

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.306



东秦岭南召县五朵山岩体二云母花岗岩 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及地质意义

李开文^{1,2}, 方怀宾¹, 郭君功³, 刘坤¹, 赵焕¹, 王小娟¹

1. 河南省地质调查院, 河南郑州 450001

2. 河南省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 河南郑州 450001

3. 河南省地质科学研究所, 河南郑州 450001

摘要: 秦岭造山带地处华北板块与扬子板块结合带, 经历了复杂的构造演化过程, 其板块拼合机制及碰撞时限一直备受争议。对东秦岭南召县五朵山岩体二云母花岗岩进行岩石地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究, 结果表明岩石具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 69.32\% \sim 74.28\%$)、高铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.14 \sim 17.28$)、高碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.68\% \sim 9.03\%$) 等特征, 且相对富钾贫钠, 在岩石类型上属于强过铝质“S”型花岗岩类。岩石具有中等的稀土元素含量, 呈现轻稀土富集、重稀土亏损的右倾配分模式, 中等的负 Eu 异常, 富集 K、Rb、Th 等大离子亲石元素, 亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti 等元素, 表明南召县二云母花岗岩可能形成于陆陆碰撞所导致的陆壳加厚环境。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果表明, 二云母花岗岩锆石均具有明显的韵律环带, Th/U 比值均大于 0.4, 暗示岩浆成因特征, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 433 ± 2 Ma; 结合构造环境特征, 表明东秦岭南召地区在早志留世末期由俯冲环境转换为陆陆碰撞环境。

关键词: 二云母花岗岩; 岩石学; 地球化学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 南召县; 东秦岭。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)01-0123-12

收稿日期: 2018-06-13

Petrogeochemistry, Zircon U-Pb Dating and Geological Significance of Two-Mica Granites from Wuduoshan Granite in Nanzhao County, Eastern Qinling Mountains

Li Kaiwen^{1,2}, Fang Huaibin¹, Guo Jungong³, Liu Kun¹, Zhao Huan¹, Wang Xiaojuan¹

1. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, China

2. Henan Key Laboratory for Metal Mineral Ore-Forming Geological Process and Utilization of Resource, Zhengzhou 450001, China

3. Henan Geological Science Research Institute, Zhengzhou 450001, China

Abstract: The Qinling orogenic belt, located in the suture zone of the North China Plate and the Yangtze Plate, has undergone a complicated tectonic evolution process however, its plate combination mechanism and collision time limit have been controversial. In this study, petrogeochemistry analyses and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating are undertaken for the two-mica granites from Wuduoshan in Nanzhao County, eastern Qinling mountains. Results show that the two-mica granites have $\text{SiO}_2 = 69.32\% - 74.28\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.14\% - 17.28\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.68\% - 9.03\%$, and belong chemically to peraluminous series of S type. Meanwhile, the two-mica granites have a moderate amount of rare earth elements, with medium fractionation characteristics between light rare earth elements and heavy rare earth elements and medium negative Eu anomalies. The trace elements diagram shows enrichment of large ion lithophile elements (LILEs) and depletion of Ba, Nb, Sr, P and Ti, indicating

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查项目 (Nos. 12120114027001, DD20160043)。

作者简介: 李开文 (1984-), 男, 工程师, 主要从事区域地质矿产调查工作。ORCID: 0000-0003-2354-5778. E-mail: likaiwen0502@163.com

引用格式: 李开文, 方怀宾, 郭君功, 等, 2019. 东秦岭南召县五朵山岩体二云母花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及地质意义. 地球科学, 44 (1): 123-134.

that the two-mica granites may have been formed in the thickened crust caused by the collision between continents. Zircons from the two-mica granites in this study display fine-scale oscillatory growth and high ratios of Th/U (>0.4), indicating a magmatic origin. The dating of the two-mica granites yields a LA-ICP-MS zircon U-Pb age of 433 ± 2 Ma. Combined with constructional environment, it is concluded that it was transformed from plate subduction to continental collision in the Nanzhao County at late of Early Silurian.

Key words: two-mica granites; petrology; geochemistry; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Nanzhao County; eastern Qinling mountains.

秦岭造山带位于中央造山带中东部,是华北板块与扬子板块的分界线及结合带,经历了中—新元古代、古生代和中新生代岩浆事件(张国伟等,1996, 2001; Ratschbacher *et al.*, 2003; 陈衍景, 2010; 朱越等, 2015; 侯红星等, 2016; 刘清泉等, 2016), 是研究岩浆作用与造山作用的典型地区. 其中, 古生代花岗岩在秦岭造山带岩浆岩研究中占有重要地位.

东秦岭造山带位于中秦岭造山带与大别造山带中间, 是研究秦岭造山带演化的重点区域. 前人对于东秦岭岩浆作用尤其是古生代花岗岩做了大量研究, 张国伟等(2001)根据秦岭造山带大地构造演化, 将花岗质岩浆活动划分为前造山期(中元古代初至早前寒武纪)、主造山期(新元古代、早古生代、早中生代)及后造山期(中生代). 王晓霞等(2015)将秦岭造山带花岗质岩浆作用分为新元古代(979~711 Ma)、古生代(507~400 Ma)、早中生代(250~185 Ma)和晚中生代(160~100 Ma)四期岩浆作用, 并对各期岩浆作用进行了详细研究. 王涛等(2009)对北秦岭东段古生代花岗质岩浆时空演变及造山作用做了详细研究, 将古生代岩浆演化分为 3 个阶段: 505~470 Ma、450~422 Ma 和 415~400 Ma, 第 1 阶段总体具 I 型弧岩浆特点, 伴生有漂池等 S 型花岗岩, 第 2 阶段以灰池子岩体为代表的 I 型花岗岩为主, 被解释为有地幔物质混染的下地壳部分熔融, 第 3 阶段以 I 型花岗岩为主, 形成于块体碰撞过程及略后的抬升环境, 表明中国中央造山系古生代俯冲增生直到碰撞具有多块体、不等时的拼合特点. 张成立等(2013)对北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗质岩浆作用进行了分析, 认为古生代存在~500 Ma 的高压—超高压变质作用、~450 Ma 的中压麻粒岩相和~420 Ma 的角闪岩相退变质作用, 并对其构造机制进行了时空限定.

五朵山花岗岩体分布于河南省西南部内乡、镇平、南召、卧龙等区县的交界处, 出露面积约 1 420 km², 呈岩基产出, 为主要由寺庄、黄龙庙、四棵树、牧虎关、石门等岩体组成的复式岩体, 主要岩

石类型为中细粒黑云母二长花岗岩、中细粒二云母二长花岗岩及斑状黑云母二长花岗岩等, 同位素资料显示为加里东期花岗岩体(常秋玲等, 2006). 雷敏(2010)获得四棵树似斑状黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 464.1 ± 4.6 Ma, 刘丙祥(2014)获得 3 件五朵山岩体黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄介于 448.5~451.5 Ma. 但是, 对于具有构造环境指示意义的二云母花岗岩却鲜有报导.

本文在详细的野外调查基础之上, 对东秦岭南召县五朵山二云母花岗岩进行了岩石学、岩石地球化学和锆石 U-Pb 年代学分析, 并试图进一步探讨东秦岭地段扬子板块与华北板块拼接过程中由俯冲向陆陆碰撞转换的时限.

1 地质概况

调查区地处秦岭造山带东段(图 1), 区域上以商南—丹凤断裂带和勉县—略阳断裂带为界, 自北向南依次被划分为华北陆块南缘及北秦岭、秦岭微地块、扬子地块北缘(Mattauer *et al.*, 1985; 张国伟等, 1996, 2001; Meng and Zhang, 2000; 王宗起等, 2009), 这三大板块沿两条主缝合带, 经加里东期板块俯冲, 在晚海西期—印支期发生碰撞造山进行拼合, 之后经历中生代强烈陆内造山作用的叠加复合, 在主造山期板块构造基础之上, 形成现今秦岭造山带基本构造格架.

调查区出露地层主要有二郎坪群、秦岭岩群等. 二郎坪群主体为一套变质碎屑岩、变质基性—中酸性火山岩和碳酸盐岩沉积建造, 本区由于被后期侵入体吞噬只有少数俘虏体残留. 目前多数被认为是古商丹洋向华北板块俯冲过程中秦岭古岛弧北侧发育的弧后盆地. 赵姣(2012)获得二郎坪群细碧—角斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (463~475) Ma. 秦岭岩群是一套受多期变质变形混合岩化影响的结晶杂岩系, 主要由片麻岩、斜长角闪岩、钙硅酸盐岩、大理岩等组成(张国伟等, 2001). 时毓等

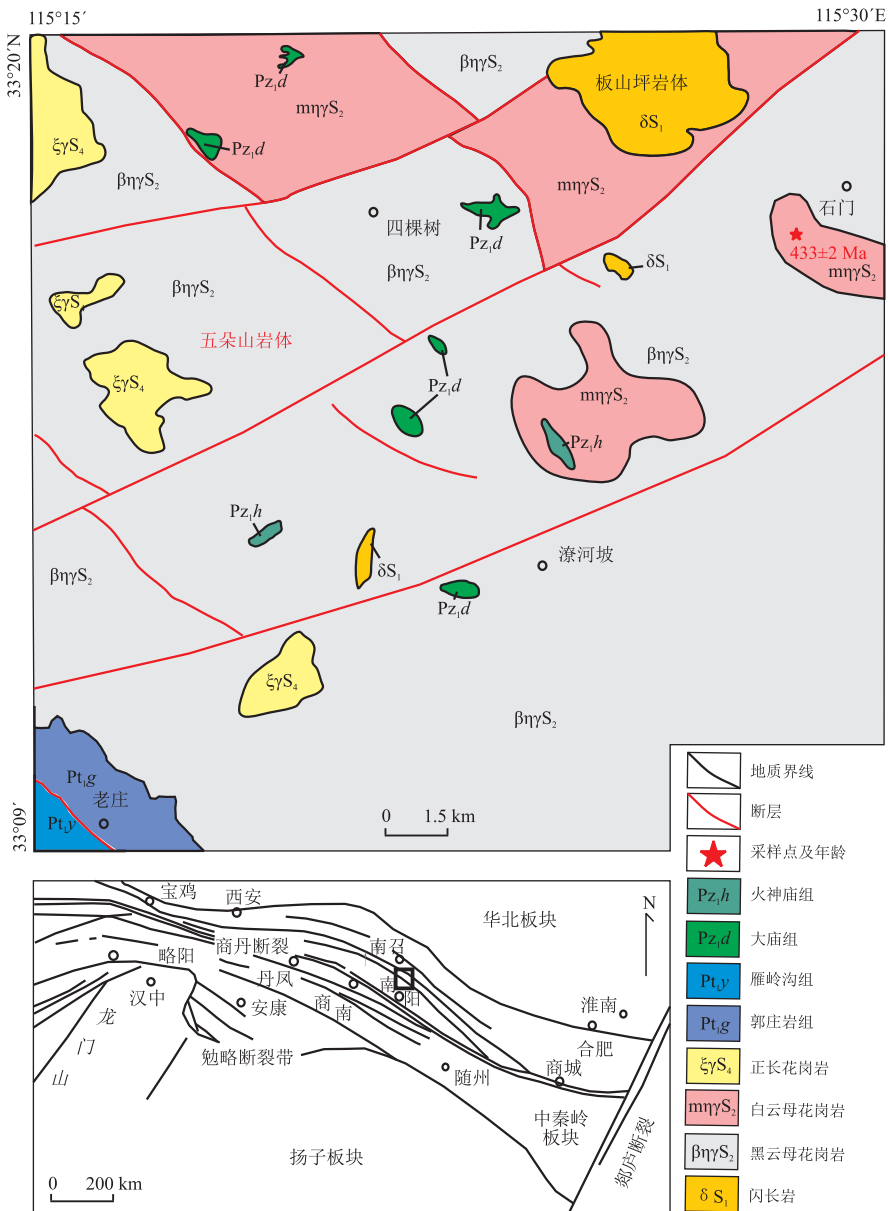


图 1 研究区地质简图

Fig.1 Schematic geological map of study area

据张国伟等(2001)修改

(2009)通过研究秦岭造山带东段秦岭岩群年代学及地球化学特征,显示秦岭岩群变质岩主要由新元古代早期的火山岩和新元古代中晚期的沉积岩组成,并指出秦岭岩群严格来讲不属于一个地层单元,而是由不同时代地层单元组成的构造混杂地质体。

调查区出露的侵入岩主要为早古生代花岗岩组合。晚寒武世—早奥陶世花岗岩集中发育于北秦岭东段秦岭岩群中及附近(王涛等,2009),具有岛弧花岗岩的特征,可以解释为岩浆弧(Xue *et al.*, 1996a)。晚奥陶世—中志留世花岗岩是秦岭造山带花岗岩质的主体,主要发育于北秦岭的东部,侵入

于秦岭岩群和二郎坪群(王晓霞等,2015)。晚志留世花岗岩岩浆活动表现较弱,主要分布于中秦岭中段,显示为碰撞晚期特征(王涛等,2009)。

2 地质及岩石学特征

南召县二云母花岗岩位于五朵山复式岩体东部(图 2),主要分布于四棵树和石门一带,与黑云母花岗岩一起共同构成了调查区侵入岩的主体岩性。岩石总体呈北西—南东向展布,与区域构造线方向一致。二云母花岗岩与黑云母花岗岩未见明显的先后

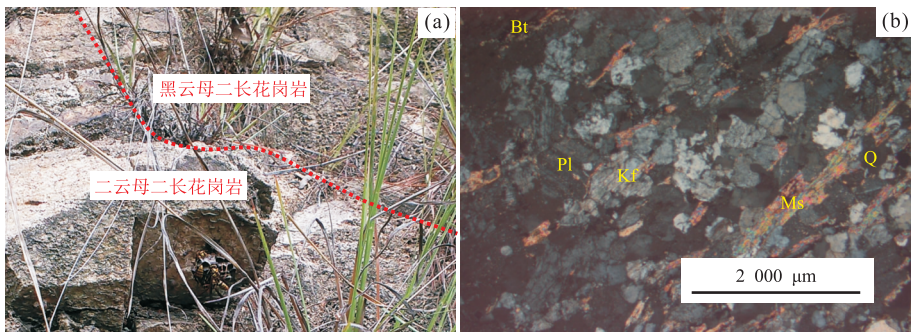


图 2 二云母花岗岩野外及镜下照片(正交偏光)

Fig.2 Filed photographs and microphotographs for two-mica granite (cross polarized light)

Q.石英;Pl.斜长石;Kf.钾长石;Bt.黑云母;Ms.白云母

侵入次序,呈相变过渡接触关系,均侵入北侧板山坪岩体,并被正长花岗岩所侵入.二云母花岗岩侵入于二郎坪群大庙组和火神庙组,且岩体内部含大量二郎坪群捕虏体,指示剥蚀深度较浅.

二云母二长花岗岩风化面呈淡灰黄色,中细粒花岗岩结构,块状构造.主要组成矿物为:钾长石 25%~30%,呈半自形—他形板柱状,粒径 2~4 mm;斜长石 30%~35%,呈半自形板柱状,粒径 2~4 mm;石英 20%~25%,呈他形粒状,粒径 1~2 mm;黑云母 3%~5%,呈半自形片状集合体,片径 0.5~1.0 mm;白云母 3%~7%,局部可达 10%以上,呈半自形片状集合体,片径 0.5~1.0 mm.

3 样品分析方法

3.1 元素地球化学分析

野外采集新鲜样品,在河南省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室完成样品初步处理,粉末样送至湖北省地质实验测试中心完成主量、微量和稀土元素分析.主量元素分析采用常规湿化学方法分析,分析精度优于 0.5%,稀土和微量元素分析在 Finnigan MAT 公司 ELEMENT 型高分辨率等离子质谱仪(ICP-MS)上进行测试,分析精度优于 5%,分析流程与朱金初等(2006)相同.

3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试

野外采集年龄样品 2~5 kg,样品破碎至 80~160 目,用水淘洗粉尘后利用浮选及电磁选方法进行分离,然后通过重液分选,最后在双目镜下人工挑出锆石.锆石分选由河北省地质测绘院(实验室)完成.将锆石粘在玻璃板上,用环氧树脂浇铸,制成薄片、抛光,并拍摄锆石透、反射光和阴极发光图像.锆石的制靶、阴极发光图像(CL)及 U、Th、Pb 同位素

含量测定均在天津地质调查中心激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)实验室进行.利用 193 nm FX 激光器对锆石进行剥蚀,激光束斑直径为 35 μm ,频率为 10 Hz,采用 He 作为激光剥蚀物质的载气送入 Neptune(ICP-MS),利用动态变焦扩大色散使质量数相差很大的 U-Pb 同位素可以同时接收,从而进行锆石 U-Pb 同位素测定.采用²⁰⁸Pb 对普通铅进行校正(Andersen, 2002),利用 NIST612 样作为外标计算锆石的 Pb、U、Th 含量.²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄的加权平均值误差为 $\pm 1\sigma$,可信度为 95%.U/Pb 年龄的计算采用 Ludwig(2003)编制的 ISOPLOT 程序完成.

4 分析结果

4.1 元素地球化学

对南召县五朵山岩体 7 件中细粒二云母花岗岩进行了主量元素、微量元素和稀土元素测定,分析结果见表 1.

由表 1 可以看出,二云母花岗岩在主量元素组成上具有高硅、富铝和富碱的特征, SiO_2 含量变化范围为 69.32%~74.28%,平均 71.27%; Al_2O_3 含量变化范围为 14.14%~17.28%,平均 15.37%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 7.68%~9.03%,平均 8.21%,且相对富钾贫钠, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值平均为 1.19.在图 3a 中 6 件样品落入高钾钙碱性系列,1 件样品落入钾玄岩系列;在图 3b 中,样品均落入强过铝质区域,且 CIPW 标准矿物计算均出现刚玉.

二云母花岗岩稀土元素总体含量偏低,稀土总量(ΣREE)介于 51.70×10^{-6} ~ 303.84×10^{-6} ,平均 123.73×10^{-6} .轻重稀土含量比值($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)介于 2.08~6.71, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 7.04~

表 1 南召县二云母花岗岩主量元素(%)、微量元素及稀土元素(10^{-6})分析结果Table 1 Major (%), trace elements and rare earth elements (10^{-6}) compositions for two-mica granites in Nanzhao County

样品号	005/7	006/3	1038/3	2021/1	209/4	210/1	6010/1
SiO ₂	70.13	70.55	74.28	72.07	70.17	72.37	69.32
TiO ₂	0.14	0.18	0.06	0.14	0.22	0.25	0.29
Al ₂ O ₃	17.28	16.18	14.64	15.58	14.14	14.34	15.41
Fe ₂ O ₃	0.45	0.59	0.23	0.77	3.14	1.17	1.72
FeO	0.57	0.80	0.38	0.35	1.83	1.15	1.52
MnO	0.13	0.05	0.04	0.05	0.08	0.09	0.13
MgO	0.23	0.36	0.13	0.26	0.18	0.46	0.82
CaO	0.48	1.46	1.08	1.07	1.07	1.44	1.29
Na ₂ O	4.69	4.58	4.24	3.83	2.94	3.23	3.38
K ₂ O	4.34	3.80	4.03	4.49	5.22	4.45	4.30
P ₂ O ₅	0.05	0.06	0.04	0.07	0.10	0.11	0.15
LOI	1.24	1.07	0.64	1.06	0.50	0.55	1.28
H ₂ O ⁺	1.24	1.20	0.64	1.01	0.63	0.36	1.27
Total	99.75	99.68	99.79	99.74	99.58	99.59	99.61
A/CNK	1.30	1.13	1.10	1.19	1.14	1.12	1.22
Rb	217.8	153.2	165.6	168.6	156.8	184.9	143.5
Ba	538.7	808.0	430.5	714.4	813.6	1386	809.1
Th	8.16	10.26	13.39	9.95	47.49	21.15	8.55
U	1.20	1.45	1.09	1.27	2.10	1.05	1.11
Ta	1.71	1.62	1.37	1.21	0.61	0.96	1.12
Nb	11.88	10.75	9.19	9.32	5.31	8.50	9.32
Sr	243.1	420.5	224.4	363.5	186.9	316.1	305.0
Hf	3.4	3.7	2.5	3.1	5.6	4.8	3.12
Zr	72.6	95.2	42.3	72.4	210.3	177.0	110.7
La	11.93	17.67	8.52	13.65	67.52	32.72	28.27
Ce	22.99	31.91	16.22	26.79	132.3	56.55	52.76
Pr	2.74	3.71	1.80	3.00	13.00	6.68	6.83
Nd	9.72	13.25	6.57	10.71	42.94	22.58	24.87
Sm	2.25	2.43	1.42	2.21	7.85	3.96	4.83
Eu	0.44	0.60	0.36	0.58	0.86	0.87	1.07
Gd	1.91	1.88	1.40	1.81	6.80	3.37	3.51
Tb	0.34	0.27	0.27	0.31	0.96	0.52	0.56
Dy	1.86	1.28	1.74	1.53	4.52	2.74	2.85
Ho	0.33	0.21	0.34	0.26	0.83	0.57	0.52
Er	0.84	0.53	0.99	0.70	2.13	1.54	1.36
Tm	0.12	0.08	0.15	0.10	0.27	0.22	0.21
Yb	0.78	0.48	0.87	0.60	1.75	1.38	1.24
Lu	0.11	0.07	0.13	0.09	0.25	0.20	0.18
Y	9.71	6.28	10.91	7.71	21.90	15.64	15.22
δEu	0.62	0.83	0.78	0.86	0.35	0.71	0.76
总和	66.08	80.65	51.70	70.05	303.84	149.53	144.28

27.73, 球粒陨石标准化曲线(图 4a)呈轻稀土相对富集、重稀土相对亏损的右倾模式;具有中等偏弱的负 Eu 异常, δEu 值为 0.35~0.86, 平均为 0.70。在原始地幔标准化蛛网图上, 二云母花岗岩富集 K、Rb、Th 等大离子亲石元素, 亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti 等元素(图 4b)。

4.2 锆石 U-Pb 定年

本文对南召县下桐扒中细粒二云母花岗岩样品 1038/3(坐标: 纬度 N33°16'41", 经度 E112°59'28")

进行锆石阴极发光分析和 U-Pb 测试, 结果显示, 锆石多数为无色透明, 少量为浅黄色, 呈自形晶或半自形晶, 多为短柱状, 少数呈长柱状。锆石长宽比多数在 3:2 以下, 锆石晶形相对较好, 部分发育裂纹, 锥面和柱面保留偏差。在阴极发光图像(CL)上, 锆石核边结构明显, 发育典型的岩浆震荡生长环带, 结晶环带宽度一般较窄, 个别较宽(图 5)。

对 1038/3 锆石样品共分析了 17 个点(表 2), 其 U、Th 含量范围分别为 $184 \times 10^{-6} \sim 1448 \times 10^{-6}$ 和

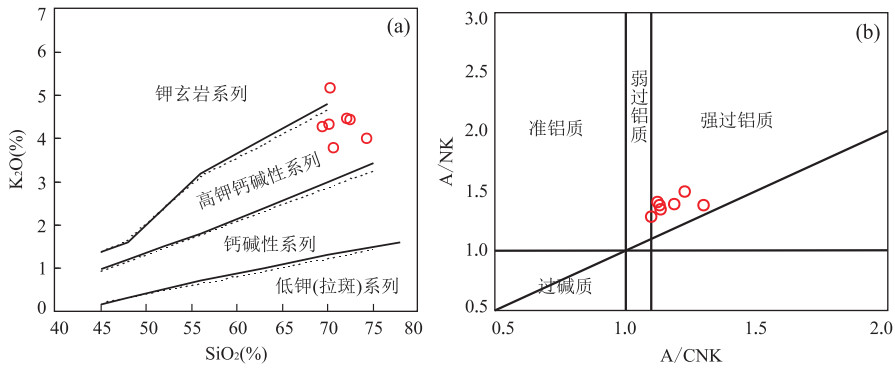


图 3 研究区二云母花岗岩 SiO_2 - K_2O 图解(a)和 A/CNK - A/NK 图解(b)

Fig.3 Plot of SiO_2 vs. K_2O (a) and A/CNK vs. A/NK in the study area (b)

图 a 据 Peccerillo and Taylor(1976);图 b 据 Maniar and Piccoli(1989)

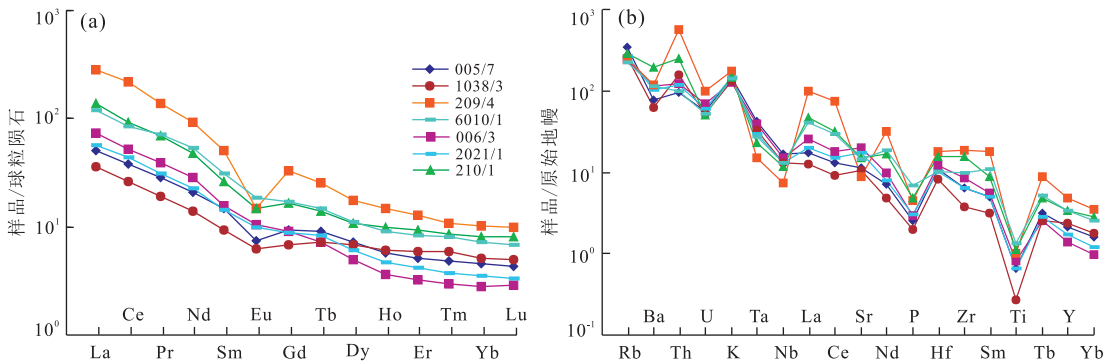


图 4 研究区二云母花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔蛛网图(b)

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider (b)

标准化值据 Sun and McDonough(1989)

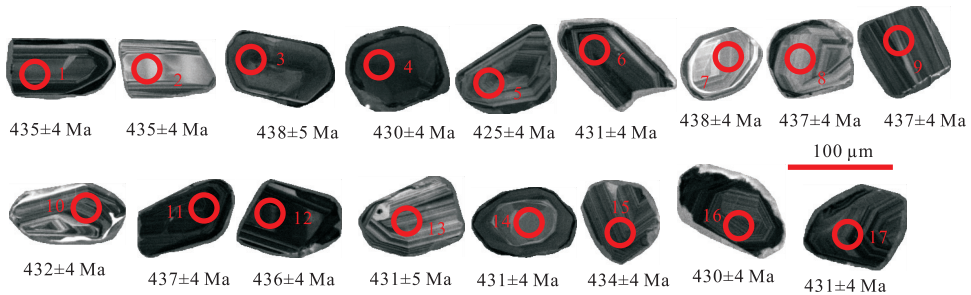


图 5 研究区二云母花岗岩锆石 CL 图像

Fig.5 CL images of zircons from two-mica granite in the study area

$90 \times 10^{-6} \sim 1240 \times 10^{-6}$, 锆石 Th/U 比值除一个点 (0.15) 外, 其余均大于 0.4. Th/U 比值大于 0.4, 具有韵律环带的锆石显示岩浆成因 (Williams and Claesson, 1987; Rubatto, 2002; 吴元保和郑永飞, 2004). 所测定的 17 个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值在 $425 \pm 4 \text{ Ma} \sim 438 \pm 5 \text{ Ma}$ 之间 (表 2), 其加权平均年龄为 $433 \pm 2 \text{ Ma}$ (图 6), 代表了二云母花岗岩的形成时代, 为早志留世末期.

5 讨论

5.1 花岗岩成因类型

南召县五朵山二云母花岗岩样品的 SiO_2 含量相对较高, 变化范围是 $69.32\% \sim 74.28\%$, 具有较高的全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 $7.68\% \sim 9.03\%$), 且相对富钾贫钠. CIPW 标准矿物计算均有刚玉出现, $\text{A}/\text{CNK} = 1.10 \sim 1.30$, 属于强过铝质花岗岩类. 在 ACF 三角图解中, 7 件样品均落入“S”型花岗岩区域

表 2 南召县下桐扒二云母花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试数据
Table 2 LA-ICP-MS zircon dating results for two-mica granite in Nanzhao County

点号	U(10^{-6})	Th(10^{-6})	Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			谱和度 (%)			
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	1 249	1 240	0.99	0.0565	0.0009	0.5432	0.0102	0.0698	0.0007	471	36	441	8	435	4	99
2	184	195	1.06	0.0563	0.0011	0.5411	0.0116	0.0697	0.0007	463	45	439	9	435	4	99
3	658	406	0.62	0.0570	0.0009	0.5520	0.0092	0.0702	0.0008	493	33	446	7	438	5	98
4	485	219	0.45	0.0557	0.0009	0.5288	0.0092	0.0689	0.0007	439	36	431	7	430	4	100
5	517	535	1.04	0.0563	0.0009	0.5292	0.0089	0.0682	0.0007	464	35	431	7	425	4	99
6	1 299	633	0.49	0.0567	0.0008	0.5405	0.0085	0.0691	0.0007	481	32	439	7	431	4	98
7	325	176	0.54	0.0559	0.0010	0.5420	0.0104	0.0702	0.0007	450	40	440	8	438	4	100
8	371	194	0.52	0.0563	0.0010	0.5439	0.0100	0.0701	0.0007	463	38	441	8	437	4	99
9	534	328	0.61	0.0565	0.0009	0.5473	0.0099	0.0702	0.0007	470	36	443	8	437	4	99
10	588	90	0.15	0.0569	0.0009	0.5435	0.0091	0.0693	0.0007	488	34	441	7	432	4	98
11	1 448	607	0.42	0.0558	0.0008	0.5396	0.0085	0.0701	0.0007	446	32	438	7	437	4	100
12	1 421	591	0.42	0.0566	0.0008	0.5456	0.0085	0.0699	0.0007	476	32	442	7	436	4	99
13	304	194	0.64	0.0564	0.0013	0.5404	0.0137	0.0691	0.0007	469	50	439	11	431	5	98
14	337	135	0.40	0.0566	0.0010	0.5398	0.0103	0.0692	0.0007	474	40	438	8	431	4	98
15	996	418	0.42	0.0568	0.0008	0.5456	0.0086	0.0696	0.0007	482	32	442	7	434	4	98
16	802	337	0.42	0.0565	0.0008	0.5390	0.0087	0.0690	0.0007	471	33	438	7	430	4	98
17	1 062	475	0.45	0.0557	0.0008	0.5328	0.0086	0.0691	0.0007	439	33	434	7	431	4	99

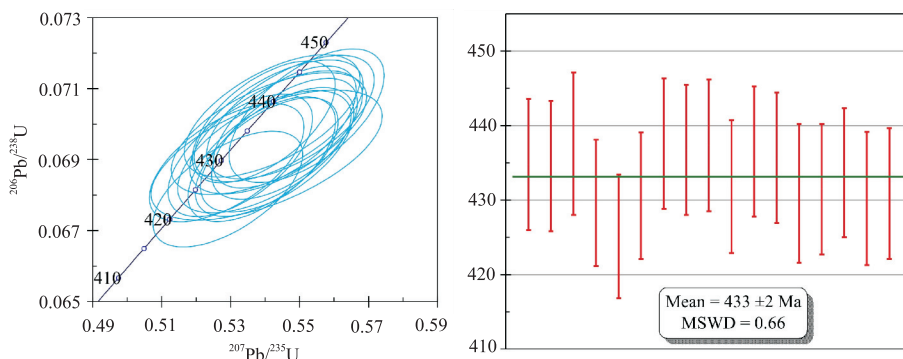
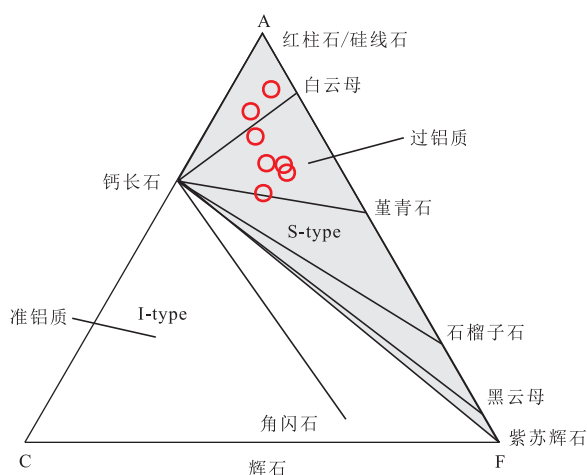


图 6 研究区二云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.6 Zircon U-Pb concordia diagram for two-mica granite in the study area

图 7 南召县二云母花岗岩 A(Al-Na-K)-C(Ca)-F(Mg+Fe²⁺)图解Fig.7 Plot of A(Al-Na-K)-C(Ca)-F(Mg+Fe²⁺) of the two-mica granite from the Nanzhao County
据 White and Chappell(1977)

(图 7). 稀土元素含量总体不高, 呈轻稀土富集、重稀土亏损的右倾配分模式, 中等的负 Eu 异常. 岩石 Rb/Sr 比值除样品 006/3 外均大于 0.44, 显示壳源花岗岩的特征; Zr/Hf 比值范围为 16.9~37.4, 平均 28.2, 接近正常花岗岩值(33~40)和地壳平均值(33~46); Nb/Ta 比值为 6.6~8.8, 平均 7.7, 略低于地壳平均值(11), 但该值远低于地幔平均值(60), 而与地壳平均值(10)接近(黎彤, 1985; Dostal and Chatterjee, 2000). 在原始地幔标准化蛛网图解中, 二云母花岗岩富集 K、Rb、Th 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta 等高场强元素, 这些地球化学特征均与典型富铝壳源型花岗岩基本相似. 根据 Watson and Harrison(1983)提出的锆石饱和温度计算方法, 得出南召县二云母花岗岩的成岩温度在 723~806 °C, 显示二云母花岗岩的成岩温度并不高, 其成岩物质

可能来源于地壳部分. 综合以上研究, 笔者认为南召县五朵山二云母花岗岩在岩石成因上属强过铝质的“S”型花岗岩.

5.2 花岗岩成岩年龄

南召县五朵山二云母花岗岩的锆石 CL 图像分析结果显示, 锆石具有典型的岩浆生长环带, 且具有较高的 Th/U 比值(>0.4), 表明它们均为岩浆结晶作用的产物, 所测定的年龄代表了二云母花岗岩体的形成时代(图 5). 锆石 U-Pb 测年结果显示, 南召县五朵山二云母花岗岩的成岩年龄为 433±2 Ma, 时代为早志留世末期.

王涛等(2009)对秦岭造山带东段早古生代岩浆作用进行了综合研究, 将构造岩浆演化划分为 505~470 Ma 陆缘俯冲阶段、450~422 Ma 块体碰撞阶段及 415~400 Ma 碰撞晚期阶段, 并认为 450~422 Ma 块体碰撞阶段主要岩石类型为“I”型花岗岩类. 雷敏(2010)认为 468~428 Ma 阶段为早古生代岩浆活动的主体阶段, 岩石类型主要为“I”-“S”过渡型及“S”型, 形成于陆壳俯冲-陆陆碰撞的时期, 而刘丙祥(2014)获得~450 Ma 的五朵山等岩体时代显示“I”-“S”过渡, 兼具俯冲和碰撞类型的特征.

5.3 构造意义

南召县五朵山二云母花岗岩具有典型的“S”型花岗岩的地球化学属性, 其较低的重稀土含量暗示岩浆源区可能残留有石榴子石(Dostal and Chatterjee, 1995), 结合典型富铝矿物白云母的出现, 暗示二云母花岗岩可能是加厚陆壳部分重熔所形成, 表明其可能形成于陆陆碰撞所导致的陆壳加厚环境(Barbarin, 1999).

不同构造环境中酸性侵入岩的地球化学特征研究表明, 微量元素可以用来判定岩浆侵入的构造环境. Pearce *et al.*(1984)根据花岗岩构造环境特征将

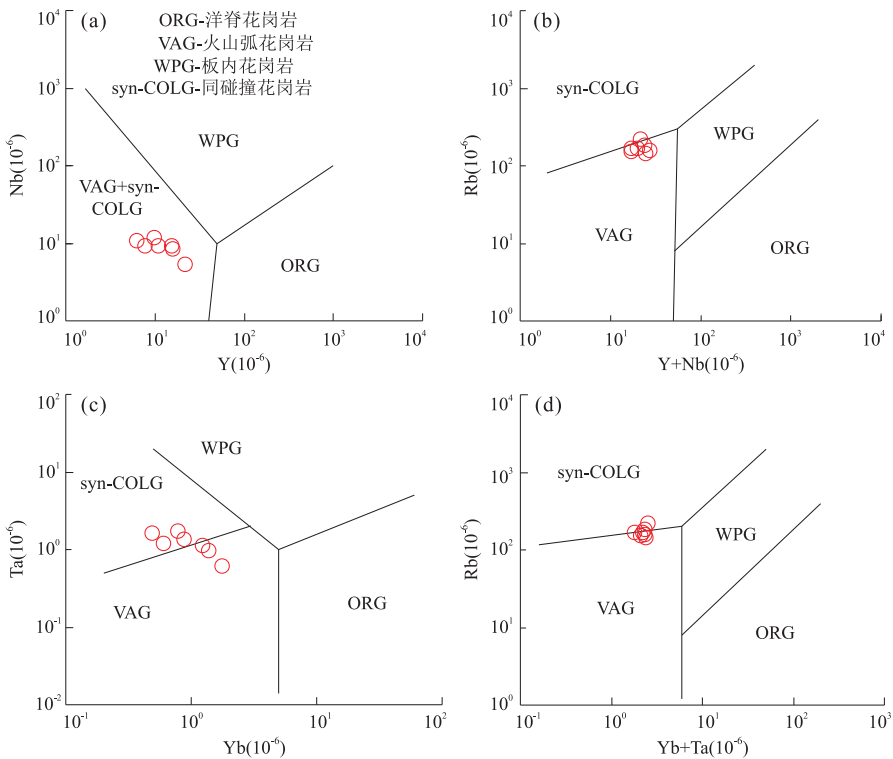


图 8 研究区二云母花岗岩微量元素构造判别图

Fig.8 Tectonic environment discrimination diagrams for two-mica granites

其分为 4 类:洋脊花岗岩(ORG)、火山弧花岗岩(VAG)、板内花岗岩(WPG)和同碰撞花岗岩(syn-COLG).在图 8a 和 8b 上,样品均落入火山弧与同碰撞区域,在图 8c 和 8d 上,样品投影同样均落入火山弧与同碰撞交汇区域,显示了由俯冲向碰撞环境的转换.

在图 9 中,样品基本均落入同碰撞花岗岩区,个别点落入同碰撞花岗岩与晚造山期花岗岩交汇区,显示同碰撞特征.

中奥陶世—中志留世花岗岩体遍布整个北秦岭东段,是秦岭造山带古生代花岗岩的主体,其中以五朵山岩体规模最大,面积达 1 420 km²,另外有安吉坪、土桥岗等岩体.安吉坪岩体为高分异二云母二长花岗岩,土桥岗岩体则为石榴子石二长花岗岩,二者总体均呈现出挤压特征的“S”型花岗岩地球化学特征,锆石 U-Pb 年龄显示成岩年龄为 ~430 Ma 左右,且锆石氧同位素特征均显示壳源成因特点(刘丙祥,2014).

研究区地处扬子板块与华北板块结合部的秦岭造山带,早古生代该区经历了板块俯冲、碰撞和后碰撞造山过程(王晓霞等,2015).张国伟等(1996,2001)和 Xue *et al.*(1996b)根据岛弧火山岩和俯冲型花岗岩的同位素年代和古生物证据推断,震旦纪

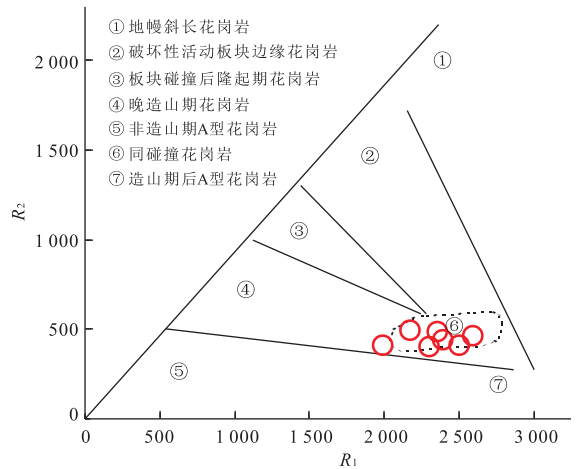


图 9 研究区二云母花岗岩 R₁-R₂ 构造判别图解

Fig.9 R₁-R₂ tectonic discrimination diagram for two-mica granites

据 Batchelor and Bowden(1985)

至早奥陶世是秦岭洋最大扩展期,中奥陶世开始俯冲消减,这也与区域二郎坪群最新年龄(463 ~ 475 Ma;赵姣,2012)较为一致.闫全人等(2009)以北秦岭造山带华北陆块南缘被动陆缘火山裂谷盆地、早古生代岛弧—弧后盆地和晚古生代岛弧—蛇绿混杂岩等构造相带为研究重点,认为华北陆块南缘由晚新元古代大洋扩张作用转换为板块俯冲作用的时

限为早奥陶世(472 Ma)。

从早奥陶世开始秦岭造山带东段发育大量“1”型岛弧花岗岩,与北秦岭榴辉岩等超高压变质作用时间较吻合(杨经绥等,2003;陈丹玲等,2004)。马昌前等(2004)通过对秦岭东部大别山北麓至西部昆仑山研究认为,中央造山带内与俯冲作用有关的侵入岩成岩时代呈由东向西变新的趋势,可能反映了秦岭洋向华北地块南缘俯冲过程中是从东向西逐渐关闭的。晚奥陶世—中志留世花岗质岩浆在北秦岭地区普遍发育,区域构造研究显示,该时期发生块体碰撞,古老基底岩石秦岭岩群向西挤出侧向运移及该时期由东向西剪刀状双向俯冲的构造动力学特点,反映了秦岭造山带由点碰撞到面碰撞的过程(王涛等,1999;Wang *et al.*, 2005),也许正是这种碰撞过程导致了地壳的加厚,并在稍后的抬升过程中造成幔源物质加入,形成岩浆上侵并形成“1”型花岗岩(王涛等,2009)。

本文获得南召县五朵山典型碰撞型“S”型二云母花岗岩成岩年龄为 433 ± 2 Ma,显示东秦岭南召县地区在早志留世末期构造环境已由俯冲环境转换为陆陆碰撞环境,这一结论亦与张成立等(2013)研究获得的 450 Ma 左右的中压麻粒岩相变质作用相符合。该认识对于东秦岭地区早古生代岩浆演化作用有重要的指示意义,亦对整个秦岭造山带的构造演化提供了重要线索和依据。

6 结论

(1)南召县五朵山岩体二云母花岗岩在岩石成因上属强过铝质的“S”型花岗岩。

(2)南召县五朵山岩体二云母花岗岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 433 ± 2 Ma。

(3)东秦岭南召地区在早志留世末期构造环境已由俯冲环境转换为陆陆碰撞环境。

致谢:天津地质矿产研究所实验室周红英老师和耿建珍老师在锆石定年过程中给予大力帮助,河南省地质调查院王世炎教授级高工在野外地质调查中给予大力支持,天津地质矿产研究所李承东教授级高工在论文撰写过程中提供关键性建议,两位审稿专家提出宝贵修改意义,在此一并表示感谢!

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. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)

Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46 (3): 605–626. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1)

Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48 (1–4): 43–55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)

Chang, Q. L., Lu, X. X., Liu, D. H., et al., 2006. The Relation between Gold Deposits and Wuduoshan Granite in Eastern Qinling. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(3): 319–325 (in Chinese with English abstract).

Chen, D. L., Liu, L., Sun, Y., 2004. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating for High-Pressure Basic Granulite from North Qinling and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1901–1908 (in Chinese).

Chen, Y. J., 2010. Indosinian Tectonic Setting, Magmatism and Metallogenesis in Qinling Orogen, Central China. *Geology in China*, 37(4): 854–866 (in Chinese with English abstract).

Dostal, J., Chatterjee, A. K., 1995. Origin of Topaz-Bearing and Related Peraluminous Granites of the Late Devonian Davis Lake Pluton, Nova Scotia, Canada: Crystal Versus Fluid Fractionation. *Chemical Geology*, 123 (1–4): 67–88. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00047-p](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00047-p)

Dostal, J., Chatterjee, A. K., 2000. Contrasting Behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf Ratios in a Peraluminous Granitic Pluton (Nova Scotia, Canada). *Chemical Geology*, 163 (1–4): 207–218. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00113-8)

Hou, H. X., Zhang, D. H., Zhang, R. Z., 2016. The Chronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Mesozoic Shiyagou Hidden Granite at East Qinling. *Earth Science*, 41(10): 1665–1682 (in Chinese with English abstract), <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.122>

Lei, M., 2010. Petrogenesis of Granites and Their Relation to Tectonic Evolution of Orogen in the East Part of Qinling Orogenic Belt (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 28–48 (in Chinese with English abstract).

Li, T., 1985. The Abundance of Chemical Elements in the Lithosphere and Its Structural Layers. *Acta Geologica Sinica*, 59 (3): 219–227 (in Chinese with English abstract).

Liu, B. X., 2014. Magmatism and Crustal Evolution in the Eastern North Qinling Terrain (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei, 57–93 (in Chinese with English abstract).

Liu, Q. Q., Shao, Y. J., Chen, X. M., et al., 2016. Petrogeochemistry Geochronology and Hf Isotopes of the Monzogranite from Xinxian, Southern Region in Henan Province. *Earth Sci-*

- ence, 41 (8): 1275—1294 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.507>
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Ma, C. Q., Ming, H. L., Yang, K. G., 2004. An Ordovician Magmatic Arc at the Northern Foot of Dabie Mountains: Evidence from Geochronology and Geochemistry of Intrusive Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 393—402 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonics Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101 (5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101)
- Mattauer, M., Matte, P., Malavieille, J., et al., 1985. Tectonics of the Qinling Belt: Build-Up and Evolution of Eastern Asia. *Nature*, 317(6037): 496—500. <https://doi.org/10.1038/317496a0>
- Meng, Q. R., Zhang, G. W., 2000. Geologic Framework and Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, Central China. *Tectonophysics*, 323(3—4): 183—196. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00106-2)
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Ratschbacher, L., Hacker, B. R., Calvert, A., et al., 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, Geochronology, and Deformation History. *Tectonophysics*, 366(1—2): 1—53. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00053-2)
- Rubatto, D., 2002. Zircon Trace Element Geochemistry: Partitioning with Garnet and the Link between U-Pb Ages and Metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1—2): 123—138. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2)
- Shi, Y., Yu, J. H., Xu, X. S., et al., 2009. Geochronology and Geochemistry of the Qinling Group in the Eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2651—2670 (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. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, T., Pei, X. Z., Wang, X. X., et al., 2005. Orogen-Parallel Westward Oblique Uplift of the Qinling Basement Complex in the Core of the Qinling Orogen (China): An Example of Oblique Extrusion of Deep-Seated Metamorphic Rocks in a Collisional Orogen. *The Journal of Geology*, 113(2): 181—200. <https://doi.org/10.1086/427668>
- Wang, T., Wang, X. X., Tian, W., et al., 2009. North Qinling Paleozoic Granite Associations and Their Variation in Space and Time: Implications for Orogenic Processes in the Orogens of Central China. *Science in China (Series D)*, 39(7): 949—971 (in Chinese).
- Wang, T., Zhang, G. W., Wang, X. X., et al., 1999. Growth Patterns of Granitoid Plutons and Their Implications for Tectonics, Kinematics and Dynamics Examples from Granitoid Plutons in the Core of the Qinling Orogenic Belt, China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(3): 326—335 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Wang, T., Zhang, C. L., 2015. Granitoid Magmatism in the Qinling Orogen, Central China and Its Bearing on Orogenic Evolution. *Science in China (Series D)*, 45(8): 1109—1125 (in Chinese).
- Wang, Z. Q., Yan, Q. Q., Yan, Z., et al., 2009. New Division of the Main Tectonic Units of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1527—1546 (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. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90211-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90211-X)
- White, A. J. R., Chappell, B. W., 1977. Ultrametamorphism and Granitoid Genesis. *Tectonophysics*, 43(1—2): 7—22. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90003-8)
- Williams, I. S., Claesson, S., 1987. Isotopic Evidence for the Precambrian Provenance and Caledonian Metamorphism of High Grade Paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97(2): 205—217. <https://doi.org/10.1007/bf00371240>
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese).
- Xue, F., Kröner, A., Reischmann, T., et al., 1996a. Palaeozoic Pre- and Post-Collision Calc-Alkaline Magmatism in the Qinling Orogenic Belt, Central China, as Documented by Zircon Ages on Granitoid Rocks. *Journal of the Geological Society*, 153(3): 409—417. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.153.3.0409>
- Xue, F., Lerch, M. F., Kröner, A., et al., 1996b. Tectonic Evolution of the East Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: A Review and New Tectonic Model. *Tectonophysics*, 253(3—4): 271—284. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00033-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00033-8)

1016/0040-1951(95)00060-7

Yan, Q. R., Wang, Z. Q., Yan, Z., et al., 2009. Timing of the Transformation from Seafloor Spreading on the South Margin of the North China Block to Subduction within the North Qinling Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1565–1583.

Yang, J. S., Liu, F. L., Wu, C. L., et al., 2003. Two Ultrahigh Pressure Metamorphic Events Recognized in the Central Orogenic Belt of China: Evidence from the U-Pb Dating of Coesite-Bearing Zircon. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 463–477 (in Chinese with English abstract).

Zhang, C. L., Liu, L., Wang, T., et al., 2013. Granitite Magmatism Related to Early Paleozoic Continental Collision in the North Qinling Belt. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2323–2329 (in Chinese).

Zhang, G. W., Meng, Q. Q., Yu, Z. P., et al., 1996. Orogenesis and Dynamics of the Qinling Orogen. *Science in China (Series D)*, 26(3): 193–200 (in Chinese).

Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling Orogen and Continental Dynamics. Science Press, Beijing, 236–451 (in Chinese).

Zhao, J., 2012. Studies on Geochemical and Zircon Dating of Volcanics from Erlangping Group of the North Qinling, Eastern Qinling Mountains (Dissertation). Northwest University, Xi'an, 11–47 (in Chinese with English abstract).

Zhu, J. C., Zhang, P. H., Xie, C. F., et al., 2006. The Huashan-Guposhan A-Type Granitoid Belt in the Western Part of the Nanling Mountains: Petrology, Geochemistry and Genetic Interpretations. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 529–542 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Y., Zhou, H. W., Li, S. L., et al., 2015. Late Paleoproterozoic Crustal Anatexis and Its Tectonic Significance: Evidence from Petrology and Zircon U-Pb Ages of Migmatite. *Earth Science*, 40(5): 824–839 (in Chinese with English abstract). <https://doi.10.3799/dqkx.2015.067>

附中文参考文献

常秋玲, 卢欣祥, 刘东华, 等, 2006. 秦岭五朵山花岗岩体及金矿关系探讨. 吉林大学学报(地球科学版), 36(3): 319–325.

陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等, 2004. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 49(18): 1901–1908.

陈衍景, 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用. 中国地质, 37(4): 854–866.

侯红星, 张德会, 张荣臻, 2016. 东秦岭中生代瑶沟隐伏花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 41(10): 1665–1682.

雷敏, 2010. 秦岭造山带东部花岗岩成因及其与造山带构造演化的关系(硕士学位论文). 北京: 中国地质科学院, 28–48.

黎彤, 1985. 岩石圈及其结构层的元素丰度. 地质学报, 59(3): 219–227.

刘丙祥, 2014. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化(博士学位论文). 合肥: 中国科学技术大学, 57–93.

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.

马昌前, 明厚利, 杨坤光, 2004. 大别山北麓的奥陶纪岩浆弧: 侵入岩年代学和地球化学证据. 岩石学报, 20(3): 393–402.

时毓, 于津海, 徐夕生, 等, 2009. 秦岭造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究. 岩石学报, 25(10): 2651–2670.

王涛, 王晓霞, 田伟, 等, 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示. 中国科学(D辑), 39(7): 949–971.

王涛, 张国伟, 王晓霞, 等, 1999. 花岗岩生长方式及构造运动学、动力学意义——以秦岭造山带核部花岗岩为例. 地质科学, 34(3): 326–335.

王晓霞, 王涛, 张成立, 2015. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1109–1125.

王宗起, 闰全人, 闫臻, 等, 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. 地质学报, 83(11): 1527–1546.

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. 科学通报, 49(16): 1589–1604.

闫全人, 王宗起, 闫臻, 等, 2009. 从华北陆块南缘大洋扩张到北秦岭造山带板块俯冲的转换时限. 地质学报, 83(11): 1565–1583.

杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等, 2003. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用: 来自含柯石英锆石的定年证据. 地质学报, 77(4): 463–477.

张成立, 刘良, 王涛, 等, 2013. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗质岩浆作用. 科学通报, 58(23): 2323–2329.

张国伟, 孟庆任, 于在平, 等, 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学(D辑), 26(3): 193–200.

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, 236–451.

赵姣, 2012. 北秦岭东段二郎坪群火山岩的地球化学及年代学研究(硕士学位论文). 西安: 西北大学, 11–47.

朱金初, 张佩华, 谢才富, 等, 2006. 南岭西段花山—姑婆山 A 型花岗质杂岩带: 岩石学、地球化学和岩石成因. 地质学报, 80(4): 529–542.

朱越, 周汉文, 李少林, 等, 2015. 豫西小秦岭地区晚古元古代地壳深熔作用及构造意义: 岩石学和锆石 U-Pb 年代学证据. 地球科学, 40(5): 824–839.