

内蒙古巴林右旗建设屯埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及成因讨论*

刘建峰^{1,2} 迟效国² 赵芝^{2,3} 胡兆初⁴ 陈军强⁵

LIU JianFeng^{1,2}, CHI XiaoGuo², ZHAO Zhi^{2,3}, HU ZhaoChu⁴ and CHEN JunQiang⁵

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

4. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

5. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

5. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2011-10-10 收稿, 2012-12-12 改回.

Liu JF, Chi XG, Zhao Z, Hu ZC and Chen JQ. 2013. Zircon U-Pb age and petrogenetic discussion on Jianshetun adakite in Balinyouqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3):827–839

Abstract In this paper petrology, geochemistry, zircon U-Pb dating and in-situ Hf isotopic analyzing for Jianshetun granodiorite in SE Inner Mongolia are reported. LA-ICP-MS zircon dating gives the emplacement age of Early Triassic (248.5 ± 2.3 Ma) for the pluton. Petrological and geochemical study indicate that the aluminum saturation index (A/CNK) of the rock is 1.02, belonging to calc-alkaline I-type granite. The rock has high SiO_2 ($\geq 56\%$) and Al_2O_3 ($\geq 15\%$) contents, and the Na_2O and K_2O contents range between 4.34% ~ 4.41% and 2.03% ~ 2.07% respectively, with $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratio varying from 2.10 to 2.17; the rock has high content of Sr ($> 400 \times 10^{-6}$), low content of Y ($\leq 18 \times 10^{-6}$) and Yb ($\leq 1.9 \times 10^{-6}$), and has notable fractionation between LREE and HREE, with $(\text{La}/\text{Yb})_N$ varying between 16.92 ~ 17.38. Besides, there is not negative Eu anomaly in the chondrite-normalized REE pattern. All of the geochemical characteristics above indicate that the Jianshetun pluton belongs to adakite. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ of in-situ zircon Hf isotopic analysis is between 11.2 ~ 14.4, showing the magma originated from depleted source. Considering regional magmatism, stratigraphy and palaeontology data, it is thought that the pluton is the product of partial melting of the thickened newborn lower crust after the Late Permian closure of the Paleo-Asian Ocean along Xar Moron River suture belt.

Key words Zircon U-Pb dating; Geochemistry; Zircon Hf isotope; Adakite; Paleo-Asian Ocean

摘要 本文对内蒙古东南部建设屯花岗岩闪长岩进行了岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 定年及原位 Hf 同位素分析研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示了该岩体的形成时代为 248.5 ± 2.3 Ma, 为早三叠世早期岩浆岩侵入体。岩石学和地球化学研究表明, 该岩体铝饱和指数 A/CNK 为 1.02, 属于钙碱性 I 型花岗岩; $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, Na_2O 和 K_2O 含量分别为 4.34% ~ 4.41% 和 2.03% ~ 2.07%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于 2.10 ~ 2.17 之间; $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$, 岩石轻重稀土分馏明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 16.92 ~ 17.38 之间, 无明显的 Eu 负异常, 显示了埃达克岩的地球化学特征。锆石 Hf 同位素分析显示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 11.2 ~ 14.4 之间, 反映了源区亏损的特征。综合考虑区域岩浆岩和地层古生物资料, 本文认为该岩体

* 本文受国家自然科学基金项目(41102029、40739905)、国家油气专项(XQ-2007-07)和中石化股份公司前瞻性项目(G0800-06)联合资助。

第一作者简介: 刘建峰, 男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 岩石学和地球化学专业, E-mail: wenjv@yahoo.com.cn

是晚二叠世古亚洲洋沿西拉木伦河缝合带闭合后,加厚的新生下地壳部分熔融作用的产物。

关键词 锆石 U-Pb 定年;地球化学;锆石 Hf 同位素;埃达克岩;古亚洲洋

中图法分类号 P588.122; P597.3

1 引言

我国东北地区传统上被称为“兴蒙褶皱带”(兴蒙造山带),夹持在西伯利亚古板块和中朝古板块之间,这里是我国境内已知发展历史最长、构造岩浆活动最复杂的造山带之一,区内显生宙花岗岩极为发育,有“巨型花岗岩省”之称(吴福元等,1999; Wu *et al.*, 2000),显生宙花岗岩的形成机制与区域构造演化的关系已经成为国内外学术界的焦点(吴福元等,1999; Wu *et al.*, 2000, 2011; 洪大卫等,1994, 2000; Hong *et al.*, 2004; Jahn *et al.*, 2000; Jahn, 2004; Liu *et al.*, 2005)。内蒙古东南部地区位于该造山带的东南段,处于两大古板块的最终碰撞、拼合部位,是研究显生宙地壳增生和区域构造演化的理想场所。近年来,前人通过精确的同位素定年在该地区识别出早古生代到中生代多期花岗岩组合,其中既有与俯冲作用有关的钙碱性闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩组合(Chen *et al.*, 2000, 2009; 陈斌等, 2001; 石玉若等, 2005; 刘建峰等, 2009; Wu *et al.*, 2011),又有与碰撞作用有关的二长花岗岩、钾长花岗岩和二云母花岗岩等高钾钙碱性花岗岩组合(Chen *et al.*, 2000, 2009; 陈斌等, 2001; 石玉若等, 2004; 李锦轶等, 2007),还有伸展背景下形成的碱性、碱长花岗岩组合(洪大卫等, 1994; 施光海等, 2004; 石玉若等, 2007; 刘勇等, 2012; 张万益等, 2012),这些花岗岩的形成受控于不同的地球动力学背景,是古亚洲洋闭合过程中不同阶段的产物。刘伟等(2007)对林西地区地壳生长时代和方式的研究中,发现林西北部原定海西期的龙头山岩体形成于早三叠世,并通过锆石 Hf 同位素分析讨论了源岩组成和性质,但没有对该时期花岗岩的空间分布及其形成的构造环境进行深入讨论。在林西幅 1:20 万区调报告中(辽宁省第二区域地质测量队, 1971^①),除了龙头山岩体外,巴林右旗北部的建设屯、幸福之路等岩体也被划分为海西期,岩石组合为石英闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩,这些岩体大致呈东西向分布在西拉木伦河缝合带以北。考虑到西拉木伦河缝合带二叠纪之前是南北古生物地理分区的一条重要界线(黄本宏和丁秋红, 1998; 王成文和张松梅, 2003; 王玉净和樊志勇, 1997; 尚庆华, 2004),这些花岗岩体的形成可能与两大板块之间的古亚洲洋闭合有关,因此本文选择其中出露面积较大的建设屯岩体进行研究,通过岩石学、年代学、地球化学和锆石 Hf 同位素研究,并结合区域岩浆岩和地层古生物资料讨论该花岗岩组合与兴蒙造山带构造演化的关系。

2 区域地质概况及岩石学特征

建设屯岩体位于巴林右旗北部幸福之路乡的建设屯附近,大地构造位置上处于西拉木伦河缝合带以北。区内出露的地层单元主要有二叠纪大石寨组(原定青凤山组)火山岩、哲斯组和林西组碎屑岩,以及中、新生代陆相火山岩和碎屑岩,其中大石寨组和哲斯组为海相沉积地层,林西组出现海陆交互沉积(内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 李文国等, 1996)。研究区岩浆活动频繁,广泛出露晚古生代到中生代以来的火山岩和花岗岩侵入体。建设屯岩体呈北东东向椭圆状岩株形式产出,面积约 50km²,南部侵入大石寨组火山角砾岩,北部被侏罗纪白音高老组流纹岩所覆盖,晚期被第四系水系切割为东西两个岩体(图 1b)。根据与围岩的接触关系,区域地质调查报告中将该岩体被划分为晚海西期侵入体,但从本文定年结果(248.5 ± 2.3Ma)来看,应为早三叠世,与该岩体西部 50km 的龙头山岩体的形成时代(241 ± 3Ma)相近(刘伟等, 2007)。

本文主要对建设屯东部岩体进行研究。从野外观察来看,岩体节理发育,风化作用较强,岩石风化面灰白色,具有球状风化特征。采样位置为发育在岩体中的冲沟底部露头,岩石比较新鲜,新鲜面为青灰色,中细粒块状构造,由长英质矿物和少量黑云母、角闪石组成,其中长石为灰白色,粒径 1~3mm,含量约 50%~60%,石英粒径 0.5~2mm,含量 30%~35%,而镁铁质矿物含量约 5%。在显微镜下观察,岩石为半自形粒状结构,主要由斜长石、石英、少量碱性长石、黑云母和角闪石等矿物组成。斜长石为较自形的宽板状和粒状,发育紧密的聚片双晶和环带状结构,为偏中基性的斜长石,部分颗粒中心部分出现钠黝帘石化蚀变;碱性长石含量相对较少,呈他形粒状,表面轻微高岭土化;石英为他形粒状,发育波状消光;棕褐色黑云母和浅绿色角闪石具有交代共生的关系,呈片、柱状充填在长英质矿物之间,部分颗粒发育绿泥石化。此外,岩石中可见少量楣石、磷灰石、锆石以及磁铁矿等副矿物。

3 样品制备与分析方法

3.1 主量和微量元素

样品的粗碎和磨样工作是在吉林大学地球科学院实验

① 辽宁省第二区域地质测量队. 1971. 林西县幅(K-50-V)1:20 万区域地质矿产报告书(地质部分)

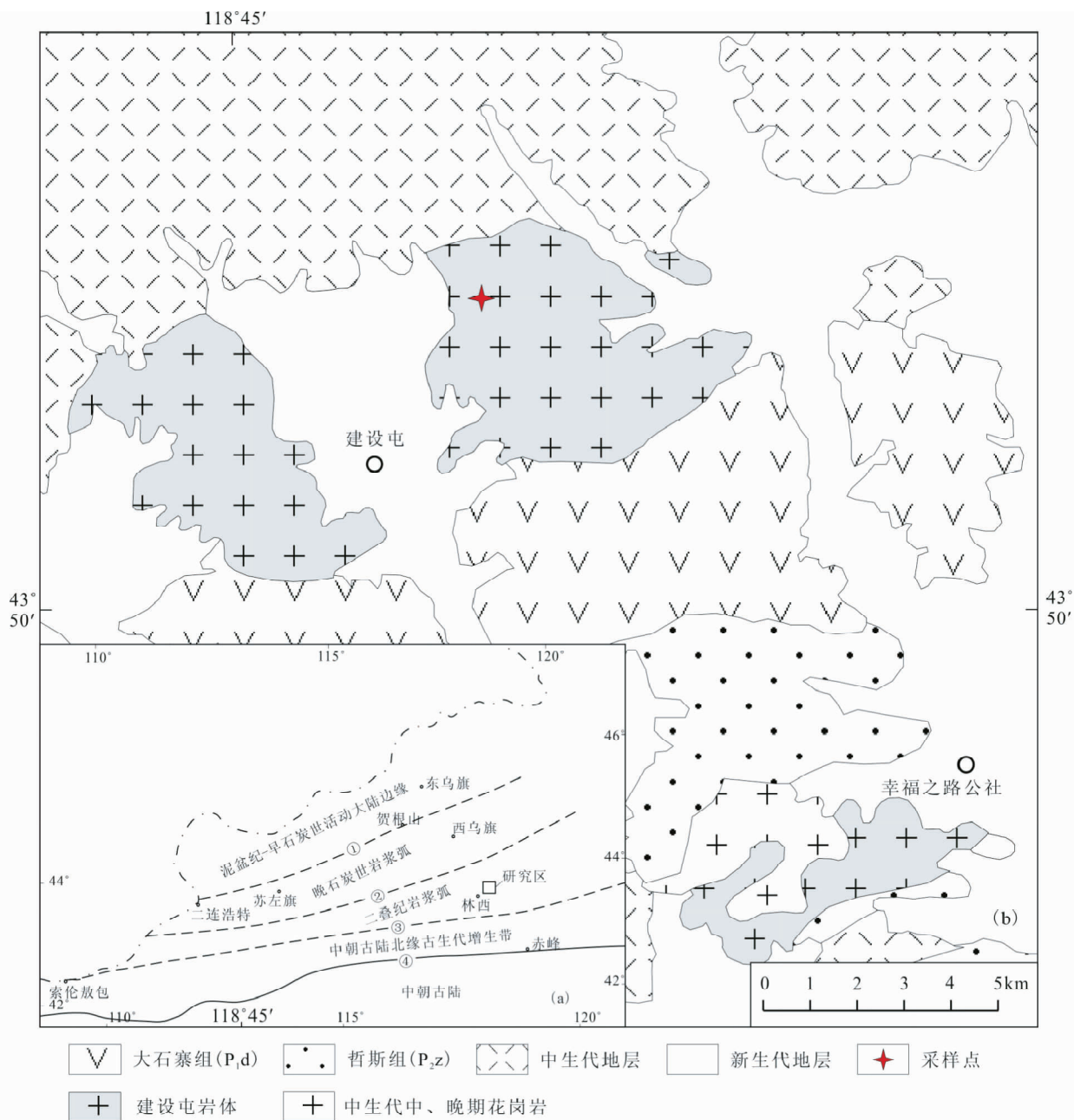


图1 内蒙古东南部区域构造简图(a,据 Xiao *et al.* ,2003; Miao *et al.* ,2008; 刘建峰等,2009)和建设屯地区地质简图(b)
①-二连浩特-贺根山断裂带;②-锡林浩特断裂带;③-索伦-西拉木伦河缝合带;④-赤峰-巴彦敖包断裂带

Fig.1 Sketch regional tectonic map of SE Inner Mongolia (a, after Xiao *et al.* , 2003; Miao *et al.* ,2008; Liu *et al.* , 2009) and geological map showing the distribution of Jianshetun pluton (b)

室完成的。经薄片显微镜下鉴定后,选择新鲜样品用于地球化学分析,首先将岩石样品在颚式破碎机上进行粗碎,然后在玛瑙钵体和柱头的研磨机上研磨至200目以下,样品加工过程均在无污染设备中进行。主量元素的分析测试是在湖北省地质实验研究所采用X-荧光光谱法(XRF)完成的。稀土和微量元素是在吉林大学测试中心由美国公司Aglient 7500a等离子体质谱(ICP-MS)仪上测定的。对国家参考物质GBW07103、GBW07104的分析结果表明,微量元素

的分析精度和准确度一般优于5%。

3.2 锆石原位微区 U-Pb 测年和 Hf 同位素

锆石分选是在河北廊坊市区域地质调查大队地质实验室完成的。年龄样品的制备与SHRIMP方法类似(宋彪等,2002)。锆石阴极发光照相在北京离子探针中心扫描电镜实验室完成。锆石定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行。实验采用激光剥蚀等离子体

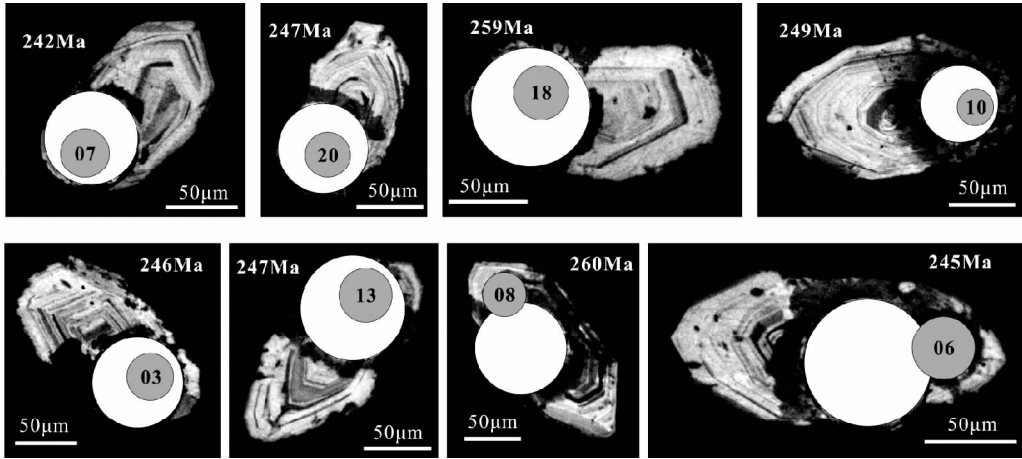


图2 建设屯花岗岩闪长岩锆石阴极发光图像

图中灰色圆图为锆石 U-Pb 年龄测定位置,白色大圆图为 Hf 同位素测定位置,分析点周围颜色发暗部分是测试过程中激光剥蚀作用造成的

Fig. 2 CL images of zircons from Jianshetun granodiorite

质谱分析技术(LA-ICP-MS),应用 GeoLas2005 准分子激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型 ICP-MS 进行锆石 U-Pb 测定,激光束斑为 $32\mu\text{m}$ 。实验中采用高纯氦气作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化,采用哈佛大学国际标准锆石 91500 作为外部校正,详细的实验原理和流程参见文献(袁洪林等,2003)。样品的同位素比值计算采用 GLITTER(ver4.0 Macquarie University) 程序,实验数据运用 Andersen(2002) 的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 Pb 的影响测试结果。年龄计算采用国际标准程序 Isoplot(ver 3.23)。

锆石原位 Hf 同位素分析测试是在锆石 U-Pb 定年基础上进行的,测试工作是在中国科学院地质与地球物理研究所 Neptune MC-ICP-MS 和 193nm 激光取样系统上完成。分析过程中采用的激光束直径为 $63\mu\text{m}$,激光剥蚀时间为 26s。仪器的运行条件,详细的分析过程和数据处理见文献(Wu *et al.*, 2006)。分析过程中采用国际标样 Mud Tank 锆石为外标, Mud Tank 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测定结果为 0.282513 ± 0.000004 ,与国际上推荐值在误差范围内一致(Woodhead and Hergt, 2005)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

用于测年的样品(JG21-29-58)为青灰色块状花岗岩闪长岩,采样点的经纬度为 N $43^{\circ}53'36.3''$, E $118^{\circ}48'19.6''$ (图 1b)。所测锆石无色到浅褐色,短柱状到粒状,长宽比多介于 2:1~3:1 之间。从阴极发光图像来看,锆石晶形较好,发育韵律环带结构,显示了岩浆成因锆石的特征(图 2)。

测年结果见表 1,从表中可以看出,所测锆石 Th/U 比值

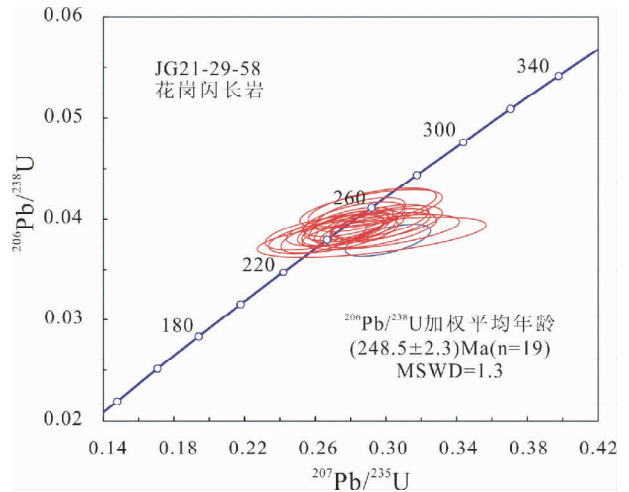


图3 建设屯花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Concordia U-Pb diagram of zircons from Jianshetun granodiorite

介于 0.48 至 1.13 之间,均大于 0.30,反映岩浆成因的特征(Koschek,1993)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中(图 3),所测 20 粒锆石除了 29-58-01 号锆石投影点偏离谐和线较远外,其余 19 粒锆石均分布在谐和线上及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $248.5 \pm 2.3\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 1.3$,表明建设屯岩体形成的时代为早三叠世早期。

4.2 地球化学特征

表 2 列出了建设屯岩体岩体的化学成分,鉴于龙头山岩体与建设屯岩体时空分布具有相似性,因此本文也将该岩体的化学成分列入表中一起进行介绍。从表中可以看出,建设屯岩体具有较低 SiO_2 含量(69.91%~70.01%),龙头山岩体除样品 VII07B 外, SiO_2 含量相对较高(70.02%~

表 1 建设屯花岗岩长岩锆石 U-Pb 同位素 LA-ICP-MS 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from Jianshetun granodiorite

测点号	含量 ($\times 10^{-6}$)		同位素比值				同位素年龄 (Ma)											
	Pb	^{232}Th	^{232}Th ^{238}U	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$					
														^{238}U				
29-58-01	41.5	240.1	212.7	1.13	0.05761	0.00192	0.30112	0.00992	0.03791	0.00065	0.01202	0.00021	267	8	240	4	242	4
29-58-02	30.9	125.1	149.7	0.84	0.05506	0.00237	0.30066	0.01276	0.03960	0.00071	0.01263	0.00027	267	10	250	4	254	5
29-58-03	44.0	209.0	226.7	0.92	0.05113	0.00189	0.27438	0.01000	0.03892	0.00067	0.01195	0.00023	246	8	246	4	240	5
29-58-04	42.5	153.6	207.8	0.74	0.05565	0.00356	0.29714	0.01822	0.03873	0.00071	0.01207	0.00017	264	14	245	4	242	3
29-58-05	62.5	345.4	314.0	1.10	0.05257	0.00180	0.28285	0.00954	0.03902	0.00067	0.01200	0.00021	253	8	247	4	241	4
29-58-06	21.2	59.5	115.3	0.52	0.04974	0.00263	0.26544	0.01382	0.03870	0.00072	0.01197	0.00035	239	11	245	4	241	7
29-58-07	41.6	200.0	218.9	0.91	0.05020	0.00190	0.26474	0.00990	0.03825	0.00066	0.01134	0.00022	238	8	242	4	228	4
29-58-08	24.2	59.6	123.4	0.48	0.05149	0.00266	0.29228	0.01483	0.04117	0.00078	0.01382	0.00041	260	12	260	5	277	8
29-58-09	33.0	122.4	165.8	0.74	0.05118	0.00191	0.28523	0.01049	0.04042	0.00070	0.01319	0.00027	255	8	255	4	265	5
29-58-10	38.1	134.6	191.2	0.70	0.05466	0.00217	0.29677	0.01159	0.03937	0.00069	0.01251	0.00027	264	9	249	4	251	5
29-58-11	43.3	158.7	225.9	0.70	0.05147	0.00170	0.27873	0.00912	0.03928	0.00066	0.01203	0.00023	250	7	248	4	242	5
29-58-12	29.7	125.7	149.6	0.84	0.05404	0.00209	0.29638	0.01133	0.03977	0.00069	0.01256	0.00025	264	9	251	4	252	5
29-58-13	40.3	178.8	206.5	0.87	0.05159	0.00192	0.27730	0.01020	0.03899	0.00067	0.01233	0.00024	249	8	247	4	248	5
29-58-14	21.5	73.3	112.1	0.65	0.05514	0.00256	0.29571	0.01351	0.03890	0.00072	0.01334	0.00033	263	11	246	4	268	7
29-58-15	46.1	252.0	226.0	1.12	0.05121	0.00192	0.27895	0.01030	0.03951	0.00068	0.01263	0.00023	250	8	250	4	254	5
29-58-16	24.3	62.2	126.7	0.49	0.05113	0.00218	0.28189	0.01182	0.03998	0.00071	0.01329	0.00034	252	9	253	4	267	7
29-58-17	28.8	91.6	138.8	0.66	0.05541	0.00516	0.29197	0.02648	0.03822	0.00082	0.01191	0.00019	260	21	242	5	239	4
29-58-18	14.3	47.2	69.9	0.68	0.05156	0.00296	0.29158	0.01648	0.04101	0.00078	0.01626	0.00042	260	13	259	5	326	8
29-58-19	20.8	80.5	108.2	0.74	0.05104	0.00289	0.27029	0.01501	0.03840	0.00075	0.01354	0.00036	243	12	243	5	272	7
29-58-20	25.1	65.9	122.4	0.54	0.05138	0.00257	0.27704	0.01364	0.03911	0.00073	0.01230	0.00036	248	11	247	5	247	7

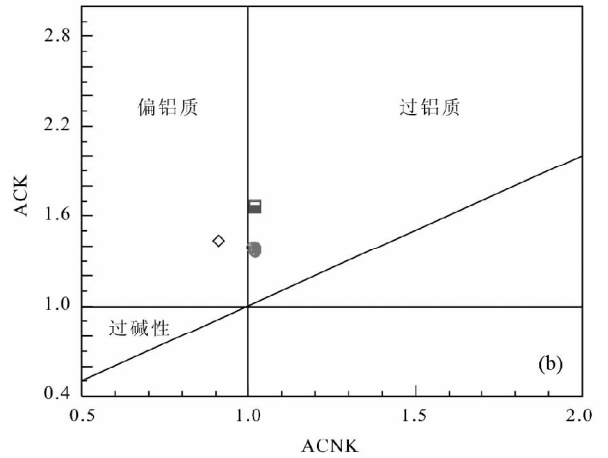
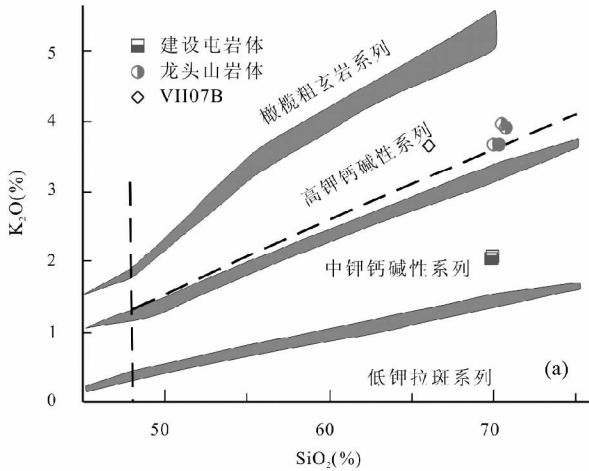


图4 内蒙古东南部早三叠世花岗岩 SiO_2 - K_2O 图(底图据 Rickwood, 1989)和 ACNK 图解(底图据 Maniar and Piccoli, 1989)

龙头山岩体数据引自文献 Liu *et al.*, 2005

Fig. 4 SiO_2 - K_2O diagram (after Rickwood, 1989) and ACNK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989) of Early Triassic granite in SE Inner Mongolia

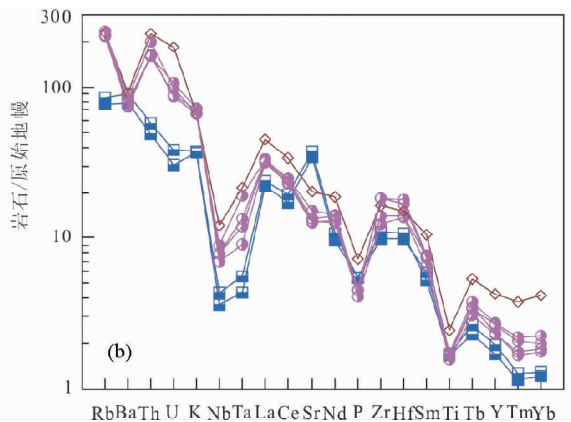
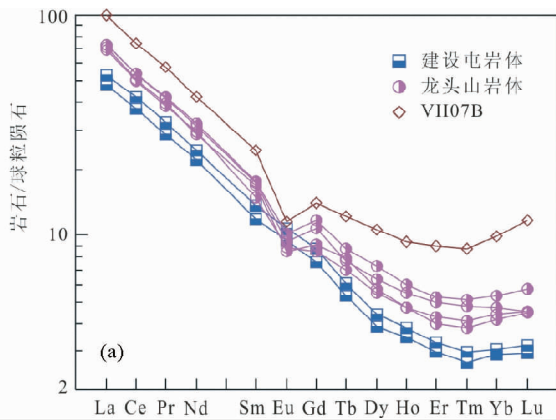


图5 内蒙古东南部早三叠世花岗岩稀土元素元素配分图(球粒陨石标准化值据 Boynton, 1984)和微量元素蛛网图(原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 REE pattern (normalizing values of chondrite after Boynton, 1984) and trace elements spider diagrams (normalizing values of primary mantle after Sun and McDonough, 1989) of Early Triassic granites in SE Inner Mongolia

70.79%);另外,建设屯岩体相对龙头山岩体具有较高的 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 和 Na_2O 含量,而 K_2O 含量明显偏低。建设屯岩体 Na_2O 含量大于 K_2O 含量, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于 2.10 ~ 2.17 之间,显示了富钠低钾的特征,这与岩石富含斜长石、贫碱性长石的特征一致。在 SiO_2 - K_2O 图中(图 4a),建设屯岩体投影到钙碱性系列区,而龙头山岩体投影到高钾钙碱性区。两个岩体铝饱和指数 A/CNK 均小于 1.1,显示了偏铝质 I 型花岗岩的特征(图 4b)。

从表 2 和稀土元素配分曲线(图 5a)中,可以看到建设屯岩体稀土总量 ΣREE 偏低($70.1 \times 10^{-6} \sim 78.6 \times 10^{-6}$),轻重稀土分馏非常明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 16.8 ~ 17.4 之间;且存在重稀土的分馏, $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$ 介于 4.13 ~ 4.43;几乎不存

在 Eu 的负异常(δEu 为 0.97 ~ 0.98)。对于龙头山的样品来说,样品 VII07B 虽然具有较低的 SiO_2 含量(66.10%),但却相对于其他样品具有较高 Th、Y 的含量和稀土总量 ΣREE (141.8×10^{-6}),重稀土间分馏作用不明显,另外采样位置也不同于其他样品(Liu *et al.*, 2005)。虽然原作者将其归入龙头山岩体,但 Th、Y 和稀土元素属于不相容元素,样品 VII07B 经分异作用不能形成 SiO_2 含量较高样品的稀土配分模式,因而该样品可能是其他岩浆事件的产物。

除 VII07B 样品外,龙头山岩体也具有明显的稀土分馏特征, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 13.6 ~ 17.2 之间, $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$ 介于 3.30 ~ 4.07;相对建设屯岩体,稀土总量(ΣREE)偏高($96.3 \sim 103.8 \times 10^{-6}$),并存在较弱 Eu 的负异常(δEu 为 0.65 ~

表 2 建设屯和龙头山岩体主量元素 (wt%)、微量元素和稀土元素 ($\times 10^{-6}$) 分析数据Table 2 Contents of major elements (wt%), trace elements and REE ($\times 10^{-6}$) of Jianshetun and Longtoushan plutons

样品号	JG21-29		LW97076 LW97077 LW97078 WL60420 VII07B				
	-058	-059					
岩体名称	建设屯		龙头山				
SiO ₂	70.01	69.91	70.56	70.02	70.79	70.41	66.10
TiO ₂	0.37	0.36	0.34	0.36	0.37	0.38	0.54
Al ₂ O ₃	15.59	15.74	14.58	14.72	14.62	14.60	14.16
Fe ₂ O ₃	1.02	1.02	0.46	0.75	0.69	0.24	2.68
FeO	1.18	1.18	1.50	1.40	1.50	1.95	1.45
MnO	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.07
MgO	1.07	1.03	0.82	0.85	0.88	0.89	1.47
CaO	3.24	3.24	1.99	2.09	2.03	2.17	3.09
Na ₂ O	4.34	4.41	3.91	4.03	3.93	4.00	3.61
K ₂ O	2.07	2.03	3.95	3.65	3.88	3.66	3.64
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.09	0.10	0.10	0.10	0.16
LOI	0.61	0.57	0.33	0.62	0.75	0.66	1.66
Total	99.65	99.64	98.57	98.63	99.58	99.09	98.62
Ba	622	549	520	512	557	591	644
Rb	54	48	136	140	140	147	147
Sr	785	726	268	286	270	321	423
Y	8.9	7.8	10.6	12.2	10.9	12.5	19.4
Zr	111	123	138	156	205	203	183
Nb	3.12	2.60	5.00	5.64	5.63	6.33	8.63
Th	4.9	4.2	13.6	13.9	13.5	17.0	19.2
Pb	10.6	9.2	26.2	24.9	18.0	15.6	13.5
Ga	22.6	20.5	18.5	18.8	18.2	19.3	19.4
Zn			64.2	57.4	43.5	30.5	44.2
Ni	10.42	8.92					
V	56.87	51.82	29.99	33.93	33.42	46.34	71.65
Cr	13.3	11.9	116.9	137.2	167.9	149.8	256.6
Hf	3.06	3.33	4.25	4.34	5.18	5.47	4.69
Cs			5.20	5.97	6.30	5.40	6.64
Sc	5.88	5.00					
Ta	0.23	0.18	0.38	0.55	0.49	0.78	0.88
Co	7.17	6.32	4.12	4.37	4.78	4.92	8.93
U	0.80	0.64	2.21	1.82	1.84	2.04	3.82
La	16.50	15.01	21.63	22.83	22.19	22.66	30.75
Ce	34.24	30.29	40.51	43.41	41.30	43.81	60.14
Pr	3.98	3.51	4.72	5.13	4.80	5.18	7.08
Nd	14.66	13.13	17.72	18.76	17.17	19.19	25.39
Sm	2.65	2.32	2.90	3.38	3.30	3.45	4.71
Eu	0.79	0.70	0.65	0.69	0.63	0.75	0.85
Gd	2.26	1.96	2.19	2.77	2.37	3.04	3.62
Tb	0.29	0.25	0.33	0.37	0.38	0.41	0.58
Dy	1.41	1.25	1.78	2.05	1.84	2.34	3.40
Ho	0.27	0.25	0.34	0.40	0.34	0.43	0.67
Er	0.69	0.63	0.89	1.04	0.84	1.10	1.88
Tm	0.10	0.09	0.13	0.16	0.12	0.17	0.28
Yb	0.64	0.60	0.92	0.99	0.87	1.12	2.06
Lu	0.10	0.09	0.15	0.15	0.14	0.18	0.38
∑REE	78.6	70.1	94.9	102.1	96.3	103.8	141.8
(La/Yb) _N	17.4	16.8	15.9	15.6	17.2	13.6	10.1
(Sm/Yb) _N	4.43	4.13	3.39	3.66	4.07	3.30	2.45
δEu	0.97	0.98	0.76	0.67	0.65	0.69	0.60

注: 龙头山岩体数据引自 Liu *et al.*, 2007

0.76)。在微量元素蛛网图中(图 5b),两个岩体也显示了类似的配分形式,均表现为高度富集 Rb、Ba、U、K 等大离子亲石元素(LILE),相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(HFSE);所不同的是龙头山岩体的配分曲线相对较高,且具有明显 Ba 的负异常,而建设屯岩体具有 Sr 的正异常。此外,在 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 和 Sr/Y-Y 判别图解中建设屯岩体投影到典型的埃达克岩范围内,而龙头山岩体虽然在 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图解中投影到埃达克岩范围内,但在 Sr/Y-Y 图解中则落在埃达克岩和经典岛弧岩石过渡的区域(图 6)。

4.3 锆石 Hf 同位素特征

表 3 列出了建设屯岩体的测年样品原位锆石 Hf 同位素分析测试结果,考虑到 29-58-01 号锆石 U-Pb 年龄不谐和,本文只对其余 19 颗锆石的测试结果进行讨论。从表 3 中可以看出锆石 Hf 同位素组成比较均一, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282935 ~ 0.283027 之间,对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值,投影到显生宙平均地壳演化范围内(图 7a),在锆石 Hf 同位素组成直方图中表现了正态分布的特征(图 7b), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 11.19 ~ 14.37,加权平均值为 12.29 ± 0.42 (MSWD = 3.0)。岩体的亏损地幔模式年龄 t_{DM1} 为 318 ~ 442Ma,两阶段模式年龄 t_{DM2} 为 404 ~ 692Ma,与中亚造山带中(除古老微陆块外)显生宙岩浆岩给出的 Nd 模式年龄范围一致(洪大卫等,2000; Hong *et al.*, 2004; Jahn *et al.*, 2000; Jahn, 2004; Yang *et al.*, 2006)。龙头山岩体的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 9.38 ~ 17.81,平均值为 12.39 ± 2.06 ($n=25$) (刘伟等,2007),与建设屯岩体在误差范围内一致。

5 讨论

5.1 岩石成因

埃达克岩是根据地球化学特征定义的一类中酸性火成岩岩石组合,它具有以下显著的地球化学特征: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ (很少低于这个值), $\text{MgO} < 3\%$ (很少高于 6%), 贫 Y 和 Yb ($Y \leq 18 \times 10^{-6}$, $Yb \leq 1.9 \times 10^{-6}$), 高 Sr ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$), 并且 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 通常小于 0.7040 (Defant and Drummond, 1990)。建设屯和龙头山岩体形成时代上一致,分别为 $248.5 \pm 2.3\text{Ma}$ 和 $241 \pm 3\text{Ma}$,而且空间分布上仅相距约 50km,表明两者具有密切的成因联系。从两个岩体的岩石学和地球化学特征来看,两个岩体岩石类型均为花岗闪长岩, SiO_2 介于 69.91% ~ 70.79%, 均大于 56%; MgO 介于 0.82% ~ 1.07%; Y 和 Yb 含量分别为 7.79×10^{-6} ~ 12.48×10^{-6} 和 0.60×10^{-6} ~ 1.12×10^{-6} , 类似于前面所提到的埃达克岩的地球化学特征。所不同的是建设屯岩体 Al_2O_3 和 Sr 含量分别为 15.59% ~ 15.74% 和 726×10^{-6} ~ 785×10^{-6} , 龙头山岩体 Al_2O_3 和 Sr 含量分别为 14.58% ~ 14.72% 和 268×10^{-6} ~ 321×10^{-6} (表 2), 本文认为造成上述差别的原因可

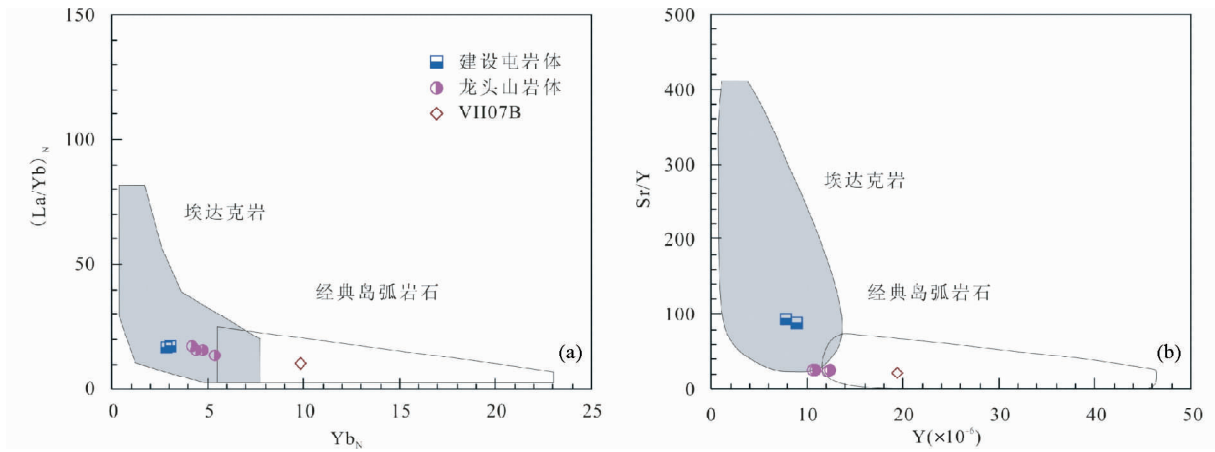


图6 内蒙古东南部早三叠世花岗岩 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 和 Sr/Y - Y 图解(底图据 Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999)

Fig. 6 $(La/Yb)_N$ - Yb_N and Sr/Y - Y diagrams of Early Triassic granite in SE Inner Mongolia (after Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999)

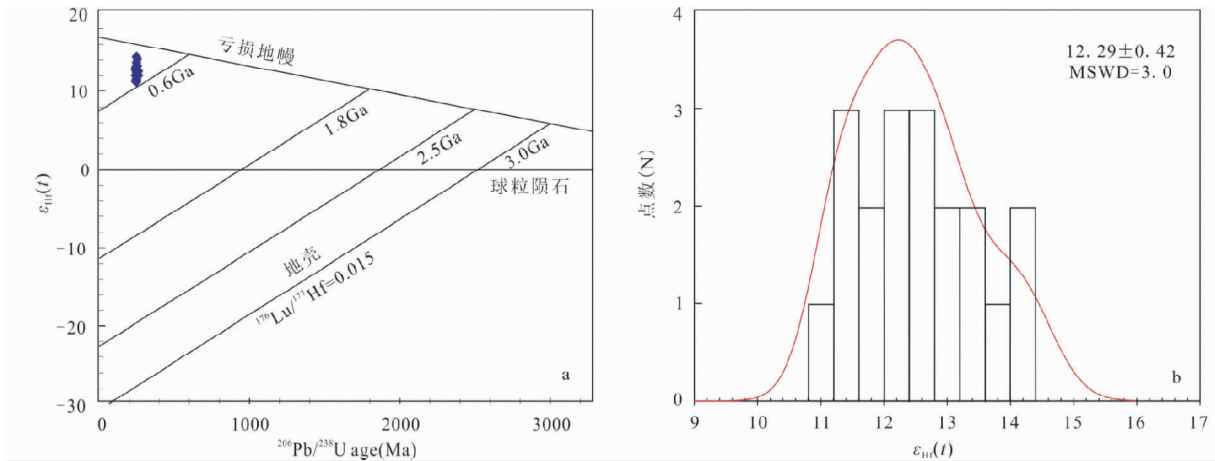


图7 建设屯花岗岩闪长岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 与年龄相关图(a)和锆石 Hf 同位素组成直方图(b)

Fig. 7 Plot of zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ vs. U-Pb age (a) and histogram of zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ (b) from Jianshetun granodiorite

能是相似源区不同程度熔融产生的熔体经不同程度分离结晶作用形成的。

在花岗岩岩石中 Sr 和 Eu 主要以类质同相的形式取代斜长石中的 Ca, Ba 主要取代黑云母和钾长石中的 K, Nb 和 Ta 的强烈亏损说明岩浆为地壳来源或者受到地壳物质的混染,而 P 和 Ti 的亏损可能与磷灰石和榍石等副矿物的分离结晶作用有关(孙德有等,2004)。在稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图中(图5),龙头山岩体除了相对亏损 Eu, Sr 和 Ba 外与建设屯岩体具有一致性,即富集不相容元素 Th 以及 Rb, U, K 等大离子亲石元素(LILE),相对亏损 Nb, Ta, P, Ti 等高场强元素(HFSE),表明两者具有相同或相似的源区组成; Eu, Sr 和 Ba 等元素的亏损可能与龙头山岩体经历了与斜长石和黑云母的分离结晶作用有关。虽然两个岩体在稀土和微量元素特征有很多相似性,但岩体 SiO_2 含量几乎相

同, Al_2O_3 和 K_2O 等主要元素的差别是很难用同源岩浆演化来解释的,因为无论什么矿物组合发生分离结晶一般都会导致 SiO_2 含量不同程度的增加,因此可以排除它们是同源岩浆经分离结晶作用的产物。另外,两个岩体锆石 Hf 同位素组成具有很好的一致性, $\epsilon_{Hf}(t)$ 加权平均值分别为 12.29 ± 0.42 和 12.39 ± 2.06 , 表明两个岩体具有相似同位素组成的岩浆源区。通过以上分析本文认为,建设屯和龙头山岩体的原始岩浆起源于含石榴子石残留的源区,其中建设屯岩体更接近原始岩浆的化学成分,表现出埃达克岩的地球化学特征;而龙头山岩体则是经斜长石和磷灰石、榍石等副矿物分离结晶作用的产物,其中斜长石分离结晶效应明显是负铕异常和相对贫铈的主要原因,较高的岩浆结晶分异程度导致稀土配分曲线的近平行上移。

埃达克岩的概念提出以后,除在俯冲带地区外,人们相

表 3 建设屯花岗闪长岩锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Hf isotopic composition of zircons from Jianshetun granodiorite

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
29-58-01	240	0.018595	0.000690	0.282947	0.000014	6.20	11.36	0.49	429	670	-0.98
29-58-02	250	0.025965	0.000976	0.283027	0.000014	9.03	14.37	0.50	318	404	-0.97
29-58-03	246	0.020469	0.000756	0.283008	0.000019	8.35	13.63	0.66	343	468	-0.98
29-58-04	245	0.029866	0.001085	0.282943	0.000014	6.06	11.27	0.50	439	682	-0.97
29-58-05	247	0.049428	0.001818	0.282995	0.000155	7.90	13.03	5.47	372	523	-0.95
29-58-06	245	0.019871	0.000725	0.282946	0.000012	6.17	11.43	0.42	430	667	-0.98
29-58-07	242	0.017028	0.000622	0.282966	0.000013	6.86	12.08	0.45	402	606	-0.98
29-58-08	260	0.014806	0.000550	0.282968	0.000013	6.94	12.56	0.47	398	575	-0.98
29-58-09	255	0.021051	0.000789	0.282991	0.000015	7.75	13.22	0.55	368	511	-0.98
29-58-10	249	0.011043	0.000405	0.282935	0.000011	5.78	11.19	0.40	442	692	-0.99
29-58-11	248	0.023424	0.000881	0.282984	0.000017	7.50	12.80	0.61	379	545	-0.97
29-58-12	251	0.013189	0.000496	0.282963	0.000013	6.75	12.18	0.47	405	603	-0.99
29-58-13	247	0.028068	0.001021	0.282976	0.000013	7.20	12.46	0.47	392	575	-0.97
29-58-14	246	0.019346	0.000705	0.282951	0.000016	6.33	11.62	0.56	424	651	-0.98
29-58-15	250	0.017383	0.000636	0.282960	0.000013	6.64	12.03	0.46	410	616	-0.98
29-58-16	253	0.035527	0.001274	0.283020	0.000013	8.76	14.11	0.47	332	429	-0.96
29-58-17	242	0.015319	0.000572	0.282990	0.000012	7.71	12.94	0.43	367	528	-0.98
29-58-18	259	0.015962	0.000581	0.282952	0.000013	6.38	11.97	0.46	420	628	-0.98
29-58-19	243	0.028668	0.001032	0.282984	0.000015	7.50	12.68	0.54	380	553	-0.97
29-58-20	247	0.014325	0.000578	0.282997	0.000017	7.95	13.28	0.60	358	500	-0.98

继在大陆内部发现了具有类似地球化学特征的岩石。一些学者根据 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值、Sr-Nd 同位素特征和产出位置将埃达克岩划分为两种成因类型:一类是年轻的大洋板片俯冲发生部分熔融形成(O型,即原始定义类型);另一类是加厚的玄武质下地壳部分熔融形成的(C型)。其中,O型埃达克岩具有富钠贫钾的特征($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$),而C型埃达克岩相对O型埃达克岩具有明显的富钾特征($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} \approx 1$ 或 > 1)(张旗等,2001;王强等,2001)。建设屯岩体 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值介于 2.10~2.17 之间,属于O型埃达克岩。但近年来的研究表明,花岗岩的地球化学成分取决于其源岩的矿物组成和化学成分、熔融时的物理化学条件和其后的岩浆演化,与构造环境并不是一一对应的(Pearce, 1996; Förster *et al.*, 1997; 吴福元等,2007)。张旗等(2004, 2008)也指出典型的O型埃达克岩并非仅限于板块俯冲带环境,原岩为贫钾的拉斑玄武岩在足够大的压力条件下即可产生具有O型埃达克岩地球化学特征的岩石。鉴于此,我们将综合区域岩浆岩和地层古生物资料探讨建设屯埃达克岩产出的构造环境及地质意义。

5.2 地质意义

从近年来对我国东北地区晚古生代地层及古生物的研究资料来看,西拉木伦河缝合带北部发育安加拉植物群,而南部发育华夏植物群,在早二叠世之前没有出现两大植物群

的混生(黄本宏和丁秋红,1998);该断裂北部二叠纪哲斯组发育凉水型哲斯腕足动物群,土著分子含量在75%以上,在古生物地理区上划属于北方生物地理大区(王成文和张松梅,2003;王成文等,2008);另外西拉木伦河北部杏树洼、哲斯以及锡林浩特等地均发现中二叠世中、晚期的远洋放射虫(王玉净和樊志勇,1997;尚庆华,2004)。以上的研究表明西拉木伦河缝合带在晚二叠世之前是一条重要的古生物地理界线。此外,内蒙古东南部地区早、中二叠世广泛发育大石寨组和哲斯组海相地层,晚二叠世-早三叠世发育林西组海陆交互沉积,普遍缺失中、晚三叠世沉积地层(内蒙古自治区地质矿产局,1991;李文国等,1996;和政军等,1997)。建设屯和龙头山花岗闪长岩体大地构造位置上位于西拉木伦河缝合带北侧附近,形成时代为早三叠世早期,从产出位置和就位时间来看,它们应是古亚洲洋闭合之后,西伯利亚古板块和中朝古板块碰撞造山初期阶段的产物。根据前文的讨论,建设屯岩体具有钠质O型埃达克岩的特征,该类型的埃达克岩与俯冲洋壳部分熔融或者是贫K的加厚下地壳部分熔融有关(王强等,2001;张旗等,2004,2008)。考虑到内蒙古东南部地区中、晚二叠世哲斯组和林西组地层中火山活动不发育以及古亚洲洋晚二叠世已经消失,可以排除建设屯埃达克岩是正在俯冲洋壳部分熔融作用的产物。

西拉木伦河缝合带两侧广泛发育晚古生代以来的岩浆活动,其中北侧岩浆活动除早三叠世建设屯和龙头山岩体

外,还包括石炭纪苏左旗-西乌旗岩浆弧(Chen *et al.*, 2000, 2009;刘建峰等,2009)和二叠纪大石寨组火山岩及同时代的侵入体(施光海等,2004;Zhu *et al.*, 2001;吕志成等,2002;Li, 2006;Zhang *et al.*, 2008;Liu *et al.*, 2011);南侧岩浆活动是近年来一些学者对中朝板块北缘分布的原定太古代或元古代片麻状闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩的研究中识别出来的,活动时间与北侧大体一致,从石炭纪持续到早三叠世(张拴宏等,2004;王惠初等,2007;罗红玲等,2007;Zhang *et al.*, 2007,2009)。从形成时代和岩石组合上来看,两侧的岩浆活动有一致性;但从同位素组成上来看,北侧的岩浆岩多具有低 I_{sr} 、正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 和正 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 同位素组成以及新元古到显生宙以来的模式年龄(洪大卫等,2000;Hong *et al.*, 2004;Jahn *et al.*, 2000;Jahn, 2004;Chen *et al.*, 2009;Yang *et al.*, 2006;Liu *et al.*, 2011);而南侧的岩浆岩普遍具有高 I_{sr} 、负 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 和负 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 同位素组成的特征,继承了中朝古板块太古代或元古代基底同位素组成的特征(罗红玲等,2007;Zhang *et al.*, 2009;阎国翰等,2000)。另外,研究区南部西拉木伦河北岸发育中三叠世时期(229.2 ~ 237.5Ma)双井子二云母花岗岩体,该岩体具有同碰撞壳源花岗岩的地球化学特征, I_{sr} 介于 0.713516 ~ 0.722096 之间, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 介于 -2.71 ~ -5.28 之间,两阶段模式年龄 t_{DM2} 为 1228 ~ 1436Ma,同位素特征显示了该岩体的源区是古亚洲洋闭合后两侧的古板块活动陆缘杂岩混合后部分熔融作用的产物(李锦轶等,2007)。

建设屯和龙头山岩体虽然产出位置与双井子岩体相近,但两个岩体主体为花岗闪长岩而不同于双井子岩体的二云母花岗岩,且两个岩体的形成时代较早,锆石 Hf 同位素具有亏损的源区组成和年轻的模式年龄,与西拉木伦河缝合带以北显生宙以来岩浆岩的同位素组成特征相似,而明显不同于中朝板块北缘岩浆岩以及双井子岩体的同位素组成特征。考虑到古亚洲洋闭合过程中存在不断的向两侧古板块的俯冲作用,在形成广泛弧岩浆作用的同时也使得玄武质岩浆不断底侵到地壳底部。因此,我们认为建设屯和龙头山岩体应是古亚洲洋闭合后,在西伯利亚古板块和中朝古板块碰撞造山初期加厚的新生下地壳部分熔融作用的产物。另外,孙德有等(2004)对吉林大玉山岩体(248 ± 4Ma)的研究表明该岩体也具有埃达克岩的地球化学特征,起源于加厚基性下地壳的部分熔融,因此本文认为大玉山岩体与建设屯和龙头山岩体共同构成三叠纪内蒙古南部到吉林中部近东西向山脉的一部分,是西伯利亚和中朝古板块碰撞造山作用的开始阶段的产物。

6 结论与认识

内蒙古东南部建设屯花岗闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 248.5 ± 2.3Ma,属于偏铝质 I 型花岗岩类,具有 O 型埃达克岩的地球化学特征,它与区域上同时代的龙头山岩体是相似

源区不同程度熔融的熔体经不同程度分离结晶作用的产物。锆石 Hf 同位素分析显示该时期的花岗岩起源于亏损的岩浆源区,综合区域岩浆岩和地层古生物资料,认为它们是西伯利亚古板块和中朝古板块沿西拉木伦河缝合带闭合后,加厚的新生下地壳部分熔融作用的产物。

致谢 感谢中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室刘勇胜教授、宗克清博士和梁婷、张春来等研究生在锆石 LA ICP-MS 定年过程中给予的帮助。锆石 Lu-Hf 同位素测试中得到了中国科学院地质与地球物理研究所杨岳衡和纪伟强博士的帮助。感谢李锦轶研究员给予的支持和鼓励。葛文春教授和一位匿名评审专家提出了宝贵的修改意见,在此表示感谢。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. 1990. *Regional Geology of Nei Mongol (Inner Mongolia) Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Boynnton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63-114
- Chen B, Jahn BM, Wilde SA and Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China; Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328(1-2): 157-182
- Chen B, Zhao GC and Wilde SA. 2001. Subduction- and collision-related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic ages and tectonic implication. *Geological Review*, 47(4): 361-367 (in Chinese with English abstract)
- Chen B, Jahn BM and 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
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665
- Förster HJ, Tischendorf G and Trumbull RB. 1997. An evaluation of the Rb vs. (Y + Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40(2-4): 261-293
- He ZJ, Liu SW, Ren JS and Wang Y. 1997. Late Permian-Early Triassic sedimentary evolution and tectonic setting of the Linxi region, Inner Mongolia. *Regional Geology of China*, 16(4): 403-409 (in Chinese with English abstract)
- Hong DW, Huang HZ, Xiao YJ, Xu HM and Jin MY. 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 DW, Wang SG, Xie XL and Zhang JS. 2000. Genesis of positive $\varepsilon_{Nd}(t)$ 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 DW, Zhang JS, Wang T, Wang SG and Xie XL. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23

- (5): 799–813
- Huang BH and Ding QH. 1998. The Angara flora from northern China. *Acta Geoscientia Sinica*, 19(1): 97–104 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Wu FY and Hong DW. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Earth and Planetary Sciences)*, 109(1): 5–20
- Jahn BM. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. Geological Society, London, Special Publications, 226(1): 73–100
- Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon. *Journal of Microscopy*, 171(3): 223–232
- Li JY. 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
- Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 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 WG, Li QF, Jiang WD *et al.* 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Nei Mongol (Inner Mongolia) Autonomous Region. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese)
- Liu JF, Chi XG, Zhang XZ, Ma ZH, Zhao Z, Wang TF, Hu ZC and Zhao XY. 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 JF, Chi XG, Zhao Z, Zhang XZ, Ma ZH, Wang TF and Hu ZC. 2011. Geochemical characteristics and geological significance of Early Permian Baya'ertuhushuo gabbro in South Great Xing'an Range. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 116–129
- Liu W, Siebel W, Li XJ and Pan XF. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating. *Chemical Geology*, 219(1–4): 5–35
- Liu W, Pan XF, Xie LW and Li H. 2007. Sources of material for the Linxi granitoids, the southern segment of the Da Hinggan Mts.: When and how continental crust grew? *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 441–460 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Nie FJ, Liu YF and Hou WR. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological significance of granite in the Baogeda Ula Mo (W) mining area, Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 401–408 (in Chinese with English abstract)
- Luo HL, Wu TR and Li Y. 2007. Geochemistry and SHRIMP dating of the Kebu massif from Wulatezhongqi, Inner Mongolia: Evidence for the Early Permian underplating beneath the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 755–766 (in Chinese with English abstract)
- Lv ZC, Duan GZ, Hao LB, Li DC, Pan J and Dong GH. 2002. The petrological and geochemical characteristics and petrogenesis significance of splite from Lower Permian Dashizai Group in the middle section of Da Hinggan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 212–222 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Bulletin of the Geological Society of America*, 101(5): 635–643
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429
- Miao LC, Fan WM, Liu DY, Zhang FQ, Shi YR and Guo F. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 348–370
- Pearce J. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247–263
- Shang QH. 2004. Occurrences of Permian radiolarians in central and eastern Nei Mongol (Inner Mongolia) and their geological significance to the Northern China Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 49(24): 2613–2619
- Shi GH, Liu DY, Zhang FQ, Jian P, Miao LC, Shi YR and Tao H. 2003. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and its implications on the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 48(24): 2742–2748
- Shi YR, Liu DY, Zhang Q, Jian P, Zhang FQ, Miao LC, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2004. SHRIMP dating of diorites and granites in southern Suzuqi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 789–799 (in Chinese with English abstract)
- Shi YR, Liu DY, Zhang Q, Jian P, Zhang FQ, Miao LC, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2005. The petrogenesis and SHRIMP dating of the Baiyinbaolidao adakitic rocks in southern Suzuqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 143–150 (in Chinese with English abstract)
- Shi YR, Liu DY, Zhang Q, Jian P, Zhang FQ, Miao LC and Zhang LQ. 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of Triassic A-type granites in Sonid Zuqi, central Inner Mongolia, China, and its tectonic implications. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 183–189 (in Chinese with English abstract)
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26–30 (in Chinese with English abstract)
- Sun DY, Wu FY, Zhang YB and Gao S. 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 174–181 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magma-tism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Wang CW and Zhang SM. 2003. *Zhesi Brachiopod Fauna*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Wang CW, Jin W, Zhang XZ, Ma ZH, Chi XG, Liu YJ and Li N. 2008. New understanding of the Late Paleozoic tectonics in northeastern China and adjacent areas. *Journal of Stratigraphy*, 32(2): 119–136 (in Chinese with English abstract)
- Wang HC, Zhao FQ, Li HM, Sun LX, Miao LC and Ji SP. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from northern Hebei: The geological records of Late Paleozoic magmatic arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 597–604 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu JF and Zhao ZH. 2001. The summary and comment on research on a new kind of igneous rock: Adakite. *Advance in Earth Science*, 16(2): 201–208 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ and Fan ZY. 1997. Discovery of Permian radiolarians in ophiolite belt on northern side of Xarmoron River, Nei Monggol and its geological significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 36(1): 58–69 (in Chinese with English abstract)
- Woodhead JD and Hergt JM. 2005. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for in situ Hf-isotope determination. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29(2): 183–195
- Wu FY, Sun DY and 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)

- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA and Sun DY. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1-2): 89-113
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1-2): 105-126
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Ge WC, Zhang YB, Grant ML, Wilde SA and Jahn BM. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1-30
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1069, doi: 10.1029/2002TC001484
- Yan GH, Mou BL, Xu BL, He GQ, Tan LK, Zhao H, He ZF, Zhang RH and Qiao GS. 2000. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area: Their chronology, Sr, Nd and Pb isotope characteristics and their implication. *Science in China (Series D)*, 42(6): 582-587
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, Wilde SA, Xie LW and Liu XM. 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
- Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2411-2421
- Zhang Q, Qian Q, Wang EQ, Wang Y, Zhao TP, Hao J and Guo GJ. 2001. An East China plateau in Mid-Late Yanshanian Period: Implication from adakites. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 248-255 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Xu JF, Wang Y, Xiao L, Liu HT and Wang YL. 2004. Diversity of adakite. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 959-965 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Xiong XL and Li CD. 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. Beijing: China Land Press (in Chinese)
- Zhang SH, Zhao Y, Song B and Wu H. 2004. The late Paleozoic gneissic granodiorite pluton in Early Pre-cambrian high-grade metamorphic terrains near Longhua County in northern Hebei Province, North China: Result from zircon SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 621-626 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Song B, Yang ZY, Hu JM and Wu H. 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
- Zhang SH, Zhao Y, Song B, Hu JM, Liu SW, Yang YH, Chen FK, Liu XM and Liu J. 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *Bulletin of the Geological Society of America*, 121(1-2): 181-200
- Zhang WY, Nie FJ, Gao YG and Liu Y. 2012. Geochemical characteristics and genesis of Triassic Chagan Obo alkaline quartz diorites in Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 525-534 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XH, Zhang HF, Tang YJ, Wilde SA and Hu ZC. 2008. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central Inner Mongolia, North China: Implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asian Orogenic Belt. *Chemical Geology*, 249(3-4): 262-281
- Zhu YF, Sun SH, Gu LB, Ogasawara Y, Jiang N and Honma H. 2001. Permian volcanism in the Mongolian orogenic zone, Northeast China: Geochemistry, magma sources and petrogenesis. *Geological Magazine*, 138(2): 101-115

附中文参考文献

- 陈斌, 赵国春, Wilde SA. 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
- 和政军, 刘淑文, 任纪舜, 王瑜. 1997. 内蒙古林西地区晚二叠世-早三叠世沉积演化及构造背景. *中国区域地质*, 16(4): 403-409
- 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 徐海明, 靳满元. 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, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 2000, 7(2): 441-456
- 黄本宏, 丁秋红. 1998. 中国北方安加拉植物群. *地球学报*, 19(1): 97-104
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 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
- 刘建峰, 迟效国, 张兴洲, 马志红, 赵芝, 王铁夫, 胡兆初, 赵秀羽. 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
- 刘伟, 潘小菲, 谢烈文, 李禾. 2007. 大兴安岭南段林西地区花岗岩类的源岩: 地壳生长的时代和方式. *岩石学报*, 23(2): 441-460
- 刘勇, 聂凤军, 刘翼飞, 侯万荣. 2012. 内蒙古宝格达乌拉钼(钨)矿区花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. *岩石学报*, 28(2): 401-408
- 罗红玲, 吴泰然, 李毅. 2007. 乌拉特中旗克布岩体的地球化学特征及 SHRIMP 定年: 早二叠世华北克拉通底侵作用的证据. *岩石学报*, 23(4): 755-766
- 吕志成, 段国正, 郝立波, 李殿超, 潘军, 董广华. 2002. 大兴安岭中段二叠系大石寨组细碧岩的岩石学地球化学特征及其成因探讨. *岩石学报*, 18(2): 212-222
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社
- 尚庆华. 2004. 北方造山带内内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义. *科学通报*, 49(24): 2574-2579
- 施光海, 苗来成, 张福勤, 简平, 范蔚茗, 刘敦一. 2004. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义. *科学通报*, 49(4): 384-389
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 施光海, 张履桥, 陶华. 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
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 施光海, 张履桥, 陶华. 2005. 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, 简平, 张福勤, 苗来成, 张履桥. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb

- 年龄及其区域构造意义. 地质通报, 26(2): 183-189
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26-30
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 174-181
- 王成文, 张松梅. 2003. 哲斯腕足动物群. 北京: 地质出版社
- 王成文, 金巍, 张兴洲, 马志红, 迟效国, 刘永江, 李宁. 2008. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识. 地层学杂志, 32(2): 119-136
- 王惠初, 赵凤清, 李惠民, 孙立新, 苗来成, 冀世平. 2007. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录. 岩石学报, 23(3): 597-604
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2001. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述. 地球科学进展, 16(2): 201-208
- 王玉净, 樊志勇. 1997. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义. 古生物学报, 36(1): 58-69
- 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
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 何国琦, 谭林坤, 赵晖, 何中甫, 张任祜, 乔广生. 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义. 中国科学(D辑), 30(4): 383-387
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14): 1511-1520
- 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248-255
- 张旗, 许继峰, 王焰, 肖龙, 刘洪涛, 王元龙. 2004. 埃达克岩的多样性. 地质通报, 23(9): 959-965
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 北京: 中国地大出版社
- 张拴宏, 赵越, 宋彪, 吴海. 2004. 冀北隆化早前寒武纪高级变质区内的晚古生代片麻状花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义. 岩石学报, 20(3): 621-626
- 张万益, 聂凤军, 高延光, 刘妍. 2012. 内蒙古查干敖包三叠纪碱性石英闪长岩的地球化学特征及成因. 岩石学报, 28(2): 525-534