

·专题研究·

# 华北地块南缘熊耳山早中生代正长花岗岩

## ——SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学及意义

李厚民, 王登红, 王晓霞, 张长青, 李立兴

(中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

**摘要:**报道了华北地块南缘河南熊耳山寨凹正长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $217.7 \pm 3.6$  Ma, 为早中生代。该正长花岗岩在岩石化学上高碱和 Al, 贫 Mg、Fe, 在微量元素上明显亏损 Ba、Sr、P、Ti, 相对富集高场强元素 U、Th、Zr、Hf, 在稀土元素上具有明显的四组分效应。研究结果表明, 寨凹正长花岗岩与东秦岭北部富碱侵入岩、北秦岭褶皱带和南秦岭褶皱带早中生代花岗岩的地球化学特征有明显差异, 为高分异的 I 型花岗岩。其形成的构造环境与东秦岭地区其他早中生代侵入体相似, 为后碰撞或后造山。

**关键词:**正长花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄, 高分异 I 型花岗岩, 四组分效应, 华北陆块南缘

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>; P597<sup>+</sup>.3; P595 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2012)06-0771-12

## The Early Mesozoic syenogranite in Xiong'er Mountain area, southern margin of North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and its significance

LI Hou-min, WANG Deng-hong, WANG Xiao-xia, ZHANG Chang-qing and LI Li-xing

(MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

**Abstract:** This paper reports a syenogranite from Zhaiwa area in Xiong'er Mountain on the southern margin of North China Craton. The syenogranite yielded a SHRIMP zircon U-Pb age of  $217.7 \pm 3.6$  Ma and MSWD = 1.6, showing Mesozoic. The syenogranite is rich in alkaline and Al, but low in Mg and Fe. The trace elements are characterized by obvious depletion of Ba, Sr, P and Ti but relative enrichment of U, Th, Zr and Hf. The REE of Zhaiwa syenogranite has obvious tetrad effect. The geochemical features of the Zhaiwa syenogranite are different from those of the alkali-rich intrusive rocks in east Qinling and the early Mesozoic granitoids in north Qinling tectonic belt and south Qinling tectonic belt. The Zhaiwa syenogranite is a high-fractional I-type granite. The tectonic setting for the Zhaiwa syenogranite is a post-collision or post-orogenic tectonic setting.

**Key words:** syenogranite; SHRIMP zircon U-Pb dating; high-fractional I-type granite; REE tetrad effect; southern margin of North China Craton

秦岭造山带为复合型造山带, 经历了元古代、古生代和中生代造山作用。在秦岭造山带发育大量的侵入岩, 其中早中生代侵入岩主要发育于北秦岭褶皱带西部、商丹和勉略缝合带之间的南秦岭褶皱带,

收稿日期: 2012-07-02; 修订日期: 2012-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572060); 中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010633903); 国家科技支撑计划课题(2006BAB01A01); 《中国地质志》资助项目(1212010811033)

作者简介: 李厚民(1962-), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿床学研究与成矿区划工作, E-mail: lihoumin2002@163.com

这些早中生代侵入岩主要为 I 型或 I-A 过渡型花岗岩,其构造环境存在较大争议(Zhang *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2003; Wang Xiaoxia *et al.*, 2007; 张成立等, 2008)。在华北地块南缘,河南境内晋宁期碱性岩有 8 个岩体,产于栾川-确山-固始断裂带中,燕山期的碱性岩在嵩县龙头-乌烧沟、方城塔山-舞阳张世英等地有出露,而早中生代侵入岩鲜有报道和研究,仅在嵩县南部见印支期碱性杂岩(Rb-Sr 等时年龄为 226 Ma,曾广策, 1990),小秦岭老牛山杂岩体中有印支期侵入体(Ding *et al.*, 2011; 齐秋菊等, 2012)。笔者最近在华北克拉通南缘的河南熊耳山寨凹地区发现了早中生代正长花岗岩。本文将报道该正长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征,并结合区域研究成果,探讨其构造环境及地质意义。

## 1 地质背景

东秦岭地区在大地构造位置上自北而南分为华北地块南缘、北秦岭褶皱带、南秦岭褶皱带和扬子地块北缘 4 个大地构造单元(图 1a)。以三门峡-宝丰断裂为界,北侧为华北陆块,南侧至黑沟-栾川断裂

之间属华北陆块南缘,区域地层主要为太古宇太华群深变质建造和中、上元古界熊耳群中基性火山岩建造、栾川群和官道口群浅变质碎屑岩-碳酸盐建造;黑沟-栾川断裂与商南-丹凤断裂之间属北秦岭褶皱带,区域地层主要为中、上元古界宽坪群变质建造、二郎坪群火山岩-碎屑岩建造和秦岭群变质建造;商南-丹凤断裂和勉县-略阳断裂之间为南秦岭褶皱带,区域地层主要为志留系-泥盆系碎屑岩-碳酸盐建造,勉县-略阳断裂南侧为扬子陆块北缘,主要地层为震旦系碳酸盐建造。

华北地块和扬子地块在印支期发生碰撞造山,自此以后,东秦岭造山带的上述 4 个构造单元作为一个整体经历构造演化。南秦岭褶皱带印支期花岗岩最发育,形成东江口(高桥街、东江口、柞水、曹坪和沙河湾岩体)、五龙(西坝、华阳、五龙、老城、西岔河和胭脂坝岩体)和光头山(迷坝、新院、姜家坪、张家坝、光头山、留坝岩体)三大岩体群,它们呈无变形的不规则椭圆形大岩基出露于古生代浅变质地层中;北秦岭褶皱带印支期花岗岩以宝鸡岩体群构成的不规则大岩基为代表,它们侵入于前奥陶系古老变质岩系中;在扬子地块西北缘也有印支期花岗岩零星出露(张成立等, 2008; Qin *et al.*, 2010a, 2010b)。

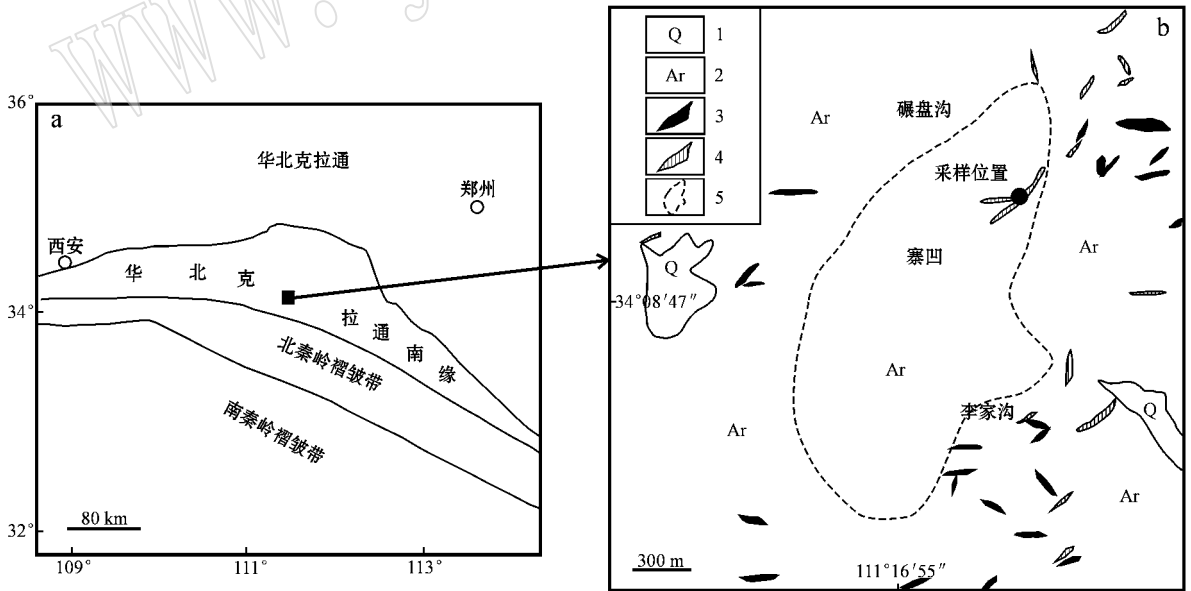


图 1 研究区构造位置(a)和河南熊耳山地区寨凹正长花岗岩地质图(b)(据邓小华等, 2008)

Fig. 1 Simplified geological map showing locality of the study area (a) and Zhaiwai syenogranite in Xiong'er Mountain, Henan Province (b) (after Deng Xiaohua *et al.*, 2008)

1—第四系; 2—太古宙太华群变质岩; 3—元古宙辉长辉绿岩脉; 4—正长花岗岩脉; 5—推断隐伏花岗岩体

1—Quaternary; 2—Archean Taihua Group metamorphic rocks; 3—Proterozoic basic dike; 4—syenogranite dike; 5—inferred concealed granite body

在南秦岭褶皱带的东江口岩体群和北秦岭褶皱带的宝鸡岩体群中还发育环斑结构花岗岩体(卢欣祥等, 1999; 王晓霞等, 2003, 2005), 主要沿商丹缝合带断续出露。南秦岭褶皱带有的大花岗岩基的周围和扬子陆块西北缘的小岩体则为埃达克质的花岗岩体(秦江峰等, 2005; 张宏飞等, 2007; 张成立等, 2008)。笔者近期发现的寨凹正长花岗岩分布在华北陆块南缘河南熊耳山地区(图 1a)。

## 2 正长花岗岩地质特征

熊耳山地区的正长花岗岩较发育, 呈岩脉产出, 岩脉长数十至数百米, 宽数米至数十米, 呈北东向集中成群分布, 单脉多呈北东向, 少量呈北西向、近南北向和近东西向。虽然地表呈岩脉状, 但据地球物理资料推断深部存在一中酸性侵入体(图 1b, 刘灵恩等, 2004; 邓小华等, 2008)。正长花岗岩脉的围岩为新太古界太华岩群的角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩。

正长花岗岩呈浅肉红色, 块状构造, 细晶结构, 局部呈似斑状结构, 斑晶为钾长石和斜长石, 也可见蠕虫状结构。主要组成矿物为钾长石、斜长石和石英。钾长石含量一般 40%~60%, 粒径 0.03~0.5 mm, 呈他形-半自形板条状、粒状, 较新鲜, 解理发育, 有时可见格子双晶; 斜长石含量 25%~40%, 粒径 0.1~0.5 mm, 呈半自形板条状, 发育聚片双晶, 可见斜长石板条呈花瓣状、扇状集合体产出, 斜长石有不同程度的绢云母化, 可见硅化交代, 石英含量 5%~20%, 粒径 0.02~0.08 mm, 呈他形-半自形粒状分布于钾长石和斜长石粒间间隙中, 多呈集合体, 可见有少量的黑云母, 但多被绿泥石交代。副矿物有磁铁矿、榍石、萤石、锆石等。晚期热液蚀变矿物有绿泥石、碳酸盐、绿帘石、石英、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、萤石等, 多以网脉或细脉产出。

岩石局部硅化很强, 有大量石英网脉穿插, 导致石英含量高达 40%~70%, 相应地钾长石减少为 20%~40%, 斜长石减少为 10%~20%。

## 3 分析方法

用于定年的正长花岗岩样品在廊坊河北省区调研究所实验室经重、磁方法分选出锆石, 然后在中国地质科学院北京离子探针中心制靶, 并进行了透射、

反射及阴极发光图像分析, 用以选取最理想的锆石颗粒进行分析测试。

锆石的 U、Th 和 Pb 同位素测试在北京离子探针中心 SHRIMP II 仪器上完成。应用标准锆石 TEMORA 对 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值进行校正, SL13(U 含量为  $238 \times 10^{-6}$ , 平均  $\text{Th}/\text{U} = 0.09$ ) 用于标定样品的 U、Th 含量, 数据处理采用 Ludwig SQUID 1.0 和 Isoplot 程序完成, 详细的实验原理和分析、数据处理流程参见宋彪等(2002)。应用实测 $^{204}\text{Pb}$  对锆石进行普通铅校正, 单点的分析误差为  $1\sigma$ , 结果采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄平均值, 置信度为 95%, 分析结果列于表 1。

主量元素、微量元素、稀土元素分析在国家地质实验测试中心完成。常量元素测试仪器为 X 荧光光谱仪(2100), 执行标准:  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  为 GB/T14506.28-1993,  $\text{H}_2\text{O}^+$  为 GB/T14506.1-1993, 烧失量 LOI 为 LY/T1253-1999。分析误差一般小于 0.01%。微量元素和稀土元素测试仪器为等离子质谱仪(X-series), 执行标准为 DZ/T0223-2001。该仪器对微量元素和稀土元素的检测下限为  $(0.1 \sim 1) \times 10^{-9}$ , 分析误差一般小于 10%。主量元素、微量元素、稀土元素分析结果见表 2。

## 4 正长花岗岩年龄

测试样品的采样位置如图 1b 所示。锆石多呈浅黄色、无色, 透明度良好, 金刚光泽。锆石晶形一般较完整, 呈自形-半自形晶, 主要为双锥柱状, 长为 100~200  $\mu\text{m}$ , 长宽比一般为 2:1。锆石阴极发光图像(图 2)显示, 锆石具有发育良好的振荡环带结构, 显示为岩浆锆石, 颗粒边部较亮, 核部普遍较暗, 但较暗的核部和较亮的边部的界线不十分清晰, 即暗色核部不具有继承锆石的特征。

在 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年中, 共分析了 14 个点, 结果列于表 1。这些点有的位于锆石边部浅色部分, 有的位于锆石核部深色部分(图 2)。除点 15.1 外, 其余锆石边部浅色部分和核部暗色部分的测定结果有较大差异: ① 边部 U 含量低( $121 \times 10^{-6} \sim 499 \times 10^{-6}$ ), 核部 U 含量高( $139 \times 10^{-6} \sim 3385 \times 10^{-6}$ ); ② 边部 Th 含量低( $40 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ ), 核部 Th 含量高( $53 \times 10^{-6} \sim 2951 \times 10^{-6}$ ); ③ 边部 Th/U 比值低(0.34~0.62), 核部 Th/U 比值高

表 1 河南熊耳山寨凹地区正长花岗岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定结果  
 Table 1 Results of SHRIMP zircon U-Pb dating for Zhaiwa syenogranite from Xiong'er Mountain area, Henan Province

点号	$w_B/\%$		$w_B/10^{-6}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		err corr	$t/\text{Ma}$		谐和度/%
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
1.1(边部)	1.18	273	113	8.59	0.43	0.43	0.0621	0.11	0.310	0.11	0.0362	0.031	0.280	229.4 ± 7.0	678 ± 230	66
2.1(核部)	2.48	986	906	30.3	0.95	0.95	0.0521	0.087	0.251	0.092	0.0349	0.029	0.316	221.4 ± 6.3	289 ± 200	23
3.1(边部)	1.99	121	40	3.87	0.34	0.34	0.0637	0.14	0.321	0.15	0.0365	0.037	0.258	230.9 ± 8.5	733 ± 300	69
4.1(核部)	1.22	490	360	14.6	0.76	0.76	0.0567	0.066	0.267	0.073	0.0341	0.030	0.415	216.5 ± 6.4	479 ± 150	55
5.1(边部)	4.19	128	45	4.15	0.36	0.36	0.067	0.22	0.335	0.23	0.0361	0.046	0.205	229 ± 10	846 ± 460	73
5.2(核部)	1.64	464	387	13.7	0.86	0.86	0.0497	0.096	0.232	0.10	0.03388	0.029	0.290	214.8 ± 6.2	179 ± 220	-20
6.1(核部)	4.52	139	53	4.05	0.39	0.39	0.056	0.27	0.250	0.27	0.0323	0.035	0.127	205.2 ± 7.0	453 ± 600	55
7.1(核部)	0.28	882	646	25.9	0.76	0.76	0.0552	0.051	0.260	0.058	0.03412	0.028	0.489	216.3 ± 6.0	419 ± 110	48
9.1(核部)	0.36	2100	1778	60.5	0.87	0.87	0.0509	0.023	0.2343	0.036	0.03341	0.028	0.779	211.9 ± 5.9	234 ± 53	10
12.1(核部)	1.82	3385	2951	104	0.90	0.90	0.0559	0.046	0.270	0.055	0.0350	0.030	0.539	221.8 ± 6.5	450 ± 100	51
14.1(核部)	2.90	464	339	13.1	0.75	0.75	0.060	0.23	0.264	0.23	0.03198	0.030	0.128	203.0 ± 5.9	602 ± 500	66
15.1(核部)	1.12	4513	608	185	0.14	0.14	0.0547	0.02	0.356	0.034	0.0471	0.028	0.815	297.0 ± 8.1	401 ± 44	26
16.1(核部)	0.19	1933	1592	58.7	0.85	0.85	0.0512	0.022	0.2490	0.035	0.03529	0.028	0.792	223.6 ± 6.1	249 ± 49	10
17.1(边部)	0.62	499	300	15.1	0.62	0.62	0.0639	0.055	0.309	0.063	0.0351	0.029	0.461	222.4 ± 6.3	737 ± 120	70

表 2 寨凹正长花岗岩主量元素( $w_B/\%$ )、微量元素和稀土元素( $w_B/10^{-6}$ )含量Table 2 Major ( $w_B/\%$ ), trace and rare earth ( $w_B/10^{-6}$ ) element data for Zhaiwai syenogranite from Xiong'er Mountain area, Henan Province

岩性	正长花岗斑岩						硅化正长花岗斑岩			
	ZWH-1	ZWH-2	ZWH-5	ZWH-6	ZWH-9	ZWH-11	ZWH-12	ZWH-14	ZWH-15	ZWH-16
样品编号										
SiO <sub>2</sub>	64.90	66.30	65.55	65.52	66.41	63.35	68.90	72.81	76.23	71.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.42	18.28	18.75	18.25	18.29	18.45	16.67	12.58	12.04	13.75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>f</sup>	0.12	0.09	0.03	0.08	0.08	0.28	0.08	0.30	0.06	0.38
CaO	1.00	0.76	0.82	0.74	0.45	1.51	0.44	1.21	0.89	0.99
MgO	0.01	0.05	0.02	0.05	0.06	0.30	0.06	0.05	0.19	0.03
K <sub>2</sub> O	9.54	8.00	9.43	8.84	11.19	10.95	9.53	8.70	7.93	8.34
Na <sub>2</sub> O	3.99	5.11	4.15	4.82	3.04	2.92	3.23	1.69	2.12	2.39
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MnO	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.20	0.12	0.14	0.12	0.14	0.32	0.14	0.50	0.20	0.60
LOI	1.06	0.84	0.98	0.99	0.70	1.49	0.69	1.21	0.34	1.15
总量	99.30	99.61	99.93	99.48	100.40	99.64	99.82	99.12	100.10	99.51
Y	23.40	42.20	29.50	37.40	56.80	37.30	36.00	37.90	43.70	44.30
Rb	528.00	379.00	537.00	439.00	701.00	653.00	502.00	627.00	581.00	643.00
Sr	37.50	55.10	45.10	38.70	38.80	41.20	33.60	22.50	20.50	25.30
Zr	112.00	129.00	112.00	132.00	112.00	122.00	110.00	117.00	118.00	118.00
Nb	22.00	28.00	24.00	21.90	18.50	22.90	31.60	39.40	33.90	36.50
Hf	6.37	7.14	6.30	7.13	6.06	6.24	6.04	6.82	6.73	6.91
Ta	4.59	4.84	5.49	4.98	3.85	4.86	5.83	5.54	5.34	5.06
Th	27.30	30.60	29.20	31.00	19.50	31.00	32.40	26.50	37.60	34.90
U	15.50	17.10	12.30	16.10	9.06	16.20	24.00	9.89	11.80	11.60
Cr	8.55	21.60	4.84	4.33	10.80	6.32	3.90	15.10	10.40	9.75
Co	1.91	1.09	1.21	2.02	0.94	2.08	2.56	2.11	0.72	1.10
Ni	2.50	11.10	3.49	3.22	4.73	2.99	2.95	5.44	6.28	4.71
Cu	284.00	107.00	70.70	250.00	195.00	640.00	170.00	10.40	7.35	18.10
Zn	3.89	2.19	2.43	23.20	5.55	7.62	5.29	6.37	2.94	8.54
Pb	8.01	5.20	5.76	4.98	6.64	8.10	6.15	8.61	6.37	11.10
Mo	497.00	276.00	30.40	7.44	55.30	48.90	63.20	1920.00	858.00	177.00
Ag	0.15	0.08	0.05	0.09	0.07	0.08	1.64	0.10	0.07	0.09
As	0.71	0.50	0.50	0.54	0.50	0.50	1.55	5.33	0.50	0.50
Sb	1.11	0.27	0.19	1.06	0.29	0.42	0.43	0.27	0.28	0.24
Bi	1.84	1.50	0.29	0.40	0.91	0.34	0.26	0.38	0.47	0.13
V	2.73	2.95	2.75	1.86	3.02	3.06	2.84	2.83	2.35	2.43
Ga	13.70	13.80	14.70	13.00	12.50	16.50	13.80	18.00	15.30	19.40
Sc	0.37	0.32	0.23	0.18	0.06	0.59	0.32	0.52	0.40	0.39
Ba	505.00	441.00	483.00	463.00	540.00	584.00	466.00	362.00	259.00	198.00
La	10.40	8.82	16.70	14.30	18.80	21.90	15.60	9.26	26.50	10.50
Ce	21.10	18.60	31.40	29.30	40.10	40.20	26.60	13.90	34.20	14.30
Pr	3.23	2.66	4.86	4.10	5.14	6.31	4.52	2.88	7.73	3.10
Nd	11.80	9.97	17.70	15.00	17.90	22.80	16.40	11.60	27.90	12.20
Sm	3.58	3.56	5.14	4.60	4.97	6.62	5.20	3.87	7.88	4.10
Eu	0.23	0.22	0.22	0.25	0.29	0.34	0.30	0.15	0.38	0.15
Gd	3.92	5.18	4.97	5.03	6.26	6.36	5.27	4.57	7.63	5.21
Tb	0.70	0.98	0.84	0.95	1.13	0.98	0.99	0.89	1.26	1.00
Dy	4.80	7.25	5.50	6.77	8.26	6.63	7.02	6.15	8.10	7.06
Ho	0.99	1.50	1.18	11.40	1.79	1.34	1.41	1.29	1.68	1.51
Er	2.98	4.88	3.70	4.41	5.77	4.63	4.56	4.24	5.29	4.84
Tm	0.54	0.87	0.63	0.71	0.97	0.80	0.80	0.75	0.92	0.84
Yb	4.02	6.34	5.01	5.49	7.49	6.46	5.77	5.77	7.15	6.46
Lu	0.62	0.96	0.74	0.81	1.07	0.99	0.82	0.86	1.02	0.96
Y	23.40	42.20	29.50	37.40	56.80	37.30	36.00	37.90	43.70	44.30
LREE	50.30	43.80	76.00	67.60	87.20	98.20	68.60	41.66	105.00	44.40
HREE	18.60	28.00	22.60	25.60	32.70	28.20	26.60	24.52	33.10	27.90
∑REE	68.90	71.80	98.60	93.10	120.00	126.00	95.30	66.18	138.00	72.20
δEu	0.19	0.16	0.13	0.16	0.16	0.16	0.17	0.11	0.15	0.10
δCe	0.85	0.89	0.81	0.89	0.94	0.79	0.74	0.63	0.56	0.58

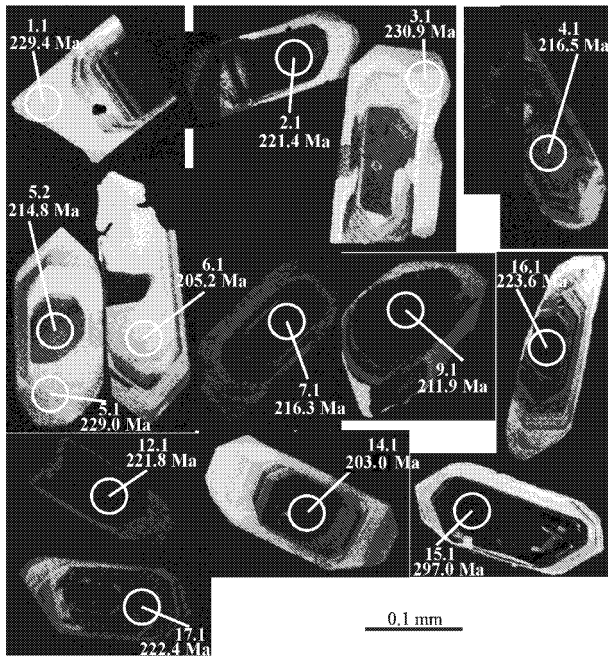


图 2 河南熊耳山寨凹地区正长花岗岩中锆石阴极发光图及测试点位置

Fig. 2 Representative CL images of zircons from Zhaiwa syenogranite in Xiong'er Mountain area, Henan Province

(0.39~0.95); ④ 边部 $^{206}\text{Pb}$ 含量低( $3.87 \times 10^{-6} \sim 15.1 \times 10^{-6}$ ),核部 $^{206}\text{Pb}$ 含量高( $4.05 \times 10^{-6} \sim 104 \times 10^{-6}$ ); ⑤ 边部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 高(0.0621~0.067),核部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 低(0.0497~0.060); ⑥ 边部 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 高(0.309~0.335),核部 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 低(0.232~0.27); ⑦ 边部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 高(0.0351~0.0365),核部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 低(0.03198~0.03529)。这些差异表明,在岩浆结晶分异形成锆石的过程中,岩浆的U、Th含量发生了突变,形成锆石核部的岩浆U、Th含量高,而形成锆石边部的岩浆U、Th含量低。U、Th含量变化的原因不详。除15.1数据点的年龄为297.0 Ma外,其余13个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $217.7 \pm 3.6$  Ma, MSWD=1.6(图3)表明为印支期。297.0 Ma的年龄与张正伟等(2003)双山碱性岩体的Rb-Sr等时线年龄298.05 Ma一致,也与磨沟碱性岩体的Rb-Sr等时线年龄318 Ma(张正伟等,2003)接近,可能是捕获了该期岩浆活动的锆石。

## 5 地球化学特征

寨凹正长花岗岩具高K、Al,贫Mg、Fe的特征, $\text{K}_2\text{O}=7.93\% \sim 11.19\%$ , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.57 \sim 5.15$ ,

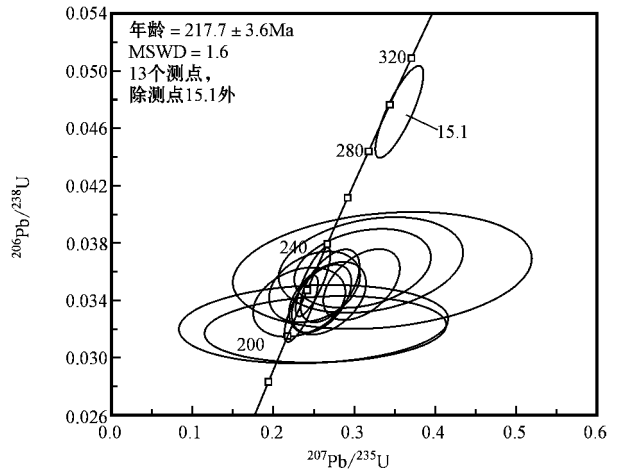


图 3 寨凹正长花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图  
Fig. 3 SHRIMP zircon U-Pb ages concordant diagram of Zhaiwa syenogranite

$\text{Al}_2\text{O}_3=12.04\% \sim 18.75\%$ , $\text{MgO}=0.01\% \sim 0.3\%$ , $\text{F}_2\text{O}_3^{\text{I}}=0.03\% \sim 0.38\%$ (表2)。该正长花岗岩为橄榄粗玄岩系列(图4a),富碱(图4b);在A/CNK-A/NK铝饱和指数图(图4c)上,样品点多落在过铝质和偏铝质界线附近,显示偏铝质到过铝质的特征。由于硅化作用的影响, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 的含量有随 $\text{SiO}_2$ 含量的增加而减少的趋势(图4d、4e、4f)。

在微量元素对原始地幔标准化模式图上(图5a),所有样品显示明显的Ba、Sr、P、Ti亏损和高场强元素U、Th、Zr、Hf的相对富集;Rb/Nb比值(13.5~37.9)明显高于大陆壳(2.2~4.7),暗示陆壳物质对成岩影响大,导致Rb的含量增加(Sylvester,1989);Nb/Ta比值为4.4~7.2,低于原始地幔( $17.5 \pm 2.0$ )(Green,1995)。

该正长花岗岩的 $\Sigma\text{REE}$ 总体含量低,为 $66.2 \times 10^{-6} \sim 138.0 \times 10^{-6}$ ,轻稀土元素富集不明显,LREE/HREE为1.58~3.48。在球粒陨石标准化模式图(图5b)上,具有十分明显的四组分效应,铕负异常十分明显 $2\text{Eu}_N/(Sm+Nd)_N$ 为0.10~0.19;有弱铈异常, $2\text{Ce}_N/(La+Pr)_N$ 为0.56~0.94。这些特点与张正伟等(2002,2003)报道的东秦岭北部富碱侵入岩高稀土总量、轻稀土强烈富集、弱负铈异常的特点不同。

## 6 讨论

### 6.1 寨凹正长花岗岩的时代及意义

东秦岭印支期岩浆活动在南秦岭褶皱带和北秦岭

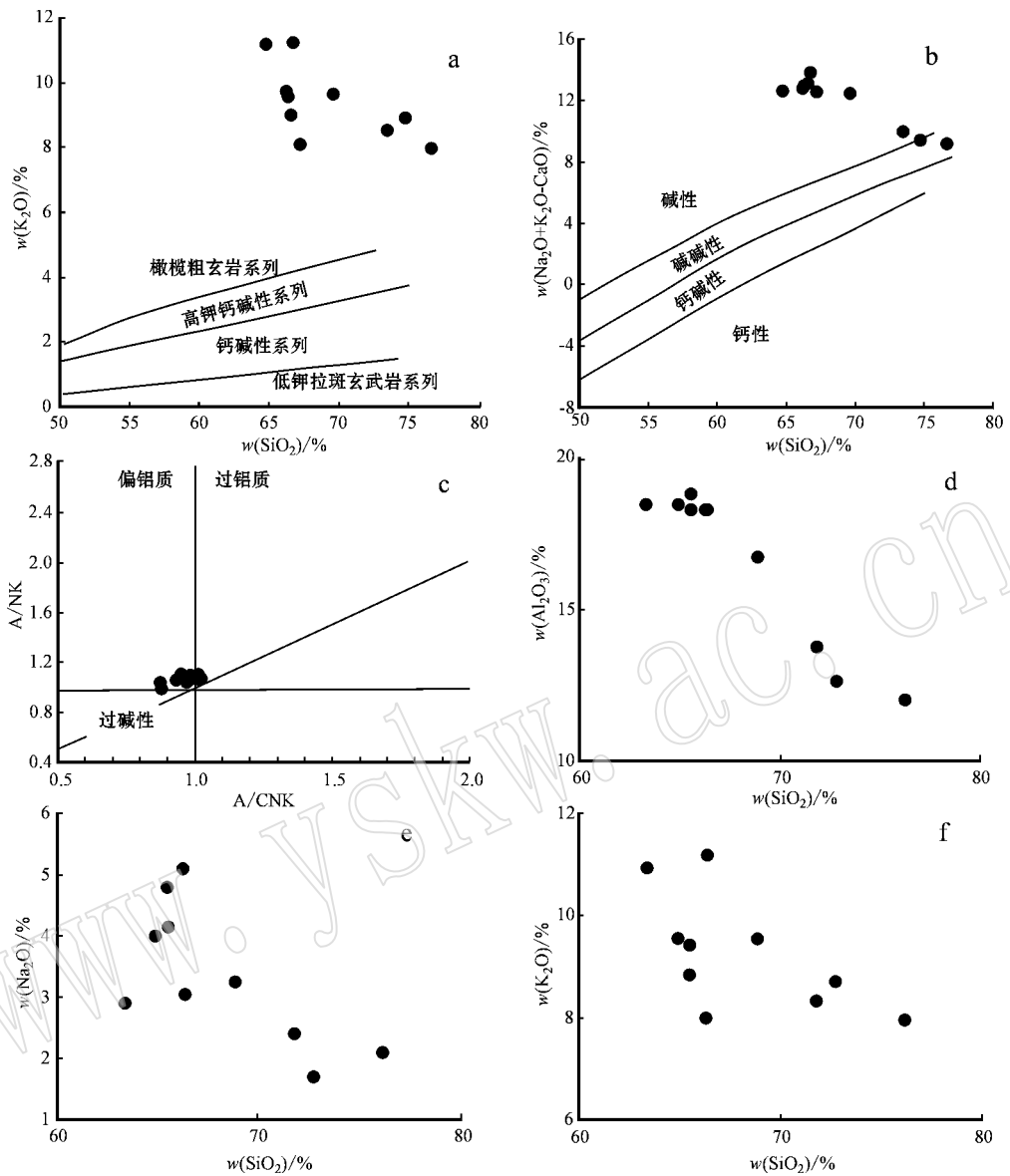


图 4 寨凹正长花岗岩主量元素地球化学图解

Fig. 4 Diagram of major elements in Zhaiwa syenogranite

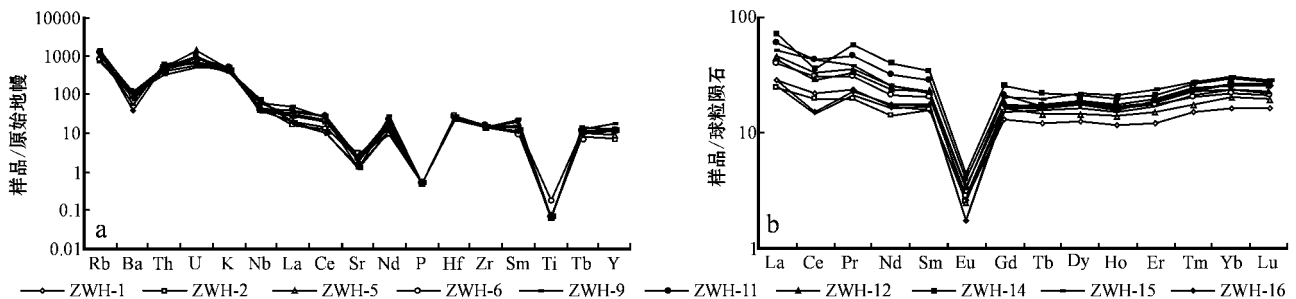


图 5 寨凹正长花岗岩原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (a) 和球粒陨石标准化的稀土元素模式 (b)

Fig. 5 Primitive mantle normalized trace elements spider patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Zhaiwa syenogranite

褶皱带发育最强烈,形成时间主要集中在 208~222 Ma(卢欣祥等,1999;张宗清等,1999,2007;胡健民等,2004;Wang Xiaoxia *et al.*,2007;Wang Fei *et al.*,2007;张成立等,2008;Qin *et al.*,2008,2010a,2010b)。但是,华北陆块南缘印支期侵入岩的报道较少,曾广策(1990)曾获得嵩县南部乌烧沟霓辉正长岩的 Rb-Sr 等时年龄为  $226 \pm 0.8$  Ma。近年来的年代学研究表明,很多 Rb-Sr 年龄不能代表岩体的形成年龄,华北陆块南缘是否有中生代花岗岩的问题一直没有解决。最近,Ding 等(2011)和齐秋菊等(2012)在小秦岭老牛山杂岩体中发现 214~228 Ma 的侵入体。

寨凹正长花岗岩中锆石为岩浆锆石,其 SHRIMP 测年显示,13 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $217.7 \pm 3.6$  Ma,测定位于锆石的边部/幔部及核部等不同部位,获得年龄几乎一致。由此,该年龄可以代表锆石结晶年龄,故解释为该岩体的成岩年龄。寨凹早中生代正长花岗岩的确定,进一步证明华北陆块南缘具有早中生代的岩浆活动。

## 6.2 寨凹正长花岗岩的成因类型及与东秦岭富碱侵入岩的对比

张正伟等(2002,2003)的研究结果显示,东秦岭华北陆块南缘有 3 个富碱侵入岩带:①分布在卢氏-嵩县-汝阳一带的北部霓辉正长岩亚带;②分布于栾川-嵩县-遂平一带的中部碱性花岗岩亚带;③分布于栾川-南召-方城一带的南部石英正长岩亚带。

寨凹正长花岗岩处于北部霓辉正长岩亚带中,

但与富碱侵入岩的特征有较大差异:寨凹正长花岗岩明显比其他富碱侵入岩贫 Fe、Mg、Ti,具有明显的 Ba、Sr、P、Ti 负异常和 U、Th、Hf 正异常,而其他富碱侵入岩除 Rb、Th 明显正异常外,Nb、Zr 具有明显负异常(张正伟等 2002,2003)。寨凹正长花岗岩稀土总量低,轻重稀土分馏不明显,强铈负异常,具有十分明显的“四组分”效应,而其他富碱侵入岩稀土总量高(达  $200 \times 10^{-6} \sim 1100 \times 10^{-6}$ ),轻稀土强烈富集(LREE/HREE 为 4~15),弱负铈异常( $\delta\text{Eu}$  为 0.27~1.39)(张正伟等,2002,2003)。

稀土元素特征具有明显四组分效应的花岗岩按照目前 A 型花岗岩的判别图解,其属于 A 型花岗岩,但是目前对这类花岗岩的成因还存在争议(Mo-neckke *et al.*,2007),因为其与岩浆结晶晚期熔体-流体的强烈相互作用有关(Bau,1996;Irber,1999;Jahn *et al.*,2001),即在晚期结晶时,元素的行为已发生了很大变化,因此对它们成因类型的鉴定只能借助于其他标志(吴福元等,2007)。由于在寨凹正长花岗岩的岩石薄片中没有鉴定出碱性暗色矿物,因此,其可能不是碱性岩。从图 6 和稀土元素的四组分效应(图 5b)看可能是高分异的 I 型花岗岩。这类花岗岩在华北陆块南缘的报道不多,同时地球物理显示深部可能还有岩体(图 1,刘灵恩等,2004;邓小华等,2008)。

## 6.3 寨凹正长花岗岩与东秦岭其他早中生代花岗岩的对比

寨凹正长花岗岩与东秦岭其他同期花岗岩有明

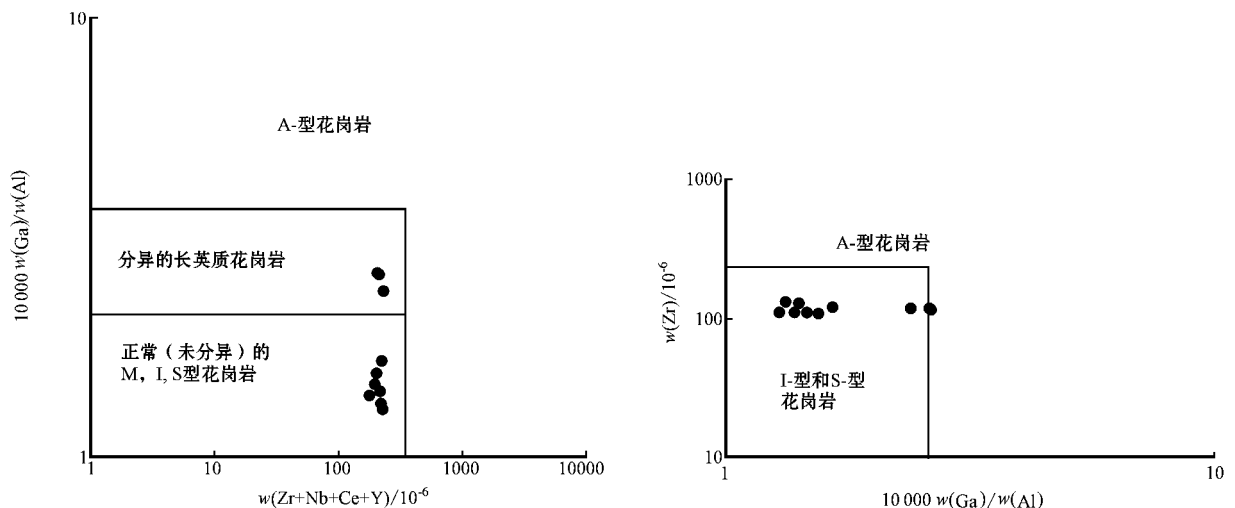


图 6 寨凹正长花岗岩的  $10000\text{Ga}/\text{Al} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  图解和  $\text{Zr} - 10000\text{Ga}/\text{Al}$  图解

Fig. 6  $10000\text{Ga}/\text{Al} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  diagram and  $\text{Zr} - 10000\text{Ga}/\text{Al}$  diagram of Zhaiwa syenogranite



显差异：华北克拉通南缘小秦岭地区老牛山杂岩体、南秦岭褶皱带东江口岩体群和五龙岩体群、扬子陆块北缘阳坝岩体中的早中生代侵入体主要为花岗闪长岩和二长花岗岩，以及具环斑结构的石英二长岩和二长花岗岩，富集大离子亲石元素，亏损高场强元素，轻稀土明显富集，不明显的钕负异常（张成立等，2008；Qin *et al.*，2008，2010a，2010b；Ding *et al.*，2011；齐秋菊等，2012）；而寨凹正长花岗岩则为石英正长花岗岩和正长花岗岩斑岩，高场强元素 U、Th、Zr、Hf 相对富集，亏损 Sr、Ba 等大离子亲石元素，轻重稀土分馏不明显，具有非常明显的钕负异常和四组分效应。造成这些差异的原因可能与它们的源区特征和所处的构造单元不同有关。

#### 6.4 寨凹正长花岗岩的构造环境

目前的研究结果显示，东秦岭印支期花岗岩主要形成于后碰撞环境，其中埃达克质花岗岩形成较

早，与后碰撞早期环境的地壳增厚紧密相关，其后产生的大量正常花岗岩类主要形成于后碰撞阶段拆沉作用发生的伸展阶段，最终侵位的高分异富钾花岗岩、环斑花岗岩以及同时代的煌斑岩标志着秦岭已进入后碰撞晚期阶段（雷泓晏等，2003；王晓霞等，2003；Wang Xiaoxia *et al.*，2007；张成立等，2008）。

寨凹正长花岗岩的成岩时代与东秦岭其他早中生代花岗岩基本同时。这时华北陆块南缘与北秦岭褶皱带、南秦岭褶皱带等已经连在了一起，作为一个整体经历构造演化。因此，寨凹正长花岗岩也应是后碰撞或后造山的产物，其地球化学特征显示具有后碰撞或后造山的环境特征（图 7）。所不同的是，华北陆块南缘离拼合带商丹断裂比南秦岭褶皱带和北秦岭褶皱带更远，地壳厚度更大，岩浆活动更弱，岩浆的碱性更强。在 Rb-Y+Nb 图解（图 7a）上，样

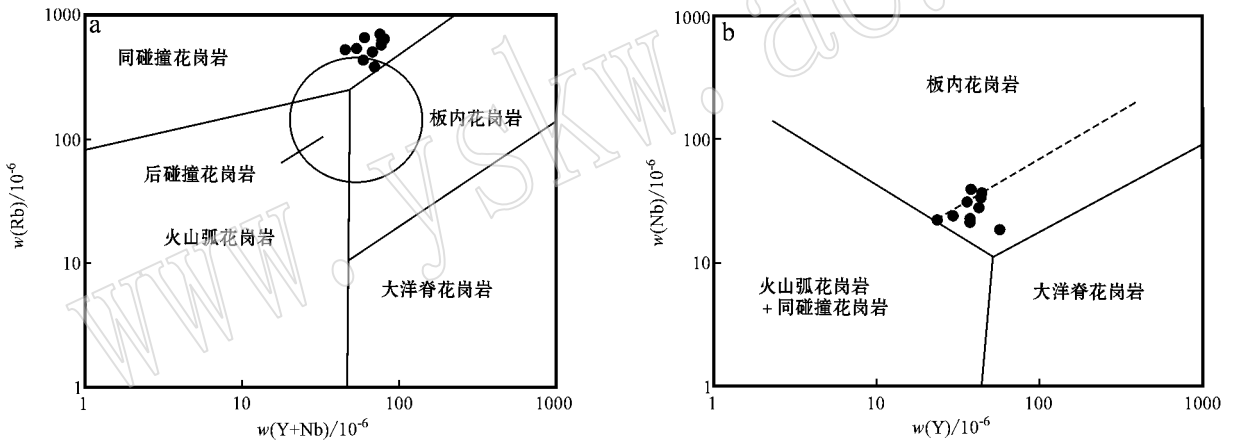


图 7 寨凹正长花岗岩的 Rb-Y+Nb 图解和 Nb-Y 图解

Fig. 7 Rb-Y+Nb diagram and Nb-Y diagram of Zhaiwu syenogranite

品点落在同碰撞花岗岩与后碰撞花岗岩界线附近，多位于同碰撞花岗岩一侧；在 Nb-Y 图解（图 7b）上，样品点落在板内花岗岩一侧。

#### 6.5 华北克拉通南缘印支期岩浆活动的成矿前景

稀土元素特征具有明显四组分效应的侵入岩经常与区内大规模成矿作用关系密切（吴福元等，2007）。但是，东秦岭地区目前识别出的成矿事件主要发生于 200 Ma 以后的燕山期，印支期成矿仅在小秦岭地区大湖金（钼）矿床（李厚民等，2007）和黄龙铺钼矿床（黄典豪等，1994）有显示。也没有与富碱侵入岩（张正伟等，2003）有关的成矿作用。寨凹正长花岗岩所在的熊耳山地区，目前发现的上宫和祁雨沟等金矿床、雷门沟等钼矿床、沙沟和铁炉坪等银

铅锌矿床都是燕山期产物，雷门沟钼矿床 Re-Os 年龄为 132.4 Ma（李永峰等，2006），沙沟银铅锌矿床 Ar-Ar 年龄为 145.2、147.6 Ma（毛景文等，2006），祁雨沟金矿床 Ar-Ar 年龄为 114.3~125.1 Ma（王义天等，2001）。因此，今后该区应关注与印支期正长花岗岩岩浆活动有关的成矿作用的研究和找矿，因为寨凹正长花岗岩中可见明显的绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、黄铜矿化等热液成矿蚀变，表 2 中有的样品 Mo 含量达到钼矿化的程度，地球物理推测深部存在隐伏中酸性岩体。事实上，地勘单位正在该区开展铜矿找矿工作，杨群周等（2003）根据蚀变、化探和物探资料，认为该区存在寻找隐伏斑岩铜矿的找矿前提。刘灵恩等（2004）总结了寨凹地区的地质背景、

寨凹隐伏岩体的地球物理特征和成矿特征,探讨了寨凹隐伏岩体对区内银多金属矿的控矿作用,建立了成矿模式并指出了找矿方向。因此,寨凹正长花岗岩的研究将对该区的找矿实践提供理论指导。

## 7 结论

(1) 华北陆块南缘具早中生代岩浆侵入,岩石类型为正长花岗岩类,SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $217.7 \pm 3.6$  Ma。

(2) 寨凹正长花岗岩为高分异的 I 型花岗岩,稀土元素具有明显的四组分效应,具有高钾和铝、富碱的岩石化学特征和 Ba、Sr、P、Ti 负异常、高场强元素 U、Th、Zr、Hf 的相对富集的微量元素地球化学特征,与秦岭地区早中生代花岗岩的地球化学特征不同,但形成环境相似。

(3) 该类花岗岩的地球化学特征和区域综合研究显示,其可能隐含着潜在的成矿信息,应引起关注。

致谢 野外工作得到河南有色金属地质矿产局郭保健博士的大力协助,室内测试得到北京离子探针中心 SHRIMP II 实验室、国家地质实验测试中心的积极帮助,在此表示衷心感谢!

## References

Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 323-333.

Deng Xiaohua, Chen Yanjing, Yao Junming, et al. 2008. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhaiwa Mo deposit, Luoning county, Henan Province [J]. *Geology in China*, 35(6): 1250-1266 (in Chinese with English abstract).

Ding Lixue, Ma Changqian, Li Jianwei, et al. 2011. Timing and genesis of the adakitic and shoshonitic intrusions in the Laoniushan complex, southern margin of the North China Craton: Implications for post-collisional magmatism associated with the Qinling Orogen [J]. *Lithos*, 126: 212-232.

Green. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust mantle system [J]. *Chem. Geol.*, 120: 347-359.

Huang Dianhao, Wu Chengyu, Du Andao, et al. 1994. Re-Os isotope

ages of molybdenum deposits in the East Qinlin and their significance [J]. *Mineral Deposits*, 13(3): 221-300 (in Chinese with English abstract).

Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 489-508.

Jahn B M, Wu Fuyuan, Capdevila R, et al. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an (Khangai) Mountains in NE China [J]. *Lithos*, 59: 171-198.

Lei Hongyan, Zhang Zhanwu, Zhao Xuanshe, et al. 2003. The genesis of the Laojunshan rapakivi granite in the north Qinling and the tectonic significance [J]. *Geology of Shaanxi*, 21(2): 49-56, 61 (in Chinese with English abstract).

Li Houmin, Ye Huishou, Mao Jingwen, et al. 2007. Re-Os dating of molybdenites from Au (Mo) deposits in Xiaolinling gold ore district and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 26(4): 417-424 (in Chinese with English abstract).

Li Yongfeng, Mao Jingwen, Liu Dunyi, et al. 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os datings for the Leimengou porphyry molybdenum deposit, western Henan and its geological implication [J]. *Geological Review*, 52(1): 122-131 (in Chinese with English abstract).

Liu Ling'en, Hu Guomin and Zhi Fengqi. 2004. Control of Zhaiwa concealed mass of rock on peripheral silver polymetallic deposits in west Henan [J]. *Mineral Resources and Geology*, 18(1): 31-34 (in Chinese with English abstract).

Lu Xinxiang, Wei Xiangdong, Xiao Qinghui, et al. 1999. Geochronological studies of rapakivi granites in Qinling and its geological implication [J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(4): 372-377 (in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Zheng Rongfen, Ye Huishou, et al. 2006.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of fuchsite and sericite from altered rocks close to ore veins in Shagou large-size Ag-Pb-Zn deposit of Xiong'er shan area, western Henan Province, and its significance [J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 359-368 (in Chinese with English abstract).

Monecke T, Dulski P and Kempe U. 2007. Origin of convex tetrads in rare earth element patterns of hydrothermally altered siliceous igneous rocks from the Zinnwald Sn-W deposit, Germany [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 335-353.

Qi Qiuju, Wang Xiaoxia, Ke Changhui, et al. 2012. Geochronology and origin of the Laoniushan complex in the southern margin of North China Block and their implications: New evidences from zircon dating, Hf isotopes and geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 279-301 (in Chinese with English abstract).

Qin Jiangfeng, Lai Shaochong and Li Yongfei. 2005. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area,

- Northern margin of Yangtze Plate [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 21 ( 3 ): 697~710 ( in Chinese with English abstract ).
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Diwu Chunrong, *et al.* 2010a. Magma mixing origin for the post-collisional adakitic monzogranite of the Triassic Yangba pluton, Northwestern margin of the South China block: geochemistry, Sr-Nd isotopic, zircon U-Pb dating and Hf isotopic evidences [ J ]. *Contrib Mineral Petrol.*, 159: 389~409.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Grapes Rodney, *et al.* 2010b. Origin of Late Triassic high-Mg adakitic granitoid rocks from the Dongjiangkou area, Qinling orogen, central China: Implications for subduction of continental crust [ J ]. *Lithos*, 120: 347~367.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Wang Juan, *et al.* 2008. Zircon LA-ICP MS U-Pb age, Sr-Nd-Pb isotopic compositions and geochemistry of the Triassic post-collisional Wulong adakitic granodiorite in the south Qinling, central China, and its petrogenesis [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 82( 2 ): 425~437.
- Song Biao, Zhang Yuhai and Liu Dunyi. 2002. Introduction to the naissance of SHRIMP and its contribution to isotope geology [ J ]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 23( 1 ): 58~62 ( in Chinese with English abstract ).
- Sun Weidong, Li Shuguang, Chen Y D, *et al.* 2003. Timing of Syn-orogenic Granitoids in the South Qinling, Central China. Constraints on the Evolution of the Qinling-Dabie Orogenic Belt [ J ]. *Journal of Geology*, 110: 457~468.
- Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites [ J ]. *J. Geol.*, 97: 261~280.
- Wang Fei, Lu Xinxiang and Lo Chinghua. 2007. Post-collisional, potassic monzonite-minette complex (Shahewan) in the Qinling Mountains (central China):  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology, petrogenesis, and implications for the dynamic setting of the Qinling orogen [ J ]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31: 153~166.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao and Jahn Bor-ming, *et al.* 2007. Tectonic significance of Triassic lamprophyres from north Qinling orogen [ J ]. *Geological Magazine*, 144( 4 ): 1~12.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Lu Xinxiang, *et al.* 2003. Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoids in North Qinling and their tectonic setting: A possible orogenic-type rapakivi granitoid [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 19( 4 ): 650~660 ( in Chinese with English abstract ).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Ilmari Hapala, *et al.* 2005. Genesis of mafic enclaves from rapakivi-textured granites in the Qinling and its petrological significance: evidence of elements and Nd, Sr isotopes [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 21( 3 ): 935~946 ( in Chinese with English abstract ).
- Wang Yitian, Mao Jingwen and Lu Xinxiang. 2001.  $^{40}\text{Ar}/^{30}\text{Ar}$  dating and geochronological constraints on the ore-forming epoch of the Qiyugou gold deposit in Songxian county, Henan province [ J ]. *Geological Review*, 47( 5 ): 551~555 ( in Chinese with English abstract ).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 23( 6 ): 1217~1238 ( in Chinese with English abstract ).
- Yang Qunzhou, Zhang Luxing, Peng Shenglin, *et al.* 2003. Geochemical characteristics and prospecting direction of Zhaiao region, western Henan [ J ]. *Mineral Resources and Geology*, 17( s ): 458~460 ( in Chinese with English abstract ).
- Zeng Guangce. 1990. Features of the syenitoid and tectonic environment in southern of Songxian, Henan province [ J ]. *Earth Science*, 15( 6 ): 635~641 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Chengli, Wang Tao and Wang Xiaoxia. 2008. Origin and tectonic setting of the early Mesozoic granitoids in Qinling orogenic belt [ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 14( 3 ): 304~316 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Hongfei, Xiao Long and Zhang Li. 2007. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of Indosinian granitoids from the Bikou block, northwest of the Yangtze plate: Constraints on petrogenesis, nature of deep crust and geodynamics [ J ]. *Science in China ( Series D ): Earth Sciences*, 50( 7 ): 972~983.
- Zhang Jing, Chen Yanjing, Shu Guiming, *et al.* 2002. Compositional study of minerals within the Qinlingliang granite, Southwestern Shaanxi Province and discussions on the related problems [ J ]. *Science in China ( Series D )*, 45: 662~672.
- Zhang Zhengwei, Zhu Bingquan and Chang Xiangyang. 2003. The geochemistry of the alkali-rich intrusive rocks in the east Qinling, central China [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 10( 4 ): 507~519 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Zhengwei, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, *et al.* 2002. Major element characteristics of the alkali-rich intrusive rocks zone and distribution of the subzones in the northern part of east Qinling, China [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 18( 4 ): 468~474 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei and Liu Dunyi. 2007. Geochronology and Geochemistry of Ophiolites, Granitoids and Clastic Rocks in Qinling Orogen [ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 176~302 ( in Chinese ).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan, *et al.* 1999. The age of the Shahewan rapakivi granite in Qinling and its restriction on the end of main orogeny of Qinling orogenic belt [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 44( 9 ): 981~983 ( in Chinese ).

## 附中文参考文献

- 邓小华, 陈衍景, 姚军明, 等. 2008. 河南省洛宁县寨凹钼矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 中国地质, 35(6): 1250~1266.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钨同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 13(3): 221~229.
- 雷泓晏, 张占武, 赵选社, 等. 2003. 北秦岭老君山环斑花岗岩的成因及大地构造意义[J]. 陕西地质, 21(2): 49~56, 61.
- 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 等. 2007. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钨定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 26(4): 417~424.
- 李永峰, 毛景文, 刘敦一, 等. 2006. 豫西雷门沟斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义[J]. 地质论评, 52(1): 122~131.
- 刘灵恩, 胡国民, 支凤歧. 2004. 豫西寨凹隐伏岩体对周边银多金属矿的控矿作用[J]. 矿产与地质, 18(1): 31~34.
- 卢欣祥, 尉向东, 肖庆辉, 等. 1999. 秦岭环斑花岗岩的年代学研究及其意义[J]. 高校地质学报, 5(4): 372~377.
- 毛景文, 郑榕芬, 叶会寿, 等. 2006. 豫西熊耳山地区沙沟银铅锌矿床成矿的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 25(4): 359~368.
- 齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 2012. 华北地块南缘老牛山杂岩时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据[J]. 岩石学报, 28(1): 279~301.
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞. 2005. 扬子板块北缘碧口地区阳坝花岗闪长岩体成因研究及其地质意义[J]. 岩石学报, 21(3): 697~710.
- 宋彪, 张玉海, 刘敦一. 2002. 微量原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学[J]. 质谱学报, 23(1): 58~62.
- 王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 等. 2003. 北秦岭老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩及构造环境——一种可能的造山带型环斑花岗岩[J]. 岩石学报, 19(4): 650~660.
- 王晓霞, 王涛, Ilmari Hapala, 等. 2005. 秦岭环斑结构花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因及岩石学意义—元素和 Nd, Sr 同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 21(3): 935~946.
- 王义天, 毛景文, 卢欣祥. 2001. 嵩县祁雨沟金矿成矿时代的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年代学证据[J]. 地质论评, 47(5): 551~555.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217~1238.
- 杨群周, 张录星, 彭省临, 等. 2003. 豫西寨凹地区地球化学特征及找矿方向[J]. 矿产与地质, 17(增刊): 458~460.
- 曾广策. 1990. 河南省嵩县南部碱性正长岩类的岩石特征及构造环境[J]. 地球科学, 15(6): 635~641.
- 张成立, 王涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. 高校地质学报, 14(3): 304~316.
- 张宏飞, 肖龙, 张利. 2007. 扬子陆块西北缘碧口块体早中生代花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成: 限制岩石成因及其动力学背景[J]. 中国科学(D 辑), 37(4): 460~470.
- 张正伟, 朱炳泉, 常向阳. 2003. 东秦岭北部富碱侵入岩带岩石地球化学特征及构造意义[J]. 地学前缘, 10(4): 507~519.
- 张正伟, 朱炳泉, 常向阳, 等. 2002. 东秦岭北部富碱侵入岩岩石化学与分布特征[J]. 岩石学报, 18(4): 468~474.
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一. 2007. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 176~302.
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 1999. 秦岭沙河湾奥长环斑花岗岩的年龄及其对秦岭造山带主造期结束时间的限制[J]. 科学通报, 44(9): 981~983.