

河南新县花岗岩岩基的岩石成因、来源 及对西大别构造演化的启示

陈伟¹⁾, 徐兆文¹⁾, 李红超¹⁾, 杨小男^{1,2)}, 陈进全¹⁾, 王浩¹⁾, 王少华¹⁾

1) 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210093;

2) 中国地质博物馆, 北京, 100034

内容提要:本文对新县花岗岩岩基进行了系统的锆石 U-Pb 定年, 全岩元素地球化学、Sr-Nd-Pb-Hf 同位素测试, 研究探讨其成岩年龄、岩石成因、物质来源以及地球化学动力学背景。花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 125.5 ± 1.5 Ma, 属于早白垩世产物。全岩元素地球化学成分表现为高硅、富碱, 贫镁、铁和钙, 富集轻稀土元素、大离子亲石元素 (Rb、K、Th、U) 和 Pb, 亏损重稀土元素、高场强元素 (Nb、Ta、Ti) 和 Sr、Ba。全岩同位素具有中等略偏高的 Sr 初始比值 [$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.706949 \sim 0.707086$], 低的放射性 Pb 同位素组成 [$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 16.611 \sim 17.152$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.304 \sim 15.432$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.316 \sim 37.702$], 低的 Nd 初始比值 [$\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -13.65 \sim -13.51$] 和老的 Nd 模式年龄 ($t_{\text{DM2}} = 2.12 \sim 2.13$ Ga)。锆石原位 Hf 同位素具有较低的初始比值 [$\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -22.92 \sim -19.40$] 和老的 Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM2}} = 2.39 \sim 2.61$ Ga)。综合以上元素地球化学特征、锆石 U-Pb 定年结果及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成, 新县花岗岩岩基应属于分异的高钾钙碱性 I 型花岗岩, 是化学成分类似于扬子板块北缘新元古代 TTG 型岩浆岩的扬子下地壳在非加厚下地壳 (深度小于 35 km) 环境下部分熔融的产物。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; Sr-Nd-Pb-Hf 同位素; 岩石地球化学; 新县花岗岩岩基; 西大别造山带; 中国中东部

大别超高压变质带是世界上规模最大的超高压变质带 (Hacker et al., 1996; Zhang Kaijun, 1997), 同时伴有大量白垩纪花岗岩出露。研究这一地区白垩纪花岗岩的形成时代、岩石成因以及源区性质, 对于认识俯冲大陆岩石圈再循环和碰撞造山带的构造演化具有十分重要的理论意义。尽管大别造山带研究已取得许多研究成果 (Xu Shutong et al., 1992; 从柏林, 1996; Zhang Kaijun, 1997; Li Shuguang et al., 1999; Jahn et al., 1999; Hacker et al., 1998; Ratschbacher et al., 2000; Ma Changqian et al., 1998; 马昌前等, 1999; Zhang Hongfei et al., 2002, 2003; Ernst et al., 2007; Xu Haijin et al., 2007, 2012; Huang Fang et al., 2007; He Yongsheng et al., 2007; Zheng Yongfei et al., 2006; Zhao Zifu et al., 2005, 2007, 2008; 郑永飞, 2008; 赵子福等, 2009), 但就整个大别造山带研究而言, 西大别地区的地质研究工作相对较薄弱, 前人对西大别地区的研究焦点主要集中于扬子板块与华北板块陆-陆碰撞造山以及高压—超高压

压变质作用等热点问题上 (Hacker et al., 1998; Liu Xiaochun et al., 2004), 而对区内广泛出露的白垩纪花岗岩的研究则较少。20 世纪 90 年代曾有学者对西大别地区的花岗岩开展过一些同位素定年工作, 获得鸡公山花岗岩岩基锆石 U-Pb 年龄为 128 ± 2 Ma、夏店花岗岩岩基全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 125 Ma、灵山花岗岩岩基全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 110 Ma (李石等, 1991)、新县花岗岩岩基 K-Ar 年龄为 130 Ma (李世长等, 1993)。近年来, 随着西大别地区众多钼矿床的发现, 研究区内的钼矿床以及成矿有关的花岗岩又重新吸引了众多学者的关注 (Zhang Hongfei et al., 2004; 郭铁朋, 2007; 邱顺才, 2006a, 2006b; 杨泽强, 2007; 魏国庆等, 2010; 杨梅珍等, 2010, 2011; Li Hongchao et al., 2012)。但这些研究工作主要仍停留在一些生产应用方面的研究, 而对白垩纪花岗岩的岩石成因、源区和动力学背景等问题缺乏系统的研究和深入的讨论。鉴于上述情况, 本文以西大别地区新县花岗岩岩基作为研究对象, 在详细的野外地质工作和岩相学观察的基

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号 40973030, 41173050) 的成果。

收稿日期: 2012-11-15; 改回日期: 2013-05-20; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 陈伟, 男, 1984 年生, 矿床学专业博士研究生, Email: nmgchen@163.com。通讯作者简介: 徐兆文, 教授, Email: xzwen@nju.edu.cn。

础上,通过全岩元素地球化学、锆石 U-Pb 定年、全岩 Sr-Nd-Pb 同位素和锆石原位 Hf 同位素等系统研究,参照前人研究成果,探讨了新县花岗岩岩基的形成时代、岩石成因、物质来源,以及白垩纪花岗岩浆作用与大别造山构造演化关系。

1 地质背景

新县花岗岩岩基位于河南省新县县城西部,处于大别造山带西端,是西大别地区几个出露规模巨大的花岗岩岩基之一。

1.1 新县地区地质概况

新县地区出露地层主要有下元古界卡房组(Pt_1k)、新县组(Pt_1x)、七角山组(Pt_1q),中元古界浒湾组(Pt_2h),震旦至奥陶系肖家庙组($Z\sim Ox$),泥盆系南湾组(Dn),白垩系下统陈棚组(Kc)和第四系(Q)(图 1)。卡房组(Pt_1k)分布于研究区西南部,岩性主要为白云二长片麻岩、浅粒岩等。新县组(Pt_1x)分布于研究区南部,岩性主要为白云二长片麻岩、白云斜长片麻岩、浅粒岩、白云母片岩等,与卡房组整合接触。七角山组(Pt_1q)分布于研究区中

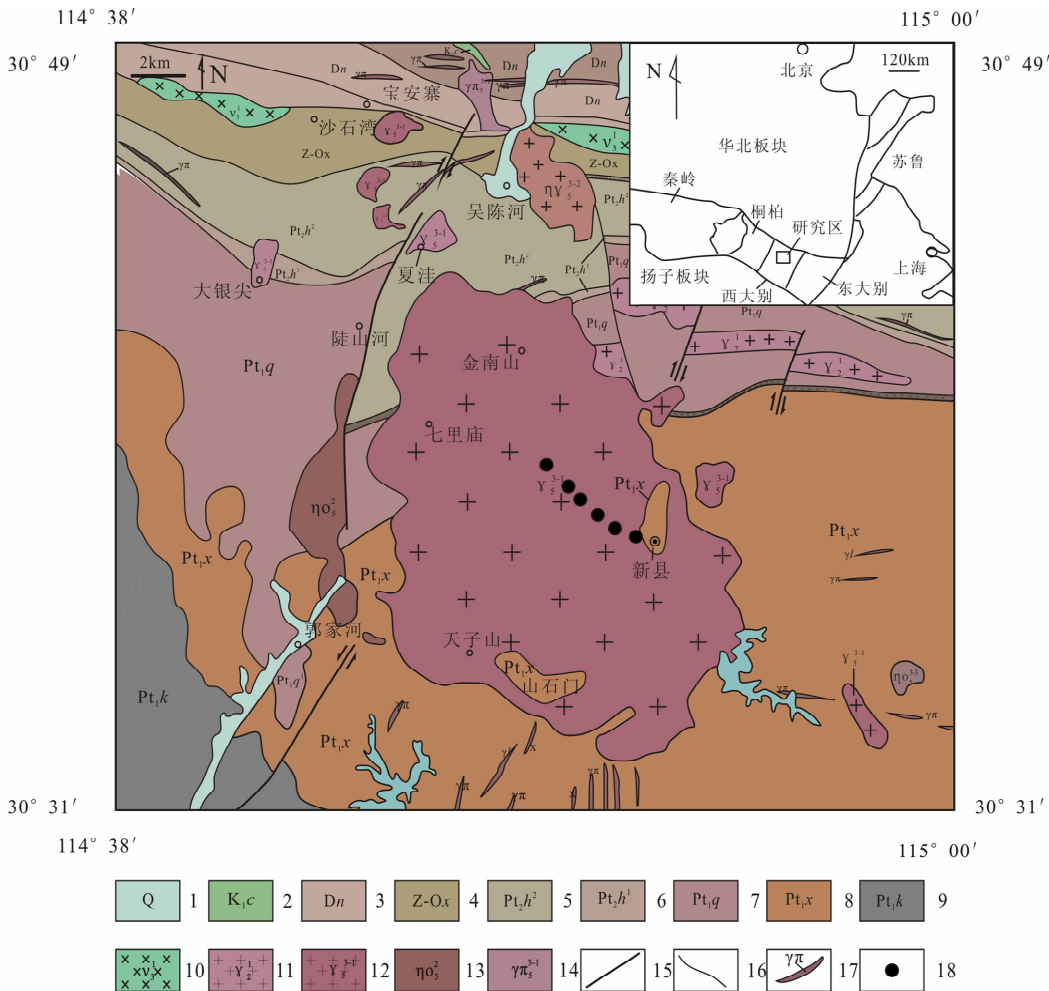


图 1 河南新县花岗岩岩基地质简图(据河南省地质局区域地质调查队,1981^①修改)

Fig. 1 Geological map of the Xinxian granitic batholith in Henan Province (modified after The Regional

Geological Survey Team of the Bureau of Geology of Henan Province, 1981^①)

1—第四系; 2—白垩系下统陈棚组; 3—泥盆系南湾组; 4—震旦—奥陶系肖家庙组; 5—中元古界浒湾组上段; 6—中元古界浒湾组下段; 7—下元古界七角山组; 8—下元古界新县组; 9—下元古界卡房组; 10—辉长岩; 11—震旦纪花岗岩; 12—燕山期花岗岩; 13—燕山早期石英二长岩; 14—燕山晚期花岗岩斑岩; 15—断层; 16—地质界线; 17—花岗斑岩脉; 18—采样位置

1—Quaternary; 2—Lower Cretaceous Chenpeng Formation; 3—Devonian Nanwan Formation; 4—Sinian-Ordovician Xiaojiamiao Formation; 5—Mesoproterozoic Upper Unit of Huwan Formation; 6—Mesoproterozoic Lower Unit of Huwan Formation; 7—Paleoproterozoic Qijiaoshan Formation; 8—Paleoproterozoic Xinxian Formation; 9—Paleoproterozoic Kafang Formation; 10—gabbro; 11—Sinian granite; 12—Yanshanian granite; 13—Early Yanshanian quartz monzonite; 14—Late Yanshanian granite porphyry; 15—fault; 16—geological boundary; 17—granite porphyry vein; 18—sample point

部,岩性主要为白云母斜长混合片麻岩、眼球状片麻岩、角闪石斜长片麻岩,与新县组整合接触。浒湾组(Pt₂h)分布研究区中北部,岩性可分为上下两段:下段主要为黑云母角闪石斜长片麻岩、黑云母斜长片麻岩、二云母斜长混合片麻岩、混合片麻岩、白云母斜长片麻岩;上段主要为二云母斜长混合片麻岩、混合片麻岩、白云母斜长片麻岩,与七角山组呈断层接触。肖家庙组(Z~Ox)分布于研究区北部,岩性主要为绿帘二长石英片岩、绢云片岩,与浒湾组呈断层接触。南湾组(Dn)分布于研究区北部,岩性主要为一套陆源碎屑岩,与肖家庙组呈断层接触。陈棚组(Kc)分布于研究区北部,岩性主要为凝灰质火山岩,与南湾组呈不整合接触。断裂构造发育,主要发育有北西向、近南北向和北东向断裂。火成岩出露广泛,分布有大小几十个岩体,产状分别为岩基、岩株和岩脉,岩性主要有变辉绿岩、花岗岩、石英二长岩和花岗斑岩脉,形成时代主要为白垩纪,其中最具代表性岩体为新县花岗岩岩基(河南省地质局区域地质调查队,1981^①)。

1.2 新县花岗岩岩基地质和岩相学特征

新县花岗岩岩基出露于河南省新县城关镇、陡山河镇和酒店乡境内,呈椭圆状沿北西向展布,长约 17 km,宽约 11km,面积约 190 km²。岩体与围岩呈侵入接触关系,南部侵入于下元古界新县组,中部侵入于下元古界七角山组,北部侵入于中元古界浒湾组。接触面多倾向岩体,南部产状较陡,倾角约 70°。岩石颜色为灰白色、浅肉红色,中粒花岗结构、块状构造。主要矿物有斜长石、钾长石、石英、黑云

母。岩石经历轻度绿泥石化、绢云母化和碳酸盐化等蚀变(河南省地质局区域地质调查队,1981^①)。显微观察主要矿物有斜长石、钾长石、石英、黑云母(图 2a,2b),副矿物有锆石、磷灰石、榍石和磁铁矿等,斜长石(25%~30%)呈半自形板状一粒状,卡斯巴双晶发育;钾长石(40%~45%)为他形粒状,多为微斜长石与条纹长石,斑晶呈自形板状;石英(25%~30%)他形粒状,主要分布于长石之间;黑云母(1%~2%)鳞片状,吸收性明显。

2 样品和分析方法

样品采自新县城关镇西侧将军山脚至山顶新县电视塔一线(图 1)。新鲜全岩样品磨碎至 200 目,供后续主量元素、微量元素、稀土元素和 Sr-Nd-Pb 同位素测试使用。

主量元素采用等离子发射光谱(ICP-AES)方法测定,将约 0.1g 全岩粉末碱熔(四硼酸锂)后用 10% HCl 溶样,以溶液状态在 JY38S 型发射光谱仪上进行测试,测试相对标准偏差一般≤2%,二价铁含量采用湿化学方法测定,测试精度好于 0.5%~1.0%。微量元素和稀土元素测定采用酸溶法(HF+HNO₃),用 Finnigan Element II 型高分辨等离子质谱(HR-ICP-MS)对样品溶液进行测定,测试中采用标准样品对仪器状态和数据质量进行监控,结果显示大部分元素分析灵敏度小于 0.5×10⁻⁹,精度优于 5%,详细测试流程见高剑峰等(2003)。以上测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。

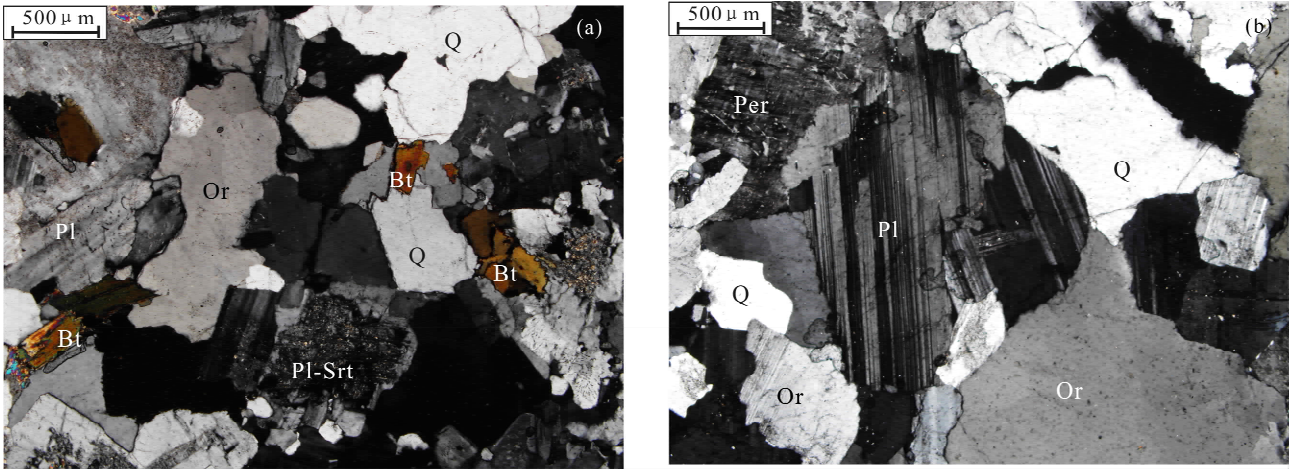


图 2 河南新县花岗岩岩基岩相学显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of the Xinxian granitic batholith in Henan Province
Q—石英;Bt—黑云母;Or—正长石;Pl—斜长石;Per—条纹长石;Pl—Srt—斜长石绢云母化
Q—Quartz; Bt—biotite;Or—orthoclase; Pl—plagioclase; Per—perthite; Pl—Srt—plagioclase with sericite

全岩 Rb-Sr、Sm-Nd 元素含量及同位素组成在南京现代分析中心完成。称取适量全岩粉末样品于 Teflon 罐中,根据已获得的 Rb、Sr、Sm 和 Nd 元素的含量加入适量的⁸⁷Rb-⁸⁴Sr 混合稀释剂(或⁸⁷Rb 和⁸⁴Sr 单稀释剂)和¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Nd 混合稀释剂,再滴入一定量纯化的 HClO₄ 和 HF,在电热板上加热一周左右使其充分溶解,利用离子交换树脂分离后,再由 VG354 多接收质谱仪测试。Sr 同位素比值以⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194 进行校正质量分馏,得到标样 NBS-987 的组成为⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710224±0.000008 (2σ),实验全流程本底为 10~20 ng;在等时线年龄计算中,样品⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值误差分别为 1% 和 0.005%。Nd 同位素比值以¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219 校正,获得标样 La Jolla 的同位素组成为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.511864±0.000006 (2σ),实验全流程本底为 50~70 pg。详细的 Rb-Sr、Sm-Nd 样品化学制备,质谱测定方法及各类标准样品测定分析见王银喜等(2006, 2007)。在(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i、ε_{Nd}(*t*)、*t*_{DM}、*t*_{DM2} 计算过程中,取 λ⁸⁷Rb=1.42×10⁻¹¹ a⁻¹, λ¹⁴⁴Sm=6.54×10⁻¹² a⁻¹, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}=0.1967, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}=0.512638, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM}=0.2137, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM}=0.51315 (Jahn et al., 1999)。

Pb 同位素分析在内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,采用二次蒸馏纯化的浓硝酸和盐酸混合酸溶样方法溶样,用超纯氢溴酸和阴离子交换树脂(BioRad AG1-X8, 100~200 目)将 Pb 分离纯化出来。采用传统的硅胶和磷酸法将样品涂在 Re 金属带上,用 Finnigan 公司的 Triton TI 型表面热电离质谱仪(TIMs)进行 Pb 同位素比值测试(Gerstenberger et al., 1997)。严格控制实验条件,使样品和铅同位素国际标准样(NIST Pb-981)在相近温度条件(~1250℃)、相近离子流强度下测量。所有样品的铅同位素比值通过监控的国际标样 NIST Pb-981 进行了质量分馏校正(Todt et al., 1996)。通过标样和某些样品的多次测量结果表明,本次研究所获得的铅同位素比值分析误差小于 0.05%。

锆石 U-Pb 同位素定年及 Lu-Hf 同位素组成测定选取新鲜的全岩样品。样品粉碎后,经磁分选和重液分离出单颗粒锆石,然后在双目镜下手工挑选出颗粒较大、晶形完好的锆石制靶,经透射光、反射光及阴极发光(CL)研究之后,对选定的锆石颗粒进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析。其中锆石样品阴极发光照片和 LA-ICP-MS 锆石

U-Pb 定年在内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。CL 图像拍摄在 JEOL-JXA-8100 电子探针仪上完成,工作状态为:加速电压 15 kV,束电流 2×10⁻⁸ A。锆石 LA-ICP-MS 定年采用的仪器型号为 Agilent 7500a,配备 UP213 型固体激光剥蚀系统,分析过程激光束斑直径为 25 μm,频率为 5 Hz。实验原理和详细测试方法参照 Jackson 等(2004)。数据处理使用 GLITTER4.0 程序,计算获得同位素比值、年龄和误差,普通铅校正采用 Andersen(2002)的方法进行,年龄计算和图解使用 SQUID 1.03 和 Isoplot/Ex 2.49 程序(Ludwig, 2001)。

原位锆石 Hf 同位素测试在国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱和 New wave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上完成。实验采用 He 作为剥蚀物质载气,根据锆石大小,剥蚀直径采用 55 μm 或 40 μm,测定使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一或相近位置。仪器运行状况及详细分析流程见侯可军等(2007)。分析中标准样 GJ1 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282015±8 (2σ, *n*=10)。¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 初始比值 ε_{Hf}(*t*) 计算中,取¹⁷⁶Lu 衰变常数 λ=1.867×10⁻¹¹ a⁻¹ (Scherer et al., 2001), (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR}=0.0332, (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR}=0.282772 (Bichert-Toft et al., 1997)。单阶段模式年龄 *t*_{DM1} 计算取(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM}=0.0384, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}=0.28325 (Vervoort et al., 1999)。

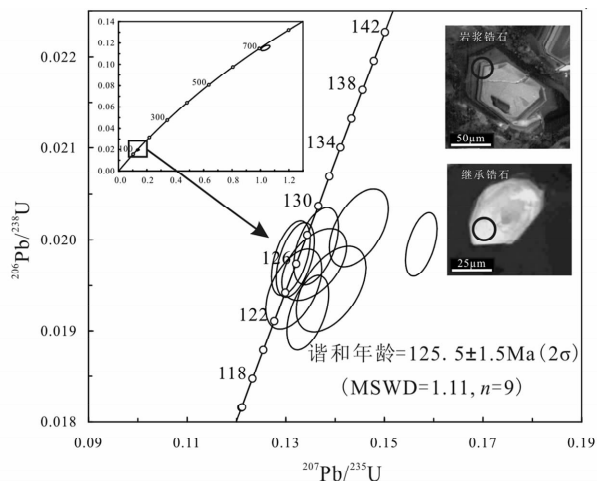


图3 河南新县花岗岩岩基锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年谐和图

Fig. 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating concordant curve for the Xinxian granitic batholith in Henan Province

表 1 河南新县花岗岩岩基 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年数据

测定点号	同位素比值							表面年龄 (Ma)			
	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
X10-10-01	1.1270984	0.04841	0.00087	0.13193	0.00255	0.01978	0.00027	126	2	126	2
X10-10-02	1.5560760	0.05083	0.00100	0.13447	0.00280	0.01920	0.00027	128	3	123	2
X10-10-03	2.3051101	0.04909	0.00138	0.13162	0.00374	0.01946	0.00029	126	3	124	2
X10-10-04	1.4986293	0.04958	0.00105	0.13614	0.00300	0.01993	0.00028	130	3	127	2
X10-10-05	1.1448278	0.06519	0.00124	1.03498	0.02082	0.11521	0.00164	721	10	703	9
X10-10-07	1.4354591	0.05192	0.00175	0.13919	0.00467	0.01946	0.00031	132	4	124	2
X10-10-09	2.1703703	0.04801	0.00089	0.13102	0.00259	0.01980	0.00027	125	2	126	2
X10-07-11	2.0408470	0.05730	0.00072	0.15747	0.00211	0.01995	0.00023	148	2	127	1
X10-07-12	1.1020209	0.04997	0.00163	0.13575	0.00434	0.01973	0.00026	129	4	126	2
X10-07-13	1.6262602	0.05216	0.00144	0.14481	0.00395	0.02013	0.00028	137	4	128	2

两阶段模式年龄 t_{DM2} 计算,平均地壳¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值采用 0.015(Griffin et al. , 2000)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石呈浅黄色,透明一半透明,长柱状,晶体自形程度良好,长轴为 50~150μm,长短轴之比为 1 : 1~3 : 1(图 3)。详细的锆石 U-Pb 年龄测试结果列于表 1。新县花岗岩岩基锆石的 Th/U 比值较高介于 1.10~2.31 之间,锆石的阴极发光图像显示出较清晰的震荡环带(图 3),表明锆石为岩浆锆石(Wu Yuanbao et al. , 2004)。此外,研究发现一粒年龄为 703 Ma(X10-10-05)的新元古代继承锆石,虽然其没有典型岩浆锆石的震荡环带,但是其 Th/U 比值较高(1.14),同样可认定为岩浆来源,没有明显的震荡环带可能是后期受到变质作用的影响。本次所测定的 10 个锆石点除 X10-

10-05 点外,²⁰⁶Pb /²³⁸U 年龄变化于 123~128Ma 之间,获得岩浆锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 谐和年龄值为 125.5±1.5Ma (MSWD=1.11,2σ,n=9,图 3)。

3.2 主量元素

表 2 为新县花岗岩岩基主量元素分析结果,岩石以高硅富钾贫镁和铁为特征,其中 SiO₂=75.97%~78.41%、MgO=0.08%~0.15%、FeO^T=0.80%~1.36%、K₂O=3.86%~4.68%、K₂O+Na₂O=7.55%~8.74%、K₂O/Na₂O=1.02~1.15。岩体 A/NKC 值介于 1.03~1.08 之间(除 X10-15 外),A/NK 值介于 1.12~1.18 之间,分异指数 D.I 值介于 93.71~95.25 之间。在 SiO₂-K₂O 图解上投影点落入高钾钙碱性范围内(图 4a),在 A/NKC-A/NK 图解上投影点落入弱过铝质范围内(图 4b)。

3.3 稀土元素和微量元素

新县花岗岩岩基稀土元素和微量元素的分析结

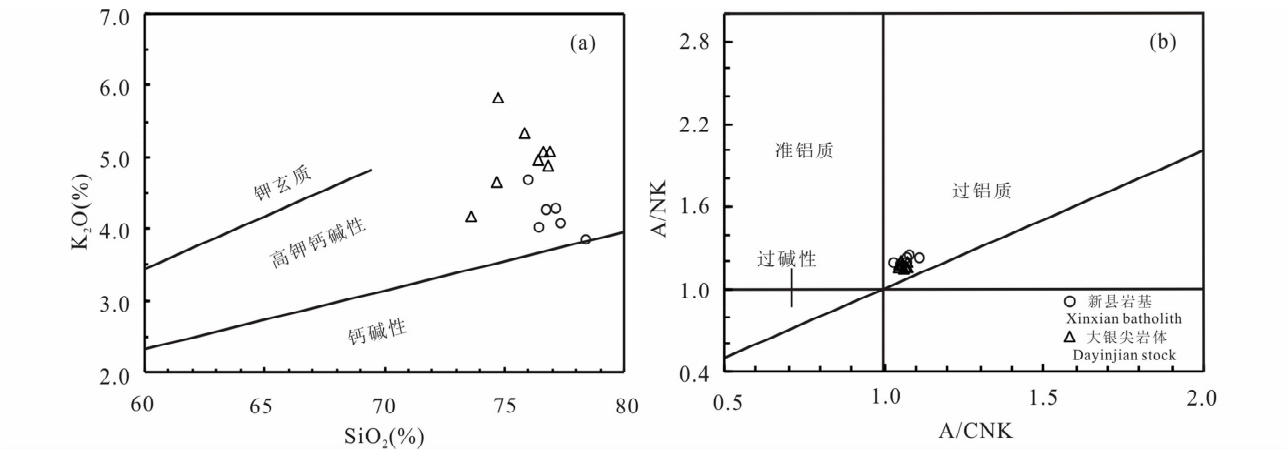


图 4 河南新县花岗岩岩基 K₂O-SiO₂ 图解(a)和 A/CNK-A/NK 图解(b) (大银尖岩体数据据 Li Hongchao et al. , 2012)
Fig. 4 Diagrams of K₂O versus SiO₂ (a) and A/CNK versus A/NK (b) for the Xinxian granitic batholith in Henan Province (the Dayinjian stock data are from Li Hongchao et al. , 2012)

表 2 河南新县花岗岩岩基主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)含量

Table 2 Major elements (%) and trace elements abundances ($\times 10^{-6}$) for the Xinxian granitic batholith in Henan Province

样号	X10-11	X10-12	X10-13	X10-14	X10-15	X10-16
SiO ₂	75.97	77.36	78.41	77.13	76.75	76.45
TiO ₂	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13
Al ₂ O ₃	13.16	12.53	11.59	12.56	12.81	12.79
Fe ₂ O ₃	0.21	0.39	0.22	0.38	0.46	0.38
FeO	0.60	0.37	0.65	0.44	0.41	0.94
FeO ^T	0.83	0.80	0.89	0.86	0.92	1.36
MnO	0.05	0.06	0.07	0.05	0.04	0.04
MgO	0.08	0.13	0.11	0.11	0.13	0.15
CaO	0.41	0.51	0.53	0.40	0.28	0.55
Na ₂ O	4.06	3.87	3.69	3.86	3.89	3.94
K ₂ O	4.68	4.08	3.86	4.30	4.28	4.03
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.07	0.07	0.06	0.07
LOI 烧失	0.24	0.37	0.42	0.30	0.59	0.61
总量	99.63	99.83	99.73	99.71	99.82	99.62
Alk	8.74	7.95	7.55	8.16	8.17	7.97
K/Na	1.15	1.05	1.05	1.11	1.10	1.02
A/NKC	1.05	1.07	1.03	1.07	1.11	1.08
A/NK	1.12	1.16	1.13	1.14	1.16	1.18
D. I	95.25	94.48	94.72	95.21	95.02	93.71
FeO ^T /MgO	9.90	5.54	7.69	7.12	6.37	8.55
La	20.974	19.000	27.083	26.000	40.799	29.053
Ce	46.545	37.443	42.714	44.150	49.954	48.908
Pr	3.590	3.410	4.907	4.627	7.105	5.405
Nd	10.386	10.086	14.205	13.331	20.366	16.219
Sm	1.681	1.946	2.402	2.132	3.108	2.854
Eu	0.270	0.305	0.412	0.322	0.393	0.382
Gd	1.534	1.518	1.571	1.908	2.415	2.213
Tb	0.247	0.207	0.278	0.252	0.395	0.339
Dy	1.242	1.330	1.362	1.230	1.855	1.611
Ho	0.270	0.243	0.305	0.283	0.366	0.355
Er	0.798	0.801	0.787	0.846	1.133	0.961
Tm	0.133	0.124	0.144	0.102	0.156	0.161
Yb	1.019	0.904	0.957	0.920	1.263	1.110
Lu	0.140	0.113	0.159	0.130	0.142	0.164
ΣREE	88.83	77.43	97.29	96.23	129.45	109.73
(La/Yb) _N	17.42	17.79	23.95	23.91	27.34	22.15
Eu/Eu *	0.50	0.52	0.61	0.48	0.42	0.45
Rb	199.553	190.591	191.327	184.856	187.345	179.413
Sr	51.901	67.357	53.257	54.125	63.099	62.450
Ba	251.465	287.520	234.494	243.614	303.638	261.912
Th	19.157	16.342	18.123	19.995	18.153	18.474
U	5.745	2.272	3.188	2.126	2.709	3.344
Pb	35.919	33.919	29.330	27.817	27.334	26.424
Nb	32.067	16.177	21.010	17.687	18.405	19.465
Ta	2.536	1.146	1.943	1.512	1.793	1.634
Zr	114.966	78.773	100.811	102.173	101.174	103.947
Hf	4.536	2.872	4.000	3.676	3.598	3.732
Ga	22.139	18.263	19.172	17.711	20.668	20.001
Y	7.140	7.303	8.025	7.055	9.908	9.933
Ga10 ⁴ /Al	3.18	2.75	3.12	2.66	3.05	2.95

果见表 2,由表 2 可见岩石的稀土总量较低 $\Sigma\text{REE}=77.43\times 10^{-6}\sim 129.45\times 10^{-6}$,稀土元素球粒陨石标准化配分图呈右倾模式(图 5a),其中轻稀土陡倾,重稀土平滑,轻重稀土分馏明显 $[(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=17.42\sim 27.34]$,Eu 亏损明显($\delta\text{Eu}=0.42\sim 0.61$)。微量元素蛛网图显示(图 5b),Rb、K、Th、U 等大离

子亲石 元素和 Pb 元素富集,Nb、Ta、Ti 等高场强元素和 Sr、Ba 元素亏损。其稀土元素和微量元素结果与西大别大银尖花岗岩岩体几乎完全一致(Li Hongchao et al.,2012,图 5a,5b)。

3.4 Sr-Nd-Pb 同位素

全岩 Sr-Nb 同位素分析结果列于表 3,由表可

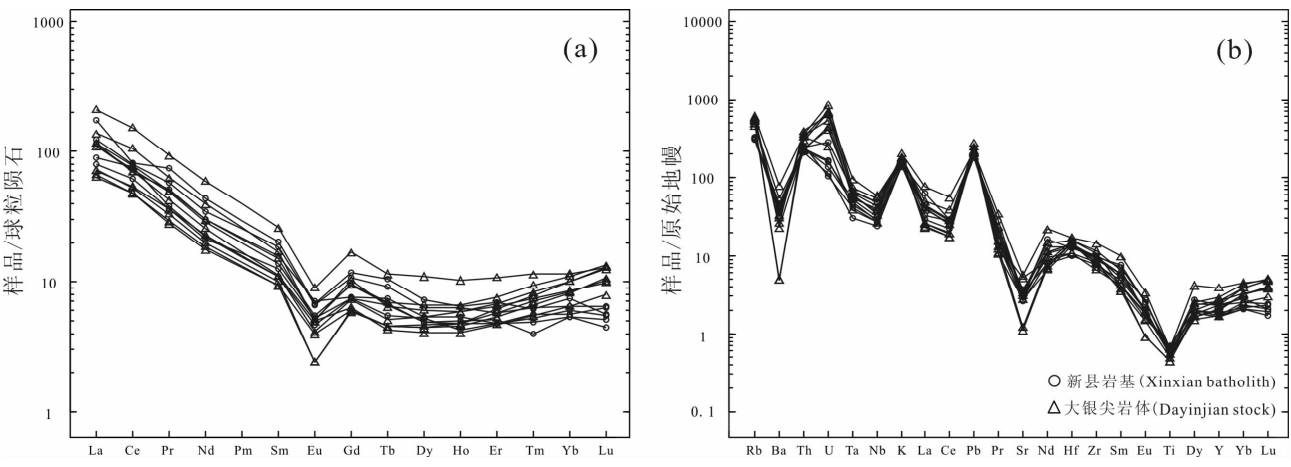


图 5 河南新县花岗岩岩基稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and trace element spider diagram (b) of the rocks for the Xinxian granitic batholith in Henan Province

大银尖花岗岩数据来源同图 4;稀土元素球粒陨石标准化配分图标准化数据 Sun Shensu et al. , 1989,

微量元素原始地幔标准化蛛图标准化数据 McDonough et al. , 1995

Dayinjian granite data source are same as fig. 4; REE normalized data are after Sun Shensu et al. , 1989,

trace elements normalized data are after McDonough et al. , 1995

见岩石的⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值分别为 4.33~9.25 和 0.714698~0.723656,按照成岩年龄($t=125.5\text{ Ma}$)计算,获得 Sr 同位素初始比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i=0.706949~0.707086。¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值变化不大,分别为 0.1051~0.1268 和 0.511863~0.511882;按照成岩年龄($t=125.5\text{ Ma}$)计算,获得 Nd 同位素初始比值 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-13.51\sim-13.65$,均值为-13.60;Nd 同位素二阶段模式年龄值 $t_{\text{DM2}}=2.12\sim2.13\text{ Ga}$,均值为 2.13 Ga。全岩 Pb 同位素测试值为²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb=16.717~17.291,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb=15.309~15.439,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb=37.599~38.000,根据 U、Th、Pb 含量及侵位年龄($t=125.5\text{ Ma}$),计算获得 Pb 同位素初始比值为(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_i=16.611~17.152, (²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_i=15.304~15.432, (²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb)_i=37.316~38.702,表明全岩铅同位素比较均一,变化范围不大。以上结果也与在西大别大银尖岩体获得的 Sr-Nd-Pb 同位素数据较为一致(Li Hongchao et al. , 2012, 表 3)。

3.5 锆石原位 Hf 同位素

锆石原位 Hf 同位素分析结果见表 4,由表可见¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf、¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值分别为 0.029057~0.087036和 0.001160~0.003374。除新元古代继承锆石(X10-10-05)外,其他岩浆锆石依据岩基成岩年龄($t=125.5\text{ Ma}$)计算,获得 Hf 同位素初始比值 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-22.92\sim-19.40$ (表 4),均值为-21.44;采用平均地壳¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值计算(Griffin et al. , 2000),

获得 Hf 同位素二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 2.39~2.61 Ga,均值为 2.52 Ga。相对来说,新元古代继承锆石显示出相对高的 Hf 初始比值 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-3.42$ 和较年轻的 Hf 同位素二阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}}=1.83\text{ Ga}$ 。

4 讨论

4.1 成因类型归属

一直以来,对分异型高硅花岗岩的成因类型判别比较困难,因为强烈的分异作用遮盖了原岩的化学组成,使得一些判别岩石成因类型的参数处于一种模棱两可的范围内,不能有效地区别岩石的成因类型。新县花岗岩岩基的 SiO₂ 介于 75.97%~78.41%之间,属于典型的高硅花岗岩。岩石的 Ga 元素的含量介于 $17.711\times 10^{-6}\sim 22.139\times 10^{-6}$ 之间, $\text{Ga}\times 10^4/\text{Al}=2.66\sim 3.18$,超出 Whalen 等(1987)厘定的 A 型花岗岩 $\text{Ga}\times 10^4/\text{Al}=2.6$ 的范围,且 K、Na 含量高,Alk 介于 7.55%~8.74%之间,这些特征指示新县花岗岩岩基相似于 A 型花岗岩,但其稀土总量较低 $\Sigma\text{REE}=77.43\times 10^{-6}\sim 129.45\times 10^{-6}$ 之间,不符合 A 型花岗岩稀土元素含量高的特点。此外岩体的 Zr、Nb、Ce、Y 等高场强元素含量也较典型的 A 型花岗岩低,四者之和介于 $171\times 10^{-6}\sim 201\times 10^{-6}$ 之间,明显低于厘定的 A 型花岗岩的下限值($\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}>350\times 10^{-6}$);同时岩石的 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 比值较低(5.54~9.90),也有别于 A 型花岗岩显著富铁的特征($\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}>$

表 3 河南新县花岗岩岩基 Sr-Nd-Pb 同位素组成

Table 3 Sr-Nd-Pb isotope compositions for the Xinxian granitic batholith in Henan Province

样品	X10-12	X10-14	X10-15	X0805 *	X0807 *	X0815 *	X0822 *	X0823 *	X0827 *	X0828 *
Rb($\times 10^{-6}$)	190.59	184.86	187.35	301.51	279.42	328.62	326.10	302.71	353.33	367.24
Sr($\times 10^{-6}$)	61.26	127.90	66.42	25.07	98.93	56.81	71.24	64.13	74.18	110.50
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	9.25	4.33	8.05	35.87	7.89	18.27	14.13	14.76	14.48	9.56
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.723656	0.714698	0.721479	0.767554	0.720634	0.738036	0.731097	0.732151	0.731689	0.723420
$\pm 2\sigma$	0.000007	0.000009	0.000012	0.000015	0.000019	0.000012	0.000010	0.000007	0.000008	0.000013
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.707086	0.706949	0.707056	0.706379	0.707173	0.706877	0.706999	0.706979	0.706994	0.707114
Sm($\times 10^{-6}$)	3.53	3.33	2.02	1.49	1.72	1.40	2.81	1.67	2.43	3.86
Nd($\times 10^{-6}$)	16.24	19.36	11.51	9.42	9.95	7.99	19.03	11.56	13.85	26.38
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1268	0.1051	0.1075	0.0971	0.0952	0.1016	0.0892	0.0868	0.1002	0.0885
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.511882	0.511863	0.511872	0.511769	0.511758	0.511786	0.511754	0.511762	0.511774	0.511767
$\pm 2\sigma$	0.000009	0.000007	0.000010	0.000007	0.000006	0.000009	0.000008	0.000007	0.000008	0.000006
t_{DM1} (Ga)	2.22	1.80	1.83	1.80	1.79	1.85	1.70	1.66	1.84	1.68
t_{DM2} (Ga)	2.13	2.13	2.12	2.17	2.18	2.15	2.18	2.17	2.16	2.16
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-13.63	-13.65	-13.51	-15.43	-15.62	-15.17	-15.6	-15.41	-15.38	-15.34
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	16.721	16.717	17.291	17.505	17.261			17.486	17.280	
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.326	15.309	15.439	15.513	15.430			15.415	15.402	
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	37.599	37.634	38.000	38.262	37.960			37.968	38.029	
$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	16.628	16.611	17.152	16.979	16.889			16.793	16.813	
$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	15.322	15.304	15.432	15.487	15.412			15.381	15.379	
$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	37.386	37.316	37.702	37.976	37.701			37.559	37.661	

注：* 数据引自 Li Hongchao et al. , 2012。

表 4 河南新县花岗岩岩基锆石 Hf 同位素组成

Table 4 Hf isotope compositions of zircon for the Xinxian granitic batholith in Henan Province

样品	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 1\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
X10-10-01	126	0.050991	0.002049	0.282126	0.000016	0.282121	-19.90	1.63	2.44
X10-10-02	123	0.060766	0.002344	0.282125	0.000016	0.282120	-20.38	1.65	2.45
X10-10-03	124	0.038393	0.001497	0.282150	0.000026	0.282147	-19.40	1.58	2.39
X10-10-04	127	0.040002	0.001629	0.282071	0.000015	0.282067	-22.16	1.69	2.57
X10-10-05	703	0.045183	0.002004	0.282264	0.000016	0.282237	-3.42	1.43	1.83
X10-10-07	124	0.065241	0.002812	0.282085	0.000014	0.282078	-21.78	1.73	2.54
X10-10-09	126	0.060873	0.002474	0.282052	0.000016	0.282046	-22.92	1.76	2.61
X10-07-11	127	0.029057	0.001160	0.282062	0.000016	0.282059	-22.30	1.69	2.58
X10-07-12	126	0.087036	0.003374	0.282066	0.000022	0.282057	-22.32	1.78	2.58
X10-07-13	128	0.071794	0.002699	0.282079	0.000022	0.282072	-21.76	1.73	2.55

10, Whalen et al. , 1987)。Whalen 等(1987)指出分异型高硅花岗岩($\text{SiO}_2 > 74\%$)也具有某些 A 型花岗岩的特征,如高 Ga、高碱等特征,这使得很难将分异型高硅花岗岩从 A 型花岗岩中区分出来,但通过 $(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO}) - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 和 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{CaO} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 判别图可以有效地将分异型花岗岩从 A 型花岗岩中区别出来,在图 6a、6b 中投影点落入分异型花岗岩范围内(FG)(Whalen et al. , 1987),这与我国东北地区(Wu Fuyuan et al. , 2003)和东南地区(邱检生等,2005)高分异 I 型花岗岩高 Ga、高碱的特点相似。

对于 Sr 含量大于 50×10^{-6} 的富硅花岗岩, A/

NKC 值不再是一个区分 I、S 型花岗岩的有效标志(Chappell, 1999),因为在这类花岗岩中 I 型花岗岩和 S 型花岗岩在 A/NKC 值 1.0~1.1 区间有一个很大的重叠范围。新县花岗岩岩基即属于此类情况,其 Sr 含量均大于 50×10^{-6} ,且 A/NKC 值介于 1.03~1.08 之间,因此仅凭 A/NKC 值无法区别 I 型或 S 型花岗岩。岩石主量元素 CIPW 标准矿物计算结果中出现刚玉分子,但含量都低于 1%,低于典型的过铝质的 S 型花岗岩的判别标准(CIPW 刚玉分子 $> 1\%$, Chappell et al. , 2001)。通常认为岩浆岩来源的 I 型花岗岩来自地壳下部,而沉积物来源的 S 型花岗岩来自地壳的上部,因此相比 S 型花

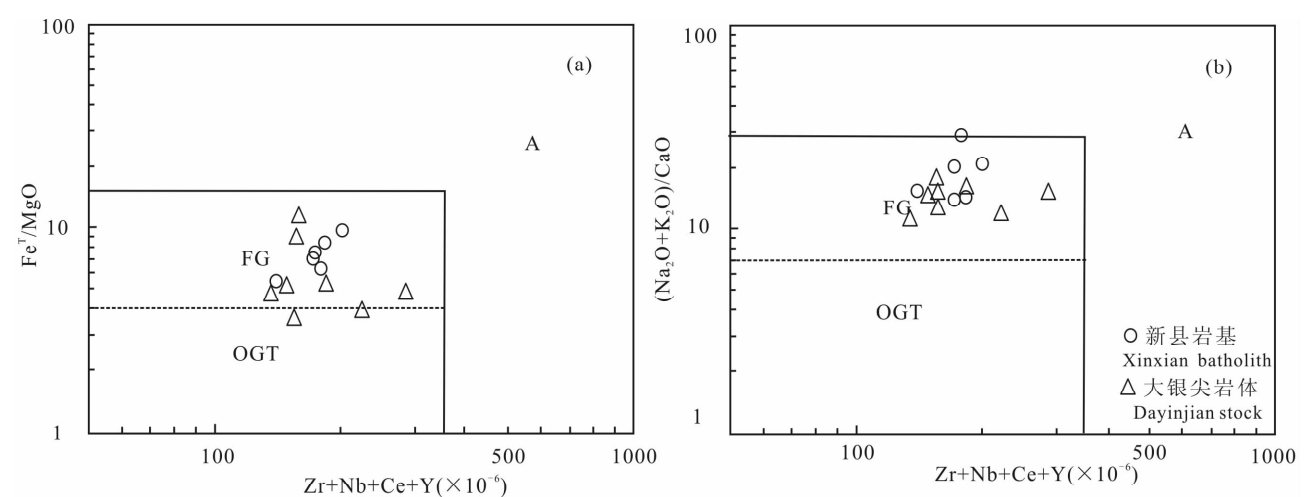


图 6 河南新县花岗岩岩基 $(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 判别图(a)、
 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 判别图 (b)
Fig. 6 The discriminated diagrams of $(\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO})$ versus $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ (a) and
 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ versus $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ (b) for the Xinxian granitic batholith in Henan Province
据 Whalen et al. ,1987,大银尖花岗岩数据来源同图 4, FG—分异的 I 型花岗岩,OGT—非分异的 I、S 和 M 型花岗岩
After Whalen et al. 1987,Dayinjian granite data source are the same as fig. 4, FG—fractionated felsic granite;
OGT—unfractionated M-, I-and S-type granite

岗岩,I 型花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低。新县花岗岩岩基的 Sr 的初始比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 介于 0.706949~0.707086 之间,更接近于下地壳成因的 I 型花岗岩,综合以上岩石化学证据我们认为新县花岗岩岩基应为分异的 I 型花岗岩。

4.2 岩石成因和源区性质

前人认为大别-苏鲁白垩纪花岗岩为俯冲扬子克拉通北缘中下地壳部分熔融形成的产物(Huang Fang et al. , 2007; Zhao Zifu et al. , 2007)。新县花岗岩岩基元素地球化学符合此特征,具有明显的陆壳元素地球化学特征:高的 SiO_2 含量和较低的 CaO 、 MgO 、 FeO 以及相容元素 Cr 、 Co 、 Ni 含量,富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素和重稀土元素。同时低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和老的 Nd 、 Hf 二阶段模式年龄也指示其为陆壳来源,岩石的 Sr - Nd - Pb - Hf 等同位素组成变化范围小,指示了岩体的源区相对简单均一,与 Xu Haijin 等(2007)提出的大别地区白垩纪花岗岩中的晚期花岗岩相似,来自均一下地壳的部分熔融,而未有混染以及岩浆混合等复杂成岩作用的参与。

岩石的 CaO 、 Sr 含量和 Sr/Y 比值低, Eu 中度亏损,稀土元素配分模式整体呈中间低两端高的下凹模式(图 5a),这些地球化学特征指示岩体来源于残留相富集斜长石、角闪石而亏损石榴石的部分熔融岩浆,根据部分熔融经验这样的残留相只能形成

于压力小于 10^9Pa 、深度小于 35 km 的长英质或玄武质的部分熔融体系(Beard et al. , 1991; Wolf et al. , 1994; Rapp et al. , 1995; Springer et al. , 1997),因此,我们推测新县花岗岩岩基可能是下地壳物质在深度小于 35 km 条件下部分熔融的产物。

大别-苏鲁中生代花岗岩源区问题一直是众多学者关注的热点。多数学者研究认为大别-苏鲁地区早白垩世中酸性岩是俯冲华南扬子陆壳北缘部分熔融的产物(Zhao Zifu et al. , 2007; Huang Jie et al. , 2006),而三叠纪时期俯冲进入地幔的扬子岩石圈地幔和地壳(郑永飞,2008)主要由新元古代岩浆岩以及少量新元古代-古生代沉积岩组成(Zheng Yongfei et al. , 2005; Wu Yuanbao et al. , 2006; Tang Jun et al. , 2008),但在西大别地区这种结论尚未得到有力的证实。我们通过与华北、长江中下游及以南、扬子板块北缘等地区的 Sr - Nd - Pb - Hf 同位素组成对比,发现大别白垩纪花岗岩、大别杂岩(以大别片麻岩和榴辉岩为代表)以及扬子北缘的 TTG 型岩浆岩三者之间,在元素地球化学和 Sr - Nd - Hf 同位素组成上极为相似,指示它们在源区上有密切的联系。

新县花岗岩岩基全岩铅同位素以低放射性成因 Pb 同位素组成为特征,与张理刚等(1995)给出的大别山不同构造单元白垩纪花岗岩类长石的 Pb 同位素组成范围($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.40\sim17.30$, $^{207}\text{Pb}/$

$^{204}\text{Pb}=15.10\sim15.50$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.40\sim38.10$) 一致。在 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i-(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 和 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i-(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图解上(图 7a, 7b), 新县花岗岩岩基铅同位素组成与鲁西-胶北、太行以及华南地区有所区别, 而较吻合于扬子板块北缘铅同位素(以大别-苏鲁造山带超高压榴辉岩和片麻岩为代表)。

新县花岗岩岩基全岩铅 Sr-Nd 同位素组成亦明显不同于华南板块、太行、庐纵以及鲁西-胶北地区的 Sr-Nd 同位素组成, 投影点全部落入大别白垩纪花岗质岩、大别花岗片麻岩以及扬子板块北部新元古代 TTG 型岩浆岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 重叠范围内(图 8)。大别白垩纪花岗质岩的投影点全部落在大别片麻岩的范围内, 但相比大别片麻岩, 扬子新

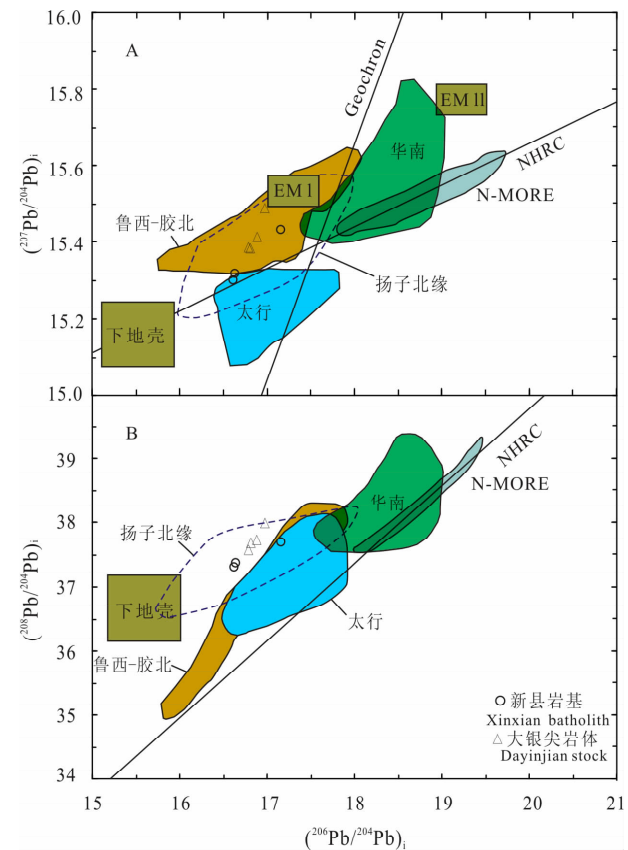


图 7 河南新县花岗岩岩基 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i-(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (a) 和 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i-(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (b) 图解

Fig. 7 The $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ versus $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (a) and $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ versus $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (b) diagrams of the rocks of the Xinxian granitic batholith in Henan Province 据 Huang Fang et al., 2007 修改, 引用文献转引自该文, 大银尖花岗岩岩数据来源于同图 4, MORB, EM I, EM II 和 Lower crust 据 Zindler et al., 1986, $t=125$ Ma Modified after Huang Fang et al., 2007 and references therein, Dayinjian granite data source are same as fig. 4, MORB, EM II and Lower crust data after Zindler et al., 1986, $t=125$ Ma

元古代 TTG 型岩浆岩的范围(图 8)几乎与大别白垩纪花岗质岩的范围一致, 说明扬子新元古代 TTG 型岩浆岩更有可能是大别地区白垩纪花岗质岩的源岩。片麻岩与白垩纪花岗岩在 Sr-Nd 同位素组成上有很大相似性, 说明它们在成因上可能有一定的联系, 但并非是源岩与演化岩石的关系, 这点将在论文后面进行讨论。Zhang Shaobing 等(2008, 2009)认为扬子北缘新元古代中期 TTG 型岩浆岩的源岩为元古代-太古代古老地壳物质, 与其相关的 Nd 二阶段模式年龄和 Hf 二阶段模式年龄分别为 $2.07\sim2.27\text{Ga}$ 和 $2.07\sim2.79\text{Ga}$, 而新县花岗岩岩基的 Nd 模式年龄和 Hf 模式年龄也与之一致(表 4), 分别为 $2.12\sim2.13\text{Ga}$ 之间和 $2.38\sim2.61\text{Ga}$ 之间。在整个大别地区, 白垩纪花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都较低, 主要集中在 $-30\sim-15$ 之间, Hf 二阶段模式年龄较老, 主要集中在 $1.9\sim3.0\text{Ga}$ 之间(续海金等, 2008), 这些特征都与扬子板块北缘的 TTG 型岩浆岩相吻合。而大别片麻岩则有相对高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 比值及较年轻的 Hf 模式年龄, 分别为 $-8\sim15\text{Ga}$ 和 $1.0\sim2.0\text{Ga}$ 之间(Zhao Zifu et al., 2008), 显著的 Hf 同位素差异指示大别白垩纪花岗岩的源岩不太可能是前人认为的片麻岩(Zhang Hongfei et al., 2002, 2003; Xu Haijin et al., 2012), 而扬子北缘的新元古代 TTG 型岩浆岩可能才是大别白垩纪花岗岩较

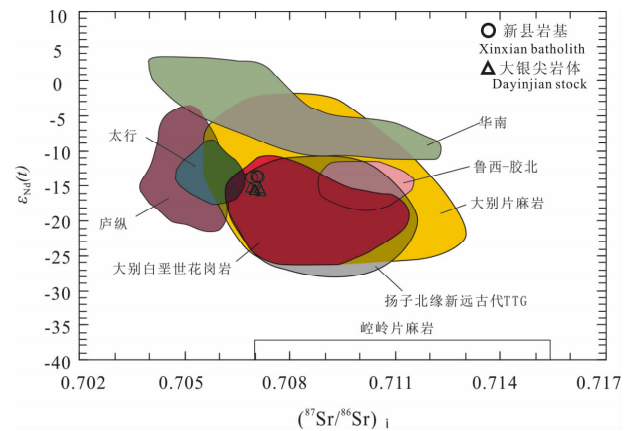


图 8 河南新县花岗岩岩基 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解

Fig. 8 The $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ versus $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of the Xinxian granitic batholith in Henan Province

据赵子福等, 2009 修改, 数据来源转引自该文, 扬子北缘新元古 TTG 数据来自 Zhang Shaobing et al., 2008, 2009, 大银尖花岗岩数据同图 4, $t=125$ Ma

Modified after Zhao Zifu et al., 2009 and references therein, the TTG of north Yangtze Block are from Zhang Shaobing et al., 2008, 2009, Dayinjian granite data source are same as fig. 4, $t=125$ Ma

为合理的源岩。

综合以上 Sr-Nd-Pb-Hf 等同位素示踪结果,我们认为新县花岗岩岩基等西大别白垩纪花岗岩更为合理的源岩可能应该是扬子北缘的新元古代 TTG 型岩浆岩。大别片麻岩虽然不是大别白垩纪花岗岩的源岩,但二者之间 Sr-Nd-Pb 同位素组成极为相似,指示它们在源区上有密切的联系。大量锆石 U-Pb 定年研究表明,大别片麻岩原岩主要为扬子陆块北缘新元古代中期(780~740 Ma)岩浆岩(Hacker et al., 1998; Zheng Yongfei et al., 2003, 2004; Chen Yi et al., 2006; 赵子福等, 2009),它是在三叠纪中期(240~225Ma)俯冲进入地球深部的扬子北缘下地壳,在经历超高压变质作用后迅速折返的产物(郑永飞, 2008)。Zheng Yongfei 等(2006)和赵子福等(2009)认为,俯冲的扬子地壳分为上、中、下地壳 3 层,大别片麻岩是上、中地壳经历超高压折返作用后形成的,而白垩纪花岗岩则是下地壳经过深融作用形成的。从这个角度讲,大别片麻岩应与白垩纪花岗岩拥有共同的源区,即俯冲扬子地壳北缘,但它们分别来自扬子地壳的不同层位,在俯冲过程中分别发生了超高压变质作用和碰撞后深熔作用(赵子福等, 2009),因此它们两者之间不是源岩与演化岩浆这种母子关系,而是扬子地壳的不同层位经历了两种不同演化方式的产物,印证了它们在地球化学和同位素组成上存在的亲缘性。

4.3 地球化学动力学背景

与新县花岗岩岩基成岩同期,西大别地区在白垩纪早期发生过一期大规模的岩浆作用,形成了灵山和夏店两个花岗岩岩基,以及宝安寨、大银尖、汤家坪、千鹅冲、母山等一系列小的花岗岩岩株,其形成时代主要介于 120~130Ma 之间(陈江峰等, 1995; Ma Changqian et al., 1998; 周红升等, 2009; 魏国庆等, 2010; 杨梅珍等, 2011; Li Hongchao et al., 2012)。在这一时期东大别地区也发生了一次大规模的两阶段岩浆作用,早阶段为~132Ma 层状含角闪石的花岗岩,被认为是地壳物质在深度大于 50 km 加厚下地壳发生部分熔融的产物;晚阶段为~128 Ma 的未发生形变且不含角闪石的花岗岩,被认为是地壳物质在小于 35km 下地壳发生部分熔融的产物(Xue Feng et al., 1997; Hacker et al., 1998; 薛怀民等, 2002; 马昌前等, 2003; Bryant et al., 2004; Zhao Zifu et al., 2004, 2007; Xie Zhi et al., 2006; Xu Haijin et al., 2007)。我们认为区分这两期成岩作用的重要证据

除了年龄上的差别,就是岩体是否发生形变和是否含有角闪石。而在西大别地区岩体年龄都小于 130Ma,且未发现形变也不含有角闪石,结合前面稀土元素特征(图 4a),表明西大别花岗岩的成岩作用应与东大别地区白垩纪晚阶段成岩作用相对应,是在深度小于 35km,非加厚下地壳部分熔融的产物,处于造山作用的最后阶段。

华南板块于三叠纪(~240Ma)俯冲进入华北陆块之下形成的大陆碰撞型造山带(Li Shuguang et al., 1993, 1994; Ames et al., 1993, 1996; Zhang Kaijun et al., 1997; Zheng Yongfei et al., 2002, 2003),深俯冲大陆岩石圈可能在上地幔顶部停滞几十个至上百个百万年后才发生熔融(赵子福等, 2009),直至白垩纪早期 130 Ma 左右,造山带碰撞造山后由挤压收缩向拉张伸展转换,加厚造山带发生拉张垮塌,地幔物质上涌,俯冲的扬子下地壳由于受到地幔物质的加热发生了部分熔融,并在拉张伸展的构造背景下侵入于地壳上部,最终形成西大别地区早白垩世花岗岩。

5 结论

(1)新县花岗岩岩基具有高硅、富碱,贫镁、铁和钙,富集轻稀土元素、大离子亲石元素(Rb、K、Th、U)和 Pb,亏损重稀土元素、高场强元素(Nb、Ta、Ti)和 Sr、Ba 的特征,属于高钾钙碱性 I 型花岗岩,是下地壳物质在深度小于 35km 环境下部分熔融作用的产物。

(2)全岩 Sr-Nd-Pb 同位素和锆石原位 Hf 同位素示踪表明,新县花岗岩岩基来源于扬子北缘下地壳,其成分可能类似于扬子北缘新元古代 TTG 型岩浆岩。

(3)锆石 U-Pb 定年表明,新县花岗岩岩基属于早白垩世产物,是在构造环境由挤压收缩向拉张伸展转换,加厚下地壳发生垮塌,地幔物质上涌,诱发俯冲的扬子下地壳部分熔融背景下形成的。

注 释

①河南省地质局区域地质调查队. 1981. 新县(大悟)幅 1/20 万区域地质调查报告, 1~273.

参 考 文 献

陈江峰, 谢智, 刘顺生, Foland K A. 1995. 大别造山带冷却年龄的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和裂变径迹年龄测定. 中国科学(D 辑), 25(10): 1086~1092.
从柏林. 1996. 大别-苏鲁造山带超高压变质岩. 北京: 科学出版社, 1~285.

- 郭铁朋. 2007. 天目山钼矿区地球化学特征及找矿标志. 物探与化探, 31(4): 309~312.
- 高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 林雨萍, 濮巍. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析. 南京大学学报(自然科学版), 39(6): 844~850.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(2): 595~2604.
- 李世长, 陈宗驯, 徐万斌. 1993. 大别山地区同位素年龄与区域变质作用构造运动关系. 合肥工业大学学报(自然科学), 16(3): 159~164.
- 李石, 王彤. 1991. 桐柏山一大别山花岗岩类地球化学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~208.
- 马昌前, 杨坤光, 许长海, 李志昌, Carl E. 1999. 大别山中生代钾质岩浆作用与超高压变质地体的剥露机理. 岩石学报, 15(3): 379~395.
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 林广春. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据. 中国科学, 33(9): 817~827.
- 邱顺才. 2006a. 河南省母山钼矿地质特征及找矿方向. 矿产与地质, 20(4~5): 403~408.
- 邱顺才. 2006b. 河南大银尖钨钼(铜)矿床地质特征. 矿业快报, 447(8): 62~64.
- 邱检生, 胡建, 王孝磊, 蒋少涌, 王汝成, 徐夕生. 2005. 广东河源白石冈岩体: 一个高分异的 I 型花岗岩. 地质学报, 79(4): 503~514.
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 张开钧, 李惠民, 杨杰东. 2006. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学特征. 岩石学报, 22(5): 1215~1224.
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 李惠民, 杨杰东. 2007. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究. 岩石学报, 23(7): 1749~1755.
- 魏国庆, 高昕宇, 赵太平, 陈伟, 杨岳衡. 2010. 大别山北麓汤家坪花岗岩斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和岩石地球化学特征及其对岩石成因的制约. 岩石学报, 26(5): 1550~1562.
- 续海金, 叶凯, 马昌前. 2008. 北大别早白垩世花岗岩类 Sm-Nd 和锆石 Hf 同位素及其构造意义. 岩石学报, 24: 87~103.
- 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 2002. 北大别东部白垩纪埃达克质火山岩及其锆石 U-Pb 年代学. 地球化学, 31(5): 455~463.
- 杨梅珍, 曾键年, 覃永军, 李法岭, 万守权. 2010. 大别山北缘千鹅冲斑岩型钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年代学及其地质意义. 地质科技情报, 29(5): 35~45.
- 杨梅珍, 曾键年, 李法岭, 潘思东, 陆建培, 任爱群. 2011. 河南新县大银尖钼矿床成岩成矿作用地球化学及地质意义. 地球学报, 32(3): 279~292.
- 杨泽强. 2007. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿铼-钼同位素年龄及地质意义. 矿床地质, 26(3): 289~295.
- 张理刚, 刘敏秀, 王可法. 1995. 东亚岩石圈块体地质-地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其地球动力学. 北京: 科学出版社, 1~252.
- 赵子福, 郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因. 中国科学(D辑): 地球科学, 39(7): 888~909.
- 郑永飞. 2008. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. 科学通报, 53(18): 2129~2152.
- 周红升, 苏华, 马昌前. 2009. 灵山岩体的形成时代、构造背景及其 A 型花岗岩的厘定. 信阳师范学院学报(自然科学版), 22(2): 222~226.
- Ames L, Tilton G R, Zhou Gaozhi. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. *Geology*, 21: 339~342.
- Ames L, Zhou Gaozhi, Xiong Baocheng. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for the collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 15: 472~489.
- Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59~79.
- Beard J S, Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kbar. *Journal of Petrology*, 32: 365~401.
- Blichert-Toft J, Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243~258.
- Bryant D L, Ayers J C, Gao S, Miller C F, Zhang H F. 2004. Geochemical, age, and isotopic constraints on the location of the Sino-Korean/Yangtze Suture and evolution of the Northern Dabie Complex, east central China. *Geological Society of America Bulletin*, 116(5-6): 698~717.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46: 535~551.
- Chappell B W, White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 489~499.
- Chen Yi, Ye Kai, Liu Jingbo, Sun Min. 2006. Multistage metamorphism of the Huangtuling granulite, Northern Dabie Orogen, eastern China: Implications for the tectonometamorphic evolution of subducted lower continental crust. *Journal of Metamorphic Geology*, 24: 633~654.
- Ernst W G, Tsujimori T, Zhang Ruth, Liu J G. 2007. Permo-Triassic collision, subduction-zone metamorphism, and tectonic exhumation along the East Asian continental margin. *Earth and Planetary Sciences*, 35: 73~110.
- Gerstenberger H, Haase G. 1997. A highly effective emitter substance for mass spectrometric Pb isotope ratio determinations. *Chemical Geology*, 136(3~4): 309~312.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, E van Achterbergh, Suzanne Y O'Reilly, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICP-MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Hacker B R, Wang X, Eide E A. 1996. The Qinling-Dabie ultrahigh-pressure collisional orogen. In: Yin A, Harris T M (Eds). *The Tectonics of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 345~370.
- Hacker B R, Ratschbacher L W, Webb L, Ireland T, Walker D, Dong S W. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215~230.
- He Yongsheng, Li Shuguang, Hoefs J, Huang Fang, Liu Sheng'ao, Hou Zhenhui. 2007. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen: New evidence for partial melting of a thickened continental crust. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 75: 3815~3838.
- Huang Jie, Zheng Yongfei, Zhao Zifu. 2006. Melting of subducted continent: element and isotopic evidence for a genetic

- relationship between Neoproterozoic and Mesozoic granitoids in the Sulu orogen. *Chemical Geology*, 229: 227~256.
- Huang Fang, Li Shuguang, Dong Feng, Li Qiuli, Chen Fukun, Wang Ying, Yang Wei. 2007. Recycling of deeply subducted continental crust in the Dabie Mountains, central China. *Lithos*, 96: 151~169.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211: 47~69.
- Jahn B M, Wu Fuyuan, Lo Chinghua, Tsai C H. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157: 119~146.
- Li Hongchao, Xu Zhao wen, Lu Xiancai, Chen Wei, Qu Wenjun, Fu Bing, Yang Xiaonan, Yang Jie, Chen Jinquan. 2012. Constraints on the timing and origin of the Dayinjian intrusion and associated molybdenum mineralisation at the western Dabie orogen, central China. *International Geology Review*, 54: 1579~1596.
- Li Shuguang, Xiao Yilin, Liu Deliang, Chen Yizhi, Ge Ningjie, Zhang Zongqing, Sun Shensu, Cong Bolin, Zhang Ruyuan, Hart S R, Wang Songshan. 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 89~111.
- Li Shuguang, Wang Songshan, Chen Yizhi, Liu Deliang, Qiu Ji, Zhou Hongxing, Zhang Zhimin. 1994. Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods. *Chemical Geology*, 112: 343~350.
- Li Shuguang, Jagoutz E, Lo Chinghua, Chen Yizhi, Li Qiuli, Xiao Yilin. 1999. Sm/Nd, Rb/Sr, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt, Central China: A retrospective view. *International Geology Review*, 41: 1114~1124.
- Liu Xiaochun, Jahn B M, Liu Danyi, Dong Shuwen, Li Sanzong. 2004. HRIMP U-Pb zircon dating of a metagabbro and eclogites from western Dabieshan (Hong'an Block), China, and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 394: 171~192.
- Ludwig K R. 2001. Using Isoplot/EX, version 2. 49. In: A geochronological toolkit for Microsoft excel. Berkeley, CA, Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1~55.
- Ma Changqian, Li Zhichang, Ehlers C, Yang Kunguang, Wang Renjing. 1998. A postcollisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China. *Lithos*, 45: 431~456.
- McDonough W F, Sun Shensu. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223~253.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar, implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891~931.
- Ratschbacher L, Hacker B R., Webb L E, McWilliams M, Ireland T, Dong Shuwen, Calvert A, Chateigner D, Wenk H R. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *Journal of Geophysical Research*, 105: 13339~13364.
- Scherer E, Munker C, Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 293: 683~687.
- Springer W, Seck H A. 1997. Partial fusion of basic granulite at 5 to 15 kbar: implications for the origin of TTG magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127: 30~45.
- Sun Shensu, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: Saunderson A D and Norry M J (eds). *Magmaism in the ocean basins*. Geology Society Special Publications, 42: 313~345.
- Tang Jun, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, Cong Bing, Zha Xiangping, Liu Xiaoming. 2008. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the tectonic affinity of the Jiaodong terrane in the Sulu orogen, China. *Precambrian Research*, 161: 389~418.
- Todt W, Cliff R A, Hanser A. 1996. Evaluation of a ^{202}Pb - ^{205}Pb double spike for high-precision lead isotope analysis. *Geophys Monogr*, 95: 429~437.
- Vervoort J, Bichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 63: 533~556.
- 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.
- Wolf M B, Wyllie P J. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115: 369~383.
- Wu Fuyuan, Jahn B M, Wilde S A, Lo Chinghua, Yui T F, Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I), geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66: 241~273.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554~1569.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Gong Boling, Liu Xiaoming, Wu Fuyuan. 2006. U-Pb, Hf and O isotope evidence for two episodes of fluid-assisted zircon growth in marble-hosted eclogites from the Dabie orogen. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 70: 3743~3761.
- Xie Zhi, Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, Wang Zhengrong, Chen Jiangfeng, Liu Xiaoming, Wu Fuyuan. 2006. Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen. *Chemical Geology*, 231: 214~235.
- Xu Haijin, Ma Changqian, Ye Kai. 2007. Early Cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry. *Chemical Geology*, 240(3~4): 238~259.
- Xu Haijin, Ma Changqian, Zhang Junfeng, Ye Kai. 2012. Early Cretaceous low-Mgadakitic-granites from the Dabie orogen, eastern China: Petrogenesis and implications for destruction of the over-thickened-lower-continental crust. *Gondwana Research*, 23: 190~207.
- Xu Shutong, Okay A I, Ji Shouyuan, Sengor A M C, Su Wen, Liu Yican, Jiang Laili. 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256: 80~82.

- Xue Feng, Rowley D B, Tucker R D, Peng Zhanxu. 1997. U-Pb zircon ages of granitoids rocks in the North Dabie complex, eastern Dabie Shan, China. *The Journal of Geology*, 105: 744~753.
- Zhang Kaijun. 1997. North and South China collision along the eastern and southern North China margins. *Tectonophysics*, 270: 145~156.
- Zhang Hongfei, Gao Shan, Zhong Zengqiu, Zhang Benren, Zhang Li, Hu Shenhong. 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids, constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China. *Chemical Geology*, 186: 281~299.
- Zhang Hongfei, Zhang Benren, Zhong Zengqiu, Suo Shutian, Zhang Haizu, Wang Linsen. 2003. Pb isotopic geochemical study on the crustal structure of Tongbaishan. *Progress in Natural Science*, 13: 63~68.
- Zhang Hongfei, Zhong Zengqiu, Gao Shan, Zhang Benren, Zhang Li, Hu Shenghong, Hou Qingye. 2004. Pb and Nd isotopic composition of the Jigongshan granite, constraints on crustal structure of Tongbaishan in the middle part of the Qinling-Tongbai-Dabie orogenic belt, Central China. *Lithos*, 73: 215~227.
- Zhang Shaobing, Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, Yuan Honglin, Wu Fuyuan. 2008. Neoproterozoic anatexis of Archean lithosphere: Geochemical evidence from felsic to mafic intrusions at Xiaofeng in the Yangtze Gorge, South China. *Precambrian Research*, 163: 210~238.
- Zhang Shaobing, Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, Yuan Honglin, Wu Fuyuan. 2009. Origin of TTG-like rocks from anatexis of ancient lower crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic granitoids in South China. *Lithos*, 113: 347~368.
- Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Wei Chunsheng, Wu Yuanbao. 2004. Zircon isotope evidence for recycling of subducted continental crust in post collisional granitoids from the Dabie terrane in China. *Geophysical Research Letter*, 31: 1029~1033.
- Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Wei Chunsheng, Wu Yuanbao, Chen Fukun, Jahn B M. 2005. Zircon U-Pb age, element and C-O isotope geochemistry of post-collisional mafic-ultramafic rocks from the Dabie orogen in east-central China. *Lithos*, 83: 1~28.
- Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Wei Chunsheng, Wu Yuanbao. 2007. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust. *Lithos*, 93: 248~272.
- Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Wei Chunsheng, Chen Fukun. 2008. Zircon U-Pb ages, Hf and O isotopes constrain the crustal architecture of the ultrahigh-pressure Dabie orogen in China. *Chemical Geology*, 253: 222~242.
- Zheng Yongfei, Wang Zhengrong, Li Shuguang, Zhao Zifu. 2002. Oxygen isotope equilibrium between eclogite minerals and its constraints on mineral Sm-Nd chronometer. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 66: 625~634.
- Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Li Shuguang, Cong Boling. 2003. Oxygen isotope equilibrium ultrahigh-pressure metamorphic minerals and its constraints on Sm-Nd and Rb-Sr chronometers. *The Geology Society Special Publications*, 220: 93~117.
- Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, Chen Fukun, Gong Bing, Li Long, Zhao Zifu. 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 68: 4145~4165.
- Zheng Yongfei, Zhou Jianbo, Wu Yuanbao, Xie Zhi. 2005. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: a passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. *International Geology Review*, 47: 851~871.
- Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, Zhang Shaobing, Liu Xueming, Wu Fuyuan. 2006. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. *Chemical Geology*, 231: 135~158.
- Zindler A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annual review of earth and planetary sciences*, 14: 493~571.

Petrogenesis and Origin of the Xinxian Granitic batholith in Henan Province and Its Implication for the Tectonic Evolution of the Western Dabie Area

CHEN Wei¹⁾, XU Zhaowen¹⁾, LI Hongchao¹⁾, YANG Xiaonan^{1,2)},
CHEN Jinquan¹⁾, WANG Hao¹⁾, WANG Shaohua¹⁾

1)State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, School of Earth Sciences and Engineering,
Nanjing University, Nanjing, 210093; 2)Geological Museum of China, Beijing,100034

Abstract

In this study, we carried out a comprehensive research using zircon U-Pb dating, petrogeochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotope analysis on the Xinxian granitic batholith to investigate its age, petrogenesis, rock source and geochemical dynamic background. Analysis shows that the Xinxian granitic batholith has a zircon ²³⁸U-²⁰⁶Pb age of 125.5±1.5 Ma. Whole-rock chemical compositions are characterized by high silica and alkali contents, lower values in Mg, Fe and Ca. The granites are enriched in light REE and large ion lithophile elements (Rb, K, Th, U) and Pb, but depleted in heavy REE, high field strength elements (Nb, Ta, and Ti), Sr, and Ba. Isotopic analyses of the Xinxian granitic batholith yielded initial Sr ratios (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i ranging from 0.706949 to 0.707086, low initial Pb isotopic ratios [(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_i=16.611~17.152, (²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_i=15.304~15.432, (²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb)_i=37.316~38.702], as well as low ε_{Nd}(t) values (-13.65 ~ -13.51) and old Nd model ages (t_{DM2}=2.12~2.13 Ga). Zircon has low ε_{Hf}(t) values (-22.92 ~ -19.40) and old Hf model ages (t_{DM2}=2.39~2.61 Ga). Based on the results of the whole-rock geochemistry, geochronology and isotopic compositions, it can be concluded that the Xinxian granitic batholith belongs to a high-K calc-alkaline fractionated I-type granite, which resulted from partial melting of the lower crust of Yangtze Block which probably consists of Neoproterozoic TTG-like magmatic rocks at the northern margin of the Yangtze Block under a non-thickened lower crust setting (<35 km).

Key words: Zircon U-Pb dating; Sr-Nd-Pb-Hf isotopes; petrogeochemistry; western Dabie region; belt; Xinxian granitic batholith; central-east China

