

https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.510



兴蒙造山带中段锡林浩特跃进地区石炭纪岛弧型侵入岩：年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及其地质意义

王树庆¹, 胡晓佳¹, 杨泽黎¹, 赵华雷¹, 张永¹, 郝爽¹, 何丽²

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

2. 河北区域地质矿产调查研究所, 河北廊坊 065000

摘要: 兴蒙造山带中段锡林浩特跃进地区出露一套石炭纪侵入岩, 具有类似岛弧侵入岩的岩石组合(花岗闪长岩、英云闪长岩、石英闪长岩)和地球化学特征。锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年结果表明, 这套侵入岩形成时代为 310~330 Ma, 属于石炭纪中晚期。岩石地球化学分析表明, 跃进侵入岩属于钠质钙碱性系列岩石; A/CNK 范围为 0.86~1.17, 大多属于准铝—弱过铝质系列; 样品均具有较高的 $Mg^\#$ 值, 范围为 47.5~55.8; 微量元素分析表明, 跃进侵入岩具有 Rb、Ba、Th、U、K 等大离子亲石元素的富集, Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素的亏损; 稀土总量较低($3.62 \times 10^{-6} \sim 172.33 \times 10^{-6}$, 平均值为 118.33×10^{-6}), 具有轻稀土富集的配分模式, $(La/Yb)_N$ 大于 1, 范围为 2.48~9.44, 重稀土分馏较弱, $(Gd/Yb)_N$ 范围为 1.19~1.96, 具有弱的 Eu 负异常(δEu 值 0.70~1.04)。跃进侵入岩均具有亏损的 Hf 同位素组成, $^{176}Hf/^{177}Hf$ 范围为 0.282 651~0.282 870, $\epsilon_{Hf}(t)$ 均为正值, 范围为 +2.0~+9.9, 地壳存留模式年龄 T_{DM}^C 范围为 829~1 536 Ma, 集中于 900~1 200 Ma; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 范围为 0.703 7~0.704 8, $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 范围为 0.512 320~0.512 401, $\epsilon_{Nd}(t)$ 均为正值(+2.1~+3.6), 二阶段 Nd 模式年龄 T_{DM2} 较集中, 为新元古代(793~918 Ma)。跃进侵入岩是在石炭纪活动大陆边缘的背景下, 由中元古代晚期—新元古代早期的新生基性下地壳物质, 在俯冲流体及岛弧基性岩浆的共同作用下部分熔融形成的, 表明石炭纪中晚期兴蒙造山带中段仍然存在板块俯冲, 古亚洲洋并未关闭。

关键词: 石炭纪; 岛弧型侵入岩; 活动大陆边缘; 兴蒙造山带; 大洋俯冲; 新生地壳。

中图分类号: P583

文章编号: 1000-2383(2018)03-0672-24

收稿日期: 2017-10-19

Geochronology, Geochemistry, Sr-Nd-Hf Isotopic Characteristics and Geological Significance of Carboniferous Yuejin Arc Intrusive Rocks of Xilinhote, Inner Mongolia

Wang Shuqing¹, Hu Xiaojia¹, Yang Zeli¹, Zhao Hualei¹, Zhang Yong¹, Hao Shuang¹, He Li²

1. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2. Regional Geology and Mineral Resources Survey Institute of Hebei Province, Langfang 065000, China

Abstract: The study of magmatism can reveal the structure and tectonic evolution of the orogeny. In this paper, we present zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating, Hf-Sr-Nd isotopic compositions and whole rock geochemical data of the Carboniferous Arc intrusive rocks from Yuejin region of Xilinhote, central part of the Xingmeng Orogenic Belt. The rock suit consists of three major rock types, i.e., granodiorite, tonalite and quartz-diorite, with zircon U-Pb ages ranging from 310 ± 1 to 330 ± 1 Ma. Geochemically, these rocks show moderate SiO_2 , high and variable Na_2O , Al_2O_3 , and CaO contents, but low K_2O , FeO_t and MgO contents. The Na_2O/K_2O ratios are all higher than 1 (1.05–2.68, average of 1.95), while these rocks are of Calc-Alkaline

基金项目: 中国地质调查“华北重大岩浆事件及其成矿作用和构造背景综合研究”(No.1212014121079); 中国地质调查“二连—东乌旗成矿带西乌旗和白乃庙地区地质矿产调查”(No.DD20160041); 中国地质调查“兴蒙造山带中段古生代花岗岩的组成、性质、时代和成矿作用研究”(No.1212011121079)。

作者简介: 王树庆(1983—), 男, 工程师, 硕士, 从事岩石学、地球化学研究及地质调查工作, 主要从事岩浆岩研究。ORCID:0000-0002-4973-7535。
E-mail:89617984@qq.com

引用格式: 王树庆, 胡晓佳, 杨泽黎, 等, 2018. 兴蒙造山带中段锡林浩特跃进地区石炭纪岛弧型侵入岩: 年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及其地质意义. 地球科学, 43(3): 672–695.

series. The A/CNK ratios range from 0.86 to 1.17, indicating most of samples are meta-to weak per-aluminous series. The $Mg^\#$ are moderately high, from 47.5—55.8. The trace elemental data of these rocks display enrichment of LILEs, such as Rb, Ba, Th, U, K, but depletion of HFSE, i.e., Nb, Ta, P and Ti. The total REE contents are low (3.62×10^{-6} — 172.33×10^{-6} , average of 118.33×10^{-6}) with moderate fractionation between LREE and HREE ((La/Yb)_N range from 2.48—9.44), while weak negative Eu abnormality are observed (δEu range from 0.70 to 1.04). The in-situ zircon Hf isotopic analysis show depleted compositions with $^{176}Hf/^{177}Hf$ ratios varying from 0.282 723 to 0.282 863, $\epsilon_{Hf}(t)$ values from +2 to +9.9 and Hf two stage model ages(T_{DM}^C) from 829 to 1 536 Ma (concentrating from 900 to 1 200 Ma). The whole rock Sr-Nd isotopic analysis of ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i range from 0.703 7 to 0.704 8, ($^{143}Nd/^{144}Nd$)_i range from 0.512 320 to 0.512 401, with positive $\epsilon_{Nd}(t)$ (+2.1 to +3.6), indicating depleted source, and the Nd two stage model ages(T_{DM2}) are of Neoproterozoic (793—918 Ma). The rock suit, whole rock geochemistry, Hf-Sr-Nd isotopic characteristics indicate that Yuejin Carboniferous intrusive rocks were formed in active continental margin, by the partial melting of basic juvenile crust (formed in Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic) triggered by subduction fluid and arc basic magma. This tectonic setting demonstrates that there was still subduction in Carboniferous in Xingmeng orogeny and the ocean was not closed.

Key words: Carboniferous; arc intrusive rocks; active continental margin; Xingmeng orogeny; subduction; juvenile crust.

中亚造山带是世界上规模最大的增生造山带,经历了长期复杂的地质演化(Şengör *et al.*, 1993; Badařch *et al.*, 2002; Khain *et al.*, 2002, 2003; Kröner *et al.*, 2007, 2010, 2011, 2014; Windley *et al.*, 2007),发育了强烈的岩浆作用,有大量的地幔物质添加,代表新元古代—显生宙大规模的地壳增生(Jahn *et al.*, 2000, 2004; Wu *et al.*, 2000; Hong *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2009).同时,中亚造山带又是世界上最重要的铜、金、稀土等金属成矿区(洪大卫等, 2003).因此其演化一直是国际地学界关注的焦点.作为中亚造山带东南段的兴蒙造山带是由众多微陆块、岛弧、增生楔及蛇绿岩(洋壳残片)等构成,经历了复杂的构造演化历史,记录了古亚洲洋俯冲及西伯利亚和华北板块最终拼合等重要信息(王荃等, 1991; 唐克东, 1992; 徐备等, 2001, 2014; Xu *et al.*, 2013, 2015; Li, 2006; Jian *et al.*, 2008),正确认识兴蒙造山带中各地质体之间时空及成因上的联系对于恢复该地区古构造格局及构造演化史有着重要的意义.

目前对于兴蒙造山带中段晚古生代构造格局和演化历史有着较大的争议,有两种主流的观点:(1)晚古生代大洋向南北双向俯冲,一直持续到晚二叠世—早三叠世两大板块拼合于索伦—西拉木伦缝合带(Xiao *et al.*, 2003; Li, 2006; Zhang *et al.*, 2007, 2009, 2016; 李锦轶等, 2007; Jian *et al.*, 2008, 2010, 2012; Liu *et al.*, 2013);(2)古亚洲洋于中泥盆世闭合,进入陆内演化阶段,兴蒙造山带地区晚古生代为伸展背景,属于陆相盆地或陆表海(邵济安等, 1991, 2014, 2015; 唐克东, 1992; 徐备和陈斌, 1997; 徐备等, 2001, 2014; 朱永峰等, 2004; Xu *et al.*, 2013, 2015; Li *et al.*, 2014).其中争议的焦点在于晚泥盆

世—石炭纪的构造背景,是俯冲还是碰撞后伸展?

兴蒙造山带中段晚古生代发育大面积的侵入岩,通过侵入岩研究可以对构造格局及构造演化进行约束.前人进行了较多研究,取得了许多重要的成果和进展.根据二道井—迪彦庙及贺根山蛇绿岩带可将晚古生代侵入岩划分为 3 条近东西向的岩浆岩带,从南到北依次为:华北北缘晚古生代岩浆岩带、白音宝力道—西乌旗晚古生代岩浆岩带以及贺根山蛇绿岩带以北的查干敖包—东乌旗岩浆岩带,其中华北北缘晚古生代岩浆岩主要为一套岛弧型侵入岩组合(Zhang *et al.*, 2007, 2009, 2016),查干敖包—东乌旗岩侵入岩主要为 GG 组合(正长花岗岩、二长花岗岩)及碱性花岗岩,形成于后造山伸展背景(洪大卫等, 1994; 张玉清等, 2009; 许立权等, 2012; 程银行等, 2012, 2014; Zhang *et al.*, 2015; 李可等, 2014, 2015; Tong *et al.*, 2015),这两条岩浆岩带认识相对统一,而中部的白音宝力道晚古生代岩浆岩带构造背景具有较大争议,目前有两种观点:造山后伸展(鲍庆中等, 2007a, 2007b; 薛怀民等, 2009, 2010; 周文孝, 2012; Hu *et al.*, 2015)和岛弧(Chen *et al.*, 2000, 2009; 陈斌和徐备, 1996; 陈斌等, 2001, 2009; 刘建峰等, 2009)两种观点.对于这套侵入岩的性质及构造背景的研究,就显得尤为重要.因此,本文选择这条岩浆岩带上锡林浩特附近石炭纪跃进岩体进行岩石学、年代学及地球化学研究,讨论了岩石成因,并对区域上位于贺根山蛇绿岩带与二道井、迪彦庙蛇绿岩带之间的白音宝力道—西乌旗石炭纪侵入岩进行了对比总结,探讨了区域构造背景,为这一地区晚古生代构造演化提供了约束.

1 地质背景及岩石特征

研究区位于内蒙古自治区锡林浩特市西南部地区,大地构造位置位于贺根山蛇绿岩带和二道井—迪彦庙蛇绿混杂岩带之间,前人将研究区归为索伦缝合带北侧的北部造山带(Xiao *et al.*, 2003; Jian *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009).研究区出露的最老地层为锡林郭勒杂岩,又称宝音图岩群(李文国等, 1996),对于其时代及属性一直有较大的争议,一种观点认为是前寒武纪基底(徐备等, 1996; 郝旭和徐备, 1997; 葛梦春等, 2011; 周文孝和葛梦春, 2013),经历了古生代俯冲作用的改造(Li *et al.*, 2011);另一种观点认为锡林郭勒杂岩是形成于古生代的弧前浊积岩,经历了晚古生代碰撞造山过程中的变质变形作用形成(施光海等, 2003; 薛怀民等, 2009).出露

的古生代地层包括中奥陶世包尔汗图群(O_2b)、早二叠世大石寨组(P_1ds)及下白垩统大磨拐河组(K_1d),以上地层均被新生代地层覆盖.区内岩浆活动频繁,发育古生代侵入岩及晚石炭世查干诺尔火山岩($\hat{c}v$).

根据最新的区调报告及野外调查,跃进岩体主要分布在锡林浩特西南约 10 km 的跃进三队一带,岩石组合为花岗闪长岩、英云闪长岩及石英闪长岩,出露面积约 60 km²,岩体呈北东东向展布,东南侧被下二叠统大石寨组角度不整合覆盖,南侧及西侧被晚石炭世二长花岗岩侵入.根据野外观察,这套石炭纪侵入岩均未发生区域变形,呈块状构造,经历较弱的风化呈球状,含有较多细粒闪长质包体(图 2a).

岩相学特征:花岗闪长岩,新鲜面呈灰白色,块状构造,中细粒花岗结构,矿物粒度为 1.5~4.0 mm,主要矿物成分为斜长石(40%~45%)、石

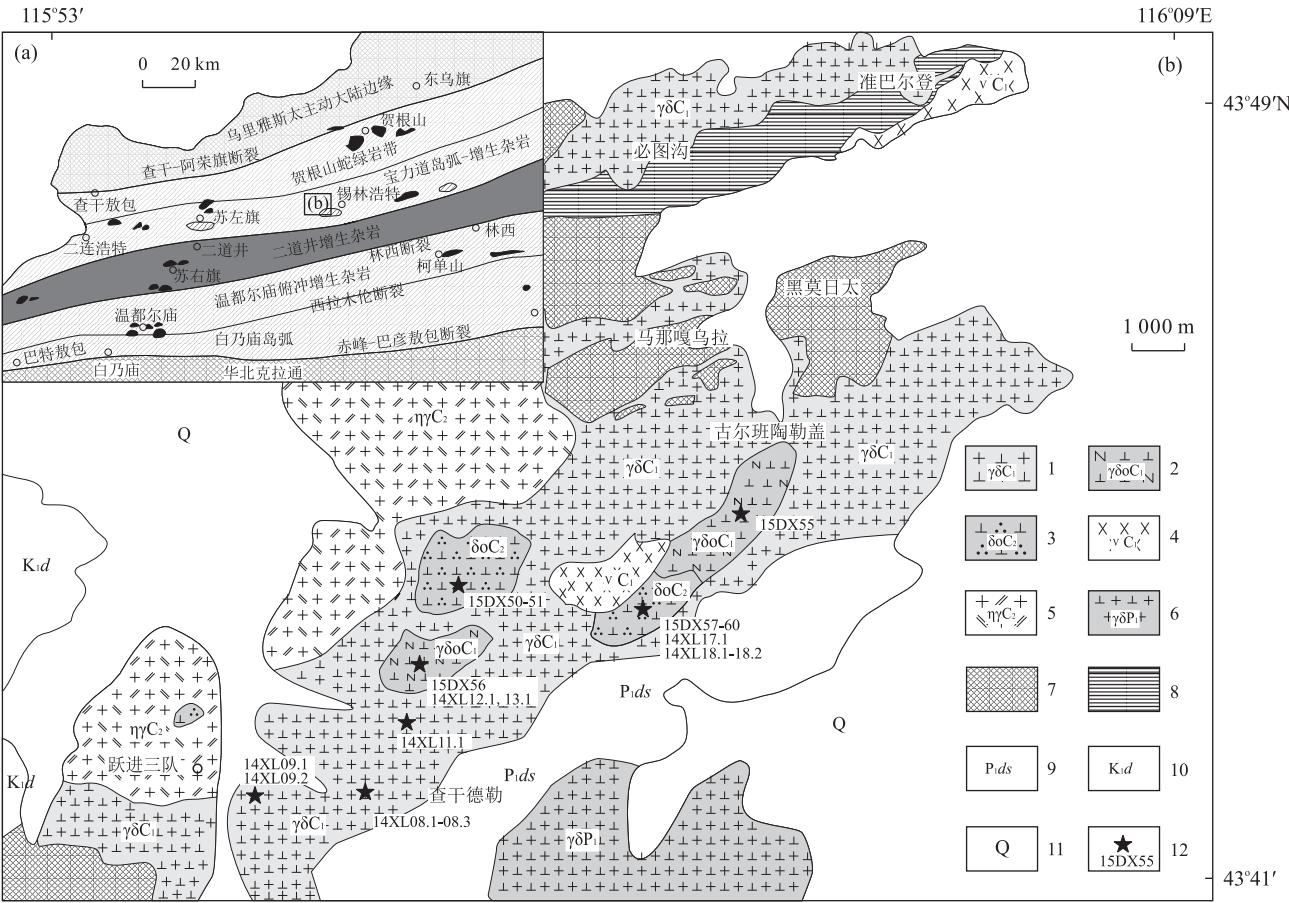


图 1 内蒙古锡林浩特跃进地区地质简图

Fig.1 Geological sketch of Yuejin region, Xilinhot, Inner Mongolia

a.据 Xiao *et al.*, 2003 修改; b.据 1:5 万跃进三队(1:50 000 跃进三队幅(K50E003008)地质图, 2013, 国土资料实物中心)及锡林浩特炼铜厂幅(1:50 000 锡林浩特炼铜厂幅(K50E002009)地质图, 2012, 中国地质大学(武汉)地质调查院)地质图修改; 1.早石炭世花岗闪长岩; 2.早石炭世英云闪长岩; 3.晚石炭世石英闪长岩; 4.早石炭世辉长岩; 5.晚石炭世二长花岗岩; 6.早二叠世花岗闪长岩; 7.锡林郭勒杂岩; 8.中奥陶世包尔汗图群; 9.早二叠世大石寨组; 10.早白垩统大磨拐河组; 11.第四系; 12.采样点及样品号

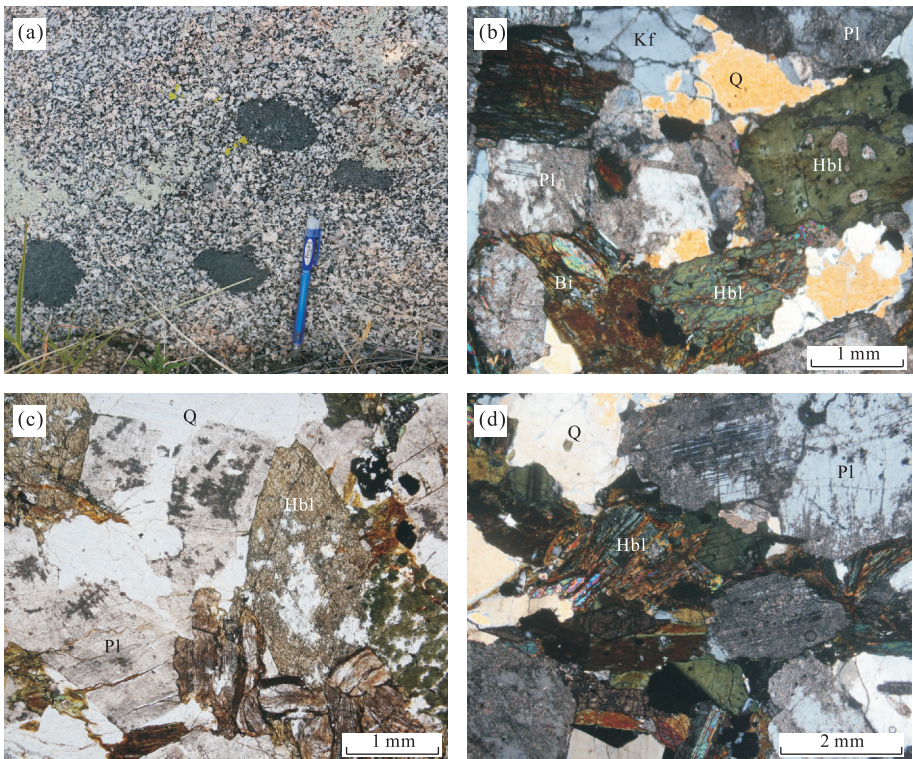


图 2 跃进侵入岩野外及镜下照片

Fig.2 Field and microscope photograph

a.石英闪长岩及其中暗色包体野外照片;b.花岗闪长岩;c.石英闪长岩;d.英云闪长岩;矿物代号:Q.石英;Pl.斜长石;Kf.钾长石;Hbl.角闪石;Bt.黑云母

英(20%~25%)、钾长石(10%~15%)、角闪石(10%~15%)及少量黑云母(5%),副矿物为磁铁矿、磷灰石(Ap)、锆石、榍石,其中斜长石呈半自形宽板状,镜下可见聚片双晶及环带发育,部分发生轻微绢云母化而呈浅灰色,粗略测定牌号为 An29,为更长石;钾长石主要为微斜长石、条纹长石,泥化显浅褐色,充填于斜长石颗粒间;角闪石自形、柱状,闪石解理,强烈绿泥石化呈交代残留或交代假象结构(图 2b).石英闪长岩,灰色,中粒花岗结构,粒度 2~5 mm,矿物成分包括斜长石(75%)、石英(15%)、角闪石(5%~10%)、黑云母(5%~10%)及少量钾长石组成,斜长石发育聚片双晶及环带,角闪石多色性明显(图 2c).英云闪长岩,灰白色或灰色,中粒花岗结构,粒度为 2~5 mm,主要由斜长石(45%~50%)、石英(25%~30%)和角闪石(15%~20%)组成,另外可见少量黑云母(5%),副矿物为磁铁矿、磷灰石、锆石、榍石等,斜长石为半自形板状,可见聚片双晶,部分可见环带,牌号为 An30,属于更长石或中长石;角闪石呈近半自形柱状,多色性中等:Ng:绿色,Nm:黄绿色,Np:浅黄色,多被黑云母交代;黑云母,褐色,片状,多具绿泥石化、水云母化、部分沿解理褪色为白云母,多交代角闪石(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锆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 同位素测试是在天津地质矿产研究所同位素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-ICP-MS)完成的,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中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2010), 锆石 U-Pb 年龄谐和图采用 Ludwig 的 Iso-plot 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天津地质矿产研究所实验室完成, 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%, 微量元素使用 ICP-MS 测试, 分析精度优于 5%.

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 以上的纯 Nd 为标准), 用 HF+HClO₄+HNO₃ 溶解, 在密闭的 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 $\times$ 10⁻¹¹ g; Nd=5.4 $\times$ 10⁻¹¹ g. Sr、Nd 同位素比值测试均在 Triton 热电离子质谱上完成, Sr 的质谱标准样 NBS987 Sr 的结果为 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710 245 $\pm$ 30, LRIG 质谱标准样的结果为 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 202 $\pm$ 30, 国家一级标准 Sm-Nd 岩石样 GBS04419 的结果是: Sm=3.017 0 $\times$ 10⁻⁶、Nd=10.066 0 $\times$ 10⁻⁶、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 739 $\pm$ 5. 国际标准岩石样 BCR-2 的结果是: Rb=46.5 $\pm$ 0.93 $\times$ 10⁻⁶、Sr=336.00 $\pm$ 6.72 $\times$ 10⁻⁶、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.704 958 $\pm$ 30, Sr 分馏的内校正因子均采用 ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr=8.375 209. Sm=6.70 $\pm$ 0.14 $\times$ 10⁻⁶、Nd=28.00 $\pm$ 0.56 $\times$ 10⁻⁶、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 633 $\pm$ 30. Nd 分馏的内校正因子均采用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 900.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

本文对 4 件样品(两件花岗闪长岩, 两件石英闪

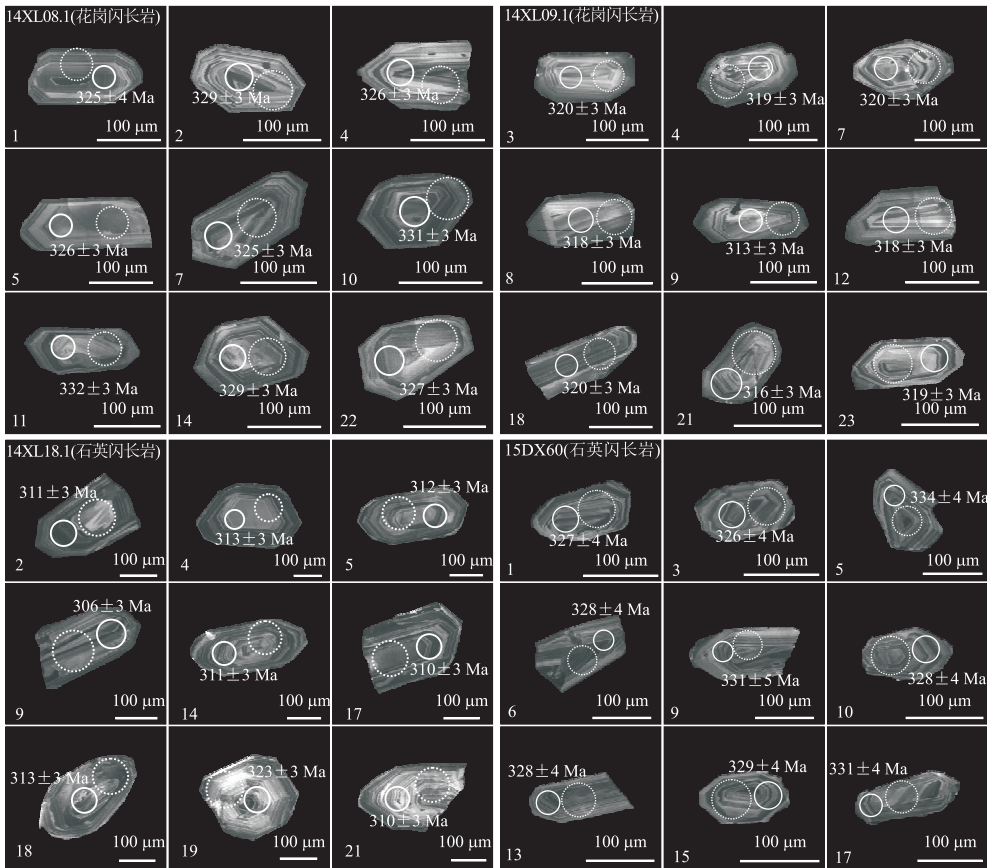


图 3 锆石阴极发光及 LA-MC-ICP-MS 测年、Hf 同位素分析点位图

Fig.3 Cathodoluminescence images and analysis spot 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

长岩)进行了锆石测年,数据列于表 1.

花岗闪长岩: 锆石呈自形短柱状,长宽比为 1.0~2.5,无色或淡绿色,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,两件样品(14XL08.1, 14XL09.1)所有测点均具有高的 Th、U 含量并且 Th/U 比值均大于 0.10(0.29~0.97),同样指示了岩浆成因.在锆石年龄谐和图上(图 4),两件样品的所有测点均成群落在谐和线上,其中样品 14XL08.1 的 24 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 325~332 Ma,加权平均值为 $328\pm 1\text{ Ma}$ ($n=24$, MSWD=0.33),样品 14XL09.1 的 24 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 313~322 Ma,加权平均值为 $319\pm 1\text{ Ma}$ ($n=24$, MSWD=0.36).

石英闪长岩: 锆石呈自形短柱状,长宽比为 1~2,无色透明,包裹体少.阴极发光较明亮,锆石发育细密的振荡环带(图 3),表明岩浆成因,并且结晶速度较慢.从表 1 可见,两件样品(14XL18.1, 15DX60)所有测点均具有高的 Th、U 含量并且 Th/U 比值均大于 0.10(0.46~1.17),同样指示了岩浆成因.在谐和图上

(图 4),两件样品的所有测点均成群落在谐和线上,其中样品 14XL18.1 的 24 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 305~323 Ma,加权平均值为 $310\pm 1\text{ Ma}$ ($n=23$, MSWD=0.64),样品 15DX60 的 27 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 314~335 Ma,剔除落在谐和线以外的 Pb 丢失的测点,其余测点加权平均值为 $330.1\pm 1.1\text{ Ma}$ ($n=23$, MSWD=1.5).

3.2 锆石原位 Hf 同位素分析

在锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年的基础上,我们对 4 件样品进行了原位 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 2.

花岗闪长岩两件样品(14XL08.1, 14XL09.1)共计分析了 34 个测点,所有测点的 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的放射性成因 Hf 的积累(徐义刚等,2007;杨钢等,2015),锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 可以用来分析源区特征, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 范围为 0.282 651~0.282 870, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值,范围在 +2.0~+9.9,二阶段模式年龄

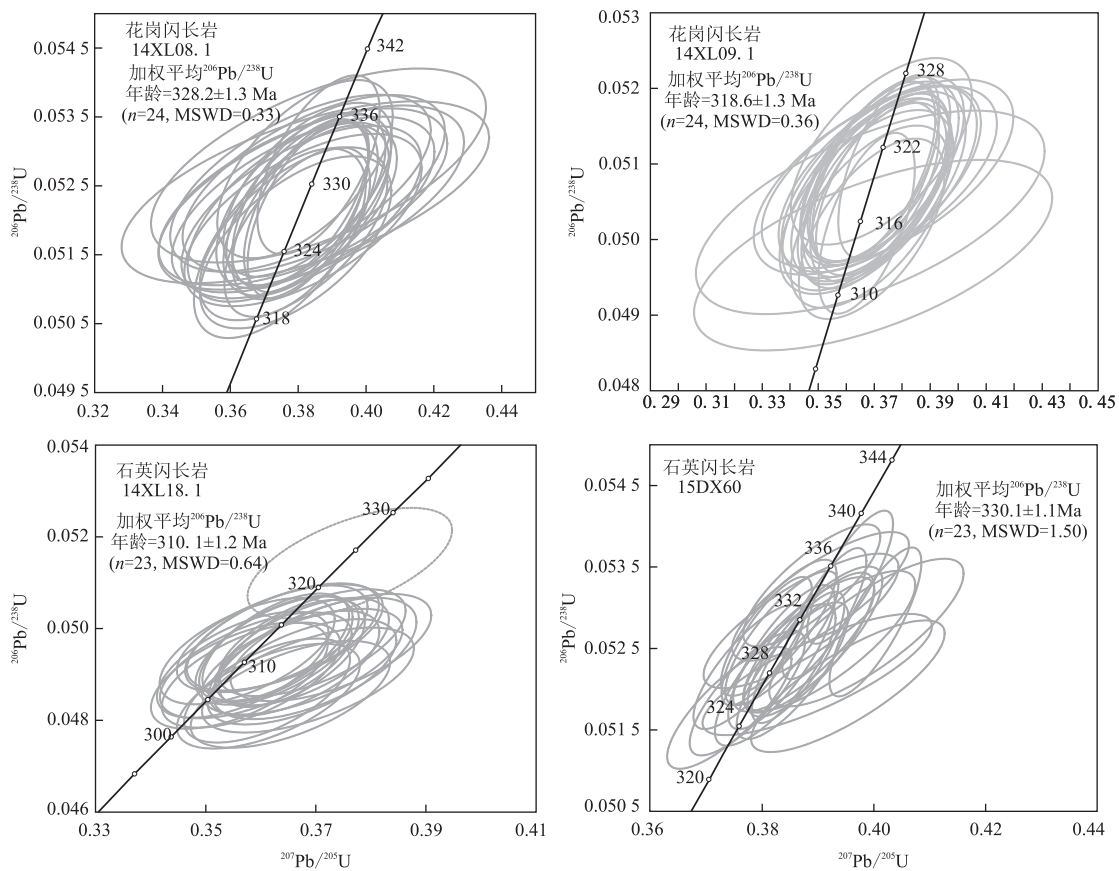


图 4 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年谐和图

Fig.4 Concordia diagrams for LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of Yujin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia

表 1 内蒙古锡林浩特侵入岩锆石 U-Pb 测年分析结果
Table 1 Zircon LA-MC-ICPMS U-Pb dating data of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia

点号	含量(10 ⁻⁶)		Th/U	同位素比值				年龄(Ma)							
	Pb	U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ				
14XL08.1(花岗岩长岩)															
1	155	400	0.45	0.051 67	0.000 6	0.374 6	0.010 3	0.052 6	0.001 5	325	4	323	9	311	63
2	134	223	0.69	0.052 33	0.000 5	0.383 9	0.018 4	0.053 2	0.002 5	329	3	330	16	337	105
3	89	284	0.36	0.052 21	0.000 5	0.382 5	0.007 5	0.053 1	0.001 0	328	3	329	6	334	42
4	108	305	0.41	0.051 83	0.000 5	0.379 7	0.008 8	0.053 1	0.001 2	326	3	327	8	335	50
5	87	238	0.42	0.051 80	0.000 5	0.378 7	0.011 3	0.053 0	0.001 6	326	3	326	10	329	66
6	76	298	0.29	0.052 12	0.000 5	0.378 3	0.012 6	0.052 6	0.001 7	328	3	326	11	313	73
7	136	305	0.52	0.051 68	0.000 5	0.379 3	0.011 5	0.053 2	0.001 6	325	3	327	10	338	66
8	47	127	0.42	0.052 23	0.000 5	0.381 5	0.015 8	0.053 0	0.002 1	328	3	328	14	328	92
9	126	309	0.47	0.052 29	0.000 5	0.380 7	0.008 2	0.052 8	0.001 1	329	3	328	7	321	46
10	126	300	0.48	0.052 74	0.000 5	0.382 0	0.010 6	0.052 5	0.001 4	331	3	329	9	309	59
11	364	691	0.61	0.052 80	0.000 5	0.386 0	0.007 4	0.053 0	0.000 9	332	3	331	6	330	40
12	46	108	0.49	0.052 53	0.000 5	0.384 6	0.015 8	0.053 1	0.002 1	330	3	330	14	333	92
13	142	265	0.62	0.052 13	0.000 5	0.382 0	0.008 8	0.053 2	0.001 1	328	3	329	8	335	49
14	41	106	0.45	0.052 34	0.000 5	0.381 4	0.017 4	0.052 9	0.002 4	329	3	328	15	323	101
15	177	320	0.64	0.052 15	0.000 5	0.382 9	0.007 3	0.053 2	0.000 9	328	3	329	6	339	40
16	100	149	0.77	0.052 80	0.000 6	0.386 0	0.020 2	0.053 0	0.002 6	332	4	331	17	330	113
17	21	68	0.35	0.052 41	0.000 5	0.382 1	0.022 1	0.052 9	0.003 1	329	3	329	19	324	131
18	159	300	0.61	0.052 29	0.000 5	0.380 8	0.010 2	0.052 8	0.001 3	329	3	328	9	321	58
19	109	256	0.49	0.052 44	0.000 5	0.382 8	0.010 2	0.052 9	0.001 3	330	3	329	9	326	57
20	105	178	0.68	0.052 14	0.000 5	0.382 4	0.010 0	0.053 2	0.001 3	328	3	329	9	337	57
21	103	167	0.71	0.052 12	0.000 5	0.380 9	0.014 4	0.053 0	0.002 0	328	3	328	12	329	84
22	51	142	0.42	0.052 00	0.000 5	0.381 5	0.014 3	0.053 2	0.001 9	327	3	328	12	337	83
23	78	181	0.49	0.052 29	0.000 5	0.383 1	0.009 9	0.053 1	0.001 3	329	3	329	9	335	57
24	48	128	0.43	0.052 54	0.000 5	0.380 7	0.015 7	0.052 6	0.002 1	330	3	328	14	310	90
14XL09.1(花岗岩长岩)															
1	8	147	0.43	0.051 20	0.000 5	0.372 6	0.013 2	0.052 8	0.001 8	322	3	322	11	321	79
2	19	357	0.37	0.051 00	0.000 5	0.375 3	0.007 4	0.053 4	0.001 0	320	3	324	6	346	42
3	7	125	0.60	0.050 90	0.000 5	0.372 8	0.011 9	0.053 1	0.001 7	320	3	322	10	333	70
4	17	316	0.68	0.050 70	0.000 5	0.371 5	0.012 7	0.053 1	0.001 7	319	3	321	11	335	73
5	16	286	0.75	0.050 60	0.000 5	0.369 9	0.010 6	0.053 0	0.001 5	318	3	320	9	331	63
6	7	135	0.46	0.050 80	0.000 5	0.371 8	0.014 3	0.053 1	0.002 0	319	3	321	12	334	83
7	7	120	0.68	0.050 90	0.000 5	0.374 8	0.018 4	0.053 4	0.002 5	320	3	323	16	347	107
8	9	156	0.80	0.050 60	0.000 5	0.367 5	0.012 4	0.052 7	0.001 7	318	3	318	11	315	74
9	10	180	0.57	0.049 80	0.000 5	0.369 6	0.026 1	0.053 8	0.003 8	313	3	319	23	364	158

续表 1

点号	含量(10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						
	Pb	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$	1σ	
14XL09.1(花岗岩闪长岩)																
10	9	157	0.63	0.050 70	0.000 5	0.372 2	0.010 2	0.053 3	0.001 4	319	3	321	9	341	60	
11	8	142	0.51	0.050 10	0.000 5	0.369 1	0.010 6	0.053 4	0.001 5	315	3	319	9	345	64	
12	6	116	0.63	0.050 50	0.000 5	0.367 3	0.012 7	0.052 7	0.001 8	318	3	318	11	318	76	
13	6	119	0.55	0.050 30	0.000 5	0.368 3	0.011 5	0.053 1	0.001 6	316	3	318	10	333	68	
14	12	225	0.57	0.050 70	0.000 5	0.373 0	0.009 7	0.053 3	0.001 3	319	3	322	8	343	57	
15	8	157	0.45	0.050 90	0.000 5	0.372 0	0.011 5	0.053 0	0.001 6	320	3	321	10	330	68	
16	8	144	0.50	0.050 90	0.000 5	0.371 7	0.010 4	0.052 9	0.001 4	320	3	321	9	326	62	
17	10	186	0.56	0.050 60	0.000 5	0.367 9	0.010 3	0.052 7	0.001 4	318	3	318	9	317	62	
18	12	232	0.51	0.050 90	0.000 5	0.370 0	0.009 4	0.052 7	0.001 3	320	3	320	8	318	55	
19	5	84	0.97	0.050 40	0.000 6	0.368 6	0.025 5	0.053 1	0.003 6	317	3	319	22	332	155	
20	9	160	0.62	0.050 80	0.000 5	0.372 0	0.014 8	0.053 1	0.002 1	319	3	321	13	333	88	
21	16	295	0.50	0.050 20	0.000 5	0.367 3	0.007 0	0.053 1	0.000 9	316	3	318	6	331	40	
22	11	193	0.47	0.050 90	0.000 5	0.369 9	0.009 0	0.052 7	0.001 2	320	3	320	8	317	54	
23	10	176	0.40	0.050 70	0.000 5	0.370 7	0.010 7	0.053 0	0.001 5	319	3	320	9	329	65	
24	6	115	0.44	0.050 80	0.000 5	0.370 4	0.017 8	0.052 9	0.002 5	319	3	320	15	325	107	
14XL18.1(石英闪长岩)																
1	23	415	0.66	0.049 30	0.000 5	0.369 8	0.007 6	0.054 3	0.001 0	311	3	319	7	383	41	
2	45	806	0.71	0.049 60	0.000 5	0.362 7	0.005 4	0.053 1	0.000 7	312	3	314	5	331	32	
3	25	458	0.68	0.049 50	0.000 5	0.367 6	0.006 4	0.053 8	0.000 9	311	3	318	6	365	37	
4	18	329	0.55	0.049 80	0.000 5	0.363 5	0.007 6	0.052 9	0.001 1	313	3	315	7	326	46	
5	22	392	0.64	0.049 60	0.000 5	0.372 7	0.007 4	0.054 4	0.001 0	312	3	322	6	388	42	
6	24	421	0.76	0.049 20	0.000 5	0.356 7	0.006 4	0.052 6	0.000 9	310	3	310	6	310	38	
7	19	348	0.58	0.049 80	0.000 5	0.362 8	0.006 8	0.052 9	0.000 9	313	3	314	6	324	41	
8	44	794	0.60	0.049 50	0.000 5	0.365 6	0.005 4	0.053 6	0.000 7	311	3	316	5	356	31	
9	24	416	0.73	0.048 60	0.000 5	0.365 4	0.007 4	0.054 5	0.001 0	306	3	316	6	390	41	
10	27	458	0.73	0.049 50	0.000 5	0.363 0	0.006 1	0.053 1	0.000 8	312	3	314	5	335	35	
11	16	297	0.60	0.049 20	0.000 5	0.359 1	0.007 1	0.052 9	0.001 0	310	3	312	6	326	43	
12	33	567	0.75	0.049 50	0.000 5	0.362 7	0.005 7	0.053 1	0.000 8	312	3	314	5	332	33	
13	22	378	0.73	0.049 10	0.000 5	0.367 5	0.007 0	0.054 3	0.001 0	309	3	318	6	385	41	
14	19	347	0.62	0.049 50	0.000 5	0.357 5	0.006 5	0.052 4	0.000 9	311	3	310	6	302	39	
15	16	300	0.57	0.048 90	0.000 5	0.368 6	0.007 9	0.054 7	0.001 1	308	3	319	7	399	46	
16	23	432	0.46	0.048 50	0.000 5	0.361 4	0.006 8	0.054 0	0.001 0	305	3	313	6	372	40	
17	25	458	0.52	0.049 20	0.000 5	0.366 1	0.006 3	0.053 9	0.000 9	310	3	317	5	367	37	
18	26	395	1.17	0.049 70	0.000 5	0.369 4	0.006 9	0.053 9	0.001 0	313	3	319	6	368	40	
19	15	258	0.58	0.051 40	0.000 5	0.376 2	0.007 6	0.053 0	0.001 0	323	3	324	7	330	44	

续表 1

点号	含量(10^{-6})		Th/U	同位素比值				年龄(Ma)							
	Pb	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ				
14XL18.1(石英闪长岩)															
20	16	284	0.62	0.049 80	0.000 5	0.364 0	0.007 1	0.053 0	0.001 0	313	3	315	6	328	42
21	14	255	0.55	0.049 30	0.000 5	0.367 5	0.007 5	0.054 1	0.001 0	310	3	318	6	374	43
22	22	402	0.65	0.048 60	0.000 5	0.361 1	0.006 2	0.053 9	0.000 9	306	3	313	5	365	36
23	19	358	0.46	0.049 00	0.000 5	0.356 1	0.006 6	0.052 7	0.000 9	308	3	309	6	318	39
24	16	305	0.47	0.049 00	0.000 5	0.358 2	0.006 6	0.053 0	0.000 9	308	3	311	6	330	40
15DX60(石英闪长岩)															
1	18	301	0.71	0.052 00	0.000 3	0.395 3	0.007 1	0.055 1	0.000 9	327	4	338	6	416	38
2	40	672	0.73	0.052 50	0.000 3	0.414 7	0.003 3	0.057 3	0.000 4	330	4	352	3	504	17
3	20	349	0.66	0.052 00	0.000 3	0.377 3	0.004 2	0.052 7	0.000 6	326	4	325	4	315	25
4	25	410	0.69	0.052 50	0.000 3	0.464 7	0.004 4	0.064 3	0.000 6	330	4	388	4	750	21
5	13	230	0.61	0.053 10	0.000 3	0.390 4	0.006 5	0.053 3	0.000 9	334	4	335	6	341	38
6	25	440	0.68	0.052 30	0.000 3	0.377 6	0.004 0	0.052 4	0.000 5	328	4	325	3	302	24
7	19	317	0.71	0.052 70	0.000 4	0.398 7	0.007 1	0.054 9	0.000 9	331	5	341	6	407	38
8	36	605	0.74	0.052 80	0.000 4	0.400 3	0.003 4	0.055 0	0.000 4	332	5	342	3	410	16
9	16	283	0.70	0.052 60	0.000 4	0.389 1	0.005 1	0.053 6	0.000 7	331	5	334	4	356	28
10	17	308	0.57	0.052 20	0.000 4	0.382 3	0.004 4	0.053 1	0.000 6	328	4	329	4	335	24
11	38	634	0.82	0.052 90	0.000 3	0.391 1	0.003 1	0.053 6	0.000 4	332	4	335	3	354	17
12	13	233	0.56	0.052 20	0.000 3	0.389 9	0.008 4	0.054 2	0.001 1	328	4	334	7	379	47
13	22	399	0.63	0.052 20	0.000 3	0.385 4	0.004 1	0.053 5	0.000 5	328	4	331	4	351	22
14	19	343	0.74	0.051 80	0.000 3	0.374 1	0.004 5	0.052 4	0.000 6	325	4	323	4	304	28
15	26	451	0.77	0.052 40	0.000 3	0.386 5	0.003 4	0.053 5	0.000 5	329	4	332	3	350	20
16	14	251	0.66	0.052 60	0.000 3	0.387 4	0.005 2	0.053 5	0.000 7	330	4	332	4	349	30
17	21	372	0.81	0.052 60	0.000 3	0.383 5	0.004 1	0.052 9	0.000 6	331	4	330	4	323	24
18	36	618	0.94	0.053 40	0.000 3	0.395 7	0.003 1	0.053 8	0.000 4	335	4	339	3	362	18
19	31	555	0.77	0.050 00	0.000 3	0.499 0	0.012 5	0.072 5	0.001 6	314	4	411	10	999	45
20	16	284	0.64	0.052 60	0.000 4	0.392 0	0.006 3	0.054 1	0.000 8	330	4	336	5	374	35
21	22	391	0.79	0.052 40	0.000 4	0.383 5	0.003 9	0.053 1	0.000 5	329	5	330	3	332	21
22	21	369	0.7	0.052 90	0.000 3	0.415 4	0.005 0	0.056 9	0.000 7	332	4	353	4	488	27
23	20	366	0.69	0.052 50	0.000 4	0.388 7	0.004 6	0.053 7	0.000 6	330	5	333	4	356	26
24	28	496	0.77	0.052 60	0.000 3	0.380 8	0.003 3	0.052 5	0.000 4	330	4	328	3	308	18
25	15	274	0.63	0.052 80	0.000 3	0.387 0	0.007 1	0.053 1	0.001 0	332	4	332	6	334	41
26	21	387	0.56	0.052 80	0.000 3	0.383 0	0.004 2	0.052 7	0.000 6	331	4	329	4	314	24
27	26	460	0.66	0.053 30	0.000 3	0.388 9	0.005 0	0.052 9	0.000 7	335	4	334	4	326	28

表 2 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩锆石 Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions for zircons of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia

点号	<i>t</i> (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (<i>t</i>)	2σ	<i>T</i> _{DM} ^c (Ma)	<i>f</i> _{Lu/Hf}
14XL08.1(花岗闪长岩)									
1	325	0.051 138	0.001 466	0.282 700	0.000 019	3.9	0.7	1 367	−0.96
2	329	0.049 792	0.001 438	0.282 801	0.000 022	7.6	0.8	1 040	−0.96
4	326	0.052 908	0.001 429	0.282 745	0.000 021	5.5	0.8	1 223	−0.96
5	326	0.069 126	0.001 735	0.282 716	0.000 021	4.4	0.7	1 322	−0.95
6	328	0.037 139	0.001 056	0.282 810	0.000 021	7.9	0.7	1 006	−0.97
7	325	0.094 467	0.002 565	0.282 766	0.000 025	6.0	0.9	1 178	−0.92
10	331	0.078 992	0.002 114	0.282 789	0.000 020	7.0	0.7	1 089	−0.94
11	332	0.037 981	0.001 109	0.282 798	0.000 021	7.6	0.7	1 040	−0.97
14	329	0.065 050	0.001 951	0.282 870	0.000 019	9.9	0.7	829	−0.94
15	328	0.039 972	0.001 166	0.282 732	0.000 023	5.2	0.8	1 258	−0.96
16	332	0.036 044	0.001 136	0.282 755	0.000 016	6.1	0.6	1 177	−0.97
18	329	0.050 115	0.001 455	0.282 792	0.000 018	7.3	0.6	1 069	−0.96
20	328	0.057 107	0.001 626	0.282 799	0.000 020	7.5	0.7	1 050	−0.95
24	330	0.041 242	0.001 165	0.282 777	0.000 020	6.8	0.7	1 110	−0.96
14XL09.1(花岗闪长岩)									
1	322	0.035 400	0.001 111	0.282 821	0.000 018	8.2	0.6	980	−0.97
2	320	0.057 173	0.001 552	0.282 718	0.000 019	4.4	0.7	1 318	−0.95
3	320	0.023 396	0.000 715	0.282 791	0.000 017	7.2	0.6	1 070	−0.98
4	319	0.048 622	0.001 454	0.282 790	0.000 022	7.0	0.8	1 087	−0.96
6	319	0.046 919	0.001 318	0.282 836	0.000 019	8.6	0.7	937	−0.96
7	320	0.030 346	0.000 955	0.282 753	0.000 016	5.8	0.6	1 195	−0.97
8	318	0.041 447	0.001 350	0.282 802	0.000 018	7.4	0.6	1 050	−0.96
9	313	0.038 677	0.001 328	0.282 806	0.000 017	7.4	0.6	1 043	−0.96
10	319	0.031 643	0.001 068	0.282 833	0.000 014	8.5	0.5	945	−0.97
11	315	0.031 954	0.001 073	0.282 812	0.000 018	7.7	0.6	1 015	−0.97
12	318	0.034 080	0.001 141	0.282 720	0.000 012	4.5	0.4	1 307	−0.97
13	316	0.034 259	0.001 122	0.282 719	0.000 013	4.5	0.4	1 311	−0.97
14	319	0.046 926	0.001 513	0.282 752	0.000 015	5.6	0.5	1 211	−0.95
15	320	0.050 609	0.001 597	0.282 752	0.000 017	5.6	0.6	1 211	−0.95
18	320	0.051 634	0.001 487	0.282 747	0.000 018	5.5	0.6	1 224	−0.96
19	317	0.049 093	0.001 474	0.282 651	0.000 015	2.0	0.5	1 536	−0.96
20	319	0.021 763	0.000 752	0.282 752	0.000 014	5.8	0.5	1 196	−0.98
21	316	0.047 108	0.001 507	0.282 801	0.000 016	7.3	0.6	1 058	−0.95
23	319	0.044 156	0.001 407	0.282 764	0.000 017	6.1	0.6	1 170	−0.96
24	319	0.052 834	0.001 597	0.282 840	0.000 018	8.7	0.6	931	−0.95
14XL18.1(石英闪长岩)									
2	312	0.047 975	0.001 726	0.282 836	0.000 022	8.4	0.8	953	−0.95
3	311	0.061 456	0.001 987	0.282 802	0.000 019	7.1	0.7	1 068	−0.94
4	313	0.034 771	0.001 330	0.282 855	0.000 021	9.2	0.7	885	−0.96
5	312	0.037 601	0.001 348	0.282 820	0.000 021	7.9	0.7	999	−0.96
8	311	0.032 861	0.001 289	0.282 863	0.000 016	9.4	0.6	861	−0.96
10	312	0.043 213	0.001 711	0.282 801	0.000 017	7.1	0.6	1 068	−0.95
14	311	0.030 456	0.001 261	0.282 774	0.000 017	6.3	0.6	1 146	−0.96
17	310	0.042 785	0.001 690	0.282 826	0.000 017	8.0	0.6	990	−0.95
18	313	0.041 057	0.001 570	0.282 798	0.000 016	7.1	0.6	1 072	−0.95
19	323	0.029 616	0.001 160	0.282 796	0.000 018	7.3	0.6	1 059	−0.97
21	310	0.033 151	0.001 264	0.282 812	0.000 016	7.6	0.6	1 026	−0.96
15DX60(石英闪长岩)									
1	327	0.060 038	0.001 729	0.282 814	0.000 018	7.9	0.6	1 006	−0.95
3	326	0.057 414	0.001 626	0.282 785	0.000 018	6.9	0.6	1 099	−0.95
5	334	0.045 281	0.001 210	0.282 856	0.000 018	9.7	0.6	855	−0.96
6	328	0.056 495	0.001 406	0.282 787	0.000 016	7.1	0.6	1 086	−0.96
8	332	0.061 491	0.001 616	0.282 855	0.000 020	9.5	0.7	868	−0.95
9	331	0.039 834	0.001 166	0.282 791	0.000 019	7.3	0.7	1 065	−0.96
10	328	0.043 964	0.001 372	0.282 838	0.000 016	8.9	0.6	921	−0.96
11	332	0.054 540	0.001 483	0.282 819	0.000 019	8.3	0.7	978	−0.96
13	328	0.044 226	0.001 440	0.282 808	0.000 013	7.8	0.5	1 019	−0.96
14	325	0.044 280	0.001 371	0.282 765	0.000 016	6.2	0.6	1 158	−0.96
15	329	0.045 989	0.001 582	0.282 820	0.000 015	8.2	0.5	983	−0.95
16	330	0.037 070	0.001 334	0.282 782	0.000 013	6.9	0.5	1 098	−0.96
17	331	0.050 036	0.001 677	0.282 801	0.000 016	7.5	0.5	1 044	−0.95
18	335	0.070 227	0.002 212	0.282 813	0.000 017	7.9	0.6	1 011	−0.93
20	330	0.033 972	0.001 343	0.282 779	0.000 012	6.8	0.4	1 108	−0.96
21	329	0.043 470	0.001 446	0.282 837	0.000 016	8.9	0.6	924	−0.96
23	330	0.043 174	0.001 363	0.282 779	0.000 014	6.8	0.5	1 108	−0.96
24	330	0.046 520	0.001 383	0.282 723	0.000 016	4.8	0.5	1 287	−0.96

表 3 内蒙古锡林浩特跃进地区侵入岩主量元素(%)和微量元素(10⁻⁶)分析结果

样品号	14XL08-1	14XL08-2	14XL08-3	14XL09-1	14XL09-2	14XL11-1	15DX55	15DX56	14XL13-1
岩性	花岗岩长岩					英云闪长岩			
SiO ₂	66.93	67.05	67.00	64.96	66.21	64.28	65.48	64.46	65.69
Al ₂ O ₃	14.75	15.18	14.63	15.74	14.58	16.58	15.72	15.72	16.29
Fe ₂ O ₃	2.30	1.69	2.03	2.20	1.95	1.93	1.66	2.03	0.65
FeO	2.02	2.27	2.31	2.45	2.76	2.78	2.86	3.08	3.47
CaO	3.32	3.32	3.22	2.67	3.03	4.78	3.74	4.82	2.38
MgO	1.91	1.88	1.93	2.09	2.30	1.99	2.10	2.20	1.75
K ₂ O	2.20	2.44	3.07	2.39	2.18	2.12	1.73	1.72	2.5
Na ₂ O	4.11	3.61	3.21	3.74	3.60	3.64	3.74	3.65	4.19
TiO ₂	0.51	0.49	0.61	0.60	0.63	0.60	0.59	0.65	0.59
P ₂ O ₅	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.15	0.17	0.21	0.17
MnO	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09	0.11	0.094
LOI	1.47	1.58	1.49	2.66	2.20	0.75	1.80	1.02	1.84
Total	99.79	99.74	99.76	99.74	99.69	99.70	99.68	99.67	99.61
Mg [#]	49.50	51.00	49.50	49.70	51.70	48.00	50.30	48.50	47.50
Na ₂ O/K ₂ O	1.87	1.48	1.05	1.56	1.65	1.72	2.16	2.12	1.68
Cr	9.49	9.42	9.78	9.25	12.00	9.71	10.80	9.88	12.40
Ni	7.42	7.18	7.42	6.43	7.92	7.12	6.28	5.14	8.16
Co	10.90	10.00	11.00	11.90	13.00	12.50	11.20	13.50	15.30
Rb	58.90	57.70	78.00	61.60	60.40	53.20	55.10	59.50	33.50
Cs	4.90	4.40	4.21	10.80	7.16	3.46	5.86	3.76	2.33
Sr	248.00	204.00	220.00	252.00	190.00	252.00	404.00	336.00	293.00
Ba	314.00	409.00	591.00	371.00	380.00	444.00	347.00	359.00	326.00
Nb	4.75	4.56	8.31	6.27	6.62	5.24	5.12	6.27	6.04
Ta	0.41	0.43	1.21	0.64	0.66	0.45	0.34	0.44	0.45
Zr	118.00	129.00	125.00	98.10	124.00	131.00	140.00	156.00	115.00
Hf	3.72	3.94	3.98	3.28	4.04	4.00	3.88	4.28	3.55
U	1.67	1.24	1.52	1.62	1.64	1.19	1.05	1.04	1.20
Th	9.36	7.90	10.70	6.25	11.20	6.32	4.88	4.78	6.97
La	11.60	11.70	23.70	14.20	17.10	16.50	20.00	17.80	15.70
Ce	24.10	23.70	55.70	32.10	37.60	31.00	38.20	36.20	34.40
Pr	2.83	3.01	7.37	4.11	4.75	4.28	4.53	4.70	4.86
Nd	11.00	11.90	29.70	16.30	18.40	16.80	17.20	19.20	20.10
Sm	2.20	2.42	6.14	3.42	3.82	3.69	3.22	4.06	4.57
Eu	0.73	0.83	1.36	0.93	0.98	1.09	1.02	1.10	1.17
Gd	2.24	2.45	5.75	3.60	3.68	3.49	2.93	4.44	4.80
Tb	0.37	0.40	0.91	0.55	0.62	0.56	0.46	0.62	0.75
Dy	2.19	2.37	5.43	3.32	3.64	3.50	2.63	3.86	4.52
Ho	0.45	0.48	1.07	0.65	0.74	0.70	0.52	0.80	0.91
Er	1.35	1.44	3.08	1.84	2.18	2.05	1.46	2.26	2.62
Tm	0.22	0.23	0.46	0.30	0.34	0.31	0.22	0.35	0.40
Yb	1.56	1.59	3.07	2.13	2.35	2.07	1.52	2.54	2.66
Lu	0.28	0.29	0.49	0.35	0.40	0.34	0.23	0.36	0.44
Y	12.50	13.40	28.10	16.70	19.80	18.50	13.20	20.10	23.90
A/CNK	0.97	1.04	1.01	1.16	1.06	0.98	1.06	0.95	1.17
ΣREE	61.12	62.81	144.23	83.80	96.60	86.38	94.14	98.29	97.90
δEu	1.01	1.04	0.70	0.81	0.80	0.93	1.02	0.79	0.760

续表 3

样品号	15DX50	15DX51	14XL12-1	14XL17-1	14XL18-1	14XL18-2	15DX57	15DX58	15DX59	15DX60
岩性	石英闪长岩									
SiO ₂	62.51	62.14	61.32	62.26	61.26	57.05	61.03	62.74	60.70	62.58
Al ₂ O ₃	14.91	15.96	15.98	15.68	18.14	16.81	15.57	15.99	16.08	16.25
Fe ₂ O ₃	2.68	2.29	2.52	2.7	1.78	2.7	2.75	1.83	2.59	2.48
FeO	4.10	3.55	3.68	3.48	3.09	4.48	4.04	3.41	3.20	3.06
CaO	4.28	5.28	5.03	4.33	4.42	5.5	4.47	3.45	5.55	4.91
MgO	3.20	2.70	2.80	2.67	2.82	4.03	3.36	2.52	2.48	2.60
K ₂ O	1.52	1.28	1.96	2.24	1.67	1.67	1.40	1.73	1.92	1.35
Na ₂ O	2.98	3.35	3.28	3.15	3.76	3.67	3.41	4.18	3.92	3.62
TiO ₂	0.72	0.72	0.82	0.81	0.61	0.98	0.87	0.68	0.61	0.70
P ₂ O ₅	0.21	0.18	0.19	0.21	0.14	0.29	0.22	0.17	0.19	0.19
MnO	0.15	0.12	0.13	0.13	0.1	0.11	0.14	0.11	0.12	0.12
LOI	2.28	2.04	1.88	1.95	1.87	2.2	2.30	2.81	2.29	1.78
Total	99.54	99.61	99.59	99.61	99.66	99.49	99.56	99.62	99.65	99.64
Mg [#]	50.80	50.20	49.70	48.70	55.80	55.00	52.00	51.10	48.50	50.70
Na ₂ O/K ₂ O	1.96	2.62	1.67	1.41	2.25	2.20	2.44	2.42	2.04	2.68
Cr	14.40	12.00	13.30	9.84	3.17	35.30	15.30	12.50	11.90	12.80
Ni	7.48	6.81	9.84	7.88	11.90	23.90	7.59	6.00	9.99	6.57
Co	18.40	16.70	17.60	15.70	15.20	23.70	18.40	14.30	14.80	15.40
Rb	57.90	43.30	59.40	58.9	49.7	38.10	55.00	71.80	68.30	49.70
Cs	3.58	2.54	2.02	1.90	11.10	6.23	6.41	6.00	2.96	3.86
Sr	310.00	348.00	262.00	267.00	401.00	252.00	362.00	299.00	279.00	382.00
Ba	284.00	292.00	376.00	540.00	288.00	343.00	283.00	348.00	458.00	339.00
Nb	7.00	6.26	6.26	6.32	5.05	7.78	8.11	8.90	5.94	6.36
Ta	0.44	0.50	0.52	0.36	0.47	0.63	0.62	1.03	0.37	0.44
Zr	134.00	133.00	134.00	179	91.1	174	172.00	108.00	116.00	144.00
Hf	3.76	3.79	4.02	5.21	2.87	4.89	4.74	3.11	3.36	4.00
U	0.75	1.32	1.34	0.86	0.95	2.07	2.01	1.38	1.06	1.56
Th	1.72	6.91	3.92	2.75	5.59	4.96	4.29	2.63	3.44	4.10
La	12.60	26.10	16.50	16.30	11.80	15.80	15.70	12.30	11.10	15.50
Ce	27.80	52.50	38.20	36.40	28.00	39.10	39.60	31.80	30.10	37.20
Pr	4.30	5.99	5.31	5.19	3.38	4.73	5.82	5.02	4.38	4.92
Nd	19.80	23.00	22.80	22.50	14.00	19.70	24.80	22.00	20.20	20.70
Sm	4.97	4.56	5.22	5.25	3.13	4.12	5.70	5.32	5.08	4.54
Eu	1.24	1.18	1.32	1.32	0.87	1.18	1.45	1.33	1.30	1.24
Gd	4.90	4.29	5.40	5.59	3.43	4.48	6.35	5.24	5.93	4.20
Tb	0.81	0.69	0.89	0.85	0.51	0.63	0.90	0.85	0.88	0.70
Dy	4.96	4.18	5.29	5.14	3.15	3.61	5.57	5.59	5.37	4.36
Ho	1.00	0.85	1.05	1.02	0.64	0.71	1.15	1.17	1.08	0.89
Er	2.76	2.45	3.00	2.89	1.79	1.95	3.27	3.37	2.97	2.52
Tm	0.42	0.38	0.45	0.44	0.28	0.28	0.57	0.53	0.45	0.39
Yb	2.58	2.58	2.98	2.82	1.84	1.89	3.52	3.51	3.21	2.75
Lu	0.40	0.38	0.47	0.45	0.3	0.31	0.52	0.50	0.43	0.40
Y	24.40	21.60	27.80	27.4	17.1	18.3	29.40	30.50	26.90	22.80
A/CNK	1.04	0.97	0.96	1.01	1.13	0.94	1.02	1.06	0.86	0.99
ΣREE	88.54	129.13	108.88	106.16	73.12	98.49	114.92	98.53	92.48	100.31
δEu	0.77	0.82	0.76	0.74	0.81	0.84	0.74	0.77	0.72	0.87

(T_{DM}^{C})范围为 829~1 536 Ma.

石英闪长岩两件样品(14XL18.1, 15DX60)共计分析了 29 个测点,所有测点的 Hf 同位素组成也比较一致,除一个点以外, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 范围为 0.282 723~0.282 863,

$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值,范围在+4.8~+9.7,二阶段模式年龄(T_{DM}^{C})范围为 855~1 287 Ma.

3.3 岩石地球化学

跃进侵入岩的主微量元素分析结果列于表 3.主量元素显示,3 类侵入岩(花岗闪长岩、英云闪长岩、

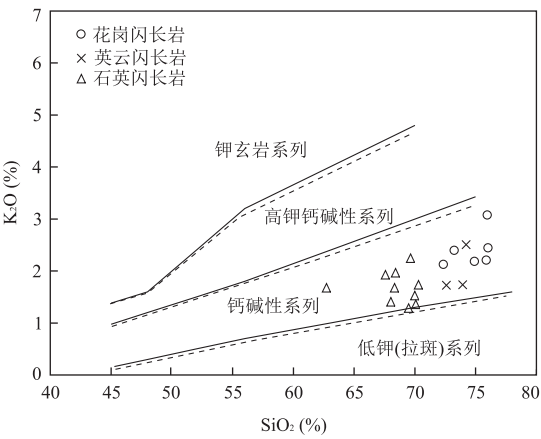


图 5 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解
Fig. 5 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia
据 Le Maitre *et al.* (1989)

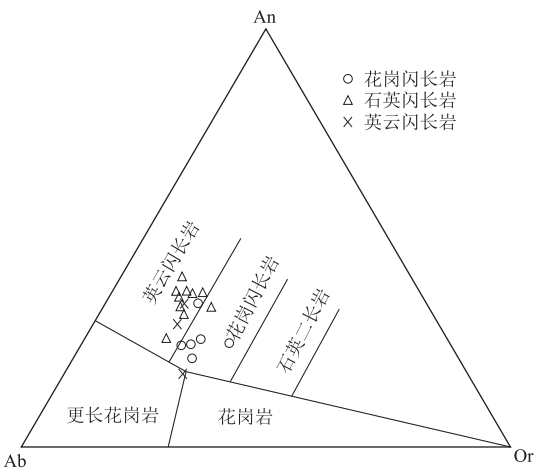


图 7 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 An-Ab-Or 图解
Fig. 7 An-Ab-Or diagram of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia
据 Barker (1979), 矿物含量 CIPW 根据标准矿物计算

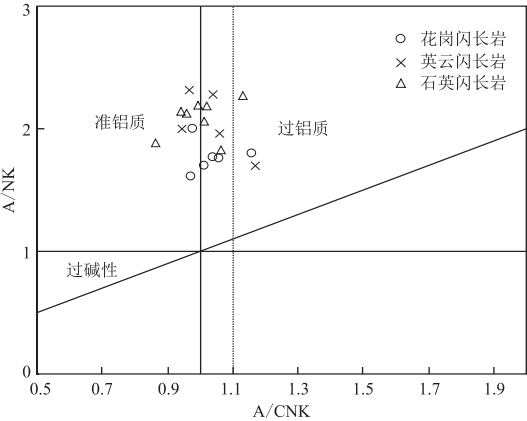


图 6 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 A/CNK-A/NK 图解
Fig. 6 A/CNK-A/NK diagram of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia
据 Maniar and Piccoli (1989)

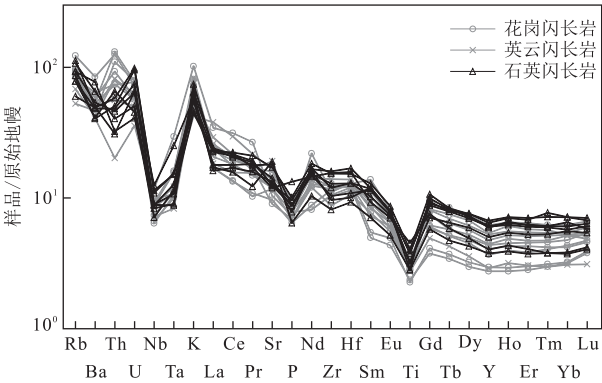


图 8 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩原始地幔标准化微量元素蛛网图
Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia
原始地幔标准化数据根据 Sun and McDonough (1989)

石英闪长岩)具有相似的特征:中等—偏高的 SiO_2 含量(57.05%~67.05%),较高的 Al_2O_3 (14.58%~18.14%)、 Na_2O (2.98%~4.19%)、 CaO (2.38%~5.55%)含量,较低的 K_2O (1.28%~3.07%)、 FeO_t (3.79%~6.91%)、 MgO (1.75%~4.03%)、 TiO_2 、 P_2O_5 含量, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值均大于 1.00 (1.05~2.68,平均 1.95),在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图上均落在钙碱性系列区域(图 5)。A/CNK 范围为 0.86~1.17,在 A/CNK-A/NK 图解上(图 6),样品落在准铝—弱过铝质系列区域,有个别样品落在强过铝质范围内。样品均具有较高的 $\text{Mg}^\#$ 值,范围为 47.5~55.8,平均值为 50.4。在 CIPW 标准矿物 An-Ab-Or 图解上,石英闪长岩和英云闪长岩大部分落在英云闪长岩区域,一个石英闪长岩样品落在花岗闪长岩区域,一个英

云闪长岩落在更长花岗岩区域,花岗闪长岩样品除一个落在英云闪长岩区域外,均落在花岗闪长岩区域(图 7),与镜下鉴定的定名稍有出入,可能由于 CIPW 标准矿物计算时假定的条件有关,但总体是一致的。

微量元素蛛网图(图 8)表明,这套侵入岩具有 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素的富集, Ba 具有弱的亏损,个别样品显示 Th 的亏损, Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素的亏损,类似俯冲带岩石的特征;不同样品间的稀土含量变化较小,稀土元素总量较低, ΣREE 范围为 $73.62\times 10^{-6}\sim 172.33\times 10^{-6}$,平均值为 118.33×10^{-6} ,在球粒陨石标准化的稀土元素配

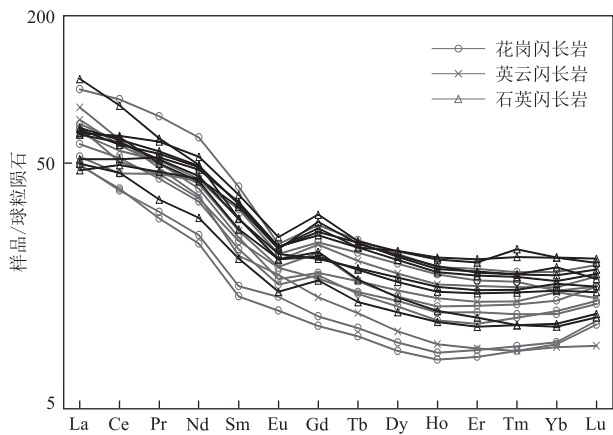


图 9 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩稀土配分模式图
Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns diagram of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia
原始地幔标准化数据根据 Sun and McDonough (1989)

分模式图上(图 9),所有样品具有一致的配分模式,显示轻稀土富集,(La/Yb)_N 大于 1,范围为 2.48~9.44,轻稀土分馏较明显,(La/Sm)_N 范围为 1.41~4.04,重稀土分馏较弱,(Gd/Yb)_N 范围为 1.19~1.96,具有较弱的 Eu 负异常(δEu 值为 0.70~1.04),表明岩浆演化过程中有过少量斜长石的分离结晶作用。

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素分析

本次共对 7 件样品进行了 Sr-Nd 同位素分析,数据列于表 4。

⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值小于 3,没有出现(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 异常低的情况(小于 0.700),表明 Sr 同位素分析结果有地质意义(Wu *et al.*, 2000),7 件样品具有较低的 Sr 初始比值,(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 范围为 0.703 7~0.704 8。

分析样品的 *f*_{Sm/Nd} 范围为-0.26~-0.36,在有效的范围内(-0.2~-0.4, Wu *et al.*, 2000),表明分析数据有意义,7 件样品均具有亏损的 Nd 同位素

组成,(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 范围为 0.512 320~0.512 401, ε_{Nd}(*t*)均为正值(+2.1~+3.6),表明源岩来自地幔;二阶段模式年龄 *T*_{DM2} 较集中(793~918 Ma)。

4 讨论

4.1 时代

通过锆石 LA-ICP-MS 测年,本次在跃进花岗闪长岩和石英闪长岩获得的年龄范围为 310~328 Ma,表明形成于早石炭世晚期一晚石炭世中期,这与区域上白音宝力道石炭纪岛弧型侵入岩(309~311 Ma, Chen *et al.*, 2000, 2009)及西乌旗南部岛弧型侵入岩(322~325 Ma, 刘建峰等, 2009)的侵位时代是相似的,均属于早石炭世晚期一晚石炭世早期,表明这套侵入岩在区域上呈连续带状分布。

4.2 成因

从岩石学特征来看,跃进侵入岩富含细粒闪长质暗色包体(MMEs),暗色矿物以角闪石为主,类似于 Barbarin(1999)分类方案中 ACG 系列;全岩地球化学数据表明,这套侵入岩属于钙碱性系列,微量元素显示 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素的富集以及 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素的亏损,反映了俯冲带的地球化学特征;另外,较低的 Sr 含量(<400×10⁻⁶)及较高的 Yb 含量(平均值 2.5×10⁻⁶),属于低 Sr 高 Yb 类花岗岩(张旗等, 2006),代表了正常的地壳厚度(30 km 左右),这与具有陆壳的成熟岛弧的地壳厚度类似(邓晋福等, 2004, 2007),重稀土分馏不明显也说明了源区石榴石不作为主要残留相存在,也表明地壳厚度不大。

邓晋福等(2015)提出岛弧岩浆可能的源区有 3 个:(1)俯冲的洋壳;(2)地幔楔;(3)地幔楔上的陆壳或洋壳。俯冲洋壳熔融一般形成埃达克岩,跃进侵入

表 4 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia

样品	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	± 2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	± 2σ	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM} (<i>t</i>)
花岗闪长岩										
14XL08-1	0.687 131	0.707 092	0.000 007	0.703 9	0.126 479	0.512 640	0.000 005	0.512 368	3.0	844
14XL08-2	0.818 354	0.707 559	0.000 005	0.703 7	0.128 605	0.512 677	0.000 005	0.512 401	3.6	793
14XL09-1	0.707 240	0.707 344	0.000 007	0.704 1	0.132 687	0.512 633	0.000 007	0.512 356	2.5	875
14XL09-2	0.919 831	0.708 250	0.000 005	0.704 1	0.131 291	0.512 675	0.000 010	0.512 401	3.4	804
石英闪长岩										
14XL12-1	0.655 923	0.706 909	0.000 007	0.703 8	0.144 785	0.512 633	0.000 005	0.512 320	2.1	918
14XL18-1	0.358 557	0.706 405	0.000 016	0.704 8	0.141 386	0.512 657	0.000 008	0.512 370	2.6	863
英云闪长岩										
14XL13-1	0.330 740	0.705 528	0.000 004	0.704 0	0.143 784	0.512 669	0.000 003	0.512 358	2.8	857

岩 Sr/Yb 比值较小,不属于洋壳直接熔融形成的埃达克岩;地幔楔直接熔融会产生基性岩浆,如果由基性岩浆直接分异,只能产生很少量的酸性岩,跃进侵入岩出露面积较大,并非来自幔源岩浆分异.因此,这套侵入岩可能来自地幔楔之上下地壳的熔融,这也得到同位素方面的支持,Sr-Nd-Hf 同位素分析数据均具有亏损的同位素组成, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值,在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解上落在球粒陨石线的上方(图 10),在 Sr-Nd 同位素图解上落在 OIB 区域(图 11),指示了亏损的地幔源区——即新生的基性下地壳物质,这与兴蒙造山带显生宙巨量的花岗岩源区特征是相似的(Wu *et al.*, 2000; 洪大卫等, 2000, 2003),并且 Hf-Nd 同位素二阶段模式年龄范围为中—新元古代(800~1200 Ma),也表明源岩是中—新元古代的新生基性下地壳.

此外,这套侵入岩的 $\text{Mg}^\#$ 范围为 47.5~55.8,平均值为 50.4,略大于直接由基性下地壳物质熔融形成的岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值(45,张旗等,2008),可能有幔源岩浆的参与,这也得到了岩体地质及区域岩石组合的支持:侵入岩中丰富的细粒暗色包体及研究区存在的同期辉长岩,均指示了跃进侵入岩的形成有基性岩浆的参与.

综上所述,根据薄片鉴定及 CIPW 标准矿物 Ab-An-Or 图解,跃进侵入岩具有类似于岛弧深成岩 TTG 组合(邓晋福等,2007),并且地球化学分析也指示了岛弧岩浆岩的特征,表明在早石炭世晚

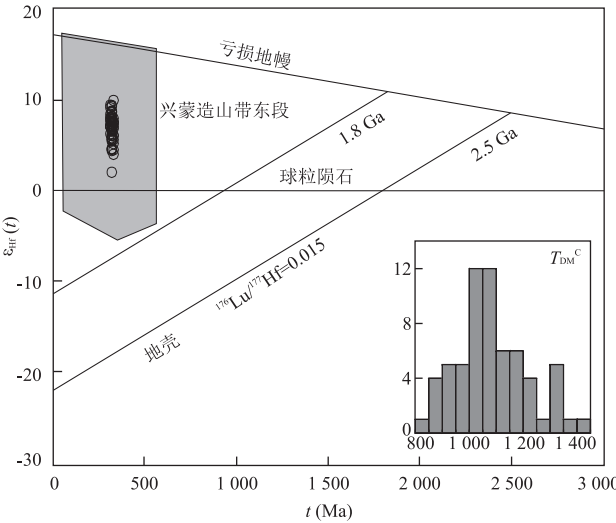


图 10 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解
Fig. 10 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ diagrams of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia
兴蒙造山带东段 Hf 同位素组成据 Yang *et al.* (2006)

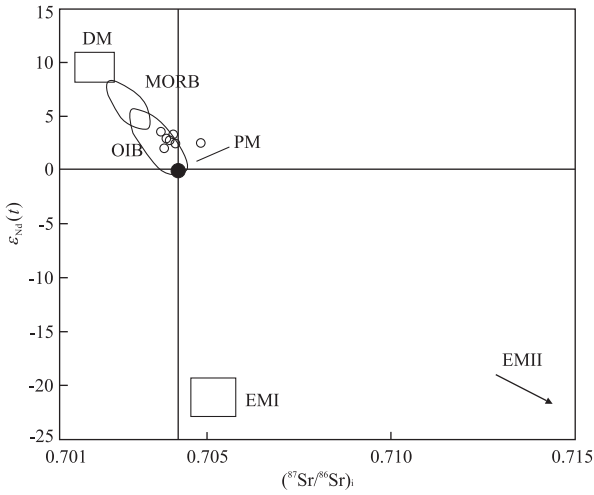


图 11 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 Sr-Nd 同位素组成图解
Fig. 11 Sr-Nd isotopic diagram of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia

期—晚石炭世早期,由俯冲板片脱水释放的流体及在流体作用下上覆地幔楔熔融形成的熔体共同作用下,中—新元古代形成的基性下地壳部分熔融,形成了这套岛弧型侵入岩.

4.3 构造背景

岩石学及地球化学分析均指示了俯冲带的构造背景,这也得到了主微量元素构造环境判别图解的支持,在微量元素构造环境判别 Pearce 图解上,样品均落在岛弧花岗岩区域(图 12);在 Rb-Hf-Ta 图解上,样品落在火山弧花岗岩区域,部分向碰撞花岗岩区域过渡,表明岛弧向成熟的方向演化(图 13);在主量元素构造环境判别 R_1-R_2 图解上(图 14),样品成群落在板块碰撞前区域.岛弧可分成为洋内弧和陆缘弧,跃进地区属于以酸性侵入岩为主的相对成熟岩浆弧,区别于以玻安岩、高镁安山岩等为代表的未成熟的洋内岛弧(邓晋福等,2007, 2015),在微量元素比值 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ 判别图解(图 15)上,样品也大多落在活动大陆边缘(陆缘弧)区域.此外,本文将前人在苏左旗白音宝力道、西乌旗达青牧场石炭纪侵入岩的数据进行对比,多数落于岛弧花岗岩区域,在 Rb-Hf-Ta 图解上少量样品落在板内和碰撞花岗岩区域,是由于较高含量的 Ta,而 Brown *et al.* (1984)认为随着岛弧成熟度增加,岛弧花岗岩趋向于富集 Ta,区域上与这套岛弧型侵入岩密切伴生的为一期 GG 组合(二长花岗岩、正长花岗岩),也代表了形成于成熟的岛弧背景(邓晋福等,2007),因此从区域上表明石炭纪侵入岩形成成熟岛弧的构造背景.此外本次研究的侵入岩同位素分析表明其源

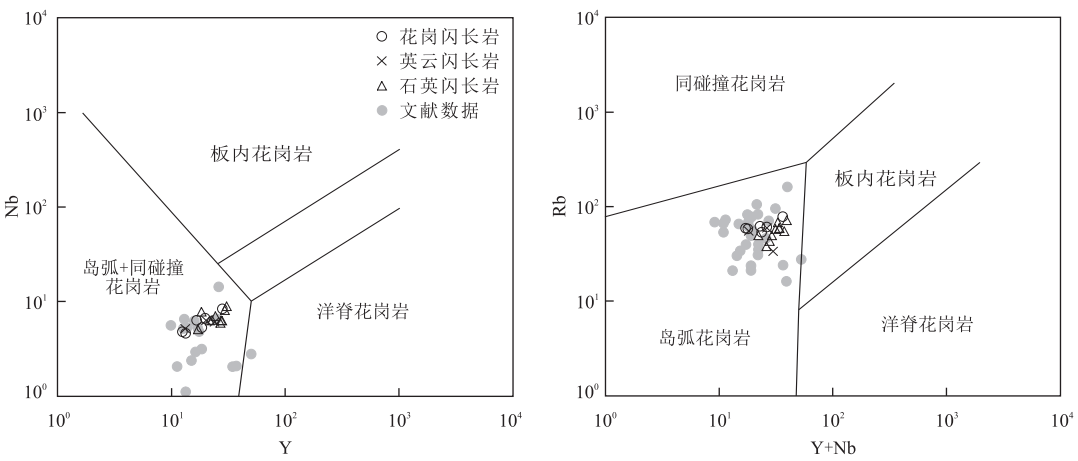


图 12 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 Y-Nb 及 (Y+Nb)-Rb 构造环境判别图解

Fig.12 Y-Nb and Y+Nb-Rb discrimination diagrams of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia

据 Pearce *et al.* (1984); 文献数据来自 Chen *et al.* (2000)、刘建峰等 (2009) 及 Hu *et al.* (2015)

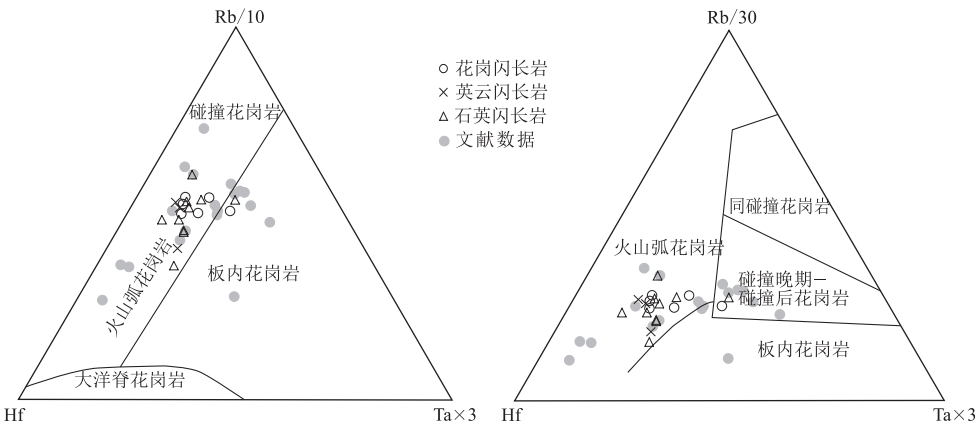


图 13 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 Rb-Hf-Ta 判别图解

Fig.13 Rb-Hf-Ta discrimination diagrams of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia

据 Harris *et al.* (1986); 文献数据来自 Chen *et al.* (2000)、刘建峰等 (2009) 及 Hu *et al.* (2015)

岩为中—新元古代从地幔分离出来的新生地壳物质,区域上早古生代乌兰敖包图闪长质侵入岩富集的同位素组成也指示了古老基底物质(王树庆等, 2016),这都说明之前存在大陆,跃进侵入岩形成于活动大陆边缘的构造环境。

4.4 地质意义

由于中亚造山带经历了多阶段复杂的演化过程,现有的研究对于构造演化有着不同的认识,部分学者认为古亚洲洋闭合于中晚泥盆世,晚泥盆世之后进入陆内演化阶段(邵济安等, 1991; 唐克东, 1992; 徐备和陈斌, 1997; 徐备等, 2014; Xu *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2016);另外一种观点认为古亚洲洋经历了早古生代及晚古生代多期俯冲—增生造山过程,最终于晚古生代末期沿索伦缝合带闭合(Chen *et al.*, 2000, 2009; Xiao *et al.*, 2003; Li,

2006; Jian *et al.*, 2010),争议的焦点集中于晚古生代地球动力学背景,如对苏左旗白音宝力道向东经锡林浩特至西乌旗一带广泛发育的石炭纪岩浆岩构造背景的争议,Chen *et al.* (2000, 2009)和刘建峰等(2009)认为白音宝力道及西乌旗南部侵入岩形成于俯冲带的岛弧和活动大陆边缘环境,代表了石炭纪古亚洲洋向北的俯冲作用,而鲍庆中等(2007a, 2007b)认为西乌旗南部石炭纪石英闪长岩形成于华北板块和西伯利亚板块碰撞后的裂谷环境, Hu *et al.* (2015)认为白音宝力道侵入岩形成后碰撞背景下,从本文的研究结果来看,跃进石炭纪侵入岩形成于俯冲带的活动大陆边缘背景,区域上与西部南蒙古地区发育的 I 型花岗岩(Blight *et al.*, 2010)、白音宝力道地区出露的岛弧型侵入岩(陈斌和徐备, 1996; Chen *et al.*, 2000, 2009)、锡林浩特一带分布

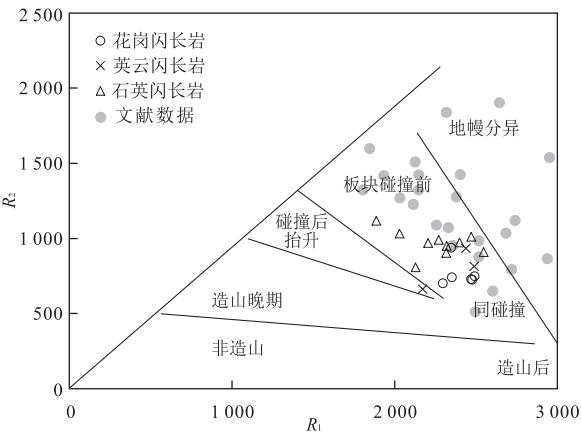


图 14 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 R_1 - R_2 构造环境判别图解
Fig.14 R_1 - R_2 discrimination diagram of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia
据 Batchelor and Bowden (1985); 文献数据来自 Chen *et al.* (2000), 刘建峰等 (2009) 及 Hu *et al.* (2015)

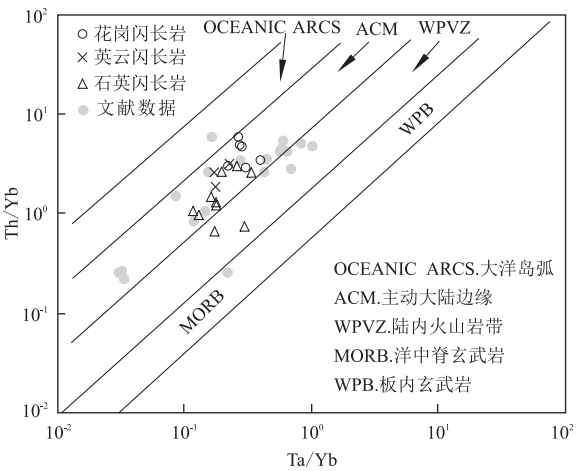


图 15 内蒙古锡林浩特跃进侵入岩 Th/Yb-Ta/Yb 判别图解
Fig.15 Th/Yb-Ta/Yb discrimination diagram of Yuejin intrusive rocks, Xilinhot, Inner Mongolia
据 Gorton and Schandl (2000); 文献数据来自 Chen *et al.* (2000), 刘建峰等 (2009) 及 Hu *et al.* (2015)

的早石炭世岛弧型变质基性火山岩(康健丽等, 2016)及西乌旗出露的石炭纪岛弧型侵入岩(刘建峰等, 2009)构造背景是一致的, 而鲍庆中等(2007a, 2007b)未对西乌旗南部石炭纪石英闪长岩进行地球化学分析工作, 仅依据区域上石英闪长岩侵入锡林浩特杂岩及被晚石炭世本巴图组及阿木山组“角度不整合”(尚待确认)认为形成于伸展裂谷背景, 值得进一步商榷; 薛怀民等(2009)根据锡林郭勒杂岩中岩浆成因锆石的加权平均年龄 406 ± 7 Ma 及锆石变质增生边的年龄 337 ± 6 Ma, 认为锡林郭勒杂岩原岩是形成于晚古生代早期的弧前沉积物, 后经历了石炭纪碰撞造山过程中的变质变形作用形成的, 据此推断维拉斯托一带未变形且侵入到锡林郭勒杂岩的石炭纪侵入岩(闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩)形成于晚造山/后造山环境, 但并未对侵入岩进行岩石学和地球化学分析, 并且锡林郭勒杂岩的时代及成因仍有争议, 如 Li *et al.* (2011)在锡林郭勒杂岩中同样获得了 452 ± 5 Ma 的岩浆锆石年龄, 与薛怀民等(2009)和施光海等(2003)获得的岩浆年龄 (437 ± 3 Ma)类似, 但认为这些岩浆锆石形成于早古生代大洋俯冲诱发的部分熔融和混合岩化作用, 而碎屑锆石年龄表明锡林郭勒杂岩形成于 800 Ma 之前, 因此石炭纪侵入岩的成因也需在岩石学及地球化学分析的基础上进一步讨论; Hu *et al.* (2015)对白音宝力道石炭纪侵入岩中花岗闪长岩、二长花岗岩进行地球化学分析认为形成于造山后伸展背景, 而认为一套 TTG 组合的石英闪长岩、英云闪长岩、闪长岩、辉长闪长岩所反映的岛弧地球化学特征

是来源于被早古生代岛弧物质的混染及不同程度的岩浆分离结晶作用, 并未给出具体的过程及依据, 如果是岩浆被早期岛弧物质混染, 应该主要限于与围岩接触带并且混染的规模不会太大, 难以形成规模大的、均匀具有岛弧特征的 TTG 侵入岩. 事实上, 认为大洋闭合于晚石炭纪之前的观点(薛怀民等, 2009, 2010; 李可等, 2014, 2015; 徐备等, 2014; Xu *et al.*, 2015)的研究员多认为石炭纪侵入岩呈面状分布并且出现碱性花岗岩, 但根据贺根山及二道井—迪彦庙蛇绿岩带可将晚古生代侵入岩分为 3 条带, 碱性花岗岩及高钾钙碱性的后造山花岗岩多分布于贺根山蛇绿岩带以北的查干敖包—东乌旗地区, 贺根山蛇绿岩以南的白音宝力道—锡林浩特—迪彦庙石炭纪侵入岩带为一套岛弧型 TTG 侵入岩组合, 并且区域上在二道井—达青牧场—迪彦庙地区发育一条蛇绿混杂岩带(Liu *et al.*, 2013), 时代为 315~318 Ma(达青牧场玄武岩, Liu *et al.*, 2013)和 328 ± 3 Ma(迪彦庙斜长花岗岩), 白音宝力道—锡林浩特—达青牧场—迪彦庙石炭纪 TTG 侵入岩组合时代上与蛇绿岩一致, 在空间上分布于蛇绿岩带以北, 并且陈斌等(2009)和 Chen *et al.* (2009)在白音宝力道以南蛇绿混杂岩带中的蓝片岩中获得了 318 ± 5 Ma 的锆石年龄, 共同构成了沟—弧体系, 代表了石炭纪古亚洲洋向北的俯冲. 此外, Zhang *et al.* (2007, 2009, 2016)在华北板块北缘地区识别出的晚石炭世 ($324 \sim 300$ Ma) 岛弧型侵入岩(花岗闪长岩—英云闪长岩—石英闪长岩—闪长岩—角闪辉长

岩),与跃进侵入岩所处的白音宝力道—锡林浩特—达青牧场—迪彦庙岛弧岩带同期形成,代表了晚古生代古亚洲洋向南俯冲到华北板块之下形成的安第斯型活动大陆边缘,因此南北两条石炭纪岛弧岩带反映了大洋俯冲作用达到顶峰,仍存在洋壳——以二道井—达青牧场—迪彦庙蛇绿岩为代表(Liu *et al.*, 2013),表明并未碰撞造山,这从沉积记录上也可以得到证实—苏左旗—西乌旗地区广泛沉积了晚石炭纪本巴图组(C_2bb)海相碎屑岩和阿木山组(C_2a)碳酸盐岩。直到二叠晚期出现陆相的林西组上部地层,才代表了残余海盆的消失,古亚洲洋沿索伦—西拉木伦构造带闭合,进入陆内演化阶段(Li, 2006)。

此外, Sr-Nd-Hf 同位素分析表明,跃进侵入岩源岩为形成于中元古代晚期—新元古代早期的新生下地壳物质,这表明元古宙存在明显的地壳增生作用,这与中亚造山带显生宙花岗岩所反映的新元古代地壳增生事件是一致的(吴福元等, 1999; Wu *et al.*, 2000; 洪大卫等, 2003),反映了大规模的地壳增生事件。

5 结论

(1) 锆石 U-Pb LA-MC-ICP-MS 测年结果表明,锡林浩特跃进地区酸性侵入岩形成于早石炭世晚期—晚石炭世中期(310~330 Ma),为一套钙碱性的岛弧型岩浆岩。

(2) Sr-Nd-Hf 同位素分析表明,锡林浩特跃进侵入岩的源岩是中元古代晚期—新元古代早期新生的基性下地壳物质,在俯冲带流体及基性岩浆共同作用下,部分熔融形成的。

(3) 岩石学及岩石地球化学分析显示跃进侵入岩形成于活动大陆边缘的构造环境,表明研究区在石炭纪仍存在古亚洲洋的俯冲作用,并未进入板内演化阶段。

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;刘永顺教授级高工在成文过程中给予许多指导;编委及两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

Badarch, G., Gunningham, W. D., Windley, B. F., 2002. A New Terrane Subdivision for Mongolia: Implications for the

Phanerozoic Crustal Growth of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 87—110. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00017-2)

Bao, Q. Z., Zhang, C. J., Wu, Z. L., et al., 2007a. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of a Carboniferous Quartz-Diorite in Baiyingaole Area, Inner Mongolia and Its Implications. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(1): 15—23 (in Chinese with English abstract).

Bao, Q. Z., Zhang, C. J., Wu, Z. L., et al., 2007b. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Granitoids in a Late Paleozoic Rift Area, Southeastern Inner Mongolia, and Its Implications. *Geology in China*, 34(5): 790—798 (in Chinese with English abstract).

Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46: 605—626. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1)

Barker, F., 1979. Trondhjemite: Definition, Environment and Hypothesis of Origin. In: Trondhjemite, D., ed., *Dacites and Related Rocks*. Elsevier, Amsterdam, 1—12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41765-7.50006-X>

Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1—4): 43—55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)

Blight, J. H. S., Crowley, Q. G., Petterson, M. G., et al., 2010. Granites of the Southern Mongolia Carboniferous Arc: New Geochronological and Geochemical Constraints. *Lithos*, 116: 35—52. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.01.001>

Brown, G. C., Thorpe, R. S., Webb, P. C., 1984. The Geochemical Characteristics of Granitoids in Contrasting Arc and Comments on Magma Source. *Journal of the Geological Society*, 141(3): 413—426. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.3.0413>

Chen, B., Jahn, B. M., Tian, W., 2009. Evolution of the Solonker Suture Zone: Constraints from Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Ratios and Whole-Rock Nd-Sr Isotope Compositions of Subduction- and Collision-Related Magmas and Forearc Sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 245—257. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2008.05.007>

Chen, B., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Two Contrasting Paleozoic Magmatic Belts in Northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 328: 157—182. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00182-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00182-7)

Chen, B., Ma, X. H., Liu, A. K., et al., 2009. Zircon U-Pb Ages

- of the Xilinhot Metamorphic Complex and Blueschist, and Implications for Tectonic Evolution of the Solonker Suture. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3123–3129 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Xu, B., 1996. The Main Characteristics and Tectonic Implications of Two Kinds of Paleozoic Granitoids in Sunidzuqi, Central Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 49–64 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Zhao, G. C., Wilde, S., 2001. Subduction- and Collision-Related Granitoids from Southern Sonidzuqi, Inner Mongolia: Isotopic Ages and Tectonic Implications. *Geological Review*, 47(4): 361–367 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y. H., Li, Y. F., Li, M., et al., 2014. Geochronology and Petrogenesis of the Alkaline Pluton in Dong Ujimqi, Inner Mongolia and Its Tectonic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2086–2096 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y. H., Teng, X. J., Xin, H. T., et al., 2012. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Granites in Mahonondor Area, East Ujimqin Banner, Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 323–334 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Feng, Y. F., Di, Y. J., et al., 2015. Magmatic Arc and Ocean-Continent Transition: Discussion. *Geological Review*, 61(3): 473–484 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Luo Z. H., Su, S. G., et al., 2004. Petrogenesis, Tectonic Setting and Mineralization. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Xiao, Q. H., Su, S. G., et al., 2007. Igneous Petro-tectonic Assemblages and Tectonic Settings: A Discussion. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 392–402 (in Chinese with English abstract).
- Ge, M. C., Zhou, W. X., Yu, Y., et al., 2011. Dissolution and Supracrustal Rocks Dating of Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 182–195 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Gorton, M. P., Schandl, E. V., 2000. From Continents to Island Arcs: A Geochemical Index of Tectonic Setting for Arc-Related and Within-Plate Felsic to Intermediate Volcanic Rocks. *Canadian Mineralogist*, 38(5): 1065–1073. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1065>
- Hao, X., Xu, B., 1997. Sm-Nd, Rb-Sr Isotopic Geochronology of the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China. *Geological Review*, 43(1): 101–105 (in Chinese with English abstract).
- Harris, N. B. W., Pearce, J. A., Tindle, A. G., 1986. Geochemical Characteristics of Collision-Zone Magmatism. In: Coward, M. P., Reis, A. C., eds., *Collision Tectonics. Geological Society of London Special Publications*, 19: 67–81. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.04>
- Hong, D. W., Huang, H. Z., Xiao, Y. J., et al., 1994. The Permian Alkaline Granites in Central Inner Mongolia and Their Geodynamic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 68(3): 219–230 (in Chinese with English abstract).
- Hong, D. W., Wang, S. G., Xie, X. L., et al., 2000. Genesis of Positive $\epsilon_{Nd}(t)$ Granitoids in the Da Hinggan Mts.-Mongolia Orogenic Belt and Growth Continental Crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441–456 (in Chinese with English abstract).
- Hong, D. W., Wang, S. G., Xie, X. L., et al., 2003. Correlation between Continental Crustal Growth and the Supercontinental Cycle: Evidence from the Granites with Positive $\epsilon_{Nd}(t)$ in the Central Asian Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 203–209 (in Chinese with English abstract).
- Hong, D. W., Zhang, J. S., Wang, T., et al., 2004. Continental Crustal Growth and the Supercontinental Cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Science*, 23: 799–813. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00134-2](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00134-2)
- Hu, C. S., Li, W. B., Xu, C., et al., 2015. Geochemistry and Zircon U-Pb-Hf Isotopes of the Granitoids of Baolidao and Halatu Plutons in Sonidzuqi Area, Inner Mongolia: Implications for Petrogenesis and Geodynamic Setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97(B): 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.07.030>
- Jahn, B. M., Capdevila, R., Liu, D. Y., et al., 2004. Sources of Phanerozoic Granitoids in the Transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: Geochemical and Nd Isotopic Evidence, and Implications for Phanerozoic Crustal Growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 629–653. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00125-1)
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Chen, B., 2000. Massive Granitoid Generation in Central Asia: Nd Isotope Evidence and Implication for Continental Growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82–92.
- Jian, P., Kröner, A., Windly, B. F., et al., 2012. Carboniferous and Cretaceous Mafic-Ultramafic Massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP Zircon and Geochemical Study of the Previously Presumed Integral “Hegenshan Ophiolite”. *Lithos*, 142–143: 48–66. <https://doi.org/>

- 10.1016/j.lithos.2012.03.007
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2008. Time Scale of the Early to Mid-Paleozoic Orogenic Cycle of the Longlived 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>
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2010. Evolution of a Permian Intraoceanic Arc-Trench System in the Solonker Suture Zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia, *Lithos*, 118 (1—2): 169—190. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.04.014>
- Kang, J. L., Xiao, Z. B., Wang, H. C., et al., 2016. Late Paleozoic Subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and Geochemical Evidence from the Meta-Basic Volcanics of Xilinhot, Inner Mongolia, *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 383—397 (in Chinese with English abstract).
- Khain, E. V., Bibikova, E. V., Kröner, A., et al., 2002. The Most Ancient Ophiolite of the Central Asian Fold Belt: U-Pb and Pb-Pb Zircon Ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and Geodynamic Implications, *Earth and Planetary Science Letters*, 199(3—4): 311—325. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00587-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00587-3)
- Khain, E. V., Bibikova, E. V., Salnikova, E. B., et al., 2003. The Palaeo-Asian Ocean in the Neoproterozoic and Early Palaeozoic: New Geochronologic Data and Palaeotectonic Reconstructions, *Precambrian Research*, 122(1—4): 329—358. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00218-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00218-8)
- Kröner, A., Demoux, A., Zack, T., et al., 2011. Zircon Ages for a Felsic Volcanic Rock and Arc-Related Early Palaeozoic Sediments on the Margin of the Baydrag Microcontinent, Central Asian Orogenic Belt, Mongolia, *Journal of Asian Earth Sciences*, 42 (5): 1008—1017. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2010.09.002>
- Kröner, A., Kovach, V., Belousova, E., et al., 2014. Reassessment of Continental Growth during the Accretionary History of the Central Asian Orogenic Belt, *Gondwana Research*, 25 (1): 103—125. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.023>
- Kröner, A., Lehmann, J., Schulmann, K., et al., 2010. Lithostratigraphic and Geochronological Constrains on the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt in SW Mongolia: Early Paleozoic Rifting Followed by Late Paleozoic Accretion, *American Journal of Science*, 310 (1): 523—574. <https://doi.org/10.2475/07.2010.01>
- Kröner, A., Windley, B. F., Badarch, G., 2007. Accretionary Growth and Crust-Formation in the Central Asian Orogenic Belt and Comparison with the Arabian-Nubian Shield, *Geological Society of America Memoir*, 200: 181—209.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., et al., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Blackwell, Oxford.
- 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 Subdivision of the Mesoproterozoic Stratigraphy in the Northern North China, *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131—2140 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., 2006. Permian Geodynamic Setting of Northeast China and Adjacent Regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and Subduction of the Paleo-Pacific Plate, *Journal of Asian Earth Sciences*, 26 (3—4): 207—224. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2005.09.001>
- Li, J. Y., Gao, L. M., Sun, G. H., et al., 2007. Shuangjingzi Middle Triassic Syn-Collisional Crust-Derived Granite in the East Inner Mongolia and Its Constraint on the Timing of Collision between Siberian and Sino-Korean Paleo-Plates, *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565—582 (in Chinese with English abstract).
- Li, K., Zhang, Z. C., Feng, Z. S., et al., 2014. Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Its Geological Significance of the Late-Carboniferous to Early-Permian Volcanic Rocks in Bayanwula Area, the Central of Inner Mongolia, *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2041—2054 (in Chinese with English abstract).
- Li, K., Zhang, Z. C., Feng, Z. S., et al., 2015. Two-Phase Magmatic Events during Late Paleozoic in the North of the Central Inner Mongolia-Da Hinggan Orogenic Belt and Its Tectonic Significance, *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 272—288 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. G., Li, Q. F., Jiang, W. D., et al., 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Inner Mongol Autonomous Region. China University of Geosciences Press, Wuhan, 119—120 (in Chinese).
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Brouwer, F. M., et al., 2011. Tectonic Significance of the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China: Petrological, Geochemical and U-Pb Zircon Age Constraints, *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 1018—1029. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2010.09.009>
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Brouwer, F. M., et al., 2014. Nature and Timing of the Solonker Suture of the Central Asian Orogenic Belt: Insights from Geochronology and Geochemistry of Basic Intrusions in the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China, *International Journal of Earth Sciences*, 103 (1): 41—60. <https://doi.org/10.1007/>

s00531-013-0931-3

- Liu, J. F., Chi, X. G., Zhang, X. Z., et al., 2009. Geochemical Characteristic of Carboniferous Quartz-Diorite in the Southern Xiwuqi Area, Inner Mongolia and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 365—376 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. F., Li, J. Y., Chi, X. G., et al., 2013. A Late-Carboniferous to Early Early-Permian Subduction-Accretion Complex in Daqing Pasture, Southeastern Inner Mongolia: Evidence of Northward Subduction beneath the Siberian Paleoplate Southern Margin. *Lithos*, 177: 285—296. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.07.008>
- 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>
- Ludwig, K. R., 2003. Users Manual for Isoplot 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, 4: 1—71.
- 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>
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Şengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Paleozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299—307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>
- Shao, J. A., He, G. Q., Tang, K. D., 2015. The Evolution of Permian Continental Crust in Northern Part of North China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 47—55 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Tang, K. D., He, G. Q., 2014. Early Permian Tectono-Paleogeographic Reconstruction of Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1858—1866 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Tang, K. D., Wang, C. Y., et al., 1991. The Tectonic Characters of Nanhada Massif and Its Evolution. *Science in China (Series B)*, 21(7): 744—751 (in Chinese).
- Shi, G. H., Liu, D. Y., Zhang, F. Q., et al., 2003. SHRIMP Zircon Geochronology and Its Significance of Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 48(20): 2187—2192 (in Chinese).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in Oceanic Basins, Geological Society Special Publication*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Tang, K. D., 1992. Tectonic Evolution and Minerogenetic Regularities of the Fold Belt along the Northern Margins of Sino-Korean Plate. Peking University Press, Beijing, 305 (in Chinese with English abstract).
- Tong, Y., Jahn, B. M., Wang, T., et al., 2015. Permian Alkaline Granites in the Erenhot-Hegenshan Belt, Northern Inner Mongolia, China: Model of Generation, Time of Emplacement and Regional Tectonic Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97(Part B): 320—336. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.10.011>
- Wang, Q., Liu, X. Y., Li, J. Y., 1991. Plate Tectonics between Cathaysia and Angaraland in China. Peking University Press, Beijing, 151 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. Q., Xin, H. T., Hu, X. J., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Early Paleozoic Wulanaobaotu Intrusive Rocks, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(4): 555—569 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Jahn, B. M., Kovach, P. V., et al., 2009. Nd-Sr Isotopic Mapping of the Chinese Altai and Implications for Continental Growth in the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 110(1—4): 359—372. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.02.001>
- Windley, B. F., Alexeev, D., Xiao, W. J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Geological Society*, 164: 31—47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Phanerozoic Crustal Growth: U-Pb and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1—2): 89—113. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00179-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00179-7)
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Lin, Q., 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic Granites and Crustal Growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181—189 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 1069—1090. <https://doi.org/10.1029/2002TC001484>
- Xu, B., Charvet, J., Chen, Y., et al., 2013. Middle Paleozoic Convergent Orogenic Belts in Western Inner Mongolia

- (China): Framework, Kinematics, Geochronology and Implications for Tectonic Evolution of the Central Asian Orogenic Belt, *Gondwana Research*, 23(4): 1342—1364. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.05.015>
- Xu, B., Charvet, J., Zhang, F. Q., 2001. Primary Study on Petrology and Geochronology of Blueschists in Sunitezuoqi, Northern Inner Mongolia. *Chinese Journal of Geology*, 36(4): 424—434 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Chen, B., 1997. Framework and Evolution of the Middle Paleozoic Orogenic Belt between Siberian and North China Plates in Northern Inner Mongolia. *Science China Earth Sciences*, 27(3): 227—232 (in Chinese).
- Xu, B., Chen, B., Shao, J. A., 1996. Sm-Nd, Rb-Sr Study of Xilin Gol Complex, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 41(2): 153—155 (in Chinese).
- Xu, B., Zhao, P., Bao, Q. Z., et al., 2014. Preliminary Study on the Pre-Mesozoic Tectonic Unit Division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB). *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841—1857 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Zhao, P., Wang, Y. Y., et al., 2015. The Pre-Devonian Tectonic Framework of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt (XMOB) in North China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97 (Part B): 183—196. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.07.020>
- Xu, L. Q., Ju, W. X., Liu, C., et al., 2012. Sr-Yb Classification and Genesis of Late Carboniferous Granites in Arenshaobu Area of Erenhot, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 31(9): 1410—1419 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 307—316 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Guo, L. J., Hou, Z. Q., et al., 2009. The Xilingele Complex from the Eastern Part of the Central Asian-Mongolia Orogenic Belt, China: Products of Early Variscan Orogeny other than Ancient Block: Evidence from Zircon SHRIMP U-Pb Ages. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 2001—2010 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Guo, L. J., Hou, Z. Q., et al., 2010. SHRIMP Zircon U-Pb Ages of the Middle Neopaleozoic Unmetamorphosed Magmatic Rocks in the Southwestern Slope of the Da Hinggan Mountains, Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 811—823 (in Chinese with English abstract).
- Yang, G., Xiao, L., Wang, G. C., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Zircon Lu-Hf Study of Granites in Western Section of Xiemisitai Area, Western Junggar. *Earth Science*, 40(3): 548—562 (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>
- Zhang, Q., Wang, Y., Li, C. D., et al., 2006. Granite Classification on the Basis of Sr and Yb Contents and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249—2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Xiong, X. L., 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. China Land Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Kröner, A., et al., 2009. Early Permian Plutons from the Northern North China Block: Constraints on Continental Arc Evolution and Convergent Margin Magmatism Related to the Central Asian Orogenic Belt. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1441—1467. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0368-2>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Liu, J. M., et al., 2016. Different Sources Involved in Generation of Continental Arc Volcanism: The Carboniferous-Permian Volcanic Rocks in the Northern Margin of the North China Block. *Lithos*, 240—243: 382—401. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.027>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2007. Carboniferous Granitic Plutons from the Northern Margin of the North China Block: Implications for a Late Palaeozoic Active Continental Margin. *Journal of the Geological Society*, 164(2): 451—463. <https://doi.org/10.1144/0016-76492005-190>
- Zhang, X. H., Yuan, L. L., Xue, F. H., et al., 2015. Early Permian A-Type Granites from Central Inner Mongolia, North China: Magmatic Tracer of Post-Collisional Tectonics and Oceanic Crustal Recycling. *Gondwana Research*, 28(1): 311—327. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.02.011>
- Zhang, Y. Q., Xu, L. Q., Kang, X. L., et al., 2009. Age Dating of Alkali Granite in Jingesitai Area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and Its Significance. *Geology in China*, 36(5): 988—995 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P., Xu, B., Tong, Q., et al., 2016. Sedimentological and Geochronological Constraints on the Carboniferous Evolution of Central Inner Mongolia, Southeastern Central Asian Orogenic Belt: Inland Sea Deposition in a

- Post-Orogenic Setting. *Gondwana Research*, 31: 253—270. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.01.010>
- Zhou, W. X., 2012. Studies of Geochronology and Geochemistry of Paleozoic Magmatism in Xilinhot Area, Inner Mongolia (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 69—72 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W. X., Ge, M. C., 2013. Redefinition and Significance of Metamorphism Xilinhot Group in Xilinhot Area, Inner Mongolia, China. *Earth Science*, 38 (4): 715—724 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. F., Sun, S. H., Mao, Q., et al., 2004. Geochemistry of the Xilingele Complex, Inner Mongolia: A Historic Record from Rodinia Accretion to Continental Collision after Closure of the Paleo-Asian Ocean. *Geological Journal of China Universities*, 10 (3): 343—355 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等, 2007a. 内蒙古白音高勒地区石炭纪石英闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其意义. 吉林大学学报(地球科学版), 37 (1): 15—23.
- 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等, 2007b. 内蒙古东南部晚古生代裂谷区花岗质岩石锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 中国地质, 34 (5): 790—798.
- 陈斌, 马星华, 刘安坤, 等, 2009. 锡林浩特杂岩和蓝片岩的锆石 U-Pb 年代学及其对索伦缝合带演化的意义. 岩石学报, 25 (12): 3123—3129.
- 陈斌, 徐备, 1996. 内蒙古苏左旗地区古生代两类花岗岩类的基本特征和构造意义. 岩石学报, 12 (4): 49—64.
- 陈斌, 赵国春, Wilde, S., 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义. 地质论评, 47 (4): 361—367.
- 程银行, 李艳锋, 李敏, 等, 2014. 内蒙古东乌旗碱性侵入岩的时代、成因及地质意义. 地质学报, 88 (11): 2086—2096.
- 程银行, 滕学建, 辛后田, 等, 2012. 内蒙古东乌旗狼麦温都尔花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 31 (3): 323—334.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等, 2015. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换. 地质论评, 61 (3): 473—484.
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等, 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社.
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等, 2007. 火成岩组合与构造环境: 讨论. 高校地质学报, 13 (3): 392—402.
- 葛梦春, 周文孝, 于洋, 等, 2011. 内蒙古锡林郭勒杂岩解体及表壳岩系年代确定. 地学前缘, 18 (5): 182—195.
- 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.
- 郝旭, 徐备, 1997. 内蒙古锡林浩特锡林郭勒杂岩的原岩年代和变质年代. 地质论评, 43 (1): 101—105.
- 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等, 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义. 地质学报, 68 (3): 219—230.
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 等, 2000. 兴安造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地学前缘, 7 (2): 441—456.
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 等, 2003. 从中亚正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩看超大陆演化和大陆地壳生长的关系. 地质学报, 77 (2): 203—209.
- 康健丽, 肖志斌, 王惠初, 等, 2016. 内蒙古锡林浩特早石炭世构造环境: 来自变质基性火山岩的年代学和地球化学证据. 地质学报, 90 (2): 383—397.
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 等, 2010. 北京延庆高干庄组凝灰岩的锆石 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, 高立明, 孙桂华, 等, 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23 (3): 565—582.
- 李可, 张志诚, 冯志硕, 等, 2014. 内蒙古中部巴彥乌拉地区晚石炭世—早二叠世火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 30 (7): 2041—2054.
- 李可, 张志诚, 冯志硕, 等, 2015. 兴安造山带中段北部晚古生代两期岩浆活动及其构造意义. 地质学报, 89 (2): 272—288.
- 李文国, 李庆富, 姜万德, 等, 1996. 内蒙古自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 119—120.
- 刘建峰, 迟效国, 张兴洲, 等, 2009. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 83 (3): 365—376.
- 邵济安, 何国琦, 唐克东, 2015. 华北北部二叠纪陆壳演化. 岩石学报, 31 (1): 47—55.
- 邵济安, 唐克东, 何国琦, 2014. 内蒙古早二叠世构造古地理的再造. 岩石学报, 30 (7): 1858—1866.
- 邵济安, 唐克东, 王成源, 等, 1991. 那丹哈达地体的构造特征及演化. 中国科学(B辑): 化学生命科学, 21 (7): 744—751.
- 施光海, 刘敦一, 张福勤, 等, 2003. 中国内蒙古锡林郭勒杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及意义. 科学通报, 48 (20): 2187—2192.
- 唐克东, 1992. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律. 北京: 北京大学出版社, 305.
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶, 1991. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造. 北京: 北京大学出版社, 151.
- 王树庆, 辛后田, 胡晓佳, 等, 2016. 内蒙古乌兰敖包图早古生代侵入岩年代学、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 41 (4): 555—569.
- 吴福元, 孙德有, 林强, 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 15 (2): 181—189.

徐备,陈斌,邵济安,1996.内蒙古锡林郭勒杂岩 Sm-Nd,Rb-Sr 同位素年代研究.科学通报,41(2):153—155.

徐备,陈斌,1997.内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化.中国科学:地球科学,27(3):227—232.

徐备,Charvet,J.,张福勤,2001.内蒙古北部苏尼特左旗蓝片岩岩石学和年代学研究.地质科学,36(4):424—434.

徐备,赵盼,鲍庆中,等,2014.兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探.岩石学报,30(7):1841—1857.

许立权,鞠文信,刘翠,等,2012.内蒙古二连浩特北部阿仁绍布地区晚石炭世花岗岩 Sr-Yb 分类及其成因.地质通报,31(9):1410—1419.

徐义刚,巫祥阳,罗震宇,等,2007.山东中侏罗世—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.

薛怀民,郭利军,侯增谦,等,2009.中亚—蒙古造山带东段的锡林郭勒杂岩:早华力西期造山作用的产物而非古老陆块?——锆石 SHRIMP U-Pb 年代学证据.岩石学报,25(8):2001—2010.

薛怀民,郭利军,侯增谦,等,2010.大兴安岭西南坡成矿带晚古生代中期未变质岩浆岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学.岩石矿物学杂志,29(6):811—823.

杨钢,肖龙,王国灿,等,2015.西准噶尔谢米斯台西段花岗岩年代学、地球化学、锆石 Lu-Hf 同位素特征及大地构造意义.地球科学,40(3):548—562.

张旗,王焰,李承东,等,2006.花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义.岩石学报,22(9):2249—2269.

张旗,王焰,熊小林,2008.埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇.北京:中国大地出版社.

张玉清,许立权,康小龙,等,2009.内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩年龄及意义.中国地质,36(5):988—995.

周文孝,2012.内蒙古锡林浩特地区古生代岩浆作用的年代学与地球化学研究(博士学位论文).武汉:中国地质大学,69—72.

周文孝,葛梦春,2013.内蒙古锡林浩特地区中元古代锡林浩特岩群的厘定及其意义.地球科学,38(4):715—724.

朱永峰,孙世华,毛骞,等,2004.内蒙古锡林格勒杂岩的地球化学研究:从 Rodinia 聚合到古亚洲洋闭合后碰撞造山的历史记录.高校地质学报,10(3):343—355.