

doi:10.3799/dqkx.2016.046

# 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

王树庆, 辛后田, 胡晓佳, 张永, 赵华雷, 耿建珍, 杨泽黎, 滕学建, 李艳峰

天津地质矿产研究所, 天津 300170

**摘要:** 对造山带中岩浆作用的研究可以为构造演化提供约束。兴蒙造山带中段乌兰敖包图一带出露一套早古生代早期的闪长质侵入岩(石英闪长岩和闪长岩), 具有俯冲带型侵入岩的岩石组合和地球化学特征, 标志着早古生代古亚洲洋的俯冲事件。通过锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 定年, 在石英闪长岩和闪长岩中分别获得了  $474.0 \pm 1.8$  Ma 和  $487.8 \pm 1.9$  Ma 的年龄, 属于晚寒武世—早奥陶世。锆石原位 Hf 同位素分析表明, 乌兰敖包图侵入岩具有富集的 Hf 同位素组成,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  范围为  $0.282\ 123 \sim 0.282\ 304$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为负值(两件样品的平均值分别为  $-10.84$  和  $-8.53$ ), 二阶段模式年龄为古元古代(范围为  $1\ 851 \sim 2\ 250$  Ma), 表明这套侵入岩源于古元古代中期再循环地壳物质。岩石地球化学分析显示, 石英闪长岩和闪长岩具有中等  $\text{SiO}_2$  含量( $56.52\% \sim 66.06\%$ ), 较高的  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $2.60\% \sim 6.81\%$ )、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $14.69\% \sim 18.35\%$ )、 $\text{CaO}$  ( $0.57\% \sim 6.58\%$ , 平均值为  $3.97\%$ ) 含量, 低的  $\text{K}_2\text{O}$  ( $0.73\% \sim 2.94\%$ )、 $\text{TFeO}$ 、 $\text{MgO}$  含量,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值较高( $0.92 \sim 5.66$ , 平均值为  $3.19$ ); 微量元素具有 Rb、Ba、Th、U、Sr、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; 稀土总量较低, 轻稀土富集, 具有较弱的 Eu 负异常( $\delta\text{Eu}$  范围为  $0.76 \sim 0.99$ )。地球化学特征以及锆石 Hf 同位素组成表明, 乌兰敖包图早古生代侵入岩在主动大陆边缘的构造背景之下, 由古老地壳物质熔融形成的, 代表了兴蒙造山带中段早古生代早期的俯冲事件, 将兴蒙造山带中段早古生代北部岩浆岩带向东延伸, 并且佐证了锡林浩特地区存在前寒武纪基底。

**关键词:** 早古生代; 侵入岩; 主动大陆边缘; 大洋俯冲; 古老基底; 同位素; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2016)04-0555-15

收稿日期: 2015-11-06

## Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Early Paleozoic Wulanaobaotu Intrusive Rocks, Inner Mongolia

Wang Shuqing, Xin Houtian, Hu Xiaojia, Zhang Yong, Zhao Hualei,  
Geng Jianzhen, Yang Zeli, Teng Xuejian, Li Yanfeng

Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

**Abstract:** The study of magmatism can reveal the orogenic tectonic evolution. In this paper, zircon LA-MC-ICPMS U-Pb dating, Hf isotopic compositions and whole rock geochemical data of the Early Paleozoic dioritic rocks from Wulanaobaotu region, central part of the Xing-Meng Orogenic belt are present. The rock suite consists of two major rock types, i.e., quartz-diorite and diorite, with zircon U-Pb ages of  $474.0 \pm 1.8$  Ma and  $487.8 \pm 1.9$  Ma, respectively. In-situ zircon Hf isotopic analysis shows enriched compositions with  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios varying from  $0.282\ 123$  to  $0.282\ 304$ , negative  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values and Hf two stage model ages ( $T_{\text{DM}}^{\text{C}}$ ) from  $1\ 851$  to  $2\ 250$  Ma. The results indicate that the intrusive rocks are likely derived from an ancient basement material. Geochemically, these rocks show moderate  $\text{SiO}_2$  contents ( $56.52\% - 66.06\%$ ), high and variable  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $2.60\% - 6.81\%$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $14.69\% - 18.35\%$ ), and  $\text{CaO}$  ( $0.57\% - 6.58\%$ , average  $3.97\%$ ) contents, but low  $\text{K}_2\text{O}$  ( $0.73\% - 2.94\%$ ),  $\text{TFeO}$  and  $\text{MgO}$  contents. Most  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  ratios are all higher ( $0.92 - 5.66$ , average  $3.19$ ). The trace elemental data of these rocks display enrichment of Rb, Ba, Th, U, K and Sr, but depletion of Nb, Ta, P and Ti. The total REE contents are low with moderate fractionation between LREE and HREE. Meanwhile, weakly negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu}$  ranges from

**基金项目:** 中国地质调查局项目 (Nos.1212014121079, 1212011121079)。

**作者简介:** 王树庆 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩石学、地球化学研究及地质调查和侵入岩研究工作。E-mail: 89617984@qq.com

**引用格式:** 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.

0.76 to 0.99) are observed in all samples. Thus, we propose that the Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks were likely formed in an active continental margin setting during Late Cambrian to Early Ordovician, consistent with the existence of Early Paleozoic subduction-related tectonic-magmatic belt in Xing-Meng orogenic belt. The enriched zircon Hf isotopic characteristics further northern suggest the magma originated from a Precambrian basement source.

**Key words:** Early Paleozoic; intrusive rock; subduction; active continental margin; Precambrian basement; isotope; geochemistry.

兴蒙造山带是世界上最大的增生造山带之一,其演化一直是国际地学界关注的焦点,包括造山带增生方式以及古亚洲洋最终闭合的时限(Sengör *et al.*, 1993; Badarch *et al.*, 2002; Khain *et al.*, 2002, 2003; Buslovl *et al.*, 2004; Kröner *et al.*, 2007, 2010, 2011, 2014; Windley *et al.*, 2007),多数国内学者认为兴蒙造山带中段的索伦山—二道井为西伯利亚板块和华北板块的最终缝合带(Chen *et al.*, 2000, 2009; Xiao *et al.*, 2003; Jian *et al.*, 2008, 2010, 2012).前人对碰撞前的大洋演化历史进行了许多研究,取得了许多重要进展(唐克东, 1992; 徐备等, 2001; Li, 2006; Jian *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2013, 2015; 杨文麟等, 2014).

由于晚古生代强烈的构造岩浆作用的改造,现存的早古生代岩浆记录较少,主要沿南北两条岩浆岩带分布(Xiao *et al.*, 2003; Jian *et al.*, 2008),南带主要分布在温都尔庙蛇绿岩带以南的巴特敖包、图林凯、太古生庙、正镶白旗等地,为一套包括埃达克岩的岛弧型侵入岩,与同期包尔汗图群岛弧火山岩一起指示了早古生代古亚洲洋向南的俯冲事件(刘敦一等, 2003; Jian *et al.*, 2008; 张维和简平, 2008; 秦亚等, 2013; Zhang *et al.*, 2013; 白新会等, 2015);北带主要分布在苏左旗白音宝力道一带,为一套形成于早中奥陶世的岛弧侵入岩组合(徐备和陈斌, 1997; Chen *et al.*, 2000; 陈斌等, 2001; 石玉若等, 2004, 2005a, 2005b; 赵利刚等, 2013).但是由于目前在东部没有发现同期的岛弧型岩浆岩,这条岩浆岩带能否向东延伸还存在疑问.

本次研究在锡林浩特以西的乌兰敖包图一带新发现了早古生代与俯冲有关的闪长质侵入岩,通过锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 测年以及全岩地球化学分析,对早古生代古亚洲洋的演化有了进一步的约束;同时,通过锆石原位 Hf 同位素分析对其源区进行了探讨,暗示了古老基底的存在.

## 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北部的

乌兰敖包图一带(图 1),大地构造上属于华北板块和西伯利亚板块之间的俯冲—增生造山带,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(内蒙古自治区地质矿产局, 1996),对于时代及构造属性一直有较大的争议,有前寒武纪基底(徐备等, 1996; 郝旭和徐备, 1997; 葛梦春等, 2011)和晚古生代弧前沉积(施光海等, 2003; Chen *et al.*, 2009)两种认识.出露的晚古生代地层有上石炭统本巴图组( $C_2b$ )、下二叠统大石寨组( $P_1ds$ )、下二叠统哲斯组( $P_1zs$ )以及非正式填图单位查干诺尔火山岩( $C_2v$ ),以上地层均为海相地层并被中生代地层所覆盖.区内岩浆活动频繁,发育古生代侵入岩、火山岩以及新生代火山岩,最强烈的一期岩浆活动发生在晚古生代(石炭纪—二叠纪).

根据前人资料(中国地质调查局实物地质资料中心, 2013.1: 50 000 喇嘛音乌苏等 4 幅区调报告)和野外地质调查,锡林浩特市以西 40 km 的乌兰敖包图一带出露一早古生代侵入体,北侧被上石炭统本巴图组不整合覆盖,东部与本巴图组为断层接触,南侧与下二叠统哲斯组断层接触,西侧被第四系掩盖.侵入体经历了较强的韧性变形,呈糜棱岩化(图 2),但仍可识别出强变形带和弱变形域,弱变形域总体保留了侵入体的特征——成分均匀以及典型的花岗结构.乌兰敖包图侵入体由南北两个小的侵入体组成,北侧侵入体面积较小约 0.4 km<sup>2</sup>,岩性为糜棱岩化石英闪长岩;南侧侵入体面积约 2.1 km<sup>2</sup>,岩性为糜棱岩化石英闪长岩和闪长岩.由于韧性变形,岩石总体颜色较深,呈深灰色,局部呈绿泥石化,整体具有明显定向性(图 2).采样点位置:石英闪长岩(14XL02.1)坐标为(115°38'53"E, 44°00'04"N),闪长岩(14XL03.1)坐标为(115°39'30"E, 44°00'32"N).

变形较弱的样品镜下仍显示典型的花岗结构以及岩浆岩矿物组合(图 2).石英闪长岩为中细粒花岗结构,矿物呈半自形—他形,粒度为 0.5~1.5 mm,矿物组合包括斜长石(55%~60%)、角闪石(10%~15%)、石英(10%~15%)、少量黑云母(5%);闪长岩

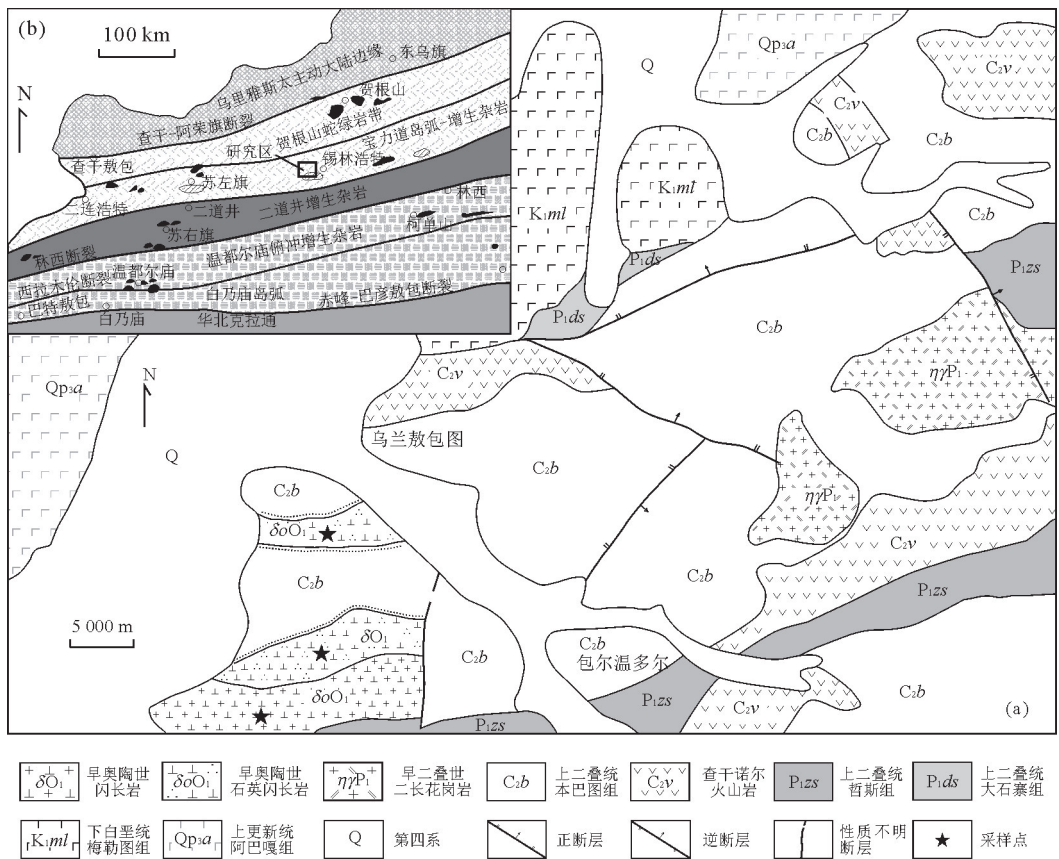


图 1 研究区地质简图

Fig.1 Geological sketch of study area

图 a 据喇嘛音乌苏地质图(中国地质调查局实物地质资料中心,2013.1:50 000 喇嘛音乌苏等 4 幅区调报告)修改;图 b 据 Xiao *et al.*(2003)

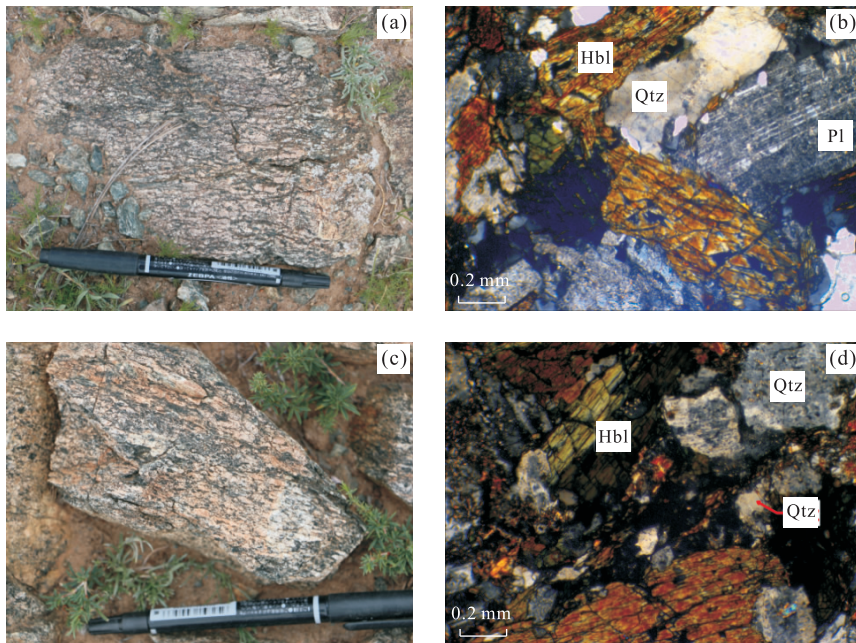


图 2 样品野外及镜下照片

Fig.2 Field and Microscope photographs of samples

a, b. 石英闪长岩; c, d. 闪长岩; Hbl. 角闪石; Qtz. 石英; Pl. 斜长石



为中细粒花岗结构,矿物粒度为 1~2 mm,矿物组合包括斜长石(60%~65%)、角闪石(20%~25%)、石英(5%),另外还有少量黑云母(约 3%)。

## 2 分析方法

### 2.1 锆石 U-Pb 测年

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后进行阴极发光照相,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 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-ICPMS)完成的,将 NEW WAVE 193-FX-ArF 准分子激光器与 Thermo Fisher 公司的 Neptune 型 MC-ICPMS 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  $\mu\text{m}$ ,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 作外标来校正锆石的 U、Th、Pb 含量,锆石年龄计算采用标样 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  $\mu\text{m}$ ,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 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)绘制。

### 2.2 岩石地球化学

野外采集新鲜无蚀变的岩石样品,首先用水将样品表面冲洗干净并晾干,机械破碎至 200 目后送实验室分析。岩石主微量元素分析在天津地质矿产研究所实验室完成,主量元素用熔片 X 射线荧光光谱(XRF)法测试,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%。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年代学

本次研究对石英闪长岩、闪长岩共两件样品进

行了锆石 U-Pb 测年,分析结果见表 1。

**3.1.1 石英闪长岩(14XL02.1)** 石英闪长岩中的锆石呈自形短柱状,长宽比为 1.5~3.0,透明,无色或淡黄色,包裹体少。阴极发光图像较暗,具有较细密的振荡环带,指示典型的岩浆成因(图 3)。本次测试的 24 个测点数据列于表 1,可见均具有高的 Th、U 含量并且 Th/U 比值均大于 0.10(0.26~0.46),同样指示了岩浆成因。在谐和图上(图 4),数据点成群落在谐和线上,24 个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄范围为 471~480 Ma,加权平均值为 474.0±1.8 Ma( $n=24$ , MSWD=0.28)。

**3.1.2 闪长岩(14XL03.1)** 闪长岩中的锆石呈自形短柱状,长宽比为 1.5~3.0,透明,淡黄色或淡绿色,包裹体少。阴极发光图像较暗,具有较细密的振荡环带,并且 Th/U 比值均大于 0.1(0.31~0.55),指示典型的岩浆成因(图 3)。在谐和图上(图 4),数据点成群落在谐和线上,24 个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄范围为 484~491 Ma,加权平均值为 487.8±1.9 Ma( $n=24$ , MSWD=0.12)。

### 3.2 锆石原位 Hf 同位素分析

在锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 定年的基础上,笔者对两件样品进行了微区原位 Hf 同位素测定, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值以及二阶段模式年龄采用锆石加权平均年龄计算,分析结果列于表 2。

石英闪长岩(14XL02.1)共计分析了 13 个测点,所有测点的 Hf 同位素组成比较一致,并且<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>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),<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 范围为 0.282 123~0.282 257,加权平均值为 0.282 179±0.000 027(2 $\sigma$ ,  $n=13$ ), $\epsilon_{\text{Hf}}(474 \text{ Ma})$  范围为 -8.04~-12.76,加权平均值为 -10.84±0.98(2 $\sigma$ ,  $n=13$ ),单阶段模式年龄相对集中,变化范围为 1 396~1 595 Ma,二阶段模式年龄范围为 1 951~2 225 Ma。

闪长岩(14XL03.1)共计分析了 14 个测点,所有测点的 Hf 同位素组成也比较一致,<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值均小于 0.002,<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 范围为 0.282 183~0.282 304,加权平均值为 0.282 242±0.000 020(2 $\sigma$ ,  $n=14$ ), $\epsilon_{\text{Hf}}(484 \text{ Ma})$  范围为 -6.33~-10.62,加权平均值为 -8.53±0.73(2 $\sigma$ ,  $n=14$ ),单阶段模式年龄相对集中,变化范围为 1 345~1 521 Ma,二阶段模式年龄范围为 1 851~2 120 Ma。

### 3.3 岩石地球化学

乌兰敖包图闪长质侵入岩的主微量元素分析结

表 1 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩锆石 U-Pb 测年分析结果  
Table 1 Zircon LA-MC-ICPMS U-Pb dating data of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks, Inner Mongolia

点号	含量( $10^{-6}$ )		同位素比值										年龄(Ma)			
	Pb	U	Th/U	Th	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$	$1\sigma$	$1\sigma$			
石英闪长岩(14XL02.1)																
1	10	138	45	0.3261	0.0760	0.0007	0.5942	0.0127	0.0567	0.0012	472	5	474	10	480	45
2	18	229	88	0.3860	0.0760	0.0007	0.5983	0.0098	0.0571	0.0009	472	5	476	8	495	34
3	16	207	72	0.3500	0.0761	0.0007	0.6022	0.0111	0.0574	0.0010	473	5	479	9	507	38
4	12	158	48	0.3056	0.0761	0.0007	0.5987	0.0124	0.0570	0.0011	473	5	476	10	493	43
5	27	340	138	0.4043	0.0762	0.0007	0.5932	0.0091	0.0565	0.0008	473	5	473	7	471	31
6	10	127	40	0.3168	0.0763	0.0007	0.5984	0.0141	0.0569	0.0013	474	5	476	11	488	50
7	26	326	118	0.3631	0.0760	0.0007	0.5942	0.0087	0.0567	0.0007	472	5	474	7	481	29
8	12	156	47	0.2993	0.0761	0.0007	0.5919	0.0109	0.0564	0.0010	473	5	472	9	470	38
9	18	232	65	0.2797	0.0766	0.0007	0.5962	0.0164	0.0565	0.0015	476	5	475	13	471	57
10	18	219	72	0.3292	0.0773	0.0007	0.5972	0.0110	0.0560	0.0010	480	5	475	9	453	38
11	11	134	35	0.2581	0.0769	0.0008	0.5982	0.0185	0.0564	0.0017	478	5	476	15	469	66
12	11	135	39	0.2885	0.0771	0.0008	0.5943	0.0147	0.0559	0.0013	479	5	474	12	447	52
13	11	140	43	0.3074	0.0768	0.0007	0.5957	0.0163	0.0562	0.0015	477	5	474	13	462	58
14	18	230	90	0.3940	0.0763	0.0007	0.5969	0.0117	0.0567	0.0010	474	5	475	9	480	41
15	9	117	35	0.3017	0.0765	0.0008	0.5999	0.0199	0.0569	0.0018	475	5	477	16	488	71
16	19	240	97	0.4020	0.0764	0.0007	0.5958	0.0097	0.0566	0.0009	474	5	475	8	476	33
17	10	131	50	0.3836	0.0761	0.0007	0.6004	0.0170	0.0572	0.0016	473	5	477	14	500	60
18	8	98	31	0.3163	0.0760	0.0008	0.5924	0.0234	0.0565	0.0022	472	5	472	19	472	84
19	8	108	44	0.4057	0.0767	0.0008	0.5989	0.0210	0.0567	0.0019	476	5	477	17	479	75
20	16	200	93	0.4641	0.0762	0.0007	0.5982	0.0204	0.0570	0.0019	473	5	476	16	490	73
21	11	142	58	0.4080	0.0758	0.0007	0.5931	0.0152	0.0568	0.0014	471	5	473	12	483	55
22	10	128	45	0.3535	0.0758	0.0007	0.5936	0.0133	0.0568	0.0012	471	5	473	11	484	47
23	9	112	35	0.3139	0.0760	0.0007	0.5959	0.0184	0.0569	0.0017	472	5	475	15	487	66
24	12	149	57	0.3794	0.0761	0.0007	0.5959	0.0132	0.0568	0.0012	473	5	475	10	484	46
闪长岩(14XL03.1)																
1	24	292	109	0.3714	0.0786	0.0008	0.6213	0.0094	0.0573	0.0008	488	5	491	7	504	30
2	26	310	118	0.3800	0.0786	0.0008	0.6286	0.0097	0.0580	0.0008	488	5	495	8	530	31
3	18	221	89	0.4016	0.0780	0.0008	0.6169	0.0106	0.0573	0.0009	484	5	488	8	505	35
4	32	380	135	0.3541	0.0791	0.0008	0.6250	0.0116	0.0573	0.0010	491	5	493	9	502	37
5	36	439	157	0.3573	0.0785	0.0008	0.6153	0.0091	0.0568	0.0008	487	5	487	7	485	30
6	24	302	113	0.3731	0.0785	0.0008	0.6174	0.0101	0.0570	0.0009	487	5	488	8	493	33
7	27	333	127	0.3807	0.0785	0.0008	0.6170	0.0090	0.0570	0.0007	487	5	488	7	492	29
8	22	271	98	0.3609	0.0784	0.0008	0.6160	0.0101	0.0570	0.0009	487	5	487	8	490	34
9	25	305	143	0.4676	0.0780	0.0008	0.6197	0.0097	0.0576	0.0008	484	5	490	8	515	31

续表 1

点号	含量( $10^{-6}$ )		Th/U	同位素比值				年龄(Ma)							
	Pb	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$	$1\sigma$					
闪长岩(14XL03.1)															
10	16	197	0.384 5	0.078 8	0.000 8	0.619 9	0.013 8	0.0570	0.001 2	489	5	490	11	493	46
11	28	342	0.553 1	0.078 7	0.000 8	0.619 9	0.009 9	0.0571	0.000 8	488	5	490	8	497	32
12	33	406	0.473 3	0.078 5	0.000 8	0.618 8	0.009 1	0.0572	0.000 8	487	5	489	7	499	30
13	10	131	0.308 5	0.078 5	0.000 8	0.633 1	0.015 6	0.0585	0.001 4	487	5	498	12	547	52
14	18	228	0.408 6	0.078 5	0.000 8	0.627 6	0.010 6	0.0580	0.000 9	487	5	495	8	530	34
15	22	271	0.409 6	0.078 7	0.000 8	0.626 6	0.009 7	0.0578	0.000 8	488	5	494	8	521	31
16	33	396	0.444 2	0.079 0	0.000 8	0.636 3	0.009 3	0.0584	0.000 8	490	5	500	7	545	28
17	30	367	0.415 3	0.078 4	0.000 8	0.630 2	0.009 3	0.0583	0.000 8	486	5	496	7	542	29
18	32	395	0.410 3	0.078 6	0.000 8	0.622 6	0.008 9	0.0574	0.000 7	488	5	491	7	509	28
19	32	393	0.391 5	0.078 7	0.000 8	0.633 0	0.009 2	0.0583	0.000 8	488	5	498	7	542	29
20	38	467	0.399 3	0.078 7	0.000 8	0.638 1	0.008 9	0.0588	0.000 7	488	5	501	7	561	27
21	28	348	0.413 3	0.079 2	0.000 8	0.642 2	0.010 7	0.0588	0.000 9	491	5	504	8	561	34
22	21	264	0.340 8	0.078 8	0.000 8	0.630 2	0.010 7	0.0580	0.000 9	489	5	496	8	530	35
23	27	339	0.401 9	0.078 9	0.000 8	0.632 0	0.010 2	0.0581	0.000 8	490	5	497	8	532	32
24	39	484	0.424 1	0.078 6	0.000 8	0.621 2	0.008 6	0.0573	0.000 7	488	5	491	7	505	27

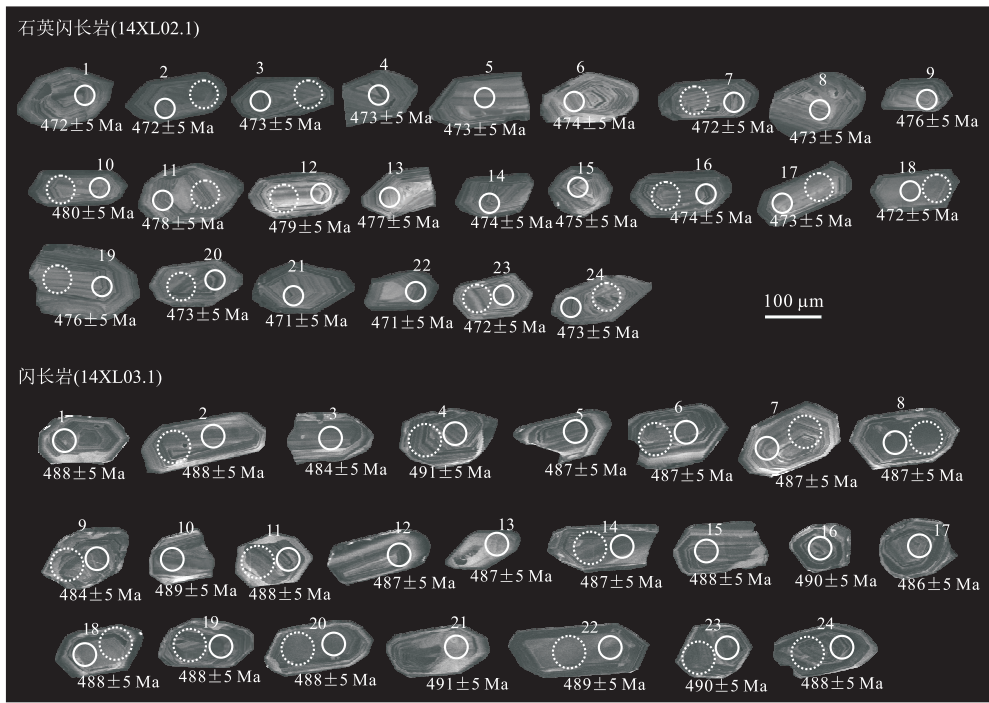


图 3 锆石阴极发光及 LA-MC-ICPMS 测年、Hf 同位素分析点位

Fig.3 Cathodoluminescence images and analysis spot of zircons

实心圆圈为测年,虚线圈为 Hf 同位素分析

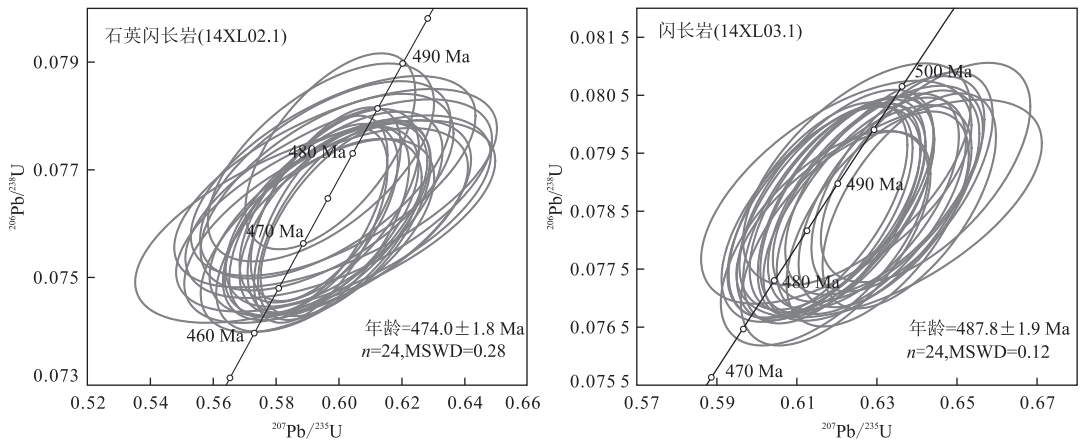


图 4 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 测年谱和图

Fig.4 Concordia diagrams for LA-MC-ICPMS zircon U-Pb dating of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks, Inner Mongolia

果列于表 3,石英闪长岩和闪长岩具有相似的地球化学特征:中等的  $\text{SiO}_2$  含量(56.52%~66.06%),较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.69%~18.35%)、 $\text{Na}_2\text{O}$  (3.60%~6.81%,平均值为 4.27%)、 $\text{CaO}$  (0.57%~6.58%,平均值为 3.97%) 含量,较低的  $\text{K}_2\text{O}$  (0.73%~2.94%)、 $\text{FeO}_1$  (4.85%~6.98%)、 $\text{MgO}$  (1.53%~4.51%)、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  含量, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值较高(0.92~5.66,平均值为 3.19),在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图上落在钙碱性及高钾钙碱性系列区域(图 5).在  $\text{A}/\text{CNK}$ - $\text{A}/\text{NK}$  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。

微量元素蛛网图(图 7)表明,这套侵入岩具有 Rb、Ba、Th、U、K、Sr 等大离子亲石元素的富集, 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,稀土元素总量偏低, $\Sigma\text{REE}$  范围为  $65.98 \times 10^{-6} \sim 165.51 \times 10^{-6}$ ,平均值为  $102.84 \times 10^{-6}$ ,在球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图上(图 8),所有样品具有一致的配分模式,显示轻稀土富集,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  大于 1, 范围为 3.85~11.55,轻稀土分馏较明显,  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  范

表 2 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩锆石 Hf 同位素组成

Table 2 Hf isotopic compositions for zircons of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks, Inner Mongolia by LA-MC-ICPMS

点号	$t(\text{Ma})$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
石英闪长岩(14XL02.1)												
2	474	0.023 642	0.000 907	0.282 160	0.000 018	0.282 152	-21.64	-11.51	0.65	1 536	2 169	-0.97
3	474	0.020 162	0.000 784	0.282 207	0.000 018	0.282 200	-19.98	-9.81	0.62	1 467	2 063	-0.98
7	474	0.033 324	0.001 286	0.282 226	0.000 022	0.282 215	-19.30	-9.28	0.77	1 459	2 029	-0.96
10	474	0.023 852	0.000 928	0.282 125	0.000 016	0.282 117	-22.88	-12.76	0.55	1 586	2 247	-0.97
11	474	0.022 722	0.000 847	0.282 197	0.000 017	0.282 190	-20.32	-10.17	0.61	1 482	2 085	-0.97
12	474	0.027 976	0.001 065	0.282 123	0.000 015	0.282 113	-22.96	-12.88	0.54	1 595	2 255	-0.97
16	474	0.019 539	0.000 761	0.282 257	0.000 017	0.282 250	-18.22	-8.04	0.60	1 396	1 951	-0.98
17	474	0.017 884	0.000 725	0.282 147	0.000 018	0.282 141	-22.10	-11.92	0.64	1 547	2 194	-0.98
18	474	0.020 503	0.000 835	0.282 160	0.000 016	0.282 152	-21.65	-11.50	0.56	1 534	2 168	-0.97
19	474	0.019 483	0.000 749	0.282 152	0.000 021	0.282 145	-21.92	-11.74	0.73	1 541	2 184	-0.98
20	474	0.025 841	0.001 047	0.282 143	0.000 019	0.282 134	-22.24	-12.16	0.66	1 566	2 210	-0.97
23	474	0.022 979	0.000 917	0.282 237	0.000 017	0.282 229	-18.92	-8.79	0.60	1 430	1 998	-0.97
24	474	0.015 688	0.000 608	0.282 210	0.000 016	0.282 204	-19.88	-9.66	0.57	1 456	2 053	-0.98
闪长岩(14XL03.1)												
2	484	0.022 977	0.000 910	0.282 224	0.000 017	0.282 215	-19.39	-9.04	0.58	1 448	2 022	-0.97
4	484	0.033 733	0.001 277	0.282 253	0.000 019	0.282 242	-18.34	-8.11	0.68	1 421	1 963	-0.96
6	484	0.035 415	0.001 332	0.282 240	0.000 024	0.282 228	-18.80	-8.59	0.83	1 441	1 993	-0.96
7	484	0.027 639	0.001 099	0.282 272	0.000 020	0.282 262	-17.68	-7.40	0.69	1 388	1 918	-0.97
8	484	0.033 706	0.001 358	0.282 228	0.000 020	0.282 216	-19.23	-9.03	0.70	1 459	2 021	-0.96
9	484	0.032 520	0.001 328	0.282 183	0.000 022	0.282 171	-20.83	-10.62	0.75	1 521	2 120	-0.96
11	484	0.033 275	0.001 421	0.282 231	0.000 018	0.282 218	-19.13	-8.95	0.63	1 458	2 016	-0.96
14	484	0.027 115	0.001 084	0.282 302	0.000 017	0.282 292	-16.63	-6.34	0.59	1 346	1 852	-0.97
18	484	0.039 999	0.001 534	0.282 255	0.000 019	0.282 241	-18.30	-8.15	0.66	1 429	1 966	-0.95
19	484	0.040 566	0.001 596	0.282 193	0.000 021	0.282 178	-20.48	-10.36	0.75	1 519	2 104	-0.95
20	484	0.033 335	0.001 290	0.282 235	0.000 019	0.282 224	-18.98	-8.76	0.65	1 447	2 004	-0.96
22	484	0.034 361	0.001 301	0.282 304	0.000 023	0.282 292	-16.55	-6.33	0.81	1 350	1 851	-0.96
23	484	0.033 929	0.001 261	0.282 202	0.000 023	0.282 191	-20.14	-9.91	0.81	1 492	2 076	-0.96
24	484	0.031 695	0.001 288	0.282 235	0.000 023	0.282 224	-18.98	-8.76	0.80	1 446	2 004	-0.96

注:  $\epsilon_{\text{Hf}}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1] \times 10\ 000$ ;  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\} \times 10\ 000$ ;  $T_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln\{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$ ;  $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = T_{\text{DM}} - (T_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{cc}} - f_s) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})]$ ;  $f_s = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1]$ ; 其中  $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$  和  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$  为样品测定值,  $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\ 2$ ,  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\ 772$ ;  $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\ 4$ ,  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\ 25$ ,  $f_{\text{cc}}$ ,  $f_s$ ,  $f_{\text{DM}}$  分别为大陆平均地壳、样品和亏损地幔的  $f_{\text{Lu/Hf}}$ ,  $f_{\text{cc}} = -0.55$ ,  $f_{\text{DM}} = 0.16$ ,  $t$  为样品形成时间,  $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ .

围为 1.79~5.35, 重稀土分馏较弱,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  范围为 1.26~2.01, 具有较弱的 Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu}$  值为 0.76~0.99), 结合 Sr 无明显亏损, 暗示岩浆演化过程中并没有显著的斜长石的分离结晶作用。

## 4 讨论

### 4.1 乌兰敖包图侵入岩的形成时代

本次研究对乌兰敖包图石英闪长岩和闪长岩进行了锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 测年, 分别获得了  $474.0 \pm 1.8 \text{ Ma}$  和  $487.8 \pm 1.9 \text{ Ma}$  的年龄, 表明这套闪长质侵入岩的侵位时代为晚寒武世晚期到早奥陶世晚期, 这与研究区以西苏左旗白音宝力道一带的早中奥陶世 (463~490 Ma) 岛弧侵入岩在形成时代

上是一致的 (Chen *et al.*, 2000; 陈斌等, 2001; 石玉若等, 2004, 2005b)。

### 4.2 成因及源区

乌兰敖包图侵入岩为一套石英闪长岩、闪长岩系列, 类似俯冲带岩石组合 (邓晋福等, 2007), 主量元素显示属于钙碱性—高钾钙碱性系列, 较高的  $\text{SiO}_2$ , 高  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ , 微量元素显示 Rb、Ba、K、Sr、Th、U 等大离子亲石元素的富集及 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素的亏损, 以及 LREE 富集的稀土配分模式, 均指示了与俯冲带有关的背景。微量元素 Zr/Y 平均比值 (4.0~18.8) 为 7.3, 除一个样品外均介于活动大陆边缘安山岩范围 (4~12) 之内 (Condie, 1989); 在 Pearce 微量元素构造环境判别图解上 (图 9), 样品均落于岛弧花岗岩区域; 在微量



表 3 内蒙乌兰敖包图闪长质侵入岩主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 3 Major(%) and trace elements( $10^{-6}$ ) data of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks, Inner Mongolia

样品号	石英闪长岩					闪长岩				
	14XL01-1	14XL02-1	14XL02-2	14XL02-3	14XL03-2	14XL03-1	14XL03-3	14XL04-1	14XL04-3	14XL04-4
SiO <sub>2</sub>	64.20	61.91	61.22	66.06	64.02	58.28	59.58	58.71	56.52	56.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.66	16.76	16.84	15.08	14.71	16.64	14.69	17.84	18.16	18.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.40	2.83	4.16	2.24	1.70	1.90	2.04	1.78	2.52	2.74
FeO	2.69	3.57	2.11	3.04	3.75	5.27	5.05	4.16	4.71	4.09
TFeO	4.85	6.12	5.85	5.06	5.28	6.98	6.89	5.76	6.98	6.56
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.39	6.80	6.50	5.62	5.87	7.76	7.65	6.40	7.75	7.29
CaO	0.57	3.08	6.58	2.90	5.03	4.32	5.77	3.30	3.94	4.25
MgO	2.18	2.54	1.53	1.98	2.55	3.84	4.51	2.76	3.38	2.94
K <sub>2</sub> O	1.50	1.22	1.11	0.88	1.11	2.84	0.73	1.97	2.94	1.86
Na <sub>2</sub> O	6.81	4.56	3.66	4.98	3.20	2.60	3.17	5.36	3.65	4.69
TiO <sub>2</sub>	0.50	0.48	0.38	0.42	0.53	0.69	0.65	0.57	0.72	0.65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.15	0.13	0.10	0.13	0.15	0.15	0.25	0.28	0.27
MnO	0.10	0.12	0.11	0.10	0.10	0.15	0.13	0.15	0.19	0.16
LOI	1.94	2.38	1.92	1.88	2.75	2.74	2.95	2.70	2.47	2.75
总量	99.71	99.60	99.75	99.66	99.58	99.42	99.42	99.55	99.48	99.53
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	4.54	3.74	3.30	5.66	2.88	0.92	4.34	2.72	1.24	2.52
A/CNK	1.20	1.16	0.88	1.05	0.94	1.09	0.89	1.05	1.11	1.05
Cs	1.17	1.20	0.87	0.76	1.20	2.69	1.30	1.27	2.53	1.92
Rb	26.9	25.6	16.7	13.9	29.2	80.4	19.0	44.0	77.4	52.0
Ba	436	321	306	296	667	1 440	283	862	852	456
Sr	147.0	408.0	532.0	228.0	240.0	285.0	98.5	217.0	452.0	427.0
Li	9.78	15.90	6.75	7.48	15.90	19.40	19.10	14.40	15.80	13.80
Ga	14.6	16.1	18.6	11.6	13.9	15.0	13.9	16.0	17.4	17.3
Nb	8.84	7.50	6.01	7.34	5.86	7.41	6.00	6.41	8.26	7.35
Ta	0.69	0.52	0.46	0.52	0.36	0.50	0.40	0.39	0.64	0.49
Zr	125.0	130.0	94.0	99.5	128.0	97.8	116.0	64.9	82.9	120.0
Hf	4.03	4.09	3.01	3.08	3.57	3.02	3.36	2.14	2.68	3.59
U	0.93	1.50	2.18	1.64	0.94	1.29	0.86	1.31	1.72	1.75
Th	4.71	5.10	7.90	7.10	2.64	13.90	4.62	11.60	18.00	8.28
Cu	5.92	43.70	7.21	5.16	25.00	20.30	57.00	12.50	28.10	10.40
Pb	3.21	6.50	10.30	2.34	6.18	4.31	4.75	6.50	5.04	5.49
Zn	54.6	40.5	32.3	33.0	53.7	77.8	68.5	58.8	62.0	61.8
Cr	4.52	3.77	3.99	18.80	23.60	19.60	84.30	5.07	7.80	8.79
Ni	3.74	4.85	5.73	5.43	7.98	5.18	15.40	6.42	8.14	8.52
Co	8.01	9.95	8.57	10.40	14.10	18.30	22.80	14.50	19.20	16.50
V	85.0	96.4	106.0	112.0	152.0	200.0	194.0	153.0	219.0	165.0
Sc	12.80	8.44	9.55	11.00	20.60	29.50	31.60	15.30	23.20	16.80
La	12.90	15.30	23.00	14.80	9.78	38.80	14.00	18.00	28.00	13.20
Ce	31.7	33.8	57.3	39.6	24.3	71.1	36.5	39.3	62.2	30.4
Pr	3.12	4.18	5.63	3.43	2.98	7.28	4.28	5.14	7.94	4.59
Nd	11.6	16.3	21.1	12.7	12.7	26.1	17.9	20.6	31.2	20.3
Sm	2.08	3.42	3.86	2.60	3.16	4.68	3.84	4.26	6.04	4.77
Eu	0.52	0.94	1.01	0.74	0.96	1.45	0.99	1.30	1.64	1.30
Gd	2.09	3.24	4.05	2.56	3.55	5.05	4.01	3.75	5.38	3.92
Tb	0.29	0.55	0.59	0.42	0.52	0.70	0.59	0.56	0.78	0.62
Dy	1.51	3.31	3.39	2.42	3.16	3.94	3.51	3.12	3.98	3.51
Ho	0.28	0.67	0.70	0.50	0.63	0.81	0.71	0.62	0.80	0.72
Er	0.83	2.01	2.07	1.46	1.84	2.43	1.95	1.72	2.36	2.05
Tm	0.13	0.31	0.32	0.22	0.28	0.36	0.31	0.28	0.36	0.31
Yb	0.86	2.12	2.17	1.53	1.82	2.41	2.11	1.89	2.44	2.12
Lu	0.14	0.36	0.36	0.25	0.30	0.40	0.35	0.31	0.42	0.35
Y	6.65	17.40	18.80	12.60	16.20	20.60	18.20	16.20	20.70	17.80
ΣREE	68.05	86.51	125.55	83.23	65.98	165.51	91.05	100.85	153.54	88.16
δEu	0.76	0.86	0.78	0.88	0.88	0.91	0.77	0.99	0.88	0.92
(La/Yb) <sub>N</sub>	10.76	5.18	7.60	6.94	3.85	11.55	4.76	6.83	8.23	4.47
(La/Sm) <sub>N</sub>	4.00	2.89	3.85	3.67	2.00	5.35	2.35	2.73	2.99	1.79
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	2.01	1.26	1.54	1.38	1.61	1.73	1.57	1.64	1.82	1.53

注:测试工作由天津地质矿产研究所实验室完成,主量元素采用熔片法 XRF 测试,其中 FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样,重铬酸钾滴定容量法,微量元素采用 ICP-MS 测试.N 代表球粒陨石标准化,δEu =  $\sqrt{\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N}$ ,标准化数据引自 Sun and McDonough(1989).

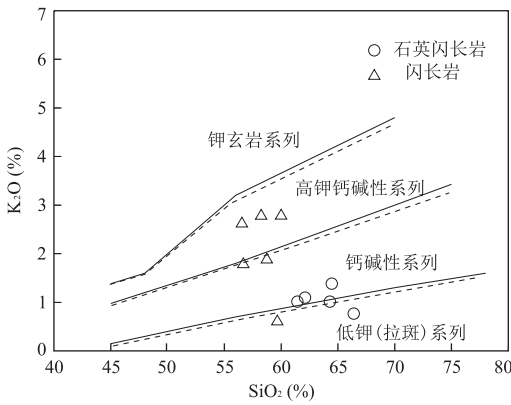


图 5 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图解  
Fig.5  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  diagram of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks

据 Le Maitre *et al.* (1989)

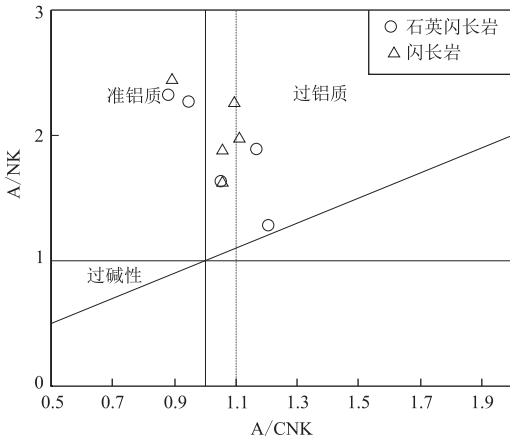


图 6 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩 A/CNK-A/NK 图解  
Fig.6 A/CNK-A/NK diagram of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks

据 Maniar and Piccoli (1989)

元素比值  $\text{Th}/\text{Yb}\text{-}\text{Ta}/\text{Yb}$  判别图解(图 10)上,样品落在主动大陆边缘和岛弧区域;与典型岛弧岩浆岩相比,乌兰敖包图向西到白音宝力道一带,都以侵入岩为主,同期的岛弧火山岩不发育,并且区别于岛弧岩浆岩(以拉斑系列为主),乌兰敖包图闪长质侵入岩属于钙碱性—高钾钙碱性系列,因此岩石组合与地球化学特征均指示这套侵入岩形成于活动大陆边缘构造环境,与苏左旗白音宝力道奥陶纪岛弧侵入岩一起构成了早古生代俯冲岩浆岩带。

锆石 Hf 同位素分析表明,乌兰敖包图闪长质侵入岩具有富集的 Hf 同位素组成,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为负值,并且在  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)\text{-}t$  图解上,两件样品的分析点均落在古元古代地壳的演化范围内,区别于 Yang *et al.* (2006) 总结的兴蒙造山带东段显生宙岩浆岩亏损的

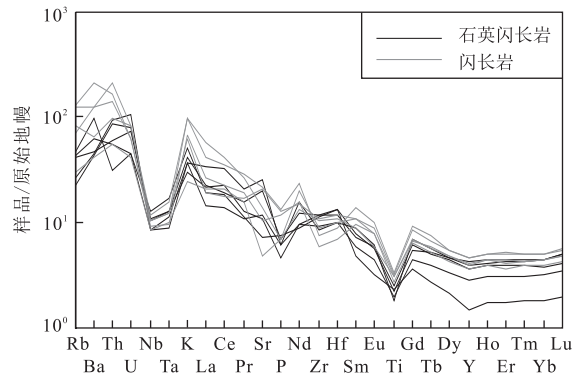


图 7 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks  
原始地幔标准化数据根据 Sun and McDonough (1989)

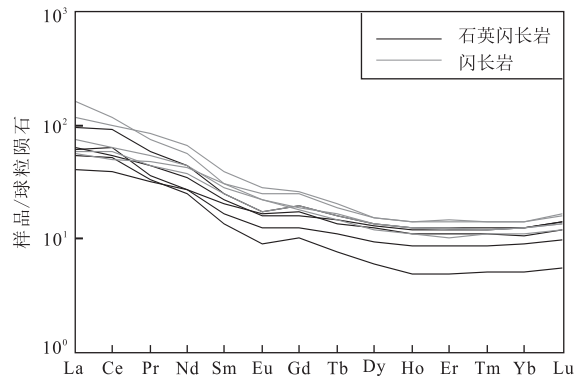


图 8 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩稀土配分模式图  
Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns diagram of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks

原始地幔标准化数据根据 Sun and McDonough (1989)

Hf 同位素组成(图 11).二阶段模式年龄范围为 1 851~2 255 Ma,平均值约为 2 056 Ma,表明其源区可能为古元古代中期地壳物质,区别于兴蒙造山带大多数显生宙花岗岩的新生地壳源区(洪大卫等, 2000, 2003; Wu *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2006).

### 4.3 地质意义

在兴蒙造山带中段,早古生代岩浆岩主要沿着两条构造—岩浆岩带分布,记录了古亚洲洋向南北两侧的双向俯冲(Xiao *et al.*, 2003; Jian *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2015).北部主要分布在白音宝力道一带,为一套形成于早中奥陶世(490~464 Ma)的岛弧型侵入岩,前人的研究表明这套侵入岩指示了早古生代古亚洲洋俯冲所形成的增生造山带(徐备和陈斌, 1997; Chen *et al.*, 2000; 陈斌等, 2001; 施光海等, 2003; 石玉若等, 2004, 2005a, 2005b; Jian

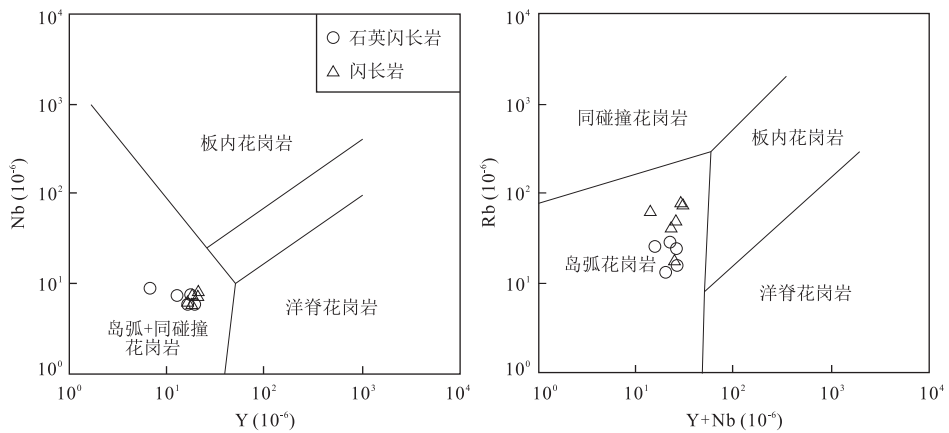


图 9 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩的 Y-Nb 及 Y+Nb-Rb 构造环境判别图解

Fig.9 Y-Nb and Y+Nb-Rb discrimination diagrams of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks, Inner Mongolia  
据 Pearce *et al.*(1984)

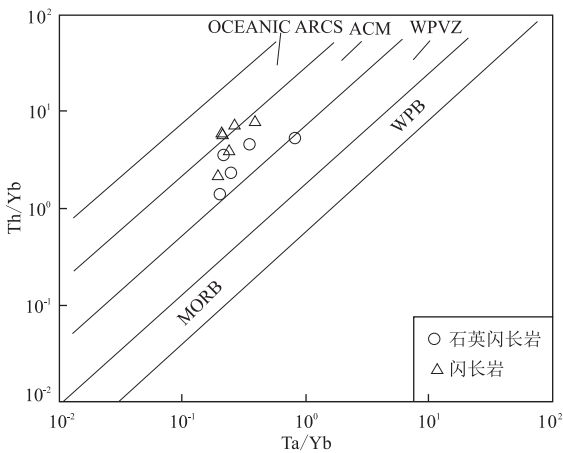


图 10 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩的 Th/Yb-Ta/Yb 判别图解

Fig. 10 Th/Yb-Ta/Yb discrimination diagrams of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks, Inner Mongolia  
OCEANIC ARCS,大洋岛弧; ACM,主动大陆边缘; WPVZ,陆内火山岩带; MORB,洋中脊玄武岩; WPB,板内玄武岩; 据 Gorton and Schandl(2000)

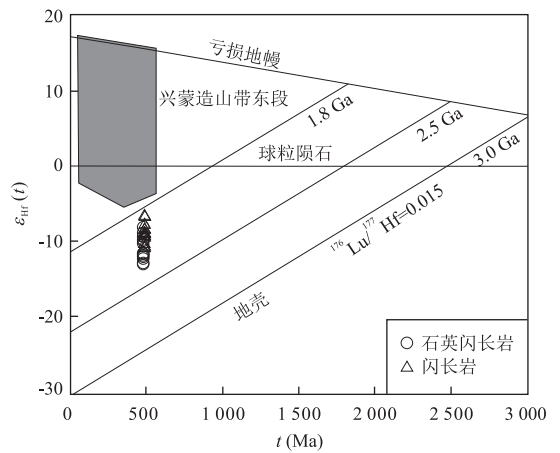


图 11 内蒙古乌兰敖包图闪长质侵入岩  $\epsilon_{Hf}(t)-t$  图解  
Fig.11  $\epsilon_{Hf}(t)-t$  diagrams of Wulanaobaotu dioritic intrusive rocks, Inner Mongolia

兴蒙造山带东段 Hf 同位素组成据 Yang *et al.*(2006)

*et al.*, 2008),但是由于缺乏早古生代蛇绿岩并且岩浆记录较少,对于北部构造岩浆岩带是否存在、能否向东延伸,缺乏岩浆记录的支持。目前在白音宝力道以东报道的早古生代岩浆作用仅有葛梦春等(2011)在锡林浩特南发现的志留纪(421~457 Ma)含电气石片麻状 S 型花岗岩,可能代表了晚期碰撞事件。本次发现的乌兰敖包图闪长质侵入岩形成于晚寒武世—早奥陶世活动大陆边缘的构造环境,代表了早古生代早期的大洋俯冲事件,将早古生代北部构造—岩浆岩带向东进行了延伸,对早古生代俯冲增生造山作用进行了时间和空间上的限定。

此外,富集的锆石 Hf 同位素组成表明,乌兰敖包图早古生代闪长质侵入岩源区为再循环古老地壳物质,这对于区域上锡林浩特地块的存在与否也有新的启示。区域上前人认为的出露于锡林浩特—西乌旗以及巴林左旗一带的一套变质表壳岩—锡林郭勒杂岩代表了锡林浩特地块的基底组成(徐备等, 1996; 郝旭和徐备, 1997; 葛梦春等, 2011; Li *et al.*, 2011),但目前这套表壳岩的碎屑锆石测年结果表明,这套表壳岩沉积下限不早于泥盆纪(Chen *et al.*, 2009; 薛怀民等, 2009; 许雅雯等, 2014)。因此有学者认为这套变质表壳岩是弧前沉积物在随后的碰撞造山过程中变质所形成的(施光海等, 2003; Chen *et al.*, 2009),并非是古老的结晶基底,锡林浩特地块可能并不存在。本次乌兰敖包图侵入岩的 Hf

同位素特征指示源岩为古元古代地壳物质,结合孙立新等(2013)在苏尼特左旗一带新发现的中元古代变质深成体,表明在苏尼特左旗—锡林浩特一带存在元古代的基底,暗示了锡林浩特地块的存在。

## 5 结论

(1) 乌兰敖包图石英闪长岩和闪长岩的锆石 U-Pb LA-MC-ICPMS 测年结果表明,石英闪长岩和闪长岩的成岩年龄分别为  $474.0 \pm 1.8$  Ma 和  $487.8 \pm 1.9$  Ma, 指示兴蒙造山带中段锡林浩特一带早古生代板块俯冲始于晚寒武世晚期。

(2) 岩石组合和岩石地球化学分析表明,这套侵入岩形成于主动大陆边缘的构造环境,将兴蒙造山带早古生代北部构造—岩浆岩带向东进行了延伸。

(3) 锆石原位 Hf 同位素分析结果表明,乌兰敖包图侵入岩源区为古元古代基底物质,佐证了锡林浩特地块的存在。

致谢:赵凤清研究员、孙立新研究员审阅了全稿并提出了许多建设性修改意见;谷永昌教授级高工、刘永顺教授级高工在成文过程中给予许多指导;两位匿名审稿人审阅了全文,提出了宝贵的修改意见,在此一并致以诚挚的感谢。

## References

- Badarch, G., Cunningham, 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. doi: 10.1016/S1367-9120(02)00017-2
- Bai, X. H., Xu, Z. Y., Liu, Z. H., et al., 2015. Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Geological Significance of the Early Silurian Plutons from the Southeastern Margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 67–79 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Monggol Autonomous Region., 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Nei Monggol Autonomous Region. China University of Geosciences Press, Wuhan, 354 (in Chinese).
- Buslovi, M. M., Fujiwara, Y., Iwata, K., et al., 2004. Late Paleozoic-Early Mesozoic Geodynamics of Central Asia. *Gondwana Research*, 7(3): 791–808. doi: 10.1016/S1342-937X(05)71064-9
- 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(3): 245–257. doi: 10.1016/j.jseaes.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(1–2): 157–182. doi: 10.1016/S0040-1951(00)00182-7
- Chen, B., Zhao, G. C., Wilde, S., 2001. Subduction- and Collision-Related Granitoids from Southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic Ages and Tectonic Implications. *Geological Review*, 47(4): 361–367 (in Chinese with English abstract).
- Condie, K. C., 1989. Geochemical Changes in Basalts and Andesites across the Archean-Proterozoic Boundary: Identification and Significance. *Lithos*, 23(1–2): 1–18. doi: 10.1016/0024-4937(89)90020-0
- 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. doi: 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).
- Hong, D. W., Wang, S. G., Xie, X. L., et al., 2000. Genesis of Positive  $\epsilon(\text{Nd}, t)$  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  $\epsilon_{\text{Nd}}$  in the Central Asian Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 203–209 (in Chinese with English abstract).



- Jian, P., Kröner, A., Windley, 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. doi: 10.1016/j.lithos.2012.03.007
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., 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. doi: 10.1016/j.lithos.2010.04.014
- 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. doi: 10.1016/j.lithos.2007.07.005
- 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. doi: 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. doi: 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. doi: 10.1016/j.jseaes.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. doi: 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. doi: 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 Tuffbed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further Constrains on the New Subdivision of the Mesoproterozoic Stratigraphy in the Northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131–2140 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., 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. doi: 10.1016/j.jseaes.2005.09.001
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Brouwer, M. F., 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. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.09.009
- Liu, D. Y., Jian, P., Zhang, Q., et al., 2003. SHRIMP Dating of Adakites in the Tulingkai Ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic Subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317–327 (in Chinese with English abstract).
- Liu, 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. doi: 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. doi: 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. doi: 10.1093/petrology/25.4.956
- Qin, Y., Liang, Y. H., Xing, J. L., et al., 2013. The Identification of Early Paleozoic O-Type Adakitic Rocks in Zhengxiangbaiqi Area, Inner Mongolia and Its Significance. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 106–114 (in Chinese with English abstract).
- Sengör, 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. doi: 10.

- 1038/364299a0
- 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).
- Shi, Y. R., Liu, D. Y., Jian, P., et al., 2005a. Zircon SHRIMP Dating of K-rich Granites in Sonid Zuoqi, Central Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 24(5): 424–428 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. R., Liu, D. Y., Zhang, Q., et al., 2005b. The Petrogenesis and SHRIMP Dating of the Baiyinbaolidao Adakitic Rocks in Southern Suzuoqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 143–150 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. R., Liu, D. Y., Zhang, Q., et al., 2004. SHRIMP Dating of Diorites and Granites in Southern Suzuoqi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 789–799 (in Chinese with English abstract).
- Sun, L. X., Ren, B. F., Zhao, F. Q., 2013. Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Compositions of the Mesoproterozoic Granitic Gneiss in Xilinhot Block, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 32(2–3): 327–340 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in Oceanic Basins. Geological Society Special Publication*, 42(1): 313–345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Tang, K. D., 1992. Tectonic Evolution and Minerogenetic Regularities of the Fold Belt along the Northern Margin of Sino-Korean Plate. Peking University Press, Beijing, 305 (in Chinese with English abstract).
- 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, London*, 164: 31–47. doi: 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. doi: 10.1016/S0040-1951(00)00179-7
- 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. doi: 10.1029/2002TC001484
- Xu, B., Charvet, J., Yan, C., 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. doi: 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 in China (Series D)*, 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., 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. doi: 10.1016/j.jseae.2014.07.020
- Xu, Y. W., Li, C. D., Zhao, L. G., et al., 2014. The Discovery of Devonian Strata in Xilin Gol Complex of Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Geology in China*, 41(4): 1167–1177 (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).
- 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). doi: 10.3799/dqkx.2015.043
- 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. doi: 10.1016/j.epsl.2006.04.029
- Yang, W. L., Luo, M. S., Wang, C. G., et al., 2014. Neoproterozoic-Paleozoic Sedimentary Basins Evolution of Xing-Meng Orogenic Belt. *Earth Science*, 39(8): 1155–1168 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.

2014.101

Zhang, W., Jian, P., 2008. SHRIMP Dating of Early Paleozoic Granites from North Damaoqi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 778—787 (in Chinese with English abstract).

Zhang, W., Jian, P., Kröner, A., et al., 2013. Magmatic and Metamorphic Development of an Early to Mid-Paleozoic Continental Margin Arc in the Southernmost Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 63—74. doi: 10.1016/j.jseas.2012.05.025

Zhao, L. G., Ran, H., Zhang, Q. H., et al., 2013. Discovery of Ordovician Pluton in Abaga Banner, Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Global Geology*, 31(3): 451—461 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

白新会, 徐仲元, 刘正宏, 等, 2015. 中亚造山带东段南缘早志留世岩体锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 31(1): 67—79.

内蒙古自治区地质矿产局, 1996. 内蒙古自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社.

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): 546—561.

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.

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, 王式洸, 谢锡林, 等, 2000. 兴蒙造山带正  $\epsilon(\text{Nd}, t)$  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  $\epsilon_{\text{Nd}}$  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.

李怀坤, 朱士兴, 相振群, 等, 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分方案的进一步约束. *岩石学报*, 26(7): 2131—2140.

刘敦一, 简平, 张旗, 等, 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消滅的证据. *地质学*

报, 77(3): 317—327.

秦亚, 梁一鸿, 邢济麟, 等, 2013. 内蒙古正镶白旗地区早古生代 O 型埃达克岩的厘定及其意义. *地学前缘*, 20(5): 106—114.

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.

石玉若, 刘敦一, 简平, 等, 2005a. 内蒙古中部苏尼特左旗富钾花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. *地质通报*, 24(5): 424—428.

石玉若, 刘敦一, 张旗, 等, 2005b. 内蒙古苏左旗白音宝力道 Adakite 质岩类成因探讨及其 SHRIMP 年代学研究. *岩石学报*, 21(1): 143—150.

石玉若, 刘敦一, 张旗, 等, 2004. 内蒙古苏左旗地区闪长—花岗岩类 SHRIMP 年代学. *地质学报*, 78(6): 789—799.

孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等, 2013. 内蒙古锡林浩特地块中元古代花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征. *地质通报*, 32(2—3): 327—340.

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.

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(D辑)*, 27(3): 227—232.

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, 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.

许雅雯, 李承东, 赵利刚, 等, 2014. 内蒙古锡林郭勒杂岩中泥盆纪地层的发现及地质意义. *中国地质*, 41(4): 1167—1177.

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.

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.

杨文麟, 骆满生, 王成刚, 等, 2014. 兴蒙造山系新元古代—古生代沉积盆地演化. *地球科学*, 39(8): 1155—1168.

张维, 简平, 2008. 内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U-Pb 年代学. *地质学报* 82(6): 778—787.

赵利刚, 冉皞, 张庆红, 等, 2013. 内蒙古阿巴嘎旗奥陶纪岩体的发现及地质意义. *世界地质*, 31(3): 451—461.