

北大别山牢山寨岩体地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

唐相伟, 王 云, 郭跃闪, 熊平良, 刘 沛

(河南省地质矿产勘查开发局 第三地质矿产调查院, 河南 信阳 464000)

摘 要: 对北大别山牢山寨岩体进行了锆石 U-Pb 定年、岩石全岩主量和微量元素分析, 发现牢山寨岩体二长花岗岩在化学成分上具超酸、富碱、过铝质等特点, 属超酸性富碱高钾钙碱性系列; 大离子亲石元素 Rb、K 富集, 高场强元素 Hf、Th、U 与轻稀土元素明显富集, 重稀土元素亏损, 具中等负 Eu 异常等特征, 稀土元素配分曲线为左高右平缓的轻稀土元素富集型。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试得到岩体 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $133 \pm 2 \text{ Ma}$ ($n = 21$, $\text{MSWD} = 3.1$), 代表牢山寨岩体的侵位年龄, 表明其为早白垩世的岩浆活动产物。推测其形成机制为: 在秦岭-大别造山带中生代构造体制转换及其后伸展机制下, 下地壳尚未发生拆沉, 含斜长石 + 辉石 + 角闪石 + 石榴石的高压麻粒岩下地壳部分熔融, 沿深断裂向上运移, 在地壳浅部固结成岩形成牢山寨岩体。

关键词: 地球化学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 后碰撞花岗岩; 牢山寨岩体

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0691-12

Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Laoshanzhai rock mass in North Dabie Mountain

TANG Xiang-wei, WANG Yun, GUO Yue-shan, XIONG Ping-liang and LIU Pei
(Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan Geological Bureau, Xinyang 464000, China)

Abstract: On the basis of zircon U-Pb dating and rock total analysis of Laoshanzhai rock mass, the authors hold that chemical components of Laoshanzhai rock mass have ultra-acid, alkali-rich and peraluminous characteristics, thus belonging to ultra-acid, alkali-rich and high-K calc-alkali series. The data indicate that Laoshanzhai rock mass is characterized by enrichment of LILE (Rb, K), HFSE (Hf, Th, U,) and LREE, and depletion of HREE, with moderate negative Eu anomaly. Rare earth element distribution curve is higher on the right side and flat on the left side, exhibiting light REE enrichment. Major trace elements show that magma of rock mass was mainly from lower crust source, and was probably mixed with a small amount of mantle materials. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating shows that $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age value of rock mass is $133 \pm 2 \text{ Ma}$ ($n = 21$, $\text{MSWD} = 3.1$), which represents the emplacement age of Laoshanzhai rock mass as the product of magmatic activities of Early Cretaceous period. Laoshanzhai rock mass was formed by tectonic regime transition and the extension mechanism of Qinling-Dabie orogenic belt in Mesozoic, during which the lower crust had not yet been delaminated, the lower crust of high pressure granulite that contained plagioclase, pyroxene, hornblende and garnet was subjected to partial melting, and experienced upward migration along deep faults, then experienced consolidation diagenesis in the shallow crust.

Key words: geochemistry; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; post-collision granite; Laoshanzhai rock mass

Fund support: Geological Research Project of Two Power Price in Henan Province

收稿日期: 2016-12-30; 接受日期: 2017-08-11

基金项目: 河南省两权价款地质科研项目(豫国土资函[2015]258号)

作者简介: 唐相伟(1982-), 男, 工程师, 主要从事地质矿产调查评价, E-mail: 48901860@qq.com。

秦岭-大别造山带位于中国中部,是一个经历了多阶段构造演化的复杂的大陆碰撞造山带(杨泽强, 2007; 续海金等, 2008), 历经中元古代-古生代的多大陆缘裂解、增生和碰撞, 三叠纪的华北与扬子大陆板块之间对接, 三叠纪-侏罗纪的地壳缩短(拆离、推覆、A型俯冲), 东段大别造山带的超高压变质作用, 以及随后的强烈伸展塌陷和岩石圈拆离(高山等, 1999; 罗照华等, 2006), 中生代期间岩浆活动特别强烈。位于北大别山北麓的牢山寨岩体属该期间的岩浆活动产物(李明立, 2009)。

近年来在牢山寨岩体附近相继发现了王湾、左吊桥中小型钼矿床及薄刀岭中型银矿床。河南省2010年度地质勘查基金项目在牢山寨岩体内外接触带共发现5条钨矿体和10余层钼矿体, 但前人的研究主要集中在矿床学方面(据河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院, 2013)^①, 缺乏与矿床相关的岩体成因、成岩成矿机制等研究。本文在详细的野外地质工作和岩相学观察的基础上, 对牢山寨岩体地球化学特征进行了研究, 厘定了成岩时代, 初步探讨了岩体成因与构造环境, 这对于深入认识区域成矿时空结构规律和成岩-成矿的关联机制以及指导该区找矿和成矿潜力评价具有重要意义。

1 区域地质背景

大别造山带为秦岭造山带的东延部分, 带内以龟山-梅山断裂为界, 其北侧属北秦岭弧盆系, 南侧属南秦岭陆棚-陆坡带和桐柏-大别高压-超高压变质杂岩带(杨泽强等, 2008; 李法岭, 2011)。牢山寨岩体位于南秦岭陆棚-陆坡带中部(图1)。

区域出露的前侏罗纪岩石地层单元以龟(山)-梅(山)断裂为界, 北侧属北秦岭地层区, 主要出露岩层有: 下元古界秦岭岩群($P_{t_1}Q$), 岩性主要以长英质糜棱岩(绢云石英片岩、绿泥斜长片岩)、构造片岩(大白云母片石英片岩)为主, 夹角闪质糜棱岩; 下古生界寒武系二郎坪群, 主要由绿帘角闪岩相的变海相火山岩、火山碎屑沉积岩夹碳酸盐岩组成; 石炭系上统胡油坊组(C_2h), 岩性主要以粉砂岩为主, 夹暗色泥岩、细砂岩、钙质泥质或泥质灰岩, 呈薄互层状。

南侧属南秦岭地层区, 主要出露岩层有: 中新元古界龟山岩组($P_{t_2-3}g$), 岩性主要以斜长角闪(片)岩、(含榴)绢云(白云)石英片岩为主, 岩石普遍具残斑结构和石英多晶条带构造、云母鱼构造, 剪切褶皱发育; 震旦系-下古生界肖家庙岩组($Z-P_{z_1}x$)泥砂质碎屑岩夹碳酸盐岩沉积建造; 古生界定远组($P_{z_1-2}d$)主要由浅变质基性火山岩和酸性火山碎屑岩组成, 为一套双峰式偏碱性火山岩; 泥盆系南湾组(D_n), 岩性主要为残余微细韵律层理发育的黑云变粒岩、砂板岩; 侏罗纪及以后主要出露岩层有侏罗系上统段集组, 白垩系下统陈棚组、上统周家湾组, 为磨拉石陆相建造以及白垩系的陆相中酸性火山岩、碎屑岩沉积建造(据河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队, 2001)^②。

区域岩浆活动极为频繁, 各个地质时期均有岩浆活动。其中中生代岩浆活动强烈, 大的花岗岩基和中酸性小岩体共存, 主要分布在桐柏-商城断裂两侧及以南地区(陈伟等, 2013)。区内中酸性小岩体密布, 明显受北西西向和近南北向断裂交织构成的网格状断裂体系控制, 具有成群成带、等间距分布特点, 与斑岩型钼(铜)成矿关系密切, 构成东秦岭-大别钼(铜)成矿带的东段。

区域构造复杂, 北西西向龟(山)-梅(山)断裂和桐(柏)-商(城)断裂纵贯全区, 具长期活动性和继承性(李法岭, 2011), 且与近南北向断裂构成网格状构造格局, 控制了该区不同沉积建造、变质相带、岩浆岩带的展布。

2 岩石学特征

牢山寨岩体位于殷鹏乡附近, 出露面积113.7 km²(图2)。侵位于南湾组变质地层, 接触面倾向围岩, 界限清楚, 接触带破碎, 围岩蚀变强烈, 主要为绿帘石化、硅化、萤石矿化等, 局部地段可见烘烤现象。

牢山寨岩体岩石类型为二长花岗岩。岩石呈肉红色-黄灰色, 中粒花岗结构, 块状构造。矿物成分主要有更长石、钾长石、石英等(图3), 其中更长石占35%~45%, 半自形板状, 聚片双晶, 具净边, 粒径1~4 mm; 钾长石占25%~40%, 自形板状, 粒径多在

① 河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院. 2013. 河南省光山县殷棚钼钨矿预查.

② 河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队. 2001. 文殊寺幅、浚陂河镇幅、千斤河棚幅、新县幅、两路口幅 1:5 万区域地质调查报告.

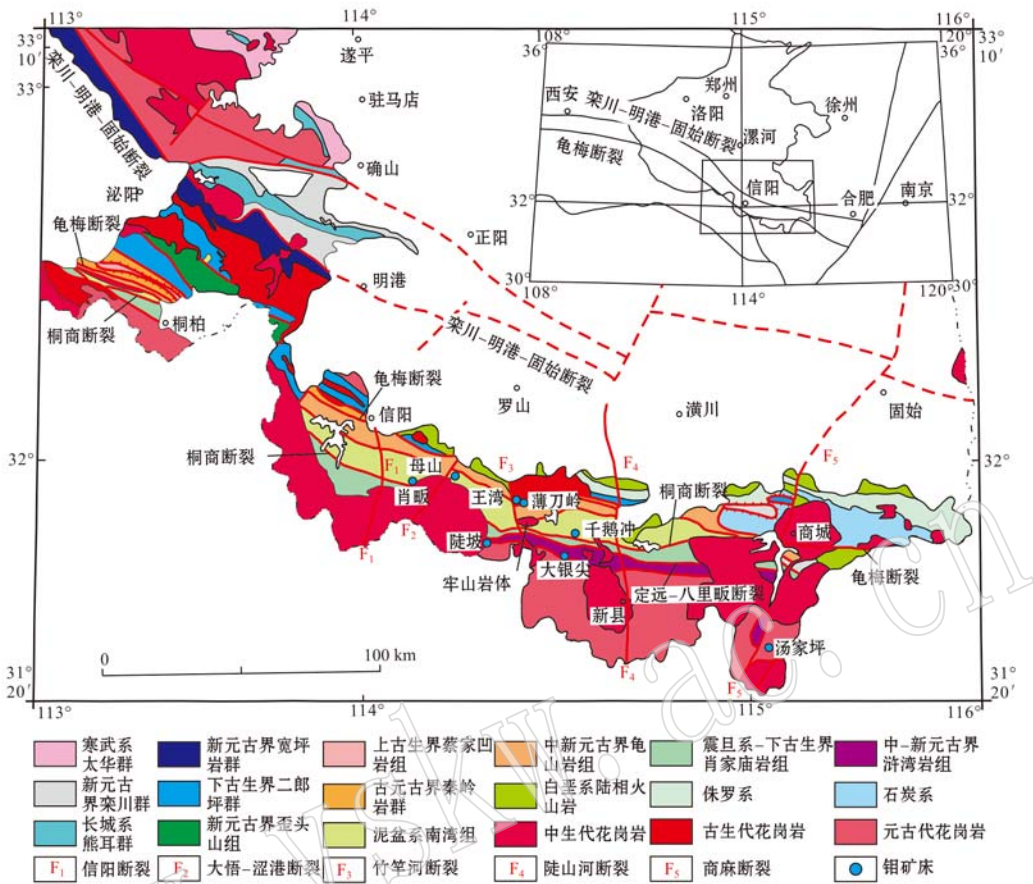


图 1 桐柏-大别(河南段)地质简图(据河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队, 2001)^①
Fig. 1 Geological sketch map of Tongbai-Dabie (Henan section) (after No. 3 Geological Party of Henan Geological Bureau, 2001)^①

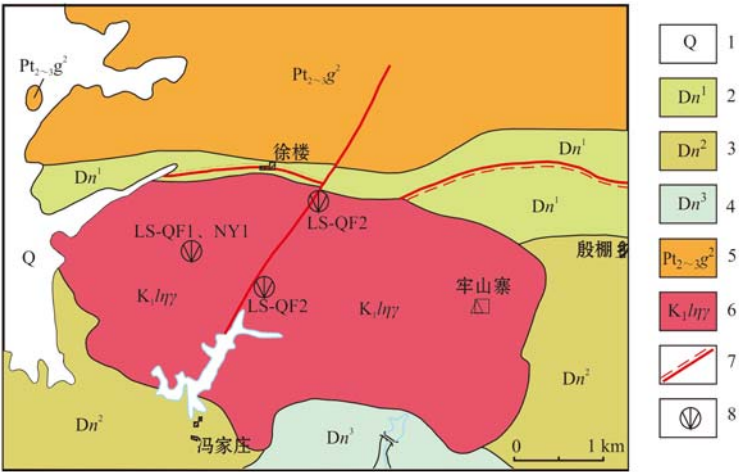


图 2 牢山寨岩体一带地质简图
Fig. 2 Geological sketch map of Laoshanzhai rock mass
1—第四系亚砂土、粘土; 2—泥盆系南湾组一段; 3—泥盆系南湾组二段; 4—泥盆系南湾组三段; 5—中新元古界龟山岩组; 6—牢山寨岩体;
7—流劈理带; 8—测年、全分析样品位置及编号
1—Quaternary sub-sandy soil, clay; 2—first stage of Devonian Nanwan Formation; 3—second stage of Devonian Nanwan Formation; 4—third stage of Devonian Nanwan Formation; 5—Mid-Neoproterozoic Guishan Formation; 6—Laoshanzhai rock mass; 7—flow cleavage zone; 8—sampling site and its serial number

① 河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队. 2001. 文殊寺幅、浚波河镇幅、千斤河棚幅、新县幅、两路口幅 1:5 万区域地质调查报告.

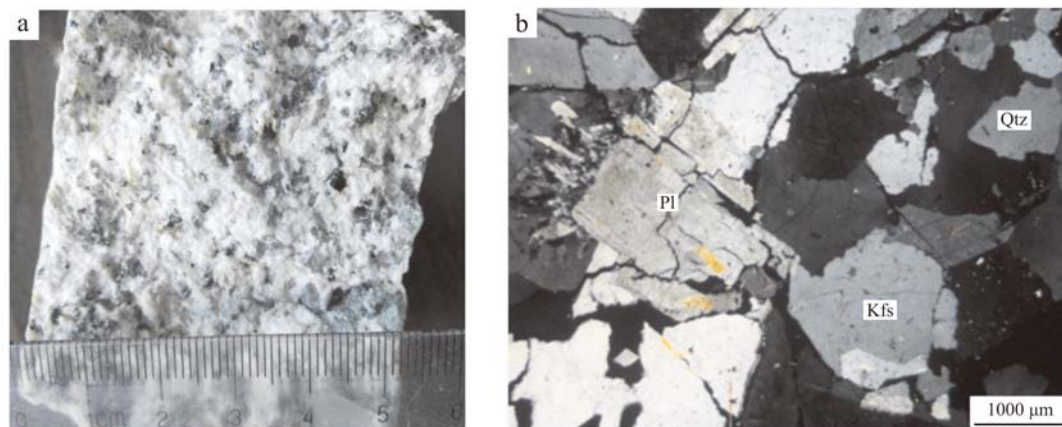


图 3 牢山寨岩体岩石学特征

Fig. 3 Petrologic features of Laoshanzhai rock mass

a—牢山寨岩体标本; b—岩体显微特征; Qtz—石英; Kf—钾长石; Pl—斜长石

a—sample of Laoshanzhai rock mass; b—microscopic characteristics of rock mass; Qtz—quartz; Kf—potash feldspar; Pl—plagioclase

3 mm 以上,一般为微斜条纹长石,常见卡氏双晶及格子双晶,晶体内部常见有细粒更长石包体;石英占 25%~35%,它形粒状,粒径 2~4 mm。还含有少量的黑云母、黝帘石及磁铁矿、绿帘石、磷灰石、独居石等。

3 样品情况及分析方法

本研究样品采自牢山寨岩体西北部,采样点坐标:114°33′02″E, 31°50′38″N,样品号 LS-NY1,岩性为中粒二长花岗岩,样品新鲜无风化。新鲜全岩样品磨碎至 200 目,供后续主量元素、微量元素、稀土元素测试使用。

锆石样品的分选在河北省区域地质调查队实验室进行,采用人工破碎重砂淘洗,从花岗岩样品中分离出锆石,然后,在双目镜下挑纯,锆石样品的纯度达 95% 以上,无污染。

主量元素采用等离子体发射光谱仪及紫外可见分光光度计测定,微量元素、稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪及 X 射线荧光光谱仪测定,测试中采用标准样品对仪器状态和数据质量进行监控,结果显示大部分元素分析精度优于 5%。以上测试由河南省岩石矿物测试中心完成,数据分析中稀土元素球粒陨石标准化采用 Boynton (1984) 数据(微量元素原始地幔标准化采用 Rollison 等(2000)数据。

单矿物锆石样品的制靶、阴极发光照相及 U-Pb 同位素分析,在天津地质调查中心实验测试室完成。选择颗粒较大、晶形完好的锆石制靶,经透射光、反射光及阴极发光(CL)研究之后,对选定的锆石颗粒

的最优点利用天津地质矿产研究所 193 nm 准分子激光器和多接收器等离子体质谱仪联用技术(LA-ICP-MS)。其中激光器为美国 ESI 公司生产的 NEW WAVE 193 nm FX ArF 准分子激光器,波长 193 nm,脉冲宽度小于 4 ns,束斑直径可调,本次束斑直径在 25 nm 左右。脉冲频率 1~200 Hz 连续可调,激光输出最大功率为 15 J/cm²。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(刘勇胜等, 2013)和 Kenneth Ludwig 的 Isoplot (Ludwig, 2003)程序进行,采用 ²⁰⁴Pb 校正法或者 Tom Andersen 的方法(Andersen, 2002)对普通铅进行校正。

4 岩石地球化学特征

牢山寨岩体二长花岗岩的主、微量元素分析结果(表 1)显示, SiO₂ 含量介于 73.76%~75.48% 之间, Al₂O₃ 含量介于 13.34%~14.74% 之间, K₂O + Na₂O 含量介于 7.84%~8.44% 之间, K₂O/Na₂O 值介于 0.91~1.09 之间, 含铝指数 A/CNK 介于 1.09~1.18 之间, A/NK 介于 1.24~1.28 之间, 显示其具过铝质花岗岩特征; 岩体分异指数 DI = 92.76~93.51, 反映岩体经历了高分度的分异演化作用。在硅碱图(图 4a)上, 岩体投点落在亚碱性花岗岩区域内。在 K₂O-SiO₂ 图解(图 4b)上, 岩体位于高钾钙碱性系列区域内。

由牢山寨二长花岗岩的微量元素分析结果及其原始地幔标准化蛛网图(图 5a)发现, 曲线整体右倾, 大离子亲石元素(LILE)Rb、K 富集, Ba、Eu 亏损; 高

表 1 牢山寨二长花岗岩主量元素 ($w_B/\%$) 及微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 含量分析结果
Table 1 Analytical results of major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of Laoshanzhai rock mass

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	P ₂ O ₅	灼减量	H ₂ O ⁺	总量	K ₂ O/Na ₂ O	A/NK	A/CNK
LS-QF1	73.76	14.74	1.07	0.11	0.17	4.02	4.42	0.68	0.11	0.029	0.034	0.23	99.86	0.91	1.27	1.15
LS-QF2	75.48	13.34	0.89	0.17	0.13	3.85	3.99	0.84	0.21	0.059	0.034	0.23	99.51	0.96	1.24	1.09
LS-QF3	74.70	14.30	0.86	0.20	0.14	4.30	3.95	0.52	0.13	0.030	0.032	0.56	100.21	1.09	1.28	1.18
样品编号	Cr	Ni	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U	La	Ce	Pr	Nd
LS-QF1	9.73	3.54	22.1	234	124	118	33.1	386	11.3	1.98	29.5	8.16	25.9	46.8	5.39	16.8
LS-QF2	9.00	2.79	18.8	184	130	81.5	32.3	366	10.7	2.06	22.3	8.37	22.0	38.9	4.34	13.9
LS-QF3	6.81	4.14	21.5	231	101	95.9	32.1	425	9.87	2.38	21.9	7.58	25.6	44.8	5.17	17.2
样品编号	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	La/Sm	La/Sm	(La/Sm) _N	
LS-QF1	2.64	0.40	2.38	0.33	1.89	0.35	1.20	0.23	1.74	0.28	13.1	119.43	11.66	0.48	10.04	
LS-QF2	2.65	0.43	2.46	0.39	2.37	0.47	1.48	0.28	1.94	0.28	15.6	107.49	8.50	0.51	7.65	
LS-QF3	2.93	0.49	2.54	0.40	2.20	0.45	1.45	0.26	2.03	0.31	15.9	121.73	9.98	0.54	8.50	

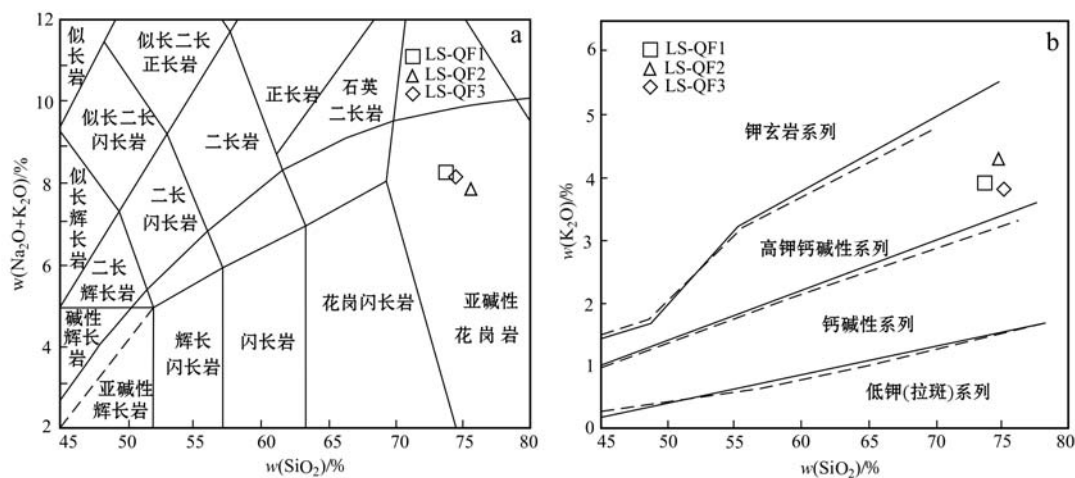


图 4 牢山寨岩体硅碱图解(a)和 K_2O-SiO_2 图解(b)(据 Middlemost, 1985)

Fig. 4 $Na_2O+K_2O-SiO_2$ diagram (a) and K_2O-SiO_2 diagram (b) of Laoshanzhai rock mass (after Middlemost, 1985)

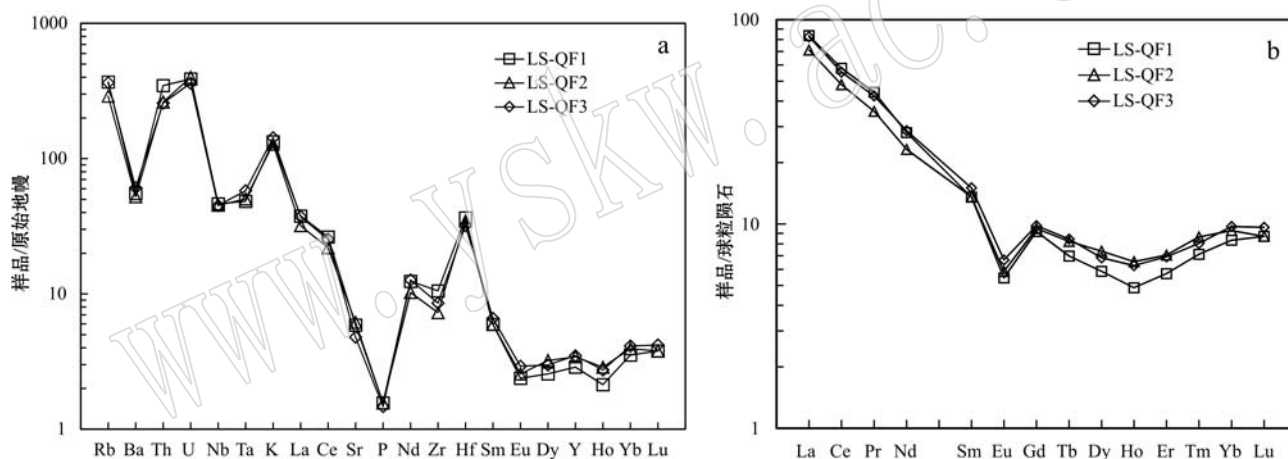


图 5 牢山寨岩体微量元素原始地幔标准化图解(a)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Laoshanzhai rock mass

场强元素 (HFSE) Hf、Th、U 等富集, Nb、Ta 亏损。

牢山寨岩体稀土元素总量 (ΣREE) 范围在 $91.89 \times 10^{-6} \sim 106.33 \times 10^{-6}$; 轻、重稀土元素比 ($LREE/HREE$) 为 $8.50 \sim 11.66$, $(La/Yb)_N = 7.65 \sim 10.04$, $(La/Sm)_N = 5.22 \sim 6.17$, $(Gd/Yb)_N = 1.01 \sim 1.10$, δEu 为 $0.48 \sim 0.54$, 为中等负 Eu 异常。牢山寨花岗岩体稀土元素球粒陨石标准化分模式图解中呈右倾模式(图 5b), 铈谷明显, 轻稀土元素分馏明显, 重稀土元素整体稍平坦, Ho 弱亏损, 属轻稀土元素富集型。

5 锆石 U-Pb 同位素定年

锆石 CL 图像(图 6)及透、反射光图像显示, 锆石多为无色, 透明度良好, 呈短柱状, 多为自形晶, 少数为半自形, 粒径在 $50 \sim 69 \mu m$ 之间, 长宽比约为 $1:1 \sim 1:2$, 具有清晰的振荡型岩浆生长环带。锆石的 Th/U 值介于 $0.61 \sim 2.82$ 之间, 具有典型的岩浆锆石特征。

对牢山寨二长花岗岩的 21 个锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试, 结果显示 U 含量为 $235 \times 10^{-6} \sim 2325 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $151 \times 10^{-6} \sim 2189 \times 10^{-6}$ (表 2), $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄介于 $144 \sim 129 Ma$ 之

表 2 牢山寨二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测定结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb age data of Laoshanzhai rock mass

样品编号	$w_B/10^{-6}$				Th/U				同位素比值				表面年龄/Ma			
	Pb		Th		U				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	
	1 σ		1 σ		1 σ			1 σ			1 σ		1 σ		1 σ	
LS-NY1-01	41	1 028	1 678	0.612	0.022 6	0.000 3	0.153 9	0.003 23	0.049 4	0.001 7	144	2	145	3	164	83
LS-NY1-02	10	286	374	0.763	0.022 5	0.000 6	0.151 5	0.003 28	0.048 8	0.003 0	143	4	143	3	140	145
LS-NY1-03	5	151	221	0.683	0.021 9	0.000 7	0.147 7	0.003 29	0.048 9	0.003 7	140	5	140	3	142	176
LS-NY1-04	24	1 090	751	1.451	0.022 1	0.000 9	0.150 5	0.003 36	0.049 5	0.005 7	141	6	142	3	170	267
LS-NY1-05	8	427	289	1.474	0.021 7	0.000 7	0.147 3	0.003 26	0.049 2	0.003 8	138	4	140	3	157	181
LS-NY1-06	11	339	429	0.791	0.022 5	0.000 8	0.150 8	0.003 33	0.048 6	0.003 2	143	5	143	3	129	157
LS-NY1-07	11	311	443	0.703	0.021 5	0.000 4	0.145 1	0.003 06	0.049 1	0.001 9	137	2	138	3	150	90
LS-NY1-08	29	2 178	771	2.827	0.021 5	0.000 3	0.149 2	0.003 11	0.050 3	0.001 4	137	2	141	3	210	65
LS-NY1-09	7	286	287	0.996	0.021 5	0.000 2	0.144 6	0.003 08	0.048 7	0.002 4	137	1	137	3	136	117
LS-NY1-10	57	2 189	2 325	0.941	0.020 3	0.000 3	0.141 9	0.002 96	0.050 6	0.001 1	130	2	135	3	222	50
LS-NY1-11	11	540	378	1.427	0.021 2	0.000 3	0.147 5	0.003 15	0.050 4	0.002 8	135	2	140	3	214	130
LS-NY1-12	38	1 545	1 439	1.074	0.021 5	0.000 2	0.146 7	0.003 05	0.049 6	0.001 1	137	1	139	3	175	54
LS-NY1-13	10	377	405	0.931	0.020 3	0.000 2	0.140 2	0.002 98	0.050 0	0.002 4	130	1	133	3	194	113
LS-NY1-14	6	280	213	1.313	0.021 1	0.000 3	0.147 3	0.003 17	0.050 5	0.003 3	135	2	139	3	219	149
LS-NY1-15	22	975	879	1.108	0.020 2	0.000 2	0.137 6	0.002 86	0.049 3	0.001 2	129	1	131	3	163	56
LS-NY1-16	6	355	215	1.651	0.020 3	0.000 3	0.142 4	0.003 02	0.050 8	0.002 5	130	2	135	3	230	116
LS-NY1-17	7	248	270	0.918	0.020 7	0.000 2	0.144 1	0.003 07	0.050 4	0.002 6	132	1	137	3	215	119
LS-NY1-18	4	151	190	0.792	0.020 2	0.000 3	0.139 6	0.002 99	0.050 2	0.002 9	129	2	133	3	206	132
LS-NY1-19	4	192	151	1.268	0.020 3	0.000 3	0.142 1	0.003 05	0.050 8	0.003 1	130	2	135	3	231	140
LS-NY1-20	13	743	415	1.792	0.020 7	0.000 2	0.140 6	0.002 95	0.049 2	0.001 7	132	1	134	3	157	82
LS-NY1-21	10	438	360	1.218	0.020 8	0.000 2	0.144 8	0.003 07	0.050 5	0.002 3	133	2	137	3	220	103

间。21 个测点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $133 \pm 2 \text{ Ma}$ ($n = 21, \text{MSWD} = 3.1$) (图 7)。此年龄值代表牢山寨岩体的侵位年龄,属早白垩世。

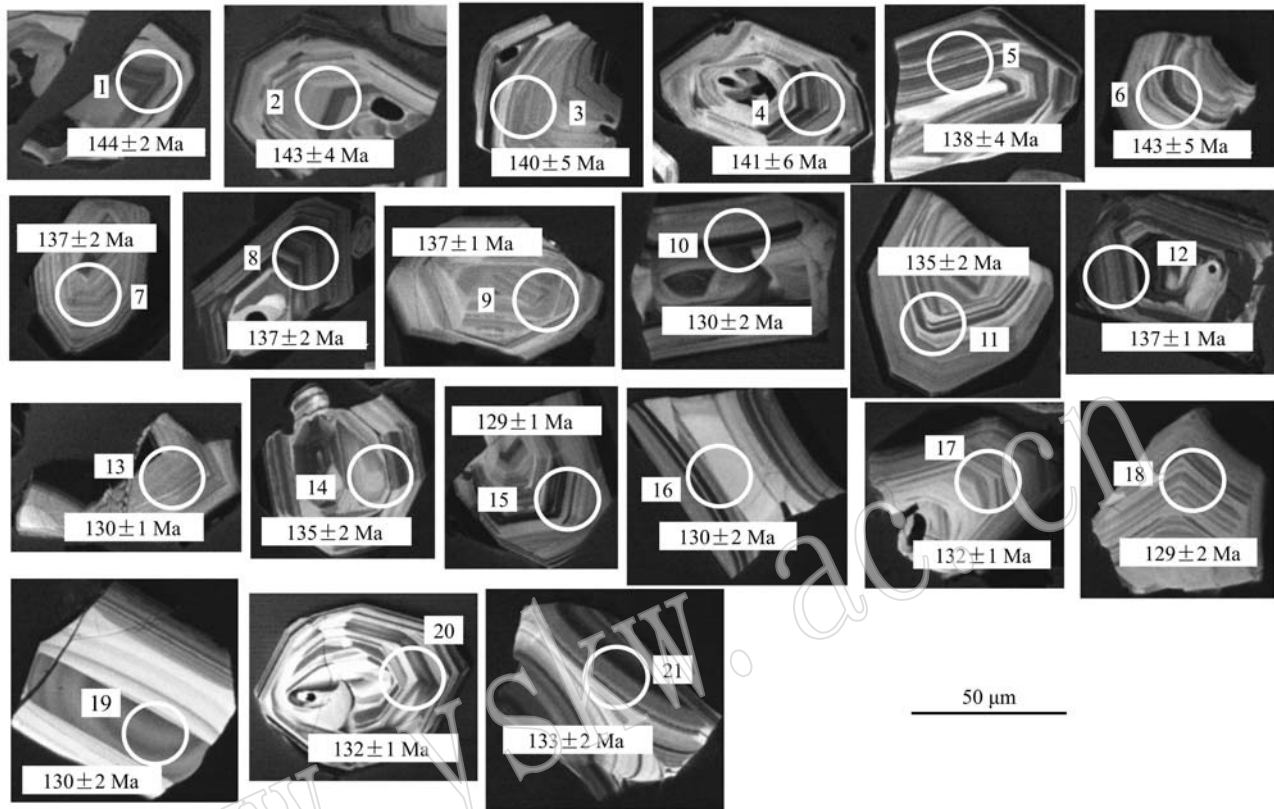


图 6 牢山寨岩体锆石阴极发光图像
Fig. 6 CL images of zircons of Laoshanzhai rock mass

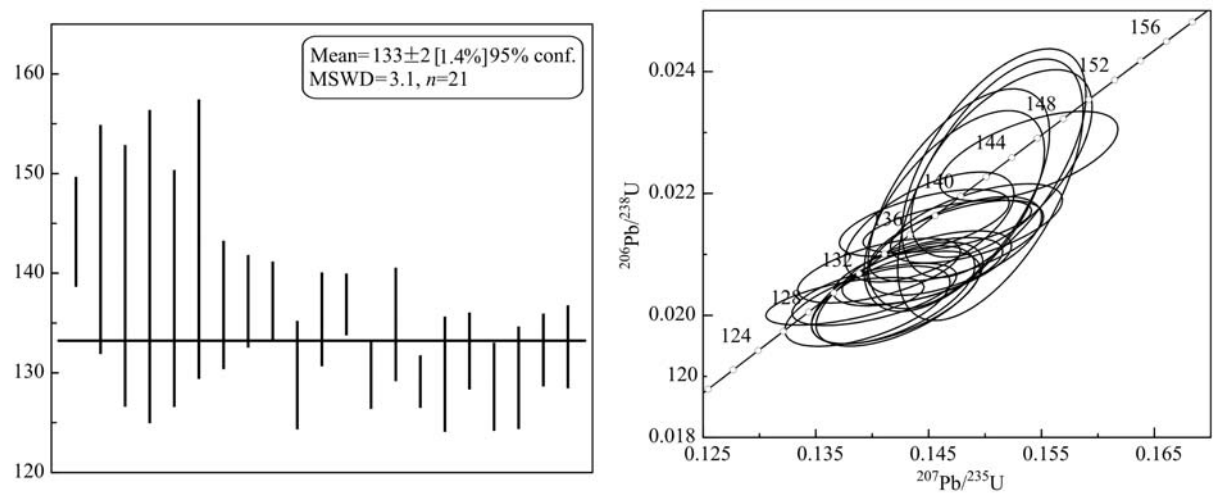


图 7 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄及年龄谐和图
Fig. 7 Zircon LA-ICP-MS U-Pb weighted average age and concordia diagram

6 讨论

6.1 岩体成因

牢山寨二长花岗岩中石英含量较多(25%~35%), 含少量角闪石、独居石, SiO_2 、 Al_2O_3 、全碱含量较高, 钾钠含量大致相同, 属高钾钙碱性; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.34\% \sim 14.74\%$, $A/\text{CNK} = 1.09 \sim 1.18$, 属过铝质花岗岩; CIPW 标准矿物分析中刚玉含量在 1.18~2.30 之间, 显示其具有 S 型花岗岩的矿物组合和岩石化学特征。岩石学实验表明, 在准铝质到弱过铝质岩浆分异过程中, 磷灰石的溶解度较低, 随 SiO_2 含量的增加而降低; 而在强过铝质岩浆中, 磷灰石溶解度变化趋势与此相反(Wolf and London, 1994)。牢山寨岩体 P_2O_5 含量随 SiO_2 含量的增加未见明显的降低趋势, 这有别于 I 型花岗岩二者呈负相关的特征。在 $\text{Zr}-\text{SiO}_2$ 判别图解(图 8)中, 牢山寨二长花岗岩均投在 S 型花岗岩区域, 说明其具有 S 型花岗岩特征。

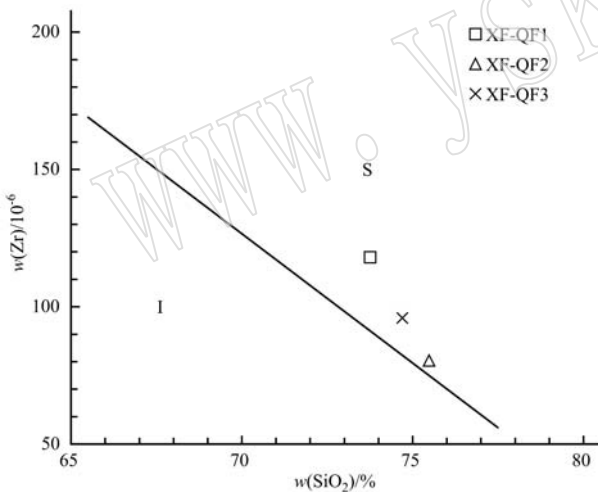


图 8 牢山寨岩体岩石成因 $\text{Zr}-\text{SiO}_2$ 判别图
(据路远发, 2004)

Fig. 8 $\text{Zr}-\text{SiO}_2$ discriminant diagram of Petrogenesis of Laoshanzhai rock mass

牢山寨岩体 HREE 和 Y 的含量低或许表明源区也可能有石榴石存在, HREE 平坦分布, Ho_N 与 Yb_N 大体相当或 $\text{Ho}_N < \text{Yb}_N$ (即 MREE 亏损), 暗示角闪石可能是重要的残留相(郑荣国等, 2013; 陈芳等, 2014; 董增产等, 2015)。李承东等(2004)认为岩浆贫 Sr, 有明显的铕负异常, 说明残留相中可能存在富 Ca 的斜长石, 致使熔融的岩浆贫 Ca 和 Sr, 因此

推测源岩残留相中可能有石榴石存在, 可能相当于(斜长石+辉石+角闪石+石榴石)高压麻粒岩相的环境, 也形成于较厚的下地壳底部。张旗等(2010)曾依据 Sr-Yb 将花岗岩分为 4 类: 埃达克岩型, 高 Sr 低 Yb ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$); 喜马拉雅型, 低 Sr 低 Yb ($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$); 浙闽型, 低 Sr 高 Yb ($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$); 广西型, 高 Sr 高 Yb ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$) 型。牢山寨岩体 Sr 含量为 $101 \times 10^{-6} \sim 130 \times 10^{-6}$, Yb 含量为 $1.74 \times 10^{-6} \sim 2.03 \times 10^{-6}$, 在花岗岩的 Sr-Yb 分类图中落入喜马拉雅型(图 9a), 进一步说明岩体形成的物源区物质以斜长石+辉石+角闪石+石榴石为主, 具有深源特点(大于 40 km)。

根据康磊等(2016)采用的锆石饱和温度计模拟计算公式, 计算出牢山寨岩体的锆石饱和温度为 $725.4 \sim 758.9^\circ\text{C}$ 。样品中个别锆石发育有残留核, 说明母岩浆中锆元素已达饱和(魏庆国等, 2010; 康磊等, 2016), 因此 $725.4 \sim 758.9^\circ\text{C}$ 可代表原始岩浆的初始岩浆温度。

6.2 岩体形成的构造环境

扬子陆块陆壳向北深俯冲碰撞事件发生在 242~220 Ma 的中晚三叠世, 在 150 Ma 以后进入折返伸展时期, 并伴随强烈的岩浆活动(王强等, 2000; 许志琴等, 2003)。碰撞造山带的演化一般都要经历从挤压缩短向伸展减薄的构造体制的转换过程。事实上, 整个中国东部在早白垩世总体处在伸展的构造体制下。在这一时期, 不仅形成了大别钼矿带这一世界级钼多金属成矿省, 而且在华北克拉通南缘、中国东北地区(孙景贵等, 2012)、华北克拉通内部(毛景文等, 2005; 翟明国, 2010)、长江中下游等地区均发育了大规模的构造-岩浆-成矿事件(毛景文等, 2005; 翟明国, 2010; 孙景贵等, 2012), 它们均与中国东部乃至亚洲东北部晚中生代大规模地壳伸展的构造背景密切相关。

大别造山带发育的大量白垩纪花岗岩在约 130 Ma 发生了明显的地球化学特征变化。研究表明, 早期形成的花岗岩(143~130 Ma)来自残留相中富石榴石而贫斜长石的加厚下地壳的部分熔融(He et al., 2011)。花岗岩地球化学特征在 130 Ma 左右发生的转变指示大别造山带在约 130 Ma 发生了下地壳的拆沉作用, 之后形成的花岗岩来自减薄地壳的部分熔融(Wang et al., 2007; Xu et al., 2007; He et al., 2011)。

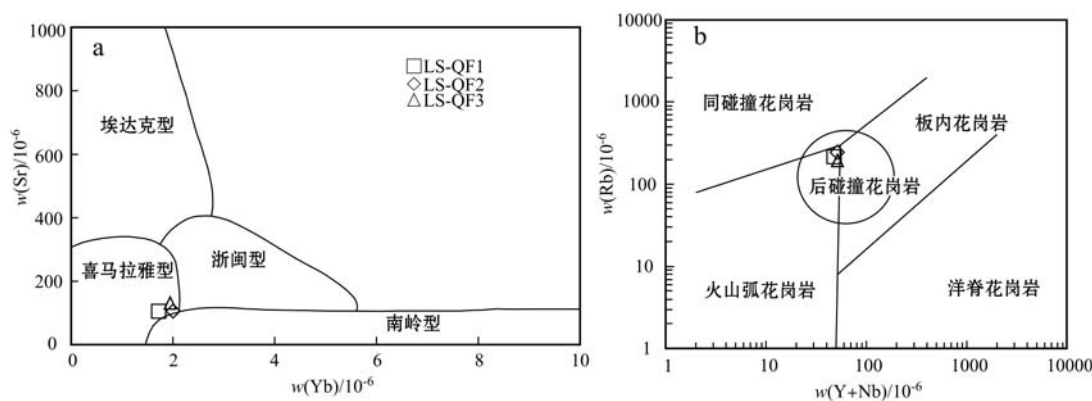


图 9 花岗岩的 Sr-Yb 分类图(a, 据张旗等, 2010)和 Rb-(Nb+Y)判别图(b, 据 Brown *et al.*, 1984)

Fig. 9 Sr-Yb classification diagram (a, after Zhang Qi, 2010) and Rb-(Y+Nb) discrimination (b, after Brown *et al.*, 1984) of granite

牢山寨岩体的成岩年龄为 133 ± 2 Ma, 在 Rb-(Nb+Y)判别图解(图 9b)上, 全部样品均投影于后碰撞花岗岩区, 表明其地球动力学背景为秦岭-大别造山带中生带构造体制转换及其后伸展机制下, 下地壳尚未发生拆沉。含斜长石+辉石+角闪石+石榴石的高压麻粒岩下地壳部分熔融, 沿深断裂向上运移, 在地壳浅部固结形成牢山寨岩体。

7 结论

(1) 牢山寨岩体化学成分具超酸($\text{SiO}_2 = 73.76\% \sim 75.48\%$)、富碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.84\% \sim 8.44\%$)、过铝质($\text{A}/\text{CNK} = 1.09 \sim 1.18$, $\text{A}/\text{NK} = 1.24 \sim 1.28$)等特点, 属超酸性富碱高钾钙碱性系列。岩石大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、K 富集, 高场强元素(HFSE)Hf、Th、U、Nb、Ta 富集特征。轻稀土元素明显富集, 重稀土元素亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 7.65 \sim 10.04$, δEu 为 $0.48 \sim 0.54$, 具中等负 Eu 异常, 稀土元素分布曲线为左高右平缓的轻稀土富集型。

(2) 牢山寨岩体 LA-ICP-MS U-Pb 定年测得岩体 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 133 ± 2 Ma ($n = 21$, $\text{MSWD} = 3.1$), 代表牢山寨岩体的侵位年龄, 说明其为早白垩世岩浆活动的产物。

(3) 牢山寨岩体地球动力学背景为秦岭-大别造山带中生带构造体制转换及其后伸展机制下, 下地壳尚未发生拆沉。含斜长石+辉石+角闪石+石榴石的高压麻粒岩下地壳部分熔融, 沿深断裂向上运移, 在地壳浅部固结形成牢山寨岩体。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem. Geol.*, 192 (1/2): 59~79.
- Brown G C, Thorpe R S and Webb P C. 1984. The Geochemical characteristics of gneissoids in contrasting arc and comments on magma sources[J]. *Geol. Soc. Lond.*, 141: 411~426.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Elsevier, 63~114.
- Chen Fang, Wang Denghong, Du Jianguo, *et al.* 2013. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the Liucun monzogranite in Ningguo, Anhui Province and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 869~882 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wei, Xu Zhaowen, Li Hongchao, *et al.* 2013. Petrogenesis and origin of the Xinxian granitic batholith in Henan Province and its implication for the tectonic evolution of the western Dabie area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1510~1524 (in Chinese with English abstract).
- Dong Zengchan, Gu Pingyang, Chen Ruiming, *et al.* 2015. Geochronology, geochemistry, and Hf isotope of Yanchangbeishan adamellite of Lenghu area in Qinghai[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(1): 130~144 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Zhang Benren, Jin Zhenmin, *et al.* 1999. The Qinling Mountains Dabie orogenic belt crust delamination[J]. *Science in China(Series D)*,

- 29(6): 532~541(in Chinese with English abstract).
- He S Y, Li G S, Hoefs J, *et al.* 2011. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen: new evidence for partial melting of a thickened continental crust[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75: 3 815 ~ 3 838.
- Kang Lei, Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, *et al.* 2016. Chronology, geochemistry and petrogenesis of monzonitic granite and quartz diorite in Mangai area: Its inspiration to Early Paleozoic tectonic-magmatic evolution of the southern Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(6): 1 731~1 748(in Chinese with English abstract).
- Li Chengdong, Zhang Qi, Miao Laicheng, *et al.* 2004. Mesozoic high-Sr, low-Y and low-Sr, low-Y types granitoids in the northern Hebei province: Geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 269~284(in Chinese with English abstract).
- Li Faling. 2011. Geological characteristics and metallogenic epoch of Qianechong Large-size porphyry Mo deposit at the northern foot of Dabie mountains, Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 457~468(in Chinese with English abstract).
- Li Mingli. 2009. Characteristics of Intermediate-acid Small Intrusive Bodies and Metallogenic System of Molybdenum-polymetallic Deposits in Mesozoic in Dabie Mountain, Henan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Li Ming, *et al.* 2013. Applications of LA-ICP-MS in the elemental analyses of geological samples[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 58(36): 3 753~3 769(in Chinese).
- Lu Yuanfa. 2004. Geokit—A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 33(5): 459~464(in Chinese).
- Ludwig R L. 2003. Isoplot 3.0: A geochronological tool kit for Microsoft Excel[J]. *Geochronology Center Berkeley, Special Publication*, (4): 1~70.
- Luo Zhaohua, Wei Yang, Xin Houtian, *et al.* 2006. Petrogenesis of the post-orogenic dike complex-Constraints to lithosphere delamination[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1 672 ~ 1 684(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, *et al.* 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 171~190 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, *et al.* 2003. Geodynamic setting of Mesozoic large scale mineralization in North China and its adjacent areas: implications for age dating of metallic deposits[J]. *Science in China(Series D)*, 33(4): 289~299.
- Middlemost E A K. 1985. *Magma and Magmatic Rocks*[M]. London: Longman, 1~266.
- Sun Jinggui, Zhang Yong, Xing Shuwen, *et al.* 2012. Genetic types, ore-forming age and geodynamic setting of endogenic molybdenum deposits in the eastern edge of Xing-Meng orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 317~1 332(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Wyman A D, Xu F J, *et al.* 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 2 609~2 636(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua and Xiong Xiaolin. 2000. The ascertainment of Late-Yanshanian A-type granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297~306(in Chinese with English abstract).
- Wei Qingguo, Gao Xinyu, Zhao Taiping, *et al.* 2010. Petrogenesis of Tangjiaping granite porphyry in northern Dabie: Evidence from Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1 550~1 562(in Chinese with English abstract).
- Wolf M B and London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(4): 4 127~4 145.
- Xu Haijin, Ye Kai and Ma Changqian. 2008. Early Cretaceous granitoids in North Dabie and their tectonic implications: Sr-Nd and zircon Hf isotopic evidence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(01): 87~103(in Chinese with English abstract).
- Xu J H, Ma Q C and Ye K. 2007. Early cretaceous granitoids and their implication for the collapse of the Dabie orogen, Eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Chem Geol.*, 240(2): 238~259.
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, *et al.* 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433~450 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zeqiang. 2007. Re-Os isotopic ages of Tangjiaping molybdenum deposit in Shangcheng County, Henan and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(3): 289~295(in Chinese with English abstract).
- Yang Zeqiang, Wan Shouquan, Ma Hongwei, *et al.* 2008. Geochemistry and mineralization model of Tangjiaping Mo deposit in

- Shangcheng County, Henan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 788~794(in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 24~36(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2010. On the classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb concentrations III: Practice[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3 431~3 455(in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongguo, Wu Tairan, Zhang Wen, *et al.* 2013. Geochronology and geochemistry of the Yagan granite in the northern margin of the Alxa block: Constraints on the tectonic evolution of the southern Altaids[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2 665~2 675(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈芳, 王登红, 杜建国, 等. 2014. 安徽宁国刘村二长花岗岩地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 88(5): 869~882.
- 陈伟, 徐兆文, 李红超, 等. 2013. 河南新县花岗岩岩基的岩石成因、来源及对西大别构造演化的启示[J]. *地质学报*, 87(10): 1 510~1 524.
- 董增产, 辜平阳, 陈锐明, 等. 2015. 柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 40(1): 130~144.
- 高山, 张本仁, 金振民, 等. 1999. 秦岭-大别造山带下地壳拆沉作用[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 29(6): 532~541.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 2016. 茫崖二长花岗岩、石英闪长岩的年代学、地球化学及岩石成因: 对阿尔金南缘早古生代构造-岩浆演化的启示[J]. *岩石学报*, 32(6): 1 731~1 748.
- 李承东, 张旗, 苗来成, 等. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系[J]. *岩石学报*, 20(2): 269~284.
- 李法岭. 2011. 河南大别山北麓千鹅冲特大隐伏斑岩型钼矿床地质特征及成矿时代[J]. *矿床地质*, 30(3): 457~468.
- 李明立. 2009. 河南省大别山地区中生代中酸性小岩体特征及钼多金属成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学.
- 刘勇胜, 胡兆初, 李明, 等. 2013. LA-ICP-MS 在地质样品元素分析中的应用[J]. *科学通报*, 58(36): 3 753~3 769.
- 路远发. 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 33(5): 459~464.
- 罗照华, 魏阳, 辛后田, 等. 2006. 造山后脉岩组合的岩石成因——对岩石圈拆沉作用的约束[J]. *岩石学报*, 22(6): 1 672~1 684.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 21(1): 171~190.
- Rollison H R, 杨学明, 杨晓勇, 等. 2000. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 孙景贵, 张勇, 邢树文, 等. 2012. 兴蒙造山带东缘内生钼矿床的成因类型、成矿年代及成矿动力学背景[J]. *岩石学报*, 28(4): 1 317~1 332.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏-大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. *岩石矿物学杂志*, 19(4): 297~306.
- 魏庆国, 高昕宇, 赵太平, 等. 2010. 大别北麓汤家坪花岗岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年和岩石地球化学特征及其对岩石成因的制约[J]. *岩石学报*, 26(5): 1 550~1 562.
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 2003. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制[J]. *地质学报*, 77(4): 433~450.
- 续海金, 叶凯, 马昌前. 2008. 北大别早白垩纪花岗岩类的 Sm-Nd 和锆石 Hf 同位素及其构造意义[J]. *岩石学报*, 24(1): 87~103.
- 杨泽强, 万守全, 马宏卫, 等. 2008. 河南商城县汤家坪钼矿床地球化学特征与成矿模式[J]. *地质学报*, 32(6): 788~794.
- 杨泽强. 2007. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿-钼同位素年龄及地质意义[J]. *矿床地质*, 26(3): 289~295.
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. *矿床地质*, 29(1): 24~36.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2010. 三论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 应用[J]. *岩石学报*, 26(12): 3 431~3 455.
- 郑荣国, 吴泰然, 张文, 等. 2013. 阿拉善地块北缘雅干花岗岩体地球化学、地质年代学及其对区域构造演化制约[J]. *岩石学报*, 29(8): 2 665~2 675.