



引文格式: 马玉见, 刘亚剑, 梁涛, 等. 华北克拉通南缘角子山花岗岩的锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及构造背景[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 95-109. DOI: 10.12401/j.nwg.2023160

Citation: MA Yujian, LIU Yajian, LIANG Tao, et al. Zircon U-Pb Dating and Geochemical Features of the Jiaozishan Granite in the South Margin of the North China Craton and Its Tectonic Implications[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 95-109. DOI: 10.12401/j.nwg.2023160

华北克拉通南缘角子山花岗岩的锆石 U-Pb 定年、 岩石地球化学特征及构造背景

马玉见^{1,2}, 刘亚剑³, 梁涛^{4,*}, 卢仁⁴, 包刚², 雷万杉⁵

(1. 河南省自然资源科技创新中心(废弃矿山再利用研究), 河南 郑州 450016; 2. 河南省第六地质大队有限公司, 河南 郑州 450016; 3. 河南财经政法大学, 河南 郑州 450000; 4. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450016; 5. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 角子山岩基是秦岭造山带东端伏牛山余脉规模居第二位的燕山期侵入岩, 其岩石成因模型有助于深入认识华北克拉通南缘伏牛山余脉早白垩世酸性岩浆的形成规律和深部构造演化。角子山花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年样品的 30 个测点中, 18 个有效锆石测点的 U-Pb 年龄集中于 (129.5±1.4) Ma (1 个) 和 (116.1±1.4)~(122.2±1.3) Ma (17 个) 两组, 形成了锆石年龄谱, 后者的加权平均年龄为 (119.3±0.9) Ma。结合前人 10 个有效锆石测点的 U-Pb 年龄数据, 27 颗锆石的加权平均年龄为 (118.2±1.2) Ma, 代表了角子山花岗岩的形成时代。角子山花岗岩样品具有富 Si 和碱、贫 Ca 和 Mg 的特征, 为高钾钙碱性系列岩石, 属于准铝质-弱过铝质花岗岩。在微量元素蛛网图中, 角子山花岗岩样品显示了 Rb、Th 及 Zr、Hf 的正异常和 Sr、P、Ti 的负异常。角子山花岗岩稀土总量为 $20.9 \times 10^{-6} \sim 204 \times 10^{-6}$, (La/Yb)_N 值为 4.24~21.0, δEu 值为 0.53~0.78, 稀土配分模式呈轻稀土富集(右倾平滑)和中、重稀土亏损(近水平)的特征。角子山花岗岩样品的 La_N-(La/Yb)_N 投点显示了正相关关系, 表明其成分变异受控于部分熔融作用。角子山花岗岩的部分熔融源残余相包括角闪石、斜长石和金红石, 无石榴子石残余, 表明它形成于正常厚度地壳, 存在深度大致为 40~50 km 和小于 30 km 的两个部分熔融岩石源区。角子山花岗岩形成于秦岭早白垩世陆(板)内造山阶段, 经历了岩浆/流体混合再活化作用, 是 ~120 Ma 区域岩石圈拆沉作用的产物。

关键词: 角子山; 正长花岗岩; 岩浆/流体混合再活化; 岩石圈拆沉; 伏牛山余脉; 华北克拉通南缘

中图分类号: P581; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0095-15

Zircon U-Pb Dating and Geochemical Features of the Jiaozishan Granite in the South Margin of the North China Craton and Its Tectonic Implications

MA Yujian^{1,2}, LIU Yajian³, LIANG Tao^{4,*}, LU Ren⁴, BAO Gang², LEI Wanshan⁵

收稿日期: 2022-09-21; 修回日期: 2023-05-04; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 河南省自然资源科技攻关项目“豫西熊耳山西段矿物地球化学勘查标志体系研究”(2022-398-8), “河南省东秦岭碱性侵入岩岩石成因及成矿预测研究”(2014-06), “河南省西峡县高庄-梅子沟金矿带成矿规律及找矿技术方法研究”(2016-08), 国家自然科学基金项目“河南省嵩县南部正长岩的 U-Pb 定年、锆石 Hf 同位素及地球化学特征”(U1504405)联合资助。

作者简介: 马玉见(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查和区域成矿研究工作。E-mail: 736776748@qq.com。

* 通讯作者: 梁涛(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事内生金属矿床成因研究及勘查工作。E-mail: liang20010212@126.com。

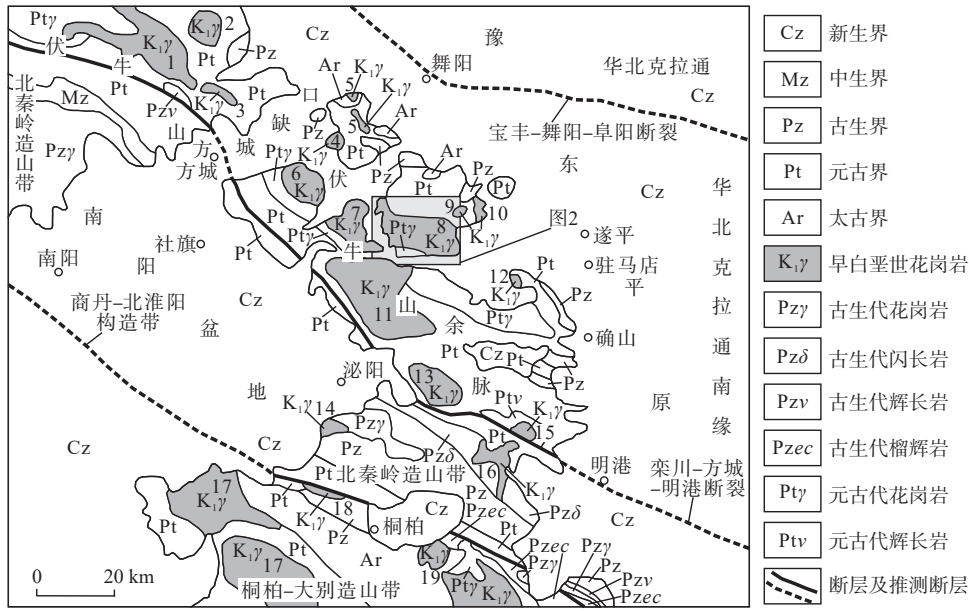
- (1. Henan Natural Resources Science and Technology Innovation Center (Research on the Reuse of Abandoned Mines), Zhengzhou 450016, Henan, China; 2. Henan Sixth Geological Brigade Co, Ltd, Zhengzhou 450016, Henan, China; 3. Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450000, Henan, China; 4. Henan Academy of Geology, Zhengzhou 450016, Henan, China; 5. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Jiaozishan batholith was a Yanshanian intrusive rock with the second largest area in the stretching branch of the Funiu Mountains, eastern of the Qinling orogenic belts. Its petrogenetic model was significant to understand the regular pattern of the early Cretaceous acid magma and deep tectonic evolution in the stretching branch of the Funiu Mountains. Among the total 30 zircon spots from dating sample JZS07 by LA-ICP-MS dating method, the U-Pb isotopic results of 18 zircon spots were available, and they were divided into two groups with (129.5 ± 1.4) Ma (1 spot) and $(116.1 \pm 1.4) \sim (122.2 \pm 1.3)$ Ma (17 spots), which had formed the zircon age spectrum. The weighted mean age of the second group was (119.3 ± 0.9) Ma. Combined with the previous zircon U-Pb age data of 10 available zircon spots, the weighted average age of 27 zircons was (118.2 ± 1.2) Ma, which represented the formation age of the Jiaozishan granite. The samples of the Jiaozishan granite were characterized by higher SiO_2 and alkali, and lower MgO and CaO, and compositional spots fell into high-K calc-alkaline series in the $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram. The positive anomalies of Rb, Th, Zr and Hf, and negative anomalies of Sr, P and Ti were shown in spider diagram. Their total REEs contents were from 20.9×10^{-6} to 204×10^{-6} with $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ratios of $4.24 \sim 21.0$. They had shown the characteristics of LREE-enrichment, MREE and HREE depletion with Eu negative anomalies (δEu values were $0.53 \sim 0.78$). In the $\text{La}_N\text{-}(\text{La}/\text{Yb})_N$ diagram, the sample points of the Jiaozishan granite had shown a positive correlation, indicating that the compositional variation was controlled by partial melting of source rock. The residual phases of its partial melting source included mainly hornblende, plagioclase and rutile, and no garnet. The Jiaozishan granite was formed in the crust with normal thickness, and there are two partial melting sources with depths of roughly $40 \sim 50$ km and less than 30 km, respectively. The Jiaozishan granite experienced magma/fluid mixing and reactivation, and its formation tectonic setting was intraplate orogenic environment. The Jiaozishan granite was one of the products of the lithosphere delamination in ~ 120 Ma.

Keywords: Jiaozishan; syenogranite; magma/fluid mixing and reactivation; lithosphere delamination; the stretching branch of the Funiu mountains; south margin of North China Craton

花岗岩是造山带的重要组成部分,也是造山带形成和演化的重要信息载体,这使得它成为研究造山带物质组成、结构变形、壳-幔作用、成矿作用及找矿等不可或缺的对象(邓晋福等,2004)。伏牛山余脉位于秦岭造山带的最东端,它北西隔“方城缺口”与东秦岭主脉相接,南东隔栾川—方城断裂与北秦岭构造带相接,其内发育新太古代、新元古代和晚中生代3期酸性侵入岩(河南省地质矿产局,1989)。其中,祖师顶、角子山岩基和张士英、吴沟、黄山、大纸房、嵯岬山、铜山及天目山岩株是伏牛山余脉早白垩世花岗岩的典型代表(图1),出露面积约为 800 km^2 ,但与其北西侧东秦岭造山带主脉和南东侧北秦岭及桐柏—大别造山带的早白垩世花岗岩相比,伏牛山余脉早白垩世花岗岩成因研究总体上积累不足,认识偏弱。

伏牛山余脉早白垩世花岗岩的锆石 U-Pb 年龄(向君峰等,2010;李创举等,2010;段友强等,2015;卢仁等,2020,2023;梁涛等,2021a,2021b;Zhao et al.,2021)表明其出露 $\sim 131 \text{ Ma}$ 、 $\sim 120 \text{ Ma}$ 及 $\sim 106 \text{ Ma}$ 3期酸性岩浆侵入。祖师顶及黄山二长花岗岩和角子山正长花岗岩是陆内造山作用的岩浆响应(刘振宏等,2004),但周红升等(2008)认为它们形成于古太平洋板块向亚欧板块俯冲引起的岩石圈伸展环境。张士英岩体的形成有3种观点:①处于太平洋板块俯冲方向转变的过程中,发生局部拉张的先存断裂控制了岩浆侵位(向君峰等,2010)。②处于华北克拉通岩石圈伸展减薄时期,是软流圈地幔岩浆底侵所造成的下地壳部分熔融及壳幔混合过程及壳幔相互作用的产物(李创举等,2010)。③形成于造山后期构造体制从挤



1. 交口; 2. 神林; 3. 七峰山; 4. 吴沟; 5. 张士英; 6. 房山; 7. 祖师顶; 8. 角子山; 9. 大纸房; 10. 嵯岍山; 11. 黄山; 12. 蚂蚁山; 13. 铜山; 14. 梁湾; 15. 天目山; 16. 老寨山; 17. 三合店; 18. 老湾; 19. 鸡公山

图 1 华北克拉通南缘伏牛山余脉区域地质简图(据张国伟等, 2001 修改)

Fig. 1 Simplified regional geologic map of the stretching branch of the Funiu Mountains, southern margin of the North China Craton

压向伸展的转变阶段, 幔源物质上涌导致下地壳使其发生部分熔融, 是华北克拉通破坏的产物(段友强等, 2015; Zhao et al., 2021)。大纸房花岗岩具有埃达克岩的特性, 嵯岍山花岗岩为低 Sr、高 Yb 的南岭型(A 型)花岗岩, 它们形成于板内环境, 且经历了岩浆/流体体系混合再活化作用, 是~120 Ma 区域岩石圈拆沉作用的岩浆响应(卢仁等, 2023)。铜山和天目山花岗岩形成于造山期后的板内拉张环境, 但它们以及吴沟岩体被认为形成于板内造山过程, 是岩石圈拆沉作用的产物(卢仁等, 2020; 梁涛等, 2021a, 2021b)

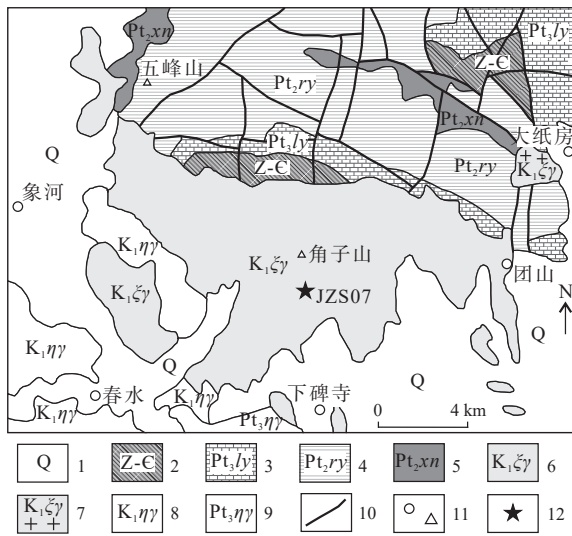
由此可见, 伏牛山余脉仅少部分早白垩世花岗岩取得了成因认识, 全面系统开展早白垩世花岗岩成因研究不仅有利于探讨伏牛山余脉早白垩世花岗岩之间的成因联系, 而且有助于建立整合的深部构造-岩浆响应模型。为此, 笔者对伏牛山余脉早白垩世角子山岩基进行了锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学分析, 分析了其岩石成因, 探讨了其深部构造过程。

1 地质特征

角子山岩基位于泌阳县东北部的象河-春水-下碑寺一带, 地处华北克拉通南缘伏牛山余脉中部, 它

南西距栾川-方城断裂带约为 32 km(图 1)。出露地层包括熊耳群、汝阳群、洛峪群、下寒武统-震旦系和第四系(图 2), 熊耳群位于角子山岩基的北部, 在西部五峰山一带呈 NNE 向带状延申, 在东部呈 NW 向带状延申至大纸房岩株, 主体岩性为安山岩和斑状英安岩。汝阳群大面积出露于角子山岩基北部, 不整合覆盖于熊耳群上, 西南端和东南端局部为角子山花岗岩侵入, 汝阳群以陆源碎屑岩为主, 岩性主要为石英砂岩、泥岩、粉砂岩。洛峪群以浅海相碎屑岩-碳酸盐岩沉积为主, 岩性主要为页岩、石英砂岩和白云岩, 出露于汝阳群南北两侧, 其中南侧汝阳群呈 NWW 向带状出露, 其南部为角子山花岗岩侵入而多呈港湾状边界。下寒武系-震旦系分两部分出露于角子山岩基北侧和大纸房岩株北西侧, 岩性以石英砂岩、白云岩、大理岩、砾岩和粉砂岩为主。

受栾川-方城区域性深大断裂的影响, 象河-春水-下碑寺地区的 NW 向断裂构造发育, 在春水-下碑寺以南发育韧性剪切带, 在角子山岩基以北的沉积地层中发育脆性断裂(河南省地质矿产厅区域地质调查队, 2000a)。韧性剪切带以李仙桥-罗圈崖剪切带为代表, 位于春水西南约为 5 km 处, 走向为 120°~140°, 倾向 SW, 倾角为 60°~85°, 主要切穿新元古代花岗岩,



1. 第四系; 2. 下寒武统一震旦系; 3. 上元古界洛峪群; 4. 中元古界汝阳群; 5. 中元古界熊耳群; 6. 早白垩世中粗粒正长花岗岩; 7. 早白垩世细粒正长花岗岩; 8. 早白垩世二长花岗岩; 9. 晚元古代二长长花岗岩; 10. 断层; 11. 村镇(圆形)和山峰(三角形); 12. 定年样品编号及位置

图2 伏牛山余脉角子山花岗岩地质简图(据河南省地质矿产开发局第一地质调查队, 2005 修改)

Fig. 2 Simplified geologic map of the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu Mountains

糜棱岩化和碎裂岩化发育。沉积岩系中的脆性断裂发育近 EW 向、近 SN 向、NW 及 NWW 向和 NE 及 NNE 向 4 组, 它们相互切割使得地层网格化, 角子山岩基破坏了近 SN 向和 NE 及 NNE 向断层的南延, 大纸房岩株位于近 SN 向和 NW 向断裂的交汇部位。

象河-春水-下碑寺地区岩浆活动强烈, 火山岩局部出露, 侵入岩广泛分布。火山岩仅为中元古代熊耳群火山岩系, 侵入岩发育, 形成新太古代、新元古代和燕山期 3 个侵入岩旋回(河南省地质矿产局, 1989)。大夫岭片麻状花岗岩为新太古代侵入岩的典型代表, 位于象河以东约为 12 km 处; 李仙桥和桂花山二长花岗岩是新元古代侵入岩的典型代表, 李仙桥岩体位于春水以东约为 10 km 处, 呈 NW-SE 向展布, 桂花山岩体下碑寺以南, 呈近 EW 向带状出露; 燕山期侵入岩包括祖师顶和角子山岩基与黄山、大纸房和嵯峨山岩株(图 1), 岩性以二长花岗岩和正长花岗岩为主, 它们的锆石 U-Pb 年龄集中于 ~131 Ma 和 ~118 Ma 两期(表 1)。

角子山岩体呈 NW-SE 向展布, 西起象河, 南至春水-下碑寺一线, 东至团山, 出露面积约为 148 km², 东、西和南三面均为第四系覆盖, 北部与熊耳群、汝阳群、

洛峪群和下寒武统一震旦系呈侵入接触关系, 可见冷凝边和烘烤边, 接触带内出露熊耳群火山岩和石英砂岩捕虏体, 接触面倾向外倾为主, 倾角为 30°~60°, 其东、西两侧分别出露大纸房和嵯峨山岩株与祖师顶岩基和黄山岩株(图 1、图 2)。角子山岩体的主体岩性为中-粗粒黑云母正长花岗岩(图 3a), 局部岩性渐变为中粒黑云母二长花岗岩, 发育暗色微粒包体(图 3b), 在岩体中部的粗粒正长花岗岩内可见晶洞构造(图 3c)。细粒黑云母二长花岗岩多出露于岩体边部(图 3d), 岩体不同岩性之间呈渐变关系。角子山中-粗粒黑云母正长花岗岩以灰红-浅肉红色为主, 块状构造, 花岗等粒结构, 主要矿物为钾长石(45%~55%)、斜长石(15%~25%)和石英(20%~30%), 钾长石发育卡氏双晶, 斜长石发育聚片双晶及弱环带结构(图 3e), 可见条纹长石(图 3f), 钾长石和斜长石粒径大多为 2~10 mm, 石英粒径大多为 2~5 mm。暗色矿物以黑云母为主, 含量约为 5%, 副矿物主要为磁铁矿、榍石、磷灰石及锆石。

2 锆石 LA-ICP-MS 定年

2.1 分析方法

定年样品 JZS07 的锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, 北京锆年领航科技有限公司完成了锆石样品靶制作和反射光、透射光及阴极发光照相。上机分析测试前, 对靶上所有锆石颗粒的图像进行了综合分析, 之后设计出最恰当的测点。

锆石定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司生产的 ComPex102 Excimer ArF 准分子激光器, 使用高纯 He 气作为载气将激光剥蚀物送入等离子质谱仪, 质谱仪型号为美国 Agilent 公司的 ICP-MS 7500a。激光束斑直径 44 μm, 剥蚀时间 50 s, 激光频率为 8 Hz, 激光能量为 80 mJ/pulse。在定年测试中, 标样 NIST610、91500、GJ-1 和样品锆石有序穿插进行测试。使用 Glitter 软件对测试获得的锆石同位素比值和元素含量进行处理, 运用 Isoplot 程序(Ludwing, 2001)绘制锆石 U-Pb 谐和计算加权平均年龄。

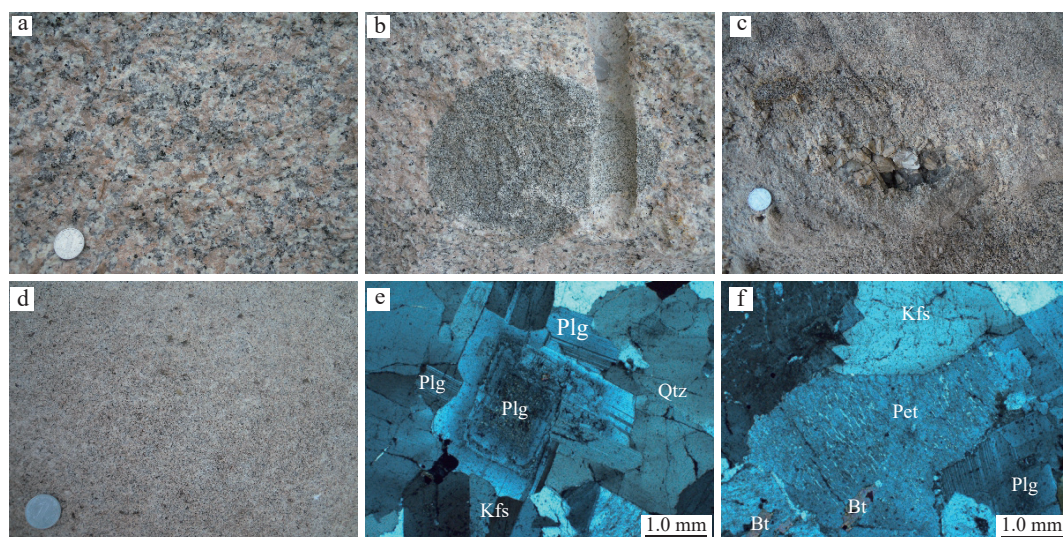
2.2 样品特征

样品 JZS07 的岩性为粗粒黑云母正长花岗岩, 分选获得的锆石数量多于 1000 粒, 大部分锆石呈无色透明, 少量锆石略显淡黄色, 个别锆石内可见裂纹和

表 1 豫南方城-泌阳-桐柏地区燕山期花岗岩锆石 U-Pb 年龄统计表

Tab. 1 The zircon U-Pb ages of Yanshanian granites in the Fangcheng-Biyang-Tongbai area, the southern Henan province

序号	构造单元	花岗岩名称	定年样品编号	样品岩性	定年方法	花岗岩形成年龄 (Ma)	文献
1	华北克拉通南缘	张士英	DSS1	钾长花岗岩	SHRIMP	107.3±2.4	向君峰等, 2010
			SG2	似斑状花岗岩	SHRIMP	106.7±2.5	向君峰等, 2010
			Mai4	石英斑岩脉	SHRIMP	101±3	向君峰等, 2010
			HF-30	角闪石英正长岩	LA-ICP-MS	124.2±0.5	李创举等, 2010
			ZSY-D-1	石英正长岩	LA-ICP-MS	122.8±1.5	段友强等, 2015
			ZSY-A-1	石英正长岩	LA-ICP-MS	122.8±1.5	Zhao et al., 2021
2	华北克拉通南缘	吴沟	WG02	斑状黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	130.8±0.8	梁涛等, 2021a
3		祖师顶	DB18-1	黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	131.9±1.1	周红升等, 2008
4		黄山	DB13-1	斑状黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	132.8±0.8	周红升等, 2008
5		角子山	DB16-1	斑状黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	120.9±0.8	周红升等, 2008
6		大纸房	JZS07	粗粒黑云母正长花岗岩	LA-ICP-MS	119.3±0.9	本文
7		大纸房	DZF01	黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	119.5±1.6	卢仁等, 2023
8		嵯岬山	CYS01	粗粒黑云母正长花岗岩	LA-ICP-MS	116.8±1.3	卢仁等, 2023
9		铜山	TSH01	中粒黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	130.6±1.8	梁涛等, 2021b
10		天目山	TMS03	黑云母正长花岗岩	LA-ICP-MS	129.2±1.7	卢仁等, 2020
10	北秦岭构造带	梁湾	YDP9	花岗闪长岩	SHRIMP	132.5±2.3	江思宏等, 2009
11			YDP10	二长花岗岩	SHRIMP	137.0±3.4	江思宏等, 2009
11	老寨山	TMS-2	黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	123.0±0.8	Yang et al., 2017	
12	老湾	LW07-1	黑云母二长花岗岩	SHRIMP	132.5±2.4	刘翼飞等, 2008	
13	桐柏-大别造山带	三合店	05DB36-1	斑状角闪黑云二长花岗岩	LA-ICP-MS	133.1±0.5	Zhang et al., 2013
14			05DB31-1	斑状角闪黑云二长花岗岩	LA-ICP-MS	136.8±0.6	Zhang et al., 2013
14		鸡公山	05DB10-1	黑云母正长花岗岩	LA-ICP-MS	125.4±1.0	Zhang et al., 2013
			11TB42	花岗岩	LA-ICP-MS	133.4±1.4	Zhang et al., 2018
			12TB43	花岗岩	SIMS	135.2±2.4	Zhang et al., 2018



a. 中粒黑云母正长花岗岩; b. 中粒黑云母正长花岗岩中的暗色微粒包体; c. 中粒黑云母正长花岗岩中的晶洞;
d. 细粒黑云母二长花岗岩; e. 自形-半自形粒状结构的角子山正长花岗岩, 斜长石发育聚片双晶和弱环带结构,
钾长石发育卡氏双晶; f. 他形的条纹长石与聚片双晶的斜长石; Kfs. 钾长石; Pet. 条纹长石; Plg. 斜长石; Qtz. 石英;
Bt. 黑云母

图 3 伏牛山余脉缘角子山花岗岩岩石图

Fig. 3 Petrographs of the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu mountains.

矿物包裹体。样品 JZS07 的大多数锆石颗粒晶型完整,多呈柱状、长柱状,长轴长度以 150~200 μm 为主,短轴长度为 50~100 μm ,如 JZS07-02、03 和 -17 等。晶型不完整的锆石颗粒以棱角-次棱角状为主,如

JZS07-14,长轴粒径以 100~150 μm 为主,短轴粒径约为 100 μm 。样品 JZS07 的锆石发育均匀、清晰、致密的韵律震荡环带(图 4),具有明显的岩浆锆石特点(熊万宇康等,2023)。

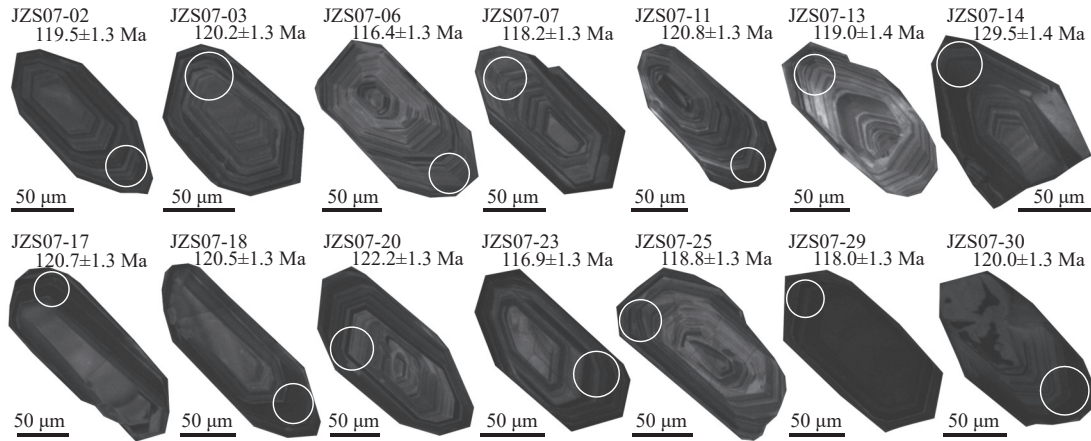


图4 伏牛山余脉角子山花岗岩定年样品 JZS07 的锆石阴极发光图

Fig. 4 Zircon cathodoluminescence images of samples JZS07 from the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu mountains

2.3 锆石 U-Pb 定年结果

样品 JZS07 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见表 2 和图 5。

对样品 JZS07 累计进行了 30 个锆石测点的分析,其中 JZS07-01、-05、-08、-09、-10、-12、-15、-16、-19、-21、-24 和 -26 等 12 个测点的测定值明显偏离 U-Pb 一致线(图 5a),在年龄计算不予考虑。剩余 18 个有效锆石测点的 U-Pb 年龄集中于 2 组(图 5b): ①测点 JZS07-14 的 U-Pb 年龄为 (129.5±1.4) Ma; Th/U 值为 0.61。②其余 17 个锆石测点的 U-Pb 年龄介于 (116.1±1.4~122.2±1.3) Ma, Th/U 值介于 0.47~1.67, 加权平均年龄为 (119.3±0.9) Ma(图 5c)。

3 地球化学特征

对角子山岩体 8 件花岗岩样品进行了主、微量元素分析。主量元素分析测试由河南省有色金属地质勘查总院检测中心完成,分析仪器为 ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪,执行标准为 GB/T14506.28-2010,分析精度分别优于 5%。微量元素成分分析由澳实分析检测(广州)有限公司完成,分析方法代码为 ME-MS81,等离子体质谱仪型号为 Agilent 7900 分析测试,测试结果的相对偏差和误差均低于 10%。

3.1 主量元素

角子山花岗岩样品的主量元素分析结果见表 3。8 件样品的 SiO_2 含量介于 73.30%~77.66%, Al_2O_3 含量介于 12.42%~13.48%, TFe_2O_3 含量的最低值和最高值分别为 0.83% 和 2.05%, MgO 含量介于 0.03%~0.47%, CaO 含量介于 0.43%~1.44%, Na_2O 和 K_2O 含量分别介于 3.47%~4.27% 和 4.02%~5.10%。它们的 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值分别为 7.99%~9.01% 和 0.70~1.02。它们的 A/CNK 和 A/NK 值分别介于 0.94~1.04 和 1.10~1.22。

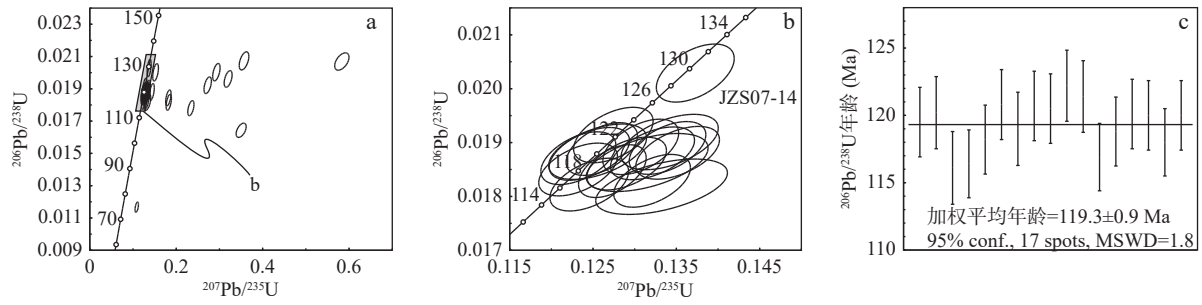
在角子山花岗岩样品的哈克图解中(图 6): ① MgO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MnO 、 CaO 和 P_2O_5 投点趋势整体上为负相关关系。② Na_2O 投点整体上为正相关关系。③ K_2O 投点为发散趋势。在 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 和 K_2O - SiO_2 图解中(图 7a、图 7b),角子山花岗岩样品点均落入花岗岩分类区内,位于碱性-亚碱性系列分界线以下,属于高钾钙碱性系列岩石。角子山花岗岩 18 件样品的 A/CNK 和 A/NK 值分别介于 0.94~1.14 和 1.10~1.35,总体上属于准铝质-弱过铝质花岗岩(图 7c)。

3.2 微量元素

角子山花岗岩样品的微量元素分析结果见表 3。除样品 JZS03 和 JZS05 的 Ba 含量 (22.8×10^{-6} 和 $17.3\times$

表 2 伏牛山余脉角子山花岗岩样品 JZS07 锆石 LA-ICP-MS 定年结果表
Tab. 2 Zircon LA-ICP-MS dating results of sample JZS07 from the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu mountains

测点	元素含量 (10^{-6})		同位素比值												谐和度 (%)		
	Pb	Th	Th/U	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			
				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值		1 σ	
-01	24.8	922	842	1.09	0.15465	0.00343	0.35028	0.00477	0.01643	0.00018	2.398.0	37.3	304.9	3.6	105.0	1.2	2
-02	17.9	435	776	0.56	0.04776	0.00109	0.12324	0.00184	0.01871	0.00020	86.4	54.4	118.0	1.7	119.5	1.3	99
-03	9.16	222	394	0.56	0.04836	0.00126	0.12555	0.00240	0.01883	0.00021	116.9	60.1	120.1	2.2	120.2	1.3	100
-04	6.96	220	277	0.79	0.05316	0.00160	0.13323	0.00323	0.01818	0.00021	335.6	66.9	127.0	2.9	116.1	1.4	91
-05	11.1	297	463	0.64	0.05540	0.00130	0.14370	0.00226	0.01881	0.00021	428.2	51.1	136.3	2.0	120.1	1.3	87
-06	14.5	460	619	0.74	0.04958	0.00116	0.12455	0.00193	0.01822	0.00020	175.1	53.5	119.2	1.7	116.4	1.3	98
-07	14.0	398	592	0.67	0.04829	0.00113	0.12321	0.00193	0.01850	0.00020	113.7	54.5	118.0	1.7	118.2	1.3	100
-08	24.1	472	763	0.62	0.12487	0.00270	0.35696	0.00455	0.02073	0.00023	2026.9	37.9	309.9	3.4	132.3	1.4	20
-09	48.5	644	1323	0.49	0.20440	0.00429	0.58329	0.00679	0.02069	0.00022	2861.7	33.8	466.6	4.4	132.0	1.4	-12
-10	39.7	878	1357	0.65	0.10604	0.00224	0.29292	0.00350	0.02003	0.00022	1732.4	38.3	260.9	2.8	127.9	1.4	32
-11	26.4	772	1098	0.70	0.05011	0.00113	0.13073	0.00186	0.01892	0.00021	200.1	51.6	124.8	1.7	120.8	1.3	97
-12	29.6	558	1208	0.46	0.09529	0.00205	0.23390	0.00293	0.01780	0.00019	1533.8	40.0	213.4	2.4	113.7	1.2	39
-13	8.03	239	331	0.72	0.05118	0.00148	0.13149	0.00299	0.01863	0.00022	248.9	65.4	125.4	2.7	119.0	1.4	95
-14	42.4	1020	1683	0.61	0.04907	0.00110	0.13727	0.00191	0.02029	0.00022	151.1	51.7	130.6	1.7	129.5	1.4	99
-15	17.9	600	702	0.85	0.07296	0.00163	0.18275	0.00251	0.01816	0.00020	1012.9	44.3	170.4	2.2	116.0	1.3	62
-16	9.01	246	346	0.71	0.05513	0.00138	0.15223	0.00270	0.02002	0.00022	417.4	54.5	143.9	2.4	127.8	1.4	88
-17	30.6	740	1315	0.56	0.05139	0.00116	0.13394	0.00188	0.01890	0.00020	258.2	51.0	127.6	1.7	120.7	1.3	94
-18	38.0	799	1675	0.48	0.04843	0.00109	0.12605	0.00175	0.01888	0.00020	120.2	52.0	120.5	1.6	120.5	1.3	100
-19	20.0	567	693	0.82	0.10297	0.00225	0.27284	0.00350	0.01922	0.00021	1678.3	39.8	245.0	2.8	122.7	1.3	33
-20	14.7	366	617	0.59	0.04828	0.00113	0.12744	0.00195	0.01914	0.00021	113.2	54.4	121.8	1.8	122.2	1.3	100
-21	47.8	783	1689	0.46	0.11842	0.00252	0.32014	0.00378	0.01961	0.00021	1932.5	37.6	282.0	2.9	125.2	1.3	23
-22	10.1	414	381	1.09	0.05120	0.00129	0.13421	0.00238	0.01901	0.00021	250.0	56.9	127.9	2.1	121.4	1.3	95
-23	23.7	618	1031	0.60	0.05237	0.00119	0.13209	0.00188	0.01829	0.00020	301.5	50.9	126.0	1.7	116.9	1.3	93
-24	16.6	569	635	0.89	0.07150	0.00162	0.18181	0.00255	0.01844	0.00020	971.9	45.5	169.6	2.2	117.8	1.3	64
-25	15.9	483	655	0.74	0.05029	0.00117	0.12904	0.00195	0.01861	0.00020	208.6	53.3	123.2	1.8	118.8	1.3	96
-26	12.7	432	771	0.56	0.06748	0.00157	0.10861	0.00162	0.01167	0.00013	852.5	47.6	104.7	1.5	74.8	0.8	67
-27	19.7	654	766	0.85	0.05212	0.00122	0.13516	0.00205	0.01881	0.00020	290.5	52.6	128.7	1.8	120.1	1.3	93
-28	26.4	1551	928	1.67	0.04808	0.00115	0.12456	0.00197	0.01879	0.00020	103.2	55.5	119.2	1.8	120.0	1.3	99
-29	35.1	736	1574	0.47	0.04998	0.00110	0.12732	0.00166	0.01847	0.00020	194.1	50.5	121.7	1.5	118.0	1.3	97
-30	12.2	299	517	0.58	0.05098	0.00121	0.13214	0.00206	0.01880	0.00020	240.1	53.8	126.0	1.9	120.0	1.3	95



a.样品 JZS07 中 30 个锆石测点的 U-Pb 谐和图; b.样品 JZS07 中 18 个锆石测点的 U-Pb 谐和图(不含测点 JZS07-01、-05、-08、-09、-10、-12、-15、-16、-19、-21、-24 和-26); c.样品 JZS07 中 17 个锆石测点(JZS07-02、-03、-04、-06、-07、-11、-13、-17、-18、-20、-22、-23、-25、-27、-28、-29 和-30)的加权平均年龄

图5 伏牛山余脉角子山花岗岩样品 JZS07 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果图

Fig. 5 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of sample JZS07 from the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu Mountains

表 3 伏牛山余脉角子山花岗岩主量元素(%)和微量元素(10⁻⁶)分析结果表

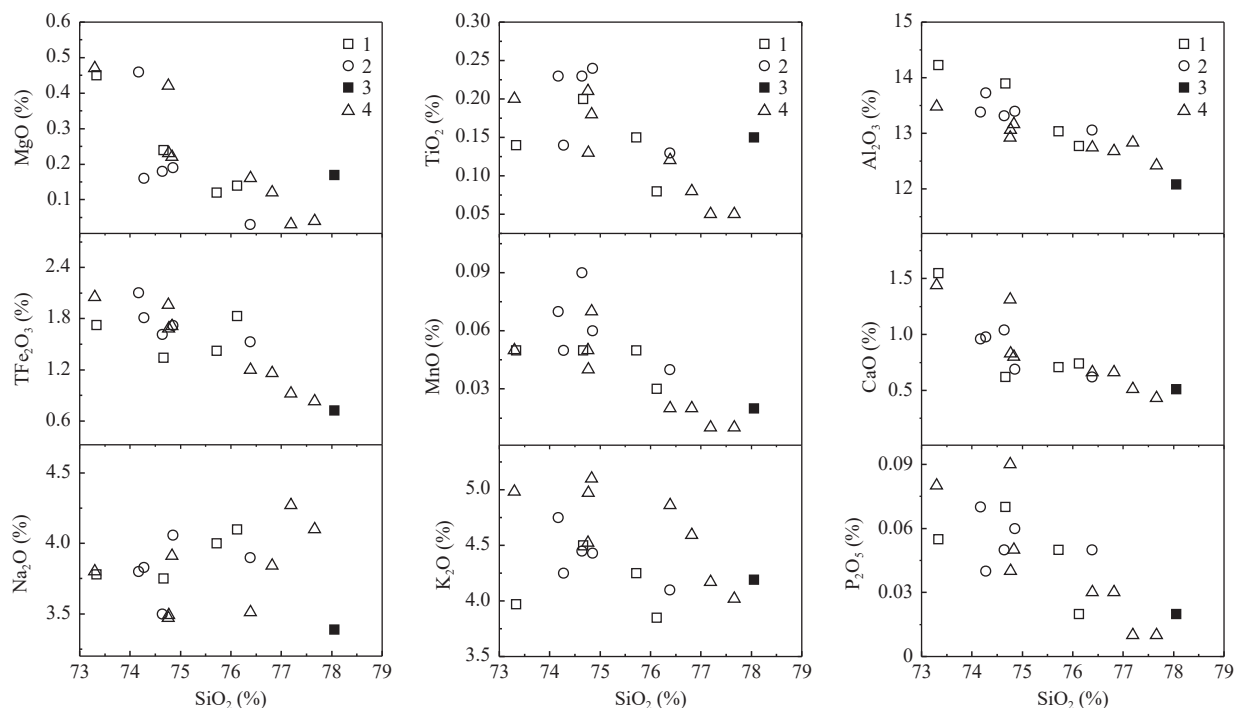
Tab. 3 Major (%) and trace (10⁻⁶) elements analysis results of the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu mountains

样品编号	JZS01	JZS03	JZS04	JZS05	JZS06	JZS07	JZS08	JZS09
岩性	黑云母正长花岗岩							
SiO ₂	76.82	77.19	74.76	77.66	74.77	73.30	76.39	74.83
TiO ₂	0.08	0.05	0.21	0.05	0.13	0.20	0.12	0.18
Al ₂ O ₃	12.68	12.83	12.92	12.42	13.06	13.48	12.74	13.16
TF ₂ O ₃	1.16	0.92	1.96	0.83	1.68	2.05	1.20	1.71
MnO	0.02	0.01	0.05	0.01	0.04	0.05	0.02	0.07
MgO	0.12	0.03	0.42	0.04	0.23	0.47	0.16	0.22
CaO	0.66	0.51	1.31	0.43	0.83	1.44	0.66	0.80
Na ₂ O	3.84	4.27	3.47	4.10	3.49	3.80	3.51	3.91
K ₂ O	4.59	4.17	4.52	4.02	4.97	4.98	4.86	5.10
P ₂ O ₅	0.03	0.01	0.09	0.01	0.04	0.08	0.03	0.05
烧失量	0.54	0.54	0.42	0.61	0.77	0.42	0.82	0.42
总量	100.54	100.53	100.12	100.18	100.02	100.28	100.51	100.46
Na ₂ O+K ₂ O	8.43	8.44	7.99	8.12	8.46	8.78	8.37	9.01
Na ₂ O/K ₂ O	0.84	1.02	0.77	1.02	0.70	0.76	0.72	0.77
A/CNK	1.01	1.03	0.99	1.04	1.03	0.94	1.04	0.98
A/NK	1.12	1.11	1.22	1.12	1.17	1.16	1.15	1.10
Ga	19.6	21.6	16.6	20.4	18.7	18.2	19.0	21.6
Ba	104	22.8	386	17.3	238	492	333	483
Rb	323	357	161	325	284	242	320	330
Th	38.5	48.6	27.0	31.3	29.3	27.8	43.7	57.3
U	6.67	5.68	2.52	3.33	2.21	25.3	4.39	15.3
Sr	49.0	26.4	231	22.7	109	234	105	129
Zr	110	73.0	127	68.0	100	105	139	203
Hf	4.6	3.6	3.7	4.2	4.7	3.6	4.9	7.0
Nb	20.1	17.2	14.9	26.4	23.2	19.3	30.4	52.2
Ta	1.7	1.3	1.3	2.3	2.2	1.6	2.6	4.4
Y	6.6	3.8	11.3	3.8	9.6	10.2	9.1	18.5
La	20.9	21.1	39.0	6.6	28.8	33.0	32.9	60.4
Ce	32.8	28.4	62.1	8.1	48.1	53.7	56.8	95.7
Pr	2.90	2.08	5.89	0.82	4.14	5.12	4.97	8.75
Nd	8.4	4.9	18.8	2.1	12.7	16.3	14.2	25.0

续表 3

样品编号	JZS01	JZS03	JZS04	JZS05	JZS06	JZS07	JZS08	JZS09
岩性	黑云母正长花岗岩							
Sm	1.31	0.60	3.05	0.64	1.96	2.62	1.87	3.45
Eu	0.20	0.10	0.65	0.11	0.40	0.58	0.37	0.53
Gd	0.88	0.45	2.00	0.26	1.28	1.76	1.29	2.44
Tb	0.14	0.07	0.31	0.05	0.21	0.27	0.22	0.41
Dy	0.85	0.39	1.75	0.37	1.23	1.51	1.30	2.50
Ho	0.18	0.10	0.35	0.09	0.26	0.30	0.26	0.52
Er	0.64	0.39	1.02	0.41	0.92	0.95	1.00	1.84
Tm	0.12	0.09	0.16	0.10	0.15	0.15	0.19	0.33
Yb	1.06	0.77	1.25	1.05	1.37	1.22	1.46	2.47
Lu	0.21	0.18	0.20	0.24	0.27	0.22	0.26	0.45
ΣREE	70.6	59.6	137	20.9	102	118	117	205
(La/Yb) _N	13.3	18.5	21.0	4.24	14.2	18.2	15.2	16.5
δEu	0.54	0.57	0.76	0.70	0.73	0.78	0.69	0.53
Nb/Ta	11.8	13.2	11.5	11.5	10.5	12.1	11.7	11.9
Zr/Hf	23.9	20.3	34.3	16.2	21.3	29.2	28.4	29.0
Th/U	5.77	8.56	10.7	9.40	13.3	1.10	9.95	3.76
Rb/Sr	6.59	13.5	0.70	14.3	2.61	1.03	3.06	2.56
Y/Nb	0.33	0.22	0.76	0.14	0.41	0.53	0.30	0.35
Rb/Ba	3.11	15.66	0.42	18.79	1.19	0.49	0.96	0.68
t _{Zr} (°C)	757	725	765	722	749	741	779	803

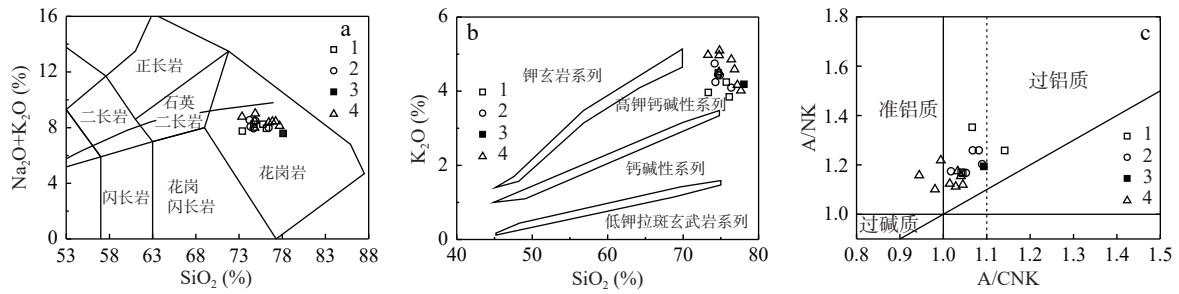
注: δEu计算公式为: $\delta Eu = 2 \times Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$; 全岩 Zr 饱和温度 t_{Zr} 计算方法据 Watson et al. (1983)。



数据来源: 1. 河南省地质矿产厅区域地质调查队, 2000a; 2. 河南省地质矿产厅区域地质调查队, 2000b; 3. 周红升等, 2008; 4. 本次研究

图6 伏牛山余脉角子山花岗岩哈克图

Fig. 6 Harker diagrams of the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu mountains



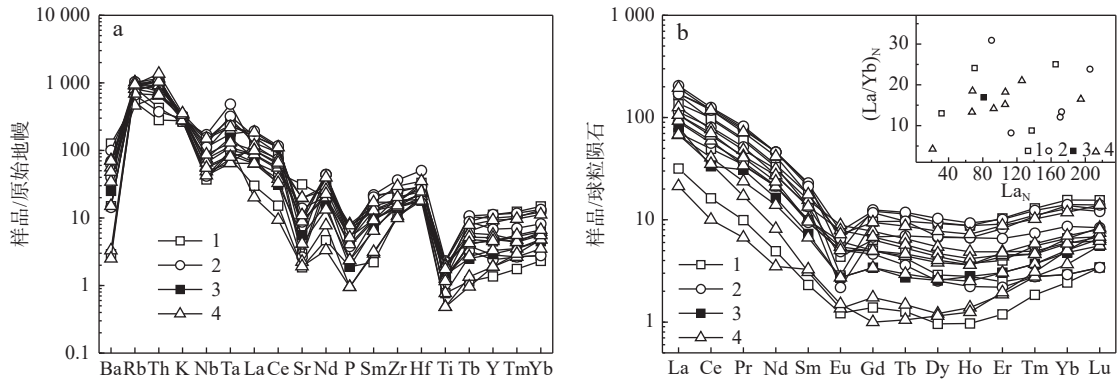
a. $SiO_2-(Na_2O+K_2O)$ 图解(底图据 Middlemost, 1989), 图中碱性及亚碱性系列界线据 Irvine 等(1971);
 b. SiO_2-K_2O 图解(底图据 Rollison, 1993); c. A/NK-A/CNK 图解(底图据 Maniar et al., 1989), 图例同图 6

图7 伏牛山余脉角子山花岗岩图

Fig. 7 Diagrams of Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu mountains

10^{-6})明显偏低外,其余6件样品 Ba 含量的最低值和最高值分别为 104×10^{-6} 和 492×10^{-6} , Rb 和 Th 含量分别介于 $161 \times 10^{-6} \sim 357 \times 10^{-6}$ 和 $27.0 \times 10^{-6} \sim 57.3 \times 10^{-6}$ 。它们 Zr 含量的最低值和最高值分别为 68×10^{-6} 和 203×10^{-6} , Hf 含量介于 $3.6 \times 10^{-6} \sim 7.0 \times 10^{-6}$, Zr/Hf 值为 $16.2 \sim 34.3$, 全岩 Zr 饱和温度介于 $722 \sim 803$ °C。它们

的 Nb 和 Ta 的含量分别为 $14.9 \times 10^{-6} \sim 52.2 \times 10^{-6}$ 和 $1.3 \times 10^{-6} \sim 4.4 \times 10^{-6}$, Y 含量的最低值和最高值分别为 3.8×10^{-6} 和 18.5×10^{-6} , Nb/Ta 和 Y/Nb 值分别介于 $10.6 \sim 13.2$ 和 $0.14 \sim 0.76$ 。在微量元素蛛网图中(图 8a),角子山花岗岩样品显示了 Rb、Th 及 Zr、Hf 的正异常和 Sr、P、Ti 的负异常。



a. 角子山花岗岩的微量元素蛛网图, 标准化数据据 Thompson(1982); b. 角子山花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化配分模式图, 球粒陨石标准化数据据 Boynton(1984), 图例同图 6

图8 伏牛山余脉角子山花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(b)

Fig. 8 (a)Diagrams of spider and (b)REE distribution patter for the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu mountains

角子山花岗岩样品的稀土总量介于 $20.9 \times 10^{-6} \sim 204 \times 10^{-6}$ 之间, $(La/Yb)_N$ 值范围是 $4.24 \sim 21.0$, δEu 值介于 $0.53 \sim 0.78$, 它的稀土配分模式具轻稀土富集(右倾平滑)和中、重稀土亏损(近水平)的特征, 显示负 Eu 异常(图 8b)。此外, 角子山花岗岩样品的 $La_N-(La/Yb)_N$ 投点显示了一定程度的正相关关系, 表明其成分变异受控于部分熔融作用。

136 Ma(河南省地质矿产厅区域地质调查队, 2000a) 和 123 Ma(河南省地质矿产厅区域地质调查队, 2000b), 形成时代分别为早白垩世和早白垩世中期。角子山花岗岩的 SHRIMP 锆石定年获得了 $112 \sim 115$ Ma 和 $120 \sim 122$ Ma 两组年龄, 因 $112 \sim 115$ Ma 组内部分锆石的定年结果偏离 U-Pb 谐和线, 周红升等(2008)认为它们代表的是岩浆后期事件, $120 \sim 122$ Ma 组内 6 颗锆石的加权平均年龄(120.9 ± 0.8) Ma 代表了岩体结晶时代。

4 讨论

4.1 形成时代与锆石年龄谱

角子山花岗岩的黑云母和全岩 K-Ar 年龄分别为

角子山花岗岩 LA-ICP-MS 定年样品 JZS07 的岩性为粗粒黑云母正长花岗岩, 为块状构造和花岗结构, 定年锆石阴极发光图像发育岩浆振荡环带, 其 17 个

有效锆石测点的加权平均年龄为(119.3±0.9) Ma, 它表示了岩浆的结晶年龄, 表明角子山花岗岩形成于早白垩世阿普特期。

在对比角子山锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 定年结果是发现: ①SHRIMP 定年中 4 个测点(10.2、11.1、12.1 和 13.1)的谐和度低于 90%, 不应该参与年龄计算。②LA-ICP-MS 与 SHRIMP 的定年结果互有重叠, 将 SHRIMP 两组年龄值(112~115 Ma 和 120~122 Ma)合为一组(图 9)。所以, 对两次锆石 U-Pb 定年结果进行了综合处理, 27 颗有效锆石给出的加权平均年龄(118.2±1.2) Ma 是角子山花岗岩的形成年龄。

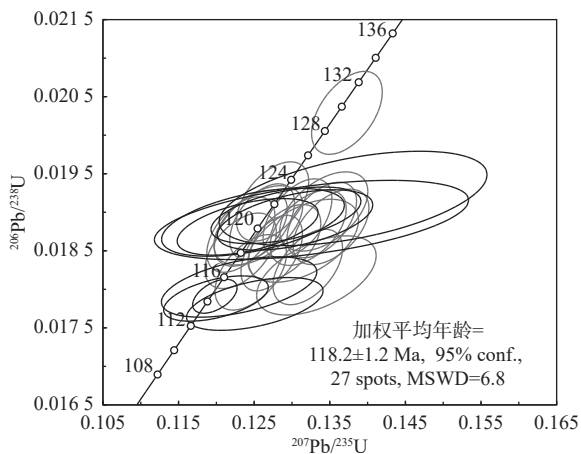


图 9 伏牛山余脉角子山花岗岩锆石 U-Pb 年龄图(黑色据周红升等, 2008, 灰色为本次数据)

Fig. 9 Zircon U-Pb dating summary of the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu mountains

在豫南方城—泌阳—桐柏地区存在一期与角子山花岗岩形成时代相近的花岗岩(表 1), 如大纸房、嵯岬山和老寨山花岗岩, 张士英和鸡公山花岗岩中存在与之时代相近的侵入单元。北秦岭骨头崖和二郎坪岩体的锆石 U-Pb 年龄分别为(111.7±0.6) Ma 和(114.0±0.5) Ma(卢仁等, 2017; 梁涛等, 2019a), 太山庙岩基和东沟花岗斑岩的锆石 U-P 年龄分别为 113~125 Ma(叶会寿等, 2008; 齐玥, 2014; Zhao et al., 2021)和(112±1) Ma(叶会寿等, 2006), 伏牛山岩基也存在 115~120 Ma 的岩浆侵入活动(Gao et al., 2014; 张昕等, 2018)。这表明东秦岭造山带存在与角子山岩基形成时代相接近的岩浆活动。

尽管只有 1 颗锆石的年龄为(129.5±1.4) Ma, 但角子山花岗岩的定年结果还是显示了~130 Ma 和~118 Ma 两组年龄, 形成了锆石年龄谱(图 9)。这是真实可靠的, 因为: ①东侧大纸房和嵯岬山花岗岩的

锆石年龄谱组合分别为~120 Ma 和~136 Ma 与~117 Ma 和 134 Ma(卢仁等, 2023), 它们几乎是一致的。②方城—泌阳—桐柏地区广泛出露与~130 Ma 接近的花岗岩(表 1)。方城—泌阳—桐柏地区郭庄、吴沟、铜山和天目山等早白垩世花岗岩的定年结果均形成了锆石年龄谱, 峰值年龄组合为~130 Ma 和~145 Ma, 它们与大纸房和嵯岬山锆石年龄谱都是岩浆/流体体系混合再活化作用的产物(卢仁等, 2020, 2021; 梁涛等, 2021a, 2021b)。因此, 角子山花岗岩也经历了岩浆/流体体系混合再活化作用, 与其内暗色微粒包体具有相同的成因指示。

综上所述, 角子山花岗岩形成于(118.2±1.2) Ma, 属于早白垩世酸阿普特期酸性岩浆活动的产物, 它经历了岩浆/流体体系混合再活化作用。

4.2 源区特征

角子山花岗岩的哈克图解显示了 Al_2O_3 和 CaO 负相关关系以及 Sr、Eu 负异常, 结合样品岩性为正长花岗岩, 很容易认为这是斜长石结晶分异的结果。但是, 以下两个地质事实否定了这种认识: ①暗色微粒包体与角子山岩浆的密度差大于斜长石与角子山岩浆的, 暗色微粒包体反而说明角子山花岗岩岩浆演化中没有经历斜长石的结晶分异作用。② Al_2O_3 和 CaO 是斜长石的主要化学成分, Na_2O 和 K_2O 同样也是, 它们显示一致的负相关协变趋势才能说明斜长石结晶分异, 角子山花岗岩的 Na_2O 和 K_2O 不具备相应的协变趋势(图 6)。角子山花岗岩的 $(La/Yb)_N - La_N$ 投点趋势表明部分熔融控制其成分变异(图 8b), 源区岩石存在斜长石残留导致角子山岩体形成 Sr、Eu 负异常。

角子山花岗岩的 TiO_2 含量低于 0.25%(图 6), 具有明显的 Ti 负异常(图 8a), 这表明其部分熔融源区内残余相至少包含角闪石、金红石等富 Ti 矿物相。它的 $(La/Yb)_N$ 较小(4.24~21.0)以及 Y 质量分数较高($3.8 \times 10^{-6} \sim 18.5 \times 10^{-6}$), 表明它的部分熔融源区不含石榴子石。与嵯岬山龙卧沟岩体的稀土配分模式相似(卢仁等, 2014), 角子山岩基样品的稀土配分模式中也显示了中稀土元素相对轻、重稀土元素亏损(Dy、Ho-Er 负异常), 这说明其部分熔融源区残余相中的角闪石参与控制了 Dy、Ho 和 Er 质量分数。

邓晋福等(1996, 2004)认为花岗岩的稀土配分模式中 Eu 异常情况能够大致反映其源区深度, 无负 Eu 异常相当于加厚陆壳, 负 Eu 异常对应于正常厚度陆壳, 或者双倍陆壳的中、上部。此外, 花岗岩岩石系列

(K_2O 含量)也与地壳厚度存在对应关系,即钾玄岩、高钾钙碱性和中钾钙碱性系列岩石对应的地壳厚度大致范围依次为大于 67 km、67~40 km 和 40~17 km (邓晋福等, 2004, 2015)。张旗等(2010)据 Sr 和 Yb 含量将花岗岩划分出埃达克、喜马拉雅、浙闽和南岭等 4 个类型,形成深度依次为大于 50 km、40~50 km、30~40 km 和小于 30 km。角子山花岗岩属于高钾钙碱性系列,并显示了负 Eu 异常,在 Yb-Sr 图解中以喜马拉雅型为主,部分样品点落入浙闽型和南岭型(图 10),表明它形成于正常厚度地壳,在 40~50 km 和小于 30 km 不同深度处存在两个部分熔融岩石源区。

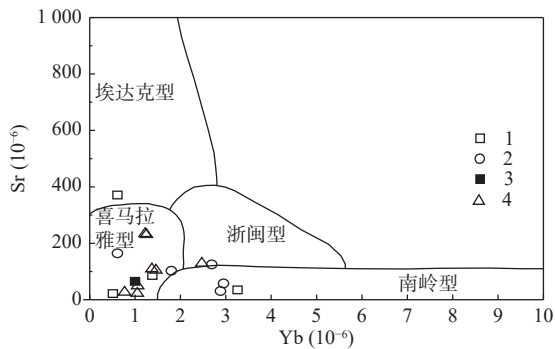


图 10 伏牛山余脉角子山花岗岩的 Yb-Sr 图(底图据张旗等 2010; 图例同图 6)

Fig. 10 Yb-Sr diagram of the Jiaozishan granite in the stretching branch of the Funiu mountains

所以,角子山花岗岩的部分熔融源残余相包括角闪石、斜长石和金红石,无石榴子石残余,它形成于正常厚度地壳,存在 2 个部分熔融岩石源区,深度大致分别为 40~50 km 和小于 30 km。

4.3 构造背景

在印支末期,扬子与华北板块已完成拼接,预示着秦岭造山带进入了陆(板)内构造演化阶段(卢欣祥, 2000; 张国伟等, 2001),这说明角子山花岗岩形成与板块俯冲或大陆裂谷无直接成因关系,应处于陆(板)内演化阶段,属于陆内造山作用的岩浆响应(刘振宏等, 2004)。一方面,在大陆板块拼接完成后,其深部岩石圈-软流圈系统的汇聚仍在持续进行,导致陆内碰撞造山作用得以显现,对应的深部过程为岩石圈垮塌(拆沉)作用(邓晋福等, 2004, 2007)。另外一方面,经历长期构造演化拼合而成的大陆板块及造山带具有复杂的岩石学结构和厚度不均一性,形成重力稳定性差异及异常,在同一深部地质过程中产生不完全相同的浅部地质响应(罗照华等, 2006, 2007, 2008)。

综上所述,暗色微粒包体和锆石年龄谱表明角子山花岗岩经历了岩浆/流体体系混合再活化作用,它还存在 40~50 km 和小于 30 km 两个不同深度处的部分熔融源区。花岗质岩浆在上升途中是不可能从围岩中捕获锆石颗粒的,花岗岩锆石年龄谱是岩石圈拆沉作用的地质响应之一(梁涛等, 2015a, 2015b, 2018, 2019b),深部物质和能量在岩石圈灾变过程中得以交换和释放。角子山岩基东侧大纸房岩株的锆石 U-Pb 定年也显示了锆石年龄谱,峰值年龄为 136.9 Ma 和 119.5 Ma。它还具有埃达克岩特性,是~120 Ma 区域岩石圈拆沉作用的产物(卢仁等, 2023)。

在经历了复杂的碰撞拼合之后,在伏牛山余脉岩石圈不同深度处形成多个岩浆/流体库,其内包含各式晶体群(罗照华等, 2013, 2019, 2020; 苏尚国等, 2018),如多成因的锆石。在早白垩世~120 Ma 大纸房岩石圈发生拆沉作用时,深部岩浆/流体得以快速释放,上升途中注入到壳源岩浆/流体库内,不同时代(如~130 Ma)的锆石随之“混合”,混合活化之后的岩浆/流体继续上侵,角子山岩浆/流体体系在构造有利部位固结成岩,在~118 Ma 晶出锆石。角子山花岗岩形成于秦岭早白垩世陆(板)内造山阶段,是~120 Ma 区域岩石圈拆沉作用的岩浆响应之一。

5 结论

(1) 角子山花岗岩定年样 JZS07 中 17 个锆石测点的 U-Pb 加权年龄为(119.3±0.9) Ma,综合前人 10 个锆石 U-Pb 测点获得年龄为(118.2±1.2) Ma,表明角子山花岗岩形成于早白垩世阿普特期。

(2) 角子山花岗岩富硅、碱和贫钙、镁,为高钾钙碱性系列岩石,属于准铝质-弱过铝质花岗岩。

(3) 角子山花岗岩的部分熔融源残余相包括角闪石、斜长石和金红石,无石榴子石残余,它形成于正常厚度地壳,存在深度大致为 40~50 km 和小于 30 km 的两个部分熔融岩石源区。

(4) 角子山花岗岩形成于秦岭早白垩世陆(板)内造山阶段,经历了岩浆/流体体系混合再活化作用,是~120 Ma 区域岩石圈拆沉作用的产物。

参考文献(References):

邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J]. 地质论评, 2015, 61(3): 473-484.

- DENG Jinfu, FENG Yanfang, DI Yongjun, et al. Magmatic arc and ocean-continent transition: Discussion[J]. *Geological Review*, 2015, 61(3): 473-484.
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-149.
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 392-402.
- DENG Jinfu, XIAO Qinghui, SU Shangguo, et al. Igneous petrotextonic assemblages and tectonic settings: A discussion[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 392-402.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宜学, 等. 大陆根-柱构造-大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996, 1-110.
- DENG Jinfu, ZHAO Hailing, MO Xuanxue, et al. Continental roots-plume tectonics of China: Key to the continental dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 1-110.
- 段友强, 张正伟, 杨晓勇. 华北克拉通南缘张士英岩体大陆动力学背景: 来自地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的证据[J]. *岩石学报*, 2015, 31(7): 1995-2008.
- DUAN Youqiang, ZHANG Zhengwei, YANG Xiaoyong. The continental dynamics of Zhangshiyong pluton at the southern margin of the North China Craton: Evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(7): 1995-2008.
- 河南省地质矿产局. 河南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-772.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province. Regional geology of Henan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1-772.
- 江思宏, 聂凤军, 方东会, 等. 河南桐柏围山城地区侵入岩年代学与地球化学特征[J]. *地质学报*, 2009, 83(7): 1011-1029.
- JIANG Sihong, NIE Fengjun, FANG Donghui, et al. Geochronology and geochemical features of the main intrusive rocks in the Weishancheng area, Tongbai County, Henan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(7): 1011-1029.
- 李创举, 包志伟. 河南舞阳南部张士英岩体的地球化学与成因及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(3): 435-443.
- LI Chuangju, BAO Zhiwei. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of the Zhangshiyong syenite from south of Wuyang, Henan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(3): 435-443.
- 河南省地质矿产厅区域地质调查队. 春水幅 1: 50000 地质图说明书[R]. 河南省地质矿产厅区域地质调查队, 2000a: 1-48.
- 河南省地质矿产开发局第一地质调查队. 豫西南 1: 250000 地质图[R]. 河南省地质矿产开发局第一地质调查队, 2005.
- 河南省地质矿产厅区域地质调查队. 张台幅 1: 50000 地质图说明书[R]. 河南省地质矿产厅区域地质调查队 2000b: 1-35.
- 梁涛, 卢仁, 刘小丽, 等. 华北克拉通南缘方城县吴沟花岗岩锆石 U-Pb 年龄 (130.8Ma) 报道[J]. *中国地质*, 2021a, 48(2): 672-674.
- LIANG Tao, LU Ren, LIU Xiaoli, et al. Report on the zircon U-Pb age (130.8 Ma) of Wugou granite in the Fangcheng County, southern margin of the North China Craton[J]. *Geology in China*, 2021a, 48(2): 672-674.
- 梁涛, 卢仁, 罗照华, 等. 豫西熊耳山蒿坪沟黑云母花岗岩斑岩的锆石 LA-ICP-MS U-P 年龄及其地质意义[J]. *地质论评*, 2015a, 61(4): 901-912.
- LIANG Tao, LU Ren, LUO Zhaohua, et al. LA-ICP-MS U-Pb Age of zircons from Haopinggou biotite granite porphyry in Xiong'er Mountain, western Henan Province, and its geologic implications[J]. *Geological Review*, 2015a, 61(4): 901-912.
- 梁涛, 卢仁, 罗照华. 豫西五丈山花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2019a, 65(5): 1054-1076.
- LIANG Tao, LU Ren, LUO Zhaohua. Zircon U-Pb ages and geological features of Wuzhangshan granite in Xiong'er Mountain, western Henan Province, and its geologic implications[J]. *Geological Review*, 2019a, 65(5): 1054-1076.
- 梁涛, 卢仁, 王莉. 北秦岭二郎坪岩体锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019b, 49(2): 445-459.
- LIANG Tao, LU Ren, WANG Li. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical features and geological significance of Erlangping rock mass in North Qinling[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019b, 49(2): 445-459.
- 梁涛, 卢仁. 北秦岭烟镇岩体的锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及构造背景[J]. *地质科学*, 2018, 53(2): 615-637.
- LIANG Tao, LU Ren. Zircon U-Pb dating and geochemical features of Yanzhen granitic body in northern Qinling Mountains, and its tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2018, 53(2): 615-637.
- 梁涛, 卢仁. 豫南伏牛山余脉铜山岩体锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021b, 51(2): 400-415.
- LIANG Tao, LU Ren. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical features and geological implications of the Tongshan rock mass in stretching branch of the Funiu Mountain, southern Henan Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021b, 51(2): 400-415.
- 梁涛, 卢仁. 豫西崆山小妹河岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义[J]. *地质通报*, 2015b, 34(8): 1526-1540.
- LIANG Tao, LU Ren. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical features and geological implications of Xiaomeihe rock mass in Xiaoshan Mountain, western Henan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015b, 34(8): 1526-1540.
- 刘翼飞, 江思宏, 方东会, 等. 河南桐柏老湾花岗岩体锆石

- SHIRMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(6): 519-523.
- LIU Yifei, JIANG Shihong, FANG Donghui, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Laowan granite in Tongbai area, Henan Province, and its geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27(6): 519-523.
- 刘振宏, 王世炎, 张良, 等. 华北陆块南缘燕山期陆内造山岩浆活动特征[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(1): 35-42.
- LIU Zhenhong, WANG Shiyan, ZHANG Liang, et al. The Jurassic magmatism of intracratonic orogen in the southern margin of the North China Craton[J]. *Geological Survey and Research*, 2004, 27(1): 35-42.
- 卢仁, 梁涛, 刘小丽. 华北克拉通南缘南召县郭庄岩体锆石 U-Pb 年龄报道[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1296-1297.
- LU Ren, LIANG Tao, LIU Xiaoli. The report on zircon U-Pb age of the Guozhuang intrusive in the Nanzhao County, southern margin of the North China Craton[J]. *Geology in China*, 2021, 48(4): 1296-1297.
- 卢仁, 梁涛, 卢欣祥, 等. 豫西崤山龙卧沟岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 756-772.
- LU Ren, LIANG Tao, LU Xinxiang, et al. Geochronology and geochemical features of Longwogou granite in Xiaoshan Mountain, western Henan Province, and their geological implications[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 756-772.
- 卢仁, 梁涛. 华北克拉通南缘早白垩世天目山 A 型花岗岩的锆石稀土元素和岩石地球化学特征[J]. 地质论评, 2020, 66(6): 1676-1694.
- LU Ren, LIANG Tao. Zircon rare earth elements and geochemical features of the Early Cretaceous Tianmushan A-type granite in the south margin of the North China Craton[J]. *Geological Review*, 2020, 66(6): 1676-1694.
- 卢仁, 梁涛, 卢欣祥. 华北克拉通南缘大纸房和崤山花岗岩的锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因启示[J]. 地质科学, 2023, 58(2): 529-555.
- LU Ren, LIANG Tao, LU Xinxiang. Zircon U-Pb dating and geochemical features of the Dazhifang and Chayashan granites in the south margin of the North China Craton, and their implications for petrogenesis[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2023, 58(2): 529-555.
- 卢仁, 梁涛. 北秦岭西峡骨头崖花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 2017, 63(6): 1479-1496.
- LU Ren, LIANG Tao. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical features of Gutouya granite in Xixia County, northern Qinling Mountains, and its geological implication[J]. *Geological Review*, 2017, 63(6): 1479-1496.
- 卢欣祥. 秦岭花岗岩大地构造图[M]. 西安: 西安地图出版社, 2000, 1-33.
- LU Xinxiang. Granitoid tectonic map of Qinling Belt[M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 2000, 1-33.
- 罗照华, 梁涛, 陈必河, 等. 板内造山作用与成矿[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1945-1956.
- LUO Zhaohua, LIANG Tao, CHEN Bihe, et al. Intraplate orogenesis and its implications in metallogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 1945-1956.
- 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 碰撞造山带斑岩型矿床的深部约束机制[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 447-456.
- LUO Zhaohua, LU Xinxiang, CHEN Bihe, et al. The constraints from deep processes on the porphyry metallogenesis in collisional orogens[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(3): 447-456.
- 罗照华, 魏阳, 辛后田, 等. 太行山中生代板内造山作用与华北大陆岩石圈巨大减薄[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 52-63.
- LUO Zhaohua, WEI Yang, XIN Houtian, et al. The Mesozoic intraplate orogeny of the Taihang Mountains and the thinning of the continental lithosphere in North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 52-63.
- 罗照华, 杨宗锋, 代耕, 等. 火成岩的晶体群与成因矿物学展望[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 176-181.
- LUO Zhaohua, YANG Zongfeng, DAI Geng, et al. Crystal populations of igneous rocks and their implications in genetic mineralogy[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 176-181.
- 罗照华, 杨宗锋, 苏尚国, 等. 火成岩中的超临界流体晶及其研究意义[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 216-227.
- LUO Zhaohua, YANG Zongfeng, SU Shangguo, et al. Supercritical fluid crystals in igneous rocks and the implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(6): 216-227.
- 罗照华. 四川攀西地区层状侵入体中堆晶岩成因的矿物学约束[J]. 地学前缘, 2020, 27(5): 61-69.
- LUO Zhaohua. Mineralogical constraints on the formation of cumulates in layered intrusions in the Pan-Xi region, Sichuan Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(5): 61-69.
- 齐玥. 东秦岭地区晚中生代老君山岩体和太山庙岩体成因[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014, 1-83.
- QI Yue. Petrogenesis of Laojunshan and Taishanmiao granite plutons in eastern Qinling, central China[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014, 1-83.
- 苏尚国, 崔晓亮, 罗照华, 等. 流体晶、流体晶矿物组合、流体岩及其研究意义[J]. 地学前缘, 2018, 25(6): 283-289.
- SU Shangguo, CUI Xiaoliang, LUO Zhaohua, et al. Fluid minerals, mineral assemblages, fluid rocks: Significance in the studies of rocks and ore deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(6): 283-289.
- 向君峰, 赵海杰, 李永峰, 等. 华北地台南缘张士英岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 871-887.
- XIANG Junfeng, ZHAO Haijie, LI Yongfeng, et al. SHRIMP zircon

- U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Zhangshiying intrusive complex in the southern margin of North China Craton and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(3): 871–887.
- 熊万宇康, 赵梦琪, 于淼, 等. 造山带洋陆转换过程与岩浆作用: 以东昆仑都兰地区古生代花岗岩为例[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 113–139.
- XIONG Wanyukang, ZHAO Mengqi, YU Miao, et al. Ocean–Continent Transition Process and Magmatism in Orogenic Belts: A Case Study of Paleozoic Granites in the Dulan Area of East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 113–139.
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 等. 东秦岭东沟超大型斑岩铜矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 1078–1088.
- YE Huishou, MAO Jingwen, LI Yongfeng, et al. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in east Qinling, China, and its geological implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(7): 1078–1088.
- 叶会寿, 毛景文, 徐林刚, 等. 豫西太山庙铝质 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. *地质论评*, 2008, 54(5): 699–711.
- YE Huishou, MAO Jingwen, XU Lingang, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry of the Taishanmiao aluminous A-type granite in western Henan Province[J]. *Geological Review*, 2008, 54(5): 699–711.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001, 1–855.
- ZHANG Guowei, ZHANG Benren, YUAN Xuecheng, et al. Qinling belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001, 1–855.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 985–1015.
- ZHANG Qi, JIN Weijun, LI Chengdong, et al. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 985–1015.
- 张昕, 吴才来, 陈红杰, 等. 华北板块南缘伏牛山花岗岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2018, 34(5): 1517–1538.
- ZHANG Xin, WU Cailai, CHEN Hongjie, et al. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopes analysis of granites from Funiu Mountain pluton in southern margin of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(5): 1517–1538.
- 周红升, 马昌前, 张超, 等. 华北克拉通南缘泌阳春水燕山期铝质 A 型花岗岩类年代学、地球化学及其启示[J]. *岩石学报*, 2008, 24(1): 49–64.
- ZHOU Hongsheng, MA Changqian, ZHANG Chao, et al. Yan-shanian aluminous A-type granitoids in the Chunshui of Biyang, south margin of North China Craton: Implications from petrology, geochronology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(1): 49–64.
- Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P. ed. *Rare Earth Element Geochemistry*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1984, 63–114.
- Gao X Y, Zhao T P, Chen W. Petrogenesis of the early Cretaceous Funiushan granites on the southern margin of the North China Craton: Implications for the Mesozoic geological evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 94: 28–44.
- Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 1971, 8: 523–548.
- Ludwig K R. Users manual for Isoplot/Ex (rev 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2001, 1–55.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 635–643.
- Middlemost E A K. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks[J]. *Chemical Geology*, 1989, 77: 19–26.
- Rollison H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1993, 102–213.
- Thompson R N. Magmatism of the British Tertiary volcanic province[J]. *Scottish Journal of Geology*, 1982, 18: 59–107.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in a variety of crustal magmas types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64: 295–304.
- Yang Y F, Wang P, Chen Y J, et al. Geochronology and geochemistry of the Tianmugou Mo deposit, Dabie Shan, eastern China: Implications for ore genesis and tectonic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 81: 484–503.
- Zhang J Y, Ma C Q, Li J W, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Cretaceous Jigongshan and Qijianfeng batholiths in the Tongbai orogen, central China: Implications for lower crustal delamination[J]. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 2013, 102: 1045–1067.
- Zhang W X, Zhu L Q, Wang H, et al. Generation of post-collisional normal calc-alkaline and adakitic granites in the Tongbai orogen, central China[J]. *Lithos*, 2018, 296 - 299: 513 - 531.
- Zhao Z, Yang X Y, Zhang Z W, et al. Petrogenesis and geodynamic implications of the Cretaceous anorogenic granitoids in east Qingling orogen[J]. *Solid Earth Sciences*, 2021, 6(4): 331–353.