

# 蚌埠隆起区古元古代钾长花岗岩的成因:岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素的制约

杨德彬<sup>1</sup>, 许文良<sup>1\*</sup>, 裴福萍<sup>1</sup>, 王清海<sup>2</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 吉林大学东北亚国际地学研究与教学中心, 吉林长春 130026

**摘要:** 对蚌埠隆起区庄子里和磨盘山钾长花岗岩进行了系统的年代学和地球化学以及锆石 Hf 同位素的研究, 以便对其岩石成因进行约束。研究结果表明, 庄子里和磨盘山钾长花岗岩中锆石发育震荡生长环带, 且具有较高的 Th/U 比值(0.13~1.47), 反映了岩浆成因特征。对庄子里和磨盘山钾长花岗岩中岩浆锆石进行的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果(上交点年龄)分别为  $2104 \pm 20$  Ma 和  $2196 \pm 190$  Ma, 这表明蚌埠隆起区钾长花岗岩的形成时代为古元古代。钾长花岗岩的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量分别介于 69.65%~77.95% 和 4.98%~5.17% 之间; 该类岩石富集轻稀土元素和 Zr、Hf、Rb、Th、U 等元素, 明显亏损 Ba、Sr、Eu、P 和 Ti 等元素; 它们的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化于 -3.4~+3.2 之间, Nd 的模式年龄变化于 2.31~2.79 Ga 之间; 锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和 Hf 同位素两阶段模式年龄分别介于 -5.1~+7.8 和 2.26~2.83 Ga 之间。上述特征表明, 蚌埠隆起区钾长花岗岩的原始岩浆起源于有少量古老地壳物质涉入的新生下地壳的部分熔融。庄子里和磨盘山钾长花岗岩为 A 型花岗岩, 形成于伸展的构造背景。

**关键词:** 古元古代; 钾长花岗岩; 年代学; 地球化学; Hf 同位素; 蚌埠隆起。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2009)01-0148-17

收稿日期: 2008-10-10

## Petrogenesis of the Paleoproterozoic K-Feldspar Granites in Bengbu Uplift: Constraints from Petro-Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope

YANG De-bin<sup>1</sup>, XU Wen-liang<sup>1\*</sup>, PEI Fu-ping<sup>1</sup>, WANG Qing-hai<sup>2</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. International Centre for Geoscience Research and Education in Northeast Asia, Jilin University, Changchun 130026, China

**Abstract:** The study on the chronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Zhuangzili and Mopanshan K-feldspar granites in Bengbu uplift was carried out in order to constrain their petrogenesis. Zircons from the intrusions display oscillatory zoning and high Th/U ratios (0.13~1.47), implying their magmatic origin. Zircon LA-ICP-MS, U-Pb dating results of the Zhuangzili and Mopanshan K-feldspar granites indicate that they formed in Paleoproterozoic with the upper intercept ages of  $2104 \pm 20$  Ma and  $2196 \pm 190$  Ma, respectively. Their  $\text{SiO}_2$  and  $\text{K}_2\text{O}$  contents range from 69.65 to 77.95% and 4.98 to 5.17%, respectively. Moreover, the K-feldspar granites are enriched with light rare earth elements as well as Zr, Hf, Rb, Th, and U, while markedly depleted in Ba, Sr, Eu, P and Ti. Their  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values vary from -3.4 to +3.2 and Nd model ages range from 2.31 to 2.79 Ga. Their initial Hf isotope ratios and Hf two-stage model ages range from -5.1 to +7.8 and 2.26 to 2.83 Ga, respectively. Taken together, it is suggested that the primary magma for the K-feldspar granites could be mainly derived from partial melting of the Paleoproterozoic and Neoarchean juvenile crust and that a small amount of ancient crustal material was involved in their origin. Chemically, these K-feldspar granites are A-type ones, implying that they formed under an extensional tectonic setting.

**Key words:** Paleoproterozoic; K-feldspar granite; geochronology; geochemistry; Hf isotope; Bengbu uplift.

## 0 引言

蚌埠隆起区内花岗质岩石出露广泛,主要由钾长花岗岩、片麻状花岗岩和花岗闪长质—花岗质岩石组成,安徽省地质局1:20万区域地质调查报告(1979)和安徽省区域地质志(1987)基于野外关系的研究,将它们划归为晚太古代,且认为花岗岩为变质成因。而近年来对蚌埠隆起区中部和西部片麻状花岗岩和花岗闪长质—花岗质岩石的岩相学、年代学和地球化学的研究结果表明,它们均形成于中生代,其岩浆活动可以划分为3期:晚侏罗世(160 Ma)—片麻状花岗岩的形成;早白垩世早期(130 Ma)—花岗闪长质—花岗质岩石的形成;早白垩世晚期(110 Ma左右)—花岗质岩石的形成,并且它们均为岩浆结晶的产物(邱瑞龙等,1999;靳克等,2003; Xu et al., 2005; 杨德彬等,2005, 2006, 2007)。那么位于蚌埠隆起区东部边缘、出露于郯庐断裂带内的钾长花岗岩的形成时代如何?是晚太古代还是中生代?它们的岩浆源区和形成的构造背景如何?这些问题因缺少精确的年代学和地球化学研究一直未得到解决。鉴于此,本文报道了庄子里和磨盘山钾长花岗岩中锆石的LA-ICP-MS U-Pb定年结果和岩石地球化学以及锆石的Hf同位素特征,并讨论了岩石成因。

## 1 地质背景与岩体地质

蚌埠隆起位于华北克拉通东南部边缘,东临郯庐断裂带,南为大别造山带,总体呈东西向带状分布。蚌埠隆起主要由古元古代五河杂岩组成(许文良等,2006),包括变质镁铁质岩系、表壳岩系和变质变形花岗质侵入体。隆起区内花岗质岩石主要由钾长花岗岩、片麻状花岗岩和花岗闪长岩以及二长花岗

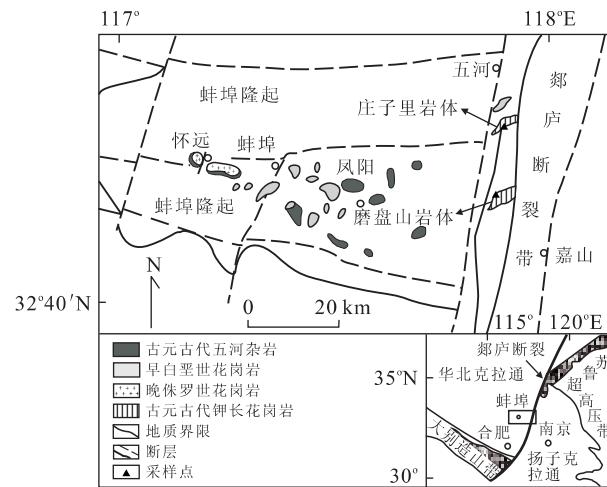


图1 蚌埠隆起区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map showing the Bengbu uplift

岩组成(图1),中生代花岗质岩体侵入的围岩为古元古代五河杂岩,岩体与围岩具有明显的侵入接触关系。本区出露的钾长花岗岩岩体为庄子里岩体和磨盘山岩体。

庄子里岩体(样品号BB8)出露于蚌埠市东约48 km处的庄子里村南部,位于郯庐断裂带内,主要为钾长花岗岩组成。岩石风化面呈灰红色,新鲜面为肉红色,中细粒花岗结构,块状构造(图2a),主要由石英(30%)、碱性长石(50%)、斜长石(15%)组成(图2a),碱性长石以条纹长石为主,次为微斜长石,暗色矿物为少量的黑云母(3%)和普通角闪石(2%),副矿物为榍石、磁铁矿、磷灰石、锆石。岩石中碱性长石具有高岭土化,斜长石发生绢云母化,局部发育碳酸盐化。岩石中含有少量细粒闪长质包体。

磨盘山岩体(样品号BB13)出露于蚌埠市东约52 km处的石门山镇北部,位于郯庐断裂带内,与庄子里岩体具有相类似的岩石组合特点(图2),由钾长花岗岩组成。岩石呈肉红色,中细粒花岗结构,块

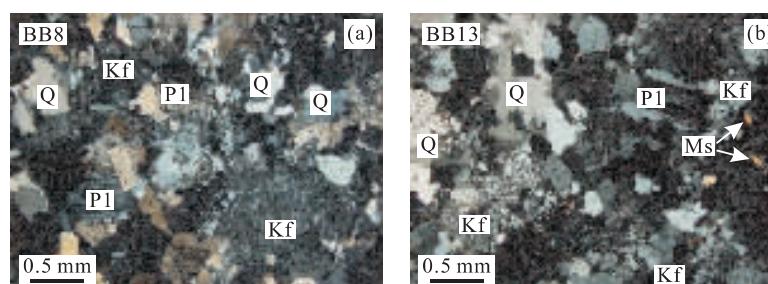


图2 蚌埠隆起区钾长花岗岩的显微照片

Fig. 2 Microphotographs for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift

Kf. 钾长石; Ms. 白云母; Pl. 斜长石; Q. 石英

状构造(图 2b),组成矿物主要为石英(35%)、碱性长石(50%)、斜长石(13%),含有少量的白云母(2%),碱性长石以条纹长石为主,少量的微斜长石,副矿物为磁铁矿、磷灰石和锆石(图 2b).岩石变形较强,石英颗粒具有定向拉长现象.

## 2 分析方法

野外采集测年样品重约 30 kg 锆石,在河北省廊坊市区域地质调查研究所实验室用常规方法将样品粉碎至 80~100 目,并用淘选和电磁选方法进行分离. 在双目镜下挑选出晶形较好,无明显裂痕和包裹体的锆石颗粒,然后将其粘贴在环氧树脂表面,打磨抛光后露出锆石的表面,然后对其进行透射光、反射光和阴极发光(CL)图像的采集. 锆石的制靶和显微图像的采集是在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成. 通过对透射光、反射光和阴极发光图像的分析,选择锆石吸收程度均匀的位置进行定年和 Hf 同位素的分析. 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成. 采用 Agilent 7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda-Physik 公司的 CornPex102 ArF 准分子激光器以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统联机进行. 激光束斑直径为 30  $\mu\text{m}$ ,激光剥蚀样品的深度为 20~40  $\mu\text{m}$ . 实验中采用 He 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. 锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, $^{29}\text{Si}$  作为内标. 测试结果通过 GLITTER 软件计算得出,实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正以扣除普通 Pb 的影响,谐和图的绘制采用 Isoplot 3.0 完成(Ludwig, 2001). 详细的实验分析步骤和数

据处理方法见文献 Yuan *et al.* (2004). 所给定的同位素比值和年龄的误差均在  $1\sigma$  水平.

锆石 Hf 同位素的测试在中国科学院地质与地球物理研究所配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上进行,分析时激光束直径为 63  $\mu\text{m}$ ,激光剥蚀时间为 26 s. 测定时用锆石国际标样 91500 作外标,所用的激光脉冲速率为 6~8 Hz,激光束脉冲能量为 100 mJ. 仪器的运行条件和详细的分析流程见 Xu *et al.* (2004). 分析过程中需要对 $^{176}\text{Yb}$  的干扰进行校正,校正时采用新的 TIMS 测定值 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$ (Chu *et al.*, 2002),而对每个分析点的  $\beta_{\text{Yb}}$  和  $\beta_{\text{Hf}}$  则利用对该分析点实测得出的平均值进行校正.

主量元素、痕量元素和 Nd 同位素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成. 主量元素采用玻璃熔片大型 X 射线荧光光谱法(XRF)分析;痕量元素的分析则采用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析方法;Nd 同位素分析采用 HF+HNO<sub>3</sub> 混合酸溶解,用阳离子交换技术进行分离,分离本底在同位素测量误差范围之内. 同位素比值的测定是在多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)上进行的,分析精度优于 0.002%. 国际标样 La Jolla 和 BCR-2 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  测定平均值分别为 0.511859±6( $2\sigma, n=20$ )和 0.512637±3( $2\sigma, n=20$ ).

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 定年

蚌埠隆起区钾长花岗岩中部分锆石的 CL 图像见图 3. 从图 3a,3b,3c 中可以看出庄子里岩体中锆石晶形完好,内部结构清晰,发育典型的震荡生长环带,结合高的 Th/U 比值(0.14~1.07),反映了岩浆成因锆石的特点(Koschek, 1993). 磨盘山岩体中

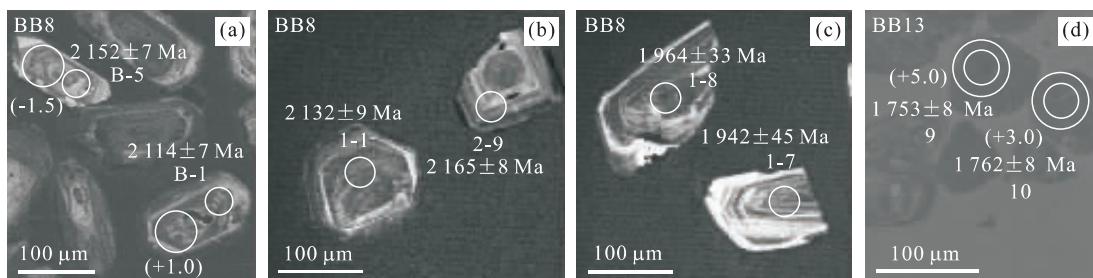


图 3 蚌埠隆起区钾长花岗岩中锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of selected zircons for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift

63  $\mu\text{m}$  圆圈为 Hf 同位素分析点;30  $\mu\text{m}$  圆圈为 U-Pb 年龄分析点;括号内数字为  $\epsilon_{\text{Hf}}(\tau)$  值;其他为 U-Pb 年龄及分析点号

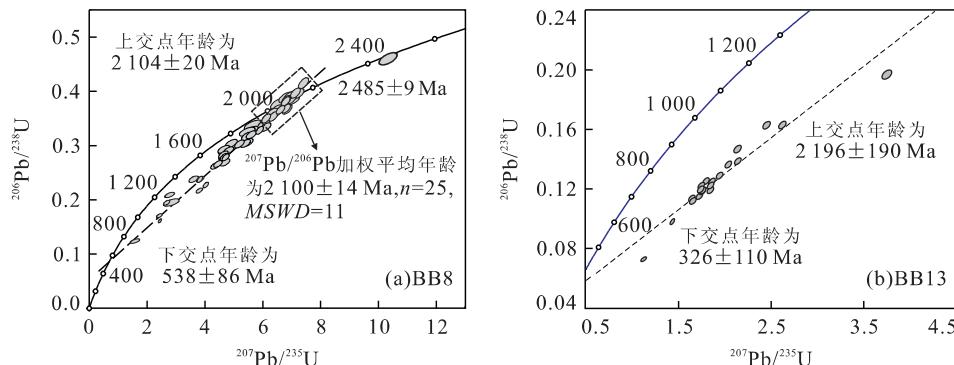


图 4 蚌埠隆起区钾长花岗岩中锆石 LA-ICP-MS 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb Concordia diagrams summarizing the LA-ICP-MS zircon data for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift

锆石的 CL 图像均显示弱发光的特点(图 3d),但锆石微弱的环带结构和高的 Th/U 比值(0.13~1.47, 样品 BB13-16 为 0.09),暗示了它们的岩浆成因特点(Koschek, 1993),而锆石的 CL 图像弱发光的特点应与锆石高的 U 含量有关( $U=(732\sim 3138)\times 10^{-6}$ , 平均为  $1694\times 10^{-6}$ ).

蚌埠隆起区钾长花岗岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果列于图 4 和表 1 中,部分结果标定在图 3 中。从表 1 和图 4 中可以看出,庄子里钾长花岗岩中岩浆锆石的分析结果大部分位于谐和线及其附近区域,少数分析点偏离谐和线,但它们之间(除样号为 BB8-1-18 点)可以构成一条不一致曲线,其上交点年龄为  $2104\pm 20$  Ma,下交点年龄为  $538\pm 86$  Ma,其中相对谐和的 25 个数据点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $2100\pm 14$  Ma(图 4a)。另外一颗捕获锆石(样号为 BB8-1-18, Th/U=0.45)的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  谐和年龄为  $2485\pm 9$  Ma。磨盘山钾长花岗岩中锆石的分析点都偏离谐和线,但它们多沿着不一致线分布,其上交点年龄为  $2196\pm 190$  Ma,下交点年龄为  $326\pm 110$  Ma,由于数据点较少,误差偏大(图 4b)。

### 3.2 主量元素

蚌埠隆起区钾长花岗岩的主量元素和痕量元素分析结果见表 2。从表 2 中可以看出,庄子里钾长花岗岩的  $\text{SiO}_2=69.65\%\sim 70.55\%$ ,  $\text{TiO}_2=0.62\%\sim 0.67\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3=12.24\%\sim 12.61\%$ ,  $\text{MgO}=0.42\%\sim 0.71\%$ ,  $\text{CaO}=1.49\%\sim 1.51\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}=4.98\%\sim 5.10\%$ ,全碱( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )= $8.67\%\sim 9.09\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.24\sim 1.41$ 。磨盘山钾长花岗岩总体上与庄子里钾长花岗岩相类似,具有相对富 Si 贫 Ti、Mg、Ca 的特点,其中  $\text{SiO}_2=77.85\%\sim 77.95\%$ ,  $\text{TiO}_2=0.09\%\sim 0.10\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3=11.92\%\sim 12.10\%$ ,  $\text{MgO}=0.09\%\sim 0.15\%$ ,  $\text{CaO}=0.08\%\sim 0.28\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}=4.98\%\sim 5.10\%$ ,全碱( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )= $8.67\%\sim 9.09\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.24\sim 1.41$ 。磨盘山钾长花岗岩的 REE 丰度相对偏高( $\Sigma \text{REE}=(303\sim 390)\times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE}=4.60\sim 6.38$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N=4.40\sim 8.57$ ),Eu 的负异常更大( $\delta \text{Eu}=0.06\sim 0.09$ )(图 6a)。它们的 REE 丰度与同时代辽吉花岗岩的 REE 丰度相当,均具有明显的 Eu 负异常(图 6a)。

4.98%~5.17%, 全碱( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )= $8.43\%\sim 8.59\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.38\sim 1.56$ 。

所有样品在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图解上均落在高钾钙碱性系列范围内(图 5a),与同时代的辽吉花岗岩中大部分样品所具有的高钾钙碱性系列岩石特点相类似(孙敏等,1996; 郝德峰等,2004; 路孝平等,2004a)。庄子里钾长花岗岩的  $A/\text{CNK}[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  的摩尔比介于  $0.85\sim 0.89$  之间,属准铝质岩石(图 5b);而磨盘山钾长花岗岩的  $A/\text{CNK}$  变化于  $1.02\sim 1.08$  之间,属弱过铝质岩石(图 5b),它们均小于 1.1。与同时代的辽吉花岗岩中大部分样品的  $A/\text{CNK}$  值小于 1.1,具有准铝质—弱过铝质岩石的特点相类似(孙敏等,1996; 郝德峰等,2004; 路孝平等,2004a)。

### 3.3 痕量元素

从表 2 和图 6a 中可以看出,庄子里和磨盘山钾长花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化曲线具有相类似的特点,以相对富集轻稀土元素(LREEs)、贫重稀土元素(HREEs),具有明显 Eu 负异常的右斜“V”字型为特征(图 6a),与典型“A”型花岗岩的稀土元素配分型式相类似。其中庄子里钾长花岗岩的稀土元素总量( $\Sigma \text{REE}$ )为  $283\sim 314\times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE}$  为  $7.31\sim 7.66$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  变化于  $7.34\sim 7.66$  之间,  $\delta \text{Eu}$  值介于  $0.54\sim 0.57$  之间。与庄子里钾长花岗岩相比,磨盘山钾长花岗岩的 REE 丰度相对偏高( $\Sigma \text{REE}=(303\sim 390)\times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE}=4.60\sim 6.38$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N=4.40\sim 8.57$ ),Eu 的负异常更大( $\delta \text{Eu}=0.06\sim 0.09$ )(图 6a)。它们的 REE 丰度与同时代辽吉花岗岩的 REE 丰度相当,均具有明显的 Eu 负异常(图 6a)。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b),庄子里和磨盘山钾长花岗岩同样具有相类似的特





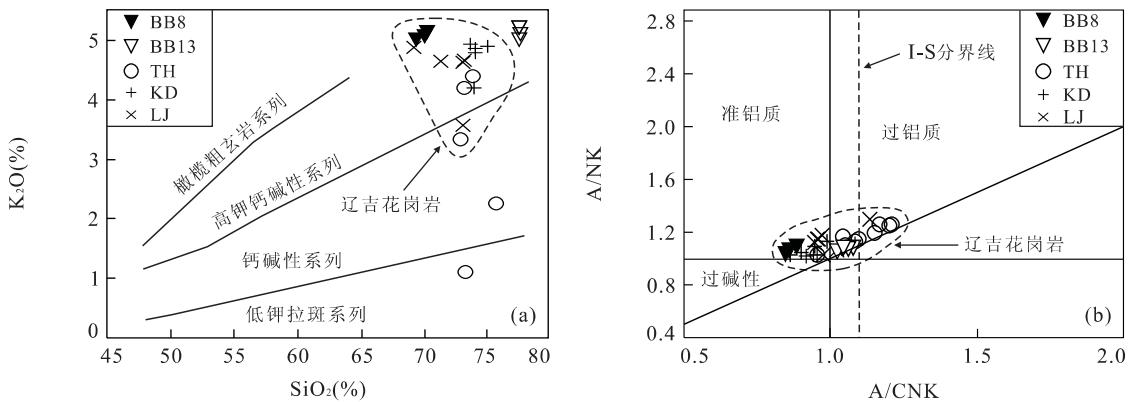


图 5 蚌埠隆起区钾长花岗岩的  $SiO_2-K_2O$  图(a)和含铝指数图(b)

Fig. 5  $SiO_2$  vs.  $K_2O$  and aluminous index diagrams for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift  
TH、KD、LJ. 为辽吉花岗岩; TH. 据路孝平等, 2004a; KD. 据孙敏等, 1996; LJ. 据郝德峰等, 2004

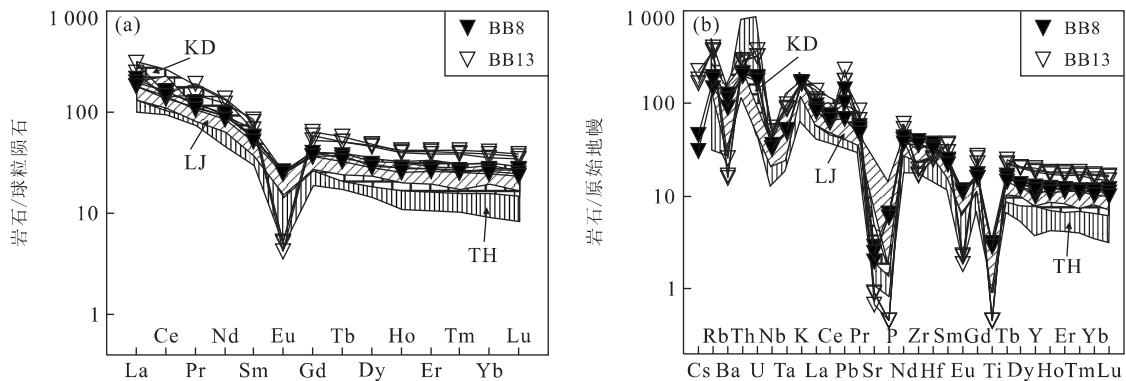


图 6 蚌埠隆起区钾长花岗岩的球粒陨石标准化稀土元素(a)和原始地幔标准化微量元素(b)变异图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift  
球粒陨石标准化值据 Boynton(1984); 原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989); TH、KD、LJ 数据来源见图 5

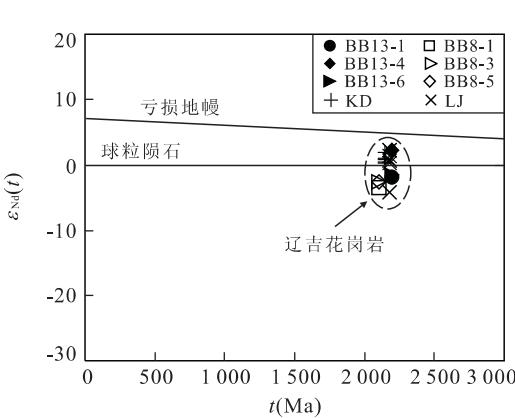


图 7 蚌埠隆起区钾长花岗岩的  $t-\epsilon_{Nd}(t)$  变异图

Fig. 7  $t$  vs.  $\epsilon_{Nd}(t)$  diagram for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift  
亏损地幔演化线据 Goldstein *et al.* (1984); KD 和 LJ 数据来源见图 5

点, 它们具有相对一致的配分型式, 以富集高场强元素(如  $Zr$ 、 $Hf$ )和大离子亲石元素(如  $Rb$ 、 $U$ 、 $Th$ ), 明

显亏损  $Ba$ 、 $Sr$  和  $P$ 、 $Eu$ 、 $Ti$  等元素为特征, 这与典型“A”型花岗岩所具有的痕量元素特点相类似。庄子里钾长花岗岩中  $Zr=397\times 10^{-6}\sim 440\times 10^{-6}$ 、 $Hf=9.94\times 10^{-6}\sim 11.28\times 10^{-6}$ ; 而  $Rb$  介于  $92\times 10^{-6}\sim 121\times 10^{-6}$  之间、 $U$  介于  $3.72\times 10^{-6}\sim 4.03\times 10^{-6}$  之间、 $Th$  介于  $17.02\times 10^{-6}\sim 18.09\times 10^{-6}$  之间。其中  $Ba$ 、 $Sr$  含量较低 ( $Ba=634\times 10^{-6}\sim 864\times 10^{-6}$ 、 $Sr=41.6\times 10^{-6}\sim 59.6\times 10^{-6}$ )。与庄子里钾长花岗岩相比, 磨盘山钾长花岗岩的  $Ba$ 、 $Sr$ 、 $P$ 、 $Eu$  和  $Ti$  亏损程度更大(图 6b), 其中  $Zr=186\times 10^{-6}\sim 219\times 10^{-6}$ 、 $Hf=7.80\times 10^{-6}\sim 8.57\times 10^{-6}$ ; 而  $Rb$  介于  $235\times 10^{-6}\sim 251\times 10^{-6}$  之间、 $U$  介于  $6.72\times 10^{-6}\sim 7.80\times 10^{-6}$  之间、 $Th$  介于  $23.77\times 10^{-6}\sim 24.70\times 10^{-6}$  之间;  $Ba=109\times 10^{-6}\sim 181\times 10^{-6}$ 、 $Sr=14.2\times 10^{-6}\sim 19.4\times 10^{-6}$ 。它们的痕量元素特点与同时代的辽吉花岗岩的痕量元素特点相类似(图 6b)(孙敏

表2 蚌埠隆起区钾长花岗岩的主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )及Nd同位素组成Table 2 Major (%), trace elements ( $10^{-6}$ ) and Nd isotopic compositions for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift

样号	BB8-1	BB8-3	BB8-5	BB13-1	BB13-2	BB13-4	BB13-6
岩体	庄子里岩体				磨盘山岩体		
SiO <sub>2</sub>	69.65	70.31	70.55	77.89	77.95	77.85	77.88
TiO <sub>2</sub>	0.66	0.67	0.62	0.10	0.09	0.10	0.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.56	12.61	12.24	12.00	12.06	11.92	12.10
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.53	4.22	3.86	0.76	0.73	0.72	0.80
MnO	0.03	0.02	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
MgO	0.42	0.71	0.56	0.09	0.13	0.11	0.15
CaO	1.49	1.51	1.51	0.21	0.08	0.11	0.28
Na <sub>2</sub> O	3.69	4.06	3.61	3.61	3.37	3.31	3.34
K <sub>2</sub> O	4.98	5.03	5.10	4.98	5.06	5.17	5.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.14	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	1.82	0.89	1.90	0.49	0.64	0.49	0.52
Total	99.80	100.17	100.10	100.14	100.12	99.79	100.35
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.35	1.24	1.41	1.38	1.50	1.56	1.55
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	8.67	9.09	8.71	8.59	8.43	8.48	8.51
A/CNK	0.89	0.85	0.86	1.02	1.08	1.06	1.04
Be		2.57	1.26	2.36		1.75	2.96
Sc	8.62	9.51	8.75	3.39		2.41	3.94
V	33.30	35.50	32.70	3.81		2.96	3.19
Cr	10.00	9.38	9.98	2.90		0.01	2.94
Co		3.51	2.88	0.05		0.40	0.03
Ni	9.81	4.98	21.30	0.83		1.42	1.46
Cu		4.92	6.91	3.76		2.57	3.27
Zn		10.10	13.40	11.50		9.00	20.30
Ga		19.00	17.70	21.10		17.90	19.60
Rb	121.00	91.80	115.00	236.00		251.00	235.00
Sr	59.60	41.60	51.50	19.40		14.20	19.10
Y	46.10	57.40	53.20	92.60		83.70	86.90
Zr	440.00	404.00	397.00	219.00		186.00	191.00
Nb	23.20	25.40	23.70	38.90		35.50	35.90
Cs		0.25	0.36	1.43		1.32	1.74
Ba	864.00	634.00	786.00	181.00		109.00	117.00
La	65.90	60.20	56.50	76.20		94.90	55.40
Ce	126.00	131.00	117.00	113.00		122.00	112.00
Pr	15.40	14.60	12.90	18.20		23.10	13.70
Nd	55.30	57.90	50.70	73.20		81.10	54.70
Sm	10.90	11.20	9.90	16.50		15.80	13.20
Eu	1.89	1.92	1.82	0.38		0.31	0.39
Gd	9.39	10.40	9.45	16.50		15.10	13.50
Tb	1.79	1.69	1.55	2.69		2.41	2.44
Dy	9.42	10.10	9.12	15.50		14.60	15.20
Ho	2.06	1.96	1.81	2.95		2.83	3.00
Er	5.78	5.82	5.43	8.54		8.05	8.86
Tm	0.82	0.87	0.83	1.28		1.24	1.37
Yb	5.80	5.52	5.09	8.14		7.46	8.50
Lu	0.88	0.80	0.74	1.19		1.10	1.23
Hf	11.30	10.30	9.94	8.57		7.85	7.80
Ta	2.03	2.09	2.11	3.67		4.06	3.61
Pb	10.20	7.11	4.88	12.50		12.40	16.40
Th	17.70	18.10	17.00	24.70		23.80	24.20
U	3.96	4.03	3.72	6.72		7.80	6.83
$\Sigma$ REE	311.00	314.00	283.00	354.00		390.00	303.00
$\Sigma$ LREE	275.00	277.00	249.00	298.00		337.00	249.00
$\Sigma$ HREE	35.90	37.10	34.00	56.70		52.80	54.10
LREE/HREE	7.66	7.46	7.31	5.25		6.38	4.60
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.66	7.34	7.47	6.31		8.57	4.40
$\delta$ Eu	0.56	0.54	0.57	0.07		0.06	0.09
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.118 90	0.116 93	0.118 31	0.136 03		0.117 52	0.146 39
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.511 39	0.511 40	0.511 42	0.511 71		0.511 66	0.511 86
$\pm 2\sigma$	0.000 01	0.000 01	0.000 01	0.000 01		0.000 00	0.000 01
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	-24.30	-24.10	-23.80	-18.20		-19.10	-15.10
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-3.40	-2.60	-2.60	-1.10		3.20	-0.90
$f_{\text{Sm/Nd}}$	-0.40	-0.41	-0.40	-0.31		-0.40	-0.26
$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	2 812	2 735	2 747	2 818		2 354	2 897
$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	2 787	2 765	2 739	2 306		2 366	2 066

注:A/CNK=[摩尔比  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ ]; $\delta$ Eu=( $(\text{Eu}/0.0735)/[(\text{Sm}/0.195) + (\text{Gd}/0.259)]/2$ ).

表 3 蚌埠隆起区钾长花岗岩中锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic data for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift

样号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}$	$t_{\text{DM2}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
<b>庄子里岩体</b>										
BB8-01	0.038 117	0.001 385	0.281 518	0.000 018	-44.4	0.6	0.6	2 450	2 544	-0.96
BB8-02	0.053 728	0.001 889	0.281 508	0.000 021	-44.7	-0.5	0.7	2 497	2 598	-0.94
BB8-03	0.029 959	0.001 119	0.281 518	0.000 023	-44.4	1.0	0.8	2 432	2 526	-0.97
BB8-04	0.078 832	0.002 743	0.281 569	0.000 021	-42.5	0.5	0.8	2 468	2 550	-0.92
BB8-05	0.028 776	0.001 099	0.281 474	0.000 022	-45.9	-0.6	0.8	2 492	2 602	-0.97
BB8-06	0.049 417	0.001 609	0.281 465	0.000 024	-46.2	-1.6	0.8	2 537	2 652	-0.95
BB8-07	0.033 350	0.001 231	0.281 507	0.000 020	-44.7	0.4	0.7	2 455	2 553	-0.96
BB8-08	0.038 195	0.001 489	0.281 512	0.000 018	-44.5	0.2	0.6	2 464	2 561	-0.96
BB8-09	0.097 248	0.003 291	0.281 475	0.000 023	-45.9	-3.6	0.8	2 642	2 753	-0.90
BB8-10	0.054 165	0.001 741	0.281 407	0.000 022	-48.3	-3.9	0.8	2 628	2 764	-0.95
BB8-11	0.019 648	0.000 766	0.281 488	0.000 023	-45.4	0.4	0.8	2 451	2 553	-0.98
BB8-12	0.079 063	0.002 724	0.281 554	0.000 027	-43.1	0.0	1.0	2 488	2 575	-0.92
BB8-13	0.025 574	0.000 996	0.281 478	0.000 022	-45.8	-0.3	0.8	2 480	2 587	-0.97
BB8-14	0.038 655	0.001 400	0.281 460	0.000 020	-46.4	-1.5	0.7	2 530	2 646	-0.96
BB8-15	0.016 898	0.000 679	0.281 485	0.000 018	-45.5	0.4	0.6	2 449	2 553	-0.98
BB8-16	0.026 963	0.001 040	0.281 484	0.000 022	-45.6	-0.1	0.8	2 474	2 580	-0.97
BB8-17	0.033 705	0.001 282	0.281 526	0.000 044	-44.1	1.0	1.6	2 432	2 523	-0.96
BB8-18	0.009 859	0.000 418	0.281 318	0.000 018	-51.4	-5.1	0.6	2 657	2 827	-0.99
BB8-19	0.048 201	0.001 532	0.281 487	0.000 028	-45.4	-0.7	1.0	2 502	2 609	-0.95
BB8-20	0.059 130	0.002 175	0.281 523	0.000 027	-44.2	-0.4	1.0	2 494	2 591	-0.93
<b>磨盘山岩体</b>										
BB13-01	0.076 196	0.003 005	0.281 591	0.000 020	-41.8	2.9	0.7	2 453	2 509	-0.91
BB13-02	0.107 766	0.004 065	0.281 731	0.000 029	-36.8	6.3	1.0	2 319	2 341	-0.88
BB13-03	0.126 730	0.004 865	0.281 753	0.000 017	-36.0	5.9	0.6	2 339	2 361	-0.85
BB13-04	0.109 530	0.004 014	0.281 653	0.000 017	-39.6	3.6	0.6	2 432	2 475	-0.88
BB13-05	0.106 514	0.004 353	0.281 708	0.000 035	-37.6	5.0	1.2	2 373	2 403	-0.87
BB13-06	0.156 125	0.005 620	0.281 690	0.000 026	-38.3	2.5	0.9	2 490	2 527	-0.83
BB13-07	0.096 053	0.003 754	0.281 762	0.000 020	-35.7	7.8	0.7	2 252	2 263	-0.89
BB13-08	0.089 406	0.003 309	0.281 608	0.000 025	-41.2	3.0	0.9	2 450	2 502	-0.90
BB13-09	0.084 019	0.003 184	0.281 574	0.000 019	-42.4	2.0	0.7	2 491	2 552	-0.90
BB13-10	0.107 561	0.004 187	0.281 712	0.000 032	-37.5	5.4	1.1	2 355	2 383	-0.87
BB13-11	0.157 832	0.005 597	0.281 712	0.000 025	-37.5	3.3	0.9	2 455	2 487	-0.83
BB13-12	0.082 811	0.002 898	0.281 598	0.000 020	-41.5	3.3	0.7	2 436	2 489	-0.91
BB13-13	0.084 538	0.003 173	0.281 617	0.000 021	-40.9	3.5	0.7	2 428	2 476	-0.90
BB13-14	0.095 923	0.003 660	0.281 631	0.000 018	-40.3	3.4	0.6	2 439	2 486	-0.89
BB13-15	0.158 023	0.005 848	0.281 720	0.000 031	-37.2	3.3	1.1	2 459	2 491	-0.82
BB13-16	0.214 446	0.007 638	0.281 802	0.000 031	-34.3	3.5	1.1	2 463	2 479	-0.77
BB13-17	0.089 034	0.003 560	0.281 695	0.000 030	-38.1	5.8	1.1	2 338	2 366	-0.89

注: 锆石 Hf 同位素组成的计算参数为: $^{176}\text{Lu}$  衰变常数  $\lambda = 1.865 \times 10^{-11}$  (Soderlund et al., 2004); 球粒陨石和亏损地幔的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  分别为 0.033 21、0.282 772, 0.038 42、0.283 25 (Bizzarro et al., 2002; Griffin et al., 2003); 硅铝质地壳的  $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$  (Vervoort et al., 1996);  $t_{\text{DM}}$  单位为 Ma;  $t$  为岩体的形成时代。

等, 1996; 郝德峰等, 2004; 路孝平等, 2004a)。

### 3.4 Nd 同位素

蚌埠隆起区钾长花岗岩全岩的 Nd 同位素分析结果见表 2。从表 2 中可以看出, 庄子里钾长花岗岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 2 100$  Ma 值变化于  $-2.6 \sim -3.4$  之间 (图 7), 它们的两阶段 Nd 模式年龄 ( $t_{\text{DM2}}$ ) 为  $2.74 \sim 2.79$  Ga。与庄子里钾长花岗岩相比, 磨盘山钾长花岗岩具有相对高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (若以  $t = 2 196$  Ma 计

算, 介于  $-0.9 \sim +3.2$  之间) (图 7), 磨盘山钾长花岗岩的  $t_{\text{DM2}} = 2.31 \sim 2.37$  Ga, 其中样品 BB13-6 具有小于样品的形成时代的  $t_{\text{DM2}}$  值 (2.07 Ga) 而没有地质意义, 这与样品低的  $f_{\text{Sm/Nd}}$  值 (-0.26) 有关 (吴福元等, 1997)。在  $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变异图解上 (图 7), 它们均位于亏损地幔演化线下方的球粒陨石演化线附近的区域, 与辽吉花岗岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值分布范围相类似 (孙敏等, 1996; 郝德峰等, 2004)。

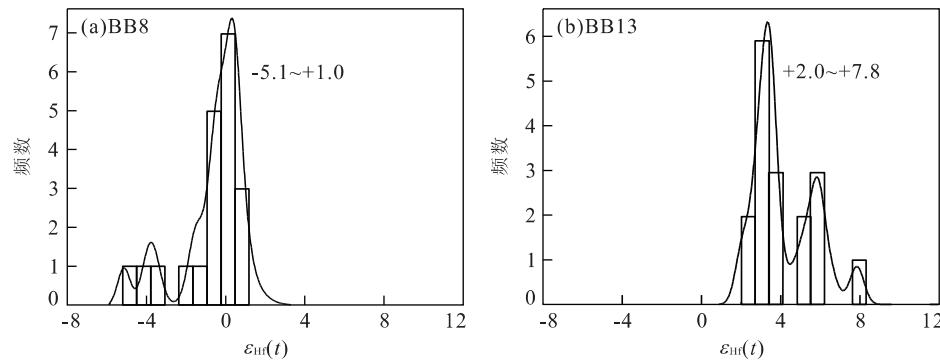


图 8 蚌埠隆起区钾长花岗岩的 Hf 同位素组成

Fig. 8 Zircon Hf isotopic compositions for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift

### 3.5 锆石 Hf 同位素

在锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年研究的基础上,同时对锆石进行了微区原位 Hf 同位素分析,分析结果列于表 3,部分结果标定在图 3a、3d 中。

庄子里钾长花岗岩中 20 个岩浆锆石微区原位 Hf 同位素的分析结果表明,它们具有相对均一的 Hf 同位素组成(图 3a 和表 3), $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值介于 0.281 318~0.281 569 之间,若以 2 100 Ma 计算,锆石初始 Hf 同位素成分  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于 -5.1~+1.0 之间(图 8a)。在表 3 中同时给出了 Hf 同位素单阶段模式年龄( $t_{\text{DM1}}$ )和两阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ ),对于后者,由于样品均为花岗质岩石,主要来源于地壳岩石的部分熔融,所以在计算两阶段模式年龄时,采用硅铝质大陆地壳的 Lu/Hf 比( $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$ )进行计算。从表 3 中可以看出,它们的  $t_{\text{DM1}}$  变化于 2.43~2.66 Ga,  $t_{\text{DM2}}$  变化于 2.52~2.83 Ga。磨盘山钾长花岗岩中 17 颗岩浆锆石 17 个点的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值介于 0.281 574~0.281 802 之间,若以磨盘山钾长花岗岩的上交点年龄 2 196 Ma 进行计算,其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于 +2.0~+7.8 之间(图 3d, 图 8b),它们的  $t_{\text{DM1}} = 2.25 \sim 2.49 \text{ Ga}$ ,  $t_{\text{DM2}} = 2.26 \sim 2.55 \text{ Ga}$ 。

## 4 讨论

### 4.1 钾长花岗岩的形成时代

蚌埠隆起区钾长花岗岩形成时代与成因的确定一直是该区地质研究中人们争论的问题之一。安徽省地质局 1:20 万区域地质调查报告(1979)和安徽省区域地质志(1987)基于钾长花岗岩体被凤阳群白石山组沉积覆盖,认为它们形成于晚太古代,且为变质成因。但详细的野外地质调查发现,岩体与凤阳群白石山组之间多呈断层接触。徐祥等(2005)对磨盘

山钾长花岗岩中白云母进行了 Ar-Ar 年龄测定,认为其韧性变形时代为 1 740 Ma。

从庄子里和磨盘山钾长花岗岩中锆石发育震荡生长环带,结合高的 Th/U 比值(0.13~1.47),暗示了它们的岩浆结晶成因。对庄子里钾长花岗岩中岩浆锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示,其上交点年龄为  $2\ 104 \pm 20 \text{ Ma}$ ,与谐和线上 25 个点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄  $2\ 100 \pm 14 \text{ Ma}$  在误差范围内完全一致,可以认为 2 100 Ma 代表了庄子里岩体的岩浆侵位结晶的年龄。而磨盘山钾长花岗岩中岩浆锆石的 U-Pb 定年结果都偏离谐和线,这是由于锆石具有高的 Th、U 含量( $\text{Th}+\text{U}=985 \times 10^{-6} \sim 5\ 019 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $2\ 211 \times 10^{-6}$ ),使其发生严重的 Pb 丢失所致。试验和实际地质情况表明,锆石的 Th、U 含量愈高,衰变能量愈强,对锆石晶格的损伤造成 Pb 丢失愈明显,从而导致锆石中放射性成因 Pb 发生不同程度的丢失,造成年龄的谐和性差(Cherniak and Watson, 2000; Chen *et al.*, 2002; 耿元生等, 2006)。磨盘山钾长花岗岩所有不谐和数据点构成一条不一致曲线,其上交点年龄为  $2\ 196 \pm 190 \text{ Ma}$ ,由于上交点附近缺乏年龄点,故造成其年龄值具有较大误差。但结合磨盘山岩体与庄子里岩体具有相类似的岩石组合特点(与蚌埠隆起区内中生代其他花岗质岩石相比,它们具有相对高的碱性长石含量和相对低的斜长石含量)和地球化学属性(稀土元素和微量元素具有一致的配分型式),因此,笔者认为磨盘山岩体应与庄子里岩体具有相类似的结晶时代,即它们形成于古元古代的 2 100~2 200 Ma 左右。综上所述,蚌埠隆起区钾长花岗岩的形成时代应为古元古代,而非前人确定的晚太古代,同时锆石的岩浆成因特征暗示钾长花岗岩的岩浆成因,而非变质成因。

华北克拉通基底岩石的高精度定年结果显示,其主要经历了 2 500 Ma 和 1 800 Ma 左右两次重大的地质事件(Zhao *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006)。近年来的研究显示,2 100~2 200 Ma 的岩浆事件在华北克拉通东部也是比较发育的。在辽宁宽甸地区(Sun *et al.*, 1993; Li and Zhao, 2007)、吉林通化地区(路孝平等,2004a)和辽南营口地区(路孝平等,2004b; Li and Zhao, 2007)分布的辽吉花岗岩中锆石 LA-ICP-MS 和 SHRIMP U-Pb 定年结果介于 2 142~2 176 Ma。在吉林通化地区集安变质杂岩中所得到的火山岩锆石 U-Pb 年龄为 1 980 Ma 和 2 110 Ma(Lu *et al.*, 2006);和辽南海城斜长角闪岩中岩浆锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 2 060 Ma(于介江等,2007);以及辽南和胶北中生代花岗岩中 2 100~2 170 Ma 大量继承锆石的存在(李三忠等,2003),均表明在吉南—辽南和胶北地区存在一期 2 100~2 200 Ma 左右的岩浆事件。这与沈其韩等(2005)根据华北克拉通早前寒武纪 600 个锆石同位素年龄样品统计的直方图所显示的,除 2 450~2 600 Ma 和 1 800~1 900 Ma 两个峰值外,还明显存在一个 2 150~2 200 Ma 的高峰相一致,暗示 2 100~2 200 Ma 古元古代岩浆事件在华北克拉通东部的广泛存在,但与 2 500 Ma 和 1 800 Ma 两次重大地质事件相比,它们的岩浆活动相对偏少。

蚌埠隆起区庄子里和磨盘山钾长花岗岩(2 100~2 200 Ma)的形成,暗示了这期岩浆事件在蚌埠隆起区的响应。蚌埠隆起区内形成于早白垩世的淮光花岗闪长岩的两阶段 Nd 模式年龄(1.93~2.03 Ga)和女山花岗岩的两阶段 Nd 模式年龄(2.03~2.18 Ga)以及曹山二长花岗岩的两阶段 Nd 模式年龄(2.13~2.18 Ga)的存在(杨德彬等,未发表数据)也证明了这一点。

#### 4.2 岩浆源区

庄子里和磨盘山钾长花岗岩均以高 SiO<sub>2</sub>、富 K<sub>2</sub>O 和低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为特征,属于准铝质—弱过铝质岩石,结合元素 U/Pb 富集的特点,暗示其壳源的地球化学性质。元素 Sr/Eu 和 P 以及 Ti 的亏损暗示其岩浆源区或在岩浆结晶分离过程中可能存在斜长石和磷灰石以及钛铁矿的残留或分离。这与同时代辽吉花岗岩的主量元素和痕量元素所反映的壳源成因特点和源区性质相类似(孙敏等,1996;郝德峰等,2004;路孝平等,2004a)。

Nd 同位素是探讨岩浆源区的有效试剂(李昌年,1992; Jahn *et al.*, 2000; 陈能松等,2007)。庄子

里钾长花岗岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化于 -2.6~-3.4 之间,与之相比,磨盘山钾长花岗岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值相对偏高,介于 -0.9~+3.2 之间。在  $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变异图解上,它们与辽吉花岗岩的 Nd 同位素组成类似均位于亏损地幔演化线下方的球粒陨石演化线附近的区域(图 7)。庄子里和磨盘山钾长花岗岩显示出高  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的特点暗示岩浆可能来源于:(1)原始地幔;(2)来源于亏损地幔并受少量地壳物质混染或与壳源岩浆发生混合;(3)基性岩浆底侵形成的新生下地壳岩石的部分熔融。庄子里和磨盘山钾长花岗岩具有高的 SiO<sub>2</sub> 含量(70%~78%),显然直接由原始地幔熔融产生该花岗质岩浆是十分困难的。而由亏损地幔岩浆与地壳混染或与壳源岩浆混合形成的话,那么简单的模拟结果表明必须有大量的地幔物质加入才能形成具有上述 Nd 同位素特点的花岗岩(孙德有等,2005),这种类似直接由地幔岩浆分异形成高 SiO<sub>2</sub> 的长英质花岗岩是不可能的(吴福元等,2007a)。因此钾长花岗岩所具有的高的甚至正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值应是基性岩浆底侵形成的新生下地壳岩石部分熔融的产物。同时其形成时代(2 100~2 200 Ma)与郝德峰等(2004)根据辽吉地区 Nd 亏损模式年龄统计的第二幕基性岩浆底侵事件的时间(2.2 Ga 左右)相一致,结合庄子里和磨盘山钾长花岗岩具有古老的 Nd 亏损模式年龄( $t_{\text{DM2}} = 2.74 \sim 2.79 \text{ Ga}$ ;  $t_{\text{DM2}} = 2.31 \sim 2.37 \text{ Ga}$ ),以及庄子里岩体中 2 500 Ma 岩浆成因捕获锆石(Th/U=0.45)的存在,进一步暗示它们的原始岩浆起源于古元古代—新太古代时期有少量古老地壳物质涉入的新生下地壳的部分熔融。这与根据 Nd 同位素组成( $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -4.2 \sim +2.3$ ;  $t_{\text{DM2}} = 2.36 \sim 2.82 \text{ Ga}$ )研究的,辽吉花岗岩的原始岩浆来源于古元古代—新太古代期间与地幔分离形成的下地壳底侵物质和古老的太古代老地壳物质共同发生部分熔融的源区性质相类似(孙敏等,1996; 郝德峰等,2004)。

近年来,锆石微区原位 Hf 同位素示踪研究越来越受到人们的重视(Vervoort *et al.*, 1996; Amelin *et al.*, 2000; Scherer *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2002; 杨德彬等,2007; 吴福元等,2007b)。锆石是一种非常稳定的矿物,具有封闭温度高,相对于其他矿物较稳定的特点,而且锆石中具有较高的 Hf 含量,Lu 的含量极低,从而导致其  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  具有非常低的比值,由 Lu 衰变而成的  $^{176}\text{Hf}$  很少,因此锆石在形成以后基本没有明显的放射性成因 Hf 的

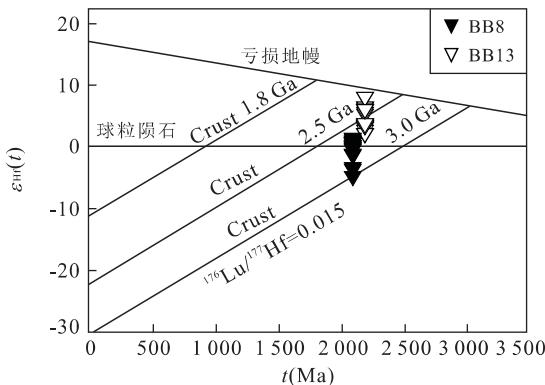
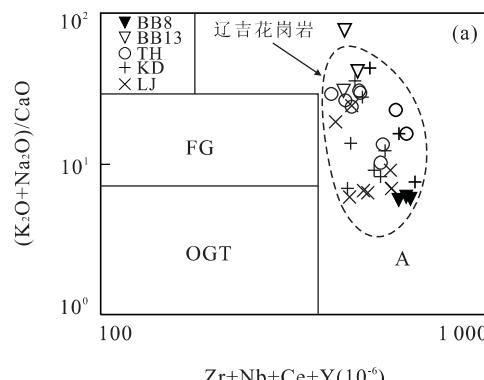


图9 蚌埠隆起区钾长花岗岩的Hf同位素特征

Fig. 9 Zircon Hf isotopic features for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift

积累,且很少受到后期岩浆热事件的影响,即使在麻粒岩相等高级变质条件下,所测样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 基本可以代表其形成时体系的Hf同位素组成,这就使锆石可以记录下岩浆源区不同性质的源岩的特征,特别是通过与锆石U-Pb定年相结合,更使锆石微区原位Hf同位素分析成为揭示地壳演化和示踪岩浆源区的重要手段(Scherer *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2002; 杨德彬等, 2007; 吴福元等, 2007b)。

庄子里钾长花岗岩中岩浆锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于-5.1~+1.0之间(图8),在Hf同位素特征图解上分布于球粒陨石Hf同位素演化线附近以及2.5 Ga和3.0 Ga古老地壳的演化线之间(图9),结合它们古老的Hf同位素模式年龄( $t_{\text{DM2}} = 2.52 \sim 2.83$  Ga),表明它们来源于新太古代时期从亏损地幔中分异出来的新生下地壳的部分熔融。这与其高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-2.6~-3.4)和古老的Nd模式年龄( $t_{\text{DM2}} = 2.74 \sim 2.79$  Ga)研究的结果相一致。



磨盘山钾长花岗岩中岩浆锆石的初始Hf同位素组成相对于庄子里钾长花岗岩具有偏高的特点( $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +2.0 \sim +7.8$ )(图8),所有数据点均位于球粒陨石Hf同位素演化线之上和亏损地幔Hf同位素演化线之下的区域内(图9)。正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值结合它们的Hf同位素单阶段模式年龄( $t_{\text{DM1}} = 2.25 \sim 2.49$  Ga)和两阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}} = 2.26 \sim 2.55$  Ga)以及岩体的形成年龄(2200 Ma左右)非常接近的特点,暗示磨盘山钾长花岗岩的原始岩浆在古元古代—新太古代时期从亏损地幔中分异出来形成新生下地壳后,很快就发生了熔融形成磨盘山钾长花岗岩。这与较庄子里岩体相对高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-0.9~+3.2)和相对年轻的Nd模式年龄(2.31~2.37 Ga)以及Hf模式年龄( $t_{\text{DM2}} = 2.26 \sim 2.55$  Ga)的特点相一致。虽然该岩体中没有出现古老的捕获锆石,但古老的Hf模式年龄和负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的存在,暗示其源区可能有古老地壳物质的涉入。

综上所述,蚌埠隆起区钾长花岗岩的原始岩浆起源于古元古代—新太古代时期有少量古老地壳物质涉入的新生下地壳的部分熔融。

#### 4.3 成因类型及形成的构造背景

蚌埠隆起区庄子里和磨盘山岩体岩石类型为钾长花岗岩,碱性长石和石英为主要造岩矿物,暗色矿物含有少量的角闪石和黑云母;主要元素以高硅、富碱、低铝为特征;具有明显的Eu负异常;富集高场强元素(如Zr、Hf)和大离子亲石元素(如Rb、U、Th),而元素Ba、Sr明显亏损,上述岩石学和地球化学特点暗示它们应属于铝质A型花岗岩(图10)(Whalen *et al.*, 1987; King *et al.*, 1997; 苏玉平和唐红峰, 2005)。这与同时代的辽吉花岗岩所显示的

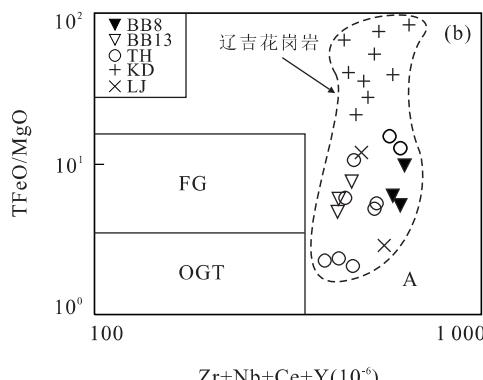
图10 蚌埠隆起区钾长花岗岩的成因类型判别(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 10 Genetic type discrimination for the K-feldspar granites in the Bengbu uplift

FG. 分异的I、S型花岗岩类分布区;OGT. 未分异的I、S、M型花岗岩类分布区;A. A型花岗岩类分布区;TH、KD、LJ 数据来源见图5

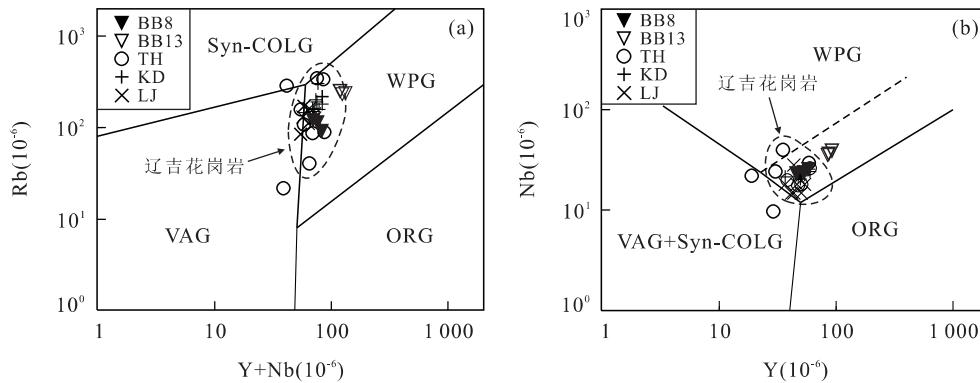


图 11 微量元素 Y+Nb—Rb 和 Y-Nb 构造环境判别图解(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 11 Y+Nb—Rb and Y-Nb discrimination diagram of tectonic setting

ORG. 大洋中脊花岗岩; WPG. 板内花岗岩; VAG. 火山弧花岗岩; Syn-COLG. 同碰撞花岗岩; TH、KD、LJ 数据来源见图 5

A 型花岗岩的成因类型相一致(图 10)(刘永江和李三忠, 1996; 孙敏等, 1996; 李三忠和杨振升, 1997; 郝德峰等, 2004; 路孝平等, 2004a).

对于 A 型花岗岩目前比较统一的认识是其形成于伸展构造背景(Pitcher, 1993). 在微量元素 Y+Nb—Rb 和 Y-Nb 构造环境判别图解中(图 11)(Pearce *et al.*, 1984), 庄子里和磨盘山岩体均投影于板内花岗岩区域内, 反映其形成于非造山的板内环境, 这与它们所具有的 A 型花岗岩的性质相一致, 进一步暗示庄子里和磨盘山岩体应形成于伸展的构造背景. 它们与同时代的辽吉花岗岩的大部分样品一同投影于板内花岗岩区域(图 11)(孙敏等, 1996; 郝德峰等, 2004; 路孝平等, 2004a), 反映它们之间应形成于一个相似的构造背景. 对宽甸地区辽吉花岗岩的研究认为, 其形成于大陆拉开向洋壳转化的伸展环境(Sun *et al.*, 1993; 孙敏等, 1996); 而对通化地区辽吉花岗岩的研究认为, 其是地克拉张作用的产物(路孝平等, 2004a); 同时对辽南—吉南地区的辽吉花岗岩的年代学和地球化学研究显示其形成于裂谷环境(郝德峰等, 2004; Li and Zhao, 2007). 上述研究进一步暗示, 庄子里和磨盘山岩体形成于伸展的构造背景. 此外, 对辽河群中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学的研究(Luo *et al.*, 2004)和辽东地区形成于 2100~2200 Ma 的基性—超基性岩墙群和花岗岩—长花岗岩双峰式火成岩岩石组合的出现(李三忠和刘永江, 1997; Lu *et al.*, 2006; 于介江等, 2007), 均反映了古元古代时期强烈伸展构造背景的存在, 这与白瑾等(1996)在总结华北克拉通古元古代构造格架时大致以 2.1 Ga 为界划分的 2.4~2.1 Ga 时期近东西向的拉张背景相一致.

## 5 结论

通过对蚌埠隆起区钾长花岗岩的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素的研究, 可以得出如下结论:

(1) 庄子里和磨盘山钾长花岗岩为岩浆成因, 其岩浆锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果(上交点年龄)分别为 2104±20 Ma 和 2196±190 Ma, 表明它们的形成时代为古元古代.

(2) 庄子里和磨盘山钾长花岗岩以高硅、富碱、低铝为特征; 富集 LREEs 和高场强元素(如 Zr、Hf)以及大离子亲石元素(如 Rb、U、Th); 明显亏损元素 Ba、Sr、Eu、P 和 Ti; 具有较高的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值(-3.4~+3.2)和  $\epsilon_{Hf}(t)$  值(-5.1~+7.8), 结合它们古老的 Nd 和 Hf 同位素模式年龄, 暗示它们的原始岩浆起源于古元古代—新太古代时期有少量古老地壳物质涉入的新生下地壳的部分熔融.

(3) 庄子里和磨盘山钾长花岗岩为 A 型花岗岩, 形成于伸展的构造背景.

致谢: 衷心感谢河北省廊坊区域地质调查研究所实验室李林庆主任在样品分离和挑选过程中给予的帮助, 同时感谢中国科学院地质与地球物理研究所和西北大学大陆动力学国家重点实验室在锆石的显微图像和 LA-ICP-MS U-Pb 分析以及主量元素、痕量元素和 Nd 同位素分析中给予的支持.

## References

- Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 4205—4225.

- Andersen, T. , 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192: 59—79.
- Bai, J. , Huang, X. G. , Wang, H. C. , et al. , 1996. Precambrian crustal evolution of China (2nd ed.). Geological Publishing House, Beijing, 1—259 (in Chinese).
- Bizzarro, M. , Simonetti, A. , Stevenson, R. K. , et al. , 2002. Hf isotope evidence for a hidden mantle reservoir. *Geology*, 30: 711—714.
- Boynton, W. V. , 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson, P. , ed., Rare earth element geochemistry. Elsevier Science Publishing Company Inc. , New York, 63—114.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, 1987. Regional geology of Anhui Province. Geological Publishing House, Beijing, 262—468 (in Chinese).
- Chen, F. K. , Siebel, W. , Satir, M. , 2002. Zircon U-Pb and Pb-isotope fractionation during stepwise HF acid leaching and geochronological implications. *Chemical Geology*, 191: 155—164.
- Chen, N. S. , Wang, X. Y. , Zhang, H. F. , et al. , 2007. Geochemistry and Nd-Sr-Pb isotopic compositions of granitoids from Qaidam and Oulongbuluke micro-blocks, NW China: Constraints on basement nature and tectonic affinity. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 7—21 (in Chinese with English abstract).
- Cherniak, D. J. , Watson, E. B. , 2000. Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 172: 5—24.
- Chu, N. C. , Taylor, R. N. , Chavagnac, V. , et al. , 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *J. Anal. et Spectrom.*, 17: 1567—1574.
- Gao, S. , Rudnick, R. L. , Yuan, H. L. , et al. , 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892—897.
- Geng, Y. S. , Yang, C. H. , Wan, Y. S. , 2006. Paleoproterozoic granitic magmatism in the Lüliang area, North China Craton: Constraint from isotopic geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 305—314 (in Chinese with English abstract).
- Goldstein, S. L. , O'Nions, R. K. , Hamilton, P. J. , 1984. A Sm-Nd study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 70: 221—236.
- Griffin, W. L. , Pearson, N. J. , Belousova, E. , et al. , 2003. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 133—147.
- Griffin, W. L. , Wang, X. , Jackson, S. E. , et al. , 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: Insitu analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61: 237—269.
- Hao, D. F. , Li, S. Z. , Zhao, G. C. , et al. , 2004. Origin and its constraint to tectonic evolution of Paleoproterozoic granitoids in the eastern Liaoning and Jilin provinces, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1409—1416 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M. , Wu, F. Y. , Chen, B. , 2000. Granitoids of the central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences*, 91: 181—193.
- Jin, K. , Xu, W. L. , Wang, Q. H. , et al. , 2003. Formation time and sources of the Huaiyang ‘ migmatitic granodiorite ’ in Bengbu, central China: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb geochronology. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(4): 331—335 (in Chinese with English abstract).
- King, P. L. , White, A. J. R. , Chappell, B. W. , et al. , 1997. Characterization and origin of alumous A-type from the lachlan fold belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371—391.
- Koschek, G. , 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon. *Journal of Microscopy*, 171: 223—232.
- Li, C. N. , 1992. Trace element petrology of igneous rocks. China University of Geosciences Press, Wuhan, 133—143 (in Chinese).
- Li, S. Z. , Hao, D. F. , Han, Z. Z. , et al. , 2003. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in Jiao-Liao massif. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 380—404 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z. , Liu, Y. J. , 1997. Palaeoproterozoic sedimentary assemblages in the Jiao-Liao massif: Ages and stratigraphic sequence. *Northwestern Geology*, 18(3): 13—20 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z. , Yang, Z. S. , 1997. Types and genesis of Palaeoproterozoic granites in the Jiao-Liao massif. *Northwestern Geology*, 18(3): 21—26 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z. , Zhao, G. C. , 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the eastern block of the North China craton. *Precambrian Research*, 158: 1—16.

- Liu, Y. J., Li, S. Z., 1996. Paleoproterozoic granite in Haicheng-Dashiqiao-Jidong area, eastern Liaoning. *Geology of Liaoning*, 13: 10–18 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. P., Wu, F. Y., Guo, J. H., et al., 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the eastern block in the North China craton. *Precambrian Research*, 146: 138–164.
- Lu, X. P., Wu, F. Y., Zhang, Y. B., et al., 2004a. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liaoji granites in Tonghua area, southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 381–392 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. P., Wu, F. Y., Lin, J. Q., et al., 2004b. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in southern Liaodong Peninsula and its constraint on tectonic evolution of the North China craton. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 123–138 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2001. Users manual for Isoplot/Ex (Rev. 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, 1: 55.
- Luo, Y., Sun, M., Zhao, G. C., et al., 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the eastern block of the North China craton: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji belt. *Precambrian Research*, 134: 349–371.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Three element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956–983.
- Pitcher, W. S., 1993. The nature and origin of granite. Blackie Academic and Professional, London, 321.
- Qiu, R. L., Xu, X., Huang, D. Z., 1999. The isotopic age of the Jingshan intrusive in the Bengbu region of the southeastern edge of the North China block and its geological implications. *Geology of Anhui*, 9(3): 161–164 (in Chinese with English abstract).
- Scherer, E. E., Cameron, K. L., Blichert-Toft, J., 2000. Lu-Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 3413–3432.
- Shen, Q. H., Geng, Y. S., Song, B., et al., 2005. New information from the surface outcrops and deep crust of Archean rocks of the North China and Yangtze blocks, and Qinling-Dabie orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 616–627 (in Chinese with English abstract).
- Soderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The  $^{176}\text{Lu}$  decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 311–324.
- Su, Y. P., Tang, H. F., 2005. Trace element geochemistry of a-type granites. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(3): 245–251 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2005. Confirmation of two episodes of a-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the Central Jilin Province, and their constraints on the structural pattern of eastern Jilin-Heilongjiang area, China. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 263–275 (in Chinese with English abstract).
- Sun, M., Armstrong, R. L., Lambert, R. S., et al., 1993. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of the Paleoproterozoic Kuandian complex, the eastern Liaoning Province, China. *Precambrian Research*, 62: 171–190.
- Sun, M., Zhang, L. H., Wu, J. H., 1996. The origin of the Early Proterozoic Kuandian complex: Evidence from geochemistry. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 207–222 (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 the ocean basins*. *Geological Society Special Publication*, 42: 313–345.
- Vervoort, J. D., Patchett, P. J., Gehrels, G. E., et al., 1996. Constraints on early earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. *Nature*, 379: 624–627.
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407–419.
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Lin, Q., 1997. Isotopic characteristics of the post-omogenie granite in orogenic belt of northern China and their implications for crustal growth. *Chinese Sciences Bulletin*, 42(20): 2188–2192 (in Chinese).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007a. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007b. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology.

- Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Xu, P., Wu, F. Y., Xie, L. W., et al., 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1642—1648.
- Xu, W. L., Gao, S., Wang, Q. H., et al., 2006. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. *Geology*, 34(9): 721—724.
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Yang, D. B., et al., 2005. SHRIMP zircon U-Pb dating in Jingshan ‘ migmatitic granite ’ Bengbu and its geological significance. *Science in China (Ser. D)*, 48(2): 185—191.
- Xu, W. L., Yang, D. B., Pei, F. P., et al., 2006. Age of the Wuhe complex in the Bengbu uplift: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating. *Geology in China*, 33(1): 132—137 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Hou, M. J., Qiu, R. L., et al., 2005.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of granites and related dikes in the Bengbu area on the southeastern margin of the North China block. *Geology in China*, 32(4): 588—595 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. B., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2005. Formation time and magma source of granites in Bengbu uplift: Evidence from LA-ICP MS zircon U-Pb dating and tracing. *Geochimica*, 34(5): 443—454 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. B., Xu, W. L., Wang, Q. H., et al., 2006. Petrogenesis of Late Jurassic Jingshan granite in Bengbu uplift, Anhui Province: Constraints from geochemistry and Hf isotope of zircons. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2923—2932 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. B., Xu, W. L., Wang, Q. H., et al., 2007. Petrogenesis of the Mesozoic granite in Bengbu uplift: Constraints from zircon Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 381—392 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. J., Yang, D. B., Feng, H., et al., 2007. Chronology of amphibolite protolith in Haicheng of southern Liaoning: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating. *World Geology*, 26(4): 391—396 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandards Newsletter*, 28: 353—370.
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107: 45—73.
- ### 附中文参考文献
- 安徽省地质矿产局,1987. 安徽省区域地质志. 北京:地质出版社,262—468.
- 白瑾,黄学光,王惠初,等,1996. 中国前寒武纪地壳演化(第二版). 北京:地质出版社,1—259.
- 陈能松,王新宇,张宏飞,等,2007. 柴—欧微地块花岗岩地球化学和 Nd-Sr-Pb 同位素组成:基底性质和构造属性启示. 地球科学——中国地质大学学报,32(1): 7—21.
- 耿元生,杨崇辉,万渝生,2006. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用——来自同位素年代学的证据. 岩石学报,22(2): 305—314.
- 郝德峰,李三忠,赵国春,等,2004. 辽吉地区古元古代花岗岩成因及对构造演化的制约. 岩石学报,20(6): 1409—1416.
- 靳克,许文良,王清海,等,2003. 蚌埠淮光“混合花岗闪长岩”的形成时代及源岩:锆石 SHRIMP U-Pb 地质年代学证据. 地球学报,24(4): 331—335.
- 李昌年,1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉:中国地质大学出版社,133—143.
- 李三忠,郝德峰,韩宗珠,等,2003. 胶辽地块古元古代构造热演化与深部过程. 地质学报,77(3): 380—404.
- 李三忠,刘永江,1997. 胶辽地块古元古代沉积组合:年代与层序. 西北地质,18(3): 13—20.
- 李三忠,杨振升,1997. 胶辽地块古元古代花岗岩类型及成因. 西北地质,18(3): 21—26.
- 刘永江,李三忠,1996. 辽宁海城—大石桥—吉洞地区早元古代花岗岩. 辽宁地质,13: 10—18.
- 路孝平,吴福元,张艳斌,等,2004a. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景. 岩石学报,20(3): 381—392.
- 路孝平,吴福元,林景仟,等,2004b. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩浆作用的年代学格架. 地质科学,39(1): 123—138.
- 邱瑞龙,徐祥,黄得志,1999. 华北地块东南缘蚌埠地区荆山岩体同位素年龄及其地质意义. 安徽地质,9(3): 161—164.
- 沈其韩,耿元生,宋彪,等,2005. 华北和扬子陆块及秦岭—大别造山带地表和深部太古宙基底的新信息. 地质学报,79(5): 616—627.
- 苏玉平,唐红峰,2005. A型花岗岩的微量元素地球化学. 矿物岩石地球化学通报,24(3): 245—251.
- 孙德有,吴福元,高山,等,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.
- 孙敏,张立飞,吴家弘,1996. 早元古代宽甸杂岩的成因. 地球

- 化学证据. 地质学报, 70(3): 207—222.
- 吴福元, 江博明, 林强, 1997. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义. 科学通报, 42(20): 2188—2192.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217—1238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185—220.
- 徐祥, 侯明金, 邱瑞龙, 等, 2005. 华北陆块东南缘蚌埠地区花岗岩与相关脉岩<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年. 中国地质, 32(4): 588—595.
- 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 等, 2006. 蚌埠隆起区五河杂岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据. 中国地质, 33(1): 132—137.
- 杨德彬, 许文良, 裴福萍, 等, 2005. 蚌埠隆起区花岗岩形成时代及岩浆源区性质: 锆石 LA-ICP MS U-Pb 定年与示踪. 地球化学, 34(5): 443—454.
- 杨德彬, 许文良, 王清海, 等, 2006. 安徽省蚌埠荆山晚侏罗世花岗岩岩体的成因——来自地球化学和锆石 Hf 同位素的制约. 岩石学报, 22(12): 2923—2932.
- 杨德彬, 许文良, 王清海, 等, 2007. 蚌埠隆起区中生代花岗岩的岩石成因: 锆石 Hf 同位素的证据. 岩石学报, 23(2): 381—392.
- 于介江, 杨德彬, 冯虹, 等, 2007. 辽南海城斜长角闪岩原岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据. 世界地质, 26(4): 391—396.