001;熊小林等, 2011),暗示源区可能有石榴石稳定存在,但根据 Moyen(2009)研究,高 Sr/Y 比值特别是在 C 型埃达克岩中可能并不能反映熔融深度,而异常高 $(Gd/Yb)_N$ 值是指示石榴石在岩浆作用过程中参与的重要指标(黄方和何永胜, 2010),目前研究表明平均大陆下地壳 $(Gd/Yb)_N$ 为 1.71)部分熔融时,源区残留石榴石形成的熔体 $(Gd/Yb)_N$ 值可达 5.8(黄方和何永胜, 2010),朝阳地侵入岩虽然轻重稀土分馏明显,但是 HREE 分馏不明显,表现在 $(Gd/Yb)_N$ 较小(1.45~1.97),远小于 5.8,也低于西藏地区加厚下地壳熔融形成的埃达克岩(3.5~6.2; Chung *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2005),表明源区并未有石榴石稳定残留,而是主要为角闪岩相,残留矿物主要为角闪石和辉石。另外, Dy/Yb 与 SiO_2 具有弱的负相关性,也表明源区并未有石榴石残留。因此,朝阳地高 Sr/Y 值的特征并非来自加厚地壳部分熔融。

Moyen(2009)认为大陆埃达克岩高 Sr/Y 比值的特征可能继承自源区,而不单受控于熔融压力/深度, Ma *et al.*(2012)研究发现,华北北部燕山地区中生代酸性火山岩(被广泛认为形成于加厚下地壳熔融形成的 C 型埃达克岩;张旗等, 2001)高 Sr/Y 特征继

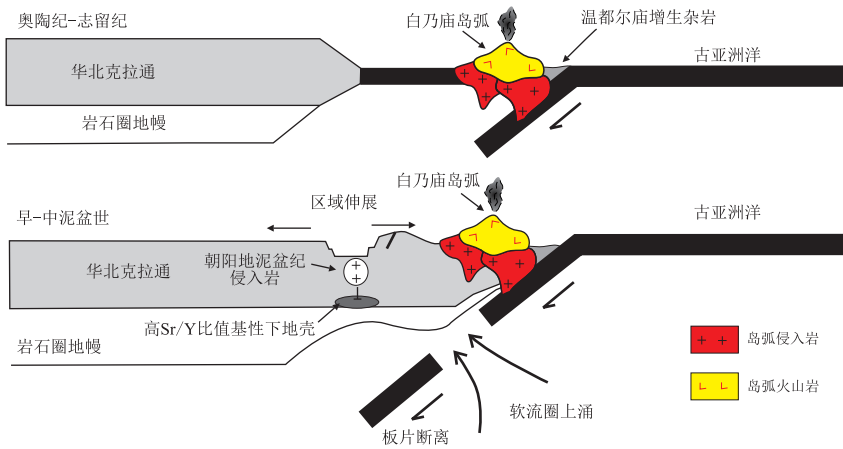


图 10 华北北缘晚古生代末期构造演化模式

Fig.10 The tectonic evolution model of northern of North China in Late Paleozoic

承自源区。

朝阳地中泥盆世侵入岩具有高硅、低镁铁、富钾及高 Sr/Y 等特征,并且具有富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, SiO_2 与初始 Sr 同位素比值、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 不具有相关关系表明未经历明显 AFC 过程,因此笔者认为其来源于华北地区基性下地壳的部分熔融,源区未有石榴石残留,暗示地壳未经过明显的加厚,高 Sr/Y 比值继承自下地壳源区。从区域上来看,泥盆纪壳源岩石多为碱性岩(商都三道沟、张家口水泉沟),来自壳幔混合源区(包志伟等,1996; Zhang *et al.*, 2010),与朝阳地侵入岩具有明显的区别,反映了不同的岩浆源区特征,这与高 Sr/Y 比值源区特征是一致的。结合区域上沿华北陆块北缘东西向分布的同期碱性岩、基性-超基性岩及 A 型花岗岩等多形成于碰撞后伸展背景,笔者推测朝阳地中泥盆世高 Sr/Y 侵入岩是在北部白乃庙岩浆弧与华北陆块碰撞后,在区域伸展背景下,由于上涌的软流圈的加热作用,具有高 Sr/Y 比值的基性下地壳发生部分熔融而形成的。与早期碱性岩浆作用相比,其虽来自不同源区,但同属于伸展体制下的岩浆作用。

4.4 地质意义

近年来对北部温都尔庙蛇绿岩及巴特敖包-白乃庙岛弧的研究表明,弧岩浆作用集中于奥陶纪-志留纪(475~420),包括正常岛弧岩浆岩和 O 型埃达克岩等,代表大洋俯冲(刘敦一等,2003; Jian *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013, 2014),之后发生弧陆碰撞(李锦轶等,2009)。主要地质记录包括:巴特敖包地区侵入到前寒武纪基底的早泥盆世(417±2 Ma)英云闪长岩(张维和简平,2008; Jian *et al.*, 2008);刘建峰等(2013)在赤峰北部解放营子地区识

别出一套早泥盆世(403.7±1.3 Ma)过铝质火山岩等代表弧陆碰撞岩浆作用的岩体和白云鄂博以北包尔汗图地区顶志留世一早泥盆世西别河组与下伏奥陶纪包尔汗图群岛弧火山岩之间的角度不整合(张允平等,2010);另外白乃庙地区早古生代白乃庙群普遍经历了一期低绿片岩相-绿片岩相变质作用,而区域上不整合在白乃庙群之上的西别河组未变质(胡晓等,1990; 聂凤军等,1994; 柳长峰等,2014; Zhang *et al.*, 2014),也限定弧陆碰撞的时限在晚志留世。碰撞后发生区域伸展作用,岩浆伸展作用包括:前人在白乃庙地区识别出侵入到白乃庙弧岩浆岩之中未变形的早泥盆世(411±8 Ma)伟晶岩(Zhang *et al.*, 2013)和碰撞后的流纹岩(钱筱嫣等,2017),以及张家口(包志伟等,1996; Jiang, 2005; 罗镇宽等,2001; 李长民等,2014)、承德(Zhang *et al.*, 2007, 2009)、商都(Zhang *et al.*, 2010; Huang and Hou, 2017)、赤峰(Shi *et al.*, 2010)等地区发育的碱性岩、基性-超基性岩、A 型花岗岩以及一套双峰式火山岩(孙立新等,2015)。

本次研究的围场朝阳地中泥盆世高 Sr/Y 侵入岩,由古老的具有高 Sr/Y 特征的基性下地壳,在包尔汗图-白乃庙岛弧与华北陆块碰撞后的区域伸展背景下,在减压和软流圈上涌加热的共同作用下诱发部分熔融而形成(图 10);与华北北部伸展背景下形成的岩浆作用属于同期,代表区域伸展作用,反映了兴蒙造山带泥盆纪的弧陆拼贴及其后的伸展作用,暗示造山过程主要是水平的弧陆拼贴等增生造山作用,对造山带的构造演化进行了约束。

5 结论

(1) 锆石 U-Pb LA-MC-ICPMS 测年结果表明, 河北围场东北部朝阳地二长花岗岩形成于中泥盆世 (386.8 ± 2.9 Ma)。

(2) 岩石学、地球化学分析表明, 朝阳地侵入岩属于 I 型花岗岩, 具有富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成及古老的模式年龄, 起源于新太古代高 Sr/Y 比值基性下地壳物质的部分熔融。

(3) 结合区域资料, 朝阳地中泥盆世二长花岗岩是在白乃庙岛弧与华北陆块碰撞后的伸展背景下, 在减压和上涌软流圈加热作用下发生部分熔融形成的, 代表北部白乃庙岛弧与华北陆块碰撞后伸展的构造背景, 反映早古生代晚期的弧陆拼贴过程。

致谢: 赵凤清研究员、李承东教授级高工审阅了全稿并提出了许多建设性修改意见; 辛后田教授级高工在成文过程中给予许多指导; 编委及 3 位审稿人审阅了全文, 提出了宝贵的修改意见, 在此一并致以诚挚的感谢!

References

Atherton, M.P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362 (6416): 144 – 146. <https://doi.org/10.1038/362144a0>

Bao, Z.W., Zhao, Z.H., Zhou, L.D., et al., 1996. An Investigation into the Petrogenesis of the Shuiquangou Syenite Complex, Northwest of Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 12 (4): 562 – 572 (in Chinese with English abstract).

Bohlen, S.R., Mezger, K., 1989. Origin of Granulite Terranes and the Formation of the Lowermost Continental Crust. *Science*, 244 (4902): 326 – 329. <https://doi.org/10.1126/science.244.4902.326>

Castillo, P. R., Janney, P. E., Solidum, R. U., 1999. Petrology and Geochemistry of Camiguin Island, Southern Philippines: Insights to the Source of Adakites and Other Lavas in a Complex Arc Setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134 (1): 33 – 51. <https://doi.org/10.1007/s0041100050467>

Chen, B., Jahn, B.M., Suzuki, K., 2013. Petrological and Nd-Sr-Os Isotopic Constraints on the Origin of High-Mg Adakitic Rocks from the North China Craton: Tectonic Implications. *Geology*, 41 (1): 91 – 94. <https://doi.org/10.1130/g33472.1>

Chung, S.L., Liu, D.Y., Ji, J.Q., et al., 2003. Adakites from Continental Collision Zones: Melting of Thickened Low-

er Crust beneath Southern Tibet. *Geology*, 31 (11): 1021. <https://doi.org/10.1130/g19796.1>

Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347 (6294): 662 – 665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>

Gao, S., Luo, T.C., Zhang, B.R., et al., 1998. Chemical Composition of the Continental Crust as Revealed by Studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (11): 1959 – 1975. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(98\)00121-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00121-5)

Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432 (7019): 892 – 897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>

Geng, J.Z., Li, H.K., Zhang, J., et al., 2011. Zircon Hf Isotope Analysis by Means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30 (10): 1508 – 1513 (in Chinese with English abstract).

Geng, Y.S., Shen, Q.H., Ren, L.D., 2010. Late Neoproterozoic to Early Paleoproterozoic Magmatic Events and Tectonothermal Systems in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (7): 1945 – 1966 (in Chinese with English abstract).

Geng, Y.S., Wan, Y.S., Shen, Q.H., 2002. Early Precambrian Basic Volcanism and Crustal Growth in the North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 76 (2): 199 – 208 (in Chinese with English abstract).

Geng, Y.S., Yang, C.H., Du, L.L., et al., 2018. Late Neoproterozoic Magmatism and Crustal Growth in Eastern Hebei: Constraint from Geochemistry, Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 34 (4): 1058 – 1082 (in Chinese with English abstract).

Guo, F., Nakamura, E., Fan, W., et al., 2007. Generation of Palaeocene Adakitic Andesites by Magma Mixing; Yanji Area, NE China. *Journal of Petrology*, 48 (4): 661 – 692. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl077>

Hu, X., Xu, C.S., Niu, S.Y., 1990. Early Paleozoic Continental Margin Evolution of North China Platform. Beijing University Publish House, Beijing (in Chinese).

Huang, D. L., Hou, Q. Y., 2017. Devonian Alkaline Magmatism in the Northern North China Craton: Geochemistry, SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Geoscience Frontiers*, 8 (1): 171 – 181. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.02.006>

Huang, F., He, Y.S., 2010. Partial Melting of the Dry Mafic Continental Crust: Implications for Petrogenesis of C-Type Adakites. *Chinese Science Bulletin*, 55 (13):

- 1255—1267 (in Chinese).
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2008. Time Scale of an Early to Mid-Paleozoic Orogenic Cycle of the Long-Lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China; Implications for Continental Growth. *Lithos*, 101 (3—4): 233—259. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.005>
- Jiang, N., 2005. Petrology and Geochemistry of the Shuiquangou Syenitic Complex, Northern Margin of the North China Craton. *Journal of the Geological Society*, 162 (1): 203—215. <https://doi.org/10.1144/0016-764903-144>
- Jiang, N., Guo, J. H., Chang, G. H., 2013. Nature and Evolution of the Lower Crust in the Eastern North China Craton; A Review. *Earth-Science Reviews*, 122: 1—9. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.006>
- Jiang, Y. H., Jiang, S. Y., Ling, H. F., et al., 2006. Low-Degree Melting of a Metasomatized Lithospheric Mantle for the Origin of Cenozoic Yulong Monzogranite-Porphry, East Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 241 (3—4): 617—633. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.023>
- Kusky, T. M., Li, J. H., 2003. Paleoproterozoic Tectonic Evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22 (4): 383—397. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(03\)00071-3](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(03)00071-3)
- Kusky, T. M., Li, J. H., Santosh, M., 2007. The Paleoproterozoic North Hebei Orogen: North China Craton's Collisional Suture with the Columbia Supercontinent. *Gondwana Research*, 12 (1—2): 4—28. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.11.012>
- Kusky, T. M., Windley, B. F., Polat, A., 2018. Geological Evidence for the Operation of Plate Tectonics throughout the Archean: Records from Archean Paleo-Plate Boundaries. *Journal of Earth Science*, 29 (6): 1291—1303. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0999-6>
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., et al., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Blackwell, Oxford.
- Li, C. M., Deng, J. F., Su, S. G., et al., 2014. Zircon U-Pb Chronology and Hf Isotope in the Western Part of the Shuiquangou Alkaline Complex, Northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (11): 3301—3314 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. K., Zhu, S. X., Xiang, Z. Q., et al., 2010. Zircon U-Pb Dating on Tuff Bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing; Further Constraints on the New Sub-division of the Mesoproterozoic Stratigraphy in the Northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (7): 2131—2140 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Zhang, J., Yang, T. N., et al., 2009. Crustal Tectonic Division and Evolution of the Southern Part of the North Asian Orogenic Region and Its Adjacent Areas. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39 (4): 584—605 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. F., Liu, W. C., Wang, H. P., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of the Bainaimiao Metavolcanic Rocks in the Northern Margin of North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 88 (7): 1273—1287 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. Y., Jian, P., Zhang, Q., et al., 2003. SHRIMP Dating of Adakites in the Tulingkai Ophiolite, Inner Mongolia; Evidence for the Early Paleozoic Subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77 (3): 317—327 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. F., Li, J. Y., Chi, X. G., et al., 2013. Early Devonian Felsic Volcanic Rocks Related to the Arc-Continent Collision on the Northern Margin of North China Craton—Evidences of Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics. *Geological Bulletin of China*, 32 (Z1): 267—278 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. W., Wang, W., Bai, X., et al., 2018. Lithological Assemblages of Archean Meta-Igneous Rocks in Eastern Hebei-Western Liaoning Provinces of North China Craton, and Their Geodynamic Implications. *Earth Science*, 43 (1): 44—56 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.003>
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51 (1—2): 537—571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Y. S., Gao, S., Luo, T. C., 1999. Geochemistry of Granulites in North China Craton; Implications for the Composition of Archean Lower Crust. *Geology-Geochemistry*, 27 (3): 40—46 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. Users Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Luo, Z. K., Miao, L. C., Guan, K., et al., 2001. SHRIMP Chronological Study of Shuiquangou Intrusive Body in Zhangjiakou Area, Hebei Province and Its Geochemical Significance. *Geochimica*, 30 (2): 116—122 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q., Zheng, J. P., Griffin, W. L., et al., 2012. Triassic “Adakitic” Rocks in an Extensional Setting (North China):

- Melts from the Cratonic Lower Crust. *Lithos*, 149: 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.017>
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2)
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., et al., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationships and Some Implications for Crustal Evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.048>
- Moyen, J. F., 2009. High Sr/Y and La/Yb Ratios: The Meaning of the “Adakitic Signature”. *Lithos*, 112(3–4): 556–574. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.001>
- Nie, F. J., Pei, R. F., Wu, L. S., et al., 1994. Sm-Nd Isotope Study of Ordos Sum Group Metavolcanic-Sedimentary Rocks, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 39(13): 1211–1214 (in Chinese).
- Qian, X. Y., Zhang, Z. C., Chen, Y., et al., 2017. Geochronology and Geochemistry of Early Paleozoic Igneous Rocks in Zhurhe Area, Inner Mongolia and Their Tectonic Significance. *Earth Science*, 42(9): 1472–1494 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.545>
- Shi, Y. R., Liu, D. Y., Miao, L. C., et al., 2010. Devonian A-Type Granitic Magmatism on the Northern Margin of the North China Craton: SHRIMP U-Pb Zircon Dating and Hf-Isotopes of the Hongshan Granite at Chifeng, Inner Mongolia, China. *Gondwana Research*, 17(4): 632–641. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.11.011>
- Sun, L. X., Ren, B. F., Teng, F., et al., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of the Volcanic Rocks from the Chaotougou Formation in Aohan Banner, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 34(8): 1493–1501 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tang, K. D., Yan, Z. Y., 1993. Regional Metamorphism and Tectonic Evolution of the Inner Mongolian Suture Zone. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4): 511–522. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1993.tb00168.x>
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Dong, C. Y., et al., 2015. Formation and Evolution of Archean Continental Crust of the North China Craton. In: Zhai, M. G., ed., *Precambrian Geology of China*. Springer, Berlin.
- Wang, H. C., Xiang, Z. Q., Zhao, F. Q., et al., 2012. The Alkaline Plutons in Eastern Part of Guyang County, Inner Mongolia: Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2843–2854 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. P., Kusky, T., Wang, L., et al., 2017. Petrogenesis and Geochemistry of Circa 2.5 Ga Granitoids in the Zhanhuang Massif: Implications for Magmatic Source and Neoproterozoic Metamorphism of the North China Craton. *Lithos*, 268–271: 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.028>
- Wang, Q., McDermott, F., Xu, J. F., et al., 2005. Cenozoic K-Rich Adakitic Volcanic Rocks in the Hohxil Area, Northern Tibet: Lower-Crustal Melting in an Intracontinental Setting. *Geology*, 33(6): 465. <https://doi.org/10.1130/g21522.1>
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Springer, Netherlands, 466.
- Wright, J. B., 1969. A Simple Alkalinity Ratio and Its Application to Questions of Non-Orogenic Granite Genesis. *Geological Magazine*, 106(4): 370. <https://doi.org/10.1017/s0016756800058222>
- Wu, F. Y., Xu, Y. G., Gao, S., et al., 2008. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145–1174 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X. L., Liu, X. C., Zhu, Z. M., et al., 2011. Adakitic Rocks and Destruction of the North China Craton: Evidence from Experimental Petrology and Geochemistry. *Science in China (Series D)*, 41(5): 654–667 (in Chinese).
- Xu, B. W., Xi, A. H., Ge, Y. H., et al., 2015. Zircon U-Pb Ages of the Late Paleozoic A-Type Granites in Chifeng, Inner Mongolia and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 58–69 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust? *Geology*, 30(12): 1111. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<1111:oomair>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<1111:oomair>2.0.co;2)
- Xu, L. Q., Deng, J. F., Chen, Z. Y., et al., 2003. The Identification of Ordovician Adakites and Its Significance in Northern Damao, Inner Mongolia. *Geoscience*, 17(4): 428–434 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., Li, H. Y., Pang, C. J., et al., 2009. On the Timing and Duration of the Destruction of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 1974–1989 (in Chinese).
- Xu, Y. G., Wu, X. Y., Luo, Z. Y., et al., 2007. Zircon Hf Isotope Compositions of Middle Jurassic-Early Cretaceous Intrusions in Shandong Province and Its Implications. *Ac-*

- Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 307—316 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Shao, J.A., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3—4): 336—352. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.04.029>
- Zhai, M.G., Peng, P., 2007. Paleoproterozoic Events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665—2682 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M.G., Santosh, M., Zhang, L.C., 2011. Precambrian Geology and Tectonic Evolution of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 1—5. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.04.004>
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al., 2001. The Characteristics and Tectonic-Metallogenic Significances of the Adakites in Yanshan Period from Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Liu, X.C., et al., 2009. Late Paleozoic to Early Mesozoic Mafic-Ultramafic Complexes from the Northern North China Block: Constraints on the Composition and Evolution of the Lithospheric Mantle. *Lithos*, 110(1—4): 229—246. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.01.008>
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2007. Petrogenesis of the Middle Devonian Gushan Diorite Pluton on the Northern Margin of the North China Block and Its Tectonic Implications. *Geological Magazine*, 144(3): 553. <https://doi.org/10.1017/s0016756807003275>
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Ye, H., et al., 2014. Origin and Evolution of the Bainaimiao Arc Belt: Implications for Crustal Growth in the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Geological Society of America Bulletin*, 126(9—10): 1275—1300. <https://doi.org/10.1130/b31042.1>
- Zhang, W., Jian, P., 2008. SHRIMP Dating of Early Paleozoic Granites from North Damaoqi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 778—787 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Jian, P., Kröner, A., et al., 2013. Magmatic and Metamorphic Development of an Early to Mid-Paleozoic Continental Margin Arc in the Southernmost Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 63—74. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.05.025>
- Zhang, X.H., Zhang, H.F., Jiang, N., et al., 2010. Early Devonian Alkaline Intrusive Complex from the Northern North China Craton: A Petrological Monitor of Post-Collisional Tectonics. *Journal of the Geological Society*, 167(4): 717—730. <https://doi.org/10.1144/0016-76492009-110>
- Zhang, Y.P., Su, Y.Z., Li, J.C., 2010. Regional Tectonics Significance of the Late Silurian Xibiehe Formation in Central Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China*, 29(11): 1599—1605 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.P., Tang, K.D., 1989. Pre-Jurassic Tectonic Evolution of Intercontinental Region and the Suture Zone between the North China and Siberian Platforms. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 3(1—4): 47—55. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(89\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0743-9547(89)90008-1)
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Cawood, P.A., et al., 2001. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and P-T Path Constraints and Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 107(1—2): 45—73. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00154-6)
- Zhao, Z.H., Xiong, X.L., Wang, Q., et al., 2008. Some Aspects on Geochemistry of Nb and Ta. *Geochimica*, 37(4): 304—320 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.X., Xu, Y.G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. *Science in China (Series D)*, 42(8): 1135—1159 (in Chinese).

附中文参考文献

- 包志伟, 赵振华, 周玲棣, 等, 1996. 冀西北水泉沟正长岩杂岩体的成因. *岩石学报*, 12(4): 562—572.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等, 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. *地质通报*, 30(10): 1508—1513.
- 耿元生, 沈其韩, 任留东, 2010. 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. *岩石学报*, 26(7): 1945—1966.
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩, 2002. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生. *地质学报*, 76(2): 199—208.
- 耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 等, 2018. 冀东地区新太古代晚期的岩浆事件与地壳增生: 来自岩石地球化学和锆石年龄及 Hf 同位素的制约. *岩石学报*, 34(4): 1058—1082.
- 胡晓, 许传诗, 牛树银, 1990. 华北地台北缘早古生代大陆边缘演化. 北京: 北京大学出版社.
- 黄方, 何永胜, 2010. 干的基性大陆下地壳部分熔融: 对 C 型埃达克岩成因的制约. *科学通报*, 55(13): 1255—1267.
- 李长民, 邓晋福, 苏尚国, 等, 2014. 冀北水泉沟岩体西段锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究. *岩石学报*, 30(11): 3301—3314.
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 等, 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. *岩石学报*, 26(7): 2131—2140.

- 李锦轶,张进,杨天南,等,2009.北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化.吉林大学学报(地球科学版),39(4): 584-605.
- 柳长峰,刘文灿,王慧平,等,2014.华北克拉通北缘白乃庙组变质火山岩锆石定年与岩石地球化学特征.地质学报,88(7): 1273-1287.
- 刘敦一,简平,张旗,等,2003.内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年:早古生代洋壳消滅的证据.地质学报,77(3): 317-327.
- 刘建峰,李锦轶,迟效国,等,2013.华北克拉通北缘与弧-陆碰撞相关的早泥盆世长英质火山岩——锆石 U-Pb 定年及地球化学证据.地质通报 32(Z1):267-278.
- 刘树文,王伟,白翔,等,2018.冀东-辽西太古宙火成岩岩石组合和动力学意义.地球科学,43(1): 44-56.
- 刘勇胜,高山,骆庭川,1999.华北克拉通麻粒岩的地球化学特征及其对太古宙下地壳组成的指示意义.地质地球化学,27(3): 40-46.
- 罗镇宽,苗来成,关康,等,2001.河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义.地球化学,30(2): 116-122.
- 聂凤军,裴荣富,吴良士,等,1994.内蒙古温都尔庙群变质火山-沉积岩钐-钕同位素研究.科学通报,39(13): 1211-1214.
- 钱筱嫣,张志诚,陈彦,等,2017.内蒙古朱日和地区早古生代岩浆岩年代学、地球化学特征及其构造意义.地球科学,42(9): 1472-1494.
- 孙立新,任邦方,滕飞,等,2015.内蒙古敖汉旗朝吐沟组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄.地质通报,34(8): 1493-1501.
- 王惠初,相振群,赵凤清,等,2012.内蒙古固阳东部碱性侵入岩:年代学、成因与地质意义.岩石学报,28(9): 2843-2854.
- 吴福元,徐义刚,高山,等,2008.华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论.岩石学报,24(6): 1145-1174.
- 熊小林,刘星成,朱志敏,等,2011.华北埃达克质岩与克拉通破坏:实验岩石学和地球化学依据.中国科学(D辑),41(5): 654-667.
- 徐博文,郗爱华,葛玉辉,等,2015.内蒙古赤峰地区晚古生代 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义.地质学报,89(1):58-69.
- 许立权,邓晋福,陈志勇,等,2003.内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义.现代地质,17(4): 428-434.
- 徐义刚,李洪颜,庞崇进,等,2009.论华北克拉通破坏的时限.科学通报,54(14): 1974-1989.
- 徐义刚,巫祥阳,罗震宇,等,2007.山东中侏罗世一早白垩世侵入岩的锆石 Hf 同位素组成及其意义.岩石学报,23(2):307-316.
- 翟明国,彭澎,2007.华北克拉通古元古代构造事件.岩石学报,23(11): 2665-2682.
- 张旗,王焰,钱青,等,2001.中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义.岩石学报,17(2): 236-244.
- 张维,简平,2008.内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U-Pb 年代学.地质学报,82(6):778-787.
- 张允平,苏养正,李景春,2010.内蒙古中部地区晚志留世西别河组的区域构造学意义.地质通报,29(11): 1599-1605.
- 赵振华,熊小林,王强,等,2008.铷与钽的某些地球化学问题.地球化学,37(4): 304-320.
- 朱日祥,徐义刚,朱光,等,2012.华北克拉通破坏.中国科学(D辑),42(8): 1135-1159.