

大别山地区鸡公山岩体锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及其地质意义

唐相伟, 杨泽强, 周雷强, 许德忠, 郭跃闪, 种凯琳
(河南省地质矿产勘查开发局 第三地质矿产调查院, 河南 郑州 450000)

摘要: 鸡公山花岗岩是桐柏-大别山造山带的一处重要岩基。为探讨鸡公山花岗岩的岩石成因和动力学背景, 指导区域找矿, 对鸡公山岩体开展了锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究。岩石地球化学分析结果显示, 岩体具准铝质-弱过铝质花岗岩特征, 属于高钾钙碱性系列; 副矿物有少量角闪石, 为分异 I 型花岗岩。锆石 U-Pb 定年测得岩体年龄值为 141.8 ± 0.8 Ma ($n=26$, MSWD=1.15), 表明鸡公山岩体形成于早白垩世。全岩 Sr 同位素 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.707 75~0.708 18, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 -19.21~-17.63, 两阶段模式年龄为 2.49~2.36 Ga。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 845~0.282 083, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 为 -29.67~-21.31, 两阶段模式年龄为 3.07~2.54 Ga。Sr-Nd-Hf 同位素特征暗示形成鸡公山岩体的岩浆可能是扬子板块中下地壳新太古代大别表壳岩物质重熔形成。岩体具较高的 (La/Yb)_N、Sr/Y 值, 铕负异常不明显, 与大别山埃达克型花岗岩特征类似, 形成于构造伸展机制下, 为尚未发生拆沉的加厚下地壳部分熔融产物。鸡公山岩体可能是岩体内伟晶岩脉的母体花岗岩。

关键词: 大别山; 锆石年代学; Sr-Nd-Hf 同位素; 鸡公山岩体

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)06-1047-14

Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the Jigongshan granite in the Dabie Mountains and their geological significance

TANG Xiang-wei, YANG Ze-qiang, ZHOU Lei-qiang, XU De-zhong, GUO Yue-shan and ZHONG Kai-lin
(No. 3 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Jigongshan granite is an important batholith in Tongbai-Dabie orogenic belt. In order to discuss the petrogenesis and dynamic background of the Jigongshan granite and guide regional prospecting, this paper has carried out zircon U-Pb dating, rock geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope studies on the Jigongshan granite. The results show that the pluton is a paraaluminous-weak peraluminous granite, belonging to the high-potassium calc-alkaline series and fractionated I-type granite, accessory mineral includes minor hornblende. Zircon U-Pb dating shows that the age of the Jigongshan pluton is 141.8 ± 0.8 Ma ($n=26$, MSWD=1.15), indicating that the Jigongshan pluton was formed in the Early Cretaceous. The ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ values and the two stage model age of whole rock are 0.707 75~0.708 18, -19.21~-17.63 and 2.49~2.36 Ga, respectively. The $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values and the two stage model age of zircon are 0.281 845~0.282 083, -29.67~-21.31 and 3.07~2.54 Ga, respectively. Sr-Nd-Hf isotopic characteristics suggest that the Jigongshan pluton may be formed by the remelting of Neoarchean

收稿日期: 2022-05-20; 接受日期: 2022-09-10; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD2016005237, DD20190570-2020-02); 河南省两权价款地质科研项目; 河南省财政地质勘查项目

作者简介: 唐相伟 (1982-), 男, 高级工程师, 从事地质矿产勘查工作, E-mail: 48901860@qq.com。

middle-lower crust of the Yangtze plate. The granite has high $(La/Yb)_N$, Sr/Y values, and inapparent Eu negative anomalies, similar to the adakite-type granite in the Dabie Mountains. The granite formed in extensional structure, as the product of partial melting of the thickened lower crust that has not yet been delaminated. Jigongshan pluton may be the parent granite of pegmatite vein in the pluton.

Key words: Dabie Mountains; zircon geochronology; Sr-Nd-Hf isotopes; Jigongshan pluton

Fund support: Project of China Geological Survey (DD2016005237, DD20190570-2020-02); Two Rights Price Geological Research Project of Henan Province; Finance Geological Survey of Henan Province

鸡公山岩体位于秦岭造山带的东延部分大别造山带,后者为三叠纪扬子陆块向华北陆块俯冲碰撞形成的大陆碰撞型造山带,在晚中生代碰撞后伸展机制下,经历了地壳加厚、地壳拆沉作用等过程,期间发生大规模的岩浆活动(Ma *et al.*, 1998; 高山等, 1999; 毛景文等, 2003; 罗照华等, 2006)。许多学者对大别山地区白垩纪岩浆活动开展了大量研究,发现岩浆活动主要集中在 145~110 Ma 之间,又分为两个主要集中时间段: 145~132 Ma 和 130~110 Ma。前者包括新县岩体的锆石 U-Pb 年龄(133.2 ± 1.7 Ma)(杨春玥等, 2020)、商城岩体的锆石 U-Pb 年龄(137 ± 2 Ma)(高昕宇等, 2013)、肖畈似斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄(139.3 ± 0.64 Ma)(杨泽强等, 2015); 后者包括汤家坪花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄(121.6 ± 4.6 Ma)(魏庆国等, 2010)、千鹅冲花岗岩斑岩的锆石 U-Pb 年龄(129 ± 2 Ma)(高阳等, 2014)、陡坡二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄(124.2 ± 0.28 Ma)(孟芳, 2013)。但对下地壳拆沉作用时限还存在较大的分歧,一些学者认为加厚下地壳拆沉发生在 133 Ma 左右或更早(朱江等, 2019; Chen *et al.*, 2015),也有学者认为拆沉减薄作用发生在 130 Ma 以后(张超等, 2008; He *et al.*, 2011; 唐相伟等, 2017)。这一问题还有待进一步研究。

前人对鸡公山岩体开展了初步研究,测得锆石 U-Pb 年龄为 135 Ma,认为岩体可能来源于古元古代古陆壳的部分熔融(Zhang *et al.*, 2018)。20 世纪 80 年代至今,在鸡公山岩体内发现有娘娘顶铍矿(屠江海等, 2017)和犁华嘴钨矿,但该区稀有金属富集成矿与岩体的源区、演化等成因的关系还不清楚。本次在前人研究成果基础上,开展了野外地质调查以及锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素研究,欲进一步解析鸡公山岩体成因、动力学背景、岩体与成矿关系,为指导下一步铍、稀土找矿提供一定岩石成因的理论依据。

1 区域地质背景

大别造山带位于栾川-明港断裂以南、襄樊-广济断裂以北,又以商丹断裂(龟山-梅山断裂)、磨子潭-晓天断裂为界,北侧属北秦岭弧盆系,中间为南秦岭陆棚-陆坡带,南侧属大别高压-超高压变质杂岩带。在中侏罗世之前,受东西向构造带控制,形成“东西成带”的构造格局。中侏罗世以后,受构造体制转换的影响,呈现出断陷与隆升相间的盆岭构造格局,即“纵横成块”(钟增球等, 2001; 毛景文等, 2005)。

侏罗纪以前出露地层有新太古代-古元古界大别岩群、古元古界秦岭岩群、中上元古界浒湾岩组、中-新元古界龟山岩组、震旦系-下古生界肖家庙岩组、古生界定远组、下古生界寒武系二郎坪群、泥盆系南湾组,侏罗纪以后出露地层有侏罗系朱集组、段集组,白垩系金刚台组、陈棚组、周家湾组。

区内岩浆活动大致可划分为新太古代、新元古代、古生代、中生代岩浆活动阶段,其中新元古代和中生代岩浆活动最为强烈。中生代中酸性小岩体和大的花岗岩基共存,既有深成相,也有浅成相、超浅成相,构成燕山期中酸性侵入岩为主的岩浆岩带(图 1),其中的中酸性小岩体是该区钨多金属矿的主要成矿母岩,小岩体分布严格受断裂控制,产出部位往往是北西西向断裂与北北东向断裂的交汇部位或附近。

2 样品采集和分析方法

样品来自公路旁采石坑新鲜岩石,无风化,采样位置及编号见图 1,其中似斑状黑云二长花岗岩 U-Pb、Lu-Hf 同位素分析样品 1 件,全岩主量元素和微量、稀土元素和 Sr-Nd 同位素样品 3 件。

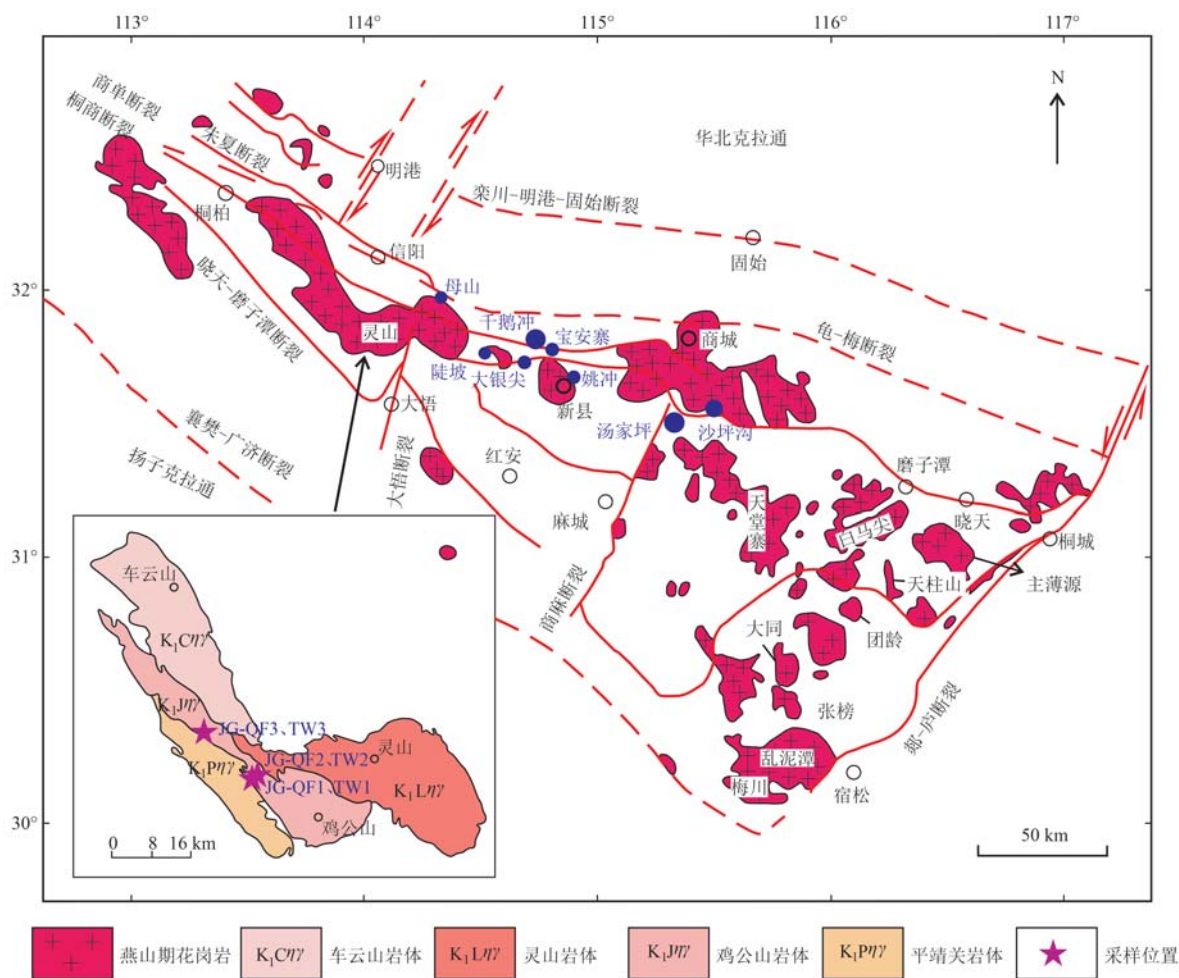


图1 大别山燕山期花岗岩分布图[修改自 Chen 等(2017)]

Fig. 1 Distribution map of the Yanshanian granites in Dabie Mountains (modified after Chen *et al.*, 2017)

全岩主微量元素地球化学分析由河南省岩石矿物测试中心完成, 采用等离子体发射光谱仪、紫外可见分光光度计、电感耦合等离子体质谱仪等测定, 测试中通过标样对测得数据质量进行监控, 元素分析精度优于 5%。

锆石样品制靶、阴极发光、透反射光照相、锆石 U-Pb 测年和 Lu-Hf 同位素分析、全岩 Sr-Nd 同位素组成分析均由天津地质调查中心实验测试室完成, 锆石样品挑选由河北省区域地质调查队实验室完成, 通过人工破碎、重砂淘洗, 然后, 在双目镜下挑纯。在透射光、反射光、阴极发光研究基础上, 优选环带较好, 裂隙不发育锆石。锆石 U-Pb 测年和 Hf 同位素分析采用仪器为美国 ESI 公司的 NEW WAVE 193 nm FX ArF 激光器与 Thermo Fisher 公司的 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪。锆石 U-Pb 测年束斑

直径约为 35 μm , 剥蚀时间 30 s 左右, 标样为美国国家标准技术研究院合成的硅酸盐物质 NIST610。Hf 同位素分析束斑直径选择在 50 μm 左右, 剥蚀时间 30 s 左右, 具体流程见耿建珍等(2011)。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序进行(刘勇胜等, 2013)。

取 200 目全岩样品粉末, 采用离子交换树脂技术进行全岩 Sr-Nd 同位素组成分析样品分离, 仪器为 Triton 热电离子质谱, 采用标样为 NBS987 和国家标准 GBS04419、国际标准岩石 BCR-2 进行质量监控。Sr 分馏的内校正因子均采用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375\,209$ 、 $\text{Sm} = (6.70 \pm 0.14) \times 10^{-6}$ 、Nd = $(28.00 \pm 0.56) \times 10^{-6}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\,633 \pm 30$, Nd 分馏的内校正因子均采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\,900$, 基本流程同文献(王树庆等, 2018)。

3 岩石特征

鸡公山岩体呈北西向带状展布于四望山-鸡公山一带,向西延伸至湖北省武胜关,出露面积大于300 km²,与北边灵山岩体、车云山岩体呈侵入接触关系。岩体为似斑状黑云二长花岗岩,岩石呈肉红色,似斑状结构,块状构造(图2a~2c),矿物成分为钾长石(40%~45%)、斜长石($An = 13 \sim 15$)(25%~

35%)、石英(15%~25%)、黑云母(2%~5%)(图2d、2e)。斑晶为深肉红色条纹长石和微斜长石,含量不均匀,一般在5%~50%,以10%~20%为多,大小2.5 mm×4 mm~4 mm×8 mm。基质主要为石英、条纹长石、斜长石及少量黑云母。副矿物主要有钨硅磷灰石、褐钨铌矿、铌钽矿、辉钼矿、褐帘石、绿帘石、萤石、锆石和少量角闪石。岩石内部有伟晶岩脉,伟晶岩呈脉状或透镜状(图2f)与岩体之间呈过渡接触关系,与犁华嘴钨矿、娘娘顶钨矿密切相关。

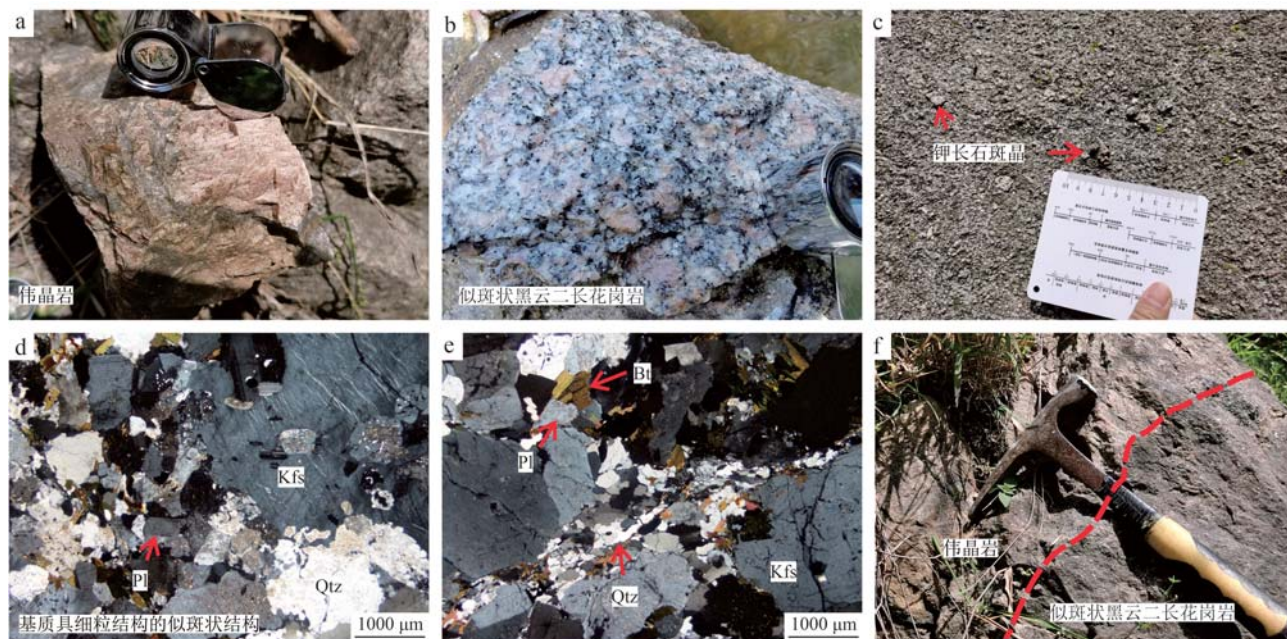


图2 伟晶岩手标本(a)、似斑状黑云二长花岗岩标本(b、c)、似斑状黑云二长花岗岩镜下照片(d、e, 单偏光)、野外伟晶岩岩脉(f)照片

Fig. 2 Hand specimens of pegmatite(a), hand specimens (b, c) and photomicrographs (d and e, plane light) of porphyritic monzogranite, field photo of pegmatite vein(f)

Bt—黑云母; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英

Bt—biotite; Kfs—potash feldspar; Pl—plagioclase; Qtz—quartz

4 测试结果

4.1 岩石地球化学

鸡公山岩体全岩分析结果(表1)显示,岩石具有高SiO₂(69.22%~71.42%)、Al₂O₃(14.44%~16.07%)和K₂O+Na₂O(8.01%~8.92%)特征, K₂O/Na₂O=0.84~1.15。除样品JG-QF2为1.21外,其他样品的含铝指数A/CNK都集中在0.98~1.13之间。A/NK值(1.23~1.43)显示准铝质到弱过铝质花岗岩特征(图3a);岩体分异指数DI=85.2

~91.02,在K₂O-SiO₂图解上,岩体属高钾钙碱性系列(图3b)。

岩体稀土元素总量在170.95×10⁻⁶~246.45×10⁻⁶之间,轻、重稀土元素比(LREE/HREE)为20.10~26.06, (La/Yb)_N=35.3~56.81,轻稀土元素分馏明显,稀土元素球粒陨石标准化模式图中呈右倾模式(图4a),铕谷不明显(δEu为0.7~1.09),重稀土元素整体稍平坦,Ho弱亏损,属轻稀土元素富集型。岩体微量元素蛛网图(图4b)显示,曲线整体右倾,大离子亲石元素富Ba、K,高场强元素富集Hf,亏损Nb、Ta、P等。

表 1 鸡公山岩体主量元素 ($w_B/\%$) 及微量元素
($w_B/10^{-6}$) 分析结果

Table 1 Major elements ($w_B/\%$) and trace elements
($w_B/10^{-6}$) of Jigongshan intrusion

	JG-1	JG-2	JG-3	JG-QF1	JG-QF2	JG-QF3
SiO ₂	70.34	71.40	70.92	71.20	71.42	69.22
Al ₂ O ₃	15.25	14.44	14.83	14.98	14.96	16.07
Fe ₂ O ₃	0.98	0.53	0.85	1.37	1.84	1.71
FeO	1.06	1.69	0.97	1.07	0.42	0.87
TiO ₂	0.25	0.20	0.38	0.42	0.36	0.42
K ₂ O	4.58	4.58	4.60	4.07	4.10	3.68
Na ₂ O	4.10	4.00	4.32	3.94	4.23	4.40
CaO	1.62	1.49	1.71	1.40	0.53	1.65
MgO	0.37	0.37	0.45	0.57	0.36	0.36
MnO	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
P ₂ O ₅	0.10	0.09	0.10	0.13	0.12	0.13
灼失量	0.38	0.62	0.44	0.36	0.82	0.52
H ₂ O ⁺				0.34	0.55	0.45
总量	99.06	99.44	99.59	99.88	99.74	99.71
A/NK	1.30	1.25	1.23	1.38	1.31	1.43
A/CNK	1.04	1.01	0.98	1.12	1.21	1.13
Rb	127.00	107.00	130.00	106.00	120.00	115.00
Sr	670.00	460.00	550.00	544.00	418.00	631.00
Zr	156.00	140.00	162.00	212.00	218.00	209.00
Nb	10.60	8.50	9.20	9.12	11.00	14.00
Ba	2 400.00	1 760.00	2 100.00	1 737.00	1 495.00	1 622.00
Hf	4.80	4.70	4.80	9.95	10.20	9.45
Ta	1.20	0.80	1.20	0.75	0.99	1.23
Th	14.20	13.10	16.40	10.00	13.00	17.10
U	1.14	1.23	1.90	1.02	1.51	1.90
La	63.40	42.50	69.10	59.50	52.00	57.60
Ce	107.00	79.10	99.60	108.00	116.00	113.00
Pr	9.71	8.03	11.20	12.50	11.00	12.40
Nd	28.20	30.10	41.10	42.00	37.90	43.30
Sm	6.43	3.18	6.47	6.25	5.98	6.90
Eu	1.33	0.99	1.18	1.44	1.20	1.57
Gd	3.00	2.44	3.24	4.84	4.61	5.40
Tb	0.51	0.42	0.52	0.51	0.52	0.60
Dy	2.23	1.90	2.17	1.91	2.14	2.60
Ho	0.37	0.34	0.34	0.30	0.37	0.44
Er	0.99	0.85	0.96	0.87	1.05	1.21
Tm	0.14	0.13	0.15	0.11	0.15	0.18
Yb	0.92	0.82	0.82	0.73	0.99	1.10
Lu	0.13	0.15	0.14	0.10	0.15	0.15
Y	8.44	7.94	0.40	7.79	10.00	11.60
ΣREE	224.36	170.95	236.99	239.06	234.06	246.45
LREE/HREE	26.06	23.25	27.42	24.51	22.45	20.10
δEu	0.93	1.09	0.79	0.80	0.70	0.79
(La/Yb) _N	46.46	34.94	56.81	54.95	35.41	35.30

其中 JG-1、JG-2、JG-3 样品数据来自河南省地矿厅第三地质调查队 (1996)^①。

① 河南省地矿厅第三地质调查队. 1996. 1:5 万游河幅、信阳市幅、谭家河幅、溱河港幅、李家寨幅区域地质调查报告.

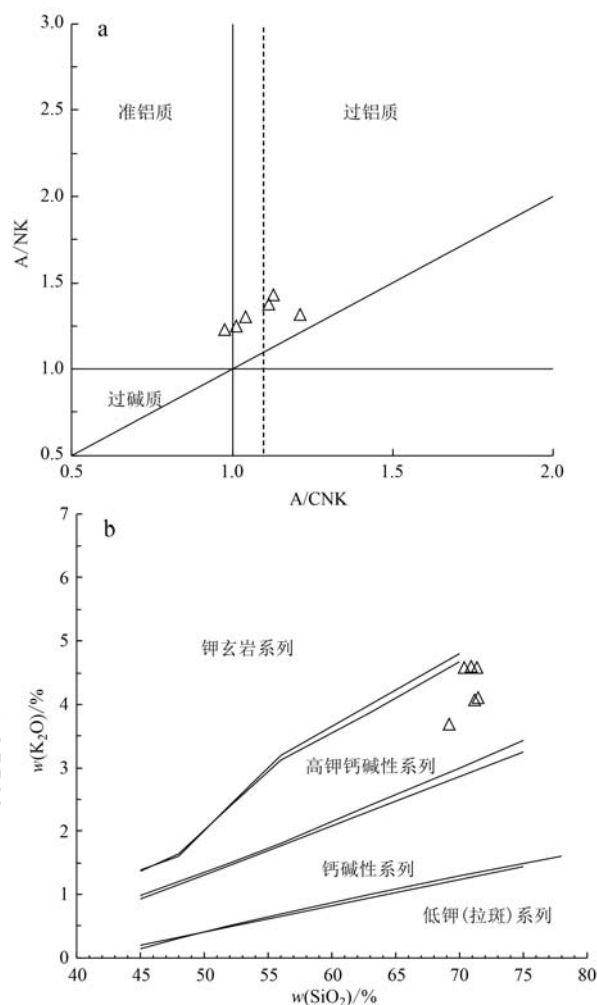


图 3 鸡公山岩体 A/NK-A/CNK 图解(a, 据 Morrison, 1980)和 K₂O-SiO₂ 图解(b, 据 Middlemost, 1994)

Fig. 3 A/NK-A/CNK diagram (a, after Morrison, 1980) and K₂O-SiO₂ plot (b, after Middlemost, 1994) of Jigongshan intrusion

4.2 锆石 U-Pb 测年

锆石呈短柱状或长柱状, 多为自形晶, 粒径为 45~75 μm, 长宽比约 1:1~2:1, 从锆石的阴极发光图像可以观察到清晰的单生长同心环带特征(图 5), 锆石的 Th/U 值较高(0.12~1.5), 具有岩浆锆石特征(吴元保等, 2004)。

从鸡公山岩体 29 颗锆石中, 选择 29 个点开展了 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试, 测试结果见表 2。测点 14、25 由于 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄明显偏老, 测点 12 的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄误差偏大, 其余 26 颗锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U

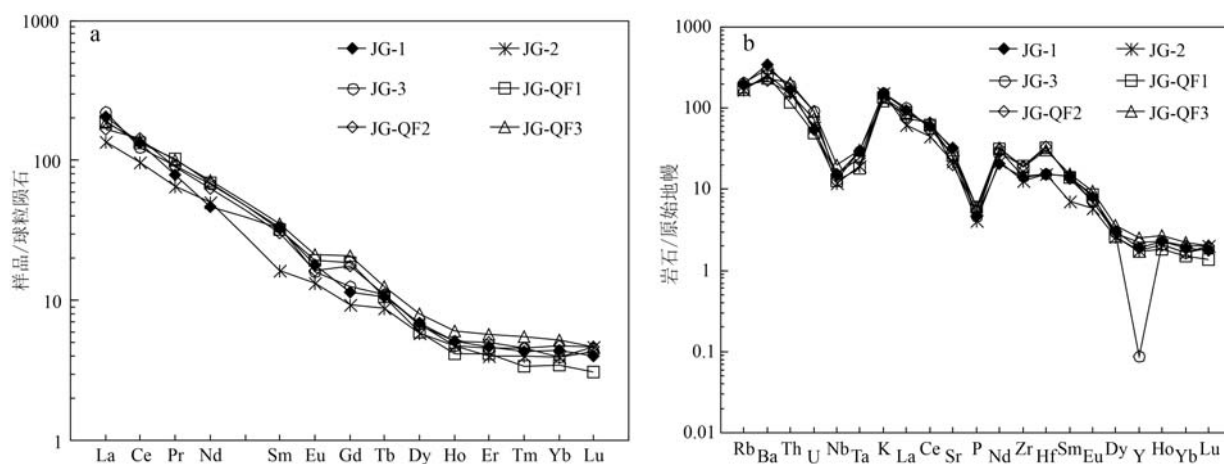


图4 鸡公山岩体稀土元素球粒陨石标准化图解(a, 标准化值据 Boynton, 1984)和微量元素原始地幔标准化图解(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized spidergrams of trace elements (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) of Jigongshan intrusion

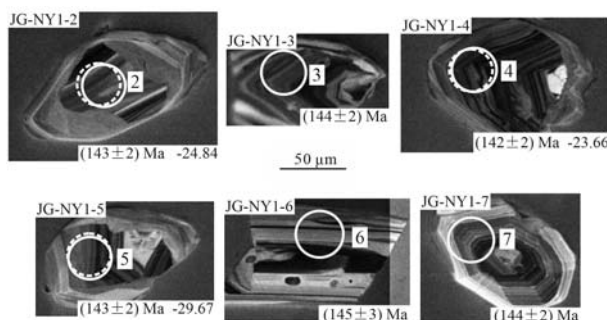


图5 鸡公山岩体锆石阴极发光图像、激光点位置及 U-Pb 年龄、 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值

Fig. 5 Cathodoluminescence images, laser point locations, U-Pb ages and $\epsilon\text{Hf}(t)$ values
实线圆为锆石 U-Pb 测点, 虚线圆为锆石 Lu-Hf 测点
The solid circle is the zircon U-Pb measure point, and the dotted circle is the zircon Lu-Hf point

年龄介于 146 ~ 136 Ma 之间, 加权平均年龄值为 141.8 ± 0.8 Ma ($n=26$, $\text{MSWD}=1.15$) (图 6), 此年龄值代表了鸡公山岩体的结晶年龄。

4.3 全岩 Sr-Nd 同位素

本次采集鸡公山岩体样品的 Sr-Nd 同位素 3 件, 分析及计算结果见表 3, 表中其他计算值在 142 Ma 基础上计算得到。鸡公山岩体样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.707 75 ~ 0.708 18, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 -19.21 ~ -17.63, 相应的两阶段模式年龄为 2.49 ~ 2.36 Ga, 平均 2.45 Ga。

4.4 Hf 同位素

在 LA-ICP-MS U-Pb 定年基础上, 优选 13 颗锆石, 在相应测年位置, 开展了微区 Lu-Hf 同位素测定, 测得 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值范围为 0.281 845 ~ 0.282 083 (表 4)。根据测得年龄计算得到 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 -29.67 ~ -21.31, 平均值 -25.18; Hf 同位素两阶段模式年龄 3.07 ~ 2.54 Ga, 平均 2.78 Ga。

5 讨论

5.1 岩体成因类型

鸡公山岩体 SiO_2 (69.22% ~ 71.42%)、高的 Al_2O_3 (14.44% ~ 16.07%)、钾钠含量大致相同显示准铝质-弱过铝质花岗岩 ($\text{A}/\text{CNK}=0.98 \sim 1.13$) 特征, 属于高钾钙碱性系列。副矿物发现有少量角闪石, 薄片观察未见白云母、石榴子石、堇青石、电气石等矿物。上述特征暗示鸡公山岩体具有 I 型花岗岩的亲缘性。鸡公山岩体分异指数 $\text{DI}=85.20 \sim 91.02$, 岩体内外接触带发现有钼、钇矿等, 副矿物有钇硅磷灰石, 在 $\text{FeO}^T/\text{MgO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 关系图上样品均落入分异花岗岩区域 (图 7a), 证明岩体经历过一定的结晶分异演化。部分学者用 P_2O_5 含量演化趋势来区分 I 型、S 型花岗岩 (吴福元等, 2007, 2017), 鸡公山岩体 P_2O_5 含量不高 (0.09% ~ 0.13%), 与典型 S 型花岗岩 (>0.12%) 存在差别,

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating result of Jigongshan intrusion

样品编号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			同位素年龄/Ma								
	Pb	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
JG-NY1-1	42	607	1 895	0.32	0.022 3	0.000 2	0.150 4	0.002 5	0.048 9	0.000 6	142	1	142	2	142	31
JG-NY1-2	4	176	128	1.37	0.022 5	0.000 3	0.152 6	0.006 2	0.049 3	0.002 0	143	2	144	6	161	94
JG-NY1-3	11	274	444	0.62	0.022 6	0.000 3	0.148 7	0.003 7	0.047 7	0.001 0	144	2	141	3	85	52
JG-NY1-4	26	458	1 177	0.39	0.022 3	0.000 3	0.150 3	0.003 2	0.048 8	0.000 8	142	2	142	3	138	38
JG-NY1-5	14	217	635	0.34	0.022 4	0.000 4	0.150 3	0.004 0	0.048 6	0.001 0	143	2	142	4	130	49
JG-NY1-6	9	149	398	0.37	0.022 7	0.000 4	0.156 3	0.004 4	0.049 9	0.001 2	145	3	147	4	191	58
JG-NY1-7	10	351	413	0.85	0.022 5	0.000 3	0.152 4	0.003 7	0.049 0	0.001 0	144	2	144	3	149	48
JG-NY1-8	23	294	1 007	0.29	0.022 9	0.000 4	0.156 5	0.003 9	0.049 6	0.000 9	146	2	148	4	177	41
JG-NY1-9	16	657	610	1.08	0.022 6	0.000 3	0.149 4	0.003 7	0.048 0	0.001 0	144	2	141	3	98	50
JG-NY1-10	16	90	779	0.12	0.021 7	0.000 4	0.146 7	0.003 4	0.049 0	0.000 8	138	2	139	3	148	40
JG-NY1-11	10	161	446	0.36	0.022 4	0.000 4	0.149 3	0.004 7	0.048 4	0.001 3	143	2	141	4	119	64
JG-NY1-12	2	73	63	1.16	0.022 1	0.001 1	0.148 9	0.007 6	0.048 8	0.002 6	141	7	141	7	137	123
JG-NY1-13	10	74	469	0.16	0.022 2	0.000 2	0.148 4	0.003 2	0.048 5	0.000 9	141	1	140	3	123	45
JG-NY1-14	50	522	1 607	0.32	0.022 3	0.000 3	0.541 9	0.010 7	0.176 3	0.003 5	142	2	440	9	2 618	33
JG-NY1-15	1	72	48	1.50	0.022 2	0.000 4	0.151 5	0.009 2	0.049 6	0.003 2	141	2	143	9	176	149
JG-NY1-16	14	168	658	0.26	0.022 4	0.000 2	0.149 0	0.002 9	0.048 2	0.000 9	143	1	141	3	108	42
JG-NY1-17	1	8	60	0.13	0.022 2	0.000 4	0.151 0	0.008 9	0.049 3	0.002 9	142	2	143	8	163	135
JG-NY1-18	21	517	872	0.59	0.022 4	0.000 2	0.151 5	0.003 1	0.049 0	0.000 9	143	1	143	3	149	41
JG-NY1-19	14	373	571	0.65	0.022 5	0.000 3	0.152 0	0.003 6	0.049 0	0.001 1	143	2	144	3	150	54
JG-NY1-20	1	65	46	1.41	0.022 3	0.000 4	0.151 4	0.008 1	0.049 2	0.002 8	142	3	143	8	156	135
JG-NY1-21	15	523	615	0.85	0.021 8	0.000 2	0.151 4	0.009 1	0.050 3	0.003 0	139	1	143	9	207	138
JG-NY1-22	30	535	1 334	0.40	0.022 1	0.000 2	0.152 4	0.003 0	0.050 0	0.000 8	141	2	144	3	195	39
JG-NY1-23	16	235	726	0.32	0.022 0	0.000 3	0.151 0	0.004 3	0.049 8	0.001 4	140	2	143	4	188	67
JG-NY1-24	12	77	583	0.13	0.021 9	0.000 2	0.145 8	0.004 7	0.048 2	0.001 3	140	2	138	4	109	64
JG-NY1-25	39	464	1 275	0.36	0.031 8	0.000 4	0.225 3	0.004 2	0.051 4	0.000 7	202	2	206	4	260	33
JG-NY1-26	31	600	1 452	0.41	0.021 4	0.000 4	0.145 2	0.008 7	0.049 3	0.003 1	136	3	138	8	163	145
JG-NY1-27	13	356	578	0.62	0.022 2	0.000 4	0.148 9	0.006 0	0.048 7	0.002 1	141	3	141	6	133	103
JG-NY1-28	9	51	421	0.12	0.021 6	0.000 4	0.150 5	0.007 0	0.050 6	0.002 3	138	2	142	7	223	106
JG-NY1-29	12	309	542	0.57	0.021 8	0.000 3	0.150 0	0.005 4	0.049 9	0.001 7	139	2	142	5	190	78

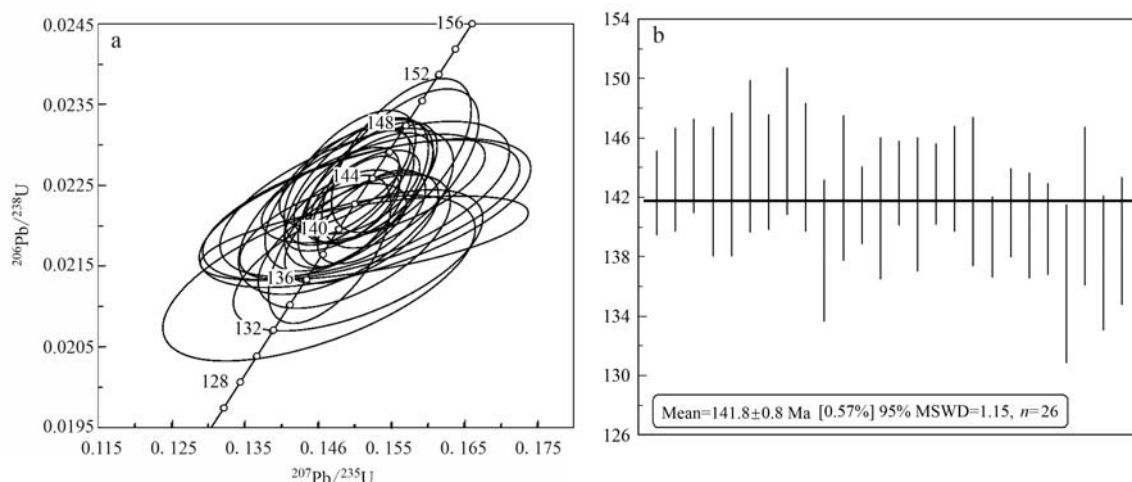


图6 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig. 6 Zircon LA-ICP-MS U-Pb age concordia diagram(a) and weighted mean age diagram(b)

P_2O_5 – SiO_2 图解(图 7b)表明 P_2O_5 随 SiO_2 含量增加而减少, 呈现出负相关性, 具 I 型演化趋势, 支持了鸡公山岩体具 I 型花岗岩特征。一般认为, 典型的 A 型花岗岩高 FeO^T/MgO 、锆谷明显、 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 含量 $>350 \times 10^{-6}$ 、Yb 含量 $>1 \times 10^{-6}$ 、Sr 含量 $<100 \times 10^{-6}$ (Bonin, 2007; 张旗等, 2021)。鸡公山岩体 FeO^T/MgO (3.86~5.86)、锆谷不明显, $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 含量 ($271 \times 10^{-6} \sim 355 \times 10^{-6}$)、Sr 含量 ($418 \times 10^{-6} \sim 670 \times 10^{-6}$)、Yb 含量 ($0.73 \times 10^{-6} \sim 0.99 \times 10^{-6}$, 一个点为 1.1×10^{-6}), 明显有别于 A 型花岗岩特征。综上所述, 认为鸡公山岩体更倾向于为分异 I 型花岗岩。

5.2 岩浆源区

多数学者研究认为大别山早白垩世花岗岩是扬子板块中下地壳的产物, 如新县岩体、达权店岩体、商城岩体、谭冲花岗岩、千鹅冲花岗岩等 (高昕宇等, 2013; 高阳等, 2014; 刘清泉等, 2016; 朱江等, 2019)。鸡公山岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 集中在 0.707 75~0.708 18, 具有较大的负 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值 ($-19.21 \sim -17.63$) 和 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值 ($-29.67 \sim -21.31$), Sr-Nd 同位素和 Hf 同位素均显示壳源特征。Sr-Nd 同位素图解显示, 3 件样品点落入扬子下地壳附近 (图 8a), 与大别山区多数早白垩世花岗岩 Sr-Nd 同位素组成类似, 暗示鸡公山岩体可能是扬子板块中下地壳古老物质重熔的产物。

近年来, 研究者除在扬子陆核崆岭地区发现最

古老的岩石外, 其他地区也发现有南秦岭块体鱼洞子群、陡岭杂岩等太古宙地壳岩石。在大别地区新县、红安、麻城一带发现新太古代岩石, 统称大别岩群 (大别表壳岩, 为一套 TTG 岩系)。该岩群一般呈残留包体分布于田铺序列花岗质片麻岩系及中生代花岗岩之中, 如在黄土岭地区麻粒岩原岩中测得岩浆中结晶锆石为 2.7~2.6 Ga (陈能松等, 2006), 在团风地区发现 2.8 Ga 左右的岩浆锆石 (邱啸飞等, 2020), 河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院 (2018) ①测得商城陈家湾一带大别表壳岩岩浆锆石 U-Pb 年龄为 2.69~2.58 Ga。大别山早白垩世商城岩体、达权店岩体 (高昕宇等, 2013)、新县岩体 (刘清泉等, 2016) 等岩体 Hf 同位素二阶段模式年龄都集中在新太古代, 说明大别山早白垩世部分岩体岩浆源区为新太古代地壳。鸡公山岩体 Nd 同位素二阶段模式年龄为 2.49~2.36 Ga, 平均 2.45 Ga; Hf 同位素二阶段模式年龄集中在 3.07~2.54 Ga, 平均 2.78 Ga, 与区域同时代岩体具有相同的特征 (图 8b)。因此, 推测鸡公山岩体岩浆可能为新太古代大别表壳岩物质重熔形成。

5.3 动力学背景及成矿意义

大别造山带为中晚三叠世扬子陆块向华北陆块俯冲碰撞形成的大陆碰撞型造山带, 经历了早期俯冲碰撞导致加厚地壳形成, 后期折返伸展导致地壳拆沉、减薄, 在挤压-伸展时期发生大规模的中生代岩浆活动 (王强等, 2000; 许志琴等, 2003)。该区挤

① 河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院. 2018. 大别山铜钨金银铅锌成矿系统与成矿预测研究报告.

表 3 鸡公山全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素数据

Table 3 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data of Jigongshan intrusion

样品号	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\varepsilon\text{Nd}(t)$	$t_{2\text{DM}}/\text{Ma}$
JG-TW1	106	544	0.564	0.708 885±5	0.707 75	6.25	42.00	0.089 9	0.511 56±4	0.511 477	-19.09	2 487
JG-TW2	120	418	0.831	0.709 45±6	0.707 77	5.98	37.90	0.095 4	0.511 56±4	0.511 471	-19.21	2 494
JG-TW3	115	631	0.527	0.709 24±9	0.708 18	6.90	43.30	0.096 3	0.511 64±3	0.511 552	-17.63	2 367

表 4 鸡公山岩体锆石 Hf 同位素数据

Table 4 Zircon Hf isotopic data of Jigongshan intrusion

样品号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
JG. NY1. 2	143	0.014 1	0.000 3	0.000 5	0.000 0	0.281 982	0.000 021	0.281 981	-27.90	-24.84	1 762	2 766	-0.99
JG. NY1. 4	142	0.008 8	0.000 1	0.000 4	0.000 0	0.282 016	0.000 014	0.282 015	-26.70	-23.66	1 713	2 691	-0.99
JG. NY1. 5	143	0.004 4	0.000 1	0.000 2	0.000 0	0.281 845	0.000 016	0.281 845	-32.80	-29.67	1 935	3 068	-0.99
JG. NY1. 9	144	0.013 9	0.000 0	0.000 6	0.000 0	0.282 029	0.000 015	0.282 028	-26.30	-23.17	1 704	2 661	-0.98
JG. NY1. 16	143	0.003 7	0.000 0	0.000 2	0.000 0	0.281 975	0.000 017	0.281 975	-28.20	-25.06	1 758	2 779	-0.99
JG. NY1. 18	143	0.005 6	0.000 1	0.000 3	0.000 0	0.282 008	0.000 021	0.282 007	-27.00	-23.91	1 718	2 707	-0.99
JG. NY1. 19	143	0.015 9	0.000 3	0.000 7	0.000 0	0.281 946	0.000 020	0.281 945	-29.20	-26.13	1 820	2 846	-0.98
JG. NY1. 20	142	0.012 7	0.000 1	0.000 6	0.000 0	0.282 083	0.000 023	0.282 081	-24.40	-21.31	1 627	2 544	-0.98
JG. NY1. 21	139	0.017 4	0.000 1	0.000 7	0.000 0	0.281 994	0.000 022	0.281 992	-27.50	-24.53	1 755	2 743	-0.98
JG. NY1. 22	141	0.006 6	0.000 0	0.000 3	0.000 0	0.281 966	0.000 018	0.281 965	-28.50	-25.45	1 776	2 802	-0.99
JG. NY1. 26	136	0.007 3	0.000 1	0.000 4	0.000 0	0.281 924	0.000 019	0.281 924	-30.00	-27.03	1 834	2 897	-0.99
JG. NY1. 27	141	0.016 0	0.000 2	0.000 7	0.000 0	0.281 896	0.000 031	0.281 895	-31.00	-27.94	1 889	2 958	-0.98
JG. NY1. 29	139	0.008 0	0.000 1	0.000 4	0.000 0	0.281 988	0.000 028	0.281 987	-27.70	-24.71	1 747	2 754	-0.99

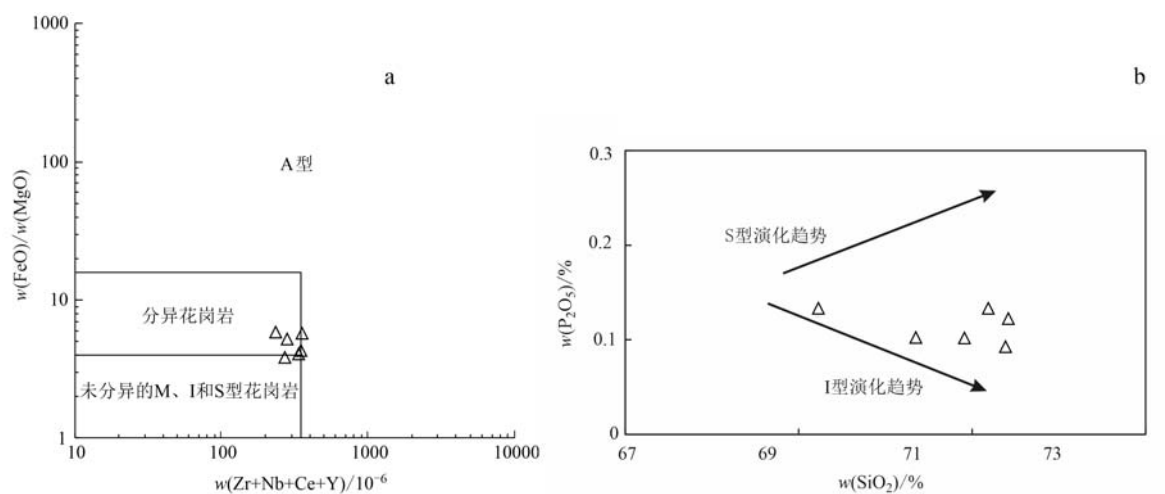


图7 $\text{FeO}^T/\text{MgO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 关系图(a, 据 Whalen 等, 1987) 和 $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ 图解(b)

Fig. 7 $\text{FeO}^T/\text{MgO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ diagram (a, after Whalen *et al.*, 1987) and $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ diagram (b)

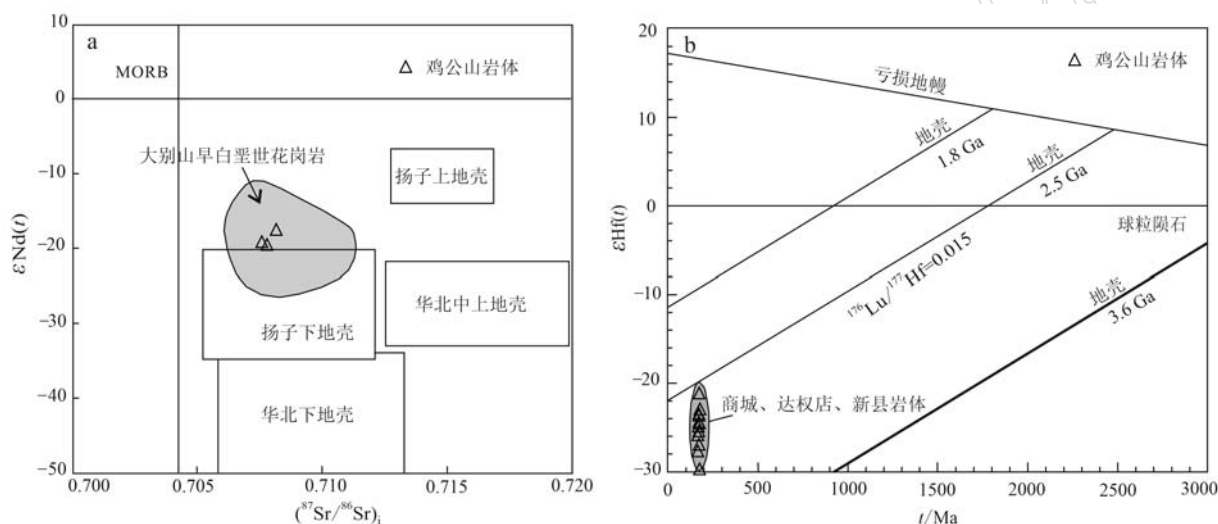


图8 鸡公山岩体 Sr-Nd 同位素[a, 据 Jahn 等(1999)]和锆石 Hf 同位素[b, 据吴福元(2007)]图解

Fig. 8 Sr-Nd isotope (a, after Jahn *et al.*, 1999) and zircon Hf isotope (b, after Wu Fuyuan *et al.*, 2007) diagrams of Jigongshan intrusion

商城、达权店岩体数据引自高昕宇等(2013), 新县岩体数据引自刘清泉等(2016)

the data of Shangcheng and Da Quandian plutons from Gao Xinyu *et al.*, 2013; the data of Xinxian pluton from Liu Qingquan *et al.*, 2016

压-伸展转化、加厚下地壳拆沉时限仍存在争议。马昌前等(2003)对刘家洼花岗岩的研究认为形成 135 Ma 前的高 Sr/Y 花岗岩是加厚地壳开始减薄以及挤压向伸展转换的产物。高昕宇等(2013)认为商城岩体 137 Ma 年龄为北淮阳地区构造体制转换的最小时间。朱江等(2019)认为西大别和东大别造山带加厚下地壳拆沉和构造体制转换时限基本一致, 发生在 133 Ma 左右。但多数研究者认为, 中生代岩浆在 130 Ma 前后形成的花岗岩地球化学特征明显不一样, >130 Ma 花岗岩通常具有高 Sr 低 Yb、较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 Sr/Y 值、铕负异常不明显等特征, 类

似于埃达克型花岗岩, 形成于加厚下地壳(>50 km)的部分熔融; <130 Ma 花岗岩通常具有低 Sr 低 Yb 等特征, 可能发生了加厚下地壳拆沉作用, 形成于减薄地壳(<35 km)的部分熔融(Wang *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007; 张超等, 2008)。鸡公山岩体锆石 U-Pb 年龄介于 146~136 Ma 之间, 同时具高 Sr 低 Yb ($\text{Sr}=418\times 10^{-6}\sim 670\times 10^{-6}$, $\text{Yb}=0.73\times 10^{-6}\sim 1.1\times 10^{-6}$), 较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ (35.3~56.81)、Sr/Y (42~79) 值, 铕谷不明显等特征, 具有埃达克型花岗岩特征。而高 Sr/Y 值同样证明源区残留石榴子石的存在(李承东等, 2004), Nb、Ta 和 Ti 亏损指示源区可

能存在残留金红石, 指示熔融深度相当于 50 km 左右。 $Mg^\#$ 在 0.23~0.51 之间, 除个别大于 0.5 外, 整体较小, Cr 和 Ni 含量中等, 指示岩浆源区受到地幔混染的程度较低。综上, 鸡公山岩体发生于构造体制转换及伸展机制下, 为尚未发生拆沉的加厚下地壳部分熔融的产物。

前人将伟晶岩主要分为 LCT 型 (Li-Cs-Ta) 和 NYF 型 (Nb-Y-F) (蒋少涌等, 2021), 其中 NYF 型伟晶岩的母体花岗岩 (分为 A 型花岗岩和 I 型花岗岩) 具准铝质-亚铝质, 稀土元素含量较富集, 内部无-弱岩相分带, 主要形成富含硅铍钇矿等重稀土矿物的重稀土矿床, 大地构造环境为伸展背景下的非造山环境, 岩浆可源于亏损 LCT 元素的中下地壳麻粒岩、花岗岩 (毛景文等, 2019; 蒋少涌等, 2021)。鸡公山岩体具准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性岩系特征、较高 REE 含量、I 型花岗岩等特征, 岩体与伟晶岩呈过渡接触关系 (图 2a、2b), 伟晶岩无岩相分带, 发现稀土矿为铍钇矿等重稀土矿物, 综上, 认为鸡公山岩体和岩体内伟晶岩形成时间一致并有构造背景相同, 属同期岩浆活动; 鸡公山岩体可能是岩体内伟晶岩脉的母体花岗岩, 伟晶岩类型为 NYF 型 (Nb-Y-F) 型。

吴福元等 (2017) 认为高分异花岗岩经常与 W、Sn、Nb、Ta、Li、Be、Sb 和 REE 等金属矿化联系密切, 稀有金属花岗岩首先就是一种高分异花岗岩。有研究者提出, 同锆石 Zr/Hf 值类似, 全岩的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值也可视为花岗岩浆结晶分异程度的标志 (Ballouard *et al.*, 2016)。Breiter 等 (2014) 提出根据锆石的 Zr/Hf 值, 可将花岗岩划分为普通花岗岩 ($Zr/Hf > 55$)、中等分异花岗岩 ($25 < Zr/Hf < 55$) 和高分异花岗岩 ($Zr/Hf < 25$) 3 类。吴福元等 (2017) 认为 $Nb/Ta = 5$ 是高分异花岗岩与超分异花岗岩的地球化学界限, 高分异花岗岩稀土元素具四分组效应和 Eu 负异常明显。鸡公山岩体 Zr/Hf (21~32), Nb/Ta (7.6~11.4), 不具有四分组效应且钨谷不明显, 结合前面岩体成因分析, 认为鸡公山岩体为中等分异花岗岩, 成矿潜力有限。

6 结论

(1) 鸡公山岩体具准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性岩系特征, 副矿物发现有少量角闪石等, 地球化学特征和岩石学特征显示鸡公山岩体可能为分异 I

型花岗岩。Sr-Nd-Hf 同位素特征暗示岩浆可能是扬子板块中下地壳新太古代大别表壳岩物质重熔形成。

(2) 鸡公山岩体 U-Pb 年龄值为 141.8 ± 0.8 Ma ($n=26$, MSWD=1.15), 为早白垩世岩浆活动的产物, 发生于构造体制转换及伸展机制下, 为尚未发生拆沉的加厚下地壳部分熔融的产物。

(3) 鸡公山岩体可能是岩体内含 Be-Y 伟晶岩脉的母体花岗岩, 为稀有金属成矿奠定了基础。

致谢 撰稿过程中得到了信阳师范学院史兴俊老师、长江大学朱江老师提出宝贵意见。审稿专家对论文提出了宝贵的意见和建议, 在此一并表示诚挚感谢!

References

- Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, *et al.* 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition[J]. *Geology*, 44: 231~234.
- Breiter K, Lamarão C N, Borges R M K, *et al.* 2014. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites[J]. *Lithos*, 192~195: 208~225.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 97(1/2): 1~29.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 2: 63~114.
- Chen Nengsong, Liu Rong, Sun Min, *et al.* 2006. LA-ICPMS U-Pb zircon dating for felsic granulite, Huangtuling area, North Dabieshan: Constraints on timing of its protolith and granulite-facies metamorphism, and thermal events in its provenance[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 295~300 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Wang P, Li N, *et al.* 2017. The collision-type porphyry Mo deposits in Dabie Shan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 81: 405~430.
- Chen Wei, Xu Zhao wen, Qiu Wenhong, *et al.* 2015. Petrogenesis of the Yaochong granite and Mo deposit, western Dabie orogen, eastern-central China: Constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os ages, whole-rock geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 431~456.
- Gao Shan, Zhang Benren, Jin Zhenmin, *et al.* 1999. Lower crust

- delamination of the Qinling-Dabie Orogen [J]. *Science in China (Series D)*, 29(6): 532~541 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xinyu, Zhao Taiping, Shi Xiaobin, *et al.* 2013. Geochemistry and petrogenesis of the Early Cretaceous Shangcheng and Daquandian granites in the North Dabie Mountains[J]. *Geochimica*, 42(4): 307~339 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yang, Ye Huishou, Li Yongfeng, *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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 49~63 (in Chinese with English abstract).
- Geng Jianzhen, Li Huikun, Zhang Jian, *et al.* 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS [J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1 508~1 513 (in Chinese with English abstract).
- He S Y, Li G S, Hoefs J, *et al.* 2011. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen: New evidence for partial melting of a thickened continental crust[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, (75): 3 815~3 838.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, *et al.* 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[J]. *Chemical Geology*, 157: 119~146.
- Jiang Shaoyong, Wang Chunlong, Zhang Lu, *et al.* 2021. In situ trace element tracing and isotopic dating of pegmatite type lithium deposits: An overview[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3 017~3 038 (in Chinese with English abstract).
- Li Chengdong, Zhang Qi, Miao Laicheng, *et al.* 2004. Mesozic high-Sr, low-Y and low-Sr, low-Y types granitoids in the northern Hebei Province: Geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 269~284 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qingquan, Shao Yongjun, Chen Xinmeng, *et al.* 2016. Petrogeochemistry geochronology and Hf isotopes of the Monzogranite from Xinxian, Southern region in Henan Province[J]. *Earth Science*, 41(8): 1 275~1 294 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Li Ming, *et al.* 2013. Applications of LA-ICP-MS in the elemental analyses of geological samples [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 58: 3 863~3 878 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Wei Yang, Xin Houtian, *et al.* 2006. Petrogenesis of the post-orogenic dike complex: Constraints to lithosphere delamination [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1 672~1 684 (in Chinese with English abstract).
- Ma C Q, Li Z C, Ehlers C, *et al.* 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China [J]. *Lithos*, 45(1): 431~456.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Ming Houli, *et al.* 2003. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic granites [J]. *Science in China (Series D)*, 33(9): 817~827 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, *et al.* 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 171~190 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Yuan Shunda, Xie Guiqing, *et al.* 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 935~969 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, *et al.* 2003. The geodynamic background of Mesozoic large-scale mineralization in north China and adjacent areas: Implications from accurate dating of metal deposits [J]. *Science in China (Series D)*, 33(4): 289~299 (in Chinese with English abstract).
- Meng Fang. 2013. Study on Rock-forming and Ore-forming of the Lingshan Pluton in the Northern Margin of Dabie Mountains[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock as sociation[J]. *Lithos*, 13(1): 97~108.
- Qiu Xiaofei, Jiang Tuo, Wu Nianwen, *et al.* 2020. Neoproterozoic crustal rocks and Paleoproterozoic migmatization in the Dabie orogen: Evidence from zircon U-Pb age and Hf isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(3): 729~738 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tang Xiangwei, Wang Yun, Guo Yueshan, *et al.* 2017. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Laoshanzhai rockmass in North Dabie Mountain[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(5): 691~702 (in Chinese with English abstract).
- Tu Jianghai and You Jingjing. 2017. Geological characteristics and pros-

- pecting direction of the Niangniangding tungsten-beryllium ore deposit in Hubei Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(5): 703~712(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Wyman A D, Xu F J, *et al.* 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, (71): 2 609~2 636.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua and Xiong Xiaolin. 2000. The ascertainment of Late-Yanshanian A-type granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297~306(in Chinese with English abstract).
- Wang Shuqing, Hu Xiaojia, Yang Zeli, *et al.* 2018. Geochronology, geochemistry, Sr-Nd-Hf isotopic characteristics and geological significance of carboniferous Yuejin arc intrusive rocks of Xilinhot, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 43(3): 672~695(in Chinese with English abstract).
- Wei Qingguo, Gao Xinyu, Zhao Taiping, *et al.* 2010. Petrogenesis of Tangjiaping granite porphyry in northern Dabie: Evidence from Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1 550~1 562(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007a. Discussion on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007b. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Science China Earth Sciences*, 60: 1 201~1 219(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yunfei. 2004. The study of zircon genetic mineralogy and its constraints on the explanation of U-Pb age[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 49(16): 1 589~1 604(in Chinese with English abstract).
- Xu J H, Mao Q C and Ye K. 2007. Early cretaceous granitoids and their implication for the collapse of the Dabie orogen, Eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Chem. Geol.*, 3~4(240): 238~259.
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, *et al.* 2003. Exhumation of structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, Central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433~450(in Chinese with English abstract).
- Yang Chunyue, He Jun, Yang Yizeng, *et al.* 2020. Geochemical characteristics and petrogenesis of monzogranites from the Xinxian batholith, Dabie Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 26(2): 132~146(in Chinese with English abstract).
- Yang Zeqiang and Tang Xiangwei. 2015. Geochemical characteristics and zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating of the Xiaofan rock bodies in the north Dabieshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 89(4): 692~700(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao and Ma Changqian. 2008. Large-scale late mesozoic magmatism in the dabie mountain: Constraints from zircon U-Pb dating and Hf isotopes[J]. *Journal of Mineral Petrology*, 28(4): 71~79(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jiao Shoutao and Liu Huiyun. 2021. Significance of Sr and Yb to granite theory: Philosophical thinking on granite research[J]. *Gansu Geology*, 30(1): 1~15(in Chinese with English abstract).
- Zhang W X, Zhu L Q, Wang H, *et al.* 2018. Generation of post-collisional normal calc-alkaline and adakitic granites in the Tongbai orogen, central China[J]. *Lithos*, 296~299: 513~531.
- Zhong Zengqiu, Suo Shutian, Zhang Hongfei, *et al.* 2001. Major constituents and texture of the Tongbai-Dabie collisional orogenic belt[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(6): 560~567(in Chinese with English abstract).
- Zhu Jiang, Wu Changxiong, Peng Sanguo, *et al.* 2019. U-Pb zircon age, geochemistry and isotopic characteristics of the Tanchong and Chengchong granites in the western Dabie orogen, China: Constraints on petrogenesis and timing of lower crustal delamination[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(7): 1 671~1 686(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈能松, 刘 嵘, 孙 敏, 等. 2006. 北大别黄土岭长英质麻粒岩的原岩、变质作用及源区热事件年龄的锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年约束[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(3): 295~300.
- 高山, 张本仁, 金振民, 等. 1999. 秦岭-大别造山带下地壳拆沉作用[J]. *中国科学(D辑)*, 29(6): 532~541.
- 高昕宇, 赵太平, 施小斌, 等. 2013. 大别山北麓早白垩世商城和达权店岩体的地球化学特征与成因[J]. *地球化学*, 42(4): 307~339.

- 高阳, 叶会寿, 李永峰, 等. 2014. 大别山千鹅冲铅矿区花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及微量元素特征[J]. 岩石学报, 30(1): 49~63.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. 地质通报, 30(10): 1 508~1 513.
- 蒋少涌, 王春龙, 张璐, 等. 2021. 伟晶岩型锂矿中矿物原位微区元素和同位素示踪与定年研究进展[J]. 地质学报, 95(10): 3 017~3 038.
- 李承东, 张旗, 苗来成, 等. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系[J]. 岩石学报, 20(2): 269~284.
- 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[J]. 地球科学, 41(8): 1 275~1 294.
- 刘勇胜, 胡兆初, 李明, 等. 2013. LA-ICP-MS 在地质样品元素分析中的应用[J]. 科学通报, 58(36): 3 753~3 769.
- 罗照华, 魏阳, 辛后田, 等. 2006. 造山后脉岩组合的岩石成因——对岩石圈拆沉作用的约束[J]. 岩石学报, 22(6): 1 672~1 684.
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 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[J]. 中国科学(D 辑), 33(9): 817~827.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 171~190.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 2019. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5): 935~969.
- 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: 从金属矿床年龄精确得到启示[J]. 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(D). 北京: 中国地质大学.
- 邱啸飞, 江拓, 吴年文, 等. 2020. 大别造山带新太古代地壳岩石和古元古代混合岩化作用——来自锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. 地质学报, 93(3): 729~738.
- 唐相伟, 王云, 郭跃闪, 等. 2017. 北大别山牢山寨岩石地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石矿物学杂志, 36(5): 691~702.
- 屠江海, 尤静静. 2017. 湖北大悟娘娘顶钨铋矿地质特征及找矿方向[J]. 岩石矿物学杂志, 36(5): 703~712.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏-大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 19(4): 297~306.
- 王树庆, 胡晓佳, 杨泽黎, 等. 2018. 兴蒙造山带中段锡林浩特跃进地区石炭纪岛弧型侵入岩: 年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地球科学, 43(3): 672~695.
- 魏庆国, 高昕宇, 赵太平, 等. 2010. 大别北麓汤家坪花岗斑岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年和岩石地球化学特征及其对岩石成因的制约[J]. 岩石学报, 26(5): 1 550~1 562.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 49(7): 745~765.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 604.
- 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[J]. 地质学报, 77(4): 433~450.
- 杨春玥, 何俊, 杨一增, 等. 2020. 大别山造山带新县二长花岗岩体地球化学与岩石成因[J]. 高校地质学报, 26(2): 132~146.
- 杨泽强, 唐相伟. 2015. 北大别山肖堰岩体地球化学特征和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年[J]. 岩石学报, 89(4): 692~700.
- 张超, 马昌前. 2008. 大别山晚中生代巨量岩浆活动的启动: 花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 矿物岩石, 28(4): 71~79.
- 张旗, 焦守涛, 刘惠云. 2021. Sr 和 Yb 两个元素对花岗岩理论的重要意义——花岗岩研究的哲学思考[J]. 甘肃地质, 30(1): 1~15.
- 钟增球, 索书田, 张宏飞, 等. 2001. 桐柏-大别碰撞造山带的基本组成与结构[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 26(6): 560~567.
- 朱江, 吴昌雄, 彭三国, 等. 2019. 西大别山早白垩世谭冲和陈冲花岗岩体 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素特征: 对岩石成因和地壳拆沉时限的约束[J]. 地质学报, 93(7): 1 671~1 686.