

东秦岭神林花岗岩的锆石 U-Pb 定年、 地球化学特征及构造背景



梁涛^{1, 2)}, 卢仁^{1, 2)}, 刘小丽^{1, 2)}

1) 河南省有色金属地质勘查总院, 郑州, 450052;

2) 河南省有色金属深部找矿勘查技术研究重点实验室, 郑州, 450052

内容提要: 神林花岗岩能够为反演东秦岭燕山期区域构造演化提供新的制约。它的主体岩性为斑状黑云母二长花岗岩, 其锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年结果为 130.6 ± 0.7 Ma。神林花岗岩样品具有高硅富碱和贫镁低钙的特征, 属于高钾钙碱性系列, 以准铝质—弱过铝质为主。它们富集大离子亲石元素(如 Rb、Th 和 K)和亏损高场强元素(如 Nb、Ta 和 Ti), 具有轻稀土富集、重稀土亏损的特征, 其 $(La/Yb)_N$ 范围为 $17.6 \sim 22.2$, δEu 值为 $0.59 \sim 0.72$ 。在 $La_N - (La/Yb)_N$ 图解中, 神林花岗岩样品显示正相关关系, 表明是源区组成和部分熔融作用控制其成分变异。神林花岗岩样品显示了高 Sr、低 Y 和 Yb 的特征, Sr/Y 值为 $24.3 \sim 37.9$, 属于高铯低钇中酸性岩(adakite, 有人音译为埃达克岩)。神林花岗岩形成于加厚大陆下地壳的部分熔融, 其源区深度大于 50 km, 部分熔融源区残余相包括石榴子石、金红石和角闪石, 无或者少量的斜长石。神林花岗岩锆石具有轻稀土亏损、重稀土富集、Ce 正异常的特征, 锆石的形成温度介于 $624 \sim 701$ °C 之间, 重稀土元素分配系数与年龄的变化特征表明神林花岗岩经历了深部岩浆/流体的注入与混合, 这与暗色微粒包体所揭示的神林花岗岩深部成岩过程相吻合。混合活化后的岩浆/流体体系沿区域深大断裂上侵, 在其次级断裂带内的断裂交汇处就位成岩。神林花岗岩形成于东秦岭陆(板)内造山阶段, 是约 131 Ma 区域岩石圈拆沉作用的岩浆响应。

关键词: 神林花岗岩; U-Pb 定年; 锆石稀土元素; 岩浆混合; 岩石圈拆沉; 东秦岭

秦岭造山带是中央造山带的重要组成部分, 它是一个多期次、多体制的复合型大陆造山带(张国伟等, 2001), 不同时代、成因及构造背景的岩浆岩成为记录其地壳生长与造山演化信息的重要载体, 尤其是广泛出露的燕山期花岗岩(卢欣祥, 2000)。东秦岭鲁山—南召—方城地区强烈发育燕山期花岗岩, 形成了近北西向的南、北两个岩带, 南岩带规模大, 包括伏牛山、四棵树(鲁山)、交口、房山、祖师顶、角子山等岩基和营子园、头道河、鸡冢、郭庄、牛心山、七峰山、叶庄等岩株, 北岩带规模小, 由熊背、神林、吴沟和张士英四个岩株构成。它们的岩石成因研究集中于伏牛山、祖师顶和角子山岩基及张士英岩株。

伏牛山岩基的形成时代存在中元古代(河南省地质矿产局, 1989)、中元古代蓟县纪和燕山期(王志宏等, 2000)、新元古代和燕山期(刘振宏等, 2004)和燕山期(王金贵和卢欣祥, 1988; 张正伟和

卢欣祥, 1990; Gao Xinyu et al., 2014; 张昕等, 2018) 4 种认识。燕山期伏牛山花岗岩的成因存在以下 4 种认识: ① 形成于陆陆碰撞背景下交代—重熔作用而成的 S 型花岗岩(王金贵和卢欣祥, 1988; 张正伟和卢欣祥, 1990); ② 存在混合型、S 型和 A 型三种花岗岩类型, 对应于陆内造山过程中挤压—走滑—伸展构造旋回(刘振宏等, 2004); ③ 经历壳幔混合而成的 I 型花岗岩, 形成于太平洋板块西向俯冲所致的伸展背景环境(Gao Xinyu et al., 2014); ④ 存在约 145 Ma 和约 119 Ma 两期与太平洋板块西向俯冲相关的 I 型花岗岩, 分别对应于秦岭造山带断裂构造复活和岩石圈拆沉作用(张昕等, 2018)。

祖师顶岩基及其南侧黄山花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 131.9 ± 1.1 Ma 和 132.8 ± 0.8 Ma, 角子山岩基的锆石 U-Pb 年龄为 120.9 ± 0.8 Ma, 其形成与燕山期古太平洋板块向亚欧板块俯冲有关(周红升等, 2008), 而刘振宏等(2004)认为它们是陆内造

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: U1504405)、河南省国土资源厅科技攻关项目(编号: 2016-08 和 2014-06)的成果。

收稿日期: 2020-10-22; 改回日期: 2021-05-31; 网络首发: 2021-06-20; 责任编辑: 黄道裘、刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.06.051

作者简介: 梁涛, 男, 1979 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查和区域成矿研究工作; Email: liang20010212@126.com。

山作用的岩浆响应。张士英岩株的锆石 U-Pb 年龄值介于 124~107 Ma,其形成存在与太平洋板块俯冲有关(向君峰等,2010;段友强等,2015)和华北克拉通岩石圈伸展减薄及壳幔相互作用相关(李创举和包志伟,2010)两种不同的认识。此外,鲁山—南召—方城地区郭庄石英闪长岩和吴沟花岗岩形成于早白垩世(约 131 Ma),均经历了岩浆混合作用,是华北克拉通岩石圈减薄作用的产物(卢仁等, 2021;梁涛等,2021)。

不难发现,东秦岭鲁山—南召—方城地区仅少部分燕山期花岗岩获得了不同程度的岩石成因认识,全面开展燕山期花岗岩成因研究有助于建立整合的深部构造—岩浆响应模型,这不仅有利于探讨

鲁山—南召—方城地区燕山期花岗岩之间的成因联系,而且能够为反演东秦岭燕山期深部构造演化提供新的约束条件。神林花岗岩是鲁山—南召—方城地区北岩带规模最大的岩株,本文对其开展了锆石 U-Pb 定年及地球化学成分测试,分析了其岩石成因和深部构造过程。

1 地质特征

神林花岗岩地处华北克拉通南缘,位于秦岭造山带东段的鲁山—南召—方城地区(图 1a、b),它侵入于中元古界熊耳群和汝阳群。熊耳群主要岩性为斜长片岩、斜长角闪片岩和片理化斑状安山岩;汝阳

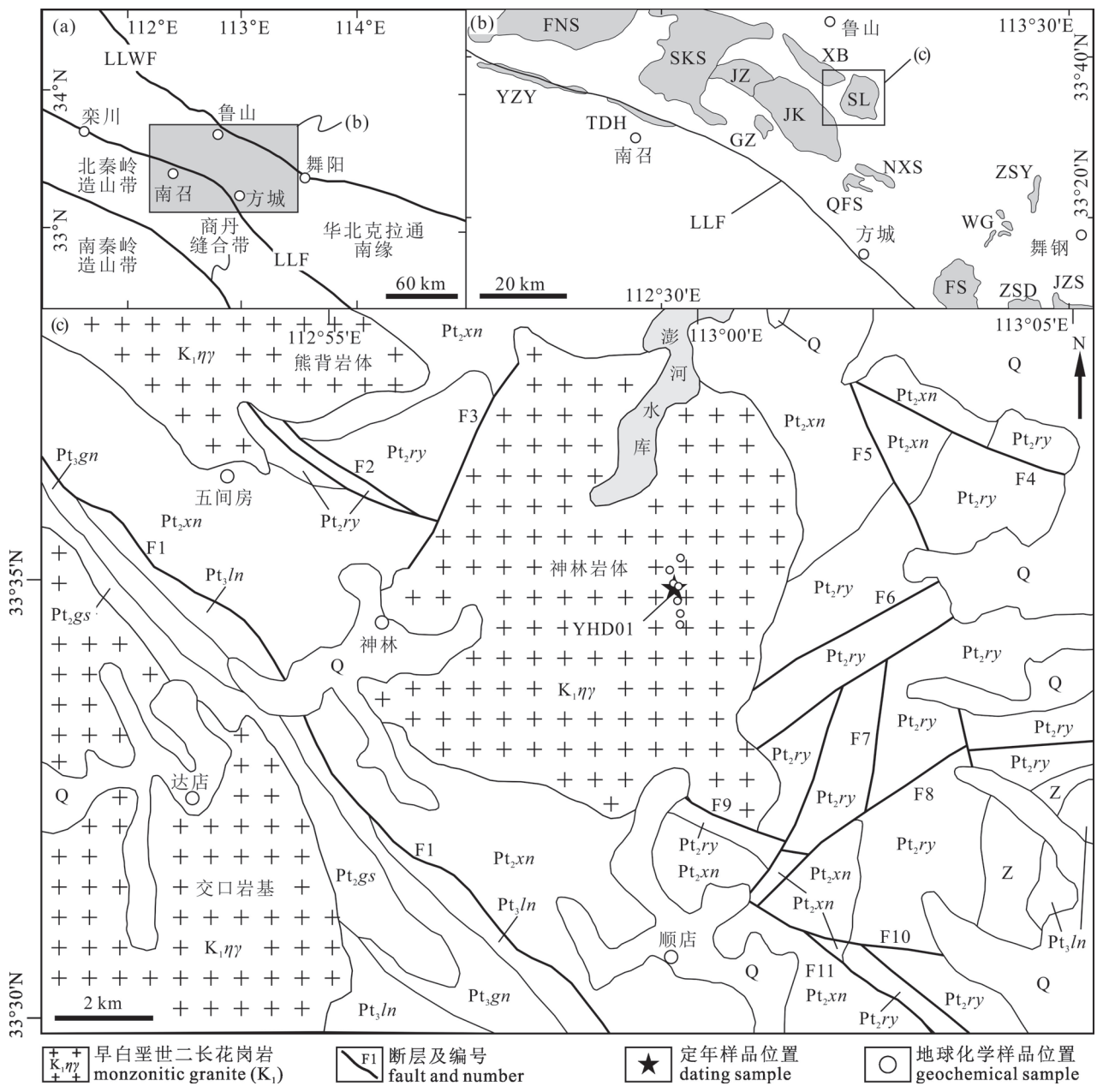


图 1 东秦岭神林花岗岩地质简图

Fig. 1 Simplified geologic map of the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt

(a) 秦岭造山带构造分区简图(底图据张国伟等,2001 简化),LLWF—灵宝—鲁山—舞阳断裂,LLF—洛南—栾川—方城断裂;(b) 东秦岭鲁山—南召—方城地区燕山期花岗岩分布简图(据河南省地质矿产开发局第一地质调查队^①简化),LLF—洛南—栾川—方城断裂,FNS—伏牛山,SKS—四棵树,ZZY—营子园,TDH—头道河,JZ—鸡冢,JK—交口,GZ—郭庄,SL—神林,XB—熊背,NXS—牛心山,QFS—七峰山,ZSY—张士英,WG—吴沟,FS—房山,ZSD—祖师顶,JZS—角子山;(c) 神林花岗岩地质简图(据河南省地质矿产开发局第一地质调查队^①简化);Q—第四系,Z—震旦系,Pt₃gn—新元古界官道口群,Pt₃ln—新元古界栾川群,Pt₂gs—中元古界高山河群,Pt₂ry—中元古界汝阳群,Pt₂xn—中元古界熊耳群

(a) Simplified tectonic map of the Qinling Orogenic Belt showing the major tectonic division and units (Simplified after Zhang Guowei et al., 2001), LLWF—Lingbao—Lushan—Wuyang fault, LLF—Luonan—Luanchuan—Fangcheng fault; (b) simplified distribution map of the Yanshanian granites in Lushan—Nanzhao—Fangcheng area, eastern Qinling Orogenic Belt (Simplified after the note ①), LLF—Luonan—Luanchuan—Fangcheng fault, FNS—Funiushan, SKS—Sikeshu, ZZY—Yingziyuan, TDH—Toudaohe, JZ—Jizhong, JK—Jiaokou, GZ—Guozhuang, SL—Shenlin, XB—Xiongbei, NXs—Niuxinshan, QFS—Qifengshan, ZSY—Zhangshiyang, WG—Wugou, FS—Fangshan, ZSD—Zushiding, JZS—Jiaozishan; (c) simplified geological map of the Shenlin granite (Simplified after the note ①); Q—Quaternary, Z—Sinian (Ediacaran) System, Pt₃gn—Guandaokou Group (Pt₃), Pt₃ln—Luanchuan Group (Pt₃), Pt₂gs—Gaoshanhe Group (Pt₂), Pt₂ry—Ruyang Group (Pt₂), Pt₂xn—Xiong'er Group (Pt₂)

群岩性以石英砂岩、泥岩和白云岩为主^②。此外,中元古界高山河群呈北西向带状展布于神林花岗岩西南部,岩性以石英岩和绢云母片岩为主;新元古界栾川群、官道口群及震旦系出露于神林花岗岩的南部,栾川群以石英砂岩、黑云母大理岩和二云片岩为主,官道口群岩性以白云石大理岩为主,震旦系岩性以石英砂岩、白云岩和硅质岩为主^②。

神林花岗岩出露区断裂构造发育(图 1c),以近北西向、近北东向、近南北向和近东西向四组断裂为主^{③④}。近北西向的水塔寺—三道沟(F1)、斗金洞(F2)、大横山(F9)、卧羊山(F11)和燕山坡一小豹沟(F4)断裂是华北克拉通南缘与北秦岭造山带分界断裂——栾川—方城断裂的次级断裂,F1 位于神林和交口花岗岩之间,总体上连续,北东倾,F2、F9 和 F11 均南西倾,推测它们三者是连续的同一条断裂,因受神林花岗岩侵位和北东向、北北西向及北西西向断裂的错断而不连续。近北东向断裂以程化沟—查山沟(F3)、三驼—石灰窑(F6)和上靠队(F8)为代表,F3 倾向北西,是神林花岗岩和汝阳群的分界线,F6 和 F8 近平行,倾向分别为南东和北西。近南北向的头道沟断层(F7)和近东西向的小横山—下傅家(F10)位于神林花岗岩东侧,分别西倾和南倾。从神林花岗岩和断层构造的平面分布特征来看,神林花岗岩出露于区域性北西向深大断裂带的近平行次级断裂带内,且就位于近北西和北东向断裂交汇部位,这表明它的上侵受控于断裂构造。

东秦岭鲁山—南召—方城地区岩浆活动强烈且频繁,形成了中—新元古代、古生代和燕山期 3 个构造岩浆旋回。火山岩主要为中元古代熊耳群的中基

性—中酸性火山岩,侵入岩包括中元古代、新元古代、古生代和燕山期 4 期,中元古代侵入岩以伏牛山混合二长花岗岩和王家营及河北岸片麻状钾长花岗岩为代表;新元古代侵入岩主要为正长(斑)岩(王志宏等,2000),其中双山正长岩的锆石 U-Pb 年龄为 844 Ma(包志伟等,2008);毛谷堆变辉长岩是古生代侵入岩的典型代表(王志宏等,2000);燕山期侵入岩在鲁山—南召—方城地区广泛分布,以伏牛山、四棵树(鲁山)、交口、房山、祖师顶等岩基和神林、郭庄、吴沟等岩株为典型代表,其中燕山期伏牛山花岗岩的锆石 U-Pb 年龄存在约 145 Ma、约 130 Ma 和约 118 Ma 3 个阶段(Gao Xinyu et al., 2014; 张昕等,2018),祖师顶岩基黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 131.9±1.1 Ma(周红升等,2008),郭庄石英闪长岩和吴沟花岗岩形成于约 131 Ma(卢仁等,2021;梁涛等,2021)。

神林花岗岩南北长约 9.5 km,东西宽约 7.5 km,出露面积约 59 km²,它的北侧和南侧侵入熊耳群,东西两侧与汝阳群分别为侵入和断层接触(图 1c),其与围岩界线清楚,可见烘烤边。神林花岗岩的主体岩性为斑状黑云母二长花岗岩(图 2a、b),发育环带结构的钾长石巨斑晶和暗色微粒包体(图 2b、c)。神林花岗岩多呈灰白色—浅肉红色,块状构造,具有自形—半自形粒状结构和似斑状结构,斑晶含量 10%~15%,以钾长石巨斑晶为主,基质含量 85%~90%,矿物主要为钾长石(30%~40%)、斜长石(30%~40%)和石英(25%~35%),斜长石表面新鲜,发育聚片双晶和弱环带(图 2d、e),部分斜长石具有中部发育绢云母化而边部新鲜的特征(图 2e),

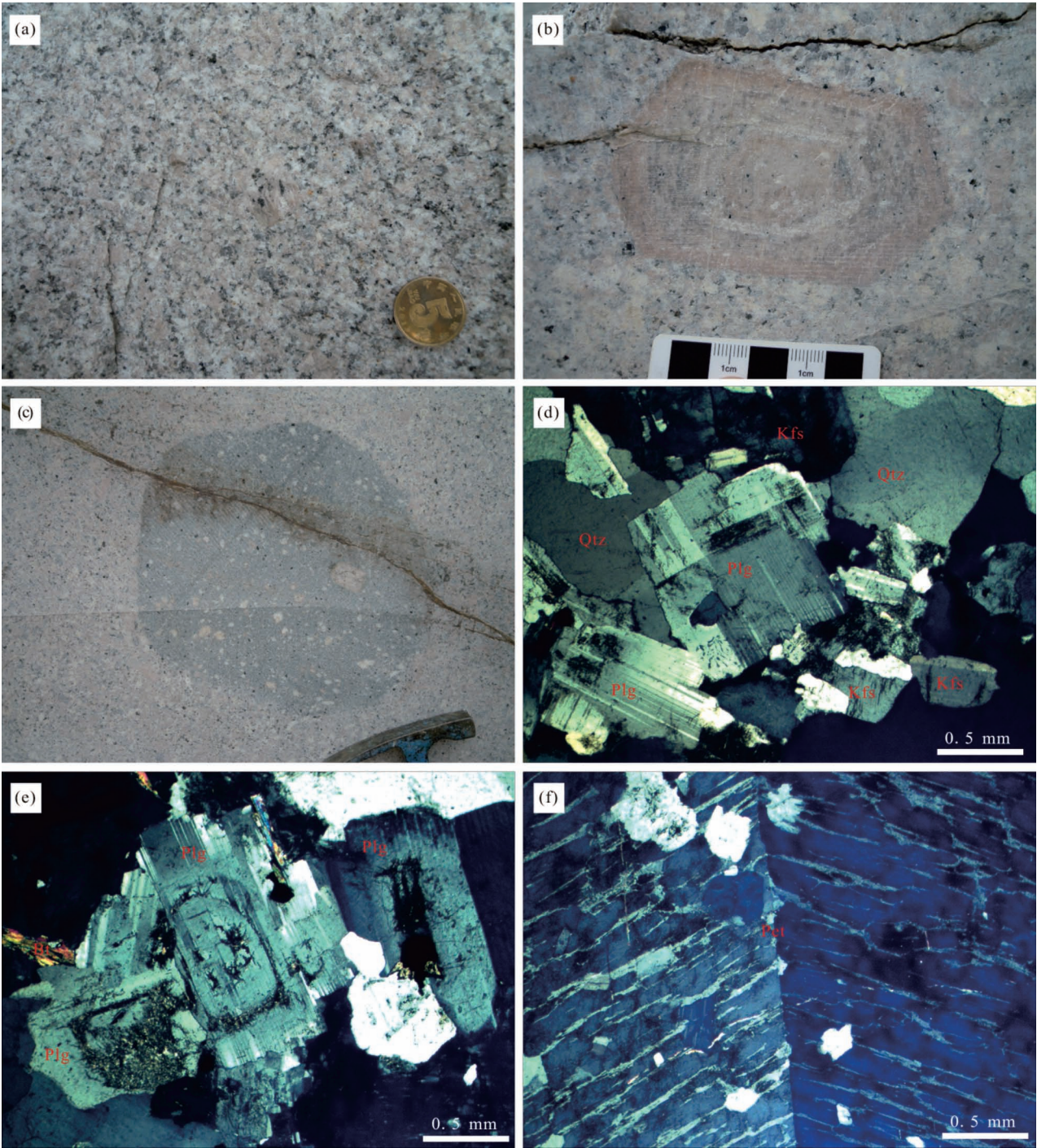


图2 东秦岭神林花岗岩的岩石照片：(a)斑状黑云母二长花岗岩；(b)具有环带结构的钾长石巨斑晶；(c)中—细粒斑状黑云母二长花岗岩中的暗色微粒包体；(d)具有自形—半自形粒状结构的神林花岗岩，斜长石发育聚片双晶，钾长石发育卡氏双晶；(e)发育聚片双晶和环带结构的斜长石，其内部发育一定程度的黏土化和绢云母化；(f)发育卡氏双晶的条纹长石

Fig. 2 Petrographs of the Shenlin granites in the eastern Qinling Orogenic Belt: (a) porphyritic biobite monzonitic granite; (b) the mega-phenocryst of K-feldspar with zonal structure; (c) mafic microgranular enclave; (d) the xenomorphic—granular texture, plagioclase with polysynthetic twin, and K-feldspar with Carlsbad twin; (e) plagioclase with zonal structure and its polysynthetic twin, the inner part shows clayization and sericitization, and the outer is fresh; (f) perthite and its Carlsbad twin

Kfs—钾长石; Pet—条纹长石; Plg—斜长石; Qtz—石英; Bt—黑云母
Kfs—K-feldspar; Pet—perthite; Plg—plagioclase; Qtz—quartz; Bt—biotite

钾长石表面发育一定程度的黏土化(图 2f),发育卡氏双晶,可见脉状客晶的条纹长石。暗色矿物以黑云母为主,含量 5%~10%,副矿物主要为磁铁矿、榍石、磷灰石及锆石。

2 锆石 LA-ICP-MS 测试

2.1 分析方法

神林花岗岩定年样品 YHD01 的坐标为 112°59′47″E 和 33°34′52″N,锆石分选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,岩石样品在破碎、淘洗之后使用重、磁方法分选锆石,锆石制靶和锆石颗粒的反射光、透射光及阴极发光(CL)照相由北京铅年领航科技有限公司完成。分析测试前,对所有靶上锆石颗粒图像进行了晶型、粒径、内部结构等方面的综合分析,优选出不含包裹体、杂质和裂缝等不利部位的锆石测点。

锆石 U-Pb 定年测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 LA-ICP-MS 实验室完成,激光剥蚀系统为 GeoLas2005,等离子质谱仪(ICP-MS)型号为 Agilent 7500a。定年测试中,标样 91500、JG-1、NIST SRM610 和样品锆石有序穿插进行,数据处理使用 ICPMSDataCal 程序(Liu Yongsheng et al., 2010),锆石 U-Pb 谐和图绘制和加权平均年龄计算使用 Isoplot 程序(Ludwing, 2001)。

2.2 样品特征

定年样品 YHD01 的岩性为斑状黑云母二长花岗岩,分选出锆石多于 1000 粒,大部分锆石无色透明,少量锆石呈浅淡黄色,个别锆石内发育裂纹和矿物包裹体,大多数锆石颗粒晶型完整,多呈长柱状,

长轴粒径以 100~200 μm 为主,短轴粒径以 50~100 μm 为主,它们发育均匀、清晰、致密的韵律振荡环带(图 3)。

2.3 锆石 U-Pb 定年结果

样品 YHD01 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见表 1 和图 4。

对样品 YHD01 累计进行了 30 个锆石测点的分析,其中测点 YHD01-05、-21 和-27 等 3 个测点的测定值明显偏离 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})-n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 谐和线,它们的谐和度低于 90%(表 1),在年龄计算中不予考虑。剩余 27 个锆石测点的同位素比值位于或者接近 U-Pb 谐和线,它们的 Th/U 值介于 0.31~0.60, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄介于 127.2 ±1.4 Ma~133.7 ±1.4 Ma,加权平均年龄为 130.6 ±0.7 Ma(MSWD=2.1;图 4a、b)。

2.4 锆石微量元素

对神林花岗岩样品 YHD01 进行锆石 U-Pb 定年的同时,也获得了其 30 个锆石测点的微量元素含量,但 YHD01-05、-21 和-27 等 3 个测点未获得有效锆石 U-Pb 年龄,在分析微量元素数据中也不考虑它们,其余 27 个测点的微量元素含量分析结果见表 2。

样品 YHD01 中 27 颗锆石测点的 Ce 含量范围介于 13.8×10^{-6} ~ 67.2×10^{-6} ,Ho 含量的最小值和最大值分别为 11.7×10^{-6} 和 30.5×10^{-6} ,Yb 和 Lu 的含量范围分别为 221×10^{-6} ~ 536×10^{-6} 和 48.6×10^{-6} ~ 122×10^{-6} ,稀土元素总量介于 436×10^{-6} ~ 1047×10^{-6} 。它们的 Y 含量范围为 488×10^{-6} ~ 1279×10^{-6} ,Ti 含量介于 0.38×10^{-6} ~ 7.52×10^{-6} 。在样品 YHD01 的锆石稀土元素配分模式图中,显示了轻稀土亏损

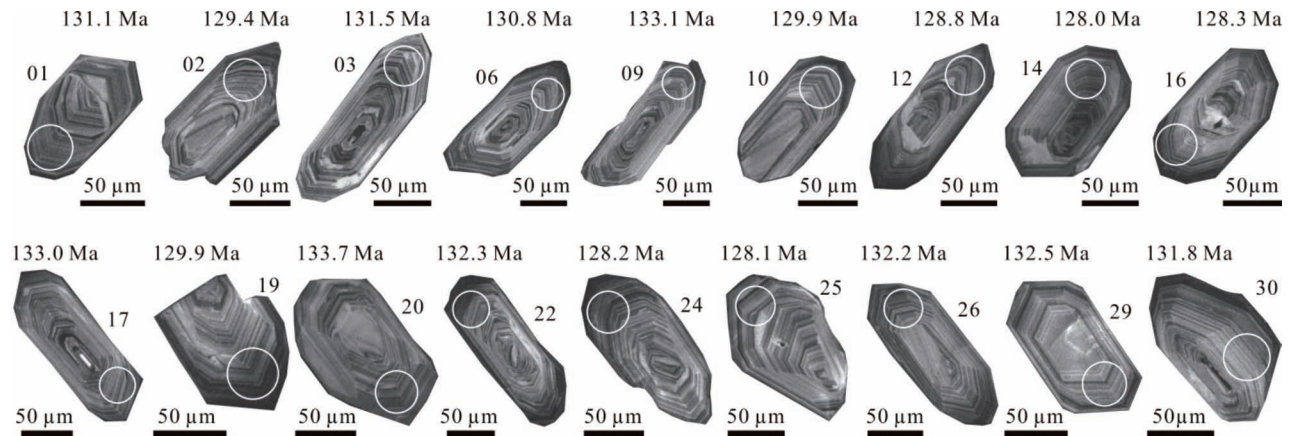


图 3 东秦岭神林花岗岩定年样品 YHD01 的锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircons in sample YHD01 from the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt

表 1 东秦岭神林花岗岩样品 YHD01 锆石 LA-ICP-MS 定年结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS dating results of sample YHD01 from the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			
					测值	1 σ	测值	测值	1 σ	测值	测值	1 σ	测值	测值	1 σ		
YHD01-01	34.8	372	1025	0.36	0.04861	0.00153	0.13795	0.00449	0.02055	0.00021	127.9	78.7	131.2	4.0	131.1	1.3	99
YHD01-02	45.0	567	1187	0.48	0.05047	0.00143	0.14099	0.00399	0.02027	0.00018	216.7	64.8	133.9	3.6	129.4	1.1	96
YHD01-03	36.5	528	883	0.60	0.05063	0.00175	0.14419	0.00517	0.02060	0.00024	233.4	79.6	136.8	4.6	131.5	1.5	96
YHD01-04	42.1	591	978	0.60	0.05065	0.00146	0.14190	0.00414	0.02029	0.00019	233.4	66.7	134.7	3.7	129.5	1.2	96
YHD01-05	38.5	444	852	0.52	0.06279	0.00223	0.18179	0.00613	0.02115	0.00017	701.9	71.3	169.6	5.3	134.9	1.1	77
YHD01-06	35.1	450	892	0.50	0.05056	0.00144	0.14350	0.00424	0.02050	0.00020	220.4	66.7	136.2	3.8	130.8	1.2	96
YHD01-07	40.1	551	1017	0.54	0.05343	0.00156	0.15199	0.00422	0.02070	0.00021	346.4	66.7	143.7	3.7	132.1	1.3	91
YHD01-08	36.2	462	1043	0.44	0.05150	0.00148	0.14811	0.00440	0.02075	0.00021	264.9	66.7	140.2	3.9	132.4	1.3	94
YHD01-09	25.7	339	706	0.48	0.05019	0.00185	0.14421	0.00523	0.02086	0.00022	211.2	82.4	136.8	4.6	133.1	1.4	97
YHD01-10	26.3	343	747	0.46	0.05151	0.00200	0.14474	0.00546	0.02035	0.00019	264.9	88.9	137.3	4.8	129.9	1.2	94
YHD01-11	41.4	493	1220	0.40	0.04762	0.00140	0.13726	0.00400	0.02083	0.00020	79.7	70.4	130.6	3.6	132.9	1.2	98
YHD01-12	25.1	279	786	0.35	0.04955	0.00165	0.13828	0.00460	0.02018	0.00022	172.3	77.8	131.5	4.1	128.8	1.4	97
YHD01-13	20.7	235	601	0.39	0.04819	0.00234	0.13197	0.00632	0.01993	0.00022	109.4	111.1	125.9	5.7	127.2	1.4	98
YHD01-14	32.6	432	823	0.52	0.05047	0.00150	0.13971	0.00416	0.02005	0.00018	216.7	68.5	132.8	3.7	128.0	1.1	96
YHD01-15	24.2	286	617	0.46	0.05192	0.00182	0.14933	0.00537	0.02079	0.00023	283.4	81.5	141.3	4.7	132.6	1.5	93
YHD01-16	42.8	505	1223	0.41	0.05139	0.00140	0.14215	0.00366	0.02010	0.00018	257.5	63.0	135.0	3.3	128.3	1.2	94
YHD01-17	34.7	480	885	0.54	0.04862	0.00129	0.13953	0.00375	0.02084	0.00020	127.9	63.0	132.6	3.3	133.0	1.3	99
YHD01-18	34.5	461	897	0.51	0.04615	0.00156	0.13142	0.00458	0.02055	0.00017	400.1	-316.6	125.4	4.1	131.1	1.1	95
YHD01-19	62.4	831	1571	0.53	0.04803	0.00124	0.13463	0.00347	0.02035	0.00020	101.9	61.1	128.2	3.1	129.9	1.3	98
YHD01-20	30.0	367	786	0.47	0.05049	0.00156	0.14535	0.00444	0.02096	0.00023	216.7	72.2	137.8	3.9	133.7	1.4	97
YHD01-21	52.4	464	1258	0.37	0.05981	0.00185	0.18130	0.00581	0.02189	0.00020	598.2	66.7	169.2	5.0	139.6	1.2	80
YHD01-22	40.1	516	962	0.54	0.04881	0.00152	0.13950	0.00433	0.02073	0.00020	139.0	72.2	132.6	3.9	132.3	1.2	99
YHD01-23	25.1	349	661	0.53	0.04479	0.00177	0.12457	0.00500	0.02020	0.00024	—	—	119.2	4.5	128.9	1.5	92
YHD01-24	54.2	744	1439	0.52	0.04917	0.00137	0.13663	0.00381	0.02008	0.00016	166.8	60.2	130.0	3.4	128.2	1.0	98
YHD01-25	36.4	451	957	0.47	0.05011	0.00201	0.13896	0.00563	0.02007	0.00023	198.2	97.2	132.1	5.0	128.1	1.5	96
YHD01-26	40.4	505	1099	0.46	0.05085	0.00156	0.14545	0.00442	0.02072	0.00018	235.3	70.4	137.9	3.9	132.2	1.2	95
YHD01-27	21.9	182	479	0.38	0.07555	0.00399	0.21678	0.01219	0.02059	0.00023	1083.3	106.6	199.2	10.2	131.4	1.4	58
YHD01-28	38.7	465	1061	0.44	0.05148	0.00163	0.14560	0.00454	0.02042	0.00016	261.2	72.2	138.0	4.0	130.3	1.0	94
YHD01-29	27.1	351	678	0.52	0.04906	0.00168	0.14082	0.00484	0.02077	0.00023	150.1	75.0	133.8	4.3	132.5	1.4	99
YHD01-30	13.1	125	406	0.31	0.04967	0.00201	0.14035	0.00534	0.02065	0.00026	189.0	94.4	133.4	4.8	131.8	1.7	98

表 2 东秦岭神林花岗岩样品 YHD01 锆石微量元素含量 ($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace elements ($\times 10^{-6}$) contents in the zircons of sample YHD01 from the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt

测点	Ti	Nb	Hf	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	δEu	t (°C)	Ce ⁴⁺ /Ce ³⁺	Kd ^{Ce}	Kd ^{Ho}	Kd ^{Yb}	Kd ^{Lu}	Kd ^λ
-01	1.41	2.96	12861	0.011	22.7	0.027	0.47	1.11	0.55	6.57	2.42	33.3	14.3	82.2	20.5	283	64.1	606	531	0.48	590	49.9	0.54	64.9	370	440	92.2
-02	3.63	6.14	11954	1.212	41.7	1.153	5.80	2.47	1.05	12.4	4.08	57.3	25.5	149	37.0	497	116	1095	951	0.47	659	8.93	0.99	116	652	796	167
-03	2.81	3.92	11225	0.030	33.8	0.051	0.53	1.70	0.86	10.4	3.46	44.8	17.5	95.0	22.1	278	58.9	696	568	0.48	639	40.0	0.80	79.8	365	404	106
-04	2.70	3.97	11108	—	34.8	0.039	0.78	1.83	0.96	11.6	3.90	49.3	20.2	107	24.8	312	65.9	780	633	0.48	636	40.4	0.82	92.0	409	452	119
-06	2.18	3.74	11597	0.236	32.7	0.105	1.00	1.86	0.90	10.2	3.54	44.8	18.3	97.3	22.9	292	64.1	708	590	0.50	620	25.9	0.77	83.1	383	440	108
-07	1.38	3.19	11998	0.013	29.9	0.043	0.79	1.60	0.86	8.63	2.89	35.7	14.8	78.6	18.6	245	53.9	575	491	0.56	588	34.7	0.71	67.4	321	370	87.6
-08	7.52	4.25	12250	0.166	30.4	0.117	1.01	1.47	0.73	9.62	3.18	42.2	18.7	107	26.4	351	80.1	771	672	0.45	720	26.9	0.72	85.0	460	550	117
-09	2.10	2.64	11109	0.009	27.6	0.027	0.64	1.39	0.72	8.41	2.87	38.7	16.5	86.5	20.3	262	56.8	621	522	0.49	618	44.1	0.65	74.8	343	390	94.5
-10	2.13	3.46	11399	—	31.7	0.058	0.71	1.71	0.87	9.14	3.38	47.1	19.6	106	25.0	323	70.4	749	638	0.54	619	36.0	0.75	89.0	424	483	114
-11	1.80	2.89	12777	0.009	26.6	0.042	0.47	0.92	0.60	6.72	2.42	30.5	13.8	80.7	20.4	278	65.4	581	527	0.53	606	44.6	0.63	62.9	365	449	88.5
-12	4.04	4.06	11976	0.025	26.8	0.030	0.44	1.43	0.64	9.07	3.22	45.6	20.5	116	29.4	390	89.4	829	733	0.41	667	51.9	0.63	93.3	512	614	126
-13	1.58	3.43	11470	0.004	26.2	0.032	0.63	1.35	0.62	8.83	3.32	41.7	18.0	100	24.3	319	69.9	715	615	0.41	597	43.4	0.62	81.9	418	480	109
-14	3.44	4.03	10988	0.322	33.7	0.150	0.95	2.06	0.96	12.4	4.06	54.0	22.5	118	27.3	333	70.6	840	680	0.45	655	23.8	0.80	102	437	485	128
-15	2.01	2.32	11586	0.136	21.3	0.033	0.46	1.19	0.62	6.27	2.48	30.9	13.4	72.2	17.2	221	48.6	518	436	0.56	614	38.2	0.50	60.7	290	334	78.9
-16	1.69	4.70	13062	0.069	30.5	0.070	0.58	1.28	0.61	9.78	3.43	47.5	21.6	126	31.5	434	101	902	808	0.38	602	41.1	0.72	98.0	568	694	137
-17	2.21	3.02	11213	0.034	29.9	0.044	0.73	1.48	0.71	9.40	3.02	39.1	15.9	85.4	20.3	259	57.6	625	522	0.44	621	37.0	0.71	72.3	339	395	95.1
-18	2.56	2.85	11998	0.176	28.2	0.082	0.71	1.21	0.71	8.77	2.66	34.1	14.3	78.1	19.3	253	58.7	582	499	0.48	632	29.9	0.67	65.2	331	403	88.6
-19	3.12	6.99	11923	5.560	67.2	4.023	19.3	5.24	1.65	14.5	4.34	52.2	19.9	103	23.9	304	67.0	785	692	0.54	647	3.71	1.59	90.4	398	460	120
-20	2.72	4.62	10648	0.015	33.9	0.042	0.59	1.67	1.03	11.1	4.00	56.2	23.1	127	30.1	377	83.6	913	750	0.54	637	45.0	0.80	105	495	574	139
-22	2.43	4.68	11322	0.251	39.5	0.131	1.25	2.34	1.21	12.8	4.48	55.1	22.0	118	27.7	340	74.6	860	699	0.54	628	24.7	0.93	100	445	512	131
-23	1.80	3.39	10790	0.013	31.7	0.039	0.65	2.12	0.83	10.1	3.40	46.6	17.9	93.5	21.2	269	55.8	673	553	0.45	607	38.3	0.75	81.3	353	383	102
-24	4.77	6.70	11304	0.482	50.6	0.482	3.14	2.53	1.22	15.1	5.27	71.3	30.5	167	41.1	536	122	1279	1047	0.47	681	16.2	1.20	139	702	837	195
-25	0.38	2.84	11464	1.690	30.2	0.324	1.49	1.03	0.63	7.78	2.39	32.6	13.8	79.1	19.0	262	58.0	569	510	0.48	510	16.8	0.71	62.9	344	398	86.7
-26	1.18	4.04	11956	0.019	28.6	0.024	0.78	1.19	0.64	7.62	2.73	37.3	15.4	89.8	21.8	293	67.8	652	567	0.49	578	47.6	0.68	70.1	384	465	99.2
-28	2.52	4.45	11768	0.013	29.0	0.038	0.53	1.31	0.70	8.56	2.97	41.2	17.8	99.4	25.2	338	77.4	743	642	0.48	631	46.2	0.69	80.9	443	531	113
-29	4.15	4.15	10498	0.626	35.7	0.140	1.43	1.91	1.21	12.7	4.41	57.5	23.6	129	29.2	369	81.1	924	747	0.56	669	23.1	0.84	107	483	557	141
-30	0.87	1.61	11017	0.019	13.8	0.015	0.43	0.75	0.41	5.31	2.03	26.6	11.7	67.5	17.1	238	55.0	488	439	0.46	558	44.7	0.33	53.3	312	378	74.3

注: (1) δ Eu 计算公式为: $\delta\text{Eu} = \frac{2\text{Eu}_N}{\text{Sm}_N + \text{Gd}_N} - 1$; (2) 锆石温度 t 计算方法据 Ferry 和 Watson (2007); 公式为: $\lg [w(\text{Ti})/10^{-6}] = 5.711 - \frac{4800}{T/K} - \lg \alpha(\text{SiO}_2) - \lg \alpha(\text{TiO}_2)$, 计算中 $\alpha(\text{SiO}_2)$ 和 $\alpha(\text{TiO}_2)$ 取值为 1, 表中温度已换算为摄氏温度; (3) 锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值计算据 Ballard et al. (2002); (4) Kd^{Ce} 表示元素 Ce 在锆石—花岗岩熔体体系的分配系数, 计算方法为锆石中 Ce 的含量/花岗岩熔体中 Ce 的含量, 花岗岩熔体中 Ce 的含量用本次全岩样品 Ce 含量的平均值代替, Kd^{Ho} 、 Kd^{Yb} 、 Kd^{Lu} 和 Kd^{Y} 与之类似。

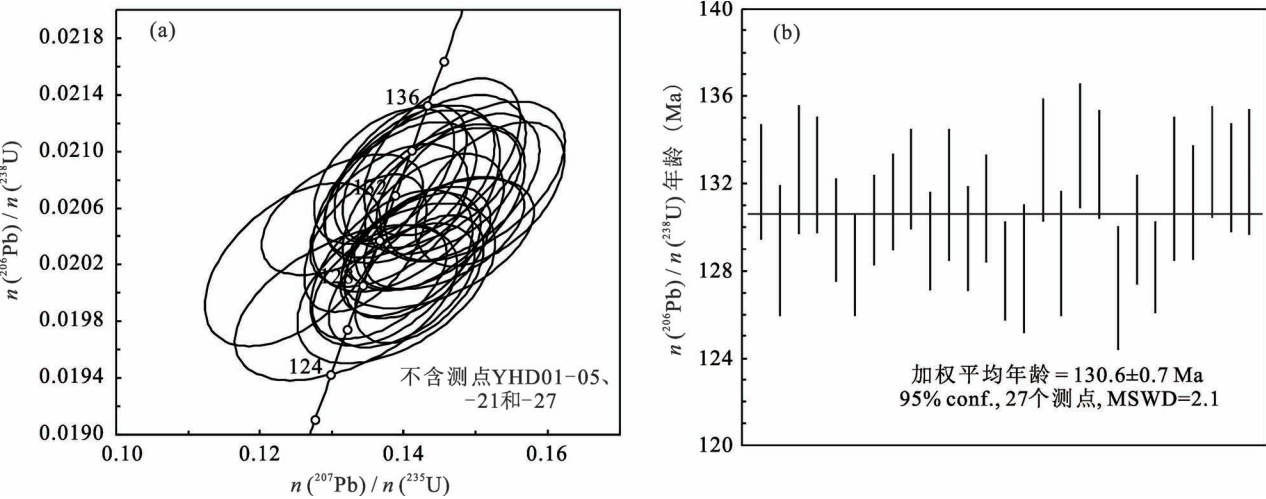


图 4 东秦岭神林花岗岩 LA-ICP-MS 锆石定年结果: (a) 样品 YHD01 中 27 颗锆石的 U-Pb 谐和图 (不含测点 YHD01-05、-21 和-27); (b) 样品 YHD01 中 27 颗锆石测点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄加权平均年龄

Fig. 4 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt: (a) Concordia diagrams for 27 spots (without YHD01-05, -21 and -27) in sample YHD01; (b) $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ weighted average age of 27 spots in sample YHD01

和重稀土富集的特征,具有明显的 Ce 正异常及 Pr、Nd 负异常(图 5a), δEu 值介于 0.38~0.56 之间。

应用 Ferry 和 Watson(2007)的锆石 Ti 温度计计算了神林花岗岩样品 YHD01 的锆石形成温度(表 2),计算中 α_{SiO_2} 取值为 1,温度范围是 510~720℃。在锆石测点年龄—温度图解中(图 5b),数据点呈现波动,总体上在 128~129 Ma 和 131~132 Ma 处出现两个温度拐点,即由早及晚,锆石形成温度经历了降低—升高—再降低的过程。

综合样品 YHD01 的锆石稀土元素含量与全岩稀土元素含量,计算了神林花岗岩稀土元素 i 在锆石—熔体体系的分配系数。在计算中,将 7 件神林花岗岩全岩样品稀土元素 i 的平均含量作为熔体中 i 的含量,27 颗锆石的 Ce 和 Ho 分配系数范围分别为 0.33~1.59 和 53.3~139, Yb 和 Lu 的分配系数范围分别是 290~702 和 334~837, Y 分配系数的最小值和最大值分别为 74.3 和 195(表 2)。在年龄—分配系数 Kd^{Yb} 图解中,在 128~129 Ma 和 131~132 Ma 处出现两个拐点,即经历了降低—升高—降低的过程(图 5c)。

氧逸度是岩浆演化过程中重要的物理化学参数之一,锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值可以有效限定岩浆的氧化状态(Ballard et al., 2002)。锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值据公式(1)计算,其中 $\text{Ce}_{\text{熔体}}$ 和 $\text{Ce}_{\text{锆石}}$ 含量数据分别为全岩 Ce 含量和锆石原位 Ce 含量。公式(1)中 Ce^{4+} 和

Ce^{3+} 的总分配系数则是依据公式(2)计算拟合获得,因 $\ln D_i$ 与 $\frac{r_i + r_0}{3 + 6} \square (r_i + r_0)^2$ 呈线性关系,故相应的 4 价元素(Zr—Hf—U—Th)与 3 价稀土元素可分别获得两条拟合直线,分别计算 Ce^{4+} 和 Ce^{3+} 偏离对应拟合曲线的程度来获得它们的总分配系数,代入到公式(1)中即可获得锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值数据。

$$\frac{\text{Ce}^{4+}}{\text{Ce}^{3+}} \square_{\text{锆石}} = \frac{\text{Ce}_{\text{熔体}} - \frac{\text{Ce}_{\text{锆石}}}{D_{\text{Ce}^{3+}}}}{\frac{\text{Ce}_{\text{锆石}}}{D_{\text{Ce}^{4+}}} - \text{Ce}_{\text{熔体}}} \quad (1)$$

$$\ln D_i = \ln D_0 - \frac{4\pi EN_A}{RT} \frac{r_i}{3} + \frac{r_0}{6} \square r_i - r_0 \square^2 \quad (2)$$

神林花岗岩锆石测点 YHD01-02 和-19 的 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值分别为 8.93 和 3.71,其余 25 颗锆石测点的 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值介于 16.2~49.9(表 2)。在 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值—年龄图解中(图 5d),由老及新数据点具有先降低后升高的趋势,转折点位于 129~130 Ma 处。

3 地球化学特征

神林花岗岩 7 件样品的全岩主量和微量元素成分分析由澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素的分析方法代码为 ME-XRF26d, X 荧光光谱仪型号为 PANalytical PW2424,相对的偏差和误差

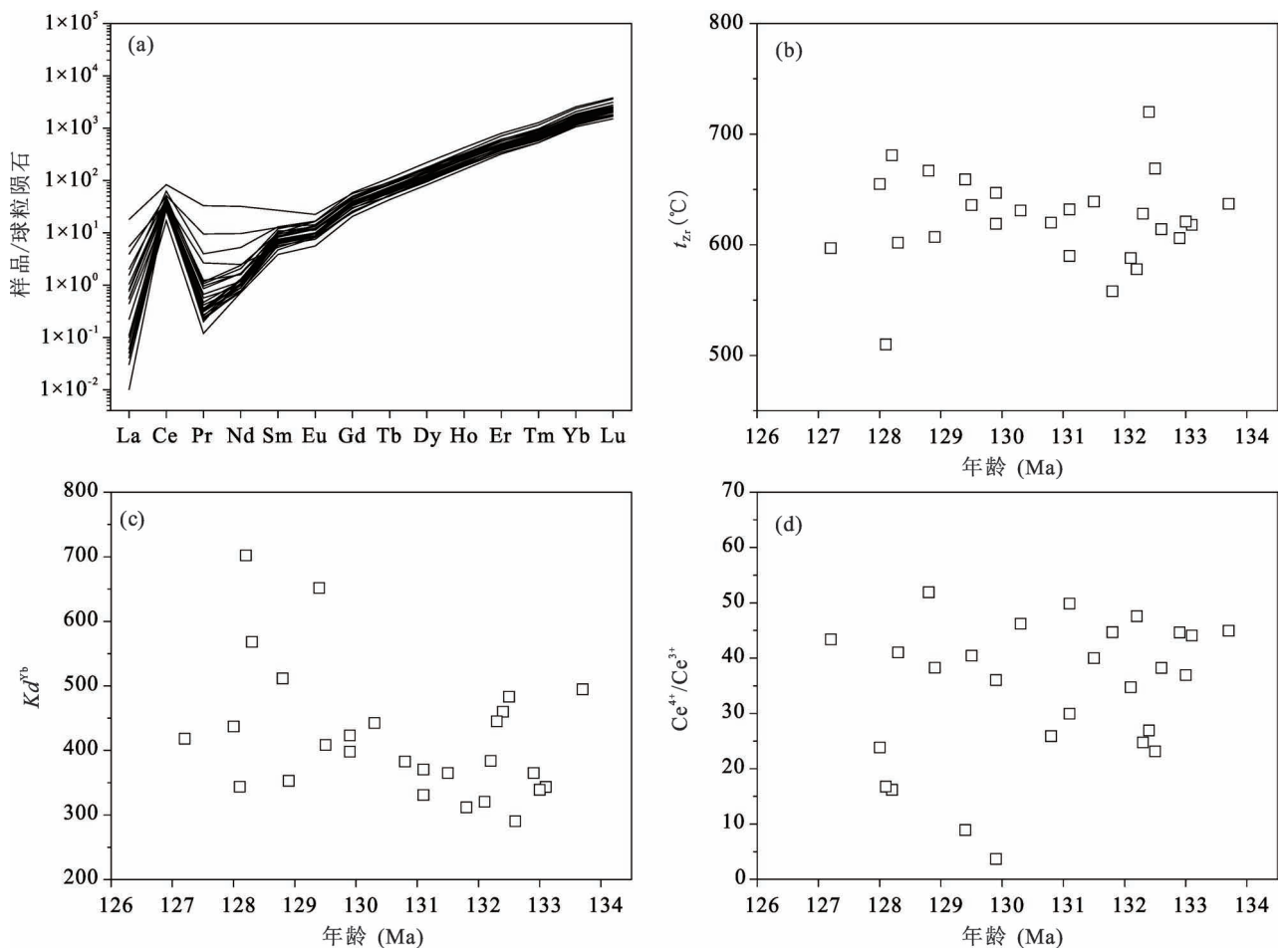


图 5 东秦岭神林花岗岩定年样品 YHD01 的锆石稀土元素图解: (a) 锆石稀土元素配分模式图,球粒陨石标准化数据据 Boynton(1984);(b) 锆石形成温度—年龄图解;(c) 锆石—神林花岗岩熔体体系内 Yb 分配系数 Kd^{Yb} —年龄图解;(d) 神林花岗岩中锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 值—年龄图解

Fig. 5 Diagrams of rare earth elements in zircons of the sample YHD01 from the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt: (a) Chondrite-normalized REE patterns, the chondrite values are from Boynton (1984); (b) diagram of ages vs. temperatures of zircons; (c) diagram of ages vs. distribution coefficients for Yb between zircons and melts formed the Shenlin granite; (d) diagram of ages vs. the ratio of Ce^{4+}/Ce^{3+} of zircons

分别低于 5% 和 2%。微量元素的分析方法代码为 ME-MS862,使用 Agilent 7900 和 Perkin Elmer Elan 9000 两台质谱仪组合测试,相对的偏差和误差均低于 10%。

3.1 主量元素

7 件样品的 SiO_2 介于 73.19%~76.00%, Al_2O_3 介于 12.72%~13.42%, TFe_2O_3 的最低值和最高值分别为 1.34% 和 2.30%, MgO 介于 0.16%~0.42%, CaO 介于 0.85%~1.48%, Na_2O 和 K_2O 分别介于 3.69%~3.93% 和 4.09%~4.51% (表 3)。在哈克图解中 (图 6), 神林花岗岩样品的 MgO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 和 P_2O_5 投点趋势整体上为负相关关

系, CaO 投点总体上为发散趋势, Na_2O 和 K_2O 投点总体上为近水平趋势, 这些成份协变特征是斜长石及钾长石结晶分异难以解释的。

神林花岗岩的 $(Na_2O + K_2O)$ 介于 7.82%~8.27%, 在 SiO_2 — $(Na_2O + K_2O)$ 图解中, 样品点均落入花岗岩分类区内 (图 7a), 神林花岗岩样品属于高钾钙碱性系列岩石 (图 7b)。神林花岗岩的 A/CNK 和 A/NK 值范围分别为 0.99~1.03 和 1.17~1.25, 以准铝质—弱过铝质为主 (图 7c)。

3.2 微量元素

7 件神林花岗岩样品显示其富集大离子亲石元素, 它们的 Rb 和 Th 含量分别介于 189×10^{-6} ~ $241 \times$

表 3 东秦岭神林花岗岩的主要元素(%)、微量元素($\times 10^{-6}$)和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 3 Major (%), trace ($\times 10^{-6}$) and rear earth ($\times 10^{-6}$) elements compositions of the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt

样品编号	YHD201	YHD202	YHD203	YHD204	YHD205	YHD206	YHD207	样品编号	YHD201	YHD202	YHD203	YHD204	YHD205	YHD206	YHD207
岩性	斑状黑云母二长花岗岩							岩性	斑状黑云母二长花岗岩						
样品(E)	112°59'47"	113°00'06"	113°00'36"	112°59'57"	113°00'09"	113°00'17"	113°00'18"	样品(E)	112°59'47"	113°00'06"	113°00'36"	112°59'57"	113°00'09"	113°00'17"	113°00'18"
位置(N)	33°34'52"	33°35'00"	33°35'44"	33°35'22"	33°34'49"	33°34'28"	33°34'07"	位置(N)	33°34'52"	33°35'00"	33°35'44"	33°35'22"	33°34'49"	33°34'28"	33°34'07"
SiO ₂	73.19	73.46	76.00	75.41	74.60	75.16	75.56	Y	8.2	8.2	5.4	5.8	7.4	5.7	5.3
TiO ₂	0.19	0.19	0.09	0.11	0.17	0.10	0.11	Pb	44.5	43.7	48.0	54.0	51.5	41.2	37.7
Al ₂ O ₃	13.42	13.32	12.98	13.22	12.98	12.72	12.90	U	9.99	11.50	9.03	4.30	6.75	6.34	3.02
TFe ₂ O ₃	2.30	2.18	1.34	1.58	2.04	1.48	1.55	La	28.6	28.0	18.3	19.1	26.1	21.4	19.6
MnO	0.06	0.06	0.04	0.05	0.06	0.05	0.05	Ce	52.9	51.0	33.6	37.6	49.0	37.2	34.7
MgO	0.42	0.42	0.16	0.20	0.36	0.22	0.23	Pr	5.46	5.20	3.43	3.98	5.20	3.60	3.29
CaO	1.48	1.47	0.85	1.01	1.36	1.10	0.94	Nd	17.6	17.0	10.3	12.4	16.6	11.0	10.2
Na ₂ O	3.75	3.87	3.76	3.93	3.77	3.69	3.79	Sm	3.24	2.90	1.46	2.06	2.69	1.83	1.72
K ₂ O	4.22	4.09	4.51	4.20	4.05	4.40	4.36	Eu	0.59	0.55	0.27	0.39	0.54	0.30	0.31
P ₂ O ₅	0.15	0.13	0.05	0.05	0.13	0.10	0.10	Gd	1.87	1.95	1.22	1.35	1.68	1.16	1.08
烧失量	0.44	0.25	0.01	0.04	0.28	0.18	0.08	Tb	0.27	0.30	0.15	0.17	0.24	0.17	0.15
总量	99.62	99.44	99.79	99.80	99.80	99.20	99.67	Dy	1.50	1.40	0.80	0.90	1.27	0.92	0.85
Na ₂ O+K ₂ O	7.97	7.96	8.27	8.13	7.82	8.09	8.15	Hf	0.30	0.27	0.17	0.18	0.26	0.19	0.17
A/CNK	1.00	0.99	1.03	1.03	0.99	0.99	1.02	Er	0.82	0.78	0.47	0.54	0.72	0.61	0.51
A/NK	1.25	1.23	1.17	1.20	1.22	1.17	1.18	Tm	0.13	0.13	0.08	0.09	0.11	0.10	0.08
Li	42.3	45.7	36.3	45.1	56.2	27.6	32.0	Yb	0.87	0.91	0.70	0.68	0.83	0.74	0.61
Be	3.89	4.42	5.67	5.69	4.81	3.68	3.66	Lu	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.14	0.14
Ba	441	419	182.5	266	321	196	188	ΣREE	114	111	71.1	79.6	105	79.4	73.4
Rb	203	199	241	231	210	190	189	(La/Yb) _N	22.2	20.7	17.6	18.9	21.2	19.5	21.7
Th	20.4	21.2	23.6	21.5	22.2	25.2	19.6	δEu	0.67	0.67	0.60	0.67	0.72	0.59	0.65
Nb	16.8	17.1	19.3	17.4	17.1	16.8	13.8	Sm/Y	36.6	37.9	24.3	35.0	34.5	30.2	31.4
Ta	0.9	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	0.9	Nb/Ta	18.7	15.5	16.1	17.4	17.1	16.8	15.3
Sr	300	311	131	203	255	172	167	Zr/Hf	32.6	31.1	23.5	23.5	29.2	22.4	27.9
Zr	127	140	80	87	105	76	92	Th/U	2.04	1.84	2.61	5.00	3.29	3.97	6.47
Hf	3.9	4.5	3.4	3.7	3.6	3.4	3.3	t _z (°C)	763	770	732	737	749	724	741

注: (1) $A/NK = \frac{n(Al_2O_3)}{n(Na_2O) + n(K_2O)}$; $A/CNK = \frac{n(Al_2O_3)}{n(CaO) + n(Na_2O) + n(K_2O)}$ (参见邓晋福等, 2015); (2) δEu 计算公式为: $\delta Eu = \frac{2Eu_N}{Sm_N + Gd_N}; (3) t_z$ 为锆石饱和温度, 计算方法据 Watson and Harrison (1983), 公式为: $T_z/K = \frac{12900}{2.95 + 0.85M + \ln \frac{496000}{Zr_{me}/10^{-6}}}$, 其中 T 为绝对温度, 表中已换算为摄氏温度; M 为全岩 $\frac{n(Na) + n(K) + 2n(Ca)}{n(Al) \times n(Si)}$, 计算中令 $n(Si) + n(Al) + n(Fe) + n(Mg) + n(Ca) + n(Na) + n(K) + n(P) = 1$; Zr_{me} 为熔体中 Zr 含量, 用全岩 Zr 含量代替 (熊双才等, 2019)。

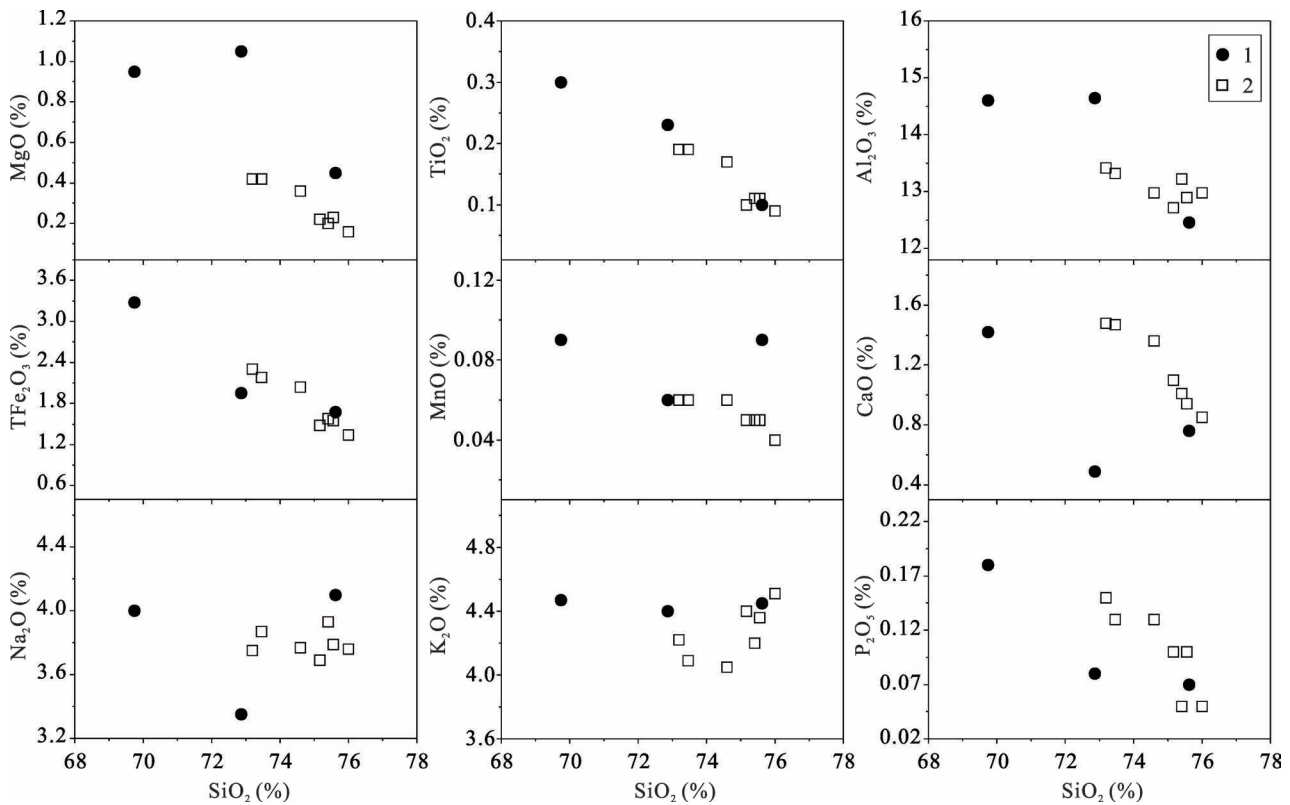


图 6 东秦岭神林花岗岩哈克图解(数据来源:1—河南省地质矿产厅区域地质调查队^③;2—本次研究)

Fig. 6 Harker diagrams of the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt (Data from: 1—the note^③; 2—this study)

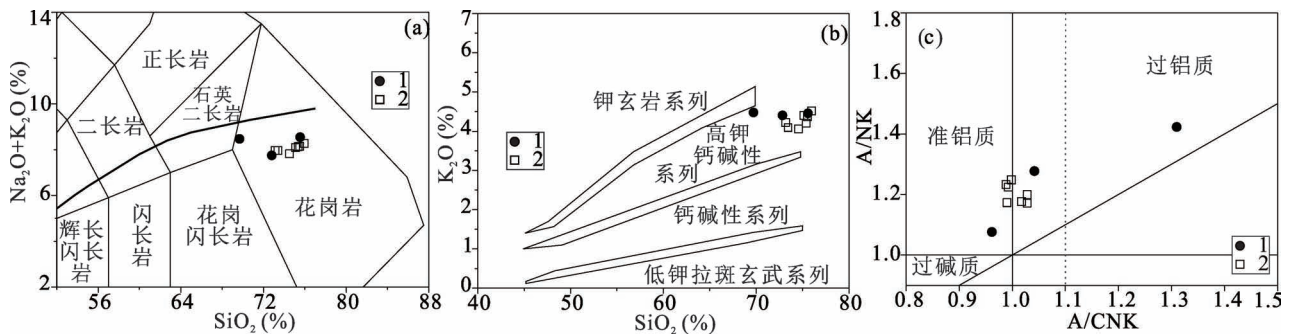


图 7 东秦岭神林花岗岩的 SiO_2 — $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解 (a) (底图据 Middlemost, 1989, 图中碱性及亚碱性系列界线据 Irvine and Baragar, 1971); SiO_2 — (K_2O) 图解 (b) (底图据 Rollison, 1993); A/CNK — A/NK 图解 (c) (底图据 Maniar 和 Piccoli, 1989)。

图例同图 6

Fig. 7 SiO_2 — $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ diagrams (a) (base map after Middlemost, 1989, and the boundary of alkaline and sub-alkaline from Irvine and Baragar, 1971); SiO_2 — K_2O diagram (b) (base map after Rollison, 1993) and A/CNK — A/NK diagram (c) (base map after Maniar and Piccoli, 1989) for the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt. The legends are the same to Fig. 6

10^{-6} 和 $19.6\times10^{-6}\sim25.2\times10^{-6}$ 。高场强元素 Nb、Ta、Zr 和 Hf 的含量依次为 $13.8\times10^{-6}\sim19.3\times10^{-6}$ 、 $0.9\times10^{-6}\sim1.2\times10^{-6}$ 、 $76\times10^{-6}\sim140\times10^{-6}$ 和 $3.3\times10^{-6}\sim4.5\times10^{-6}$ ，Nb/Ta 和 Zr/Hf 值分别介于 15.3~18.7 和 22.4~32.6。在微量元素蛛网图中(图 8a)，

神林花岗岩样品显示了明显的 Rb、Th 和 K 的异常峰及 Nb、Ta 和 Ti 的异常谷。

神林花岗岩 7 件样品的稀土总量介于 $71.1\times10^{-6}\sim114\times10^{-6}$ ， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值范围是 17.6~22.2， δEu 值介于 0.59~0.72。稀土配分模式具有右倾、

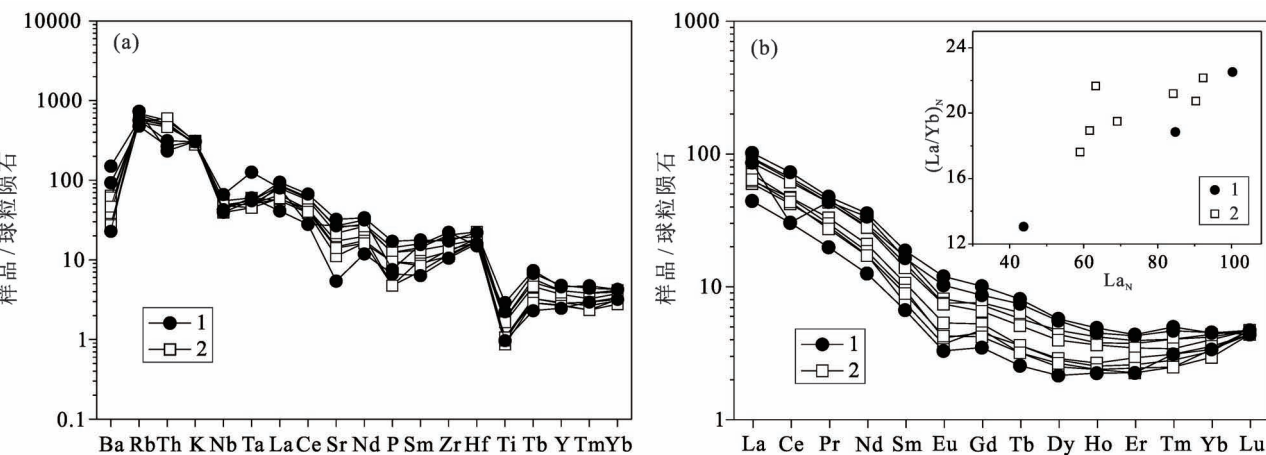


图 8 东秦岭神林花岗岩微量元素蛛网图(a) (球粒陨石标准化数据据 Thompson, 1982) 和稀土元素配分模式图(b) (球粒陨石标准化数据据 Boynton, 1984)。图例同图 6

Fig. 8 Diagrams of trace elements spider (a) (chondrite values from Thompson, 1982) and chondrite-normalized REE patterns (b) (chondrite values are from Boynton, 1984) for the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt. The legends are the same to those in Fig. 6

轻稀土富集及重稀土亏损的特征(图 8b)。此外,神林花岗岩样品的 $La_N-(La/Yb)_N$ 投点显示了线性正相关关系,表明是源区组成和部分熔融作用控制了神林花岗岩的成分变异,而非结晶分异作用。

神林花岗岩样品的 Sr 含量介于 $131\times10^{-6}\sim311\times10^{-6}$ 之间,Y 和 Yb 含量范围分别为 $5.3\times10^{-6}\sim8.2\times10^{-6}$ 和 $0.61\times10^{-6}\sim0.91\times10^{-6}$,Sr/Y 值介于 24.3~37.9,属于高铯低钇中酸性岩(adakite)(图 9)。

应用 Watson 和 Harrison(1983)的方法计算了神林花岗岩熔体的锆石饱和温度(表 3),介于 724~770℃,高于锆石 Ti 温度计的计算结果(510~720℃),这反应出神林花岗岩由熔体体系阶段到锆石晶出阶段正常的温度降低演化过程。

4 讨论

4.1 神林花岗岩的形成时代

神林花岗岩 LA-ICP-MS 定年样品 YHD01 为似斑状黑云母二长花岗岩,块状构造,具有似斑状和自形一半自形粒状结构,定年锆石 CL 图像发育岩浆振荡环带,27 颗锆石的 Th/U 值介于 0.31~0.60,它们的加权平均年龄为 130.6 ± 0.7 Ma,应是同岩浆锆石的结晶年龄,表明神林花岗岩形成于早白垩世。

伏牛山岩基的锆石 U-Pb 年龄值出现了~145 Ma、~131 Ma 和 ~115 Ma 3 个峰值(Gao Xinyu et al., 2014; 张昕等,2018),说明区域上存在一期约 131 Ma 岩浆作用。神林花岗岩西南出露交口岩基

和郭庄石英闪长岩,它们的锆石 U-Pb 年龄分别为 132~133 Ma(梁涛未发表数据)和 131.4 ± 1.4 Ma(卢仁等,2021)。神林岩体东南出露祖师顶岩基和黄山、吴沟、铜山和天目山等花岗岩,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄值介于 132.8~129.2 Ma(周红升等,2008;卢仁和梁涛,2020;梁涛和卢仁,2021)。

由此可见,神林花岗岩是早白垩世约 130 Ma 的酸性岩岩浆活动的产物,东秦岭南召—鲁山—方城地区发育与之时代相近的岩浆活动。

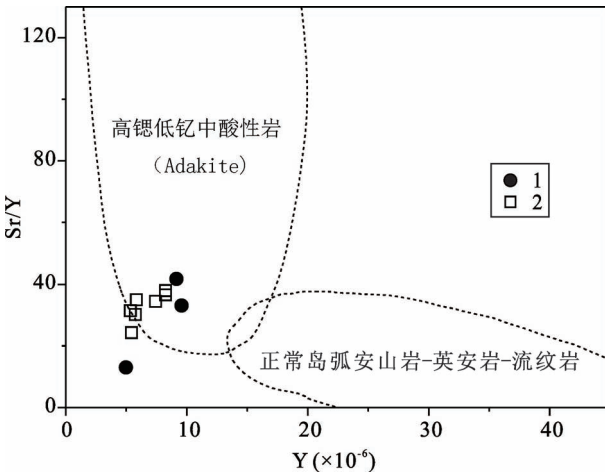


图 9 东秦岭神林花岗岩的 Y—Sr/Y 图例 (底图据 Defant et al., 2002)。图例同图 6

Fig. 9 Diagram of Y—Sr/Y for the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt (The base map is from Defant et al., 2002. The legends are the same to those in Fig. 6)

4.2 源区基本特征

神林花岗岩的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Sr 和 Yb 及 Y 的含量特征表明其为高锆低钇中酸性岩(表3和图9)。扬子板块与华北板块在印支末期完成了俯冲拼合,秦岭造山带的地质构造演化随之进入板内(陆内)阶段(卢欣祥,2000;张国伟等,2001),这说明神林花岗岩的形成与板块俯冲之间不具有成因联系。此外,神林花岗岩具有高 SiO_2 (73.19%~76.00%) 和低 MgO (0.16%~0.42%) 的特征(表3和图6),说明其不是玄武质岩浆经 AFC 演化或拆沉下地壳经部分熔融形成的。

高锆低钇中酸性岩部分熔融源区的深度是一个重要参数。基于高温高压岩石学实验结果的反演,一种观点认为它是在压力大于 1.5 GPa(深度大于 50 km)的条件下形成(如 Rapp et al., 1999; Xiong Xiaolin, 2006; Xiong Xiaolin et al., 2009),另外一种观点认为它的形成压力小于 1.5 GPa(深度小于 50 km,如 30~40 km; Qian Qing and Hermann, 2013; Ma Qiang et al., 2015)。这说明高锆低钇中酸性岩源区深度的估算(大于或者小于 50 km)需要参考区域构造演化证据进行限定。秦岭造山带是一个复合造山带,经历了多阶段俯冲碰撞造山过程,沿商丹(商南—丹凤)和勉略(勉县—略阳)带发生的向北陆—陆俯冲碰撞作用使得秦岭、华北和扬子板块于印支晚期最终拼合,之后到早白垩世未见有大规模岩浆活动(卢欣祥,2000;张国伟等,2001),这说明在约 131 Ma 之前秦岭造山带整体上保持有厚大的岩石圈。所以,我们认为神林花岗岩的部分熔融源区深度大于 50 km。

神林花岗岩显示了 Nb、Ta、Ti 亏损(图 8a),考虑到 Nb、Ta 在金红石/长英质熔体体系中的元素行为(Xiong Xiaolin, 2006)以及金红石本身也是富 Ti 矿物相,说明其部分熔融源区残余相包含金红石。在石榴子石/熔体体系中,轻、重稀土分馏程度以及钇含量主要受控于石榴子石,神林花岗岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值范围介于 17.6~22.2,且 Y 含量低(5.3×10^{-6} ~ 8.2×10^{-6}),这是部分熔融源区残余相包含石榴子石所致。神林花岗岩的稀土配分模式中也显示了明显的 Dy—Ho—Er“洼斗”(图 8b),这与华北克拉通南缘龙卧沟岩体的稀土配分模式相似(卢仁等,2014),表明其部分熔融源区残余相中的角闪石参与控制了神林花岗岩的 Dy、Ho 和 Er 含量。斜长石是主要的富 Al、Sr 及控制 Eu 含量的重要矿物,神林花岗岩的高 Al_2O_3 和 Sr 含量及无明显 Eu 异常,

这表明其部分熔融源区无或者仅存在少量的斜长石残留。

所以,神林花岗岩形成于加厚下地壳,其源区深度大于 50 km,部分熔融源区的残余相矿物包括石榴子石、金红石和角闪石,无或者少量的斜长石。

4.3 岩浆混合作用

稀土元素的分配系数受晶体/熔体体系的成分、温度、压力、氧逸度和离子半径等多种因素制约(Rollison, 1993),总体上而言,随着体系 SiO_2 含量的升高,或者是压力的升高,或者是温度的降低,稀土元素的分配系数增大。

神林花岗岩的锆石温度随其年龄呈现波动,总体上在 128~129 Ma 和 131~132 Ma 为两个拐点,即由早及晚,它经历了降低—升高—再降低的过程(图 5b),表明存在高温岩浆/流体的注入。另外一方面,神林花岗岩岩浆向上侵位是一个压力逐渐降低的过程,Yb 在锆石—熔体体系中的分配系数应是逐渐降低的,而实际情形却是降低—升高—降低的波动过程(图 5c),暗示了其它地质过程的存在。

在神林花岗岩锆石—熔体体系中,Yb 的分配系数在 128~129 Ma 和 131~132 Ma 两个温度拐点处的实际值与理论预计存在明显出入,低温拐点 131~132 Ma 处的 K_d^{Yb} 较小,高温拐点 128~129 Ma 处 K_d^{Yb} 反而出现极高值(图 5b、c)。锆石/花岗岩熔体体系中重稀土分配系数与锆石年龄之间的变化关系被认为是岩浆混合作用的结果(梁涛和卢仁,2017;卢仁和梁涛,2017,2020),这表明体系成分的改变(低 SiO_2 含量岩浆/流体注入)主导了神林花岗岩锆石—熔体体系中元素 Yb 的分配系数变化,这与其内暗色微粒包体具有相同的指向, $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值降低则说明注入的岩浆/流体具有低氧逸度,这表明神林花岗岩形成中经历了中(基)性岩浆/流体的注入与混合。

所以,高温、低 SiO_2 含量、低氧逸度的深部岩浆/流体是形成神林花岗岩的物质端元之一,它是经历了岩浆/流体混合活化作用的产物。

4.4 构造背景

在经历了复杂的俯冲碰撞造山作用之后,扬子与华北板块在印支末期拼接完成,夹持于二者之间的秦岭—大别造山带的构造演化进入了陆内阶段(卢欣祥,2000;张国伟等,2001),因深部岩石圈—软流圈系统汇聚作用的持续进行,区域构造演化步入陆内碰撞造山阶段及后续的岩石圈垮塌(拆沉)作用(邓晋福等,1996,2004,2007)。另外一方面,

经历复杂构造拼合形成的大陆板块具有复杂岩石学结构的厚大岩石圈,尤其是拼合部位的造山带,这会形成明显的重力不稳定异常区(罗照华等,2006,2007,2009,2014)。

东秦岭造山带内广泛出露陆(板)内造山背景下由岩石圈拆沉作用形成的早白垩世约 130 Ma 中酸性岩,崤山以龙卧沟(卢仁等,2014)、后河(卢仁等,2013;梁涛和卢仁,2017)和小妹河(梁涛和卢仁,2015)等酸性小岩体为代表,熊耳山以蒿坪沟(梁涛等,2015)和斑竹寺花岗岩斑岩(梁涛等,2014,2016)为代表,伏牛山余脉以天目山(卢仁和梁涛,2020)和铜山花岗岩(梁涛和卢仁,2021)为代表,北秦岭和桐柏山分别有烟镇花岗岩(梁涛和卢仁,2018)和三合店及鸡公山岩基(Zhang Jinyang et al., 2013;Zhang Wenxiang et al., 2018)。另外,北秦岭磨口基性脉岩的形成时代为早白垩世约 132 Ma,它们是岩石圈拆沉作用的产物(Liang Tao et al., 2020)。形成时代相近的它们应是东秦岭造山带同一期岩浆作用的产物,受控于相同的深部构造过程,神林花岗岩的形成与区域岩石圈拆沉作用相关。

神林花岗岩属于高铯低钇中酸性岩,其部分熔融源区深度大于 50 km,表明约 131 Ma 时神林地区地壳厚度也应不小于 50 km,现如今东秦岭莫霍面埋深约 35 km(周国藩,1992;袁学诚,1996),二者之间至少 15 km 的差距表明神林地区在早白垩世约 131 Ma 发生了岩石圈拆沉作用。在此岩石圈灾变过程中,深部岩浆/流体得以快速释放,它在上升途中注入到未完全固结岩浆/流体库内,这在锆石—熔体中重稀土元素的分配系数中得以记录(图 5),混合活化之后的岩浆/流体沿深大断裂上侵,在其次级断裂内的断裂交汇部位固结形成神林花岗岩。所以,神林花岗岩形成于东秦岭陆(板)内造山阶段,是约 131 Ma 区域岩石圈拆沉作用的岩浆响应。

5 结论

综上所述,获得以下结论:

(1) 神林花岗岩形成于早白垩世 130.6 Ma,它具有高硅富碱和贫镁低钙的特征,属于高钾钙碱性系列,以准铝质—弱过铝质为主。

(2) 神林花岗岩属于高铯低钇中酸性岩(adakite),成于加厚下地壳,其源区深度大于 50 km,部分熔融源区的残余相矿物包括石榴子石、金红石和角闪石,无或者少量的斜长石。

(3) 神林花岗岩的锆石稀土元素具有轻稀土亏

损、重稀土富集及 Ce 正异常的特征,神林花岗岩锆石—熔体体系重稀土元素分配系数随年龄的变化特征是深部岩浆/流体注入活化作用的显示。

(4) 神林花岗岩形成于东秦岭陆(板)内造山阶段,是早白垩世(约 131 Ma 前)区域岩石圈拆沉作用的产物。

注 释 / Notes

- ① 河南省地质矿产开发局第一地质调查队. 2005. 豫西南地区 1:250,000 地质图.
- ② 河南省地质调查院. 2003. 平顶山市幅 1:250,000 区域地质调查报告. 郑州:1~375.
- ③ 河南省地质矿产厅区域地质调查队. 1993. 神林幅 1:50,000 地质图说明书. 郑州:1~46.
- ④ 河南省地质矿产厅区域地质调查队. 1995. 张官营幅 1:50,000 地质图说明书. 郑州:1~40.

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 包志伟,王强,白国典,赵振华,宋要武,柳小明. 2008. 东秦岭方城新元古代碱性正长岩形成时代及其动力学意义. 科学通报, 53(6): 684~694.
- 邓晋福,罗照华,苏尚国,莫宣学,于炳松,赖兴运,谌宏伟. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京:地质出版社,1~149.
- 邓晋福,肖庆辉,苏尚国,刘翠,赵国春,吴宗絮,刘勇. 2007. 火成岩组合与构造环境:讨论. 高校地质学报, 13(3): 392~402.
- 邓晋福,赵海玲,莫宣学,吴宗絮,罗照华. 1996. 大陆根—柱构造—大陆动力学的钥匙. 北京:地质出版社,1~110.
- 邓晋福,刘翠,冯艳芳,肖庆辉,狄永军,苏尚国,赵国春,段培新,戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717~734.
- 段友强,张正伟,杨晓勇. 2015. 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. 岩石学报, 31(7): 1995~2008.
- 河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志. 北京:地质出版社:1~772.
- 李创举,包志伟. 2010. 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. 大地构造与成矿学, 34(3): 435~443.
- 梁涛,白凤军,罗照华,卢欣祥,卢仁,徐石头,成静亮. 2014. 豫西熊耳山斑竹寺花岗岩斑岩岩体锆石 U-Pb 定年及地质意义. 西北地质, 47(2): 41~50.
- 梁涛,卢仁. 2021. 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. 吉林大学学报(地球科学版), 51(2): 400~415.
- 梁涛,卢仁,刘小丽,李栋. 2021. 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. 中国地质, 48(2): 672~674.
- 梁涛,卢仁,罗照华,白凤军,刘晓. 2015. 豫西熊耳山蒿坪沟黑云母花岗岩斑岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义. 地质论评, 61(4): 901~912.
- 梁涛,卢仁. 2015. 豫西崤山小妹河岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义. 地质通报, 34(8): 1526~1540.
- 梁涛,卢仁. 2017. 豫西崤山后河岩体的地球化学及锆石稀土元素

特征. 现代地质, 31(4): 705~715.

梁涛, 卢仁, 罗照华, 刘晓. 2016. 豫西熊耳山斑竹寺岩体的地球化学特征及地质意义. 地质调查与研究, 39(1): 15~23.

梁涛, 卢仁. 2018. 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. 地质科学, 53(2): 615~637.

刘振宏, 王世炎, 张良, 杨长秀, 武太安, 崔霄峰. 2004. 华北陆块南缘燕山期陆内造山岩浆活动特征. 地质调查与研究, 27(1): 35~42.

卢仁, 梁涛, 卢欣祥, 白凤军, 成静亮, 温静静. 2014. 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. 中国地质, 41(3): 756~772.

卢仁, 梁涛, 卢欣祥, 白凤军. 2013. 豫西崤山后河岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. 地质调查与研究, 36(4): 263~270.

卢仁, 梁涛. 2017. 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. 地质论评, 63(6): 1479~1496.

卢仁, 梁涛. 2020. 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. 地质论评, 66(6): 1676~1694.

卢仁, 梁涛, 刘小丽. 2021. 华北克拉通南缘南召县郭庄岩体锆石 U-Pb 年龄年龄报道. 中国地质, 48(4): 1296 ~ 1297.

卢欣祥. 秦岭花岗岩大地构造图. 2000. 西安: 西安地图出版社: 1~33.

罗照华, 梁涛, 陈必河, 辛后田, 柯珊, 张自力, 程素华. 2007. 板内造山作用与成矿. 岩石学报, 23(8): 1945~1956.

罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 李明立, 梁涛, 黄凡, 杨宗锋. 2009. 透岩浆流体成矿作用导论. 北京: 地质出版社: 1~168.

罗照华, 魏阳, 辛后田, 柯珊, 李文韬, 李德东, 黄金香. 2006. 太行山中生代板内造山作用与华北大陆岩石圈巨大减薄. 地学前缘, 13(6): 52~63.

罗照华, 周久龙, 黑慧欣, 刘翠, 苏尚国. 2014. 超级喷发(超级侵入)后成矿作用. 岩石学报, 30(11): 3131~3154.

王金贵, 卢欣祥. 1988. 伏牛山花岗岩体的岩石学特征. 河南地质, 6(3): 35~40.

王志宏, 关保德, 王忠实, 裴放, 刘印环, 柴世钦, 刘振宏, 张保平, 刘品德, 贺国谦, 王世炎, 蒙胜华. 2000. 阶段性板块运动与板内增生——河南省 1:50 万地质图说明书. 北京: 中国环境科学出版社, 9~31.

向君峰, 赵海杰, 李永峰, 程彦博, 高亚龙, 侯可军, 董春艳, 李向前. 2010. 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. 岩石学报, 26(3): 871~887.

熊双才, 张征峰, 李广, 刘润泽, 华叙登, 赵富庄, 周鹏飞, 李关禄. 2019. 东准噶尔老爷庙地区碱性花岗岩锆石 U- Pb 定年、地球化学及其地质意义. 地质论评, 65(1): 221 ~ 231.

袁学诚. 1996. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型. 中国科学(D 辑), 26(3): 209~215.

张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社: 1~855.

张昕, 吴才来, 陈红杰, 王楠. 2018. 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. 岩石学报, 34(5): 1517~1538.

张正伟, 卢欣祥. 1990. 河南省伏牛山混合型花岗岩地球化学特征. 河南地质, 8(4): 358~364.

周国藩. 1992. 秦巴地区地球物理场特征与地壳构造格架关系的研究. 武汉: 中国地质大学出版社: 1~87.

周红升, 马昌前, 张超, 陈玲, 张金阳, 余振兵. 2008. 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. 岩石学报, 24(1): 49~64.

Ballard J R, Palin J M, Campbell I H. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircons: Application to porphyry copper-deposits of northern Chile. Contrib. Mineral. Petrol., 144: 347~364.

Bao Zhiwei, Wang Qiang, Bai Guodian, Zhao Zhenhua, Song Yaowu, Liu Xiaoming. 2008&. Geochronology and geochemistry of the Fangcheng Neoproterozoic alkali-syenites in East Qinling orogen and its geodynamic implications. Chinese Science Bulletin, 53(6): 684~694.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province. 1989#. Regional Geology of Henan Province. Beijing: Geological Publishing House: 1~772.

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P. ed. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier: 63~114.

Defant M J, Xu Jifeng, Kepezhinskas P, Wang Qiang, Zhang Qi, Xiao Long. 2002. Adakites: Some variations on a theme. Acta Petrologica Sinica, 18(2), 129~142.

Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, Mo Xuanxue, Yu Bingsong, Lai Xingyun, Chen Hongwei. 2004 #. Petrogenesis, Tectonic Environment and Metallogenesis. Beijing: Geological Publishing House: 1~149.

Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Liu Cui, Zhao Guochun, Wu Zongxu, Liu Yong. 2007&. Igneous petrotextonic assemblages and tectonic settings: A discussion. Geological Journal of China Universities, 13(3): 392~402.

Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, Wu Zongxu, Luo Zhaohua. 1996&. Continental Roots—plume Tectonics of China: Key to the Continental Dynamics. Beijing: Geological Publishing House: 1~110.

Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015&. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: Discussion and suggestion. Geological Review, 61(4): 717~734.

Duan Youqiang, Zhang Zhengwei, Yang Xiaoyong. 2015&. The continental dynamics of Zhangshiying pluton at the southern margin of the North China Craton: Evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. Acta Petrologica Sinica, 31(7): 1995~2008.

Ferry J M, Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. Contributions to Mineralogy and Petrology, 154: 429~437.

Gao Xinyu, Zhao Taiping, Chen Weiterry. 2014. Petrogenesis of the early Cretaceous Funiushan granites on the southern margin of the North China Craton: Implications for the Mesozoic geological evolution. Journal of Asian Earth Sciences, 94: 28~44.

Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Science, 8: 523~548.

Li Chuangju, Bao Zhiwei. 2010&. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of the Zhangshiying syenite from south of Wuyang, Henan Province. Geotectonica et Metallogenia, 34(3): 435~443.

Liang Tao, Lu Ren. 2021&. 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. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 51(2): 400~415.

- Liang Tao, Bai Fengjun, Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Lu Ren, Xu Shitou, Cheng Jingliang. 2014&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and its Geological implications of Banzhusi Granitic porphyry in Xiong'er shan of western Henan Province. *Northwestern Geology*, 47 (2): 41~50.
- Liang Tao, Li Longming, Lu Ren, Xiao Wenjiao. 2020. Early Cretaceous mafic dikes in the northern Qinling Orogenic Belt, central China: Implications for lithosphere delamination. *Journal of Asian Earth Sciences*, 194: 104142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104142>.
- Liang Tao, Lu Ren, Liu Xiaoli, Li Dong. 2021&. Report on the zircon U-Pb age (130.8 Ma) of Wugou granite in the Fangcheng County, southern margin of the North China Craton. *Geology in China*, 48 (2): 672~674.
- Liang Tao, Lu Ren, Luo Zhaohua, Bai Fengjun, Liu Xiao. 2015&. LA-ICP-MS U-Pb Age of zircons from Haopinggou biotite granite porphyry in Xiong'er Mountain, western Henan Province, and its geologic implications. *Geological Review*, 61(4): 901~912.
- Liang Tao, Lu Ren, Luo Zhaohua, Liu Xiao. 2016&. Geochemical features and geologic implications of Banzhusi granite porphyry body in Xiong'er Mountain, western Henan Province. *Geological Survey and Research*, 39(1): 15~23.
- Liang Tao, Lu Ren. 2015&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical features and geological implications of Xiaomeihe rock mass in Xiaoshan Mountain, western Henan Province. *Geological Bulletin of China*, 34(8): 1526~1540.
- Liang Tao, Lu Ren. 2017&. Geochemical characteristics and zircon rare earth elements of Houhe intrusive complex in Xiaoshan Mountain, western Henan Province. *Geoscience*, 31(4): 705~715.
- Liang Tao, Lu Ren. 2018&. Zircon U-Pb dating and geochemical features of Yanzhen granitic body in northern Qinling Mountains, and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geology*, 53(2): 615~637.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbin. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537~571.
- Liu Zhenhong, Wang Shiyuan, Zhang Liang, Yang Changxiu, Wu Tai'an, Cui Xiaofeng. 2004&. The Jurassic magmatism of intracratonic orogen in the southern margin of the North China Craton. *Geological Survey and Research*, 27(1): 35~42.
- Lu Ren, Liang Tao, Lu Xinxiang, Bai Fengjun, Cheng Jingliang, Wen Jingjing. 2014&. Geochronology and geochemical features of Longwogou granite in Xiaoshan Mountain, western Henan Province, and their geological implications. *Geology in China*, 41(3): 756~772.
- Lu Ren, Liang Tao, Lu Xinxiang, Bai Fengjun. 2013&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Houhe granite and its geologic implication in Xiao Mountain, western Henan Province. *Geological Survey and Research*, 36(4): 263~270.
- Lu Ren, Liang Tao. 2017&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical features of Gutouya granite in Xixia County, northern Qinling Mountains, and its geological implication. *Geological Review*, 63(6): 1479~1496.
- Lu Ren, Liang Tao. 2020&. Zircon rare earth elements and geochemical features of the Early Cretaceous Tianmushan A-type granite in the south margin of the North China Craton. *Geological Review*, 66 (6): 1676~1694.
- Lu Ren, Liang Tao, Liu Xiaoli. 2021&. The report on zircon U-Pb age of the Guozhong intrusive in the Nanzhao County, southern margin of the North China Craton. *Geology in China*, 48(4): 1296~1297.
- Lu Xinxiang. 2000#. *Granitoid Tectonic Map of Qinling Belt*. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House: 1~33.
- Ludwig K R. 2001. *Users Manual for Isoplot/Ex (rev 2.49)*: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication: 1~55.
- Luo Zhaohua, Liang Tao, Chen Bihe, Xin Houtian, Ke Shan, Zhang Zili, Cheng Suhua. 2007&. Intraplate orogenesis and its implications in metallogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (8): 1945~1956.
- Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Chen Bihe, Li Mingli, Liang Tao, Huang Fan, Yang Zongfeng. 2009&. Introduction to the metallogenic theory on the transmagmatic fluids. Beijing: Geological Publishing House, 1~168.
- Luo Zhaohua, Wei Yang, Xin Houtian, Ke Shan, Li Wentao, Li Dedong, Huang Jinxiang. 2006&. The Mesozoic intraplate orogeny of the Taihang Mountains and the thinning of the continental lithosphere in North China. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 52~63.
- Luo Zhaohua, Zhou Jiulong, Hei Huixin, Liu Cui, Su Shangguo. 2014&. Post-surpereruption (-superintrusion) metallogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3131~3154.
- Ma Qiang, Zheng Jianping Xu Yigang, Griffin W L, Zhang Ruisheng. 2015. Are continental "adakites" derived from thickened or foundered lower crust? *Earth and Planetary Science Letters*, 419: 125~133.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Middlemost E A K. 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77: 19~26.
- Qian Qing, Hermann J. 2013. Partial melting of lower crust at 10~15 kbar: Constraints on adakite and TTG formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165: 1195~1224.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335~356.
- Rollison H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. New York: Longman Scientific & Technical: 102~213.
- Thompson R N. 1982. Magmatism of the British tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology*, 18: 59~107.
- Wang Jingui, Lu Xinxiang. 1988&. Petrologic features of the Funiushan granite. *Henan Geology*, 6(3): 35~40.
- Wang Zhihong, Guan Baode, Wang Zhongshi, Pei Fang, Liu Yinhuan, Chai Shiqin, Liu Zhenhong, Zhang Baoping, Liu Pinde, He Guoqian, Wang Shiyuan, Meng Shenghua. 2000#. *Staggered Tectonic Movement and Intraplate Growth: Introduction to 1:500,000 Henan Province Geologic Map*, Beijing: China Environmental Science Press: 9~31.
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in a variety of crustal magmas types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295~304.
- Xiang Junfeng, Zhao Haijie, Li Yongfeng, Cheng Yanbo, Gao Yalong, Hou Kejun, Dong Chenyan, Li Xiangqian. 2010&. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 871~887.

Xiong Shuangcai, Zhang Zhengfeng, Li Guang, Liu Runze, Hua Xudeng, Zhao Fuzhuang, Zhou Pengfei, Li Guanlu. 2019#. Zircon U- Pb dating, geochemical characteristics of alkali- granites in Laoyemiao area, eastern Junggar, and geological significance. *Geological Review*, 65(1): 221 ~ 231.

Xiong Xiaolin, Keppler H, Audetat A, Gudfinnsson G, Sun Weidong, Song Maoshuang, Xiao Wansheng, Yuan Li. 2009. Experimental constraints on rutile saturation during partial melting of metabasalt at the amphibolite to eclogite transition, with applications to TTG genesis. *American Mineralogist*, 94: 1175~1186.

Xiong Xiaolin. 2006. Trace element characteristics of partial melts produced by melting of metabasalts at high pressures: Constraints on the formation condition of adakitic melts. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 49: 915~925.

Yuan Xuecheng. 1996#. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model. *Science in China (Serie D)*, 39(3): 235~244.

Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, Xiao Qinghui. 2001#. Qinling Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press: 1~855.

Zhang Jinyang, Ma Changqian, Li Jianwei, She Zhenbing, Zhang Chao. 2013. Geochronology and geochemistry of the Early Cretaceous Jigongshan and Qijianfeng batholiths in the Tongbai orogen, central China: Implications for lower crustal delamination. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 102: 1045~1067.

Zhang Wenxiang, Zhu Liuqin, Wang Hao, Wu Yuanbao. 2018. Generation of post-collisional normal calc-alkaline and adakitic granites in the Tongbai orogen, central China. *Lithos*, 296~299: 513~531.

Zhang Xin, Wu Cailai, Chen Hongjie, Wang Nan. 2018#. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopes analysis of granites from Funiu Mountain pluton in southern margin of the North Chin Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5): 1517~1538.

Zhang Zhengwei, Lu Xinxiang. 1990#. Geochemical characteristics of migmatitic and granitization-type granitoids in Funiushan, Henan, Chian. *Henan Geology*, 8(4): 358~364.

Zhou Guofan. 1992#. Research on Relationship Between Characteristics of Geophysical Field and Crustal Architecture and Deep Structure in the Qinling-Daba Mountains. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1~87.

Zhou Hongsheng, Ma Changqian, Zhang Chao, Chen Ling, Zhang Jinyang, She Zhenbing. 2008#. Yanshanian aluminous A-Type granitoids in the Chunshui of Biyang, south margin of North China Craton: Implications from petrology, geochronology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 49~64.

Zircon U-Pb age, geochemical features of the Shenlin granite, eastern Qinling Orogenic Belt, and its implications for tectonic settings

LIANG Tao^{1, 2)}, LU Ren^{1, 2)}, LIU Xiaoli^{1, 2)}

1) General Institute of Non-ferrous Metals Geological Exploration of Henan Province, Zhengzhou, 450052;

2) Key Laboratory of Deep Ore-prospecting technology Research for Non-ferrous Metals of Henan Province, Zhengzhou, 450052

Objectives: The Shenlin granite is located in the eastern Qinling Orogenic Belt, which emplaced in Yanshanian. The Shenlin granite provides us an opportunity to revealing the tectonic evolution history in the eastern Qinling Orogenic Belt during Yanshanian.

Methods: Based on detailed field observations of the Shenlin granite in the eastern Qinling Orogenic Belt, we have studied the petrology, geochemistry and chronology of the Shenlin granite. The petrogenesis and deep tectonic implications of the Shenlin granite was discussed.

Results: The zircon LA-ICP-MS U-Pb dating was used to constrain the formation age of the Shenlin granite. The 27 of 30 zircon spots of the Shenlin granite yield a $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ age of $130.6\pm0.7\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=2.1$). The Shenlin granite are characterized by higher in SiO_2 and alkali, and lower in MgO and CaO contents. The Shenlin granite belong to high-K calc-alkaline series in the $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$ diagram, and metaluminous to weakly peraluminous with A/CNK ratios of $0.99\sim1.03$. The Shenlin granite samples are enriched in large ion lithophile elements (e. g. , Rb, Th and K) and depleted in high field-strength elements (e. g. , Nb, Ta and Ti). In chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns, the Shenlin granite samples exhibit light rare earth element (LREE) enrichment and heavy rare earth element (HREE) depletion with δEu values of $0.59\sim0.72$. The linear trend of the Shenlin granite samples in $\text{La}_\text{N}\text{--}(\text{La/Yb})_\text{N}$ diagram has suggested that the compositional change is controlled mainly by source and degree of partial melting. The Shenlin granite samples are with high Sr, and low Y and Yb contents, with the Sr/Y ratios of $24.3\sim37.9$ that is indicative of adakite affinity. The Shenlin granite is originated from partial melting of the thickened lower crust with thickness $> 50\text{ km}$, and its residual

phases include garnet, rutile and amphibolite, and minor plagioclase. In chondrite-normalized REE patterns of zircons, the characteristics of LREE-depleted, HREE-enriched with Ce positive anomaly are shown, and the zircon formation temperatures are calculated from 624°C to 701°C. The variation of HREE partition coefficients with ages in the zircon/melts system of the Shenlin granite indicates that it has experienced injection, mixing and activation of the magma/fluids, which is consistent with mafic microgranular enclave in this intrusion. The activated magma/fluids system were intruded along the regional huge fault, and emplacement and consolidation formed the Shenlin granite took place at the fault intersection in the secondary faults.

Conclusions: The Early Cretaceous Shenlin granite belongs to adakite, which originated from partial melting of the thickened lower crust with a thickness of > 50 km. It was intruded during intracontinental (intraplate) orogenesis in the eastern Qinling Orogenic Belt, which was triggered by regional lithosphere delamination.

Keywords: Shenlin granite, U-Pb isotopic dating, REE of zircon, magma mixing; lithosphere delamination; eastern Qinling Orogenic Belt

Acknowledgements: This research is supported by National Nature Science Foundation (No. U1504405), and Science and Technology Key Project of Bureau of Land and Resources of Henan Province (Nos. 2016-08 and 2014-06)

First author: LIANG Tao, male, born in 1979, Ph. D. of mineralogy, petrology and economic geology, senior engineer, engaged in geological exploration and petrogenesis of granite; Email: liang20010212@126.com

Manuscript received on: 2020-10-22; Accepted on: 2021-05-31; Network published on: 2021-06-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 06. 051

Edited by: HUANG Daomao, LIU Zhiqiang