

doi:10.3799/dqkx.2016.507

豫南新县岩体地球化学、年代学和 Hf 同位素特征及地质意义

刘清泉^{1,2,3}, 邵拥军^{1,2*}, 陈昕梦⁴, 刘忠法^{1,2}, 张喆³

1. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083

3. 河南省有色金属地质勘查总院, 河南郑州 450052

4. 河南省有色金属地质矿产局第七地质大队, 河南郑州 450016

摘要: 新县岩体位于秦岭—大别造山带上, 对其进行系统的岩石地球化学探讨有助于加深对秦岭—大别造山带中生代构造—岩浆演化及地球动力学背景的认识。岩石地球化学分析结果显示, SiO₂ 含量为 74.94%~78.16%, K₂O 含量为 3.87%~5.86%, Na₂O 含量为 3.82%~4.24%, Al₂O₃ 含量为 12.38%~13.57%, 具有高钾钙碱性和过铝质(A/CNK=1.05~1.11)特征。岩石稀土总量较低(42.67×10⁻⁶~110.45×10⁻⁶), 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损, 具有 Eu 的负异常, 岩体富集 Rb、U、Hf 和 Y, 亏损 Ba、Nb、Ta 和 Ti, 显示出 I 型高分异花岗岩的特点。3 个期次岩石的 U-Pb 年龄分别为 153.4±1.1 Ma、146.4±1.6 Ma 和 131.6±1.8 Ma。锆石 Hf 同位素分析结果表明, 新县岩体的 ε_{Hf}(t) 值为 -24.5~-20.3, 位于地幔演化线之下, t_{DM2} 值为 2.68~2.93 Ga, 指示其源于扬子板块北缘的古老地壳, 其组成类似于扬子板块北缘 TTG 型岩浆岩。结合区域地质背景, 新县岩体形成于扬子陆块与华北陆块碰撞造山后的陆内伸展环境, 对应的地球动力学背景为晚侏罗世—早白垩世地壳从挤压收缩向区域性伸展的构造体制大转换过程和大规模的地壳伸展和岩石圈减薄时期。

关键词: 大别山; 新县; 花岗岩; 岩石学; 地球化学; 年代学; Hf 同位素。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2016)08-1275-20

收稿日期: 2015-03-28

Petrogeochemistry, Geochronology and Hf Isotopes of the Monzogranite from Xinxian, Southern Region in Henan Province

Liu Qingquan^{1,2,3}, Shao Yongjun^{1,2*}, Chen Xinmeng⁴, Liu Zhongfa^{1,2}, Zhang Zhe³

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

3. Henan Nonferrous Metals Geological Exploration Institute, Zhengzhou 450052, China

4. The Seventh Geological Brigade of Henan Nonferrous Metals Geological Mineral Resources Bureau, Zhengzhou 450016, China

Abstract: Xinxian monzogranites are located at the Qinling-Dabie orogenic belt, and a systematic geochemical study can facilitate further studies on the Mesozoic tectono-magmatic evolution and the geodynamics background of Qinling-Dabie orogenic belt. This paper presents geochemistry, zircon U-Pb geochronology, and Hf-isotopic data of the rocks, with the aim of constraining their petrogenesis, sources and tectonic implications. The geochemical analysis shows that Xinxian monzogranites are characterized by SiO₂=74.94%–78.16%, K₂O=3.87%–5.86%, Na₂O=3.82%–4.24%, Al₂O₃=12.38%–13.57%, A/CNK=1.05–1.11; the rocks are enriched in LREE, depleted HREE and negative Eu anomalies, enriched in Rb, U, Hf, Y and depleted Ba, Nb, Ta, Ti, which indicates that Xinxian monzogranites are peraluminous, high-K calc-alkaline I-type

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查评价专项(No. 12120113091200); 中南大学创新驱动计划项目(No. 2015CX008)。

作者简介: 刘清泉(1982—), 男, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: liu_qingquan@126.com

* **通讯作者:** 邵拥军, E-mail: shaoyongjun@126.com

引用格式: 刘清泉, 邵拥军, 陈昕梦, 等, 2016. 豫南新县岩体地球化学、年代学和 Hf 同位素特征及地质意义. 地球科学, 41(8): 1275–1294.

granite. The three stages yield LA-ICP-MS zircon U-Pb ages 153.4 ± 1.1 Ma, 146.4 ± 1.6 Ma and 131.6 ± 1.8 Ma respectively. According to zircon Hf isotope analysis, the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the granite range from -24.5 to -20.3 , which locates below the depleted mantle line. The t_{DM2} values range from 2.68 to 2.93 Ga, which indicates the monzogranites resulted from the lower crust of Yangtze Block. The component of the monzogranite is similar to that of Neoproterozoic TTG magmatic rocks. Xinxian monzogranites were emplaced after the major collisional period of the North China block and Yangtze block, in the post-collisional tectonic setting under the regional extension mechanism. The geodynamics setting is the transformation of tectonic regime of the Late Jurassic-Early Cretaceous and large-scale lithosphere delaminating thinning under post stretching mechanism.

Key words: Dabie mountain; Xinxian; monzogranite; petrology; geochemistry; geochronology; Hf isotope.

0 引言

秦岭—大别造山带位于扬子板块向华北板块俯冲碰撞的过渡带,是扬子板块向华北板块俯冲碰撞后经历多阶段构造演化的产物(徐树桐等,1992;杨巍然等,1999;汤加富等,2003;王勇生等,2004;翟明国,2008).造山带东端被郟庐断裂截切,西端通过南阳盆地与秦岭造山带连接.大别超高压变质带是迄今为止世界上规模最大的超高压变质带(Hacker *et al.*, 1996, 1998; Zhang, 1997; Liu *et al.*, 2004),同时区内中生代岩浆活动比较强烈,前人研究成果表明,东秦岭—大别地区中生代岩浆岩的形成时代主要集中在 145~110 Ma (Wei *et al.*, 2001; 刘敦一等,2002; 薛怀民等,2002; Bryant *et al.*, 2004; Ma *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2007).对该地区燕山期花岗岩形成时代、岩石成因以及物质来源的研究,对于人们认识碰撞造山带的构造演化和岩石成因具有重要的理论意义.近年来,随着对该地区勘查投入的大幅度增加,人们相继发现了汤家坪、千鹅冲、沙坪沟等大型钼矿床,同时还发现了一大批中小型矿床,它们与东秦岭钼成矿带相连,构成了中国最大的钼矿省(黄典豪,1994;李厚民,2007;李诺,2007;Mao *et al.*, 2011b).

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 (李石和王彤,1991).近年来超大型及大中型钼矿床被陆续发现,备受地质工作者的瞩目,其构造演化、成岩成矿时代及成矿背景是大家共同关注的主要科学问题.特别是在豫南大别山地区开展的大量地质科研工作,学者们在厘定成岩成矿时代方面取得了丰硕成果,其中以对与豫南大别山钼矿形成有关的燕山期中酸性深源浅成小斑岩体的研究颇为集中,获得了一大批岩石年代

学数据,如汤家坪花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 121.6 ± 4.6 Ma (魏庆国等,2010),千鹅冲花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 129.0 ± 2.0 Ma (高阳等,2014),大银尖花岗斑岩 U-Pb 年龄为 124.9 ± 1.3 Ma (Li *et al.*, 2012),陡坡二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 124.21 ± 0.28 Ma (孟芳,2013),母山花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 142.0 ± 1.8 Ma (杨梅珍等,2011b),肖畎似斑状花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 139.30 ± 0.64 Ma (杨泽强和唐相伟,2015),姚冲二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 139.6 ± 2.0 Ma (刘清泉等,2015).

新县岩体虽然与区内成矿没有直接的关系,但是对其进行系统的岩石地球化学探讨有助于对秦岭—大别造山带中生代构造—岩浆演化及地球动力学背景加深认识.目前已有学者对新县岩体做了初步研究,周红升等(2013)获得的花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 134.3 ± 1.4 Ma,陈伟等(2013)获得的花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 125.5 ± 1.5 Ma,而且通过 Sr-Nd-Pd 同位素特征得出新县花岗岩成分类似于扬子北缘新元古代 TTG 岩石,认为新县花岗岩形成于由挤压向伸展转变的构造环境.本文以大别地区新县花岗岩岩体作为研究对象,将新县岩体划分为 3 个期次,在详细的野外地质调查和显微镜岩相学观察的基础上,通过全岩地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 LA-MC-ICP-MS 锆石原位 Hf 同位素研究,参照前人研究成果,精确厘定了新县花岗岩岩体的形成时代、岩石成因和物质来源,并探讨了不同成岩时代的岩石成因和构造环境.

1 地质背景

新县岩体位于秦岭—大别造山带东延的大别山北麓地区,为大别造山带范畴.新县地区出露地层主要有太古界一元古界、中元古界浒湾组、奥陶系肖家庙组、泥盆系南湾组、石炭系陈棚组和第四系(图 1).太古界一元古界主要岩性为大别片麻杂岩,其由

变质表壳岩和变质深成岩组成,变质表壳岩主要岩石类型为黑云二长片麻岩、斜长角闪片麻岩、白云石英片岩、磁铁石英岩等,变质深成岩主要岩性为二长花岗质片麻岩、云英闪长质片麻岩、黑云斜长片麻岩等. 浒湾岩组主要岩性由高压变质岩块的榴辉岩、白云角闪片岩以及白云石英片岩和中压变质岩块的白云二长片麻岩、含榴白云斜长片麻岩以及构造片岩、片麻岩组成. 肖家庙岩组主要岩性为白云钠长片岩、白云石英片岩、白云更长片岩夹白云石英片岩及大理岩透镜体. 南湾组岩性主要为二云石英片岩、白云石英片岩夹二云斜长片岩、绿帘云母石英片岩、黑云绿帘斜长变粒岩和变余泥岩. 陈棚组为陆相中酸性火山岩—火山碎屑岩沉积建造.

区内构造格架表现为近 NWW 向桐柏—商城

断裂(简称桐—商断裂),近 NS 向新县断裂. 区内岩浆活动比较强烈,以中生代岩浆活动最为强烈,尤其是燕山期岩浆岩十分发育,以中酸性侵入岩占主要地位,新县岩体分布面积最大. 中酸性小侵人体数量较多,如千鹅冲岩体、大银尖岩体、姚冲岩体等,这些小岩体是研究区内钼矿床的主要成矿母岩(刘清泉等,2014).

2 岩石学特征

新县岩体位于大别地区的陡山河—新县—酒店一带,总体上呈长轴近 NS 向的椭圆状,面积约为 200 km²(图 1). 岩体与围岩呈侵入接触关系,通过

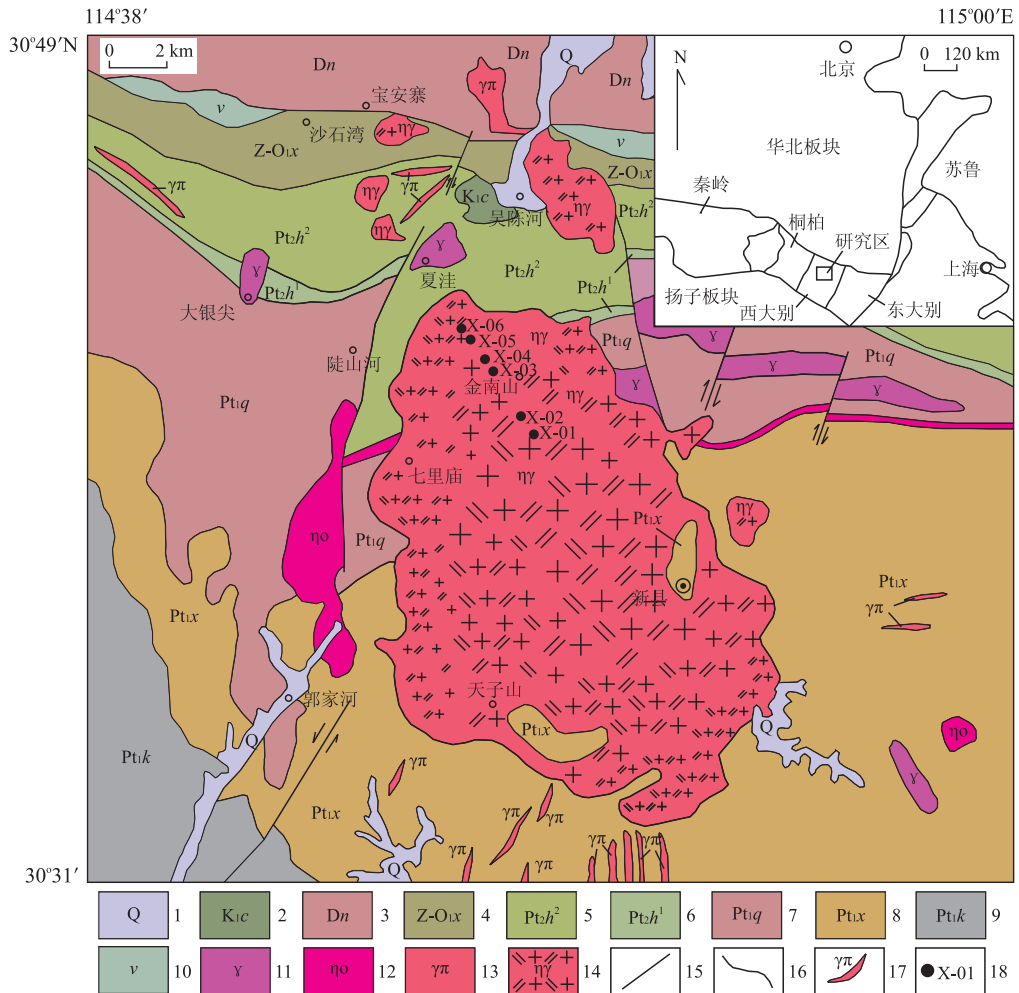


图 1 新县花岗岩体地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the Xinxian granitic batholith in Henan Province

1. 第四系; 2. 白垩系下统陈棚组; 3. 泥盆系南湾组; 4. 震旦系—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. 震旦系花岗岩; 12. 燕山期石英二长岩; 13. 燕山期花岗斑岩; 14. 燕山期二长花岗岩; 15. 断层; 16. 地质界线; 17. 花岗斑岩脉; 18. 采样位置; 据陈伟等(2013)修改

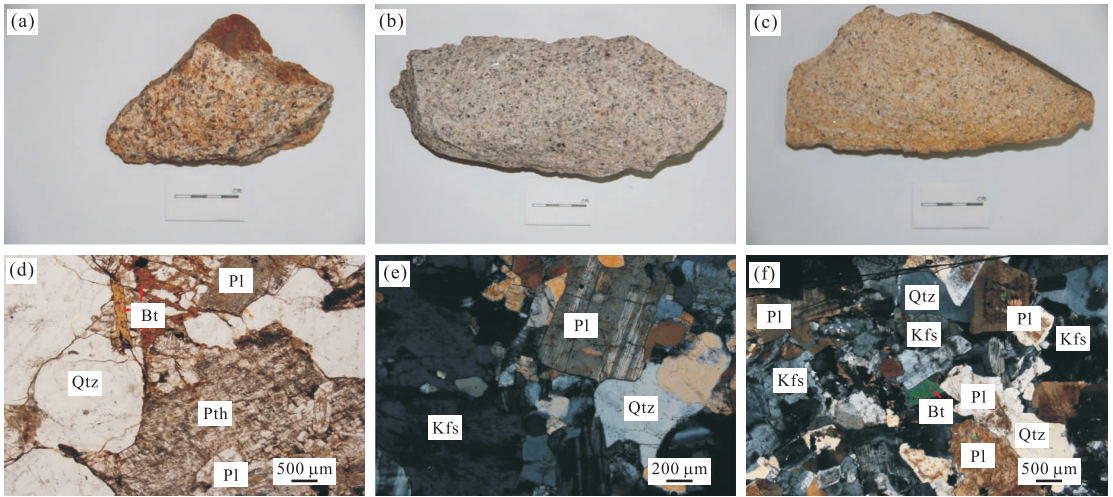


图 2 二长花岗岩岩相学特征

Fig. 2 Petrography of the monzogranite

a. 中粗粒二长花岗岩; b. 中粒二长花岗岩; c. 细粒二长花岗岩; d. 中粗粒二长花岗岩结构; e. 中粒二长花岗岩结构; f. 细粒二长花岗岩结构. Qtz. 石英; Bt. 黑云母; Pth. 条纹长石; Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石

详细的野外地质调查, 根据岩体的结构、岩性及其相互之间的接触关系, 结合区域地质资料, 笔者将新县岩体分为 3 个期次. 分别为: 第 1 期细粒二长花岗岩, 第 2 期中粒二长花岗岩和第 3 期中粗粒二长花岗岩(图 2).

第 1 期细粒二长花岗岩. 分布于岩体边缘或漂浮于岩体内部, 岩石以细粒二长花岗岩为主, 岩石呈淡红色, 细粒花岗结构, 块状构造. 矿物成分: 钾长石为 25%~40%, 斜长石为 25%~40%, 石英为 25%~40%, 黑云母少量. 钾长石多为条纹长石, 半自形一他形粒状, 一般粒度小于 2 mm; 斜长石呈半自形粒状, 粒度一般为 0.2~2.0 mm; 石英呈不规则他形粒状, 粒度为 1 mm, 少数为 2 mm, 波状消光显著.

第 2 期中粒二长花岗岩. 分布于岩体中边部, 岩石呈淡红色, 中粒花岗结构, 块状构造. 矿物成分: 钾长石为 40%左右, 斜长石为 25%~30%, 石英为 25%~35%, 黑云母少量. 钾长石发育卡氏双晶, 条纹结构发育, 半自形板状一他形粒状, 大部分粒度大于 2 mm; 斜长石呈半自形粒状, 聚片双晶发育, 个别见环带结构, 粒度一般为 1~3 mm; 石英呈浑圆状或他形粒状, 粒度为 2~4 mm, 波状消光显著.

第 3 期中粗粒二长花岗岩. 主要分布于岩体内部, 岩石呈淡红色—玫瑰红色, 中粗粒花岗结构, 块状构造. 矿物成分: 钾长石为 35%左右, 斜长石为 25%~40%, 石英为 30%左右, 黑云母少量. 钾长石大部分发育条纹双晶, 少部分发育格状双晶, 半自形

板状一他形粒状, 粒度为 3~6 mm; 斜长石呈半自形粒状, 聚片双晶发育, 为钠更长石, 粒度一般为 3~5 mm; 石英浑圆状或他形粒状, 粒度为 4~6 mm, 波状消光显著, 少数颗粒有破碎.

3 分析方法

本次研究采集的样品位置如图 1 所示, X-01、X-02 为中粗粒二长花岗岩, X-03、X-04 为中粒二长花岗岩, X-05、X-06 为细粒二长花岗岩. 全岩分析测试由澳实矿物实验室(广州)有限公司完成, 主量元素采用 X 荧光光谱仪分析方法完成, 使用仪器为荷兰 PANalytical 波长色散 X 射线荧光光谱仪. 具体方法为: 将试样煅烧后加入 50% $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ -50% LiBO_2 助熔物中均匀混合, 在 1 000 °C 以上使之熔融, 然后将熔融物倒出后形成扁平玻璃片, 再用 X 荧光光谱仪分析. 其中 P_2O_5 检出下限为 0.001%, 其余主量元素检出下限为 0.01%. 微量元素处理使用电感耦合等离子体质谱仪完成, 使用仪器为美国 Perkin Elmer Elan 9000 等离子质谱仪, 具体方法为: 将试样加入 LiBO_2 溶剂中均匀混合, 在 1 000 °C 以上的熔炉中融化, 熔融冷却后使用 HNO_3 定容, 然后用等离子体质谱仪分析. Cr 检出下限为 10×10^{-6} , Zr 检出下限为 2×10^{-6} , Ba、Ce、Ga、Hf、La、Nb、Rb、Y 检出下限在 $0.1 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$, 其余检出下限 $\leq 0.1 \times 10^{-6}$.

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年(表 1)在中

表 1 新县二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Xinxian monzogranite

测试点号	Th (10 ⁻⁶)	U (10 ⁻⁶)	Th/ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	年龄(Ma)					
												²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ		
X-01-01	2 542	2 136	1.19	0.055 1	0.001 0	0.155 5	0.003 1	0.020 4	0.000 3	0.006 0	0.000 1	147	3	130	2	121	3
X-01-02	3 205	2 343	1.37	0.047 1	0.000 9	0.135 9	0.002 8	0.020 8	0.000 2	0.006 3	0.000 1	129	3	132	2	126	3
X-01-03	2 839	2 259	1.26	0.052 1	0.001 1	0.148 6	0.003 4	0.020 5	0.000 2	0.006 3	0.000 2	141	3	131	2	127	3
X-01-06	182	152	1.20	0.051 4	0.003 5	0.146 3	0.008 8	0.021 6	0.000 5	0.006 4	0.000 2	139	8	138	3	128	5
X-01-07	3 170	2 295	1.38	0.050 9	0.001 0	0.141 1	0.002 7	0.020 0	0.000 2	0.006 3	0.000 1	134	2	128	1	126	3
X-01-08	357	292	1.22	0.057 2	0.003 7	0.174 0	0.013 0	0.021 3	0.000 4	0.007 5	0.000 3	163	11	136	2	152	7
X-01-09	3 580	2 777	1.29	0.049 4	0.001 0	0.139 2	0.002 9	0.020 3	0.000 2	0.006 4	0.000 2	132	3	130	2	129	3
X-01-10	4 873	2 774	1.76	0.050 3	0.001 2	0.145 5	0.003 7	0.020 9	0.000 3	0.006 9	0.000 2	138	3	133	2	139	4
X-01-11	2 791	2 250	1.24	0.048 9	0.001 1	0.139 1	0.003 5	0.020 5	0.000 3	0.006 8	0.000 2	132	3	131	2	137	4
X-01-12	5 125	2 790	1.84	0.047 9	0.000 9	0.134 5	0.002 8	0.020 3	0.000 2	0.006 7	0.000 1	128	2	129	1	134	3
X-01-14	2 406	2 374	1.01	0.054 0	0.001 2	0.160 5	0.004 5	0.021 3	0.000 3	0.006 8	0.000 2	151	4	136	2	136	3
X-03-01	3 590	5 224	0.69	0.057 0	0.001 1	0.180 2	0.003 4	0.022 7	0.000 2	0.006 9	0.000 2	168	3	144	1	140	3
X-03-02	3 724	6 079	0.61	0.051 0	0.000 9	0.159 4	0.003 1	0.022 4	0.000 2	0.006 7	0.000 2	150	3	143	1	134	3
X-03-03	2 650	3 437	0.77	0.054 1	0.001 1	0.172 5	0.004 8	0.022 8	0.000 4	0.007 3	0.000 2	162	4	145	3	147	4
X-03-04	2 694	4 649	0.58	0.079 6	0.002 2	0.235 5	0.006 8	0.021 2	0.000 2	0.008 3	0.000 3	215	6	135	2	166	7
X-03-06	655	1 064	0.62	0.053 1	0.002 0	0.168 3	0.005 7	0.023 1	0.000 3	0.007 6	0.000 2	158	5	147	2	153	4
X-03-07	2 914	4 189	0.70	0.056 8	0.001 4	0.180 5	0.004 5	0.022 9	0.000 3	0.006 9	0.000 2	168	4	146	2	139	4
X-03-08	4 121	5 773	0.71	0.054 3	0.001 0	0.171 7	0.004 0	0.022 7	0.000 3	0.007 2	0.000 2	161	4	144	2	145	4
X-03-10	4 225	4 888	0.86	0.081 2	0.002 1	0.239 2	0.007 0	0.021 1	0.000 3	0.008 2	0.000 2	218	6	134	2	165	4
X-03-12	4 157	5 321	0.78	0.061 4	0.002 2	0.179 8	0.005 7	0.021 4	0.000 3	0.007 6	0.000 2	168	5	137	2	153	4
X-03-13	5 917	6 992	0.85	0.047 8	0.000 8	0.154 0	0.003 0	0.023 2	0.000 3	0.007 1	0.000 2	145	3	148	2	144	4
X-03-14	4 375	4 597	0.95	0.060 0	0.001 2	0.187 4	0.004 5	0.022 5	0.000 3	0.007 4	0.000 2	174	4	143	2	148	3
X-03-15	2 048	4 056	0.50	0.053 9	0.001 2	0.165 3	0.004 3	0.022 0	0.000 3	0.007 9	0.000 2	155	4	140	2	159	5
X-05-01	4 557	14 296	0.32	0.051 4	0.000 8	0.173 1	0.002 9	0.024 1	0.000 2	0.006 8	0.000 3	162	3	153	1	138	6
X-05-02	3 687	4 629	0.80	0.090 4	0.002 0	0.303 4	0.008 3	0.023 9	0.000 3	0.009 4	0.000 5	269	6	152	2	189	9
X-05-03	1 922	3 688	0.52	0.083 4	0.003 3	0.278 7	0.003 1	0.024 3	0.001 0	0.011 7	0.000 8	250	10	155	6	235	17
X-05-04	9 506	17 079	0.56	0.053 3	0.001 0	0.178 6	0.004 1	0.023 9	0.000 2	0.007 2	0.000 3	167	4	152	1	145	6
X-05-05	7 929	22 043	0.36	0.068 1	0.003 0	0.238 3	0.004 4	0.024 2	0.000 3	0.010 1	0.000 6	217	12	154	2	203	12
X-05-07	3 471	13 938	0.25	0.053 6	0.001 0	0.176 5	0.003 1	0.023 8	0.000 3	0.007 5	0.000 2	165	3	152	2	152	4
X-05-08	2 275	6 130	0.37	0.090 2	0.001 6	0.305 1	0.006 4	0.024 4	0.000 3	0.013 3	0.000 4	270	5	155	2	267	7
X-05-09	6 837	20 129	0.34	0.054 5	0.000 7	0.183 2	0.003 0	0.024 2	0.000 3	0.010 5	0.000 2	171	3	154	2	211	5
X-05-10	6 592	21 885	0.30	0.091 1	0.003 0	0.307 5	0.001 6	0.024 3	0.000 4	0.017 5	0.000 9	272	9	155	2	350	19
X-05-11	7 229	19 846	0.36	0.048 4	0.000 8	0.160 8	0.003 6	0.023 9	0.000 3	0.007 9	0.000 2	151	3	152	2	159	5
X-05-12	7 081	24 836	0.29	0.059 0	0.001 8	0.197 7	0.006 8	0.024 0	0.000 3	0.010 7	0.000 5	183	6	153	2	215	11
X-05-13	5 247	15 865	0.33	0.052 8	0.001 1	0.178 3	0.003 7	0.024 4	0.000 3	0.007 8	0.000 2	167	3	155	2	156	4
X-05-14	13 518	31 847	0.42	0.045 9	0.001 1	0.152 3	0.003 6	0.023 9	0.000 2	0.006 7	0.000 2	144	3	152	2	134	5

国冶金地质总局山东局测试中心实验室完成, 锆石阴极发光(CL)照相在 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. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年采用的仪器型号为 Thermo Xeris 2, 配置 Coherent 公司生产的 COMPex Pro CO2F Geolas 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统, 分析时激光束斑直径为 $30 \mu\text{m}$, 频率为 8 Hz, 能量密度为 8.5 J/cm^2 , 剥蚀时间为 110 s (30 s 空白信号, 55 s 剥蚀时间, 25 s 吹扫残留信号时间). 详细实验原理及测试方法见 Jackson *et al.* (2004). 数据处理使用 ICPMSDataCal 程序 (Liu *et al.*, 2010), 同位素比值计算、年龄和误差以及普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法, 年龄计算和图解采用 ISOPLOT 程序.

原位微区锆石 Hf 同位素分析使用南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的激光剥蚀多接收等离子质谱仪 (LA-MC-ICP-MS) 完成测

试, 其中激光剥蚀系统采用 193 nm 的气体准分子激光光源的 UP193FX (New Wave, USA), 质谱使用 Thermo Fisher 公司的 eptune Plus 型多接收等离子质谱. 分析时激光束直径为 $50 \mu\text{m}$, 激光脉冲频率为 5 Hz, 信号采集次数为 200 次, 采集时间在 1 min 左右. 使用锆石国际标样 95100 作为参考物质, 分析点与 U-Pb 同位素定年为同一位置或相近位置.

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

笔者把几个测试异常点剔除后, 将本次测试样品的锆石 U-Pb 同位素年龄测试结果列于表 1, 样品中的锆石多呈柱状, 无色透明, 长度一般为 $70 \sim 160 \mu\text{m}$, 长宽比一般为 $2:1 \sim 3:1$, 锆石铀含量相对较高, 震荡环带不是很明显. 图 3a 中, 样品的锆石 U 含量为 $118 \times 10^{-6} \sim 31847 \times 10^{-6}$, 平均含量为

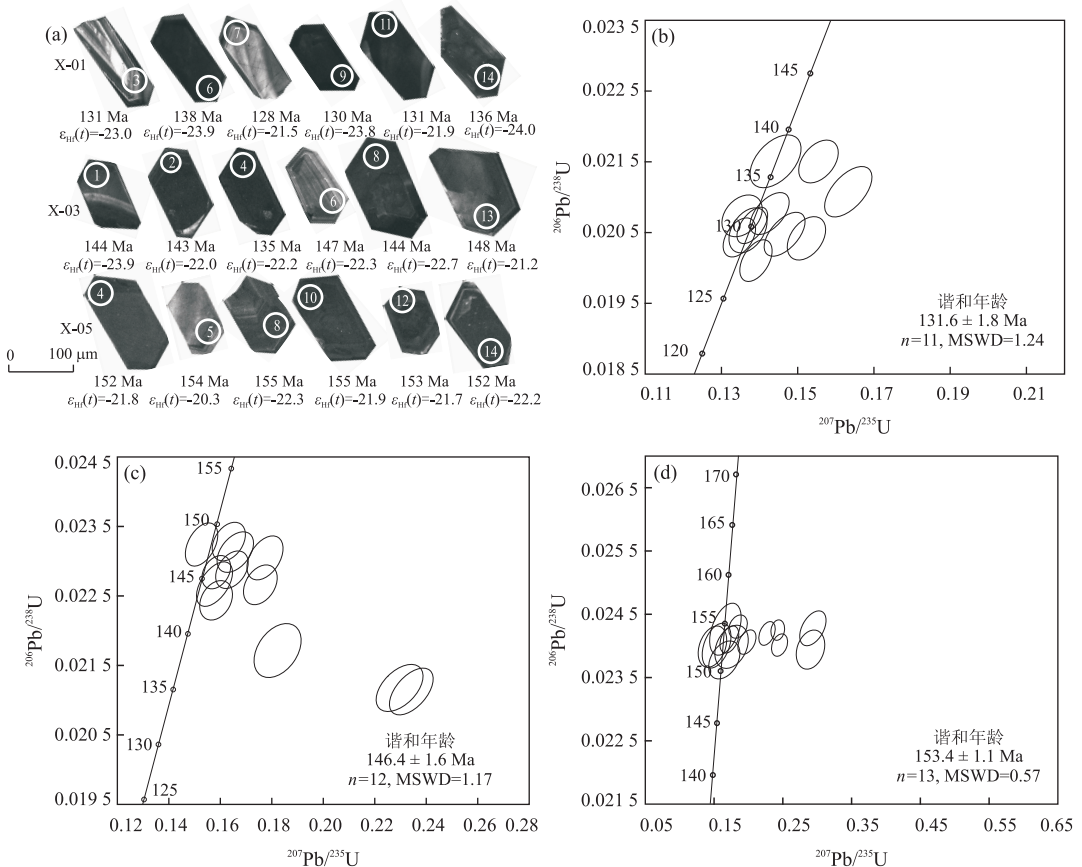


图 3 新县二长花岗岩中锆石代表性阴极发光照片(a); 中粗粒二长花岗岩(X-01)锆石 U-Pb 谐和图(b); 中粒二长花岗岩(X-03)锆石 U-Pb 谐和图(c)和细粒二长花岗岩(X-05)锆石 U-Pb 谐和图(d)

Fig. 3 CL images of representative zircons in the Xinxian monzogranite with analytical positions (a), the zircon U-Pb concordian of the medium-coarse monzogranite (X-01) (b), the zircon U-Pb concordian of the medium monzogranite (X-03) (c) and the zircon U-Pb concordian of the fine monzogranite (X-05) (d)

表 2 新县二长花岗岩主量元素(%)、微量和稀土元素(10⁻⁶)分析结果

Table 2 Major elements (%), trace elements and rare earth elements (10⁻⁶) composition of Xinxian monzogranite

样品号	X-01	X-02	X-03	X-04	X-05	X-06	样品号	X-01	X-02	X-03	X-04	X-05	X-06
SiO ₂	78.16	77.32	75.75	75.24	75.62	74.94	Pb	42	40	39	39	25	29
Al ₂ O ₃	12.38	12.38	13.57	13.54	13.33	13.52	Sr	11	11	42	44	49	49
Fe ₂ O ₃	0.62	0.66	0.78	0.95	1.09	1.06	Zr	112	134	141	120	140	127
MgO	0.06	0.05	0.09	0.10	0.08	0.11	Hf	5.9	8.0	6.2	4.7	5.0	4.8
CaO	0.27	0.24	0.50	0.58	0.36	0.39	Ti	240	180	480	300	540	600
Na ₂ O	3.82	3.94	4.24	4.24	3.83	4.07	Y	13.4	16.0	10.1	8.8	12.8	11.7
K ₂ O	4.16	3.87	4.50	4.45	4.86	4.65	Nb/Ta	8.60	8.72	11.89	12.29	12.56	12.16
MnO	0.01	0.01	0.04	0.06	0.02	0.02	Zr/Hf	18.98	16.75	22.74	25.53	28.00	26.46
TiO ₂	0.04	0.03	0.08	0.05	0.09	0.10	La	8.9	12.1	21.6	15.4	24.8	28.5
P ₂ O ₅	0.006	0.006	0.011	0.010	0.008	0.009	Ce	18.9	26.1	38.2	26.7	44.4	51.0
LOI	0.45	0.54	0.35	0.27	0.55	0.65	Pr	2.05	2.77	3.53	2.51	4.67	5.13
Total	99.98	99.05	99.91	99.49	99.84	99.52	Nd	6.1	8.9	10.5	7.4	14.6	15.7
TFeO	0.62	0.66	0.78	0.95	1.09	1.06	Sm	1.23	1.75	1.58	1.08	2.24	2.84
A/CNK	1.10	1.11	1.06	1.05	1.09	1.09	Eu	0.05	0.07	0.17	0.15	0.31	0.32
A/NK	1.15	1.16	1.15	1.15	1.15	1.15	Gd	0.95	1.23	0.93	0.76	1.67	1.80
Mg [#]	16.09	13.05	18.60	17.25	12.69	17.05	Tb	0.16	0.21	0.17	0.12	0.28	0.26
R ₁	2 874	2 872	2 478	2 460	2 530	2 459	Dy	1.21	1.45	0.97	0.85	1.76	1.77
R ₂	276	275	326	335	306	316	Ho	0.25	0.33	0.22	0.18	0.36	0.36
Q	39.43	39.46	32.68	32.20	33.92	32.68	Er	0.93	1.11	0.88	0.62	1.22	0.96
An	1.31	1.17	2.42	2.84	1.75	1.90	Tm	0.18	0.20	0.13	0.11	0.20	0.17
Ab	32.49	33.86	36.05	36.18	32.66	34.85	Yb	1.54	1.81	1.17	0.90	1.35	1.48
Or	24.71	23.23	26.72	26.52	28.94	27.81	Lu	0.22	0.27	0.18	0.12	0.18	0.16
Rb	393.0	365.0	311.0	307.0	216.0	196.5	∑REE	42.67	58.30	80.23	56.90	98.04	110.45
Ba	40	30	120	130	260	250	LREE/HREE	6.84	7.82	16.25	14.55	12.97	14.87
Th	20	20	30	20	20	20	(La/Yb) _N	4.15	4.80	13.24	12.27	13.18	13.81
U	10	10	10	10	10	10	δEu=Eu/Eu*	0.14	0.14	0.39	0.48	0.47	0.40
Nb	41.3	37.5	33.3	25.8	22.6	23.1	T _{Zr}	807	824	825	809	826	816
Ta	4.8	4.3	2.8	2.1	1.8	1.9							

注:主量元素单位为%,微量元素单位为10⁻⁶;LOI为烧失量,单位为%;T_{Zr}单位为℃;δEu=Eu/Eu* = 2Eu_N/(Sm_N+Gd_N),其中N为球粒陨石标准化值(引自 Sun and McDonough, 1989);TFeO=FeO+0.899 8×Fe₂O₃;A/CNK=摩尔 Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O);A/NK=摩尔 Al₂O₃/(Na₂O+K₂O);Mg[#] = 100×摩尔 Mg/(Mg+TFE²⁺);里特曼指数 σ = (Na₂O+K₂O)²/(SiO₂-43);AR=[Al₂O₃+CaO+(Na₂O+K₂O)]/[Al₂O₃+CaO-(Na₂O+K₂O)];R₁=摩尔[4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)];R₂=摩尔(6Ca+2Mg+Al);T_{Zr}=12 900/[2.95+0.85M+ln(496 000/Zr_{melt})]-273.15,M=(Na+K+2Ca)/(Al×Si),Zr_{melt}为锆含量(Watson and Harrison, 1983).

8 192×10⁻⁶, Th 含量为 182×10⁻⁶~13 518×10⁻⁶,平均含量为 4 222×10⁻⁶,Th/U 比值为 0.25~1.84,平均值为 0.79,绝大部分均大于 0.40,显示出岩浆成因锆石特征(Rubatto and Gebauer, 2000).图 3b~3d 中,由 X-01 的 11 个分析点、X-03 的 12 个分析点和 X-05 的 13 个分析点得到的锆石 U-Pb 谐和年龄分别为 131.6±1.8 Ma(MSWD=1.24)、146.4±1.6 Ma(MSWD=1.17)和 153.4±1.1 Ma(MSWD=0.57),其分别代表了中粗粒二长花岗岩、中粒二长花岗岩和细粒二长花岗岩的侵位年龄.周红升等(2013)获得的锆石 U-Pb 年龄(134.3±1.4 Ma)与本次第 3 期花岗岩年龄(131.6±1.8 Ma)较为一致,应为同一期.陈伟等(2013)获得的锆石 U-Pb 年龄为 125.5±1.5 Ma,是否表明区内还存在更晚一期的花岗岩,有待于进一步证实.

4.2 主量元素地球化学特征

新县岩体样品的主量元素分析结果见表 2,分析结果显示不同期次的岩石具有不同的岩石地球化学特征,总体具有较高的 SiO₂、Na₂O 和 K₂O 含量,

较低的 TFeO、P₂O₅ 和 TiO₂ 含量,在图 4a 中,样品均落于高钾钙碱性系列.岩体 Al₂O₃ 含量为 12.38%~13.57%,铝饱和指数 A/CNK 值为 1.05~1.11,在图 4b 中落于过铝质区域.岩石 SiO₂ 含量为 74.94%~78.16%,平均值为 76.17%,Na₂O 含量为 3.82%~4.24%,平均值为 4.02%,K₂O 含量为 3.87%~5.86%,平均值为 4.42%,TFeO 含量为 0.62%~1.09%,平均值为 0.86%,P₂O₅ 含量为 0.006%~0.010%,平均值为 0.008%,TiO₂ 含量为 0.03%~0.10%,平均值为 0.07%.在图 5 中,3 个侵入期次的岩体随时间由早到晚,SiO₂ 含量呈升高趋势,TFeO 与 SiO₂ 呈正相关关系,Na₂O、CaO 和 P₂O₅ 与 SiO₂ 负相关关系不太显著,Al₂O₃、TiO₂、MgO 和 K₂O 与 SiO₂ 则呈现出明显的负相关关系,表明各期次侵入体具有连续的演化趋势.

4.3 微量、稀土元素地球化学特征

新县岩体微量、稀土元素含量见表 2,新县岩体不同期次岩体的微量元素地球化学特征不同,岩体稀土元素总量 ∑REE=42.67×10⁻⁶~110.45×10⁻⁶,

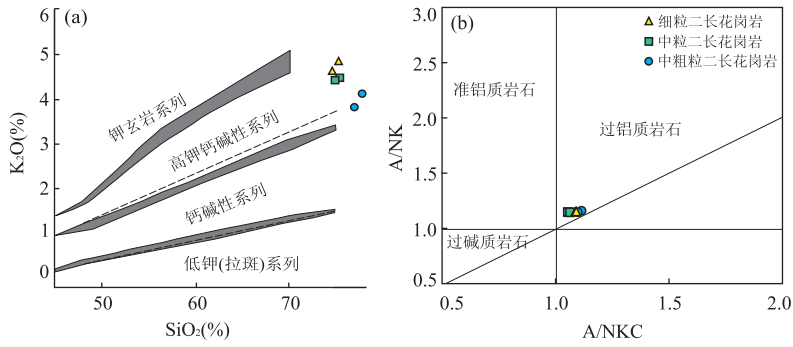


图 4 新县二长花岗岩 K_2O-SiO_2 (a) 和 ANK-ACNK (b) 关系

Fig. 4 K_2O-SiO_2 (a) and ANK-ACNK (b) relations of the Xinxian monzogranite

图 a 据 Rickwood(1989)

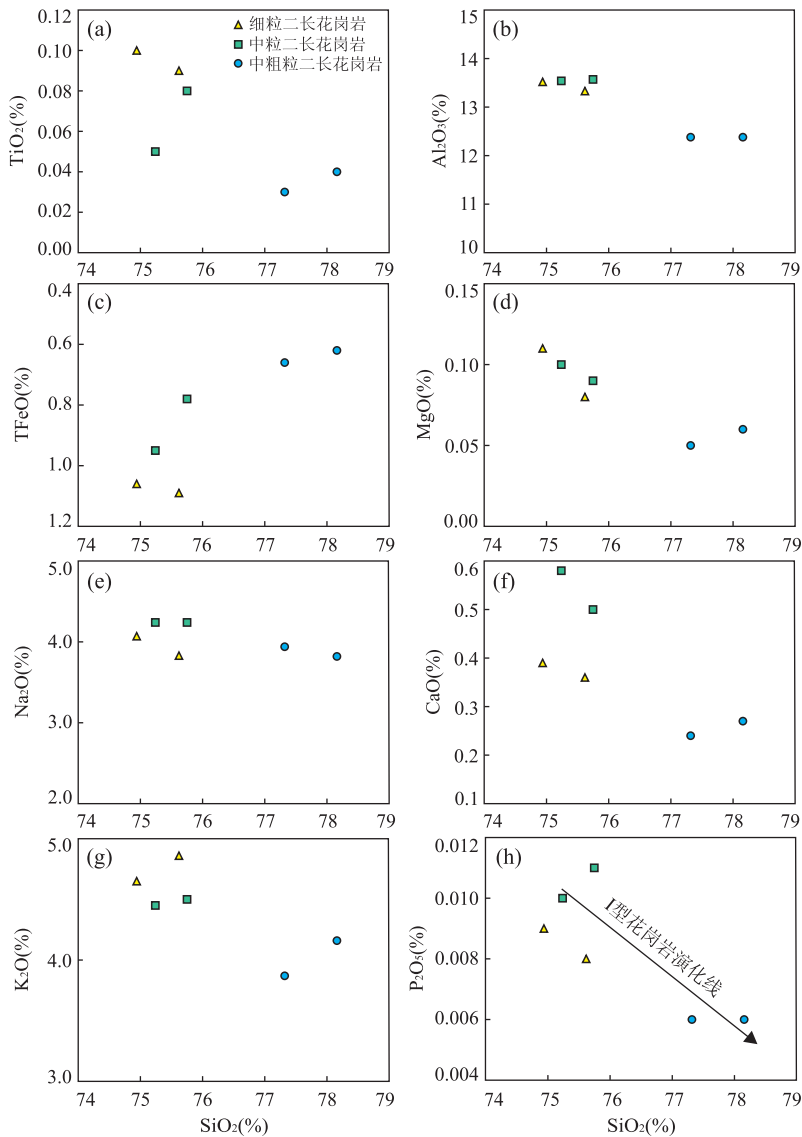


图 5 新县二长花岗岩 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagram of the Xinxian monzogranite

且从早期到晚期稀土总量呈现下降的态势, 总体而言, 其球粒陨石标准化分布模式均反映轻稀土元素

相对富集、重稀土元素相对亏损的特征(图 6). 岩石的 $(La/Yb)_N = 4.15 \sim 13.81$, 且从早期到晚期, 轻、

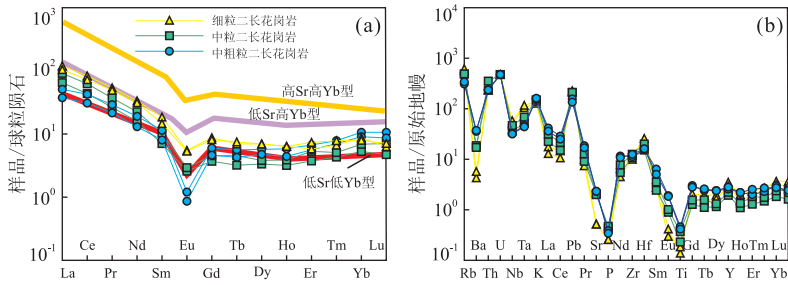


图 6 新县二长花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)与球粒陨石标准化稀土元素分布模式(b)

Fig. 6 PM-normalised trace element spider diagram (a) and chondrite-normalised REE pattern (b) of the Xinxian monzogranite

表 3 新县二长花岗岩的锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotope compositions of Xinxian monzogranite

测试点号	t(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (t)	t _{DM1} (Ma)	t _{DM2} (Ma)
X-01-01	130	0.089 913	0.002 230	0.282 019	0.000 014	-24.0	1 793	2 790
X-01-02	132	0.050 669	0.001 201	0.282 002	0.000 019	-24.5	1 768	2 876
X-01-03	131	0.069 408	0.001 663	0.282 044	0.000 016	-23.0	1 731	2 915
X-01-06	138	0.157 415	0.003 910	0.282 022	0.000 018	-23.9	1 874	2 824
X-01-07	128	0.071 049	0.001 659	0.282 089	0.000 018	-21.5	1 666	2 877
X-01-08	136	0.057 694	0.001 426	0.282 082	0.000 016	-21.6	1 666	2 722
X-01-09	130	0.121 267	0.003 078	0.282 026	0.000 016	-23.8	1 825	2 745
X-01-10	133	0.125 524	0.003 062	0.282 062	0.000 015	-22.5	1 771	2 861
X-01-11	131	0.105 876	0.002 557	0.282 077	0.000 014	-21.9	1 725	2 785
X-01-12	129	0.045 616	0.001 050	0.282 049	0.000 016	-22.8	1 695	2 751
X-01-14	136	0.124 686	0.003 099	0.282 017	0.000 015	-24.0	1 839	2 810
X-03-01	144	0.117 658	0.004 171	0.282 017	0.000 020	-23.9	1 895	2 886
X-03-02	143	0.068 153	0.002 372	0.282 067	0.000 014	-22.0	1 731	2 894
X-03-03	145	0.074 545	0.002 578	0.282 037	0.000 016	-23.1	1 783	2 786
X-03-04	135	0.086 447	0.002 916	0.282 067	0.000 016	-22.2	1 757	2 851
X-03-06	147	0.049 355	0.001 761	0.282 055	0.000 020	-22.3	1 719	2 777
X-03-07	146	0.080 706	0.002 782	0.282 004	0.000 016	-24.2	1 842	2 814
X-03-08	144	0.084 147	0.002 919	0.282 050	0.000 016	-22.7	1 781	2 925
X-03-10	134	0.097 889	0.003 540	0.282 040	0.000 021	-23.3	1 828	2 822
X-03-12	137	0.077 212	0.002 664	0.282 036	0.000 019	-23.3	1 790	2 835
X-03-13	148	0.097 509	0.003 229	0.282 090	0.000 019	-21.2	1 737	2 847
X-03-14	143	0.055 312	0.001 808	0.282 061	0.000 015	-22.2	1 713	2 738
X-03-15	140	0.065 349	0.002 206	0.282 027	0.000 016	-23.5	1 780	2 798
X-05-01	153	0.137 905	0.004 453	0.282 093	0.000 015	-21.1	1 795	2 869
X-05-02	152	0.024 449	0.000 956	0.282 063	0.000 006	-21.8	1 671	2 737
X-05-03	155	0.084 474	0.002 964	0.282 059	0.000 016	-22.1	1 770	2 802
X-05-04	152	0.077 676	0.002 707	0.282 070	0.000 019	-21.8	1 742	2 813
X-05-05	154	0.051 021	0.001 713	0.282 071	0.000 016	-20.3	1 839	2 787
X-05-07	152	0.077 947	0.002 638	0.282 067	0.000 038	-21.9	1 744	2 682
X-05-08	155	0.173 258	0.005 759	0.282 062	0.000 019	-22.3	1 914	2 795
X-05-09	154	0.144 987	0.004 498	0.282 045	0.000 014	-22.8	1 870	2 807
X-05-10	155	0.166 763	0.005 287	0.282 073	0.000 017	-21.9	1 871	2 843
X-05-11	152	0.152 313	0.004 866	0.282 109	0.000 016	-20.6	1 792	2 784
X-05-12	153	0.015 606	0.000 507	0.282 066	0.000 019	-21.7	1 648	2 702
X-05-13	155	0.134 066	0.004 520	0.282 062	0.000 016	-22.2	1 847	2 797
X-05-14	152	0.137 464	0.004 262	0.282 063	0.000 016	-22.2	1 831	2 808

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 10\,000 \times \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$;
 $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$; $t_{\text{DM2}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{s,t} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \} + t$;
 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$ 和 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测定值; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$ (Rubatto and Gebauer, 2000); $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Griffin *et al.*, 2000); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c = 0.015$; t 为锆石结晶时间, 单位为 Ma.

重稀土的分异程度越来越高。岩石样品均显示 Eu 的负异常, $\delta\text{Eu} = 0.14 \sim 0.48$, 同样, 花岗岩从早期到晚期, Eu 的负异常体现得越来越明显。从第 1 期到第 3 期, 具有明显的逐渐演变的特征, 表现出同源岩浆不断演化的规律。

岩石 Sr 含量为 $11 \times 10^{-6} \sim 49 \times 10^{-6}$, 平均值为 34.33×10^{-6} , Y 含量为 $8.8 \times 10^{-6} \sim 16.0 \times 10^{-6}$, 平

均值为 12.13×10^{-6} , Yb 含量为 $0.90 \times 10^{-6} \sim 1.81 \times 10^{-6}$, 平均值为 1.38×10^{-6} , 显示出低 Sr 低 Yb 特征。岩体微量元素原始地幔标准化分布图解模式显示, 岩体富集 Rb、U、K、Pb 和 Hf, 亏损 Ba、Nb、Ta、P 和 Ti。

4.4 锆石 Hf 同位素特征

锆石 Hf 同位素分析结果见表 3, 锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.000\,507 \sim 0.005\,759$, 平均值为 $0.002\,861$,

表明锆石在形成以后很少积累放射成因的 Hf, 因此所获得的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以代表锆石形成时的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值(Wu *et al.*, 2007). 样品 X-01 共测试 11 个点, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.001\ 201 \sim 0.003\ 91$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\ 002 \sim 0.282\ 089$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -24.5 \sim -21.5$, $t_{\text{DM2}} = 2\ 722 \sim 2\ 915\ \text{Ma}$; 样品 X-03 共测试 12 个点, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.001\ 761 \sim 0.004\ 171$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\ 004 \sim 0.282\ 090$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -24.2 \sim -21.2$, $t_{\text{DM2}} = 2\ 738 \sim 2\ 925\ \text{Ma}$; 样品 X-05 共测试 13 个点, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.000\ 507 \sim 0.005\ 759$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\ 045 \sim 0.282\ 109$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -22.8 \sim -20.3$, $t_{\text{DM2}} = 2\ 682 \sim 2\ 869\ \text{Ma}$.

5 讨论

5.1 岩石类型

新县岩体的岩性主要为二长花岗岩, 属高硅、高钾钙碱性、过铝质花岗岩, 除了 TFeO 以外, SiO_2 与其他主量元素均呈一定程度的负相关关系. 在图 7 中, 岩体样品均落于 I 型花岗岩区域. 除了样品 X-06 外, 岩石铝饱和指数 A/CNK 值均小于 1.1, 表明岩体具有 I 型花岗岩特征(吴福元等, 2007), 同时, 在图 5 中, P_2O_5 与 SiO_2 呈负相关关系, 投点总体沿 I 型花岗岩演化趋势分布(Chappell, 1999; Wu *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2007).

笔者由岩石主量元素和 Zr 含量计算的样品锆石饱和温度较高($807 \sim 826\ ^\circ\text{C}$; 表 2), 由于未见继承锆石, 因此该温度应该代表源区原始岩浆的最低温

度, 新县岩体锆石饱和温度平均值达 $818\ ^\circ\text{C}$, 为高温花岗岩(吴福元等, 2007; 隋振民和陈跃军, 2011). 在图 8a 中, 新县岩体样品均落于高分异的花岗岩区域; 同样在图 8b 中, 样品均落于高分异的钙碱性岩区域. 另外新县岩体花岗岩含有富水矿物云母, 副矿物以磷灰石、磁铁矿为特征. 综上所述, 新县岩体应属高分异 I 型花岗岩.

5.2 岩石成因

新县岩体具有较低的 Sr、Yb 和 HREE 含量, Sr 含量为 $11 \times 10^{-6} \sim 49 \times 10^{-6}$, 平均值为 34.33×10^{-6} , Yb 含量为 $0.90 \times 10^{-6} \sim 1.81 \times 10^{-6}$, 平均值为 1.38×10^{-6} , Y 含量为 $8.8 \times 10^{-6} \sim 16.0 \times 10^{-6}$, 平均值为 12.13×10^{-6} , HREE 含量为 $3.66 \times 10^{-6} \sim 7.02 \times 10^{-6}$, 平均值为 5.72×10^{-6} , HREE 和 Y 亏损表明源区可能有石榴子石的残留(Xiong *et al.*, 2005), 岩石具有低 Sr 低 Yb 特征(图 9). Martin *et al.* (2005) 指出花岗质熔体的 Sr 含量与熔融源区的 Sr 含量以及熔融残留相有关, 且主要受残留相中斜长石的控制. 新县岩体整体上贫 Al 和 Sr, 有比较明显的负 Eu 异常, 说明残留相中可能有高钙的斜长石存在, 致使熔融的岩浆贫 Al、Ca 和 Sr. 斜长石的分离结晶也使 Sr 含量降低, 随着斜长石中 Ca 含量的减少, Sr 含量也会明显降低(Ajaji *et al.*, 1998), 在图 10 中, 新县二长花岗岩样品数据的变化反映了其在形成过程中经历了钾长石和斜长石的分离. 因此, 岩石整体上的低 Al 和 Sr 特征, 表明斜长石可能是主要的残留相之一, 从早期到晚期 Sr 含量表现出逐渐降低的趋势, 表明斜长石经历了结晶分异作用.

花岗岩中的 Yb 含量主要与源岩成分、副矿物、部分熔融程度及熔融残留相组成有关, 花岗岩中能够容纳 Yb 的矿物有角闪石、石榴石以及一些副矿物, 这些矿物从岩浆中的分离必然影响熔体中的 Yb 含量, 残留相对花岗岩 Yb 的控制非常明显(张旗等, 2006; 张硕等, 2014). 由于新县花岗岩亏损 Yb, 因此笔者认为石榴石和角闪石是导致花岗岩 REE 强烈分异的重要矿物相. 陈伟等(2013)认为新县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. 高阳(2014)对千鹅冲花岗岩进行了研究, 发现其具有亏损重稀土和 Yb, 以及高 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值的特征, 说明其岩浆源区的残留相中富含石榴石, 并认为千鹅冲花岗岩源区以石榴石为主要残留相, 可能存在少量的角闪石残留. 通过对姚冲花岗岩的研究, 笔者认为其特征与千鹅冲花岗岩同

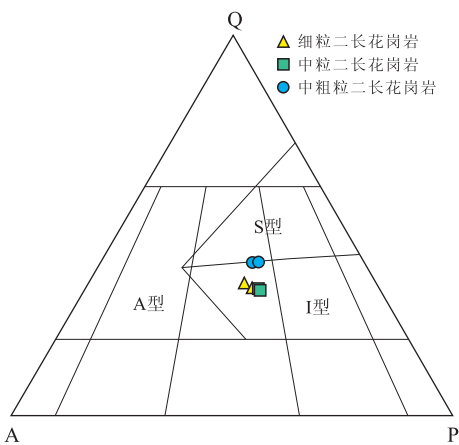


图 7 新县二长花岗岩 Q-A-P 图解

Fig. 7 Q-A-P diagram of the Xinxian monzogranite

Q. 石英; A. 碱性长石; P. 斜长石; 据 Bowden and Kinnaird(1984)

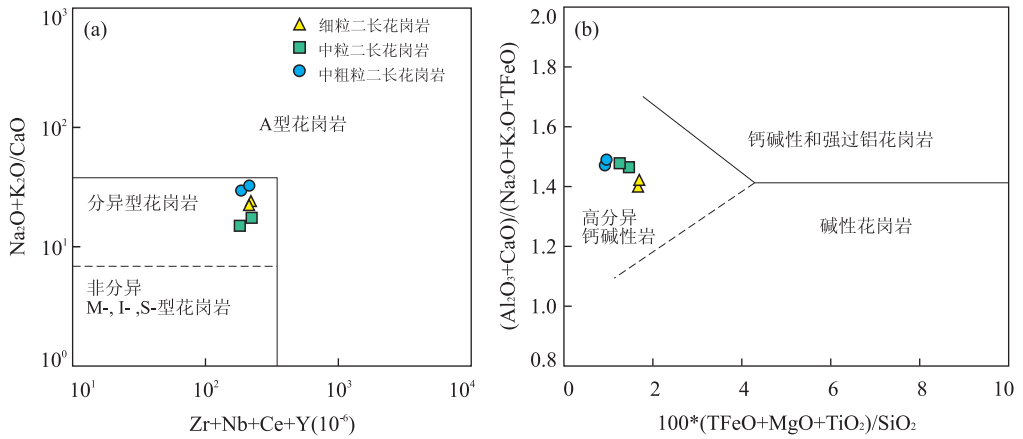


图 8 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 和 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO})/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{TFeO}) - 100 \times (\text{TFeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)/\text{SiO}_2$ 关系
 Fig. 8 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ and $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO})/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{TFeO}) - 100 \times (\text{TFeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)/\text{SiO}_2$ relations

图 a 据 Whalen *et al.* (1987), 图 b 据 Sylvester (1989)

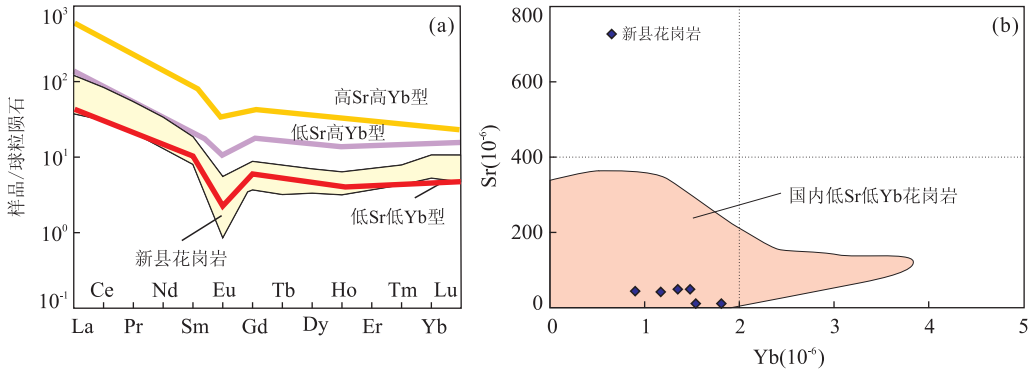


图 9 新县二长花岗岩 REE 分布模式 (a) 及 Sr-Yb 关系 (b)
 Fig. 9 REE pattern (a) and Sr-Yb relation (b) for the Xinxian monzogranite
 据张旗等 (2006)

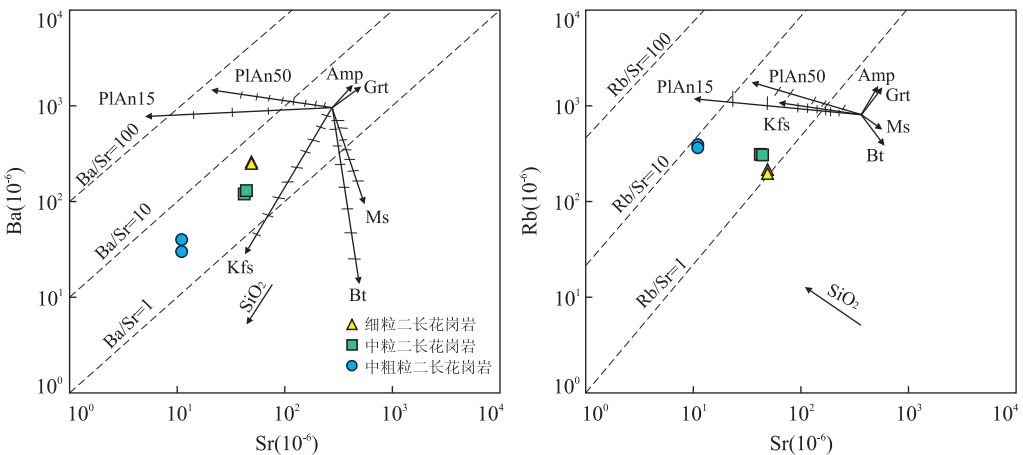


图 10 新县二长花岗岩造岩矿物结晶分异判别关系
 Fig. 10 Ba-Sr and Rb-Sr relations for the Xinxian monzogranite

PlAn50, 斜长石 (An=50); PlAn15, 斜长石 (An=15); Kfs, 钾长石; Bt, 黑云母; Ms, 白云母; Grt, 石榴子石; Amp, 角闪石; 据 Janoušek *et al.* (2004)

样具有亏损重稀土和 Yb 的特征,且千鹅冲花岗岩和姚冲花岗岩均位于新县岩体的周边.因此,新县岩体应来源于残留相富集斜长石、石榴石和角闪石的部分熔融岩浆.

新县岩石样品的 Nb/Ta 比值为 8.60~12.56, Zr/Hf 比值为 16.75~28.00; Nb/Ta 比值低于地幔平均值(60),更加接近于地壳平均值(10), Zr/Hf 比值同样低于地幔值(34~60)而较接近地壳平均值(35.5; Wedepohl, 1995),表明新县岩体可能来源于下地壳的部分熔融.

5.3 物质源区

锆石 Lu-Hf 同位素能够有效地揭示岩浆演化过程和源区性质(Blichert and Albarede, 1997),亏损地幔源区具有更高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值;而大陆地壳与亏损地幔相比,具有较低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(Patchett *et al.*, 1982).

新县二长花岗岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 具有明显的负值(-24.5~-20.3), $t_{\text{DM2}}=2.68\sim 2.93\text{ Ga}$,分布于亏损地幔演化线之下(图 11),表明岩浆主要来源于古老地壳物质.关于大别造山带深部构造地质体是否存在华北物质,前人存在争议,但大部分学者认为大别造山带的地壳物质主要来自扬子板块(Zheng *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2007; Zheng and Zhang 2007; Zhao and Zheng, 2009).

扬子板块北缘 TTG 型岩浆岩的源岩为元古代-太古代的古老地壳物质(Zhang *et al.*, 2008, 2009),其 Hf 二阶段模式年龄为 2.07~2.79 Ga,而新县二长花岗岩的 Hf 二阶段模式年龄为 2.68~2.93 Ga,两者基本一致.在整个大别造山带的构造地层地质体中,白垩纪花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-30\sim -15$, $t_{\text{DM2}}=1.9\sim 3.0\text{ Ga}$ (续海金等, 2008),新县花

岗岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-24.5\sim -20.3$, $t_{\text{DM2}}=2.68\sim 2.93\text{ Ga}$,该特征同样与扬子板块北缘的 TTG 型岩浆岩相吻合,而大别片麻杂岩具有较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-15~-8)和 t_{DM2} 值(1.0~2.0 Ga)(Zhao *et al.*, 2008).陈伟等(2013)通过 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素示踪发现,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.

Sr-Nd 同位素研究结果显示,大陆地壳的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 平均值为 0.719(Faure, 1986),若花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 大于 0.719,则其无疑是壳源的;而花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 在 0.706~0.719,其岩浆来源应主要是壳源的,但受到了幔源物质的混染.若岩浆岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)<0$,表明它们来源于地壳物质,至少在形成过程中其与地壳物质发生过相当明显的混染,混染程度越明显, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 负值越大,岩石平均年龄越老,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值愈负(DePaolo, 1988).

陈伟等(2013)得出新县花岗岩的年龄为 $125.5\pm 1.5\text{ Ma}$,且 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.706\ 949\sim 0.707\ 086$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-13.51\sim -13.65$.大别山地区中生代花岗岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.706\ 51\sim 0.723\ 70$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-27.3\sim -13.7$ (Chen *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2007; 魏庆国等, 2010; 杨梅珍等, 2010, 2011a; He *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013; 高阳, 2014; Mi *et al.*, 2015),且大于 130 Ma 的花岗岩,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 一般小于-18.0,而小于 130 Ma 的花岗岩,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 一般大于-18.0.因此笔者认为,大别山地区中生代存在两类花岗岩,一类是大于 130 Ma 的花岗岩,为大别造山带碰撞造山后构造体制由挤压向伸展转换时期加厚下地壳深熔作用的产物;另一类是小于 130 Ma 的花岗岩,此时大别造山带已转化为受西太平洋构造域影响,其构造-岩浆作用导致加厚地壳拆沉,岩石圈的厚度减薄为正常厚度,软流圈地幔小规模上涌,导致岩体侵位,为正常厚度陆壳部分熔融的产物.

因此,笔者认为 153.4~131.6 Ma 的新县花岗岩为构造体制大转换期间加厚下地壳部分熔融的产物,小于 130 Ma 的新县花岗岩为地壳伸展和岩石圈减薄时期正常厚度下地壳部分熔融的产物.

5.4 构造环境

自加里东运动开始,直到三叠纪早期,华北克拉通一直处于稳定发展阶段,同位素测年及其他研究资料表明,扬子克拉通与华北克拉通在 238~218 Ma

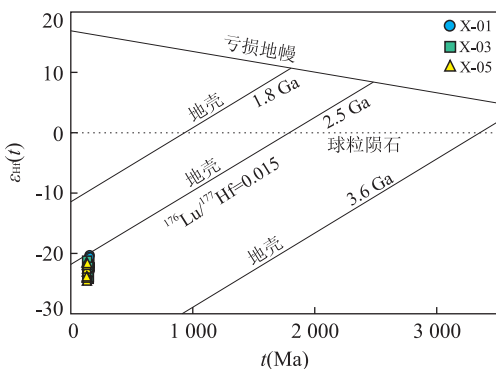


图 11 新县二长花岗岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 关系

Fig. 11 Relation of Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ and t for the Xinxian monzogranite

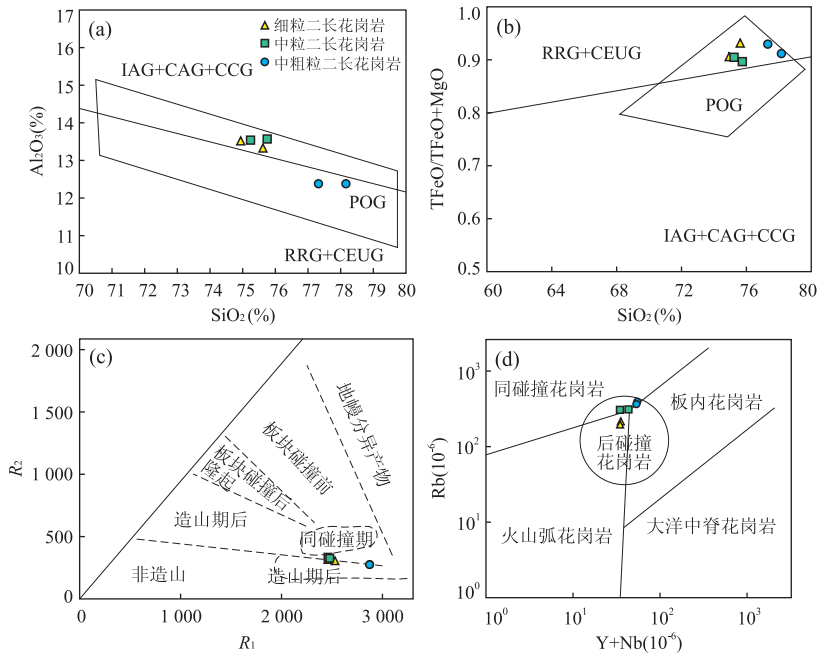


图 12 新县二长花岗岩构造环境判别关系

Fig. 12 Discriminant relations of tectonic environment of the Xinxian monzogranite

a. Al_2O_3 - SiO_2 ; b. $TFeO/(TFeO+MgO)$ - SiO_2 ; c. R_1 - R_2 ; d. Rb - $Y+Nb$; 图 a, b 据 Pearce(1996); 图 c, d 据 Batchelor and Bowden(1985); POG, 后造山花岗岩; IAG, 岛弧花岗岩; CAG, 大陆弧花岗岩; CCG, 大陆碰撞花岗岩; RRG, 裂谷型花岗岩; CEUG, 大陆造陆隆升花岗岩

实现碰撞对接(Ames *et al.*, 1993; 李锦轶, 2001; 张国伟等, 2001), 两个大陆碰撞闭合于印支期末, 之后开始碰撞造山过程。碰撞造山带的演化通常经历由挤压向伸展构造体制转换的过程(Leech, 2001; Vanderhaeghe and Teyssier, 2001), 大别造山带早白垩世扬子板块断离可能导致软流圈上涌以及大规模的地壳伸展(Bryant *et al.*, 2004; Hacker *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2004; 高阳等, 2014)。

在晚侏罗世—早白垩世初, 郟庐断裂发生强烈的左行走滑运动, 大洋板块的俯冲作用和深切至地幔的郟庐断裂的左行走滑运动使地幔对流平衡和岩石圈状态平衡遭到破坏, 岩石圈地幔楔部分熔融形成岩浆, 幔源岩浆部分与地壳重熔的岩浆混合形成花岗质岩浆(徐克勤等, 1982), 这些花岗质岩浆经历了强烈的分异演化。碰撞造山作用结束于侏罗纪(145~135 Ma), 此时受太平洋构造域构造动力的影响, 整个中国大陆中东部的区域构造体制发生转换, 从以近 SW 向构造为主、NNE-近 NS 向构造为次进入以 NNE-近 NS 向构造为主、近 EW 向构造为次的构造—动力体制大转换时期, 包括东秦岭在内的华北克拉通南缘转入伸展构造环境(任纪舜, 1991; 卢欣祥, 1998)。

在早白垩世, 挤压造山活动基本结束, 伸展活动

逐步加强, 区内拉张盆地的发育, 以及拆离断层的生成, 均表明本区此时处于伸展构造环境(李永峰, 2005); 三叠纪—侏罗纪, 该区基本没有盆地发育, 早白垩世突然有大量小型断陷盆地出现, 从白垩纪至古近纪, 小盆地逐渐合并, 最终演化为规模较大的南阳山前断陷盆地(河南省地质矿产局, 1989), 表明该区总体上处于伸展拉张状态。

许志琴等(2003)认为扬子陆块陆壳向北深俯冲事件发生在 220~242 Ma 的中—晚三叠世, 150 Ma 以后进入后折返伸展时期, 大量的花岗岩侵位。中晚中生代(170±5~135±5 Ma)大规模的地壳伸展不仅发生在中国东部, 而且在亚洲东北部甚至沿着整个欧亚大陆东部都具有相同的构造背景(Lin *et al.*, 2000; Fyhn *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2012; 刘金龙等, 2015), Izanagi(或古太平洋)板块向欧亚大陆的俯冲, 构造体制由挤压向伸展发生大转换导致加厚下地壳深熔作用产物的生成。晚中生代(<135±5 Ma)Izanagi(或古太平洋)板块由斜向俯冲转为平行于欧亚大陆边缘, 并且造成了大规模的地壳伸展、岩石圈减薄以及软流圈物质上涌(毛景文等, 2003; Goldfarb *et al.*, 2007; Mao *et al.*, 2011a)。

在图 12a 中, 新县岩体样品投点均落于后造山

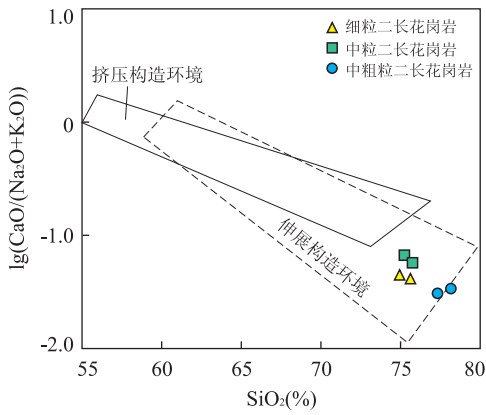


图 13 新县二长花岗岩构造环境的 $\lg(\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}))$ - SiO_2 判别关系

Fig. 13 The $\lg(\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}))$ - SiO_2 discriminant relation of tectonic environment of the Xinxian monzogranite

据 Brown(1982)修改

花岗岩类区域,同样在图 12b 中,样品投点均落于后造山花岗岩类区域.在图 12c、12d 中,新县岩体绝大多数样品投点落于后碰撞或造山期后花岗岩区域,表明新县岩体形成于华北板块和扬子板块碰撞造山后的伸展构造环境.在图 13 中,岩体样品投点主要落于挤压伸展叠加区域以及伸展区域,揭示成岩作用环境为挤压向伸展过渡的时期.

因此,笔者认为 153.4~131.6 Ma 的新县岩体形成于区内构造体制转换时期,小于 130 Ma (125.5±1.5 Ma;陈伟等,2013)的新县岩体形成时期,即大规模的地壳伸展和岩石圈减薄时期.

6 结论

(1)新县岩体位于大别造山带北麓,主要岩性为二长花岗岩,为高硅、高钾钙碱性、过铝质、高分异 I 型花岗岩.

(2)岩体具有轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损以及 Nb、Ta、Ti 负异常特征, Sr、Y、Yb 含量较低, Nb/Ta、Zr/Hf 值接近地壳平均值,表明新县岩体为下地壳部分熔融的产物.新县岩体来源于残留相富集斜长石、石榴石和角闪石的部分熔融岩浆.

(3)锆石 Hf 同位素特征表明新县岩体的物质来源主要为扬子板块北缘的古老地壳,成分与扬子板块北缘 TTG 型岩浆岩类似. 153.4~131.6 Ma 的新县花岗岩为构造体制大转换期间加厚下地壳部分

熔融的产物,小于 130 Ma 的新县花岗岩为地壳伸展和岩石圈减薄时期正常厚度下地壳部分熔融的产物.

(4)3 个期次的二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 153.4±1.1 Ma、146.4±1.6 Ma 和 131.6±1.8 Ma,均形成于扬子陆块与华北陆块碰撞造山后的陆内伸展环境,对应的地球动力学背景为晚侏罗世一早白垩世地壳从挤压收缩向区域性伸展的构造体制大转换过程,小于 130 Ma (125.5±1.5 Ma;陈伟等,2013)的新县岩体形成时期,即大规模的地壳伸展和岩石圈减薄时期.

致谢:锆石 U-Pb 定年工作得到中国冶金地质总局山东局测试中心实验室的大力支持;锆石 Hf 同位素分析得到南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的支持,匿名审稿专家和编辑对文章提出了诸多有益的修改建议,在此表示衷心的感谢!

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi: 10.1016/s0009-2541(02)00195-x
- Ames, L., Tilton, G. R., Zhou, G. Z., 1993. Timing of Collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons; U-Pb Zircon Dating of Coesite-Bearing Eclogites. *Geology*, 21(4): 339-342. doi: 10.1130/0091-7613(1993)021<0339:tocots>2.3.co;2
- Ajaji, T., Weis D., Giret A., et al., 1998. Coeval Potassic and Sodid Calc-Alkaline Series in the Post-Collisional Hercynian Tanncherfi Intrusive Complex, Northeastern Morocco; Geochemical, Isotopic and Geochronological Evidence. *Lithos*, 45(1-4): 371-393. doi: 10.1016/s0024-4937(98)00040-1
- Bryant, D. L., Ayers, J. C., Gao, S., et al., 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. doi: 10.1130/b25302.2
- Bowden, P., Kinnaird, J. A., 1984. The Petrology and Geochemistry of Alkaline Granites from Nigeria. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35(1-3): 199-211. doi: 10.1016/0031-9201(84)90043-8
- Blichert, J. Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle

- Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148 (1-2): 243-258. doi: 10.1016/s0012-821x(97)00040-x
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55. doi: 10.1016/0009-2541(85)90034-8
- Brown, G. C., 1982. Calc-Alkaline Intrusive Rocks - Their Diversity, Evolution and Relation to Volcanic Arcs. In: Thorpe, R. S., ed., *Andesites*. John Wiley, New York, 437-461.
- Bureau of Geology and Mineral of Henan Province, 1989. Regional Geology of Henan Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535-551. doi: 10.1016/s0024-4937(98)00086-3
- Chen, B., Jahn, B. M., Wei, C. J., 2002. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids in the Dabie UHP Complex, Central China: Trace Element and Nd-Sr Isotope Evidence. *Lithos*, 60(1-2): 67-88. doi: 10.1016/S0024-4937(01)00077-9
- Chen, W., Xu, Z., Li, H. C., et al., 2013. Petrogenesis and Origin of the Xinxian Granitic Batholith in Henan Province and Its Implication for the Tectonic Evolution of the Western Dabie Area. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1510-1524 (in Chinese with English abstract).
- DePaolo, D. J., 1988. Neodymium Isotope Geochemistry: An Introduction. Springer-Verlag, Berlin, 189.
- Faure, G., 1986. Principles of Isotope Geology (2nd edition). John Wiley and Sons, New York, 567.
- Fyhn, M. B. W., Nielsen, L. H., Boldreel, L. O., et al., 2009. Geological Evolution, Regional Perspectives and Hydrocarbon Potential of the Northwest Phu Khanh Basin, Offshore Central Vietnam. *Marine and Petroleum Geology*, 26(1): 1-24. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2007.07.014
- Gao, Y., 2014. Geology, Geochemistry and Genesis of the Qian'echong and Tangjiaping Porphyry Mo Deposits, Dabie Orogen (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., Ye, H. S., Li, Y. F., et al., 2014. SHRIMP Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Compositions and Trace Elements Characteristics of the Granites from the Qian'echong Mo Deposit, Dabie Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 49-63 (in Chinese with English abstract).
- Goldfarb, R. J., Hart, C., Davis, G., et al., 2007. East Asian Gold: Deciphering the Anomaly of Phanerozoic Gold in Precambrian Cratons. *Economic Geology*, 102(3): 341-345. doi: 10.2113/gsecongeo.102.3.341
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LA-MC-ICP-MS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00343-9
- Hacker, B. R., Ratschbacher, L., Liou, J. G., 2004. Subduction, Collision and Exhumation in the Ultrahigh-Pressure Qinling-Dabie Orogen. In: Malpas J., Fletcher C., Ali J. R., eds., *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. Geological Society, Special Publication, London, 157-175.
- Hacker, B. R., Ratschbacher, L., Webb, L., et al., 1998. U-Pb Zircon Ages Constrain the Architecture of the Ultrahigh-Pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1-4): 215-230. doi: 10.1016/s0012-821x(98)00152-6
- Hacker, B. R., Wang, X., Eide, E. A., 1996. The Qinling-Dabie Ultra-High-Pressure Collisional Orogen. In: Yin A., Harris T. M., eds., *The Tectonics of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge, 345-370.
- He, Y. S., Li, S. G., Hoefs, J., et al., 2013. Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions of Early Cretaceous Granitoids from the Dabie Orogen: Constraints on the Recycled Lower Continental Crust. *Lithos*, 156-159: 204-217. doi: 10.1016/j.lithos.2012.10.011
- Huang, D. H., Wu, C. Y., Du, A. D., et al., 1994. Re-Os Isotopic Ages of Molybdenum Deposits in East Qinling and Their Significance. *Mineral Deposits*, 13(3): 221-230 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
- Janoušek, V., Finger, F., Roberts, M., et al., 2004. Deciphering the Petrogenesis of Deeply Buried Granites: Whole-Rock Geochemical Constraints on the Origin of Largely Undepleted Felsic Granulites from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95(1-2): 141-159. doi: 10.1017/s0263593300000985
- Leech, M. L., 2001. Arrested Orogenic Development: Eclogitization, Delamination, and Tectonic Collapse. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(1-2): 149-159. doi:

- 10.1016/s0012-821x(00)00374-5
- Li, H. C., Xu, Z. W., Lu, X. C., et al., 2012. Constraints on Timing and Origin of the Dayinjian Intrusion and Associated Molybdenum Mineralization, Western Dabie Orogen, Central China. *International Geology Review*, 54 (13): 1579–1596. doi: 10.1080/00206814.2012.684460
- Li, H. M., Ye, H. S., Mao, J. W., et al., 2007. Re-Os Dating of Molybdenites from Au (-Mo) Deposits in Xiaoqinling Gold Ore District and Its Geologic Significance. *Mineral Deposits*, 26(4): 417–424 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., 2001. Pattern and Time of the Collision between the Sino-Korean and Yangtze Blocks: Evolution of the Sinian-Jurassic Sedimentary Settings in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 25–34 (in Chinese with English abstract).
- Li, N., Chen, Y. J., Zhang, H., et al., 2007. Molybdenum Deposits in East Qinling. *Earth Science Frontiers*, 14 (5): 186–198 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., Wang, T., 1991. Geochemistry of Granitoids in Tongbaishan-Dabieshan, Central China. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Li, X. H., Li, Z. X., Li, W. X., et al., 2007. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- and A-Type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab? *Lithos*, 96(1–2): 186–204. doi: 10.1016/j.lithos.2006.09.018
- Li, Y. F., 2005. The Temporal-Spatial Evolution of Mesozoic Granitoids in the Xiong'er Shan Area and Their Relationships to Molybdenum-Gold Mineralization (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Lin, W., Faure, M., Monié, P., et al., 2000. Tectonics of SE China, New Insights from the Lushan Massif (Jiangxi Province). *Tectonics*, 19(5): 852–871. doi: 10.1029/2000tc900009
- Liu, D. Y., Tang, J. F., Zhou, C. T., et al., 2002. U-Pb Zircon Dating and Its Geological Significance of the Taoyuanzhai Volcanic Rock, Central Dabie Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 217–212 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Sun, F. Y., Lin, B. L., 2015. Geochronology, Geochemistry and Zircon Hf Isotope of Miantian Granodiorite Intrusion in Yanbian Region, Southern Jinlin Province and Its Geological Significance. *Earth Science*, 40(1): 49–60 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. Q., Shao, Y. J., Zhang, Z. H., et al., 2015. Zircon U-Pb Ages, Hf Isotope Characteristics and Its Implication of Granite from Yaochong, Dabie Orogen, China. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 25(2): 479–491 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. Q., Zhang, Z. H., Li, Y. F., et al., 2014. Geologic Features, Mineralization Epoch and Tectonic Setting of Molybdenum Deposits in the Northern Dabie Mountain. *Geology and Exploration*, 50(2): 199–215 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. C., Jahn, B. M., Liu, D. Y., et al., 2004. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of a Metagabbro and Eclogites from Western Dabieshan (Hong'an Block), China, and Its Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 394(3–4): 171–192. doi: 10.1016/j.tecto.2004.08.004
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. doi: 10.1093/petrology/egp082
- Lu, X. X., 1998. Qinling Granite Reveals Tectonic Evolution Process. *Advance in Earth Sciences*, 13(2): 213–214 (in Chinese).
- Ma, C. Q., Yang, K. G., Ming, H. L., et al., 2004. The Timing of Tectonic Transition from Compression to Extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic Granites. *Science China: Earth Science*, 47(5): 453–462. doi: 10.1360/03yd0195
- Mao, J. W., Pirajno, F., Cook, N., 2011a. Mesozoic Metallogeny in East China and Corresponding Geodynamic Settings—An Introduction to the Special Issue. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 1–7. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.003
- Mao, J. W., Pirajno, F., Xiang, J. F., et al., 2011b. Mesozoic Molybdenum Deposits in the East Qinling-Dabie Orogenic Belt: Characteristics and Tectonic Settings. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 264–293. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.07.009
- Mao, J. W., Zhang, Z. H., Yu, J. L., et al., 2003. The Geodynamics Setting of Mesozoic Large-Scale Mineralization in North China: The Revelation from Accurate Timing of Metal Deposits. *Science in China (Series D)*, 33(4): 289–299 (in Chinese).
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., et al., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationships and Some Impli-

- cations for Crustal Evolution. *Lithos*, 79(1-2): 1-24. doi:10.1016/j.lithos.2004.04.048
- Mi, M., Chen, Y. J., Yang, Y. F., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of the Giant Qian'echong Mo Deposit, Dabie Shan, Eastern China: Implications for Ore Genesis and Tectonic Setting. *Gondwana Research*, 27(3): 1217-1235. doi:10.1016/j.gr.2014.05.006
- Meng, F., 2013. Study on Rock-Forming and Ore-Forming of the Lingshan Pluton in the Northern Margin of Dabie Mountains (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Patchett, P. J., Kouvo, O., Hedge, C. E., et al., 1982. Evolution of Continental Crust and Mantle Heterogeneity: Evidence from Hf Isotopes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78(3): 279-297. doi:10.1007/bf00398923
- Pearce, J., 1996. Sources and Settings of Granitic Rocks. *Episodes*, 19(4): 120-125.
- Ren, J. S., 1991. The Basic Characteristics of the Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere in China. *Regional Geology of China*, (4): 289-293 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247-263. doi:10.1016/0024-4937(89)90028-5
- Rubatto, D., Gebauer, D., 2000. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by Ion Microprobe: Some Examples from the Western Alps. Springer-Verlag, Berlin. doi:10.1007/978-3-662-04086-7_15
- Sui, Z. M., Chen, Y. J., 2011. Zircon Saturation Temperatures of Granites in Eastern Great Xing'an Range, and Its Geological Signification. *Global Geology*, 30(2): 162-172 (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. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345. doi:10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Sylvester, P. J., 1989. Post-Collisional Alkaline Granites. *The Journal of Geology*, 97(3): 261-280. doi:10.1086/629302
- Tang, J. F., Hou, M. J., Li, H. K., et al., 2003. Multi-Superimposed Deformations and Their Evolution in Northeastern Margin of Yangtze Block. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(4): 313-326 (in Chinese with English abstract).
- Vanderhaeghe, O., Teyssier, C., 2001. Partial Melting and Flow of Orogens. *Tectonophysics*, 342(3-4): 451-472. doi:10.1016/s0040-1951(01)00175-5
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2007. Early Cretaceous Adakitic Granites in the Northern Dabie Complex, Central China: Implications for Partial Melting and Delamination of Thickened Lower Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609-2636. doi:10.1016/j.gca.2007.03.008
- Wang, T., Guo, L., Zheng, Y. D., et al., 2012. Timing and Processes of Late Mesozoic Mid-Lower-Crustal Extension in Continental NE Asia and Implications for the Tectonic Setting of the Destruction of the North China Craton: Mainly Constrained by Zircon U-Pb Ages from Metamorphic Core Complexes. *Lithos*, 154: 315-345. doi:10.1016/j.lithos.2012.07.020
- Wang, Y. S., Zhu, G., Wang, D. X., et al., 2004. Relation Between P-T Conditions of Two Phases of Tanlu Strike-Slip Shear Zones and Delamination of the Orogenic Belts on the Eastern Margin of the Dabie Mountains. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 228-238 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295-304. doi:10.1016/0012-821x(83)90211-x
- Wedepohl, K. H., 1995. The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217-1232. doi:10.1016/0016-7037(95)00038-2
- Wei, C. J., Zhang, L. F., Wang, S. G., 2001. Mesozoic High-K Granitic Rocks from the Eastern Dabie Mountains, Central China and Their Geological Implications. *Science in China (Series D)*, 44(6): 525-534. doi:10.1007/BF02876212
- Wei, Q. G., Gao, X. Y., Zhao, T. P., et al., 2010. Petrogenesis of Tangjiaping Granite Porphyry in Northern Dabie: Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Geochemical Characteristics. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1550-1562 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419. doi:10.1007/bf00402202
- Wu, F., 2003. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, 66(3-4): 241-273. doi:10.1016/s0024-4937(02)00222-0
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions

- on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217—1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Zhang, S. B., et al., 2007. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Compositions of Migmatite from the North Dabie Terrane in China; Constraints on Partial Melting. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(9): 991—1009. doi: 10. 1111/j. 1525—1314. 2007. 00738. x
- Xie, Z., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2006. Mineral Isotope Evidence for the Contemporaneous Process of Mesozoic Granite Emplacement and Gneiss Metamorphism in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231(3): 214—235. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2006. 01. 028
- Xiong, X. L., Adam, J., Green, T. H., 2005. Rutile Stability and Rutile/Melt HFSE Partitioning during Partial Melting of Hydrous Basalt; Implications for TTG Genesis. *Chemical Geology*, 218(3—4): 339—359. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2005. 01. 014
- Xu, H. J., Ma, C. Q., Ye, K., 2007. Early Cretaceous Granitoids and Their Implications for Collapse of the Dabie Orogen, Eastern China; SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Chemical Geology*, 240(3—4): 238—259. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2007. 02. 018
- Xu, H. J., Ye, K., Ma, C. Q., 2008. Early Cretaceous Granitoids in the North Dabie and Their Tectonic Implications; Sr-Nd and Zircon Hf Isotopic Evidences. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 87—103 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. J., Ma, C. Q., Zhang, J. F., et al., 2013. Early Cretaceous Low-Mg Adakitic Granites from the Dabie Orogen, Eastern China; Petrogenesis and Implications for Destruction of the Over-Thickened Lower Continental Crust. *Gondwana Research*, 23(1): 190—207. doi: 10. 1016/j. gr. 2011. 12. 009
- Xu, K. Q., Hu, S. X., Sun, M. Z., 1982. On the Two Genetic Series of Granites in Southeastern China and Their Metallogenic Characteristics. *Mineral Deposits*, 1(2): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S. T., Jiang, L. L., Liu, Y. C., et al., 1992. Tectonic Framework and Evolution of the Dabie Mountains in Anhui, Eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 66(1): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Zhang, Z. M., Liu, F. L., et al., 2003. Exhumation Structure and Mechanism of the Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433—450 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Dong, S. W., Liu, X. C., 2002. U/Pb Zircon Dating for Cretaceous Adakitic Volcanic Rocks in Eastern Part of the North Dabie Mountains. *Geochimica*, 31(5): 455—463 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. Z., Zeng, J. N., Qin, Y. J., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating for Qian'echong Porphyry-Type Mo Deposit in Northern Dabie, China, and Its Geological Significance. *Geological Science and Technology Information*, 29(5): 35—45 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. Z., Zeng, J. N., Li, F. L., et al., 2011a. Geochemistry of Mineralization and Granitic Magmatism of Dayinjian Mo Deposit, Xinxian County, Henan Province and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 32(3): 279—292 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. Z., Zeng, J. N., Ren, A. Q., et al., 2011b. Characteristics of Mo Mineralization and Zircon LA-ICP-MS U-Pb Geochronology of Mushan Mo Deposit from Luoshan County, Henan Province. *Mineral Deposits*, 30(3): 435—447 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. R., Yang, K. G., Liu, Z. M., et al., 1999. Caledonian Tectono-Thermal Event in Tongbai-Dabie Orogenic Belt and Its Significance. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 247—253 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. Q., Tang, X. W., 2015. Geochemical Characteristics and Zircon LA-ICP-MS U-Pb Isotopic Dating of the Xiaofan Rock Bodies in North Dabieshan. *Acta Geologica Sinica*, 89(4): 692—700 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2008. State of Lithosphere beneath the North China Craton before the Mesozoic Lithospheric Disruption; A Suggestion. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(4): 516—520 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, H. F., Gao, S., Zhong, Z. Q., et al., 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(3—4): 281—299. doi: 10. 1016/s0009—2541(02)00006—2
- Zhang, K. J., 1997. North and South China Collision along the Eastern and Southern North China Margins. *Tectonophysics*, 270(1—2): 145—156. doi: 10. 1016/s0040—1951(96)00208—9
- Zhang, Q., Wang, Y., Li, C. D., et al., 2006. Granite Classification on the Basis of Sr and Yb Contents and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249—2269

(in Chinese with English abstract).

- Zhang, S., Shi, H. F., Hao, H. J., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Late Cretaceous Adakites in Bangong Lake, Tibet. *Earth Science*, 39(5): 509—524 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2008. Neoproterozoic Anatexis of Archean Lithosphere: Geochemical Evidence from Felsic to Mafic Intrusions at Xiaofeng in the Yangtze Gorge, South China. *Precambrian Research*, 163(3—4): 210—238. doi: 10.1016/j.precamres.2007.12.003
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2009. Origin of TTG-Like Rocks from Anatexis of Ancient Lower Crust: Geochemical Evidence from Neoproterozoic Granitoids in South China. *Lithos*, 113(3—4): 347—368. doi: 10.1016/j.lithos.2009.04.024
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2009. Remelting of Subducted Continental Lithosphere: Petrogenesis of Mesozoic Magmatic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Science in China (Series D)*, 52(9): 1295—1318. doi: 10.1007/s11430-009-0134-8
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 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(3—4): 248—272. doi: 10.1016/j.lithos.2006.03.067
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2008. Zircon U-Pb Ages, Hf and O Isotopes Constrain the Crustal Architecture of the Ultrahigh-Pressure Dabie Orogen in China. *Chemical Geology*, 253(3—4): 222—242. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.011
- Zheng, Y. F., Fu, B., Gong, B., 2003. Stable Isotope Geochemistry of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks from the Dabie-Sulu Orogen in China: Implications for Geodynamics and Fluid Regime. *Earth-Science Reviews*, 62(1): 105—161. doi: 10.1016/S0012-8252(02)00133-2
- Zheng, Y. F., Zhang, S. B., 2007. Formation and Evolution of Precambrian Continental Crust in South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 1—12. doi: 10.1007/s11434-007-0015-5
- Zhou, H. S., Liu, M. H., Yan, Y. T., et al., 2013. Zircon U-Pb Age of Xinxian Pluton in Dabie Orogenic Belt and Its Geological Implications. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 26(1): 94—98 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Xie, C. L., Chen, W., et al., 2010. Evolution of the Hongzhen Metamorphic Core Complex: Evidence for

Early Cretaceous Extension in the Eastern Yangtze Craton, Eastern China. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3—4): 506—516. doi: 10.1130/b30028.1

附中文参考文献

- 河南省地质矿产局, 1989. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 陈伟, 徐兆文, 李红超, 等, 2013. 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. *地质学报*, 87(10): 1510—1524.
- 高阳, 2014. 大别山千鹅冲和汤家坪斑岩钼矿地质地球化学及成因研究(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 高阳, 叶会寿, 李永峰, 等, 2014. 大别山千鹅冲钼矿区花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及微量元素特征. *岩石学报*, 30(1): 49—63.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等, 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼钨同位素年龄及其意义. *矿床地质*, 13(3): 221—230.
- 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 等, 2007. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼钨定年及其地质意义. *矿床地质*, 26(4): 417—424.
- 李锦轶, 2001. 中朝地块与扬子地块碰撞的时限与方式——长江中下游地区震旦纪—侏罗纪沉积环境的演变. *地质学报*, 75(1): 25—34.
- 李诺, 陈衍景, 张辉, 等, 2007. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景. *地学前缘*, 14(5): 186—198.
- 李石, 王彤, 1991. 桐柏山—大别山花岗岩类地球化学. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 李永峰, 2005. 豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钼(金)成矿作用(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 刘敦一, 汤加富, 周存亭, 等, 2002. 大别造山带核部桃园寨火山岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *地质学报*, 76(2): 217—221.
- 刘金龙, 孙丰月, 林博磊, 等, 2015. 吉林延边地区棉田岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素. *地球科学*, 40(1): 49—60.
- 刘清泉, 邵拥军, 张智慧, 等, 2015. 大别山姚冲花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及地质意义. *中国有色金属学报*, 25(2): 479—491.
- 刘清泉, 张智慧, 李永峰, 等, 2014. 大别山北麓斑岩型钼矿床地质特征、成矿时代及其成矿构造背景. *地质与勘探*, 50(2): 199—215.
- 卢欣祥, 1998. 秦岭花岗岩揭示的秦岭构造演化过程. *地球科学进展*, 13(2): 213—214.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等, 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. *中国科学(D辑)*, 33(4): 289—299.
- 孟芳, 2013. 大别山北麓灵山岩体的成岩成矿作用研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.

- 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, (4): 289—293.
- 隋振民, 陈跃军, 2011. 大兴安岭东部花岗岩类锆石饱和温度及其地质意义. 世界地质, 30(2): 162—172.
- 汤加富, 侯明金, 李怀坤, 等, 2003. 扬子地块东北缘多期叠加变形及形成演化. 大地构造与成矿学, 27(4): 313—326.
- 王勇生, 朱光, 王道轩, 等, 2004. 大别山东缘郟庐两期走滑剪切带形成的温压条件与造山带折返的关系. 大地构造与成矿学, 28(3): 228—238.
- 魏庆国, 高昕宇, 赵太平, 等, 2010. 大别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.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217—1238.
- 续海金, 叶凯, 马昌前, 2008. 北大别早白垩纪花岗岩类 Sm-Nd 和锆石 Hf 同位素及其构造意义. 岩石学报, 24(1): 87—103.
- 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 等, 1982. 华南两个成因系列花岗岩及其成矿特征. 矿床地质, 1(2): 1—14.
- 徐树桐, 江来利, 刘贻灿, 等, 1992. 大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程. 地质学报, 66(1): 1—14.
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等, 2003. 苏鲁高压—超高压变质带的折返构造及折返机制. 地质学报, 77(4): 433—450.
- 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, 等, 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, 等, 2011a. 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.
- 杨梅珍, 曾键年, 任爱群, 等, 2011b. 河南罗山县母山钼矿床成矿作用特征及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年代学. 矿床地质, 30(3): 435—447.
- 杨巍然, 杨坤光, 刘忠明, 等, 1999. 桐柏—大别造山带加里东期构造热事件及其意义. 地质前缘, 6(4): 247—253.
- 杨泽强, 唐相伟, 2015. 北大别山肖畈岩体地球化学特征和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年. 地质学报, 89(4): 692—700.
- 翟明国, 2008. 华北克拉通破坏前的状态——对讨论华北克拉通破坏问题的一个建议. 大地构造与成矿学, 32(4): 516—520.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等, 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社.
- 张旗, 王焰, 李承东, 等, 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249—2269.
- 张硕, 史洪峰, 郝海建, 等, 2014. 青藏高原班公湖地区晚白垩世埃达克岩年代学、地球化学及构造意义. 地球科学, 39(5): 509—524.
- 周红升, 刘明华, 严育通, 等, 2013. 大别造山带新县岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 信阳师范学院学报(自然科学版), 26(1): 94—98.