

西乌珠穆沁旗巴彦呼舒花岗闪长岩锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄、地球化学、Hf 同位素 特征及其地质意义

熊光强^{1,2)}, 刘敏¹⁾, 赵洪涛¹⁾, 张达¹⁾, 王浩然¹⁾, 王忠³⁾, 胡兆初⁴⁾

1) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083;

2) 江西省地质矿产局物化探大队, 南昌, 330002; 3) 内蒙古地质调查院, 呼和浩特, 010020;

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

内容提要: 本文报道的花岗闪长岩位于内蒙古巴彦呼舒以东 10 km 处。大地构造位于中亚造山带中段的锡林浩特晚古生代褶皱带。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得该岩体的侵位年龄为 236.1 ± 3.4 Ma。花岗闪长岩 SiO_2 为 66.93% ~ 67.22%, Al_2O_3 为 15.13% ~ 15.53%, K_2O 为 2.47% ~ 2.56%, Na_2O 为 4.35% ~ 4.46%, A/CNK 值为 0.94 ~ 0.95, 显示该地区花岗闪长岩属于偏铝质钙碱性岩; 亏损高场强元素, Sr 达 416.6×10^{-6} ~ 425.7×10^{-6} , Sr/Y 值为 42 ~ 49, 显示出高 Sr 低 Y 的典型特征, 具有 Adakite (高锶低钇中酸性岩) 或者高 Sr 花岗岩的特点。花岗闪长岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 13.3 ~ 15.7 之间; 两阶段模式年龄分别为 249 ~ 356 Ma 和 258 ~ 422 Ma。综合分析表明, 花岗闪长岩为西伯利亚板块和华北板块碰撞闭合后, 加厚的下地壳部分熔融作用的产物。

关键词: 巴彦呼舒; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素特征; 花岗闪长岩; 西伯利亚板块; 华北板块

兴蒙造山带是目前已知发展历史最长、构造岩浆活动最复杂的一条巨型造山带(任纪舜, 1991), 是显生宙重要的陆壳增生区(Wu Fuyuan et al., 2002; Hong Dawei et al., 2004), 区内发育有大量的显生宙花岗岩(吴福元等, 1999; Wu Fuyuan et al., 2000), 这些花岗岩的成因机制及其演化受到许多学者的广泛关注(陈斌等, 1996; 吴福元等, 1999; Wu Fuyuan et al., 2000; 陈斌等, 2001; Hong Dawei et al., 2004; Liu Wei et al., 2005; Li Qiuli et al., 2007; Jian Ping et al., 2008; 李益龙等, 2009; 李大鹏等, 2010; Liu Cui et al., 2011)。内蒙古中部位位于兴蒙造山带的中段, 该处发育有从南至北的白云鄂博—赤峰、苏尼特—锡林郭勒带、白音乌拉—东乌珠穆沁旗等 3 条规模宏大的花岗岩带(洪大卫等, 1994)。近年来, 随着年代学、地球化学的广泛应用, 在兴蒙造山带内识别出与俯冲作用有关(徐备等, 1997; Chen Bin et al., 2000; 陈斌等, 2001; 石玉若等, 2004, 2005; Li Jinyi et al., 2006; Chen Bin

et al., 2009; Wu Fuyuan et al., 2011; 郝百武, 2012; 秦亚等, 2013)、与碰撞作用相关(李锦轶等, 2007; 章永梅等, 2009; 柳长峰等, 2010; 熊光强等, 2013)、以及伸展背景下(施光海等, 2004; 石玉若等, 2007; 鲍庆中等, 2007; 张维等, 2010; 熊光强等, 2014)的古生代—中生代花岗岩组合, 这些花岗岩组合是古亚洲洋闭合不同时期的产物。

位于内蒙古西乌珠穆沁旗以北巴彦呼舒以东的花岗闪长岩岩体, 大地构造位置属锡林浩特晚古生代褶皱带(Tang Kedong, 1990; 唐克东等, 1991), 温都尔庙—西拉木伦河断裂以北, 二连—贺根山缝合带以南。内蒙古自治区地质局区域地质测量队八分队在 1972 年完成的 1: 25 万阿尔山宝力格幅中, 根据花岗闪长岩与围岩的侵入接触关系, 将其划分为海西期活动; 但缺少精确的同位素年代及岩石地球化学资料, 其成因机制仍存在很大争议。为此, 本文利用年代学以及岩石地球化学方法, 结合野外地质资料, 对巴彦呼舒以东花岗闪长岩的成因、构造环

注: 本文为中国地质地质调查局项目中蒙边境东段深部结构及成矿条件对比研究(编号 1212011085490), 中国地质地质调查局项目内蒙古 1: 5 万巴拉格勒农业分场幅、阿拉腾格勒公社幅、猴头庙幅、阿拉腾敖包大队幅区域地质调查(编号 1212011120700)。

收稿日期: 2014-06-04; 改回日期: 2015-03-13。责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2015.03.018

作者简介: 熊光强, 男, 1988 年生。硕士, 研究方向为构造地质学。Email: xgq_1201@163.com。通讯作者: 张达, 1967 年生。教授。主要从事构造地质学及区域成矿规律研究。Email: zhangda@cugb.edu.cn。

境等进行系统的分析,为兴蒙造山带的演化提供新的依据。

1 区域地质概况及岩石学特征

研究区位于内蒙古西乌珠穆沁旗巴彦呼舒以东 10 km 处。该处位于中亚造山带中断,大地构造位置属锡林浩特晚古生代褶皱带(Tang Kedong, 1990; 唐克东等, 1991),温都尔庙—西拉木伦河断裂以北,二连—贺根山缝合带以南(图 1a)。

据 1: 25 万阿尔山宝力格幅地质报告可知,区内出露地层上石炭统(C₃)岩性主要为灰黑色硅泥质粉砂岩和黄褐色晶屑凝灰岩、灰绿色长石石英砂岩和晶屑岩屑凝灰岩、灰黑色粉砂岩、粉砂质泥板岩和凝灰质粉砂岩以及灰黑色粉砂岩和灰绿色长石硬砂泥岩;中石炭统本巴图组(C₂b)灰褐—灰绿色长

石石英砂岩、凝灰质粉砂岩、灰岩;下二叠统格根敖包组(P₁g)灰绿色、紫褐色安山玢岩、英安玢岩、角砾安山岩、灰绿色凝灰质粉砂岩、板岩、长石石英砂岩、泥质粉砂岩以及灰黄色长石砂岩、泥质粉砂岩、长石石英砂岩以及上侏罗统兴安岭组(J₃s)灰—灰紫色流纹岩夹黑曜岩、珍珠岩、松脂岩。区内岩浆活动频繁(图 1b),主要为华力西期灰绿色斜辉辉橄岩、花岗闪长岩(本文研究对象)以及燕山期花岗岩,主要叠加在前期的花岗闪长岩上,由于覆盖严重(图 2a),无法观察花岗闪长岩与围岩的接触关系。在区内还出现有火山岩活动,主要为早更新世辉石橄榄玄武岩。

采样位置见图 1b,岩性为花岗闪长岩(图 2a),灰白色,中粗粒结构,块状构造。主要由石英、斜长石、钾长石、普通角闪石、黑云母等矿物组成。镜下

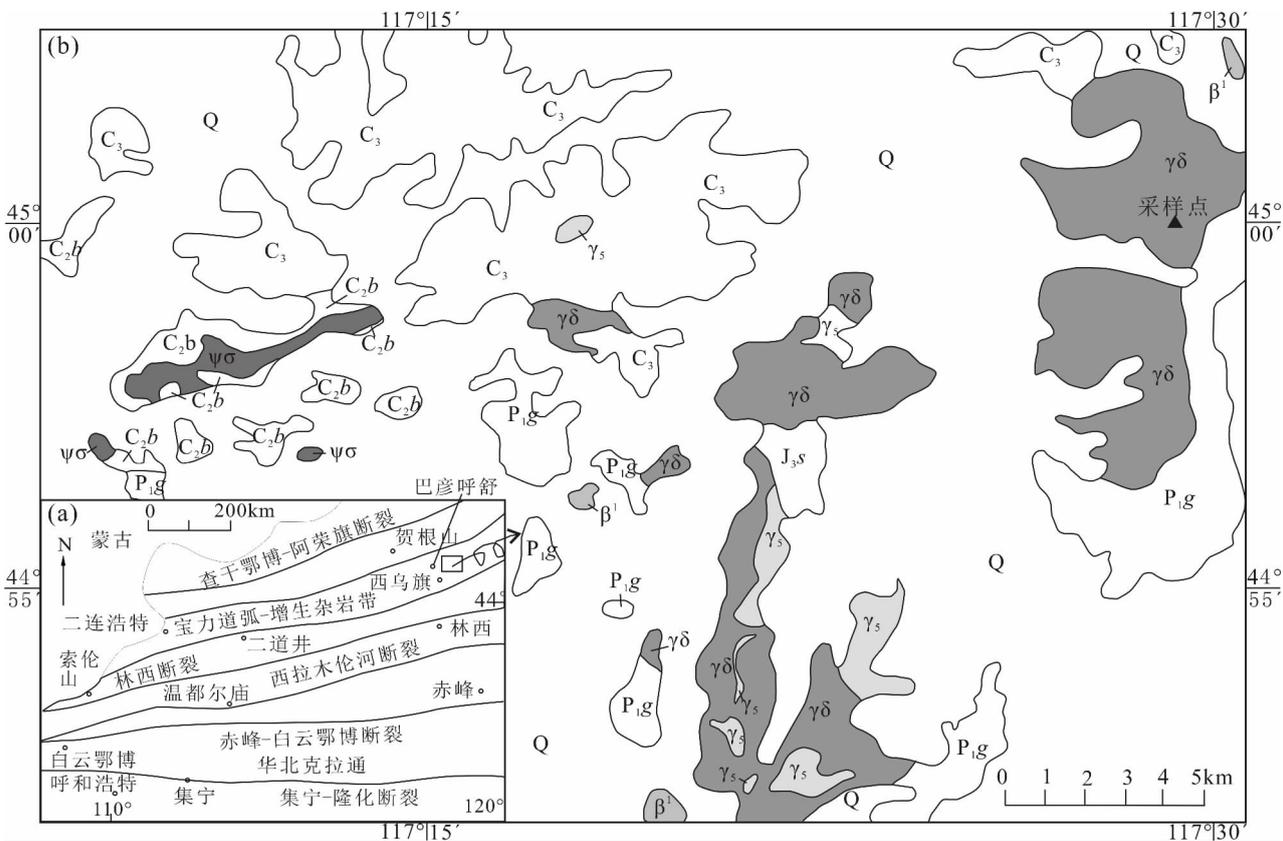


图 1 内蒙古西乌珠穆沁旗巴彦呼舒地区所处大地构造位置(a)及地质简图(b)

(据内蒙古 1974 年 1: 25 万阿尔山宝力格地质图修)

Fig. 1 Tectonic location(a) and geological map(b) of Bayanhushu area, West Ujimqin Banner (after the 1: 250000 Geological map of Aershanbaolige Inner mongolia

Q—第四系;J₃s—侏罗系兴安岭组;P₁g—二叠系格根敖包组;C₃—石炭系上统;C₂b—石炭系本巴图组;

γ₅—花岗岩;γδ—花岗闪长岩;ψδ—斜辉辉橄岩(杂岩);β¹—辉石橄榄玄武岩

Q—Quaternar; J₃s—Jurassic Hinggan mountains Formation; P₁g—Permian Gegenaobao Formation; C₃—Late Carboniferous; C₂b—Carboniferous Benbatu Formation; γ₅—granite; γδ—granodiorite; ψδ—enstentite pyroxene peridotite; β¹—pyroxene olivine basalt

观察(图 2b),石英呈他形粒状,大小为 0.5 ~ 3mm,个别可达 5mm,含量约为 20%;斜长石多呈自形一半自形粒状、板状,1 ~ 5mm,发育有聚片双晶、卡纳

复合双晶(图 2c),斜长石中见环带现象(图 2d),通过卡纳复合双晶方法测得其 $An = 40$,为中长石,含量约为 45%;钾长石多呈他形一半自形板状,大小

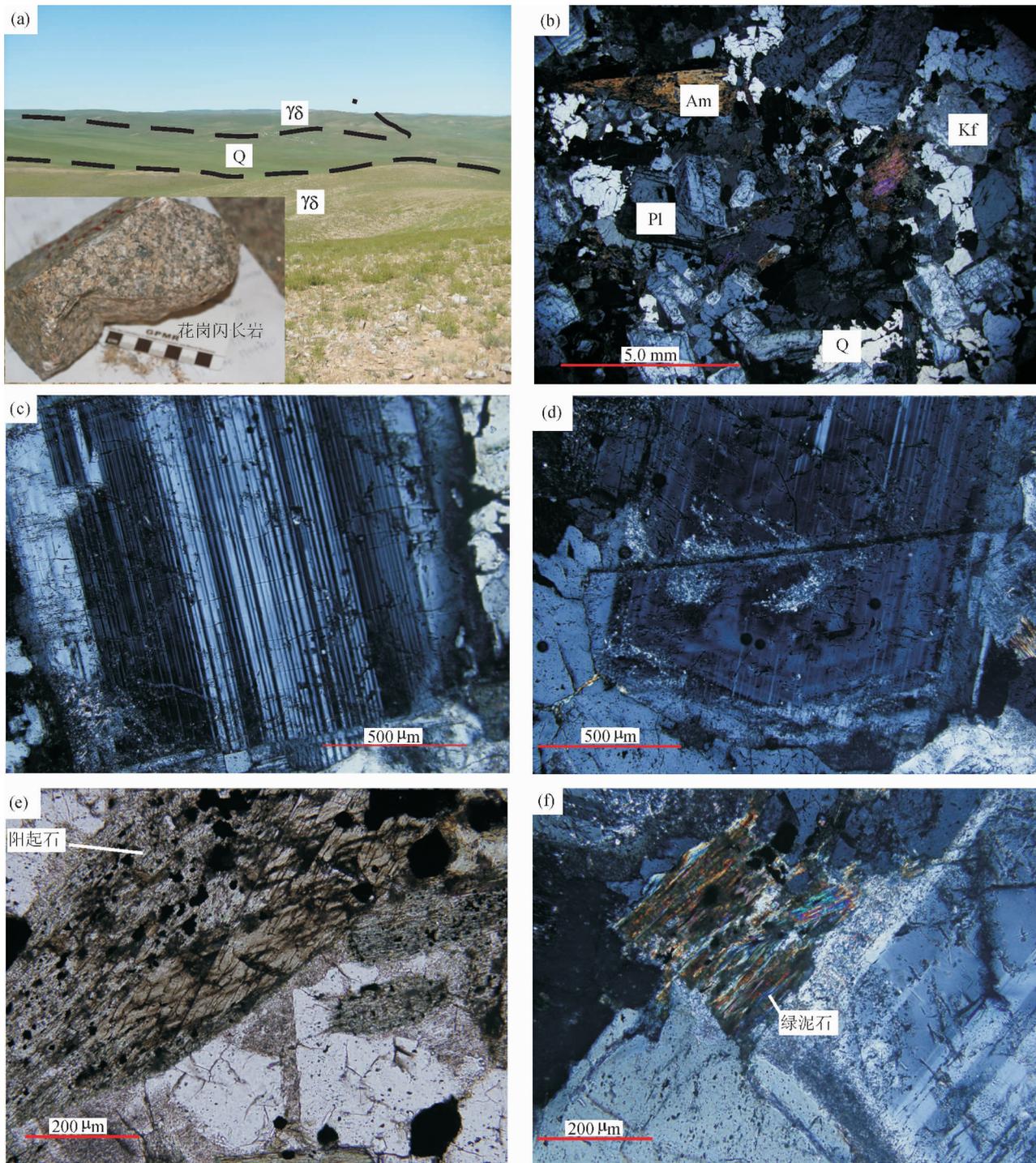


图 2 内蒙古西乌珠穆沁旗巴彦呼舒花岗闪长岩的岩石学特征

Fig. 2 Petrological characteristics of the Bayanhushu granodiorite, West Ujimqin Banner, Inner Mongolia

(a) 镜头方向为北东向;(b) 花岗闪长岩镜下特征;(c) 斜长石(中长石)卡纳复合双晶;(d) 斜长石(中长石)环带结构;

(e) 普通角闪石次生蚀变的阳起石;(f) 普通角闪石发生绿泥石化蚀变现象

(a) the lens direction is northeast; (b) the microscope features of granodiorite; (c) carlsbad-allbite crystal twin of plagioclase(andesite); (e) the actinolite is derived from hornblende; (f) the chlorite is derived from hornblende

约为 1 ~ 5mm,发育有卡氏双晶,部分发生绿泥石化,含量约为 15%;普通角闪石呈半自形—自形粒状,单偏光颜色为绿色(图 2e),具有多色性,部分普通角闪石蚀变成阳起石和绿泥石(图 2f),绿泥石干涉色呈墨水蓝,而阳起石干涉色较普通角闪石低,为 I 级干涉色,含量约为 10%;黑云母含量较少,呈片状,多色性明显,部分发生波状消光,及绿泥石化现象,含量约为 5%;还含有少量的副矿物,其中主要的为磁铁矿,其在正交偏光下的不透明矿物反射光下呈黄白色金属光泽。

2 分析方法

样品锆石挑选是由河北省廊坊市物化探研究所实验室完成的。锆石样品制靶和阴极发光图像分别是中国科学院地质与地球物理研究所和中国地质科学院北京离子探针中心完成的。将锆石标样 TEMORA (Black et al., 2004) 粘贴在环氧树脂靶上,然后抛光使其曝露一半晶面。对锆石进行透射光和反射光显微照相以及阴极发光图象分析,以检查锆石的内部结构、帮助选择适宜的测试点位。样品靶在真空下镀金以备分析。

锆石 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 同位素年龄分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar + He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度(Hu Zhaochu et al., 2008)。每个时间分辨分析数据包括大约 20 ~ 30s 的空白信号和 50s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U—Th—Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu Yongsheng et al., 2008, 2010a) 完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu Yongsheng 等(2008, 2010a, 2010b)。

参照锆石阴极发光(CL)图像和 U-Pb 同位素测定的位置进行锆石进行 Hf 同位素原位测定。Lu-Hf 同位素实验在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室。用 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{175}\text{Lu}) = 0.02669$ 和 $n(^{176}\text{Yb})/n(^{172}\text{Yb}) = 0.5886$ 进行同量异位干扰校正计算测定 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 和 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 比值(DeBievre et al., 1993; Chu

Meifei et al., 2006)。标样 91500 作为外部标准, $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 推荐值为 0.282302 ± 8 (Goolaerts et al., 2004)。 ^{176}Lu 的衰变常数采用 $1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ 。 ϵ_{Hf} 和 Hf 模式年龄计算中采用的球粒陨石和亏损地幔的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 比值分别是 0.282772 和 0.28325 (Blichert et al., 1997), 二阶段模式年龄计算采用平均地壳的 f_{cc} 为 -0.55 (Griffin et al., 2002), 数据投图采用 CGDK (v1.0) (Qiu Junting et al., 2013) 软件。

3 分析测试结果

3.1 主量元素

研究区花岗闪长岩主量元素氧化物含量见表 1。从表 1 中可以看出,4 件样品的化学分析结果表现为:

(1) 本文花岗闪长岩的 SiO_2 含量为 66.93% ~ 67.22%, 平均值为 67.09%, 低于世界花岗岩类的平均水平 (Nocklods, 1954; Vinogradov, 1962; Le Maitre, 1976; 黎彤等, 1998)。

(2) 本文花岗闪长岩的 Al_2O_3 含量偏高, 为 15.13% ~ 15.53%, 平均值为 15.39%。A/CNK 值为 1.038 ~ 1.040, 显示铝略不饱和, 与全球花岗岩类相比 (A/CNK 为 1.10 (黎彤等, 1998; 史长义等, 2005)) 偏低, 在 A/NK—A/CNK 图(图 3a) 上, 数据投影点位于过铝质范围; 而巴林右旗建设屯及林西龙头山数据投影点位于过铝质区域, 吉林大玉山花岗岩为偏铝质—过铝质。

(3) 本文花岗闪长岩的 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 6.82% ~ 7.02%, 平均值为 6.93%, 低于中国花岗岩类和全球花岗岩花岗岩类的平均值(分别为 7.86%、7.59%) (黎彤等, 1998; 史长义等, 2005), K_2O 含量为 2.47% ~ 2.56%, 平均值为 2.51%; Na_2O 含量为 4.35% ~ 4.46%, 平均值为 4.43%; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.74 ~ 1.80, 样品 Na_2O 的含量均大于 K_2O 含量, 与巴林右旗建设屯花岗岩同属钠质类型岩石(图 3b), 而林西龙头山及吉林磐石市大玉山花岗岩属钾质类型岩石。

(4) 本文花岗闪长岩的镁、钛、磷等含量较高。

(5) 在 SiO_2 — K_2O 判别图上, 花岗闪长岩与巴林右旗建设屯花岗岩样品均落入钙碱性系列(图 3c), 而林西龙头山及吉林大玉山花岗岩样品均落于高钾钙碱性系列中。

(6) 本文花岗闪长岩的里特曼组合指数 σ 值为 1.93 ~ 2.03, 平均 1.99, 属钙碱性系列。碱度率

$AR = 2.15 \sim 2.17$, 在 $AR-SiO_2$ 图(图 3d) 上, 本文、巴林右旗建设屯、林西龙头山以及吉林省磐石市大玉山花岗岩样品均在钙碱性区。

3.2 稀土元素及微量元素特征

研究区花岗闪长岩的 REE 总量为 $54.41 \times 10^{-6} \sim 65.75 \times 10^{-6}$ (表 1), 平均 59.42×10^{-6} , 低于世界平均水平; LREE/HREE 为 $7.38 \sim 7.92$, 平均 7.62 , LREE 相对 HREE 更为富集, 表现 $(La/Yb)_N > 1$, 其变化于 $8.11 \sim 8.80$ 之间, 平均 8.54 ; δEu 为 $0.94 \sim 1.02$, 平均 0.96 , 为弱的 Eu 负异常。在稀土元素球粒陨石标准化稀土图谱上(图 4a),

本文 4 件花岗闪长岩样品的稀土配分曲线极为相似, 总体表现为右倾斜型配分曲线, 其中重稀土 Ho—Lu 表现为平坦型, 轻稀土元素分馏程度高; 巴林右旗建设屯、林西龙头山以及吉林磐石市大玉山花岗岩与本文的花岗闪长岩的稀土配分曲线相似, 总体表现为右倾斜型配分曲线, 其中重稀土 Ho—Lu 表现为平坦型, 轻稀土元素分馏程度高, Eu 为弱负—弱正异常。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 4b), 本文花岗闪长岩、巴林右旗建设屯、林西龙头山及吉林磐石市大玉山花岗岩显示了类似的配分形式, 均

表 1 花岗闪长岩的主元素(%)、微量元素($\times 10^{-6}$)和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 1 Composition of major elements(%), trace elements($\times 10^{-6}$) and REE ($\times 10^{-6}$) of samples from the Granodiorite

项目	DW11-b1	DW11-b3	DW11-b4	DW11-b6	项目	DW11-b1	DW11-b3	DW11-b4	DW11-b6
SiO ₂	67.06	66.93	67.22	67.15	Pb	14.01	13.69	12.48	14.42
TiO ₂	0.54	0.53	0.50	0.52	Sr	416.60	421.10	425.70	424.00
Al ₂ O ₃	15.13	15.48	15.53	15.40	P	654.93	611.27	611.27	611.27
Fe ₂ O ₃	1.84	1.76	1.38	1.68	Zr	118.50	104.60	101.50	109.70
FeO	1.58	1.49	1.71	1.51	Hf	4.92	4.31	3.91	4.53
MnO	0.04	0.03	0.03	0.03	Ti	3236.8	3176.9	2997.1	3116.9
MgO	2.27	2.12	2.00	2.11	La	11.75	12.83	10.44	11.39
CaO	3.40	3.52	3.45	3.47	Ce	23.10	25.99	21.18	22.67
Na ₂ O	4.35	4.45	4.46	4.46	Pr	2.76	3.14	2.57	2.74
K ₂ O	2.47	2.50	2.56	2.48	Nd	11.67	13.15	10.89	11.69
P ₂ O ₅	0.15	0.14	0.14	0.14	Sm	2.37	2.53	2.14	2.34
烧失量	0.82	0.95	0.98	0.92	Eu	0.68	0.74	0.68	0.69
总量	98.83	98.95	98.98	98.95	Gd	2.08	2.27	1.96	2.07
K ₂ O + Na ₂ O	6.82	6.95	7.02	6.94	Tb	0.32	0.34	0.30	0.32
Na ₂ O/K ₂ O	1.76	1.78	1.74	1.80	Dy	1.83	1.95	1.74	1.81
σ	1.93	2.02	2.03	1.99	Ho	0.34	0.37	0.33	0.34
AR	2.16	2.15	2.17	2.16	Er	0.99	1.06	0.95	1.00
A/CNK	1.039	1.038	1.040	1.039	Tm	0.15	0.16	0.14	0.15
Cs	2.14	2.59	2.39	2.45	Yb	0.97	1.05	0.92	0.95
Rb	52.50	51.90	52.90	51.30	Lu	0.16	0.18	0.15	0.17
Ba	401.40	399.70	388.50	393.30	Y	9.42	9.84	8.64	9.03
Th	4.35	4.36	4.28	4.20	Σ REE	59.18	65.75	54.41	58.33
U	0.98	0.74	1.03	0.79	Σ LREE/ Σ HREE	7.64	7.92	7.38	7.57
Nb	4.65	4.22	4.05	4.15	$(La/Yb)_N$	8.67	8.80	8.11	8.61
Ta	0.41	0.44	0.38	0.42	δEu	0.94	0.95	1.02	0.97
K	20504.71	20753.76	21251.85	20587.73	$(Gd/Yb)_N$	1.77	1.79	1.75	1.80

$$AR = \frac{w(Al_2O_3) + w(CaO) + w(Na_2O) + w(K_2O)}{w(Al_2O_3) + w(CaO) - w(Na_2O) + w(K_2O)}$$

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); 所不同的是林西龙头山岩体的配分曲线相对较高, 且具有明显 Ba 的负异常, 而本文、巴林右旗建设屯以及吉林磐石市大玉山岩体则具有 Sr 的正异常。

3.3 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

在野外观察和室内分析样品的基础上, 我们利用锆石激光剥蚀等离子体分析技术(LA-ICP-MS), 对研究区岩体编号为 DW11-b6 的样品进行了精确的定年。根据研究区花岗岩闪长岩的锆石 CL 图像(图 5)分析, 锆石大多数呈灰白色、透明、半自形-自形晶。锆石大小和形状大体一致, 短柱状, 粒径大小 20 ~ 100 μm。阴极发光图像显示, 大多数锆石具

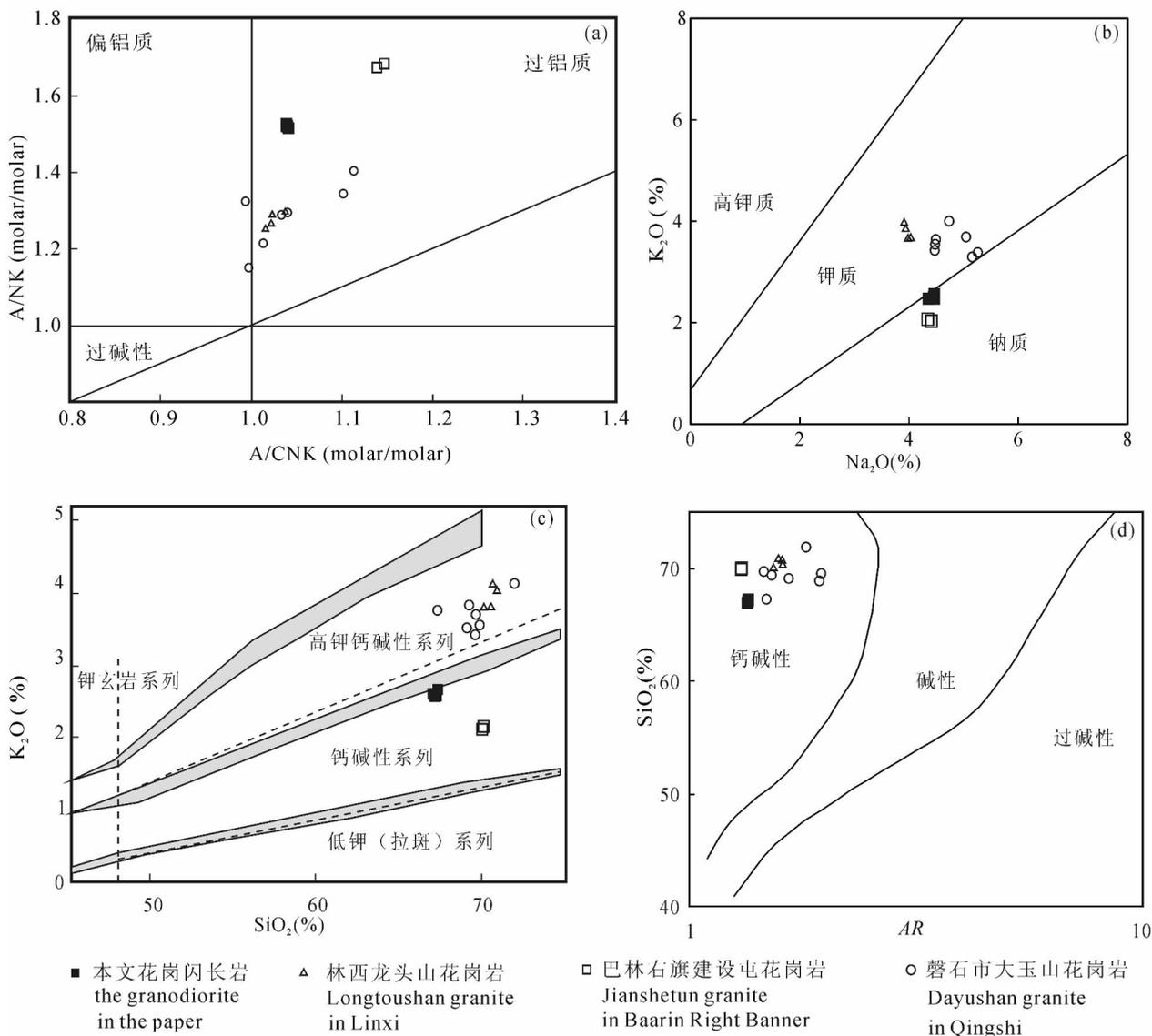


图 3 内蒙古西乌珠穆沁旗巴彦呼舒花岗岩闪长岩 A/NK—A/CNK 图(a)、Na₂O—K₂O 图(b)、K₂O—SiO₂图(c)和 SiO₂—AR 图(d)

Fig. 3 A/NK vs A/CNK (a)、Na₂O vs K₂O (b)、K₂O vs SiO₂ (c) and SiO₂ vs AR (d)

for Bayanhushu granodiorite, West Ujimqin Banner, Inner Mongolia

巴林右旗建设屯花岗岩岩体数据引自刘建峰等(2013); 林西龙头山花岗岩岩体数据引自 Liu et al. (2005);

吉林省磐石市大玉山花岗岩岩体数据引自孙德有等(2004)

The Jianshetun granite in Baarin Right Banner, Inner Mongolia, is from Liu Jianfeng et al. (2013), the Longtoushan granite in Linxi, Inner Mongolia, is from Liu et al. (2005), Dayushan granite, in Qingshi Jilin province, is from Sun Deyou et al. (2004)

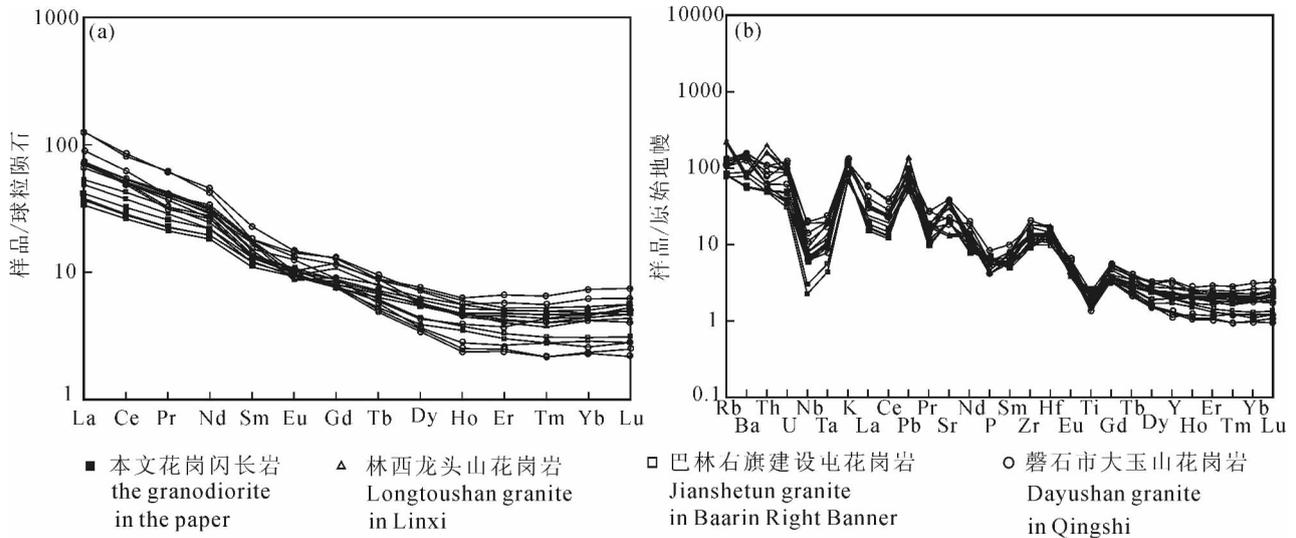


图 4 花岗闪长岩的稀土元素配分曲线 (a) 和微量元素蛛网图 (b)
 Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns of the Granodiorite (b)

有一定的振荡环带。通过对 20 颗锆石进行测试分析,其结果见表 2。锆石 Th 为 $67.5 \times 10^{-6} \sim 258 \times 10^{-6}$, 平均值为 165.33×10^{-6} , U 为 $185 \times 10^{-6} \sim 443 \times 10^{-6}$, 平均值为 343.75×10^{-6} , Th/U 比值 0.40 ~ 0.64, 平均为 0.51, 比值大于 0.1, 应属岩浆锆石。表 2 的分析结果表明, DW11-b6 样品的 20 颗锆石的分析点均位于 U-Pb 谐和线附近, 其加权平均年龄为 $236.1 \pm 3.4\text{Ma}$ ($\text{MSDW} = 0.17, 1\sigma$, 图 6)。

3.4 锆石 Hf 同位素

本文分析的 DW11-b6 样品 20 颗锆石进行原位 Hf 测试 (表 3), $n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$ 和 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 比值范围分别为 0.014590 ~ 0.029037 和 0.000467 ~ 0.000962, $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 比值均小

于 0.002, 表明这些锆石在形成以后, 仅具有较少的放射成因 Hf 的积累, 因而可以用初始 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 比值代表锆石形成时的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 比值 (吴福元等, 2007)。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 13.3 ~ 15.7 之间, 显示具有亏损的幔源组分特性; 单阶段模式年龄 (T_{DM1}) 值介于 249 ~ 356Ma, 平均值为 309Ma, 二阶段年龄 (T_{DM2}) 为 258 ~ 422Ma, 平均值为 353Ma (图 7)。

4 讨论

4.1 岩体年代学

花岗岩闪长岩的锆石阴极发光图像显示, 大多数锆石具有一定的振荡环带, 晶形相对完整; 且测年

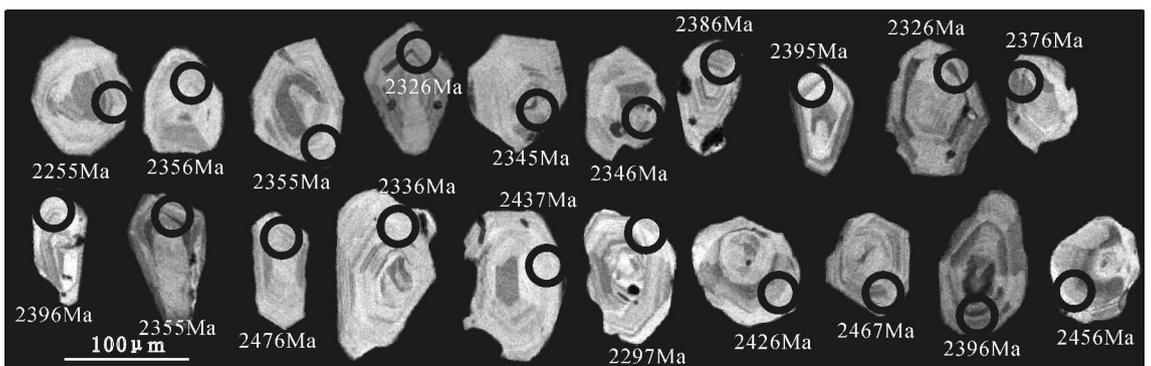


图 5 花岗闪长岩 (DW11-b6) 锆石 CL 图像
 Fig. 5 CL images of zircons for the granodiorite (DW11-b6)

表 2 花岗闪长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotope data porphyry of the Granodiorite

测试点	元素含量				同位素比值						年龄 (Ma)					
	Pb	Th	U	Th/U	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$	
	$\mu\text{g/g}$				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ
DW11-b6-1	41.3	158	327	0.53	0.0813	0.0074	0.3801	0.0278	0.0354	0.0008	1228	181	327	20	225	5
DW11-b6-2	32.8	123	292	0.46	0.0818	0.0068	0.4066	0.0338	0.0367	0.0009	1243	132	346	24	233	6
DW11-b6-3	53.0	194	426	0.5	0.0594	0.0044	0.2906	0.0190	0.0371	0.0008	583	166	259	15	235	5
DW11-b6-4	40.0	156	342	0.49	0.0609	0.0051	0.3052	0.0255	0.0366	0.0010	637	177	270	20	232	6
DW11-b6-5	65	218	420	0.56	0.0664	0.0052	0.3327	0.0240	0.0370	0.0008	817	158	292	18	234	5
DW11-b6-6	38.0	143	328	0.47	0.0706	0.0064	0.3437	0.0296	0.0370	0.0010	946	187	300	22	234	6
DW11-b6-7	50.4	209	396	0.58	0.0625	0.0054	0.2980	0.0221	0.0377	0.0009	700	183	265	17	238	6
DW11-b6-8	53.7	180	403	0.49	0.0561	0.0041	0.2916	0.0219	0.0378	0.0009	457	161	260	17	239	5
DW11-b6-9	31.7	110	259	0.46	0.0922	0.0111	0.4299	0.0418	0.0366	0.0009	1472	229	363	30	232	6
DW11-b6-10	43.8	141	316	0.48	0.0778	0.0078	0.3747	0.0293	0.0375	0.0010	1143	199	323	22	237	6
DW11-b6-11	49.0	169	374	0.5	0.0711	0.0055	0.3560	0.0259	0.0378	0.0010	959	160	309	19	239	6
DW11-b6-12	67	228	422	0.58	0.0715	0.0044	0.3707	0.0235	0.0370	0.0008	972	126	320	17	235	5
DW11-b6-13	39.1	122	315	0.43	0.0738	0.0060	0.3939	0.0313	0.0391	0.0010	1036	167	337	23	247	6
DW11-b6-14	43.5	136	296	0.51	0.0985	0.0079	0.4613	0.0330	0.0367	0.0010	1595	150	385	23	233	6
DW11-b6-15	19.7	67.5	185	0.4	0.1025	0.0110	0.5342	0.0486	0.0384	0.0011	1672	200	435	32	243	7
DW11-b6-16	33.1	125	310	0.44	0.0818	0.0075	0.3993	0.0327	0.0362	0.0011	1243	180	341	24	229	7
DW11-b6-17	68	258	443	0.64	0.0621	0.0045	0.3199	0.0218	0.0382	0.0009	677	152	282	17	242	6
DW11-b6-18	34.3	118	284	0.46	0.0690	0.0080	0.3344	0.0296	0.0389	0.0011	898	239	293	23	246	7
DW11-b6-19	67	241	426	0.61	0.0701	0.0059	0.3488	0.0269	0.0378	0.0009	931	174	304	20	239	6
DW11-b6-20	57.9	210	411	0.56	0.0706	0.0059	0.3706	0.0299	0.0387	0.0010	946	171	320	22	245	6

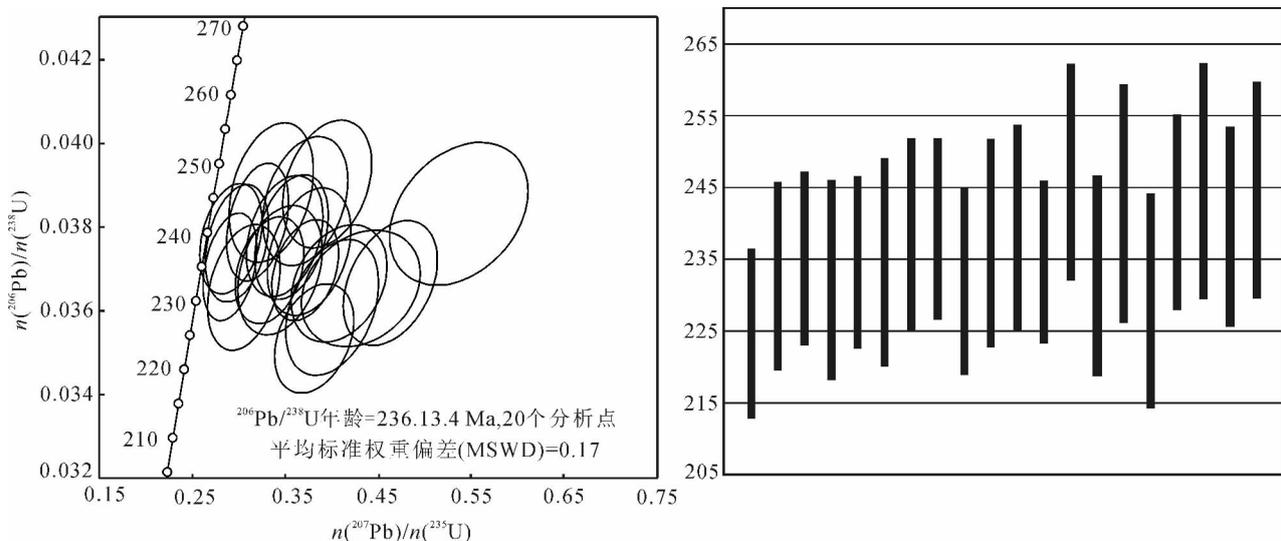


图 6 花岗闪长岩 (DW11-b6) U-Pb 年龄谱和图及权重图

Fig. 6 Concordia and weight diagrams of U-Pb ages of zircons for the Granodiorite (DW11-b6)

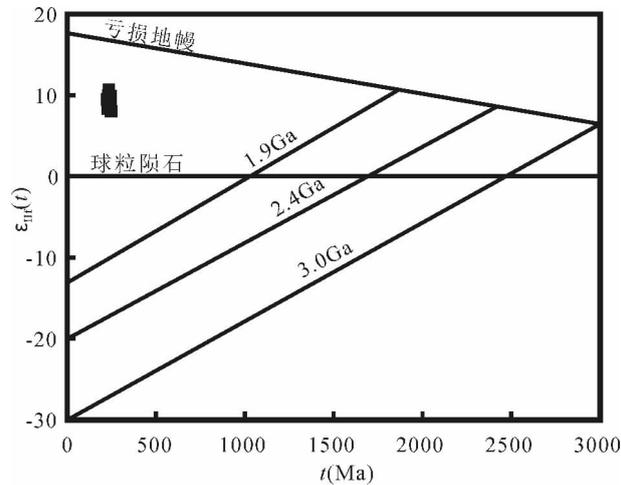
结果表明, Th/U 比值大于 0.1, 据此认为本文报道的花岗闪长岩形成于 225 ~ 247Ma, 为早—中三叠纪的岩浆活动产物, 并非为内蒙古自治区地质局区域地质测量队八分队在 1972 年所认为的海西期活动;

从区域上来看, 早—中三叠纪的岩浆活动广泛分布, 如: 北山—阿拉善地区发育的一套三叠纪的富碱侵入岩带 (许保良等, 2001), 亚干花岗岩 (228 ± 7Ma) (王涛等, 2002)、查干陶勒盖 234 ± 8Ma 的黑云母

表 3 花岗闪长岩锆石 Lu—Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Lu—Hf isotopic compositions of the granodiorite

测试点	t (Ma)	$\frac{n(^{176}\text{Yb})}{n(^{177}\text{Hf})}$	$\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}$	$\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}$		$\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
				测值	$\pm 2\sigma$					
DW11-b6-1	225	0.024079	0.000759	0.283040	0.000018	0.283037	14.3	298	343	-0.98
DW11-b6-2	233	0.014250	0.000483	0.283035	0.000022	0.283033	14.3	303	347	-0.99
DW11-b6-3	235	0.027317	0.000844	0.283038	0.000019	0.283034	14.4	302	343	-0.97
DW11-b6-4	232	0.026387	0.000853	0.283052	0.000025	0.283048	14.9	281	311	-0.97
DW11-b6-5	234	0.028490	0.000880	0.283075	0.000018	0.283071	15.7	249	258	-0.97
DW11-b6-6	234	0.026530	0.000864	0.283043	0.000025	0.283039	14.6	295	331	-0.97
DW11-b6-7	238	0.022249	0.000770	0.283029	0.000028	0.283026	14.2	313	358	-0.98
DW11-b6-8	239	0.024239	0.000774	0.283042	0.000023	0.283039	14.7	295	328	-0.98
DW11-b6-9	232	0.014590	0.000467	0.283055	0.000020	0.283053	15.0	275	302	-0.99
DW11-b6-10	237	0.029037	0.000962	0.283018	0.000020	0.283013	13.7	332	389	-0.97
DW11-b6-11	239	0.021729	0.000741	0.283012	0.000024	0.283009	13.6	337	396	-0.98
DW11-b6-12	235	0.025305	0.000816	0.283011	0.000024	0.283007	13.5	340	404	-0.98
DW11-b6-13	247	0.021385	0.000733	0.282999	0.000025	0.282996	13.3	356	422	-0.98
DW11-b6-14	233	0.018484	0.000638	0.283009	0.000020	0.283007	13.4	340	406	-0.98
DW11-b6-15	243	0.028186	0.000902	0.283052	0.000020	0.283048	15.1	282	306	-0.97
DW11-b6-16	229	0.026149	0.000852	0.283008	0.000021	0.283004	13.3	344	414	-0.97
DW11-b6-17	242	0.020447	0.000688	0.283023	0.000023	0.283020	14.1	321	369	-0.98
DW11-b6-18	246	0.022193	0.000753	0.283022	0.000020	0.283019	14.1	323	370	-0.98
DW11-b6-19	239	0.025213	0.000865	0.283046	0.000021	0.283043	14.8	290	320	-0.97
DW11-b6-20	245	0.027290	0.000912	0.283031	0.000028	0.283027	14.4	312	353	-0.97

图 7 花岗闪长岩 (DW11-b6) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图解Fig. 7 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs t diagrams of the Granodiorite

钾长花岗岩以及形成于 $235 \pm 4\text{Ma}$ 的巴布哈拉钾长花岗岩 (张永清等, 2002)、巴音满都拉花岗岩 (237 ~ 256Ma) 和板申图花岗岩 (210 ~ 216Ma) 等 (陶继雄等, 2003)、以及阿拉善地区三叠纪的富钾花岗岩 (Wang Tao et al., 2004); 而在内蒙古中东部也存在一系列的早中三叠世侵入体, 如 237Ma 左右形成的查干敖包碱性石英闪长岩 (张万益等, 2012)、内蒙

古莫尔道嘎地区发育的 243 ~ 246Ma 的中基性杂岩以及 210 ~ 229Ma 的花岗岩等早中生代侵入岩 (余宏全等, 2011)、哈拉图地区发育的 $228 \pm 21\text{Ma}$ 的花岗岩 (Chen Bin et al., 2000)、包尔汗喇嘛庙花岗岩 (204 ~ 222Ma) (石玉若等, 2004)、苏尼特左旗—锡林浩特地区花岗岩 (216 ~ 231Ma) (童英等, 2010)、贺根山地区的花岗闪长岩 ($244 \pm 4\text{Ma}$) (Miao Laicheng et al., 2008)、达茂旗车根达来花岗闪长岩 ($245 \pm 1\text{Ma}$) (张维等, 2010)、苏尼特左旗花岗岩 ($222 \pm 4\text{Ma}$) (石玉若等, 2007) 以及四子王旗侵位于 $239 \pm 4\text{Ma}$ 的布龙二长花岗岩和 $238 \pm 6\text{Ma}$ 的格尔图白云母正长花岗岩 (柳长峰等, 2010), 等等。上述表明, 在早一中三叠世区域上岩浆活动频繁, 而本文报道的花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 $236.1 \pm 3.4\text{Ma}$ ($\text{MSDW} = 0.17, n = 20$), 与上述侵入岩属于同一期岩浆活动。

4.2 源区性质

本文的花岗闪长岩的岩石稀土元素总量为 $54.41 \times 10^{-6} \sim 65.75 \times 10^{-6}$, 稀土元素分配型曲线右倾型, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 8.11 ~ 8.80, 轻重稀土元素分馏明显, 铕异常为弱的负异常—弱的正异常, 也表明斜长石在源区未残留且在岩浆演化过程中未发生分离结晶。从稀土元素来看, 轻稀土元素 [$(\text{La}/$

$(Yb)_N$ 为 8.11 ~ 8.80] 具有明显的分馏程度,重稀土元素具有一定的分馏程度 [$(Gd/Yb)_N$ 为 1.75 ~ 1.80], 稀土元素分配型曲线右倾型,这可能暗示源岩具有一定的差别,源区残留相中存在石榴石和角闪岩相(图 8)。Rapp et al (1995) 的研究表明,基性的玄武质岩石在 1.0 ~ 1.2 GPa 时斜长石将转变成石榴石,在 1.2 GPa 以上将产生 Adakite 质 [Adakite, 即高锶低钇中酸性岩,有人译为“埃达克岩”,而杨建超等(2007)认为其不符合汉语岩石命名习惯)] 熔体,并且在其残留相中可出现石榴石 + 辉石和/或角闪石。前人研究已经表明巴林右旗建设屯(刘建峰等, 2013)、林西龙头山(Liu Wei et al., 2005)以及吉林大玉山(孙德有等, 2004)具 Adakite 特征,可能其形成深度较深。

在稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图中(图 4b), 本文花岗闪长岩、巴林右旗建设屯、林西龙头山及吉林大玉山花岗岩这四个岩体除了 Th 和 Ba 亏损不一致外, 其它元素具有一致性, 即富集 Rb、U、K 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。Ba 元素的亏损可能与岩体经历了与斜长石和黑云母的分离结晶作用有关, P、Ti 的亏损说明岩浆经历了含 P、Ti 矿物的分离结晶作用, Nb 和 Ta 的亏损表明岩浆为地壳来源或曾受到地壳物质的混染。本文花岗闪长岩获得 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 加权平均值为 14.7, 而巴林右旗建设屯以及林西的龙头山的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 加权平均值分别为 12.29 ± 0.42 和 12.39 ± 2.06 (刘建峰等, 2013), 具有相对亏损的幔源组分特征, 且具有较年轻的二阶段模式。巴林右旗建设屯、林西龙头山以及吉林大玉山的岩体所表现的出来的特征类似于 Adakite 的特征。而 Adakite 的成因主要是由俯冲的年轻大洋板片熔融形成 (Atherton et al., 1993; Muir et al., 1995), 或是由新底侵的玄武质下地壳熔融形成 (Atherton et al., 1993; Muir et al., 1995; 张旗等, 2001)。巴林右旗建设屯(刘建峰等, 2013)、林西龙头山(Liu et al., 2005)以及吉林大玉山(孙德有等, 2004)的岩体源区解释为新底侵的玄武质下地壳熔融形成, 且形成深度较深, 属于加厚地壳的熔融的产物。高 Sr 低 Y 含量以及高 La/Yb 比值、低 Yb 含量是 Adakite 质岩石重要的地球化学特征(王焰等, 2000), 也有学者认为高锶花岗岩较 Adakite, 具更高的 Sr/Y 比值(刘红涛等, 2002)。本文获得的花岗闪长岩微量元素明显的富集 K 和 Sr, Sr 达 $(416.6 \sim 425.7) \times 10^{-6}$, Sr/Y 值为 42 ~ 49, 显示出高 Sr 低 Y 的典型特征,

具有 Adakite 或者高 Sr 花岗岩的特点, 暗示花岗闪长岩的岩体源区较深, 属于加厚地壳的熔融的产物。综上所述, 本文花岗闪长岩岩体与巴林右旗建设屯、林西龙头山以及吉林磐石市大玉山的岩体形成深度较深, 且属于加厚地壳的熔融的产物。

4.3 地质意义

早泥盆世至早石炭世的中华力西期, 华北克拉通北缘自赤峰—开源深断裂至锡林浩特—西乌旗一线, 为一较宽阔的活动大陆边缘。在此期间, 自苏尼特左旗至西乌旗一带发育一套中酸性侵入岩体 (Chen Bin et al., 2000; 陈斌等, 2001; 鲍庆中等, 2007; 刘建峰等, 2009; Chen Bin et al., 2009; 张拴宏等, 2010, 马士委, 2013), 而在华北板块北缘也存在着大量的 300 ~ 330 Ma 之间的中酸性岩体 (张臣等, 2007; 张拴宏等, 2004; Zhang Shuanhong et al., 2007)。Chen Bin 等(2009)获得宝力道辉长闪长岩年龄为 310 ± 5 Ma, 认为该年龄代表着碰撞的开始。而在区域上还大量发育同时期的后碰撞花岗岩(王廷印等, 1998; 朱永峰等, 2004), 结合索伦—贺根山及其东延部分大量 290 ~ 260 Ma 侵位的 A 型花岗岩(洪大卫等, 1994; 孙德有等, 2004; Wu et al., 2002; 施光海等, 2004), 认为碰撞应在 300 Ma 之前, 即晚石炭世就可能开始了对接活动。Miao Laicheng 等(2008)获得侵入贺根山蛇绿岩的花岗闪长岩脉年龄为 244 ± 4 Ma, Chen 等(2009)报道哈拉图花岗岩年龄为 234 ± 7 Ma 以及 Jian Ping 等(2008)亦认为年龄为 224 ± 2 Ma 的粗玄岩的喷发都标志着碰撞的结束。

而本文所研究的花岗闪长岩的侵位年龄为 236.1 ± 3.4 Ma, 结合岩石地球化学特征, 认为其并不是真正意义上的同碰撞花岗岩, 其侵位时代不能代表碰撞的时间。在区域上大量发育 240 ~ 210 Ma 的碱性岩(阎国翰等, 2001; 许保良等, 2001; Wang Tao et al., 2004; 韩宝福等, 2004; 任康绪等, 2005; 葛文春等, 2005; 李锦铁等, 2007)、A 型花岗岩(孙德有等, 2005; 张晓辉等, 2006; 石玉若等, 2007)及超基性岩(田伟等, 2007), 说明该时期发生了一次较大规模区域热事件。花岗闪长岩的锆石 Hf 同位素具有亏损的源区组成和年轻的模式年龄, 与西拉木伦河断裂带以北显生宙以来岩浆岩的同位素组成特征相似, 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, 我们认为本文所研究花岗闪长岩

岩体应是古亚洲洋闭合后,在西伯利亚板块和华北板块碰撞造山作用下加厚的下地壳部分熔融作用的产物。

5 结论

内蒙古巴彦呼舒以东花岗闪长岩岩体的锆石 U-Pb 年龄为 236.1 ± 3.4 Ma, 岩石地球化学数据表明花岗闪长岩属于偏铝质钙碱性岩, 显示出高 Sr 低 Y 的典型特征, 具有 Adakite 或者高 Sr 花岗岩的特点; 其构造环境并不是真正意义上的同碰撞花岗岩; 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; 综合区域上资料, 认为是花岗闪长岩为西伯利亚板块和华北板块闭合后, 加厚的下地壳部分熔融作用的产物。

致谢: 感谢狄永军副教授、周志广副教授在论文完成过程中的指导与帮助, 感谢秦晓峰、龚勇、王振在野外地质调查工作的帮助, 感谢邱骏挺、仝立华、李鹏举、张昊、邱景智、王洁宁在论文过程中的帮助, 感谢项目组成员在野外及室内整理工作给予的帮助, 感谢编辑部专家及审稿专家对本文提出的修改意见。

参 考 文 献 / References

鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 王宏, 李伟, 桑家和, 刘永生. 2007. 内蒙古东南部晚古生代裂谷区花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 中国地质, 34(5): 790 ~ 798.

陈斌, 徐备. 1996. 内蒙古苏尼特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, Simon Wilde. 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.

葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 岩石学报, 21(3): 749 ~ 762.

韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 2004. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义. 岩石学报, 20(6): 1375 ~ 1388.

郝百武. 2012. 内蒙古那仁乌拉埃达克质花岗岩的发现、成因、锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 矿物岩石, 32(1): 28 ~ 39.

洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 徐海明, 勒满元. 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.

李大鹏, 陈岳龙, 王忠, 刘长征. 2010. 内蒙古不同时代花岗岩类 Nd, Pb 同位素特征及其地质意义. 现代地质, 24(5): 821 ~ 855.

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.

黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔. 1998. 中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比如. 大地构造与成矿学, 22(1): 24 ~ 29.

李益龙, 周汉文, 钟增球, 张雄华, 廖群安, 葛梦春. 2009. 华北与

西伯利亚板块的对接过程: 来自西拉木伦缝合带变形花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄证据. 地球科学, 34(6): 931 ~ 938.

柳长峰, 杨帅师, 武将伟, 张华锋. 2010. 内蒙古中部四子王旗地区晚二叠—早三叠世过铝花岗岩定年及成因. 地质学报, 84(7): 1002 ~ 1016.

刘建峰, 迟效国, 赵芝, 胡兆初, 陈军强. 2013. 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. 岩石学报, 29(3): 827 ~ 839.

刘红涛, 孙世华, 刘建明, 翟明国. 2002. 华北克拉通北缘中生代高锶花岗岩类: 地球化学与源区性质. 岩石学报, 18(3): 257 ~ 274.

马士委. 2013. 内蒙古西乌旗石炭纪构造岩浆岩带及其地质意义. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.

秦亚, 梁一鸿, 荆济麟, 张青伟, 刘城先. 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.

任纪舜. 1991. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征. 中国区域地质, 10(4): 289 ~ 293.

任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 童英, 陈廷礼, 蔡剑辉, 张仁祜, 储著银, 裘冀. 2005. 阿拉善断块富碱侵入岩 Rb-Sr 年龄及其地质意义. 北京大学学报(自然科学版), 41(2): 204 ~ 211.

余宏全, 梁玉伟, 李进文, 关继东, 张德全, 杨郟城, 向安平, 金俊, 谭刚, 张斌. 2011. 内蒙古莫尔道嘎地区早中生代岩浆作用及其地球动力学意义. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1831 ~ 1864.

史长义, 鄢明才, 刘崇民, 迟清华, 胡树起, 顾铁新, 卜维, 鄢卫东. 2005. 中国花岗岩类化学元素丰度及特征. 地球化学, 34(5): 470 ~ 482.

施光海, 苗来成, 张福勤, 简平, 范蔚名, 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, 简平, 张旗, 张福勤, 苗来成, 施光海, 张履桥, 陶华. 2005. 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, 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.

孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004. 西拉木伦—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.

孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约. 地学前缘, 12(2): 263 ~ 275.

唐克东, 张允平. 1991. 内蒙古缝合带的构造演化. 北京: 北京科学技术出版社.

陶继雄, 胡凤翔, 陈志勇. 2003. 华北陆块北缘印支期 S 型花岗岩带特征及其构造环境. 岩石矿物学杂志, 22(2): 112 ~ 118.

田伟, 陈斌, 刘超群. 2007. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 岩石学报, 23(3): 583 ~ 590.

童英, 洪大卫, 王涛, 史兴俊, 张建军, 曾涛. 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义. 地球学报, 31(3): 395 ~ 412.

王涛, 郑亚东, 刘树文, 李天斌, 马铭波. 2002. 中蒙边界亚于变质核杂岩糜棱状钾质花岗岩—早中生代收缩与伸展构造体制的转换标志. 岩石学报, 18(2): 177 ~ 186.

- 王廷印, 高军平, 王金荣, 吴家弘. 1998. 内蒙古阿拉善北部地区碰撞期和后造山期岩浆作用. *地质学报*, 72(2): 126 ~ 137.
- 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, 郑永飞, 高山. 2007. Lu - Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185 ~ 220.
- 王焰, 张旗, 钱青. 2000. 埃达克岩的地球化学特征及其构造意义. *地质通报*, 35(2): 251 ~ 256.
- 熊光强, 赵洪涛, 刘敏, 张达, 王浩然, 王忠. 2013. 内蒙古四子王旗黑脑包岩体年代学、地球化学特征及其构造演化. *地质力学学报*, 19(2): 162 ~ 177.
- 熊光强, 刘敏, 赵洪涛, 张达, 秦晓峰, 王忠, 全立华, 胡兆初. 2014. 内蒙古东乌旗沟特岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征及其地质意义. *矿物岩石地球化学通报*, 33(4): 299 ~ 311
- 徐备, 陈斌. 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和演化. *中国科学: D 辑*, 1997, 27(3): 227 ~ 232.
- 许保良, 阎国翰, 路凤香, 邹天仁, 童英, 蔡剑辉, 刘楚雄, 张华峰. 2001. 北山—阿拉善地区二叠—三叠纪富碱侵入岩的岩石学特征. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 263 ~ 272.
- 阎国翰, 谭林坤, 许保良, 牟保磊, 邵宏翔, 陈廷礼, 童英, 任康绪, 杨斌. 2001. 阴山地区印支期碱性侵入岩岩石地球化学特征. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 281 ~ 292.
- 杨建超, 章雨旭, 黄泽光. 2007. 地质学某些术语用词辨析. *中国科学技术语*, (3): 35 ~ 39.
- 张臣, 刘树文, 韩宝福, 何国琦, 黄宝玲. 2007. 内蒙古商都大石沟花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义. *岩石学报*, 23(3): 591 ~ 596.
- 张控宏, 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岩闪长岩——锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义. *岩石学报*, 20(3): 621 ~ 626.
- 张控宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 2010. 华北板块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动其次、特征及构造背景. *岩石矿物地球化学通报*, 29(6): 824 ~ 842.
- 张维, 简平, 刘敦一, 侯可军. 2010. 内蒙古中部达茂旗地区三叠纪花岗岩和钾玄岩的地球化学、年代学和 Hf 同位素特征. *地质通报*, 29(6): 821 ~ 832.
- 张晓辉, 张宏福, 汤艳杰, 刘建民. 2006. 内蒙古中部锡林浩特—西乌旗早三叠世 A 型酸性火山岩的地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 22(3): 2769 ~ 2780.
- 章永梅, 张华锋, 刘文灿, 周志广. 2009. 内蒙古中部四子王旗大庙岩体时代及成因. *岩石学报*, 25(12): 3165 ~ 3181.
- 张万益, 聂凤军, 高延光, 刘妍. 2010. 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*, 2012, 28(2): 525 ~ 534.
- 张永清, 韩建刚, 胡凤翔. 2002. 内蒙古阿拉善盟巴音诺日公地区中三叠世花岗岩特征及构造意义. *内蒙古地质*, (4): 15 ~ 20.
- 朱永峰, 孙世华, 毛骞, 赵光. 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.
- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144 ~ 146.
- Black L P, Kamo S L., Allen C M., Davis D W, Aleinikoff J N, Valley J W, Mundil R, Campbell I H, Korsch R J, Williams I S, Foudoulis C. 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chemical Geology*, 205: 115 ~ 140.
- Blichert-Toft J, Albaredo F. 1997. The Lu—Hf geochemistry of chondrite and the evolution of the mantle—crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1/2): 243 ~ 258.
- Chen Bin, Jahn B M, Wilde S, Xu Bei. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328: 157 ~ 182.
- Chen Bin, Jahn B, Tian Wei. 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.
- Chu Meifei, Chung Sunlin, Song Biao, Liu Dunyi, Suzanne Y. O'Reilly, Norman J. Pearson, Ji Jianqiang, Wen Dajen. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constrains on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of Southern Tibet. *Geology*, 34: 745 ~ 748.
- DeBievre P and Taylor PDP. Table of the Isotopic composition of the elements. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 1993, 123: p149.
- Goolaerts A, Mattielli N, de Jong J, Dominique W, James S S. 2004. Hf and Lu isotopic reference values for the zircon standard 91500 by MC-ICP-MS. *Chem. Geol.*, 206: 1 ~ 9.
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly Suzanne Y, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. 2002. Zircon geochemistry and magma mixing, SE China; In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61: 237 ~ 269.
- Hong Dawei, Zhang Jisheng, Wang Tao, Wang Shiguang, Xie Xilin. 2004. Continental crustal growth and the super continental cycle: evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Asian Earth Sciences*, 23: 799 ~ 813.
- Hu Zhaochu, Gao Shan, Liu Yongsheng, Hu Shenghong, Chen Haihong, Yuan Honglin. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23: 1093 ~ 1101.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Alfred Kr nerr, Windley B F, Shi Yuruo, Zhang Fuqin, Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang wei, Zhang Qi, Zhang Liqao, Ren Jishun. 2008. Time scale of an early to Mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China; Implications for continental growth. *Lithos*, 101: 233 ~ 259.
- Le Maitre R W. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks. *Journal of Petrology*, 17(4): 589 ~ 598.
- Li Jinyi. 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 Sciences*, 26(3 ~ 4): 207 ~ 224.
- Li Qiuli, Chen Fukun, Guo Jinghui, Li Xianghui, Yang Yueheng, Siebel W. 2007. Zircon ages and Nd—Hf isotopic composition of the Zhaertai Group (Inner Mongolia): Evidence for early Proterozoic evolution of the northern North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30: 573 ~ 590.
- Liu Cui, Deng Jinfu, Kong Weiqiong, Xu Liquan, Zhao Guochun, Luo Zhaohua, Li Ning. 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Fine-grained Granite and Molybdenite Re-Os Dating in the Wurunitu Molybdenum Deposit, Inner Mongolia, China. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 1057 ~ 1066.
- Liu Wei, Siebel W, Li Xinjun, Pan Xiaofei. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China; Constraints on

- basaltic underplating. *Chemical Geology*, 219(1~4): 5~35
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, G nther D, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbin. 2010a. 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 of mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1&2): 537~571.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Cchanggui, Gao Shan, Xu Juan, Chen Haihong. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535~1546.
- Miao Laicheng, Fan Weiming, Liu Dunyi, Zhang Fuqin, Jian Ping, Guo Feng. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia—Daxinganling Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32:348~370.
- Muir R J, Weaver S D, Bradshaw J D, Eby G N, Evans J A. 1995. Geochemistry of the Cretaceous Separation Point batholiths, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere. *Journal of the Geological Society*, 152: 689~701.
- Nockolds S R. 2013. Average composition of some igneous rocks. *geological society of america bulletin*, 1954, 65(10):1007~1032
- Qiu Junting, Song Wanjiao, Jiang Chenxin, Wu Han, Dong Raymond M. 2013. CGDK: an extensible CoreDRAW VBA program for geological drafting. *Computers & Geosciences*, 51:34~48
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32Kbar: implications for continental growth and crust—mantle recycling. *J petrology*, 36:891~931
- Tang Kedong. 1990. Tectonic development of the Paleozoic fold belts on the northern margin of the Sino—Korean craton. *Tectonics*, 9:249~260.
- Vinogradov A P. 1962. Average content of chemical elements in the chief types of igneous rocks of the crust of the earth. *Geokhimiya*, (7): 555~571.
- Wang Tao, Zheng Yadong, Li Tianbin, Gao Yongjun. 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolia border in China and its implications for crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 715~729.
- Wu Fuyuan, Jahn B M, Wilde S A. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr—Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1~2): 89~113
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 11: 311~323.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, Zhang Yanbin, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1~30
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, Yang Zhenyu, Hu Jianmin, Wu Hai. 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China Block: implications for a late Paleozoic active continental margin. *Journal of the Geological Society London*, 164(2):451~463.

Zircon U-Pb LA-ICP-MS Dating, Geochemical, Hf Isotopic Characteristics of Bayanhushu Granodiorite in West Ujimqin Banner and Geological Significance

XIONG Guangqiang^{1,2)}, LIU Min¹⁾, ZHAO Hongtao¹⁾, ZHANG Da¹⁾,
WANG Haoran¹⁾, WANG Zhong³⁾, HU Zhaochu⁴⁾

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;

2) Geophysical and Geochemical Exploration Party, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanchang, 330201;

3) Institute of Geological Survey of Inner Mongolia, Hohhot, 010020;

4) State Key Laboratory of Geological Press and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan, 430074

Abstract: The granodiorite of the article reports located in 10km east of Bayanhushu Inner Mongolia. The tectonic position belongs to Late Paleozoic fold belt of Xilinhaote of the middle in central Asian orogenic. The age of this pluton is 236.1±3.4Ma by using LA-ICP-MS U-Pb zircon dating method. In this granodiorite, the content of SiO₂ is 66.93%~67.22%, Al₂O₃ is 15.13%~15.53%, K₂O is 2.47%~2.56%, Na₂O is 4.35%~4.46%, and the A/CNK is 0.94~0.95, this petrochemistry data indicate that the granodiorite belongs to the Partial aluminum and calc—alkaline series, and depleted in high field strength elements, the content of Sr is (416.6~425.7) 10⁻⁶, Sr/Y is 42~49, this geochemical characteristic is the same as high Sr low Y of the adakite or high Sr granite. The εHf(t) values and two staged Hf model age of the granodiorite is 13.3~15.7, 249~356Ma and 258~422Ma. Synthetical analyze shows, The granodiorite is the product of the thickening of partial melting of crust after closed by Siberian plate and North China plate.

Keywords: Bayanhushu; zircon U-Pb dating; Hf isotope; granodiorite; Siberian plate; North China plate