

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.08.007

内蒙古西乌旗沙尔哈达晚侏罗世 A 型花岗岩:地球化学特征、岩石成因与动力学背景

胡鹏¹, 段明^{1*}, 熊金莲^{2,3}, 曾威^{1,4}, 刘行¹, 闫国强¹, 魏佳林¹HU Peng¹, DUAN Ming^{1*}, XIONG Jinlian^{2,3}, ZENG Wei^{1,4}, LIU Xing¹, YAN Guoqiang¹, WEI Jialin¹

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 国家海洋信息中心, 天津 300171;

3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074;

4. 吉林大学, 吉林 长春 130061

1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China;

3. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;

4. Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China

摘要: 内蒙古西乌旗沙尔哈达花岗岩侵入于贺根山缝合带蛇绿岩中。LA-ICP-MS 锆石测年指示, 沙尔哈达花岗岩岩体于晚侏罗世 (154.6±1.2 Ma) 侵位, 矿物组合以石英、碱性长石和斜长石为主, 富 SiO₂ (74.86%~75.97%)、K₂O (4.4%~4.95%), 贫 MgO (0.044%~0.22%)、CaO (0.38%~0.77%)、TiO₂ (0.046%~0.18%) 和 P₂O₅ (0.007%~0.042%), A/CNK=1.03~1.09, 小于 1.1, 强烈亏损 Ba、Sr、Eu、P、Ti, 具有典型的右倾“海鸥型”稀土元素分配模式, 表现出典型的铝质 A 型花岗岩的矿物组合及地球化学特征。沙尔哈达 A 型花岗岩具有低的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值 (0.7014~0.70374)、低正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+3.96~+4.31)、高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+10.54~+14.72)。同位素地球化学特征指示, 沙尔哈达花岗岩可能源于新生的中基性地壳物质部分熔融及其后的结晶分异作用。沙尔哈达 A 型花岗岩为晚侏罗世蒙古-鄂霍茨克洋闭合后造山伸展作用的产物, 和蒙古-华北北部地块散布的其他 A 型花岗岩共同指示中晚侏罗世广泛的中下地壳伸展。

关键词: A 型花岗岩; 晚侏罗世; 地球化学; 锆石 U-Pb 定年; 内蒙古中部; 地质调查工程

中图分类号: P534.52; P588.12⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)08-1394-15

Hu P, Duan M, Xiong J L, Zeng W, Liu X, Yan G Q, Wei J L. Late Jurassic A-type granite in Sharhada, West Ujimqin, Inner Mongolia: geochemical characteristics, petrogenesis and geodynamic setting. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(8): 1394-1408

Abstract: The Sharhada granite in West Ujimqin, Inner Mongolia intruded into ophiolite in Hegenshan suture. LA-ICP-MS zircon dating indicates that the Sharhada granite was emplaced in the Late Jurassic (154.6±1.2 Ma). The mineral assemblage of the Sharhada granite is mainly composed of quartz, alkali feldspar and plagioclase. The granite is characterized by high SiO₂ (74.86%~75.97%), K₂O (4.4%~4.95%), low MgO (0.044%~0.22%), CaO (0.38%~0.77%), TiO₂ (0.046%~0.18%) and P₂O₅ (0.007%~

收稿日期: 2021-04-21; 修订日期: 2021-05-07

资助项目: 中国地质调查局项目《华北地区铜铁稀有金属矿产地质调查》(编号: DD20221686)、《渤海湾盆地氦气资源调查评价》(编号: DD20221668)、《天山-华北陆块铀钍等矿产资源调查》(编号: DD20190813)、《内蒙古阿拉善-河套地区区域地质调查》(编号: DD20211191)

作者简介: 胡鹏 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 从事矿产地质调查与研究工作。E-mail: 824901364@qq.com

* 通信作者: 段明 (1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事矿产地质调查与研究工作。E-mail: 279549801@qq.com

0.042%), $A/CNK = 1.03 \sim 1.09 < 1.1$. It is strongly depleted in Ba, Sr, Eu, P and Ti, with a typical right dipping "Seagull-type" REE distribution pattern, showing the geochemical characteristics of typical aluminous A-type granite. The Sharhada A-type granite has low ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.7014~0.70374), positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (+3.96~+4.31) and high $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (+10.54~+14.72), which may due to the partial melting of the newly formed intermediate/basic crustal materials and the subsequent crystallization differentiation. Furthermore, together with other A-type granites scattered in the Mongolia-Northern North China block, the Sharhada A-type granite is recognized as the product of the post-orogenic extension of the Mongolian-Okhotsk tectonic domain in the Late Jurassic, which indicates the extensive middle-lower crust extension in the Middle-Late Jurassic.

Key words: A-type granite; Late Jurassic; geochemistry; zircon U-Pb dating; central Inner Mongolia; geological survey engineering

A 型花岗岩的概念自提出以来,一直是花岗岩研究领域最重要的主题之一^[1],因其特殊的岩石成因、构造背景及地球动力学意义受到广泛关注。其成因模式复杂,包括多种地壳物质熔融^[2-8]、幔源玄武岩岩浆结晶分异与同化混染^[9-11]及壳幔岩浆混合^[12-14]。目前对于它们均形成于板内伸展或后造山伸展的构造环境已达成共识^[2, 15-21],这种特殊的构造背景蕴含了丰富的壳幔作用及地球动力学过程信息。结合区域研究成果,使用传统的地球化学手段及同位素示踪技术是揭示 A 型花岗岩复杂成因的重要手段。

东北亚自中生代以来,古亚洲洋的演化已经落幕^[22-24],而鄂霍茨克洋和古太平洋的演化持续进行,关于蒙古-鄂霍茨克洋的闭合和古太平洋板块俯冲对内蒙古中部地区的影响既是区域的研究热点,也存在争议^[25-29]。内蒙古西乌旗沙尔哈达花岗岩位于贺根山缝合带典型发育区,区内广泛分布近东西向的蛇绿岩和俯冲岛弧型-碰撞型-后造山型花岗岩,以晚古生代为主^[30-35]。而侵入于贺根山缝合带蛇绿岩中的中生代后造山 A 型花岗岩体很少有报道。本文对沙尔哈达斑状碱长花岗岩的分析表明,其具有典型的 A 型花岗岩特征,应用 LA-ICP-MS 技术测定了锆石 U-Pb 年龄,结合元素地球化学、全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素探讨其 A 型岩浆属性、岩石成因、构造背景及地球动力学意义。

1 岩体地质及岩相学特征

沙尔哈达岩体位于内蒙古东北部西乌旗地区,总体呈北东向岩株状产出,出露面积约 50 km²,与研究区内外包括其南侧的早白垩世石匠山岩体等组成复式岩体(图 1)^[36],岩体西北部发育晚石炭世梅劳特乌拉蛇绿岩带,西南部发育早石炭世迪彦庙-白音布拉格蛇绿岩带,研究区为贺根山缝合带蛇绿

岩和俯冲岛弧型-碰撞型和后造山型岩浆岩典型发育区^[37-39]。沙尔哈达岩体侵位于早石炭世白音布拉格蛇绿岩带和下二叠统寿山沟组与大石寨组,与围岩呈侵入接触,外接触带围岩普遍角岩化,内接触带可见冷凝边,未见混染现象。

沙尔哈达岩体主要为斑状黑云母二长花岗岩及斑状黑云母钾长花岗岩(图 2-a),岩体自北向南,矿物粒度由细粒向中粗粒变化。斑状黑云母二长花岗岩呈似斑状结构,块状构造。斑晶由钾长石、斜长石、石英及黑云母组成,基质具细-微粒结构,由长英质矿物及黑云母组成。副矿物为不透明矿物及锆石。条纹长石主要为正条纹长石。斜长石呈自形一半自形板状。石英多充填在钾长石和斜长石颗粒间,呈他形粒状,发育轻微绿泥石化和绿帘石化;斑状黑云母钾长花岗岩具似斑状结构,块状构造。斑晶由钾长石、石英及黑云母组成(图 2-b),基质具细-微粒结构,由长英质矿物及黑云母组成。副矿物为不透明矿物及锆石。钾长石呈他形板状,常见条纹结构发育,为以钾长石为主晶的正条纹长石,且晶内常见包含有小颗粒石英,形成包含结构。石英呈他形粒状,多数以聚斑的形式展布,裂纹发育,具平行消光。黑云母呈鳞片状集合体展布,发育浅褐-深褐色极强多色性。岩石局部发育较强粘土化及绿泥石化。

2 样品采集和分析方法

锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素分析、岩石地球化学测试和 Sr-Nd 同位素分析均在天津地质调查中心实验室完成。

2.1 锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素分析

花岗岩锆石样品(坐标:东经 118°11'00"、北纬 44°34'05")采自沙尔哈达岩体西部。将锆石靶清洗、喷碳并进行阴极发光(CL)和透射光、反射光照相后,选点进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素组

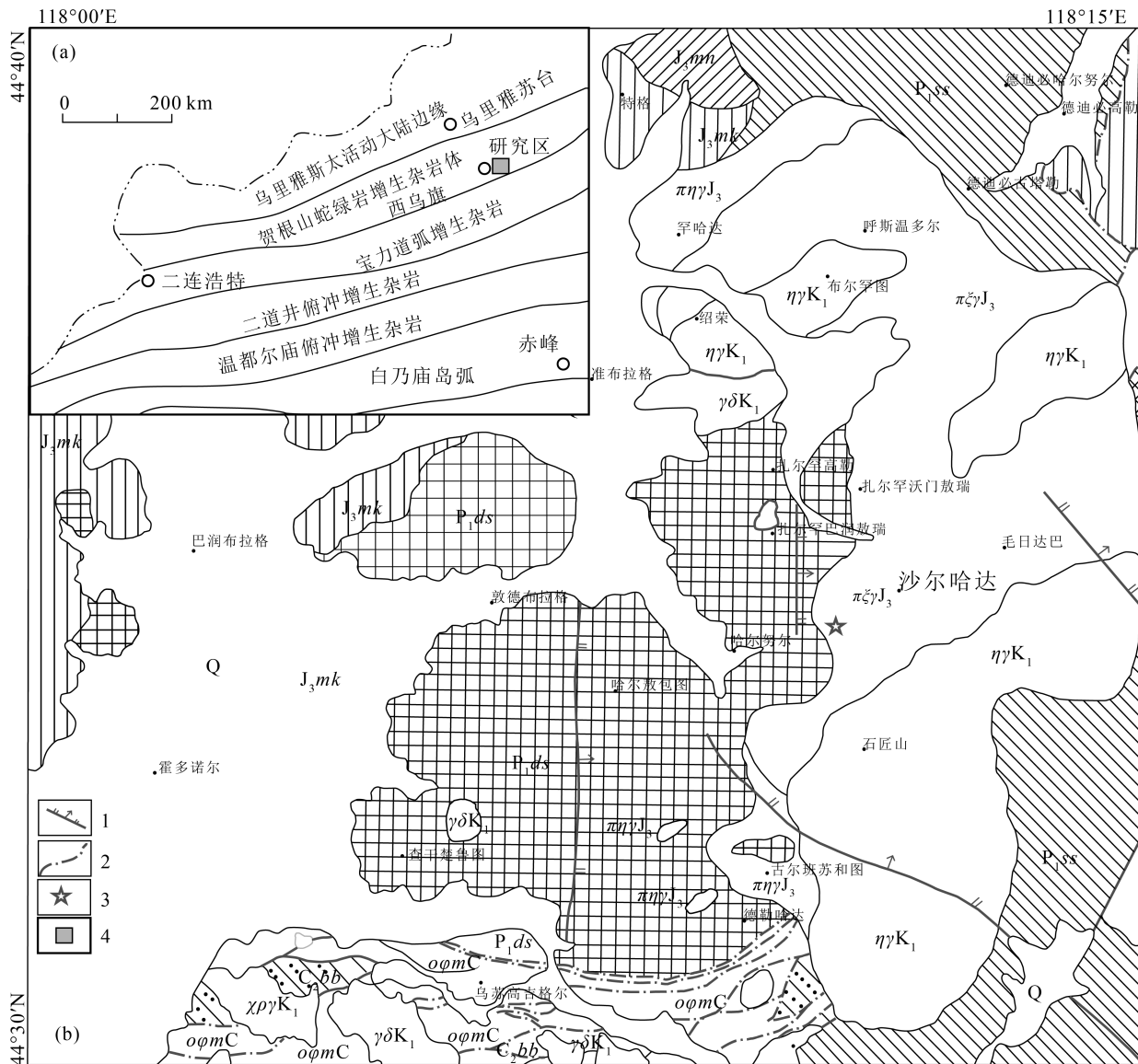


图1 内蒙古西乌旗沙尔哈达花岗岩区域构造(a)和地质简图(b) (据参考文献[36]修改)

Fig. 1 Regional sketch tectonic map(a) and geological map(b) of the Sharhada granite in West Ujimqin, Inner Mongolia
 Q—第四系; J_3mn —上侏罗统玛尼吐组; J_3mk —上侏罗统满克头鄂博组; P_1ds —下二叠统大石寨组; P_1ss —下二叠统寿山沟组; C_2bb —上石炭统本巴图组; $o\phi mC$ —蛇绿构造混杂岩; $\rho\gamma K_1$ —早白垩世碱长花岗岩; $\eta\gamma K_1$ —早白垩世二长花岗岩; $\gamma\delta K_1$ —早白垩世花岗岩闪长岩; $\pi\eta\gamma J_3$ —晚侏罗世斑状二长花岗岩; $\pi\xi\gamma J_3$ —晚侏罗世斑状钾长花岗岩; 1—实测断层; 2—韧性剪切带; 3—采样位置; 4—研究区

成分析。阴极发光照相使用扫描电镜(ss550)加载阴极发光仪(monocl4)完成。锆石 U-Pb 同位素组成分析使用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)完成。将 NEW WAVE 193-FXArF 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联接,以氦气为剥蚀物质载气,激光剥蚀束斑直径为 35 μm ,剥蚀时间为 30 s。测试中用人工合成的硅酸

盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化。锆石年龄计算采用标准锆石 GJ-1 作外标。利用刘勇胜教授研发的 ICPMSDataCal 程序^[40]和 Ludwig 研发的 Isoplot 程序进行数据处理^[41],采用²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正。原位微区锆石 Lu-Hf 同位素测试使用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)完成。采用单点剥蚀,激光束斑直径为 50 μm ,时间 30 s。详细的分析

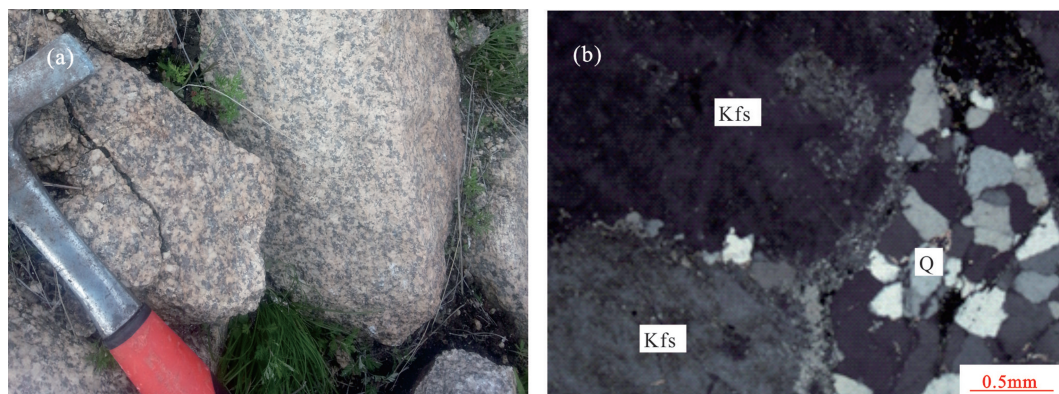


图 2 沙尔哈达花岗岩野外(a)和镜下照片(b)(正交偏光)

Fig. 2 Outcrop(a) and micrograph(b, cross polarized light) of the Sharhada granite

Q—石英; Kfs—钾长石

方法见参考文献[42-44]。

2.2 岩石地球化学

对新鲜的岩石样品进行主量和微量元素的测试。将样品研磨至 200 目以下, 主量元素采用熔片法制备成玻璃片, 再用 PW4400/40 X 射线荧光光谱仪进行测定, 分析精度优于 2%; 微量元素(含稀土元素)采用 ICP-MS 测试, 分析精度优于 5%。

2.3 Sr-Nd 同位素分析

全岩 Sr-Nd 同位素分析采用 Triton 热电离质谱计测定, 取 200 目全岩样品粉末, 采用阳离子交换树脂分离提纯 Sr 和 Nd。全流程空白本底稳定在

$Rb = 5.6 \times 10^{-10} \text{ g}$, $Sr = 3.8 \times 10^{-10} \text{ g}$, $Sm = 3.0 \times 10^{-11} \text{ g}$, $Nd = 5.4 \times 10^{-11} \text{ g}$ 。在样品测试过程中, BCR-2 Nd 标样和 NBS-987 Sr 标样的 Nd-Sr 同位素比值分别为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5122202 \pm 30$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710245 \pm 30$ 。Sr、Nd 同位素测试数据分别以 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 为内标, 用指数律进行质量分馏校正。等时线拟合计算采用 Isoplot 标准程序。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 及 Hf 同位素特征

花岗岩样品的锆石测年数据列于表 1。样品锆

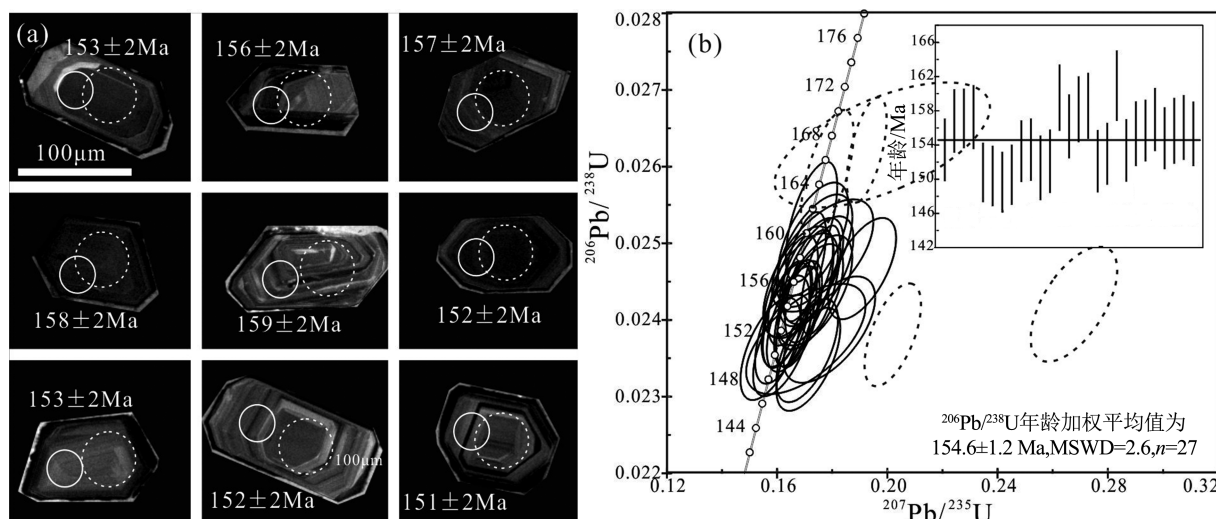


图 3 沙尔哈达花岗岩样品典型锆石阴极发光(CL)图像(a)和 U-Pb 谐和图(b)

(a 图实线圆圈为测年点位, 虚线圆圈为 Hf 同位素分析点位)

Fig. 3 CL image representative zircons from the Sharhada granite and the U-Pb zircon concordia diagram

表 1 沙尔哈达岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Th-Pb dating results of the Sharhada granite

测 点 号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	^{207}Pb	1σ	^{207}Pb	1σ	^{206}Pb	1σ	^{207}Pb	1σ	^{207}Pb	1σ	^{206}Pb	1σ
			/ ^{206}Pb		/ ^{235}U		/ ^{238}U		/ ^{206}Pb		/ ^{235}U		/ ^{238}U	
1	28	1138	0.0493	0.0010	0.1636	0.0037	0.0241	0.0003	160	49	154	4	153	2
2	17	682	0.0508	0.0014	0.1724	0.0048	0.0246	0.0003	230	62	161	4	157	2
3	68	2695	0.0561	0.0014	0.1909	0.0050	0.0247	0.0003	457	55	177	5	157	2
4	24	885	0.0802	0.0018	0.2677	0.0063	0.0242	0.0003	1202	45	241	6	154	2
5	24	917	0.0499	0.0010	0.1784	0.0038	0.0259	0.0003	191	49	167	4	165	2
6	30	1215	0.0499	0.0009	0.1698	0.0033	0.0247	0.0003	189	41	159	3	157	2
7	22	932	0.0496	0.0013	0.1617	0.0043	0.0237	0.0003	174	59	152	4	151	2
8	17	704	0.0525	0.0014	0.1709	0.0046	0.0236	0.0003	308	60	160	4	150	2
9	16	689	0.0529	0.0014	0.1713	0.0047	0.0235	0.0003	325	60	161	4	150	2
10	19	777	0.0484	0.0013	0.1576	0.0044	0.0236	0.0003	118	63	149	4	151	2
11	26	1101	0.0493	0.0010	0.1635	0.0036	0.0241	0.0003	162	47	154	3	153	2
12	25	1045	0.0615	0.0012	0.2019	0.0042	0.0238	0.0003	657	43	187	4	152	2
13	33	1393	0.0502	0.0009	0.1667	0.0032	0.0241	0.0003	204	42	157	3	153	2
14	20	759	0.0548	0.0043	0.1987	0.0159	0.0263	0.0003	405	177	184	15	167	2
15	13	556	0.0520	0.0026	0.1704	0.0089	0.0238	0.0003	287	115	160	8	151	2
16	30	1271	0.0492	0.0012	0.1619	0.0040	0.0239	0.0003	156	57	152	4	152	2
17	17	671	0.0501	0.0015	0.1731	0.0052	0.0251	0.0003	200	68	162	5	160	2
18	53	2206	0.0520	0.0008	0.1758	0.0029	0.0245	0.0003	285	34	164	3	156	2
19	14	554	0.0515	0.0021	0.1765	0.0075	0.0248	0.0003	265	95	165	7	158	2
20	14	576	0.0505	0.0016	0.1736	0.0056	0.0249	0.0003	220	71	163	5	159	2
21	18	761	0.0544	0.0020	0.1790	0.0068	0.0239	0.0003	386	83	167	6	152	2
22	22	928	0.0501	0.0011	0.1658	0.0039	0.0240	0.0003	199	51	156	4	153	2
23	35	1404	0.0495	0.0010	0.1725	0.0038	0.0253	0.0003	171	45	162	4	161	2
24	29	1233	0.0506	0.0009	0.1680	0.0034	0.0241	0.0003	223	42	158	3	153	2
25	17	733	0.0517	0.0015	0.1738	0.0055	0.0244	0.0003	272	66	163	5	155	2
26	80	2969	0.0533	0.0007	0.1926	0.0030	0.0262	0.0003	341	32	179	3	167	2
27	15	600	0.0501	0.0016	0.1687	0.0054	0.0244	0.0003	198	72	158	5	156	2
28	17	690	0.0515	0.0014	0.1749	0.0052	0.0246	0.0003	262	64	164	5	157	2
29	16	669	0.0514	0.0014	0.1721	0.0048	0.0243	0.0003	257	61	161	5	155	2
30	33	1367	0.0510	0.0009	0.1717	0.0036	0.0244	0.0003	239	43	161	3	156	2
31	21	851	0.0496	0.0014	0.1676	0.0052	0.0245	0.0003	177	68	157	5	156	2
32	29	1200	0.0493	0.0010	0.1658	0.0037	0.0244	0.0003	163	48	156	3	155	2

石均以长柱状为主,长宽比在 1 : 1~3 : 1 之间,晶形完整,多发育典型的振荡环带,环带较窄(图 3-a),指示其为岩浆锆石^[45-46]。32 个数据点中,5 个测点

4、5、12、14 和 26 谐和度较低(虚线表示),偏离谐和线(图 3-b),未参与锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值计算,其余 27 个测点位于谐和线上及其附近,

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $154.6 \pm 1.2 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=2.6$), 代表沙尔哈达花岗岩成岩年龄, 为晚侏罗世岩浆活动的产物。

在锆石 U-Pb 测年基础上, 对部分颗粒形态较好, 环带清晰且已获得年龄数据的锆石进行微区原位 Hf 同位素测试, 共分析了 26 个测点, 测试结果列于表 2。

沙尔哈达花岗岩所有测点的 Hf 同位素组成较一致, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均不大于 0.002, 说明锆石在形成后具有很少的放射性成因 Hf 累积, 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值可以用来分析源区特征^[47]。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值在 $0.282978 \sim 0.283095$ 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $+10.54 \sim +14.72$ 之间, 二阶段模式年龄 (T_{DM}^{c}) 范围为 $261 \sim$

532 Ma , 平均为 384 Ma 。

3.2 地球化学

沙尔哈达花岗岩主量、微量元素分析结果见表 3。

沙尔哈达花岗岩具有富 SiO_2 ($74.86\% \sim 75.97\%$), 富碱更富钾 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.12\% \sim 9.1\%$, $\text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O} = 1.13 \sim 1.26$), 略富 Al_2O_3 ($12.71\% \sim 13.25\%$), 贫 MgO ($0.044\% \sim 0.22\%$)、 CaO ($0.38\% \sim 0.77\%$)、 TiO_2 ($0.046\% \sim 0.18\%$)、 P_2O_5 ($0.007\% \sim 0.042\%$) 等特征。 TFeO/MgO 值较高, 为 $7.82 \sim 20.5$ 。在 TAS 图解 (图 4-a) 中, 样品点落入花岗岩区域; 在 SiO_2 - K_2O 图解 (图 4-b) 中, 落入高钾钙碱性区域; 铝饱和指数 (A/CNK) 为 $1.03 \sim 1.09$, 为弱过铝质花岗岩 (图 4-c)。

表 2 沙尔哈达花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果
Table 2 Zircon Hf dating results of the Sharhada granite

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}/Ma	$T_{\text{DM}}^{\text{c}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
1	154.6	0.0331	0.0011	0.283071	0.000025	13.87	256	316	-0.97
3	154.6	0.0376	0.0012	0.283088	0.000031	14.44	233	279	-0.96
7	154.6	0.0147	0.0005	0.283044	0.000024	12.99	289	372	-0.99
8	154.6	0.0314	0.0011	0.283042	0.000024	12.84	298	383	-0.97
9	154.6	0.0382	0.0012	0.283078	0.000024	14.12	247	302	-0.97
0	154.6	0.0383	0.0012	0.283074	0.000034	13.94	253	311	-0.96
10	154.6	0.0259	0.0008	0.283058	0.000029	13.45	273	345	-0.97
11	154.6	0.0405	0.0013	0.283060	0.000024	13.45	274	344	-0.96
13	154.6	0.0323	0.0010	0.283009	0.000034	11.68	344	457	-0.97
15	154.6	0.0336	0.0011	0.283091	0.000032	14.54	228	272	-0.97
16	154.6	0.0463	0.0014	0.283041	0.000027	12.77	302	387	-0.96
17	154.6	0.0358	0.0011	0.283031	0.000028	12.45	313	407	-0.97
18	154.6	0.0275	0.0009	0.283095	0.000027	14.72	221	261	-0.97
19	154.6	0.0669	0.0020	0.283064	0.000028	13.55	272	337	-0.94
20	154.6	0.0515	0.0019	0.283029	0.000025	12.28	324	419	-0.94
21	154.6	0.0204	0.0007	0.282992	0.000022	11.11	365	494	-0.98
22	154.6	0.0278	0.0010	0.283047	0.000027	13.02	290	371	-0.97
23	154.6	0.0483	0.0016	0.282978	0.000023	10.54	394	532	-0.95
24	154.6	0.0340	0.0011	0.283071	0.000022	13.87	256	316	-0.97
25	154.6	0.0308	0.0010	0.283043	0.000021	12.88	296	381	-0.97
27	154.6	0.0398	0.0013	0.283001	0.000026	11.36	358	477	-0.96
28	154.6	0.0368	0.0012	0.283071	0.000026	13.87	257	317	-0.96
29	154.6	0.0208	0.0007	0.283015	0.000024	11.92	333	442	-0.98
30	154.6	0.0215	0.0008	0.282981	0.000024	10.72	381	519	-0.98
31	154.6	0.0318	0.0011	0.282989	0.000021	10.97	373	503	-0.97
32	154.6	0.0338	0.0011	0.283022	0.000022	12.14	326	428	-0.97

表 3 沙尔哈达花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 3 Major, trace elements and REE compositions of the Sharhada granite

样品号	SZGS01-1	SZGS01-2	SZGS02-1	SZGS02-2	SZGS03	样品号	SZGS01-1	SZGS01-2	SZGS02-1	SZGS02-2	SZGS03
SiO ₂	75.97	75.78	75.7	74.86	75.12	Nb	19.3	47.4	22	22.2	27.9
Al ₂ O ₃	13	13.25	12.71	13.1	12.84	Ta	3.23	5.62	2.62	2.16	2.92
FeO	0.65	0.81	1.41	1.46	1.5	Zr	165	94.3	258	262	277
Fe ₂ O ₃	0.53	0.1	0.33	0.29	0.32	Hf	7.11	7.59	10.2	10.2	10.9
TFeO	1.13	0.90	1.71	1.72	1.79	Be	10.3	8.99	11.7	6.1	10.5
TFe ₂ O ₃	1.25	1.00	1.90	1.91	1.99	U	2.06	1.39	1.98	2.09	1.68
CaO	0.47	0.38	0.46	0.56	0.77	Th	14.1	6.21	9.94	15	7.1
MgO	0.093	0.044	0.17	0.22	0.2	La	10.3	1.89	28	24	14.3
K ₂ O	4.48	4.94	4.5	4.71	4.4	Ce	23.3	4.8	54.8	48.3	25.7
Na ₂ O	3.96	4.16	3.62	3.75	3.81	Pr	3.1	0.83	6.4	6.93	3.69
TiO ₂	0.1	0.046	0.16	0.17	0.18	Nd	11.7	3.49	22.8	25.9	14.3
P ₂ O ₅	0.025	0.007	0.033	0.036	0.042	Sm	2.74	1.13	5.02	5.57	2.93
MnO	0.026	0.03	0.041	0.043	0.047	Eu	0.08	0.01	0.13	0.21	0.12
烧失量	0.62	0.36	0.72	0.65	0.61	Gd	2.87	1.32	4.53	5.39	3.00
CO ₂	0.079	0.047	0.014	0.032	0.014	Tb	0.54	0.31	0.82	0.97	0.54
总量	100	99.95	99.87	99.88	99.85	Dy	3.42	2.33	4.68	5.86	3.39
A/NK	1.14	1.09	1.17	1.16	1.16	Ho	0.72	0.53	0.92	1.17	0.68
A/CNK	1.06	1.03	1.09	1.07	1.03	Er	2.25	1.74	2.69	3.57	2.07
TFeO/MgO	12.1	20.5	10.0	7.82	8.94	Tm	0.37	0.31	0.40	0.52	0.32
Cr	3.30	2.34	2.44	5.98	2.89	Yb	2.60	2.05	2.52	3.42	2.19
Ni	2.56	1.40	1.27	1.08	2.23	Lu	0.40	0.30	0.38	0.51	0.30
Co	0.69	0.24	0.72	0.83	0.88	Y	18.5	17.6	24.6	33.9	20.6
Li	20.8	103	37.6	38.2	63.4	ΣREE	64.4	21.0	134	132	73.5
Rb	249	344	259	241	235	LREE	51.2	12.2	117	111	61.0
Cs	5.11	14.6	5.73	5.26	6.93	HREE	13.2	8.89	16.9	21.4	12.5
W	1.43	0.69	4.43	1.59	0.63	(La/Yb) _N	2.84	0.66	7.97	5.03	4.68
Mo	0.54	0.45	0.34	0.67	0.6	δEu	0.09	0.03	0.08	0.12	0.12
Sr	32.2	10.6	45	54.1	61.2	R ₁	2608	2422	2715	2562	2629
Ba	48.6	3.25	93.4	137	119	R ₂	312	304	310	330	347
V	6.09	1.95	6.06	7.46	7.05	Mg [#]	12.82	8.02	15.08	18.56	16.62

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

沙尔哈达花岗岩稀土元素总量偏低(表 3),
ΣREE=21.04×10⁻⁶~134.09×10⁻⁶, (La/Yb)_N=0.66~
7.79(平均 4.24), (La/Sm)_N=1.08~3.60(平均 2.61),
(Gd/Yb)_N=0.53~1.49,平均为 1.07。轻、重稀土元
素分馏明显。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈
现典型的“海鸥型”样式(图 5-a),强烈的负 Eu 异常
(δEu=0.03~0.12),表明源区残留相有斜长石^[48]。

微量元素具有以下特点:Rb 含量为 394×10⁻⁶~
486×10⁻⁶,Ba 含量为 50.7×10⁻⁶~168×10⁻⁶,Sr 含量
为 19.5×10⁻⁶~42.1×10⁻⁶,相对富集 Rb、Th、Ta、Hf
和 Zr,明显亏损 Ba、Sr、Nb、Eu(图 5-b)。

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素特征

沙尔哈达花岗岩 Sr-Nd 同位素分析结果列于
表 4。样品的 I_{Sr}值范围为 0.7014~0.70374,均大于

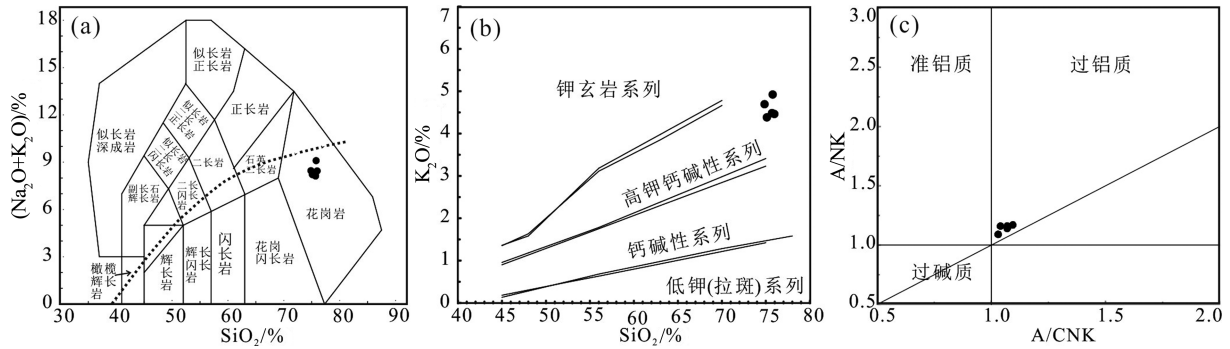


图 4 沙尔哈达花岗岩 $\text{Si}_2\text{O}-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ (a)、 $\text{Si}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ (b) 和 $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ 图解 (c)

Fig. 4 Plots of SiO_2 vs. $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ (a), SiO_2 vs. K_2O (b) and A/CNK vs. A/NK (c) of the sharhada granite

0.700, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值范围为 $-0.21 \sim -0.32$, 在有效范围内 ($-0.2 \sim -0.4$), 4 件样品均具有亏损的 Nd 同位素组成, I_{Nd} 值范围为 $0.512643 \sim 0.512660$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为正值 ($+3.96 \sim +4.31$), 表明源岩来自地幔; 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 集中在 $594 \sim 622$ Ma 之间。

4 讨论

4.1 岩石类型与成因

S-I-M-A 型分类法在花岗岩分类中使用最广, S、I、M 型花岗岩依据源区不同而区分, I 型源岩主要为火成岩, S 型来自沉积岩, M 型来自地幔, 而 A 型花岗岩与源岩无关, 代表产于伸展构造背景中的高温无水花岗岩^[50]。A 型花岗岩最重要的地球化学特征是富 SiO_2 , 贫 Sr、Ba、Eu、Ti 和 P, 具有明显的负 Eu 异常。富钾 ($\text{K}_2\text{O} = 4\% \sim 6\%$ 或更高) 也是 A

型花岗岩的典型特征^[51]。A 型花岗岩可分为碱性和铝质 2 类^[52], 碱性或过碱性类花岗岩通常含有铁橄榄石、钙铁辉石、霓石、钠闪石等镁铁质矿物, 铝质花岗岩则一般出现碱性长石和斜长石。沙尔哈达花岗岩矿物组合以石英、碱性长石和斜长石为主, 富 SiO_2 ($74.86\% \sim 75.97\%$), 富 K_2O ($4.4\% \sim 4.95\%$), 贫 MgO ($0.044\% \sim 0.22\%$)、 CaO ($0.38\% \sim 0.77\%$)、 TiO_2 ($0.046\% \sim 0.18\%$) 和 P_2O_5 ($0.007\% \sim 0.042\%$), $\text{A/CNK} = 1.03 \sim 1.09$, 小于 1.1。强烈亏损 Ba、Sr、Eu、P、Ti, 具有典型的右倾“海鸥型”稀土元素配分模式, 上述矿物组合及地球化学特征与铝质 A 型花岗岩类似^[2, 53]。在岩石成因判别图解 (图 6) 中, 所有样品点均落入 A 型花岗岩区域, 表明沙尔哈达花岗岩为 A 型花岗岩。另外, 在氧化型和还原型 A 型花岗岩判别图解^[8]中, 落在在氧化型、还原

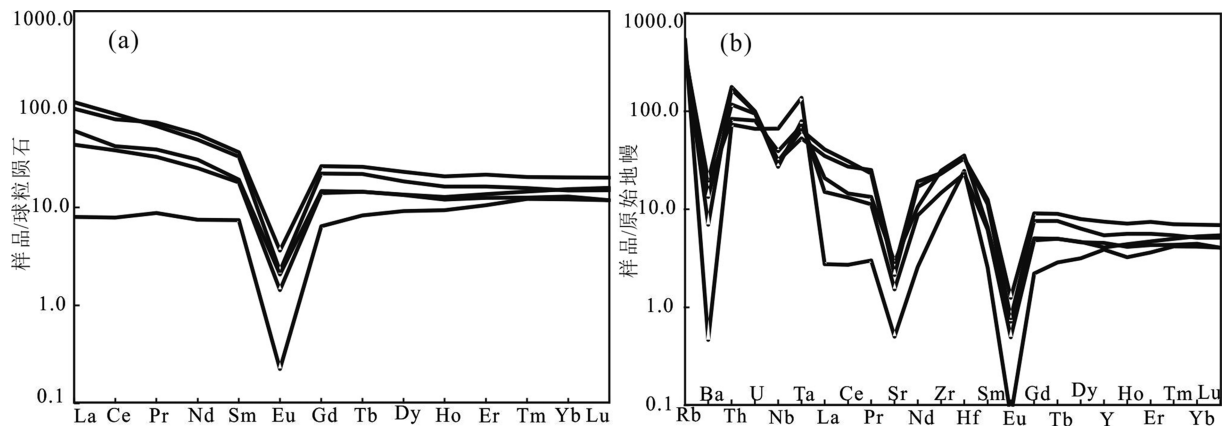


图 5 沙尔哈达花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图 (a) 微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b)

(球粒陨石标准化和原始地幔标准化数据据参考文献[49])

Fig. 5 Chondrite normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) of the Sharhada granite

表 4 沙尔哈达花岗岩 Sr-Nd 同位素分析结果
Table 4 Sr-Nd isotopic data of the Sharhada granite

样品编号	年龄/ Ma	$^{87}\text{Rb}/$ ^{86}Sr	$^{87}\text{Sr}/$ ^{86}Sr	I_{Sr}	$^{147}\text{Sm}/$ ^{144}Nd	$^{143}\text{Nd}/$ ^{144}Nd	I_{Nd}	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
B1/BGD1	154.6	25.4394	0.759392	0.70348	0.1554	0.512799	0.512642	3.96	622	-0.21
B3/BGD3	154.6	18.7883	0.742696	0.70140	0.1411	0.512802	0.512659	4.29	594	-0.28
B4/BGD4	154.6	13.8245	0.734120	0.70374	0.1339	0.512795	0.512660	4.31	594	-0.32
B5/BGD5	154.6	12.2480	0.729856	0.70294	0.1344	0.512784	0.512648	4.08	612	-0.32

型或二者交界处(图 6-f,g),表明其形成环境复杂。

A 型花岗岩的成因模式复杂、物质来源具有多样性,几乎所有花岗质岩浆体系中都能产生 A 型花岗岩^[21],其物质来源也具有多样性,地幔、壳-幔和地壳物质都可能是 A 型花岗岩的潜在源岩^[20,45]。A 型酸性岩浆的成因过程主要包括:①幔源拉斑玄武质岩浆的分离结晶与同化混染^[9-10];②壳源物质部分熔融^[3-8];③壳源酸性岩浆与幔源基性岩浆混合^[12-14]。

基性岩浆分异的 A 型花岗岩通常与大面积同期基性-超基性岩成双峰式产出,如美国黄石公园的 A 型流纹岩^[46],而沙尔哈达花岗岩缺少与之伴生的同期中基性岩石,且实验岩石学研究表明,幔源基性岩浆仅在极端情况下才能分异形成低硅($\text{SiO}_2 \leq 68\%$)钾质残留熔体,并伴有大量中间产物^[55-56],即使在最适宜的条件下,同化程度最高几乎不可能超过 25%,许多同化作用过程(包括机械混合与化学反应)都需要克服严峻的能量障碍^[57],而沙尔哈达花岗岩高硅,且岩石组合单一,不可能为幔源岩浆分离结晶与同化混染。至于岩浆混合作用形成的 A 型花岗岩,常发育暗色基性包体和变化范围较大的锆石 Hf 同位素组成^[13-14],显然这也不符合沙尔哈达花岗岩的特征。

沙尔哈达花岗岩符合铝质 A 型花岗岩^[21,52]的特点:矿物组合以碱性长石和石英为主,暗色矿物主要为黑云母,弱过铝质($A/\text{CNK}=1.03\sim 1.09$),阳离子参数 R_2 值较高($304\sim 347$,大于 280)。铝质 A 型花岗岩普遍认为是中下地壳部分熔融的产物^[58]。此外, $\text{Mg}^\#$ 值为 $8.02\sim 18.56$,远小于 45,表明地幔物质对沙尔哈达 A 型花岗岩的直接贡献没有或很小,因此沙尔哈达 A 型花岗岩为壳源物质部分熔融,这也与 Sr-Nd-Hf 同位素特征相符。沙尔哈达花岗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)-I_{\text{Sr}}$ 同位素图解指

示亏损地幔源区(图 7-a),在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解(图 7-b)上落在球粒陨石上方,指示新生的地壳物质,这与兴蒙造山带显生宙以来巨量的花岗岩源区特征相似^[59-61]。实验岩石学研究^[4,62]指出,英云闪长质-花岗闪长质岩石在不同地壳深度的脱水熔融可以产生 A 型花岗质熔体,即低压时形成准铝质岩浆,高压时形成过铝质岩浆^[61]。沙尔哈达铝质 A 型花岗岩 Hf-Nd 的二阶段模式年龄为 $622\sim 261$ Ma,结合其地球化学特征,笔者认为它来自新元古代-古生代中下地壳中基性浆源物质高压条件下部分熔融及其后的分异作用。

4.2 构造背景

A 型花岗岩形成的构造背景最初被认为是板内裂谷的非造山环境,而随后大量研究表明 A 型花岗岩可形成于多种构造环境,如澳大利亚 Lachalen 褶皱带 A 型花岗岩可以形成于造山期的各种环境^[7];Bonin^[65]明确指出,A 型花岗岩与造山运动在空间上并无联系,仅在时间上关系密切,同时指出其并非形成于传统认为的板内环境,可以是板块汇聚的活动边缘背景,其形成均与拉张构造背景有关^[2,20-21],因此,A 型花岗岩是判断伸展背景的重要岩石学标志。

沙尔哈达花岗岩的主量、微量元素地球化学特征与典型的南岭型花岗岩及区域上同时代的石匠山 A 型花岗岩特征相符,形成于造山后的地壳减薄阶段^[47,66-67]。

在 $\text{TFEO}/(\text{TFEO}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 图解(图 8-a,b)中,样品点均落入后造山花岗岩区。Pearce 等^[68]认为,Y、Yb、Rb、Ba、K、Nb、Ta、Ce、Sm、Zr 和 Hf 能有效区分花岗岩构造背景,在系统研究已知构造背景的花岗岩后,制作了相关图解(图 8),可以看到,在 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 图解中均落入后碰撞花岗岩区域(图 8-c),在主量元素 R_1-R_2 构造环境判

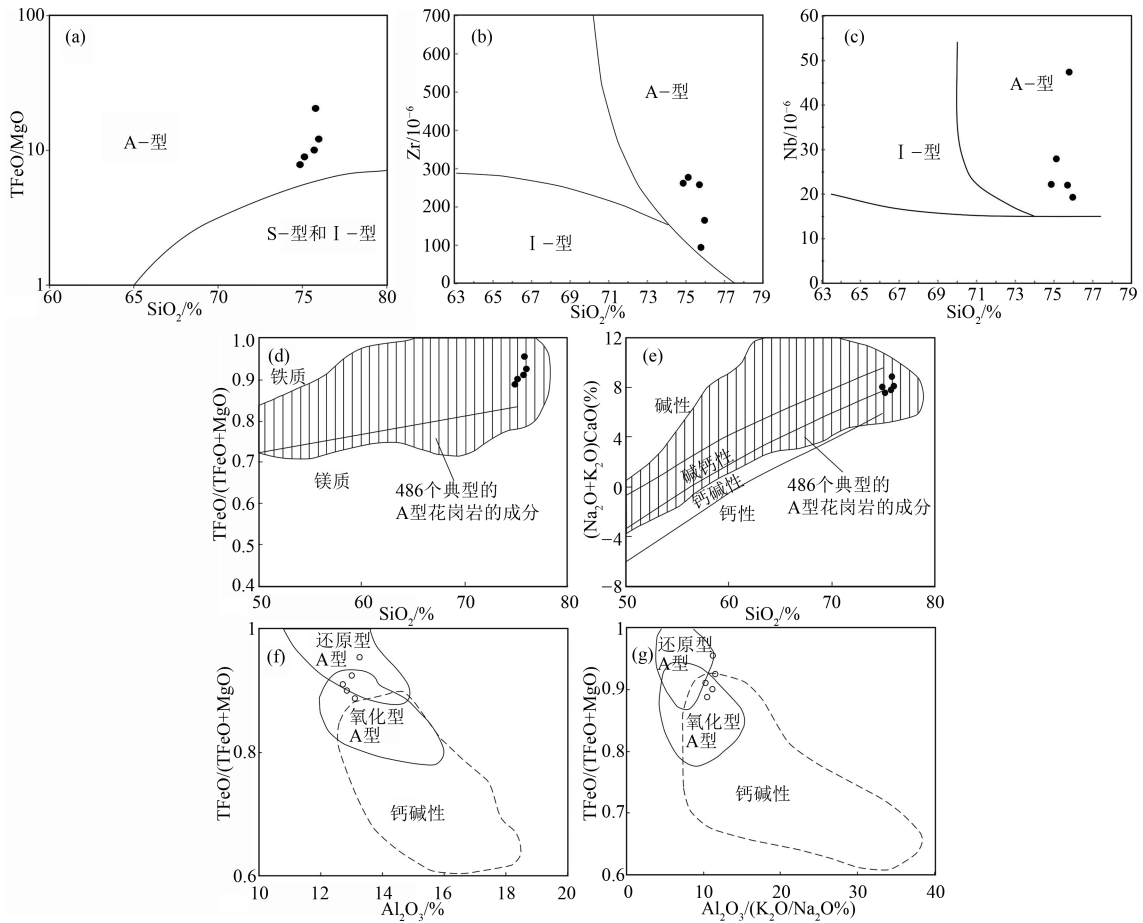


图 6 沙尔哈达花岗岩 SiO_2 - TFeO/MgO (a)、 SiO_2 - Zr (b)、 SiO_2 - Nb (c)、 SiO_2 - $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (d)、 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$) (e)、 Al_2O_3 - $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (f) 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ - $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (g) 图解 (图 b、c 据参考文献 [63]; 图 a 据参考文献 [18]; 图 e、f 底图据参考文献 [64]; 图 f、g 底图据参考文献 [8])

Fig. 6 SiO_2 - TFeO/MgO (a), SiO_2 - Zr (b), SiO_2 - Nb (c), SiO_2 - $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (d), SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$) (e), Al_2O_3 - $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (f) and $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ - $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (g) plots for the Sharhada granite

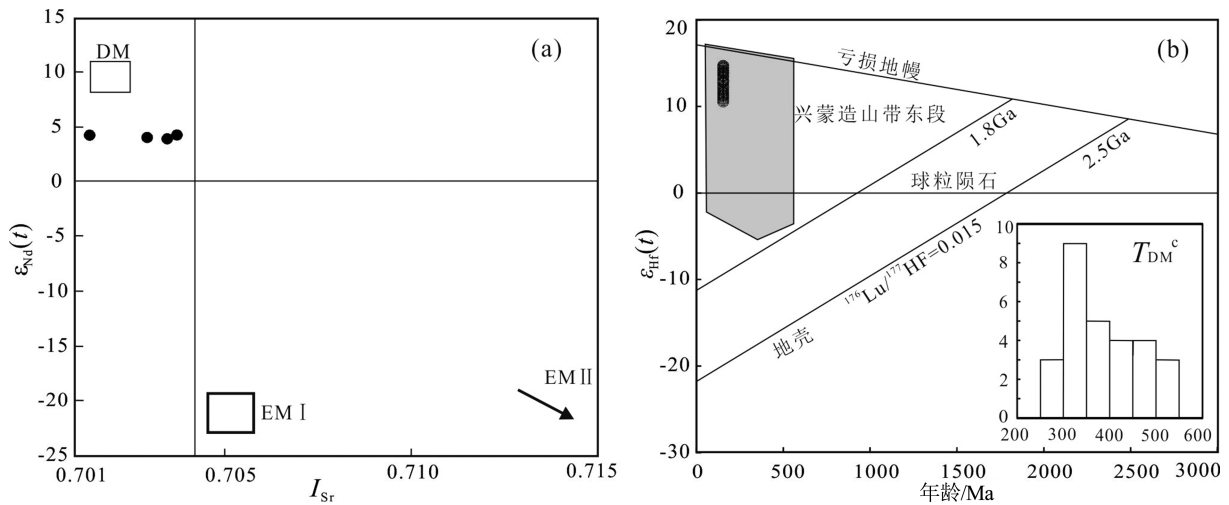


图 7 $I_{\text{sr}}-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解 (a) 和 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解 (b) (兴蒙造山带东段 Hf 同位素组成据参考文献 [13])

Fig. 7 I_{sr} vs $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram (a) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs t (Ma) diagram (b)

DM—亏损地幔; EM I—I 型富集地幔; EM II—II 型富集地幔

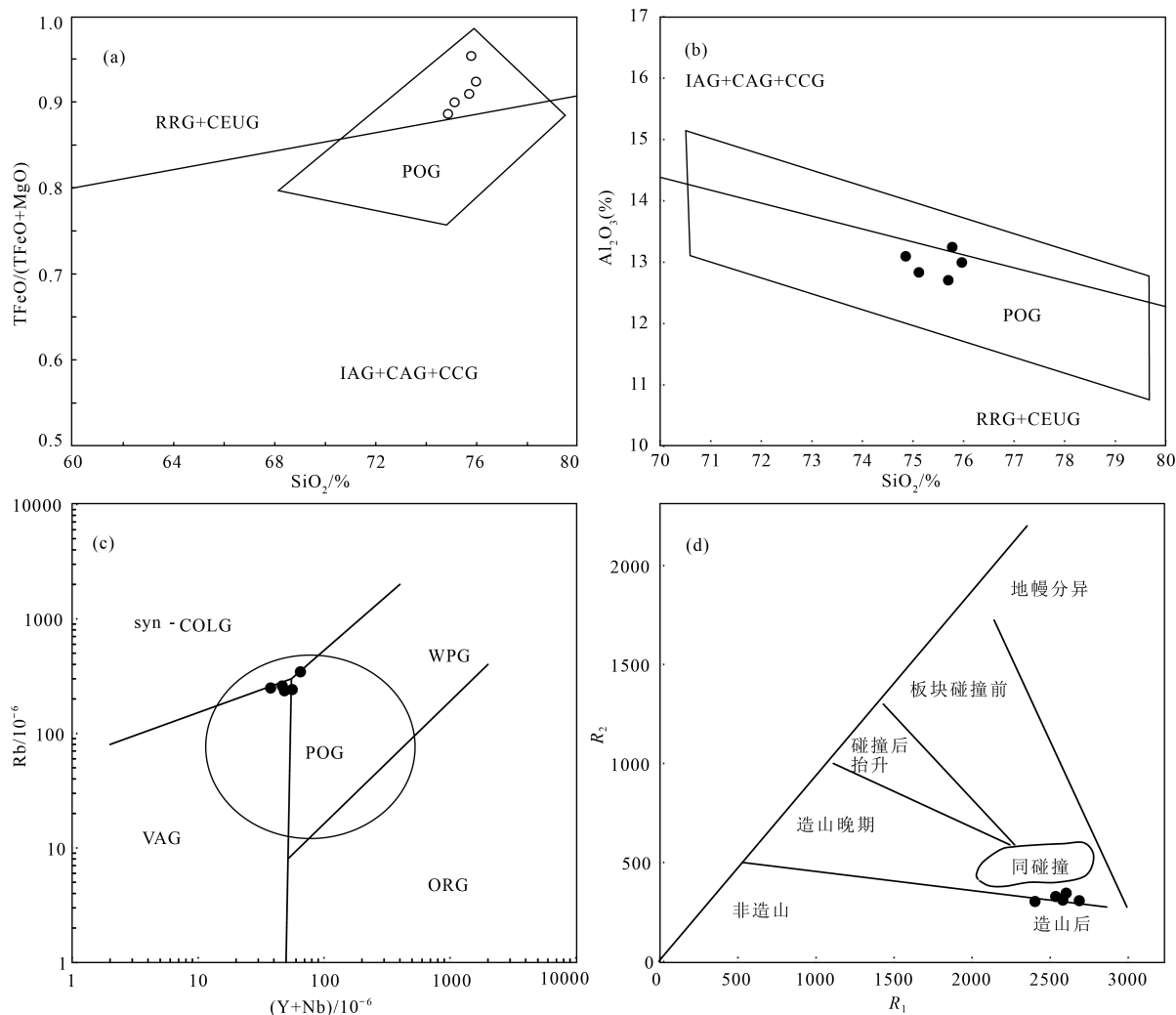


图8 沙尔哈达花岗岩构造判别图解(图a、b据参考文献[69],c据参考文献[68],d据参考文献[70])

Fig. 8 Tectonic discriminant diagrams of the Sharhada granite

IAG—岛弧花岗岩类;CAG—大陆弧花岗岩类;CCG—大陆碰撞花岗岩类;POG—后造山花岗岩类;

RRG—与裂谷有关的花岗岩类;CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类;VAG—火山弧花岗岩类;ORG—洋脊花岗岩类;

WPG—板内花岗岩类;syn-COLG—同碰撞花岗岩类

别图解中,也全部落在造山后区域(图8-d)。综上所述可以看出,沙尔哈达花岗岩形成于造山后的伸展构造背景。

4.3 地质意义

自中生代以来,古亚洲洋的演化已经落幕^[22-24],而鄂霍茨克洋和古太平洋的演化持续进行^[25-29],一个西迄蒙古-鄂霍茨克缝合带、东至太平洋之滨、跨越2500 km、覆盖面积逾 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的早白垩世巨型地壳伸展省被识别出来^[27,71],引起广泛关注,表现为一系列早白垩世变质核杂岩^[27,70,72-74]、断陷盆地群^[75-77]及大规模火山喷

发^[78-79]。而这些变质核杂岩核部的岩浆岩锆石年龄可追溯到中晚侏罗世,表明伸展运动可能在中晚侏罗世已经启动^[71],指示中下地壳流动的伸展岩浆穹隆遍布内蒙-华北北部^[25,71-72,80-81]。结合近年来在华北克拉通及兴蒙造山带陆续厘定的一系列晚侏罗世A型花岗岩,如西乌旗石匠山花岗岩^[67]、内蒙部达尔地区钾长花岗岩^[82]、内蒙古东部红山子黑云母花岗岩^[83]、西拉木伦碾子沟二长花岗岩^[84]、白乃庙地区道郎呼都格钾长花岗岩^[85]及本文的西乌旗沙尔哈达晚侏罗世A型花岗岩,表明蒙古-华北北部陆块的中下地壳在中-晚侏罗世普遍处于伸

展流动状态,这种弥散状中下地壳伸展与流动是形成独立状分布的中—晚侏罗世夭折裂陷(failed rift)盆地的重要背景^[75-76]。Davis 等^[86]基于辽西地区控盆断裂系统的研究,识别出了可能影响整个燕山造山带的中—晚侏罗世伸展事件。中—晚侏罗世和早白垩世 2 期伸展事件的确定,为研究蒙古—华北地块晚中生代大陆地球动力学过程提供了新的视角。

长期以来,有关这一东亚大陆演化驱动机制问题,总体表现为古太平洋板块的俯冲作用^[86-88]和蒙古—鄂霍茨克洋的闭合^[27, 70, 75, 77]之争。

多数学者认为,华北克拉通的破坏与古太平洋板块的俯冲有关,其远程效应引起华北克拉通大规模的早白垩世巨量岩浆作用和克拉通破坏高潮,造成大规模的中下地壳伸展^[26, 28, 89-90],而中—晚侏罗世古太平洋对华北克拉通的岩石圈改造主要局限于华北东部、辽西以东地区。岩相古地理的资料研究表明,华北克拉通东部侏罗纪地层明显缺失,标志着该区在侏罗纪处于隆升的构造背景^[26],表现为俯冲挤压导致的地壳加厚,并形成华北东部侏罗纪花岗岩与东北张广才岭等地区连成 NE 向展布的低温、富水花岗岩带,平行于欧亚大陆边缘的古太平洋俯冲带^[28, 91]。显然,无论是从空间上,还是时间上,位于内蒙古中部的晚侏罗世沙尔哈达 A 型花岗岩都不太可能是古太平洋板块俯冲作用下的产物。古地磁和地质年代学研究表明,蒙古—鄂霍茨克洋盆于晚侏罗世剪刀式迅速闭合^[29, 92-94]。晚侏罗世—早白垩世早期,大兴安岭和冀北—辽西地区碱性—亚碱性过渡性质的火山岩及流纹岩广泛出露,晚侏罗世有大兴安岭北部的塔木兰沟组^[95](约 162 Ma)、南部的满克头鄂博组^[96]、冀北—辽西地区的髫髻山组和蓝旗组^[97-98](165~157 Ma);早白垩世有大兴安岭北部的吉祥峰组(约 142 Ma)、南部的玛尼吐组(约 142 Ma)碱性流纹岩^[96],以及冀北—辽西地区的张家口组^[99](约 135 Ma)。这 2 期火山岩(晚侏罗世和早白垩世早期)指示区域伸展环境的碱性火山岩组合分别与燕山运动 A 幕和 B 幕之后的伸展环境对应,且具有自北向南变年轻的趋势^[100-101],暗示这 2 期岩浆事件与蒙古—鄂霍茨克构造体系的演化有关^[87]。因此,基于这种空间契合和时间关联,蒙古—华北北部陆块中—晚侏罗世的岩浆活动主要受控于蒙古—鄂霍茨克构造域的地球动

力学过程,研究区沙尔哈达 A 型花岗岩为蒙古—鄂霍茨克洋闭合后造山伸展背景的产物。

5 结 论

(1) 内蒙古沙尔哈达花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 154.6 ± 1.2 Ma,形成时代为晚侏罗世。

(2) 沙尔哈达斑状黑云母碱长花岗岩富 SiO_2 (74.86%~75.97%)、 K_2O (4.4%~4.95%),贫 MgO (0.044%~0.22%)、 CaO (0.38%~0.77%)、 TiO_2 (0.046%~0.18%) 和 P_2O_5 (0.007%~0.042%), $\text{A/CNK}=1.03\sim 1.09$,小于 1.1,强烈亏损 Ba、Sr、Eu、P、Ti,具有典型的右倾“海鸥型”稀土元素分配模式,为典型的铝质 A 型花岗岩。

(3) Sr-Nd-Hf 同位素分析表明,沙尔哈达 A 型花岗岩可能源于新生中基性地壳物质的部分熔融及其后的结晶分异作用。

(4) 沙尔哈达 A 型花岗岩为晚侏罗世蒙古—鄂霍茨克构造域造山后伸展作用的产物,与蒙古—华北北部地块散布的其他 A 型花岗岩共同指示中—晚侏罗世广泛的中下地壳伸展。

参考文献

- [1] 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,(6): 1217-1238.
- [2] Whalen J B, Currie K L, Chappel B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [3] Creaser R A, Price R C, Wormald R J. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model [J]. Geology, 1991, 19(2): 163-166.
- [4] Patiño Douce A E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids [J]. Geology (Boulder), 1997, 25(8): 743-746.
- [5] Landenberger B, Collins W J. Derivation of A-type Granites from a Dehydrated Charnockitic Lower Crust: Evidence from the Chaelundi Complex, Eastern Australia [J]. Journal of Petrology, 1996, 37(1): 145-170.
- [6] Frost C D, Frost B R. Reduced rapakivi-type granites; the tholeiite connection [J]. Geology (Boulder), 1997, 25(7): 647-650.
- [7] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. Journal of Petrology, 1997, 38(3): 371-391.
- [8] Dall'Agnol R, de Oliveira D C. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites [J]. Lithos, 2007, 93(3): 215-233.
- [9] Turner S P, Foden J D, Morrison R S. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia [J]. Lithos, 1992, 28(2): 151-179.
- [10] Mushkin A, Navon O, Halicz L, et al. The Petrogenesis of A-type

- Magma from the Amram Massif, Southern Israel [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(5): 815–832.
- [11] Dall'Agnol R, Frost C D, Rämö O T. IGCP Project 510 “A-type Granites and Related Rocks through Time”: Project vita, results, and contribution to granite research[J]. *Lithos*, 2012, 151: 1–16.
- [12] Kemp A I S, Wornald R J, Whitehouse M J, et al. Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, southeastern Australia[J]. *Geology (Boulder)*, 2005, 33(10): 797–800.
- [13] Yang J, Wu F, Chung S, et al. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 2006, 89(1/2): 89–106.
- [14] Zhang X, Yuan L, Xue F, et al. Contrasting Triassic ferroan granitoids from northwestern Liaoning, North China: Magmatic monitor of Mesozoic decratonization and a craton–orogen boundary[J]. *Lithos*, 2012, 144/145: 12–23.
- [15] Sylvester. Post-collisional alkaline granites [J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(3): 261–280.
- [16] Rogers J J W, Greenberg J K. Late-orogenic, Post-orogenic, and anorogenic granites: Distinction by major-element and trace-element chemistry and possible origins[J]. *The Journal of Geology*, 1990, 98(3): 291–309.
- [17] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrologic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641–644.
- [18] Eby G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. *Lithos*, 1990, 26(1/2): 115–134.
- [19] 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, (4): 297–306.
- [20] 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, (1): 57–66.
- [21] 贾小辉, 王强, 唐功建. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(3): 465–480.
- [22] 许强伟, 王玘, 王志强, 等. 内蒙古克什克腾旗长岭子斜长花岗岩斑岩锆石 U–Pb 年龄、成因与碰撞造山作用[J]. *中国地质*, 2021, 48(1): 229–246.
- [23] 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 古亚洲洋俯冲板片断离与后造山伸展: 贺根山缝合带火山岩年代学和地球化学证据[J]. *地质学报*, 2020, 94(12): 3561–3580.
- [24] 杜兵盈, 浦全生, 刘宇威, 等. 古亚洲洋的发生–发展–消亡的历史——来自黑龙江省西北部古生代(O_1 – C_1)地层的连续沉积记录[J]. *地质与资源*, 2018, 27(1): 16–21.
- [25] Zhang X, Yuan L, Wilde S A. Crust/mantle interaction during the construction of an extensional magmatic dome: Middle to Late Jurassic plutonic complex from western Liaoning, North China Craton[J]. *Lithos*, 2014, 205: 185–207.
- [26] Zhu R, Yang J, Wu F. Timing of destruction of the North China Craton[J]. *Lithos*, 2012, 149: 51–60.
- [27] Wang T, Zheng Y, Zhang J, et al. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes[J]. *Tectonics*, 2011, 30(6): TC6007.
- [28] Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 2005, 221(1): 127–156.
- [29] Zorin Y A. Geodynamics of the western part of the Mongolia–Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 1999, 306(1): 33–56.
- [30] 俞祁安, 胡鹏, 曾威, 等. 内蒙古苏尼特左旗东苏 A 型花岗岩的锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(2): 229–241.
- [31] 石玉若, 刘敦一, 张旗, 等. 内蒙古苏左旗地区闪长–花岗岩类 SHRIMP 年代学[J]. *地质学报*, 2004, (6): 789–799.
- [32] 汤文豪, 张志诚, 李建锋, 等. 内蒙古苏尼特右旗查干诺尔石炭系本巴图组火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2011, 47(2): 321–330.
- [33] 熊光强, 刘敏, 张达, 等. 内蒙古西乌旗迪彦庙蛇绿岩带内辉长岩地球化学及年代学[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2020, 50(5): 1599–1614.
- [34] 王树庆, 胡晓佳, 杨泽黎. 内蒙古二连浩特北部查干楚鲁地区变质岩系碎屑锆石年代学及地质意义[J]. *地质调查与研究*, 2020, 43(4): 287–292.
- [35] 王帅, 李英杰, 王金芳, 等. 内蒙古西乌旗晚石炭世马尼塔埃达克岩的发现及其对古亚洲洋东段洋内俯冲的约束[J]. *地质通报*, 2021, 40(1): 82–94.
- [36] 张宗超. 内蒙沙尔哈达花岗岩地质地球化学研究 [D]. 石家庄经济学院硕士学位论文, 2015.
- [37] 石玉若, 刘翠, 邓晋福, 等. 内蒙古中部花岗岩类年代学格架及该区构造岩浆演化探讨[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3155–3171.
- [38] 李英杰, 王金芳, 李红阳, 等. 内蒙古西乌旗梅劳特乌拉蛇绿岩的识别[J]. *岩石学报*, 2015, 31(5): 1461–1470.
- [39] 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 内蒙古梅劳特乌拉蛇绿岩中埃达克岩的发现及其演化模式[J]. *地质学报*, 2017, 91(8): 1776–1795.
- [40] 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.
- [41] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot/EX Version 3.00: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1–70.
- [42] 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 锆石 Hf 同位素组成的 LA–MC–ICP–MS 测定[J]. *地质通报*, 2011, 30(10): 1508–1513.
- [43] 肖志斌, 张然, 叶丽娟, 等. 沥青铀矿 (GBW04420) 的微区原位 U–Pb 定年分析[J]. *地质调查与研究*, 2020, 43(1): 1–4.
- [44] 李国占, 郝爽, 王家松, 等. 浅谈多接收器电感耦合等离子体质谱仪的日常维护[J]. *地质调查与研究*, 2019, 42(4): 271–277.
- [45] Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5): 602–622.
- [46] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184(1): 123–138.
- [47] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, (2): 185–220.
- [48] 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别[J]. *地质通报*, 2008, 27(1): 1–18.

- [49] 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.
- [50] 张旗, 李承东. 花岗岩[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [51] 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.
- [52] 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. A 型岩套的分类、判别标志和成因[J]. 高校地质学报, 2003, (4): 573–591.
- [53] 许保良, 阎国翰, 张臣, 等. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源[J]. 地学前缘, 1998, (3): 113–124.
- [54] Hildreth W, Halliday A N, Christiansen R L. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone Plateau volcanic field[J]. Journal of Petrology, 1991, 32(1): 63–138.
- [55] Whitaker M L, Whitaker M L, Nekvasil H, et al. Can crystallization of olivine tholeiite give rise to potassic rhyolites?—an experimental investigation[J]. Bulletin of Volcanology, 2008, 70(3): 417–434.
- [56] 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.
- [57] Glazner A F. Thermal limitations on incorporation of wall rock into magma[J]. Geology (Boulder), 2007, 35(4): 319–322.
- [58] 王兴安, 徐仲元, 刘正宏, 等. 大兴安岭中部柴河地区钾长花岗岩的成因及构造背景: 岩石地球化学、锆石 U–Pb 同位素年代学的制约[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2647–2655.
- [59] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Phanerozoic crustal growth: U–Pb and Sr–Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. Tectonophysics, 2000, 328(1): 89–113.
- [60] 洪大卫, 王式洗, 谢锡林, 等. 从中亚正 $\epsilon_{(Nd)}$ 值花岗岩看超大陆演化和大陆地壳生长的关系[J]. 地质学报, 2003, (2): 203–209.
- [61] 洪大卫, 王式, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 2000, (2): 441–456.
- [62] Skjerlie K P, Johnston A D. Fluid–Absent Melting Behavior of an F–Rich Tonalitic Gneiss at Mid–Crustal Pressures: Implications for the Generation of Anorogenic Granites[J]. Journal of Petrology, 1993, 34(4): 785–815.
- [63] 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 and Petrology, 1982, 80(2): 189–200.
- [64] 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.
- [65] Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. Lithos, 2007, 97(1): 1–29.
- [66] 罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 华北板块北缘乌梁素太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U–Pb 定年及构造意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(3): 515–526.
- [67] 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 内蒙古西乌旗匠匠山晚侏罗世——早白垩世 A 型花岗岩锆石 U–Pb 年龄及构造环境[J]. 地质通报, 2018, 37(2/3): 382–396.
- [68] 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.
- [69] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- [70] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43–55.
- [71] Wang T, Guo L, Zheng Y D, et al. Timing and processes of late Mesozoic mid–lower–crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U–Pb ages from metamorphic core complexes[J]. Lithos, 2012, 154: 315–345.
- [72] Donskaya V, Windley B F, Mazukabzov A M, et al. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia [J]. Journal of the Geological Society (London), 2008, 165(1): 405–421.
- [73] Mazukabzov A M, Donskaya T V, Gladkochub D P, et al. Structure and age of the metamorphic core complex of the Burgutui ridge (southwestern Transbaikalian region)[J]. Doklady Earth Sciences, 2006, 407(1): 179–183.
- [74] Darby B J, Davis G A, Zhang X H. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulushan, western Liaoning Province, Northwest China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11: 145–155.
- [75] Meng Q. What drove late Mesozoic extension of the northern China–Mongolia tract? [J]. Tectonophysics, 2003, 369(3): 155–174.
- [76] Ritts B D, Darby B J, Cope T. Early Jurassic extensional basin formation in the Daqing Shan segment of the Yinshan belt, North China Block, Inner Mongolia [J]. Tectonophysics, 2001, 339(3): 239–258.
- [77] Graham S A, Hendrix M S, Johnson C L, et al. Sedimentary record and tectonic implications of Mesozoic rifting in Southeast Mongolia [J]. Geological Society of America Bulletin, 2001, 113(12): 1560–1579.
- [78] Wang F, Zhou X H, Zhang L C, et al. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing’an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 251(1/2): 179–198.
- [79] Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. Late Mesozoic calc–alkaline volcanism of post–orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, 121(1): 115–135.
- [80] Guo L, Wang T, Castro A, et al. Petrogenesis and evolution of late Mesozoic granitic magmatism in the Hohhot metamorphic core complex, Daqing Shan, North China [J]. International Geology Review, 2012, 54(16): 1885–1905.
- [81] Charles N, Gumiaux C, Augier R, et al. Metamorphic Core Complexes vs. synkinematic plutons in continental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(1): 261–278.
- [82] 薛富红, 张晓晖, 邓江夏, 等. 内蒙古中部达拉地区晚侏罗世 A 型花岗岩: 地球化学特征、岩石成因与地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(6): 1774–1788.
- [83] 祝洪涛, 巫建华, 唐大伟, 等. 内蒙古东部红山子复式岩体晚侏罗世黑云母花岗岩地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 2020,

- 66(3): 765–785.
- [84] 陈志广, 张连昌, 吴华英, 等. 内蒙古西拉木伦成矿带碾子沟钼矿区 A 型花岗岩地球化学和构造背景[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 879–889.
- [85] 解洪晶, 武广, 朱明田, 等. 内蒙古道郎呼都格地区 A 型花岗岩年代学、地球化学及地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 483–494.
- [86] Davis G A, Darby B J. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2010, 1(1): 1–20.
- [87] 郑志东, Davis G A, 王琮. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. 地质学报, 2000, 19(4): 289–302.
- [88] Traynor J J, Sladen C. Tectonic and stratigraphic evolution of the Mongolian People's Republic and its influence on hydrocarbon geology and potential[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(1): 35–52.
- [89] Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, et al. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 131: 49–87.
- [90] Chen B, Jahn B M, Suzuki K. Petrological and Nd–Sr–Os isotopic constraints on the origin of high-Mg adakitic rocks from the North China Craton: Tectonic implications[J]. *Geology*, 2013, 41(1): 91–94.
- [91] 孙金凤, 杨进辉. 华北中生代岩浆作用与去克拉通化[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(5): 577–592.
- [92] 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1620–1646.
- [93] Cocks L R M, Torsvik T H. The dynamic evolution of the Palaeozoic geography of eastern Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 117: 40–79.
- [94] Metelkin D V, Vernikovsky V A, Kazansky A Y, et al. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18(2): 400–419.
- [95] 孟恩, 许文良, 杨德彬, 等. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U–Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1209–1226.
- [96] 王建国, 和钟铎, 许文良. 大兴安岭南端钠闪石流纹岩的岩石成因: 年代学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 853–863.
- [97] 胡健民, 刘晓文, 杨之青. 辽西地区燕山板内造山带早中生代构造变形的年代学限定[J]. 岩石学报, 2007(3): 605–616.
- [98] 赵越, 张拴宏, 徐刚, 等. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件[J]. 地质通报, 2004, 23(2/3): 854–863.
- [99] 张宏, 袁洪林, 胡兆初, 等. 冀北滦平地区中生代火山岩地层锆石 U–Pb 测年及启示[J]. 地球科学, 2005, (6): 707–720.
- [100] Zhang J H, Gao S, Ge W C, et al. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination[J]. *Chemical Geology*, 2010, 276(3/4): 144–165.
- [101] Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, et al. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, Northeastern China[J]. *Lithos*, 2008, 102(1/2): 138–157.