



大兴安岭乌奴耳地区石炭纪花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄及形成地质背景

李利阳¹, 韩 瑶², 伍光英¹, 侯红星¹, 刘 博¹, 刘根源³

1. 中国地质调查局 廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000;

2. 山东省地质环境监测总站, 山东 济南 250014;

3. 中国地质调查局 地球物理调查中心, 河北 廊坊 065000

摘 要: 对乌奴耳地区花岗闪长岩进行的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和岩石地球化学测试结果表明:花岗闪长岩的锆石 U-Pb 加权平均年龄为 332.6 ± 6.9 Ma (MSWD=3.1), 时代为早石炭世。岩石地球化学数据显示,花岗闪长岩属准铝质低钾(拉斑)系列。花岗闪长岩总体富集大离子亲石元素,亏损高场强元素。Th、U 表现,为明显正异常,Nb、Ta、Zr、Ti 表现明显负异常,La、Hf、Lu 等富集, δEu 值为 0.61~0.69,具有负铕异常,与 I 型花岗岩相似,具有火山弧花岗岩的特征,表明该侵入岩的形成与俯冲作用有关。综合区域地质特征及本研究认为,花岗闪长岩为早石炭世古亚洲洋俯冲时的产物,可为古亚洲洋及东北地块构造演化研究提供新的约束和佐证实例。

关键词: 花岗闪长岩;U-Pb 年龄;石炭纪;大兴安岭

ZIRCON U-Pb AGE AND GEOLOGICAL BACKGROUND OF CARBONIFEROUS GRANODIORITES IN WUNUER AREA, DAXINGANLING MOUNTAINS

LI Li-yang¹, HAN Yao², WU Guang-ying¹, HOU Hong-xing¹, LIU Bo¹, LIU Gen-yuan³

1. Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Langfang 065000, Hebei Province, China;

2. Shandong Geological Environmental Monitoring Station, Jinan 250014, China;

3. Geophysical Survey Center of China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract: The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and petrogeochemical results show that the granodiorite in Wunuer area was formed in the Early Carboniferous, with weighted mean zircon U-Pb age of 332.6 ± 6.9 Ma (MSWD=3.1), belonging to the quasi-aluminous low potassium (tholeiite) series. The granodiorite is generally characterized by enrichment of LILEs and depletion of HFSEs, as well as obviously positive Th and U anomalies, notably negative Nb, Ta, Zr and Ti anomalies, enriched La, Hf and Lu, and negative Eu anomaly, which is similar to I-type granite and has the characteristics of volcanic arc granite, indicating that the formation of the intrusive rock is related to subduction. Combined with the regional geological characteristics, it is concluded that the granodiorite is the product of subduction of Paleo-Asian Ocean in Early Carboniferous, which may provide new constraint and evidence for the study of tectonic evolution of Paleo-Asian Ocean and Northeast China block.

Key words: granodiorite; U-Pb age; Carboniferous; Daxinganling Mountains

收稿日期:2021-08-18;修回日期:2021-10-27. 编辑:李兰英.

基金项目:中国地质调查局项目“内蒙古高吉山林场、哈拉沟幅 1:5 万区域地质矿产调查”(DD2016007808);“内蒙古化德-河北康保德包图等 4 幅 1:5 万区域地质调查”(DD20208003)。”

作者简介:李利阳(1989—),男,硕士,工程师,主要从事区域地质矿产调查,通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号,E-mail//406054622@qq.com

中亚造山带(CAOB)是世界最大的显生宙增生型造山带之一,经历了漫长而又复杂的增生造山过程,其形成与古亚洲洋的构造演化密切相关。

大兴安岭地区位于中亚造山带东段,是研究造山带构造演化的重要窗口之一。该区自北向南依次跨越额尔古纳、兴安和松嫩3个地块,各地块之间分别以新林-喜桂图缝合带、黑河-贺根山缝合带和牡丹江缝合带为界^[1-17]。额尔古纳地块与兴安地块以新林-喜桂图缝合带为界,研究区位于新林-喜桂图缝合带内。一些学者认为新林-喜桂图缝合带形成于新元古代^[17-19],于早古生代(约500 Ma)时期碰撞拼贴。该条缝合带以新林蛇绿岩、塔源辉长岩、吉峰蛇绿岩、头道桥蓝片岩等为标志,空间展布特征较为清晰^[2,5-6]。大乌苏蛇绿岩的形成时代和侵入新林蛇绿岩的斜长花岗岩的年龄显示,新林蛇绿岩可能形成于早奥陶世,详细的地球化学研究表明,其为弧后盆地扩张过程中的早期产物,就位时代可能为早石炭世^[20]。近年来,随着大兴安岭地质工作的深入研究,在头道桥南侧识别出乌尔其汗-乌奴耳多处蛇绿混杂岩,岩石组合为变玄武岩→变辉长岩→变辉绿岩→变辉绿玢岩→放射虫硅质岩,多以断块形式分布于奥陶纪、泥盆纪地层之间,

其中乌奴耳地区变辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 344~328 Ma^[45],乌奴耳东南雅鲁地区的扁辉长岩的形成时代为 430±8 Ma^[9]。因此,额尔古纳地块与兴安地块可能并未是一次性的简单的地块拼合,两者之间可能经历过多次洋盆俯冲作用与岩浆弧形成事件。

研究区发育大量的晚古生代花岗岩,记录了这一时期的构造演化过程。但其研究程度很低,一直缺少精确的年代学和系统的地球化学研究,形成环境一直存在争议。本文通过对牙克石乌奴耳地区的花岗闪长岩进行年代学、岩石地球化学研究,探讨岩石成因及形成的构造背景,以期区域构造演化提供新的依据。

1 地质背景

研究区位于内蒙古大兴安岭北部牙克石市乌奴耳镇,构造上位于新林-喜桂图缝合带内(图1)。区内古生界为北疆-兴安地层大区之兴安地层区,主体属东乌-呼玛地层分区;中、新生界属滨太平洋地层区之大兴安岭-燕山地层分区,博克图-二连浩特地层小区。奥陶纪出露地层主要为多宝山组和裸河组,多宝山组为一套具有岛弧特征的中酸性火山岩^[21],裸河组是一套具有活动大陆边缘性质的陆缘碎屑岩系^[22-23]。区内

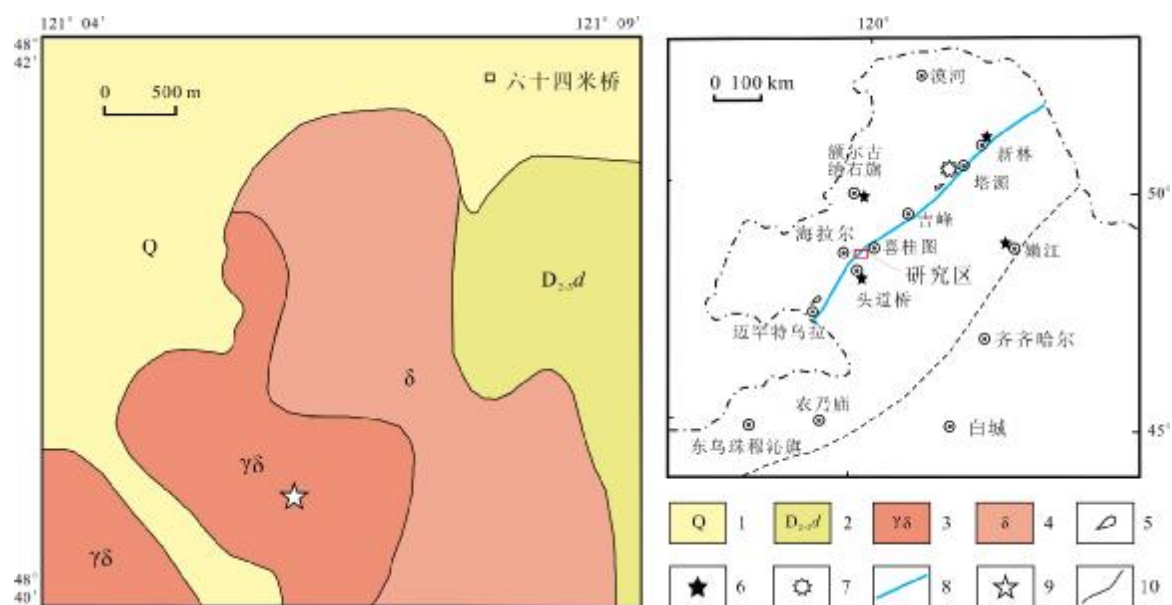


图1 大兴安岭乌奴耳地区地质简图及采样位置

Fig. 1 Geological sketch map and sampling location of Wunuer area, Daxinganling Mountains

1—第四系(Quaternary); 2—大民山组(Daminshan fm.); 3—花岗闪长岩(granodiorite); 4—闪长岩(diorite); 5—蛇绿岩(ophiolite); 6—蓝片岩(blueschist); 7—辉长岩(gabbro); 8—拼合带(suture zone); 9—采样位置(sampling location); 10—地质界线(geological boundary)

志留纪地层缺失,泥盆纪出露地层主要为泥鳅河组和大民山组,泥鳅河组为一套陆缘碎屑岩^[24],大民山组为一套具有岛弧性质的中酸性火山岩地层^[25-26]。中生代以来受鄂霍次克洋闭合和环太平洋构造域的双重影响,早期北东向断裂复活,形成了一系列受北东向断裂构造控制的火山隆起及火山断(拗)陷盆地,发生强烈的火山喷发活动,形成满克头鄂博组、玛尼吐组及白音高老组火山岩。满克头鄂博组主体为一套中酸性火山岩,玛尼吐组主体为一套中性火山岩,白音高老组主体为一套酸性火山岩。研究区发育大量晚古生代花岗岩,主要为闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩,这些花岗岩普遍侵入于奥陶系、泥盆系之中,被中生代火山岩及第四系覆盖。本研究的花岗闪长岩侵入于闪长岩中,被第四系覆盖(图1)。

2 岩石学特征

本研究的花岗闪长岩位于乌奴耳镇六十四米桥南西3 km处,呈岩基或岩枝产出。风化面为灰褐色,新鲜面为浅灰黄色,花岗结构(图2),块状构造。主要矿物成分有石英、斜长石、钾长石、角闪石。斜长石无色,透明,自形—半自形板状,聚片双晶,粒径0.30~2.00 mm,含量50%~60%;石英无色,透明,他形粒状,粒径0.20~2.00 mm,含量20%~30%;钾长石无色,半自形板状,粒径0.20~1.50 mm,含量约为10%;角闪石淡绿色,透明,半自形—他形柱状,粒径0.10~1.00 mm,含量10%~15%。岩石蚀变现象普遍,可见绿帘石化、绿泥石化、绢云母化。

3 年代学特征

锆石分选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,经重液浮选和电磁分离分选后,在双目镜下挑选出晶型完好、透明度高、无包裹体和无裂纹的锆石颗粒作为测定对象。挑选好的锆石和标样一起固定在环氧树脂中抛光制靶,进行阴极发光、透射光和单偏光照相。锆石阴极发光(CL)图像分析在北京锆石领航科技有限公司高分辨热场发射能谱阴极发光室进行,锆石原位 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析测年在北京市科荟测试技术有限公司进行,测年所用分析仪器为 Thermo Fisher Neptune 型多接收器电感耦合等离子体质谱仪及 SIUP193FXArF 型激光剥蚀系统(LA-ICP-MS),激光剥蚀斑束 35 μm ,激光量密度 10~13 J/cm²,频率 8~10 Hz,对测试数据进行普通铅校正,年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot 程序^[27-29]。

样品(U-Pb20171003)采自工作区乌奴耳镇六十四米桥南西(取样点位置: X 359475.33, Y 5394925.6, 由 GPS 确定),重约 5 kg,测年采用单颗粒锆石激光剥蚀法。锆石阴极发光图像显示,锆石多呈短柱状,个别为长柱状,自形程度较好,棱角平直,晶形完整,颗粒大小不一,长宽比在 3:1~1:1 之间,可观察到清晰的韵律环带结构(图3),较高的 Th/U 比值(表1)表明其具有岩浆锆石的特征。锆石晶体测定位置的选取,需要结合透射光、反射光和 CL 图像,以避免锆石晶体中的裂纹和包裹体,选取的分析点均位于明显的岩浆环带部位,剔除早期变质锆石及后期热事件形成的锆石,花岗闪长岩 11 颗锆石颗粒的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定

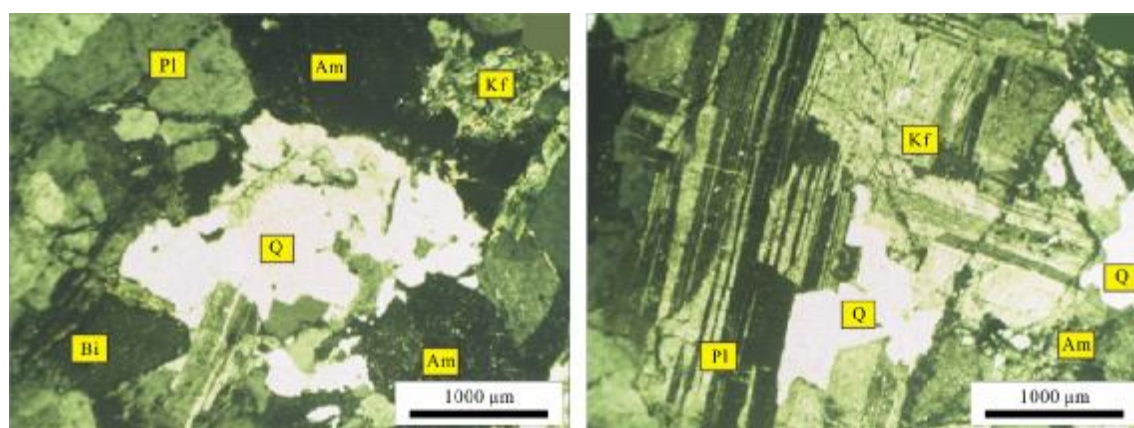


图2 大兴安岭乌奴耳地区花岗闪长岩显微镜下照片

Fig. 2 Microphotographs of granodiorites in Wunuer area, Daxinganling Mountains

Q—石英(quartz); Pl—斜长石(plagioclase); Kf—钾长石(K-feldspar); Bi—黑云母(biotite); Am—角闪石(amphibole)

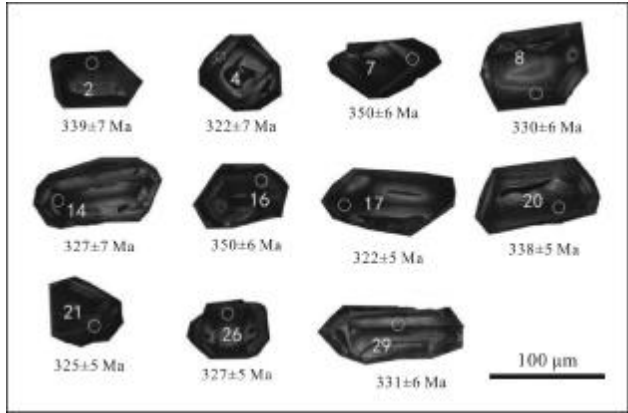


图3 样品(U-Pb20171003)锆石 CL 图像特征及测年结果
Fig. 3 CL images of zircons in granodiorite sample and dating results

显示,花岗闪长岩的年龄在 332.6 ± 6.9 Ma(图 4),为早石炭世。

4 岩石化学特征

4.1 样品采集及测试方法

岩石地球化学测试样品均为未风化、未蚀变的新鲜样品。样品在核工业北京地质研究院分析中心测试完成。将测试样品粉碎,研磨至 200 目以下的粉末备用。主量元素采用 X 射线荧光分析,使用仪器为

AxiosmAX X 射线荧光光谱仪,检测方法和依据参照 GB/T 14506.14—2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 14 部分:氧化亚铁量测定》,GB/T 14506.28—2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分:16 个主次成分量测定》;微量元素采用 NexION300D 等离子体质谱仪,检测方法和依据参照 GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分:44 个元素量测定》。

4.2 主量元素

测试结果(表 2,扫描首页 OSID 二维码可见)显示,样品烧失量范围在 1.76%~2.40%之间,平均值 2.15%。首先对所测岩石地球化学数据去掉烧失量以后,将其余的主元素氧化物分析数据换算成 100%,而后进行地球化学投图,识别岩浆岩的岩类。 SiO_2 含量(质量分数)为 62.00%~64.74%,平均值为 63.92%,属中性岩范畴。在侵入岩 TAS 分类图上(图 5),样品均落于花岗闪长岩区域,属亚碱性系列。分异指数 $\text{DI}=53.09\sim59.83$,平均值为 56.87,固结指数 $\text{SI}=34.01\sim36.61$,平均值为 35.06,表明岩浆分异程度一般,符合中性岩演化特征。侵入岩 $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$ 图(图 6)显示样品均落于低钾(拉斑)系列。 Al_2O_3 含量为 12.81%~13.77%,铝饱和指数 A/CNK 为 0.79~0.87。在 A/CNK--A/NK 判别图解(图 7)中样品落于准铝质区,因此研究

表 1 花岗闪长岩(U-Pb20171003) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄结果一览表
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of granodiorite sample (U-Pb20171003)

测点号	含量			Th/U	同位素比值								年龄/Ma						谐和度
	Pb/ 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	σ	
2	447.69	1448.77	540.58	2.68	0.0556	0.0020	0.4186	0.0182	0.0541	0.0012	0.0127	0.0002	255	4	355	3	339	7	95%
4	113.72	290.87	215.10	1.35	0.0500	0.0027	0.3518	0.0194	0.0512	0.0011	0.0158	0.0004	317	9	306	15	322	7	95%
7	406.25	878.99	473.08	1.86	0.0556	0.0021	0.4295	0.0166	0.0558	0.0010	0.0191	0.0004	383	8	363	12	350	6	96%
8	149.35	389.90	225.71	1.73	0.0503	0.0034	0.3677	0.0257	0.0526	0.0010	0.0160	0.0005	320	10	318	19	330	6	96%
14	159.32	371.20	252.16	1.47	0.0546	0.0032	0.3927	0.0248	0.0520	0.0012	0.0185	0.0005	370	11	336	18	327	7	97%
16	305.62	710.56	395.08	1.80	0.0576	0.0026	0.4441	0.0208	0.0558	0.0010	0.0185	0.0004	370	9	373	15	350	6	93%
17	527.27	1306.66	658.09	1.99	0.0574	0.0022	0.4132	0.0177	0.0512	0.0009	0.0177	0.0004	354	7	351	13	322	5	91%
20	505.65	1289.24	511.14	2.52	0.0597	0.0030	0.4417	0.0199	0.0538	0.0008	0.0182	0.0004	365	7	371	14	338	5	90%
21	255.30	630.51	588.07	1.07	0.0546	0.0020	0.3923	0.0151	0.0517	0.0008	0.0180	0.0003	361	7	336	11	325	5	96%
26	402.90	1109.51	512.88	2.16	0.0502	0.0018	0.3604	0.0138	0.0521	0.0010	0.0176	0.0005	353	10	312	10	327	6	95%
29	99.72	221.10	212.27	1.04	0.0590	0.0038	0.4258	0.0286	0.0528	0.0010	0.0194	0.0005	388	11	360	20	331	6	91%

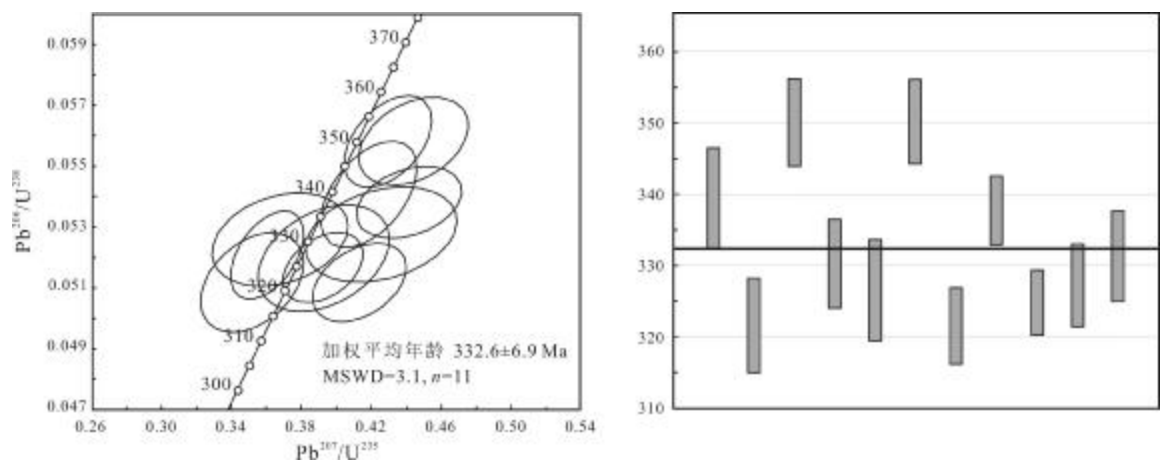


图 4 样品(U-Pb20171003)U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄

Fig. 4 U-Pb concordia diagram and weighted mean age for granodiorite sample

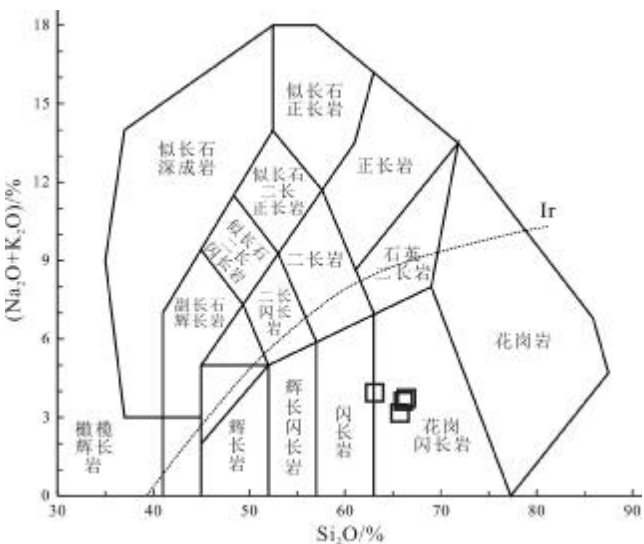


图 5 乌奴耳地区花岗闪长岩 TAS 分类图

Fig. 5 The TAS diagram for granodiorites in Wunuer area

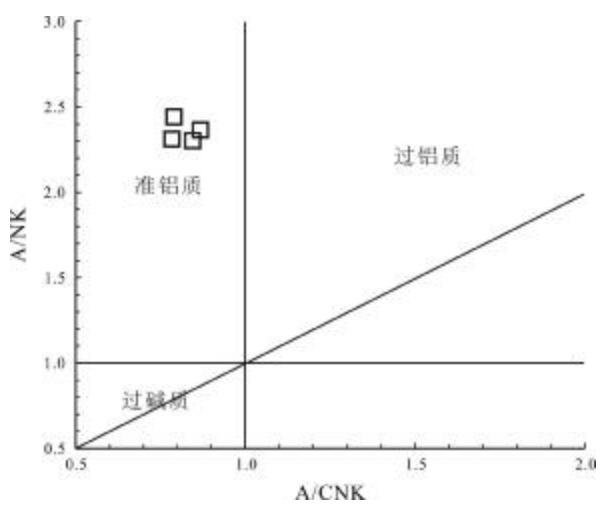


图 7 乌奴耳地区花岗闪长岩 A/CNK-A/NK 判别图解

Fig. 7 The A/CNK-A/NK diagram for granodiorites in Wunuer area

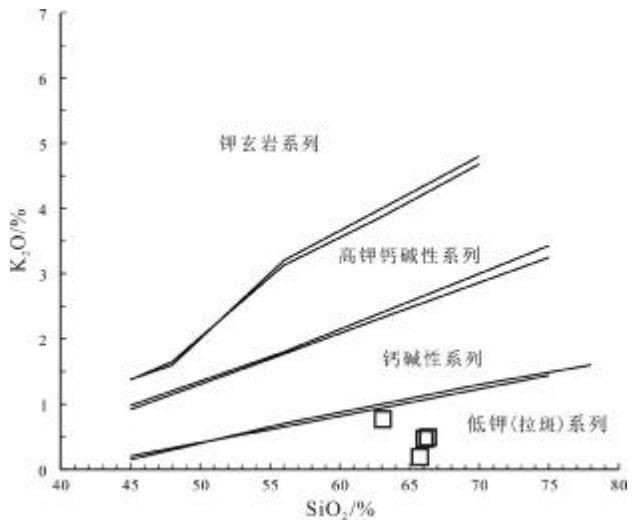


图 6 乌奴耳地区花岗闪长岩SiO₂-K₂O 图解

Fig. 6 The SiO₂-K₂O diagram for granodiorites in Wunuer area

区花岗闪长岩属准铝质低钾(拉斑)系列。

4.3 微量元素特征

花岗闪长岩的微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 8a)显示整体呈斜率较小的右倾。微量元素分析结果(表 2,扫描首页 OSID 二维码可见)显示,总体富集大离子亲石元素,亏损高场强元素。Th、U 表现为明显的正异常,Nb、Ta、Zr、Ti 表现为明显负异常,La、Hf、Lu 等富集,符合火山弧花岗岩的特征,表明该侵入岩的形成与俯冲作用有关。

4.4 稀土元素特征

花岗闪长岩稀土元素含量(表 2,扫描首页 OSID 二维码可见)显示: 稀土总量 ΣREE 为 $48.58\times10^{-6}\sim$

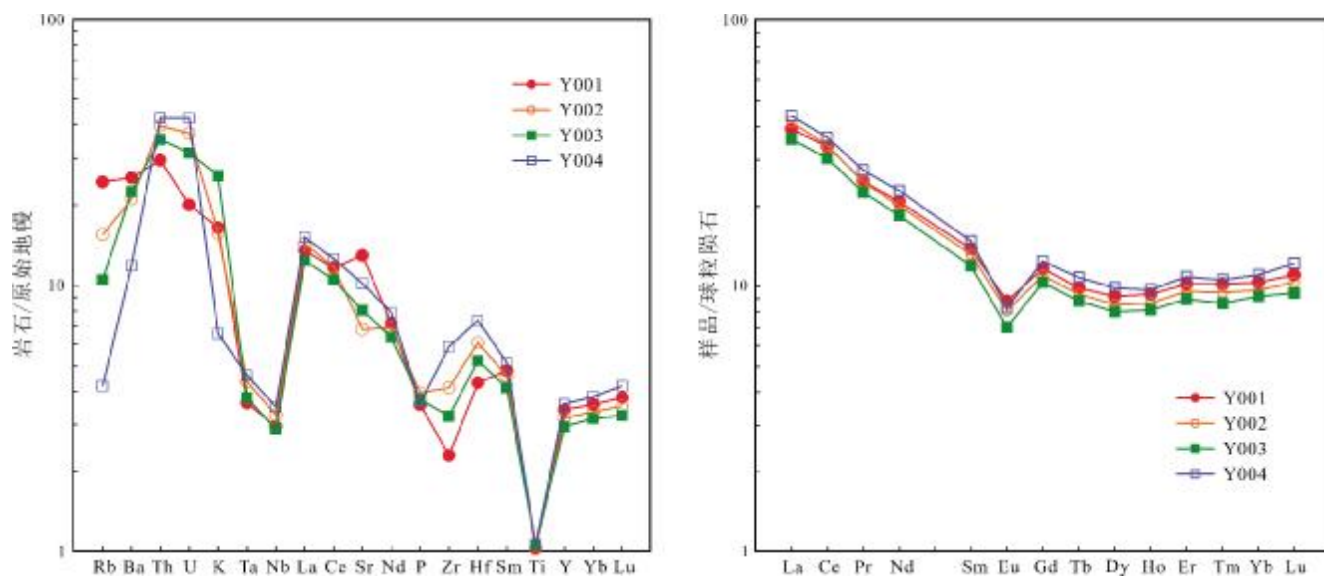


图 8 大兴安岭乌奴耳地区花岗闪长岩微量元素蛛网图和稀土元素配分曲线图

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams and chondrite-normalized REE patterns of granodiorites in Wunuer area

59.03×10^{-6} , 平均值为 53.93×10^{-6} , 稀土含量较低。LREE/HREE 为 4.64~4.98, 平均值为 4.78。La_N/Yb_N 为 3.78~4.28, 均值为 3.98。总体上岩体富集轻稀土, 重稀土相对亏损且较平坦, 轻重稀土分异明显。La_N/Sm_N = 3.14~3.50, 均值为 3.32。Gd_N/Yb_N = 1.13, 表明轻稀土分馏程度较高, 重稀土基本不分馏。稀土元素配分型式 (图 8b) 显示花岗闪长岩样品具有明显的负 Eu 异常, Eu 具“V”谷的曲线特征, δEu 值为 0.61~0.69, 平均值为 0.65, 指示具有基性斜长石的分离结晶作用发生。

5 讨论

5.1 岩石成因

研究区花岗闪长岩具有较高的 K₂O+Na₂O 和较低的 MgO、P₂O₅ 含量, 在 Whalen 等^[30]提出的一系列以 Ga/Al 值为基础的判别图解中, 所有样品均落在 I&S 型花岗岩区域 (图 9)。从岩相学角度来看, 典型 S 型花岗岩常含有堇青石、石榴石和原生的白云母等特征性的富铝矿物, 研究区花岗闪长岩未见典型 S 型花岗岩所含有的特征性的富铝矿物; 经 CIPW 标准矿物计算, 样品中普遍含微量刚玉分子, 含量均小于 2%, 从矿物学角度直接证明了岩石的弱过铝特性; 从地球化学的角度来看, 早石炭世花岗闪长岩为准铝质 (A/CNK = 0.785~0.869), 并没有变质沉积岩发生部分熔融形成熔体的强过铝质的特征。综合分析认为, 早石炭世花

岗闪长岩为准铝质 I 型花岗岩。

5.2 大地构造背景

在花岗岩 (Y+Nb)–Rb 构造判别图 (图 10a) 中, 花岗闪长岩样品均落入 VAG 火山弧花岗岩区。在花岗岩 (Yb+Ta)–Rb 构造判别图 (图 10b) 中, 花岗闪长岩样品也均落入 VAG 火山弧花岗岩区。综合表明花岗闪长岩的形成环境为板块俯冲作用下的火山弧环境。

乌尔其汗、免渡河、多宝山地区发现岛弧火山岩 (373.2 ± 5.3 Ma) 和高铯低钇 (adakitic) 花岗闪长岩 (331.2 ± 3.7 Ma), 表明晚泥盆世—早石炭世发生过大洋板片的俯冲作用^[31-34], 牙克石乌奴耳地区发现同碰撞背景下的正长花岗岩 (310.8 ± 2.5 Ma)^[35-36], 在大兴安岭西部多宝山、嫩江地区发现 310 Ma 左右具碰撞后伸张的流纹岩, 可见沿着头道桥—新林缝合带在晚泥盆世—早二叠世期间存在着俯冲→碰撞→后碰撞→造山后伸展的岩浆岩组合, 内蒙古狼山地区、锡林浩特毛登牧场、苏尼特左旗北部阿登锡勒大队一带也发现了早石炭世古亚洲洋俯冲作用下的石英闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等^[37-39], 本研究的花岗闪长岩可能就是这次俯冲作用下的产物。

6 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U–Pb 定年结果显示: 内蒙古牙克石乌奴耳地区花岗闪长岩成岩年龄为 $332.6 \pm$

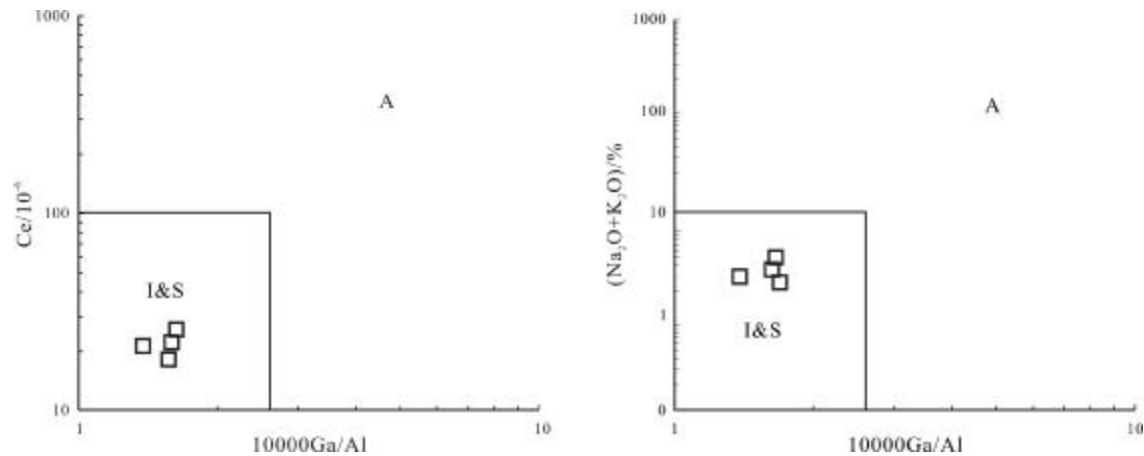


图 9 大兴安岭乌奴耳地区花岗闪长岩 Ga/Al–Ce 和 Ga/Al–(K₂O+Na₂O)图解
(据文献[30])

Fig. 9 The Ga/Al–Ce and Ga/Al–(K₂O+Na₂O) diagrams of granodiorites in Wunuer area
(After Reference [30])

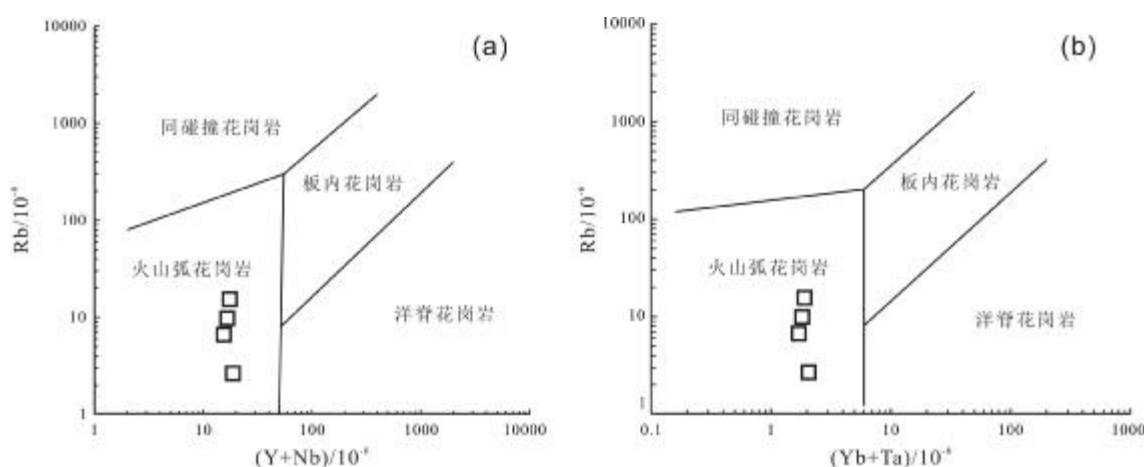


图 10 大兴安岭乌奴耳地区花岗闪长岩(Y+Nb)–Rb 和 (Yb+Ta)–Rb 构造判别图解
(据文献[30])

Fig. 10 The (Y+Nb)–Rb and (Yb+Ta)–Rb tectonic distrimination diagrams of granodiorites in Wunuer area
(After Reference [30])

6.9 Ma,为早石炭世.

(2)岩石学、岩相学及地球化学特征显示:花岗闪长岩为准铝质低钾(拉斑)系列 I 型花岗岩.

(3)结合区域地质特征,花岗闪长岩的区域构造背景属于俯冲作用下的火山弧环境,揭示了在早石炭世时期,古亚洲洋于研究区附近发生了一次俯冲作用.

参考文献(References):

[1]徐备,王志伟,张立杨,等. 兴蒙陆内造山带[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 2819–2844.
Xu B, Wang Z W, Zhao L Y, et al. The Xing-Meng intracontinent

orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(10): 2819–2844.
[2]徐备,赵盼,鲍庆中,等. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探[J]. 岩石学报, 2014, 30(7): 1841–1857.
Xu B, Zhao P, Bao Q Z, et al. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(7): 1841–1857.
[3]张兴洲,马玉霞,迟效国,等. 东北及内蒙古东部地区显生宙构造演化的有关问题[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1269–1285.
Zhao X Z, Ma Y X, Chi X G, et al. Discussion on Phanerozoic tectonic evolution in northeastern China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(5): 1269–1285.

- [4]张兴洲, 周建波, 迟效国, 等. 东北地区晚古生代构造-沉积特征与油气资源[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(5): 719-725.
Zhang X Z, Zhou J B, Chi X G, et al. Late Paleozoic tectonic-sedimentation and petroleum resources in northeastern China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(5): 719-725.
- [5]刘永江, 张兴洲, 金巍, 等. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 943-951.
Liu Y J, Zhang X Z, Jin W, et al. Late Paleozoic tectonic evolution in Northeast China[J]. Geology in China, 2010, 37(4): 943-951.
- [6]Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, et al. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt [J]. Gondwana Research, 2017, 43: 123-148.
- [7]刘永江, 冯志强, 蒋立伟, 等. 中国东北地区蛇绿岩[J]. 岩石学报, 2019, 35(10): 3017-3047.
Liu Y J, Feng Z Q, Jiang L W, et al. Ophiolite in the eastern Central Asian Orogenic Belt, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(10): 3017-3047.
- [8]冯志强. 大兴安岭北段古生代构造-岩浆演化[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 1-128.
Feng Z Q. The Paleozoic tectono-magmatic evolution of the northern Great Xing'an Range[D]. Changchun: Jilin University, 2015: 1-128.
- [9]Feng Z Q, Liu Y J, Li L, et al. Subduction, accretion, and collision during the Neoproterozoic-Cambrian orogeny in the Great Xing'an Range, NE China: Insights from geochemistry and geochronology of the Ali River ophiolitic mélange and arc-type granodiorites [J]. Precambrian Research, 2018, 311: 117-135.
- [10]冯志强, 刘永江, 金巍, 等. 东北大兴安岭北段蛇绿岩的时空分布及与区域构造演化关系的研究[J]. 地学前缘, 2019, 26(2): 120-136.
Feng Z Q, Liu Y J, Jin W, et al. Spatiotemporal distribution of ophiolites in the northern Great Xing'an Range and its relationship with the geotectonic evolution of NE China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(2): 120-136.
- [11]周建波, 张兴洲, 马志红, 等. 中国东北地区的构造格局与盆地演化[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 530-538.
Zhou J B, Zhang X Z, Ma Z H, et al. Tectonic framework and basin evolution in Northeast China[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 530-538.
- [12]张旗, 周国庆, 王焰. 中国蛇绿岩的分布、时代及其形成环境[J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 1-8.
Zhao Q, Zhou G Q, Wang Y, et al. The distribution of time and space of Chinese ophiolites, and their tectonic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(1): 1-8.
- [13]邵军, 李永飞, 周永恒, 等. 中国东北额尔古纳地块新太古代岩浆事件——钻孔片麻状二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 测年证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(2): 364-373.
Shao J, Li Y F, Zhou Y H, et al. Neo-Archaean magmatic event in Erguna massif of Northeast China: Evidence from the zircon LA-ICP-MS dating of the gneissic monzogranite from the drill [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(2): 364-373.
- [14]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.
Xu W L, Sun C Y, Tang J, et al. Basement nature and tectonic evolution of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt [J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1620-1646.
- [15]Zhang Y, Pei F P, Wang Z W, et al. Late Paleozoic tectonic evolution of the central Great Xing'an Range, Northeast China: Geochronological and geochemical evidence from igneous rocks [J]. Geological Journal, 2018, 53(1): 282-303.
- [16]赵英利, 李伟民, 温泉波, 等. 内蒙东部晚古生代构造格局: 来自中、晚二叠一早三叠世砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 岩石学报, 2016, 32(9): 2807-2822.
Zhao Y L, Li W M, Wen Q B, et al. Late Paleozoic tectonic framework of eastern Inner Mongolia: Evidence from the detrital zircon U-Pb ages of the Mid-late Permian to Early Triassic sandstones [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(9): 2807-2822.
- [17]赵英利, 刘永江, 李伟民, 等. 大兴安岭中段晚石炭世—早二叠世砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地球科学, 2018, 43(6): 2055-2075.
Zhao Y L, Liu Y J, Li W M, et al. Detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb age of Late Carboniferous to Early Permian sandstones in central Great Xing'an Range and its geological significance [J]. Earth Science, 2018, 43(6): 2055-2075.
- [18]李瑞山. 新林蛇绿岩[J]. 黑龙江地质, 1991, 2(1): 19-32.
Li R S. Xinling ophiolite [J]. Heilongjiang Geology, 1991, 2(1): 19-32.
- [19]胡道功, 谭成轩, 张海. 内蒙古阿里河地区中元古代蛇绿岩[J]. 中国区域地质, 1995(4): 334-338, 343.
Hu D G, Tan C X, Zhang H. Middle Proterozoic ophiolites in the Alihe area, Inner Mongolia [J]. Regional Geology of China, 1995 (4): 334-338, 343.
- [20]Feng Z Q, Liu Y J, Li L, et al. Geochemical and geochronological constraints on the tectonic setting of the Xinlin ophiolite, northern Great Xing'an Range, NE China [J]. Lithos, 2019, 326-327: 213-229.
- [21]邵学峰. 内蒙古杜拉尔桥地区奥陶系多宝山组地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林地质, 2018, 37(4): 21-28.
Shao X F. Geochemical characteristics and geological significance of the Ordovician Duobaoshan Formation located in Dula'er Bridge in Inner Mongolia [J]. Jilin Geology, 2018, 37(4): 21-28.
- [22]陈安霞, 周多, 张庆奎, 等. 兴安地块中部奥陶纪构造沉积环境 [J]. 现代地质, 2016, 30(5): 1061-1071.
Chen A X, Zhou D, Zhang Q K, et al. Tectonic and sedimentary

- environment in the Ordovician Period of central Xing'an block[J]. *Geoscience*, 2016, 30(5): 1061-1071.
- [23]肖霞,王少华,刘正宏,等. 大兴安岭中北段奥陶系裸河组碎屑岩地球化学特征及物源环境分析[J]. *西部探矿工程*, 2016, 28(3): 138-142.
- Xiao X, Wang S H, Liu Z H, et al. Geochemical characteristics and provenance environment of the clastic rocks of Ordovician Maohe Formation in middle and northern Daxinganling Mountains[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2016, 28(3): 138-142. (in Chinese)
- [24]张海华,徐德斌,张扩. 大兴安岭北段泥盆系泥鳅河组地球化学特征及沉积环境[J]. *地质与资源*, 2014, 23(4): 316-322.
- Zhang H H, Xu D B, Zhang K. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Devonian Niquhe Formation in northern Daxinganling Range[J]. *Geology and Resources*, 2014, 23(4): 316-322.
- [25]刘娜. 牙克石地区泥盆系“大民山组”的解体及构造属性探讨[D]. 北京: 中国地质大学, 2012: 1-49.
- Liu N. Disintegration and tectonic attribute of Devonian "Daminshan Formation" in Yakeshi[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012: 1-49.
- [26]张渝金,张超,吴新伟,等. 大兴安岭北段扎兰屯地区晚古生代海相火山岩年代学和地球化学特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 2016, 90(10): 2706-2720.
- Zhang Y J, Zhang C, Wu X W, et al. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic marine volcanic from the Zhalantun area in northern Da Hinggan Mountains and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(10): 2706-2720.
- [27]胡志中,王坤阳,晏雄,等. 锆石环氧树脂靶表面形貌特征及对 LA-ICP-MS 分析影响研究[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(6): 804-815.
- Hu Z Z, Wang K Y, Yan X, et al. Study on the morphology of zircon-bearing epoxy resin surface and its effect for LA-ICP-MS analysis[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(6): 804-815.
- [28]范晨子,胡明月,赵令浩,等. 锆石铀-铅定年激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱原位微区分析进展[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(1): 29-46.
- Fan C Z, Hu M Y, Zhao L H, et al. Advances in *in situ* microanalysis of U-Pb zircon geochronology using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(1): 29-46.
- [29]王登红. “同位素年代学与区域地质矿产”专栏成果简评[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(3): 511-512.
- Wang D H. Brief review on achievements of isotope chronology and regional geology & mineral resources[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(3): 511-512.
- [30]Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407-419.
- [31]赵芝,迟效国,潘世语,等. 小兴安岭西北部石炭纪地层火山岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2452-2464.
- Zhao Z, Chi X G, Pan S Y, et al. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating of Carboniferous volcanics and its geological significance in the northwestern Lesser Xing'an Range [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2452-2464.
- [32]赵芝,迟效国,刘建峰,等. 内蒙古牙克石地区晚古生代弧岩浆岩: 年代学及地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2010, 26(11): 3245-3258.
- Zhao Z, Chi X G, Liu J F, et al. Late Paleozoic arc-related magmatism in Yakeshi region, Inner Mongolia: Chronological and geochemical evidence [J]. *Acta petrologica Sinica*, 2010, 26(11): 3245-3258.
- [33]于跃江,赵忠海,杨欣欣,等. 大兴安岭北段漠河前陆盆地早侏罗世火山岩时代的厘定[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 580-592.
- Yu Y J, Zhao Z H, Yang X X, et al. Dating of Early Jurassic volcanic rocks in the Mohe foreland basin of northern Greater Khingan Mountains, Northeast China [J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 580-592.
- [34]贾旭,任俊光,徐文坦,等. 大兴安岭多宝山地区晚古生代碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄: 对兴安和松嫩地块碰撞拼合时间的限定. *中国地质*, 2022, 49(2): 586-600.
- Jia X, Ren J G, Xu W T, et al. Zircon U-Pb dating of Late Paleozoic alkali-feldspar granite in Duobaoshan, Great Xing'an Range: Constrains on collision and assembly time of Xing'an and Songnen blocks[J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 586-600.
- [35]李利阳,陈满,龚全德,等. 大兴安岭牙克石乌奴耳地区晚石炭世正长花岗岩岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2019, 65(2): 389-400.
- Li L Y, Chen M, Gong Q D, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and geological significance of syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains [J]. *Geological Review*, 2019, 65(2): 389-400.
- [36]董金龙,白志达,徐德兵,等. 大兴安岭牙克石地区新元古代与晚古生代两类岩石组合的构造属性及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34(6): 1758-1774.
- Dong J L, Bai Z D, Xu D B, et al. Tectonic nature and geological significance for two types of Neoproterozoic and Late Paleozoic rock assemblages in Yakeshi region, Great Hinggan Range [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(6): 1758-1774.

- Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [26]左国朝,李志林,张崇. 青海拉鸡山构造带是裂谷还是构造窗——与王二七研究员商榷[J]. 地质论评, 2001, 47(6): 561–566.
- Zuo G C, Li Z L, Zhang C. Lajishan tectonic zone of Qinghai Province: Rift or tectonic window? — To discuss with Prof. Wang Er'qi[J]. Geological Review, 2001, 47(6): 561–566.
- [27]潘桂堂,肖庆辉,尹福光,等. 中国大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 205–207.
- Pan G T, Xiao Q H, Yin F G, et al. Chinese geotectonics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 205–207. (in Chinese)
- [28]张新远,欧阳光文,王春涛,等. 拉脊山东段峡门地区新元古代花岗闪长岩体锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国锰业, 2018, 36(5): 85–88.
- Zhang X Y, Ouyang G W, Wang C T, et al. Zircon U-Pb age and geological significance of Neoproterozoic granodiorite in Xiamen area, Shandong Province[J]. China's Manganese Industry, 2018, 36(5): 85–88.
- [29]Ellam R M, Hawkesworth C J. Elemental and isotopic variations in subduction related basalts: Evidence for a three component model[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1988, 98(1): 72–80.
- [30]肖庆辉,李廷栋,潘桂棠,等. 识别洋陆转换的岩石学思路——洋内弧与初始俯冲的识别[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 721–737.
- Xiao Q H, Li T D, Pan G T, et al. Petrologic ideas for identification of ocean-continent transition: Recognition of intra-oceanic arc and initial subduction[J]. Geological in China, 2016, 43(3): 721–737.
- [31]Dilek Y. Ophiolite concept and its evolution[C]//Dilek Y, Newcomb S. Ophiolite concept and the evolution of geological thought. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2003: 1–16.
- [32]Dilek Y, Furnes H, Shallo M. Suprasubduction zone ophiolite formation along the periphery of Mesozoic Gondwana[J]. Gondwana Research, 2007, 11(4): 453–475.
- [33]Lister G, Forster M. Tectonic mode switches and the nature of orogenesis [J]. Lithos, 2009, 113(1/2): 274–291.
- [34]Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere [J]. GSA Bulletin, 2011, 123(3/4): 387–411.
- [35]Song S G, Wang M M, Xu X, et al. Ophiolites in the Xing'an-Inner Mongolia accretionary belt of the CAOB: Implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events[J]. Tectonics, 2015, 34(10): 2221–2248.
- [36]邓晋福,肖庆辉,苏尚国,等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 392–402.
- Deng J F, Xiao Q H, Su S G, et al. Igneous petrotectonic assemblages and tectonic settings: A discussion[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 392–402.
- [37]田健,滕学建,刘洋,等. 内蒙古狼山地区早石炭世石英闪长岩 U-Pb 年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋俯冲的指示[J]. 地质通报, 2020, 39(7): 1035–1045.
- Tian J, Teng X J, Liu Y, et al. U-Pb age and geochemical characteristics of quartz diorite in Early Carboniferous from Langshan area of Inner Mongolia, and its implication for subduction of Paleo-Asian Ocean[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(7): 1035–1045.
- [38]袁建国,任永健,姜振宁,等. 内蒙古锡林浩特毛登牧场早石炭世花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2017, 31(6): 1131–1146.
- Yuan J G, Ren Y J, Jiang Z N, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of granites in Early Carboniferous in Maodeng of Xilin Hot, Inner Mongolia and their geological implications[J]. Geoscience, 2017, 31(6): 1131–1146.
- [39]肖中军,王振强,赵春勇,等. 内蒙古苏尼特左旗北部阿登锡勒大队一带早石炭世高分异 I 型花岗岩的发现及地质意义[J]. 地质论评, 2015, 61(4): 777–786.
- Xiao Z J, Wang Z Q, Zhao C Y, et al. The discovery of monzogranite and its geologic implication in Adenxile, Sonid Zuoqi, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 2015, 61(4): 777–786.

(上接第 715 页/Continued from Page 715)