

河南卢氏八宝山花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成特征

曾令君^{1,2}, 星玉才³, 周栋^{1,2}, 赵太平¹, 姚军明¹, 包志伟¹

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河南省地矿局 第一地质调查院, 河南 洛阳 471023)

摘要:河南省卢氏县八宝山岩体位于华北克拉通南缘东秦岭西段, 岩体呈筒状, 可能为古火山机构岩颈相的超浅成侵入体, 成矿组合上为独特的以铁为主的多金属矿化。八宝山岩体边缘相为钾长花岗斑岩、中心相为黑云母二长花岗斑岩。二者的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄非常一致, 分别为 146.6 ± 1.6 Ma 和 145.9 ± 1.9 Ma, 说明他们可能是同期岩浆侵入作用分异的产物。钾长花岗斑岩和黑云母二长花岗斑岩锆石 Hf 同位素组成特征也非常相似, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 $-27.55 \sim -20.71$ 和 $-27.30 \sim -21.90$, t_{DM2} 值分别为 $1.80 \sim 2.93$ Ga 和 $2.03 \sim 2.92$ Ga, 表明该岩体的源区物质以壳源物质为主。综合分析表明, 八宝山岩体可能是扬子俯冲陆壳部分熔融的产物, 并可能混入少量的太华群和熊耳群的物质, 其形成的地球动力学背景可能为俯冲碰撞后的伸展环境。

关键词:八宝山岩体; 华北克拉通南缘; 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素; 岩体成因

中图分类号:P597 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-1552(2013)01-0065-013

0 引言

秦岭造山带是一个经历了包括中元古代 - 古生代多次陆缘裂解 - 增生 - 碰撞、三叠纪华北与扬子陆块之间的对接、三叠纪 - 侏罗纪造山带地壳的增厚和白垩纪造山带伸展的多阶段构造演化的复杂大陆碰撞造山带(张国伟等, 1996a; Meng and Zhang, 2000; Ratschbacher et al., 2003)。秦岭造山带, 特别是华北克拉通南缘中生代花岗质岩浆活动强烈, 与之有关的钼、钨、铅、锌、金等多金属矿产特别发育, 是我国最重要的多金属矿集区之一(Mao et al., 2003; 陈衍景, 2006)。华南北缘中生代花岗岩时空分布、源区组成、成因演化规律、成矿专属性及其与秦岭造山带演化和华北克拉通中生代岩石圈减薄过程的联系一直是一个研究的热点(卢欣祥等, 2002; Mao et al., 2008; 陈衍景等, 2009)。

河南省卢氏县八宝山岩体位于华南北缘东秦岭造山带的西段, 该岩体具有独特的地质产状和成矿组合, 岩体为火山颈相的超浅成斑岩, 目前已发现的矿化类型以铁矿化为主, 并伴有少量的铜、钼和铅锌矿化。该岩体及有关矿床目前尚缺少深入的地质、地球化学研究及精确的同位素定年, 为探讨区域成岩 - 成矿规律和地球动力学背景, 本文在详细野外地质工作基础上, 对八宝山岩体进行了锆石 U-Pb 测年和 Hf 同位素分析, 在此基础上探讨了岩体的物质来源及其形成的地球动力学背景。

1 区域地质概况

秦岭造山带由四个构造单元构成, 从南至北依次为扬子北缘、南秦岭、北秦岭、华南北缘。华南北缘是秦岭造山带最重要的中生代构造 - 岩浆 - 成矿

收稿日期: 2012-06-13; 改回日期: 2012-07-20

项目资助: 国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB416602)资助。

第一作者简介: 曾令君(1989-), 女, 硕士研究生, 矿床学专业。Email: zenglingjun0213@163.com

通信作者: 包志伟, Email: baozw@gig.ac.cn

带,其范围北至三宝断裂(三门峡-宝丰),南部以栾川断裂为界(图 1)。

卢氏八宝山地区的大地构造属于华北克拉通南缘东秦岭造山带的西段。华南北缘结晶基底为新太古界太华群中深变质岩系,盖层为古元古界熊耳群火山岩系。区内出露的地层主要是中元古界的碳酸盐岩和碎屑岩。

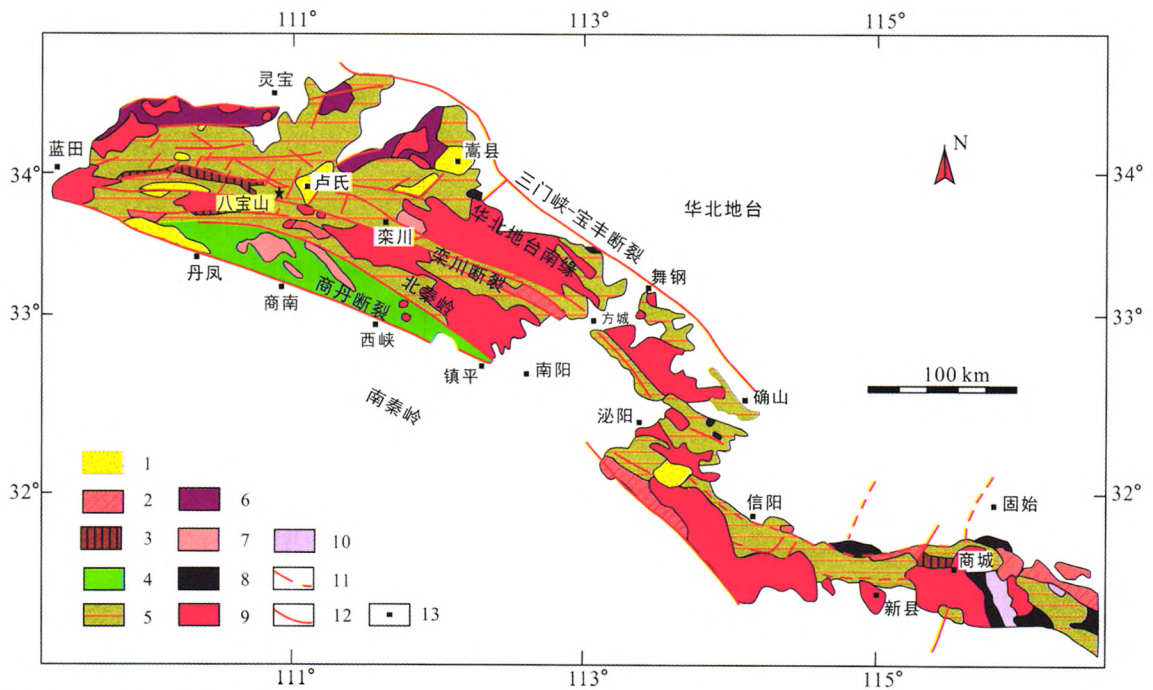
八宝山地区主要发育了一系列近东西向的逆冲断层和挤压破碎带及复式褶皱,并且其褶皱形态自北向南由开阔逐渐变为线状紧密,断裂密度相应由小变大。区内成矿岩体均为中生代岩浆作用的产物,岩性包括闪长岩、钾长花岗斑岩及二长花岗斑岩。岩体出露面积为 0.6~1.3 km²,呈北北东向的平行排列,自西向东依次为:蒲镇沟闪长岩带、银家沟-夜长坪花岗斑岩带、后瑶峪-八宝山花岗斑岩带、郭家河闪长岩带。工业矿床主要集中分布于两个花岗斑岩带上,而中性闪长岩带仅发现零星的矿化。区内矿产较为丰富,包括业已探明的曲里小型铁锌铜矿床(杨德彬等,2004)、银家沟大型多金属硫铁矿床(颜正信等,2007)、夜长坪大型钨钼矿床(肖中军和孙卫志,2007)、后瑶峪小型铁铅锌矿床(印修章和胡爱珍,2004)及八宝山小型铁铜矿床。

2 岩体地质及岩相学特征

八宝山岩体位于河南省卢氏县境内。区内出露的地层主要是中元古界的硅质条带、条纹白云岩。岩体侵位于中元古界官道口群白云岩中(图 2),岩体与围岩边界平直,呈岩株状产出。岩体地表出露似一头东尾西的鱼形,长约 2 km,面积约 1.05 km²。在 600 m 标高以上,岩体与围岩接触带内倾,呈喇叭形,600 m 标高以下接触带陡直呈筒状。铁矿体主要产于岩体和围岩的接触带上。

岩体分为两个相:中心相为黑云母二长花岗斑岩(图 3a)、边缘相为钾长花岗斑岩(图 3b)。岩体及围岩中分布较多不同岩性的岩脉。如正长斑岩脉、花岗斑岩脉、闪长斑岩脉。岩体与围岩接触带局部发育有矽卡岩(图 2)。由于风化剥蚀等原因,两种斑岩的界线较为模糊。河南省地质四队地质钻探过程中发现钾长花岗斑岩与二长花岗斑岩存在穿插关系,并推断二长花岗斑岩形成略晚。

黑云母二长花岗斑岩(图 3c),斑晶主要是斜长石、钾长石、石英及少量黑云母、角闪石。石英斑晶占 10%,大小 0.75~1.25 mm,斜长石斑晶占 30%,颗粒较大,约 2~3.5 mm,斜长石主要为中长石,具



1. 第三系;2. 中生界碎屑沉积岩;3. 古生界海相碳酸盐岩与陆源碎屑岩;4. 古元古界秦岭群黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩;5. 中元古界熊耳群火山岩及中-上元古界海相碎屑沉积岩;6. 太古宇太华群片麻岩、麻粒岩和混合岩;7. 加里东期花岗岩;8. 白垩纪火山岩;9. 燕山期花岗岩;10. 燕山期闪长岩;11. 推断断裂;12. 断裂;13. 城市。

图 1 秦岭造山带构造简图及中生代花岗岩体分布图(据罗铭玖等,1991)

Fig. 1 Geological sketch map of the Qinling-Dabie orogen (after Luo et al. , 1991)

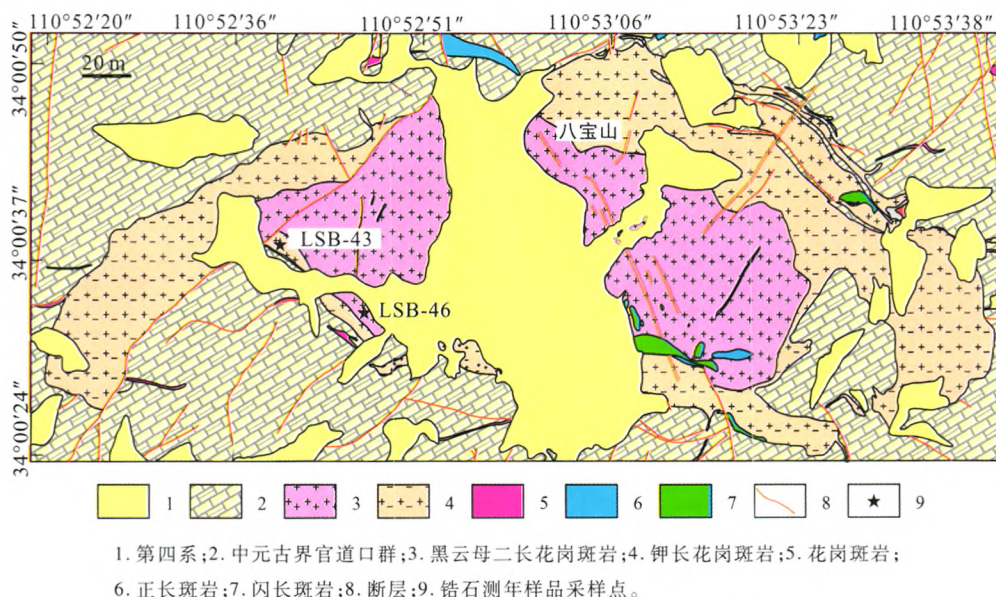
图 2 八宝山岩体地质图(据河南省卢氏县地质勘查研究所, 2011^①)

Fig. 2 Geological map of the Babaoshan granite porphyries

有环带结构和卡纳复合双晶,也有少量更长石,具有细而密的聚片双晶。钾长石约 25%,大小 0.6 ~ 2 mm,黑云母和角闪石含量较少约 5%。镜下可见角闪石的黑云母化,及黑云母绿泥石化现象。

钾长花岗斑岩(图 3d),斑晶主要是钾长石和石英,其中钾长石斑晶占 20%,粒度较大 2 ~ 5 mm,钾长石具有卡尔斯巴双晶,有些钾长石发生泥化、绢云母化(图 3e)、碳酸盐化(图 3f)。石英斑晶占 15%,粒度 1 ~ 2.5 mm,斑晶呈他形。

3 分析方法

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析方法

锆石用常规方法分选,双目镜下挑纯。选取透明、无裂隙、无包裹体、粒径较大的锆石颗粒作为测定对象。锆石的制靶和 CL 照相在北京铅年领航科技有限公司完成,将锆石与标样(TEM = 417 Ma)置于玻璃板上,用环氧树脂固定制成样品靶,然后磨至约一半,使锆石中心充分暴露,进行反射光、透射光和阴极发光显微照相。阴极发光照相主要是利用激光拉曼光谱对锆石不同区域蜕晶化程度进行研究,所用仪器为英国产 Renishaw RW2000 型 Raman 探针。实验条件为室温(23℃),Ar⁺激光器(514 nm),狭缝宽 50 μm,光栅 1800,扫描时间 30 s,波数扫描范围 150 ~ 1100 cm⁻¹。

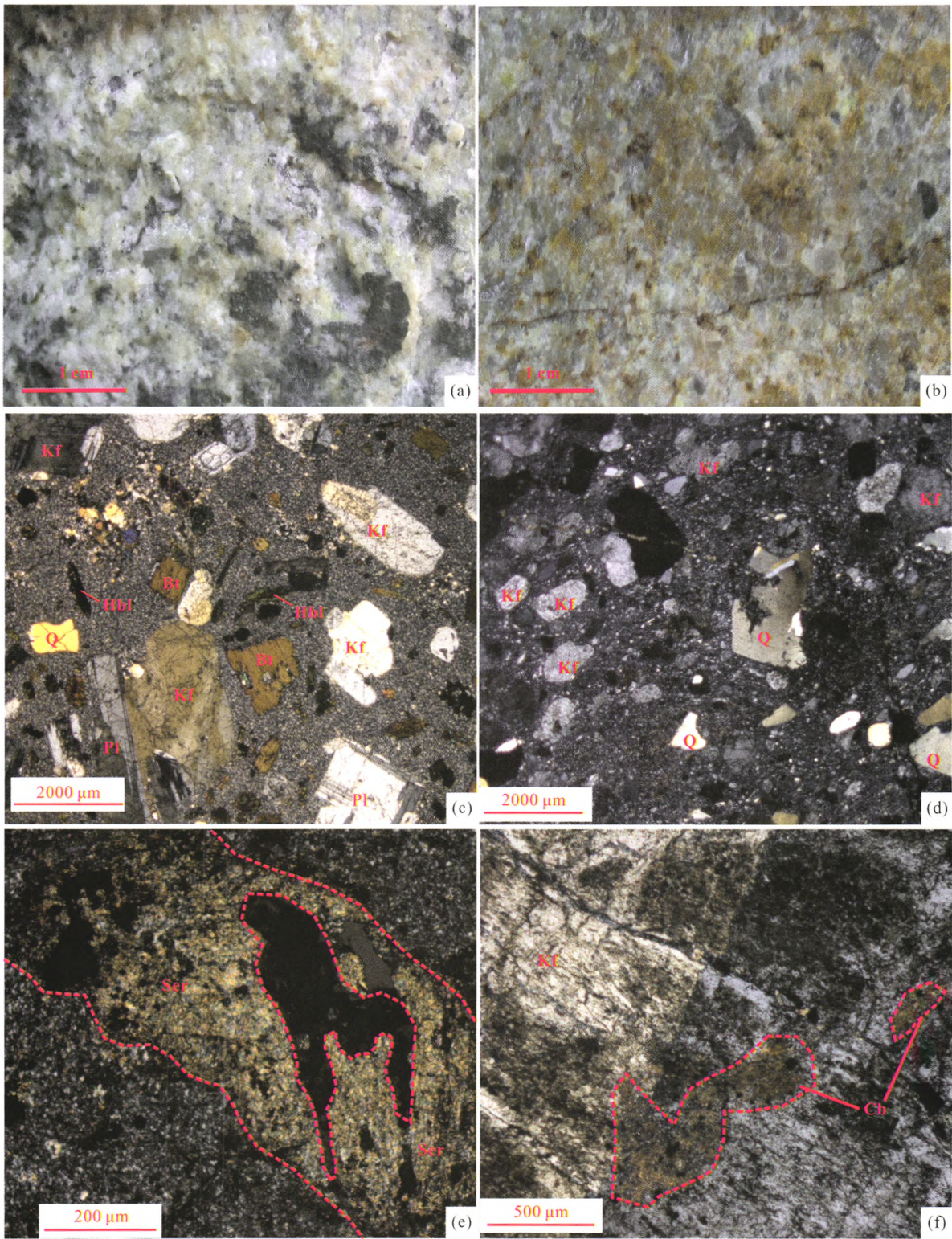
锆石 U-Pb 测定在中国科学院广州地球化学研

究所同位素地球化学国家重点实验室完成。采用单点剥蚀的方法(激光剥蚀斑束直径为 30 μm,频率为 8 Hz)。详细实验流程和数据处理见文献(涂湘林等, 2011)。应用实测²⁰⁴Pb 校正锆石中的普通铅。单个数据点的误差均为 1σ,采用年龄为²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,其加权平均值为 95% 的置信度。锆石 U-Pb 同位素及 U、Th 数据处理使用 Glitter 4.0 软件(Jackson et al., 2004)、U-Pb 谐和线图和加权平均年龄的计算及绘图用 Isoplot 3.0 软件(Ludwig, 2003)完成。为了减少继承铅、铅丢失等对年龄的影响,在²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 图中谐和度低于 90% 的年龄数据将被排除掉。

3.2 LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素分析方法

锆石 U-Pb 年龄测定后,再在原位用 LA-MC-ICP-MS 进行 Lu-Hf 同位素分析,测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。Lu-Hf 同位素测试使用 Thermo 公司制造的 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS),加载德国 Lamda Physik 公司制造的 Geolas193nm 准分子激光取样系统。激光束直径为 32 μm,剥蚀频率为 8 Hz,能量密度为 15 ~ 20 J/cm²,剥蚀时间约 60 s。详细的分析程序见(Wu et al., 2006; 谢烈文等, 2008)。数据标准化根据¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf = 0.7325,质量歧视校正用指数法则进行,Yb 和 Lu 的干扰校正取¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0.02655 和

① 河南省卢氏县地质勘查研究所. 2011. 1:2000 河南省卢氏县八宝山铁铜矿区地形地质及工程布置图.



Q. 石英; Kf. 钾长石; Bt. 黑云母; Hbl. 角闪石; Pl. 斜长石; Ser. 绢云母; Cb. 碳酸盐矿物。

图 3 八宝山岩体的典型岩石手标本和岩相学特征

Fig.3 Photos showing the petrography of the Babaoshan granite porphyries

$^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5887$ (Chu et al., 2002), 而 Yb 分馏校正则根据 $^{172}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}=1.35272$ 用指数法则进行 (Wu et al., 2006)。

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

本文选取了 3 个八宝山花岗斑岩岩体样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 其中, 钾长花岗斑岩样品两个: LSB-43 (地理坐标 $\text{N}34^{\circ}00'41''$, $\text{E}110^{\circ}52'47''$) 和 LSB-47 (地理坐标 $\text{N}34^{\circ}00'13''$, $\text{E}110^{\circ}53'15''$); 角闪石黑云母二长花岗斑岩一个, LSB-46 (地理坐标 $\text{N}34^{\circ}00'36''$, $\text{E}110^{\circ}52'52''$)。选出的锆石颗粒较大 ($70\sim250\text{ }\mu\text{m}$), 自形程度较高, 呈长柱状或短柱状, 长宽比约 $1:1\sim3:1$, 振荡环带发育, 具明显的岩浆锆石特征。其环带宽度较窄, 可能反映锆石结晶时岩浆温度不是很高, 导致微量元素扩散较慢, 形成较窄的岩浆环带 (吴元保等, 2004) (图 4)。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析结果见表 1。对 LSB-43 样品共分析了 15 个测点, 锆石的 Th、U 含量高 (分别集中在 $(677\sim1297)\times10^{-6}$ 和 $(371\sim1077)\times10^{-6}$ 之间), Th/U 比值为 $0.68\sim2.41$, 与典型的岩浆锆石特征相似 (吴元保和郑永飞, 2004)。对样品的 15 个分析点进行分析, 除 LSB-43-12 的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $140\pm2\text{ Ma}$ 并略微偏离谐和线

外, 其余 14 个点均位于谐和线上或非常接近谐和线, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据范围是 $144\sim151\text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $146.6\pm1.6\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.6$) (图 5a)。

对 LSB-47 样品中的锆石共分析了 15 个测点, 锆石的 Th、U 含量较高 (分别集中在 $(252\sim1633)\times10^{-6}$ 和 $(353\sim1630)\times10^{-6}$ 之间), Th/U 比值为 $0.43\sim1.39$, 与典型的岩浆锆石特征相似。对样品的 15 个分析点进行分析, 各点均位于谐和线上或非常接近谐和线, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据范围是 $144\sim150\text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $146.2\pm1.0\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.56$) (图 5b)。对两个钾长花岗斑岩样品锆石 U-Pb 定年结果表明, 其结晶年龄为 $\sim146\text{ Ma}$, 即钾长花岗斑岩形成于晚侏罗世。

对 LSB-46 样品中的锆石共进行了 18 个测点分析, 锆石的 Th、U 含量相对较低 (分别集中在 $(152\sim356)\times10^{-6}$ 和 $(248\sim538)\times10^{-6}$ 之间), Th/U 比值为 $0.5\sim0.9$, 是岩浆型锆石。对样品的 18 个分析点进行分析, 其中点 LSB-46-14 的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $142\pm2\text{ Ma}$ 并略微偏离谐和线, 其余 17 个点均位于谐和线上或非常接近谐和线, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据范围是 $138\sim152\text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $145.9\pm1.9\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=2.1$) (图 5c), 此年龄应代表角闪石黑云母二长花岗斑岩的结晶年龄。

以上测年结果表明矿区与矿化有关的角闪石黑云

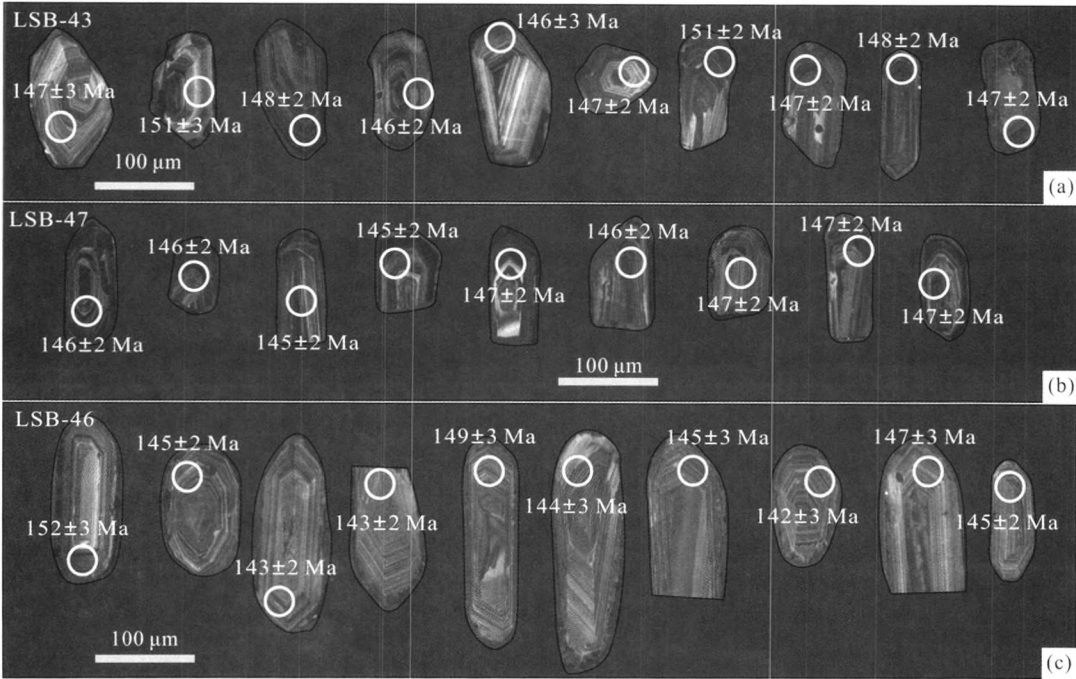


图 4 锆石阴极发光图

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from the Babaoshan granite porphyries

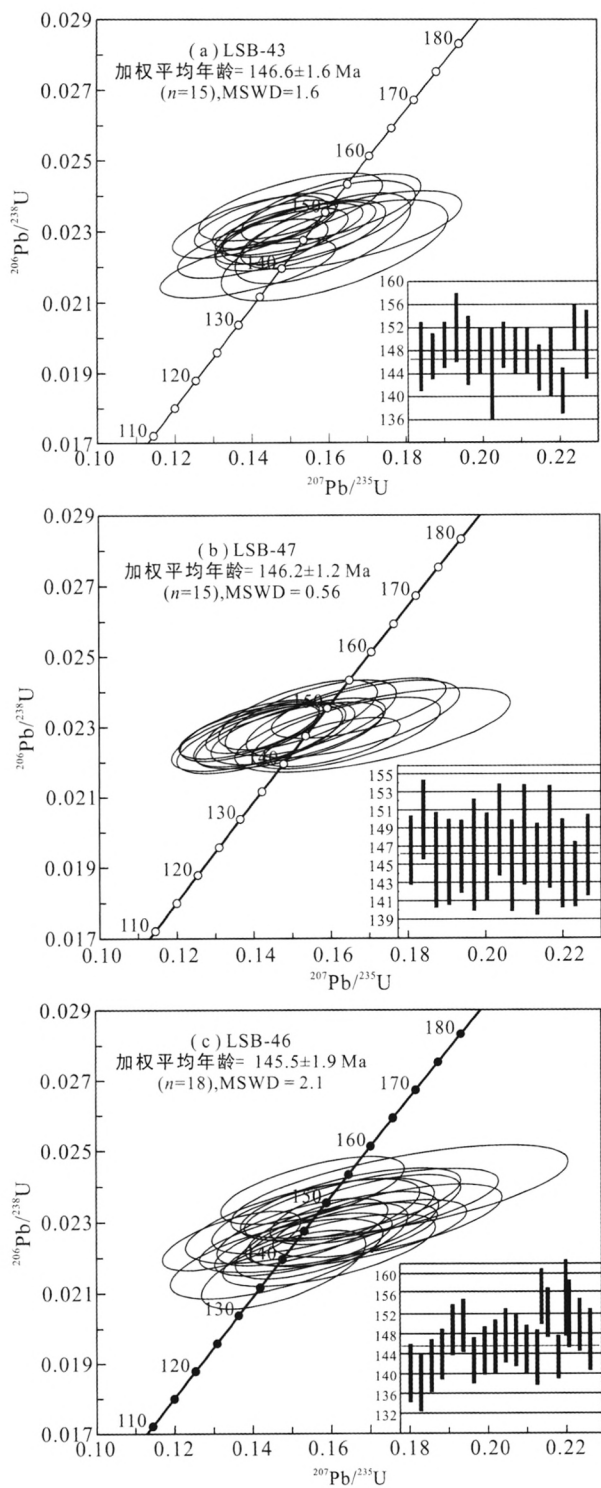


图5 八宝山花岗斑岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图
Fig. 5 U-Pb concordia plots for zircons from the Babaoshan granite porphyries

母二长花岗斑岩和钾长花岗斑岩均形成于晚侏罗世。

4.2 锆石的微量元素

锆石 REE 分析结果见表 2。与典型的岩浆锆石相似(Wilde et al., 2001),八宝山岩体钾长花岗斑岩及黑云母二长花岗斑岩具有非常相近的稀土含量和

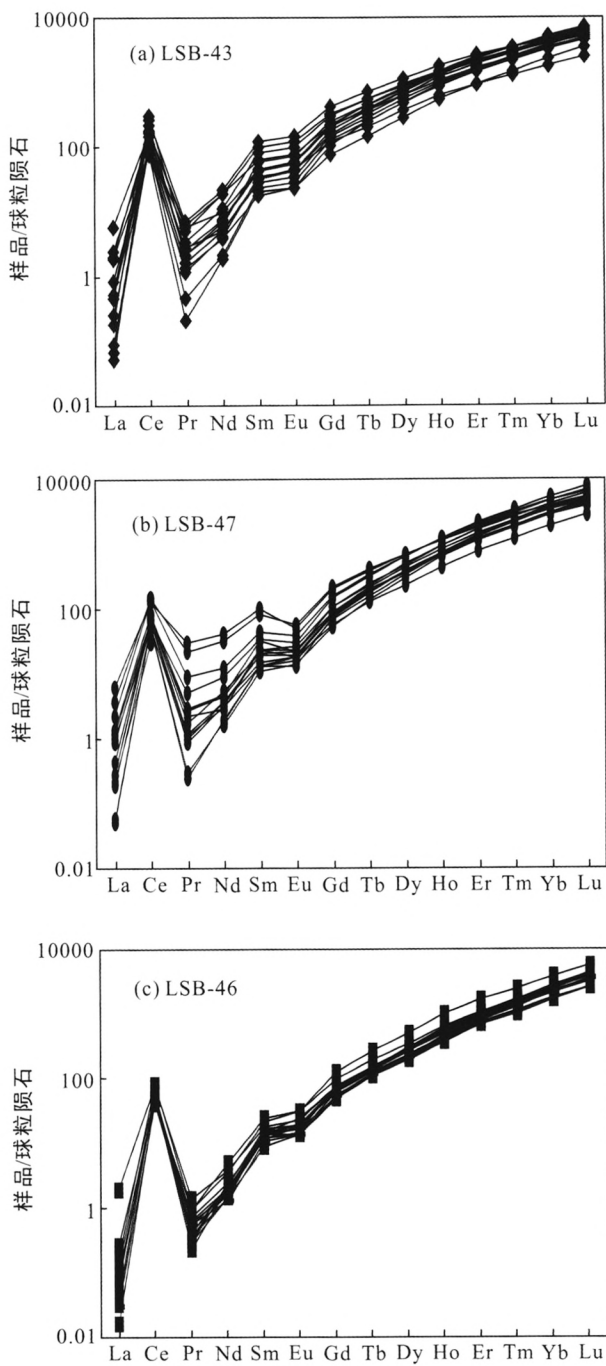


图6 八宝山花岗斑岩锆石稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(标准化数据来源于 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from the Babaoshan granite porphyries (after Sun and McDonough, 1989)

分布模式,均具有较高的 REE 含量($609 \times 10^{-6} \sim 2176 \times 10^{-6}$)、强烈富集重稀土($\Sigma \text{HREE} / \Sigma \text{LREE} = 7.9 \sim 30.5$),呈向左倾斜的稀土分布模式,具有强烈的 Ce 正异常(δCe 为 7 ~ 1188)和轻微的 Eu 负异常(δEu 为 0.37 ~ 0.58)(图 6)。

表 1 八宝山花岗岩斑岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb results for the Babaoshan granite porphyries

测点号	Th/U	含量 (×10 ⁻⁶)		同位素比值 ±1σ						年龄 (Ma)			
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
		Th	U	比值	σ	比值	σ	比值	σ	年龄	σ	年龄	σ
LSB-43-01	2.41	1297	538	0.04871	0.00276	0.15281	0.00906	0.02289	0.00041	144	8	146	3
LSB-43-02	1.14	801	704	0.04706	0.00216	0.14779	0.00709	0.02286	0.00032	140	6	146	2
LSB-43-03	0.68	677	997	0.04549	0.00197	0.14594	0.00656	0.02320	0.00028	138	6	148	2
LSB-43-04	1.93	671	347	0.05006	0.00285	0.16079	0.00954	0.02364	0.00040	151	8	151	3
LSB-43-05	1.54	312	202	0.05293	0.00360	0.16596	0.01175	0.02304	0.00045	156	10	147	3
LSB-43-06	1.76	1283	729	0.04706	0.00243	0.15251	0.00815	0.02306	0.00032	144	7	147	2
LSB-43-07	1.50	484	322	0.05180	0.00362	0.16158	0.01205	0.02247	0.00058	152	11	143	4
LSB-43-08	0.75	804	1077	0.04418	0.00226	0.14386	0.00763	0.02327	0.00033	136	7	148	2
LSB-43-09	2.03	1937	955	0.04732	0.00241	0.14985	0.00788	0.02306	0.00030	142	7	147	2
LSB-43-10	1.18	739	628	0.04392	0.00250	0.13967	0.00824	0.02313	0.00036	133	7	147	2
LSB-43-11	1.35	753	560	0.04520	0.00248	0.14036	0.00799	0.02252	0.00034	133	7	144	2
LSB-43-12	1.28	347	272	0.04980	0.00270	0.15862	0.00932	0.02281	0.00052	149	8	145	3
LSB-43-13	1.43	1152	803	0.04571	0.00298	0.13905	0.00932	0.02197	0.00034	132	8	140	2
LSB-43-14	1.32	869	658	0.04438	0.00279	0.15024	0.00977	0.02369	0.00039	142	9	151	2
LSB-43-15	2.36	878	371	0.04886	0.00305	0.15732	0.01034	0.02325	0.00048	148	9	148	3
LSB-46-01	0.72	312	436	0.04813	0.00400	0.14638	0.01120	0.02197	0.00046	139	10	140	3
LSB-46-02	0.49	175	357	0.04816	0.00308	0.14813	0.00866	0.02167	0.00045	140	8	138	3
LSB-46-03	0.60	259	432	0.05159	0.00368	0.15986	0.01121	0.02221	0.00041	151	10	142	3
LSB-46-04	0.45	218	485	0.04981	0.00395	0.15716	0.01252	0.02257	0.00040	148	11	144	3
LSB-46-05	0.47	206	444	0.05252	0.00334	0.16931	0.01002	0.02335	0.00040	159	9	149	3
LSB-46-06	0.55	227	409	0.05260	0.00428	0.17084	0.01336	0.02348	0.00042	160	12	150	3
LSB-46-07	0.65	283	432	0.04938	0.00288	0.15327	0.00935	0.02237	0.00036	145	8	143	2
LSB-46-08	0.58	221	382	0.05402	0.00366	0.16742	0.01140	0.02269	0.00038	157	10	145	2
LSB-46-09	0.47	238	507	0.05245	0.00347	0.16329	0.01015	0.02281	0.00042	154	9	145	3
LSB-46-10	0.60	244	407	0.05132	0.00382	0.15648	0.01096	0.02317	0.00043	148	10	148	3
LSB-46-11	0.53	229	432	0.05524	0.00379	0.17494	0.01205	0.02303	0.00042	164	10	147	3
LSB-46-12	0.66	318	484	0.04900	0.00301	0.15308	0.00901	0.02272	0.00038	145	8	145	2
LSB-46-13	0.50	245	486	0.05166	0.00336	0.15802	0.00908	0.02247	0.00043	149	8	143	3
LSB-46-14	0.90	352	393	0.04577	0.00281	0.15570	0.00967	0.02389	0.00039	147	8	152	2
LSB-46-15	0.74	356	483	0.04198	0.00231	0.13483	0.00729	0.02248	0.00034	128	7	143	2
LSB-46-16	0.61	152	248	0.05623	0.00635	0.17807	0.01774	0.02385	0.00053	166	15	152	3
LSB-46-17	0.45	178	392	0.05160	0.00384	0.16549	0.01159	0.02350	0.00041	155	10	150	3
LSB-46-18	0.53	283	538	0.04767	0.00379	0.15500	0.01311	0.02304	0.00049	146	12	147	3
LSB-47-01	0.43	1469	1061	0.04447	0.00199	0.14234	0.00605	0.02300	0.00030	135	5	147	2
LSB-47-02	0.54	664	897	0.05059	0.00289	0.16736	0.00925	0.02353	0.00035	157	8	150	2
LSB-47-03	0.55	598	676	0.05278	0.00326	0.16412	0.00996	0.02282	0.00042	154	9	145	3
LSB-47-04	0.60	434	793	0.04451	0.00262	0.14540	0.00855	0.02279	0.00037	138	8	145	2
LSB-47-05	0.61	822	1356	0.04291	0.00235	0.13886	0.00745	0.02288	0.00032	132	7	146	2
LSB-47-06	0.63	279	353	0.05388	0.00489	0.17096	0.01461	0.02291	0.00049	160	13	146	3
LSB-47-07	0.65	505	806	0.04561	0.00273	0.15162	0.00927	0.02288	0.00038	143	8	146	2
LSB-47-08	0.66	677	1247	0.04565	0.00272	0.15157	0.00845	0.02335	0.00040	143	7	149	3
LSB-47-09	0.68	489	744	0.04419	0.00289	0.14135	0.00924	0.02273	0.00040	134	8	145	3
LSB-47-10	0.68	495	824	0.04804	0.00289	0.15490	0.00909	0.02327	0.00044	146	8	148	3
LSB-47-11	0.74	556	823	0.04541	0.00293	0.14164	0.00879	0.02266	0.00040	135	8	144	3
LSB-47-12	0.79	252	590	0.05202	0.00370	0.16585	0.01130	0.02323	0.00045	156	10	148	3
LSB-47-13	0.89	359	551	0.04736	0.00317	0.14934	0.00994	0.02276	0.00039	141	9	145	2
LSB-47-14	1.20	1633	1360	0.05097	0.00241	0.16031	0.00724	0.02258	0.00029	151	6	144	2
LSB-47-15	1.39	575	851	0.04412	0.00249	0.13954	0.00761	0.02291	0.00036	133	7	146	2

表 2 八宝山花岗斑岩锆石稀土元素 ($\times 10^{-6}$) 测试结果

Table 2 REE results of zircons from the Babaoshan granite porphyries ($\times 10^{-6}$)

测点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Σ LREE	Σ HREE	Σ HREE/ Σ LREE	δ Eu	δ Ce
LSB-43-01	0.04	178	0.32	5.21	12.0	5.67	63.2	20.4	223	80.7	350	72.5	656	132	1802	201	1600	7.92	0.50	164
LSB-43-03	0.20	54.5	0.11	1.92	5.22	2.35	32.5	12.2	162	66.8	322	72.0	708	148	1590	64.3	1526	23.7	0.42	87.4
LSB-43-04	0.00	46.5	0.01	0.86	2.98	1.31	20.9	9.28	121	51.3	262	62.4	635	136	1351	51.7	1299	25.1	0.37	743
LSB-43-06	0.11	108	0.58	8.59	15.2	6.72	64.4	20.5	229	83.0	369	76.7	698	142	1824	139	1684	12.0	0.56	53.5
LSB-43-10	0.02	69.8	0.15	2.33	4.75	2.51	24.6	7.57	93.4	35.1	156	33.0	307	64.6	802	79.6	722	9.07	0.57	132
LSB-43-11	1.31	102	0.55	4.43	6.91	3.35	45.0	16.7	195	75.7	339	71.9	668	134	1666	119	1547	12.9	0.43	29.5
LSB-43-18	0.10	61.9	0.15	2.30	4.77	2.33	35.7	13.7	185	76.6	378	86.5	862	180	1892	71.6	1820	25.4	0.39	97.2
LSB-43-20	0.01	134	0.19	2.92	8.55	4.03	50.0	16.8	195	74.7	340	73.6	698	142	1741	149	1591	10.6	0.46	206
LSB-43-23	0.01	59.0	0.04	0.99	3.56	1.58	25.6	9.40	119	48.3	236	54.1	536	114	1211	65.2	1146	17.5	0.36	372
LSB-43-24	0.57	68.8	0.25	2.28	4.39	1.96	29.1	10.4	134	55.1	262	59.3	583	120	1333	78.3	1254	16.0	0.39	43.8
LSB-43-27	0.05	62.1	0.48	8.59	9.65	4.28	43.7	13.6	158	60.7	282	59.7	565	117	1386	85.2	1301	15.2	0.53	38.1
LSB-43-28	0.11	90.3	0.24	3.40	6.63	3.21	41.0	14.9	184	73.1	355	78.4	755	156	1763	103	1659	15.9	0.45	96.3
LSB-43-29	0.48	101	0.20	3.26	6.44	3.14	44.0	16.3	206	84.4	401	88.2	837	170	1964	114	1849	16.1	0.42	78.9
LSB-43-30	0.12	162	0.66	10.1	18.0	8.33	85.1	26.2	281	100	433	88.4	794	156	2166	200	1966	9.83	0.53	70.8
LSB-46-02	0.44	46.0	0.12	1.78	2.62	1.28	15.7	5.58	72.6	31.6	154	37.1	389	86.5	845	52.2	793	15.1	0.47	47.0
LSB-46-03	0.00	26.2	0.03	0.66	1.27	0.76	10.9	4.23	57.5	24.6	130	32.9	363	83.2	735	28.9	706	24.3	0.42	240
LSB-46-04	0.00	30.2	0.02	1.11	2.08	0.75	10.5	4.01	52.6	22.2	110	26.5	283	65.1	609	34.2	575	16.8	0.39	333
LSB-46-07	0.01	28.2	0.04	0.78	1.85	1.10	13.1	5.08	67.2	30.0	160	41.3	440	107	897	32.0	865	27.0	0.50	186
LSB-46-08	0.00	29.9	0.05	0.75	1.78	0.83	12.5	4.84	65.7	29.2	157	40.4	437	101	883	33.4	849	25.4	0.39	163
LSB-46-10	0.00	36.1	0.04	0.93	2.13	1.36	15.1	5.48	73.1	30.9	162	39.8	425	95.0	888	40.6	847	20.8	0.53	214
LSB-46-11	0.00	23.9	0.08	2.30	3.69	1.73	20.1	7.28	88.1	36.1	177	41.5	438	97.4	937	31.7	906	28.5	0.49	83.8
LSB-46-14	0.02	27.2	0.06	1.08	2.21	1.09	15.6	5.43	65.8	27.8	142	35.0	366	84.2	774	31.7	742	23.3	0.41	111
LSB-46-15	0.00	30.8	0.02	0.96	1.70	1.04	13.0	5.37	72.5	32.7	171	43.9	485	113	972	34.6	938	27.1	0.48	457
LSB-46-17	0.00	33.0	0.04	0.55	1.74	0.82	11.7	4.73	62.4	27.1	143	35.0	384	87.4	792	36.2	756	20.9	0.41	233
LSB-46-18	0.00	33.8	0.03	0.92	2.18	0.95	14.0	4.91	66.4	29.5	154	38.6	414	95.6	856	37.9	818	21.5	0.39	314
LSB-46-19	0.02	30.4	0.00	0.81	1.99	0.94	10.3	4.26	55.6	22.8	117	28.3	300	68.1	641	34.2	607	17.7	0.51	1139
LSB-46-20	0.06	33.4	0.06	0.94	2.13	1.04	14.5	5.44	71.5	31.0	162	41.8	451	106	922	37.7	884	23.4	0.42	122
LSB-46-21	0.03	49.9	0.08	1.61	3.20	1.80	25.0	9.85	130	56.3	282	63.9	654	140	1420	56.7	1363	24.0	0.43	153
LSB-46-23	0.00	35.4	0.03	1.05	2.51	1.03	12.8	4.49	58.7	25.3	121	29.7	303	68.1	664	40.0	624	15.5	0.45	258
LSB-46-27	0.02	30.1	0.00	0.92	1.79	0.76	9.86	3.99	50.3	21.2	110	27.4	290	66.8	615	33.6	581	17.2	0.44	781
LSB-46-28	0.00	24.5	0.05	0.60	1.60	0.79	11.1	4.20	57.3	25.9	136	34.3	373	91.7	763	27.5	735	26.6	0.42	141
LSB-46-30	0.00	35.6	0.02	0.68	2.22	1.03	15.2	5.61	75.3	33.6	176	43.2	469	111	969	39.6	930	23.4	0.40	404
LSB-47-01	0.88	92.8	2.10	15.5	13.1	3.36	45.1	15.1	172.	63.8	302	69.3	671	138	1606	127	1478	11.5	0.37	11.7
LSB-47-08	0.31	51.6	0.27	2.26	4.88	1.31	18.5	7.70	94.7	39.6	194	45.7	471	100	1033	60.7	973	16.0	0.36	40.2
LSB-47-09	0.06	40.7	0.09	1.77	2.34	1.05	16.6	7.15	93.3	39.7	203	47.4	479	102	1035	46.0	989	21.4	0.37	108
LSB-47-11	0.01	32.2	0.08	1.56	3.73	1.51	21.8	9.27	121	54.1	276	65.5	693	148	1430	39.1	1391	35.5	0.39	116
LSB-47-12	0.01	33.4	0.00	0.87	2.07	0.78	15.7	6.88	96.0	42.5	229	55.3	600	127	1211	37.1	1174	31.5	0.29	1188
LSB-47-13	0.04	31.5	0.02	0.90	2.07	1.09	11.6	5.00	59.7	25.6	127	30.3	320	69.1	685	35.7	649	18.1	0.53	237
LSB-47-15	0.10	44.1	0.16	2.51	3.21	1.28	22.3	8.94	123	54.6	277	68.3	698	152	1457	51.4	1405	27.3	0.34	67.0
LSB-47-20	0.53	85.3	0.87	5.82	6.98	2.35	33.6	12.7	164	68.5	353	86.4	921	199	1941	101	1839	18.0	0.38	24.3
LSB-47-21	0.06	49.7	0.21	1.36	3.57	1.08	17.3	7.21	97.2	41.0	207	49.9	521	109	1107	56.0	1051	18.7	0.34	65.4
LSB-47-23	0.20	42.9	0.26	2.13	3.71	1.35	18.2	8.29	110	47.5	246	59.8	642	137	1322	50.6	1271	25.1	0.41	38.6
LSB-47-24	0.01	41.5	0.11	1.78	3.02	1.13	17.0	6.95	96.8	42.0	220	54.2	567	121	1174	47.6	1126	23.6	0.37	106
LSB-47-25	0.05	18.9	0.00	0.76	1.63	0.82	11.3	5.37	75.0	35.6	185	47.7	508	110	1001	22.2	979	44.0	0.43	287
LSB-47-28	0.22	30.7	0.10	1.45	2.00	0.92	14.1	6.09	86.3	38.8	204	49.4	523	114	1073	35.4	1037	29.2	0.39	48.8
LSB-47-29	1.50	79.6	2.86	19.8	15.5	2.88	43.5	14.3	172	65.7	325	78.0	797	172	1792	122	1669	13.6	0.31	7.12
LSB-47-30	0.27	41.7	0.48	4.35	5.38	1.81	30.9	12.2	164	67.6	336	78.7	794	165	1704	54.0	1650	30.5	0.33	21.8

4.3 锆石 Hf 同位素组成

选取 3 个样品 (LSB-43、LSB-46、LSB-47) 已进行 U-Pb 定年的锆石颗粒进行 Hf 同位素原位分析,共测试了 43 个点,结果见表 3。分析表明两种斑岩 Hf 同位素组成非常一致。钾长花岗斑岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值为 0.281911~0.282415, 平均为 0.282068, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

介于 -27.55 ~ -9.42, 主要集中于 -27.55 ~ -20.71 之间,二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1.80~2.93 Ga。角闪黑云母二长花岗斑岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值为 0.281908~0.282310, 平均为 0.282032, 除一个点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 较高为 -13.19 外,其他介于 -27.30 ~ -21.90, 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 2.03~2.92 Ga。

表 3 八宝山花岗斑岩体 LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素原位分析测试结果
Table 3 LA-MC-ICP-MS Hf isotope composition of zircons from the Babaoshan granite porphyries

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM} (Ga)	t_{DM2} (Ga)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LSB-43-01	146	0.077563	0.001647	0.001917	0.000033	0.282044	0.000020	0.282039	-25.74	-22.73	1.74	2.63	-0.94
LSB-43-02	146	0.096938	0.001074	0.002461	0.000021	0.282062	0.000014	0.282056	-25.10	-22.14	1.74	2.60	-0.93
LSB-43-03	148	0.076646	0.000522	0.002012	0.000019	0.281996	0.000014	0.281991	-27.44	-24.39	1.82	2.74	-0.94
LSB-43-04	151	0.062373	0.000675	0.001565	0.000011	0.282058	0.000013	0.282054	-25.24	-22.09	1.70	2.60	-0.95
LSB-43-05	147	0.057184	0.000418	0.001484	0.000015	0.281989	0.000015	0.281985	-27.68	-24.61	1.80	2.75	-0.96
LSB-43-06	147	0.090670	0.000379	0.002272	0.000011	0.281921	0.000015	0.281915	-30.08	-27.09	1.93	2.91	-0.93
LSB-43-08	148	0.087857	0.001498	0.002243	0.000023	0.282018	0.000012	0.282012	-26.67	-23.65	1.80	2.69	-0.93
LSB-43-09	147	0.113590	0.000485	0.002800	0.000009	0.281955	0.000021	0.281947	-28.91	-25.96	1.91	2.84	-0.92
LSB-43-10	147	0.082646	0.000280	0.002090	0.000004	0.281999	0.000014	0.281994	-27.32	-24.31	1.81	2.73	-0.94
LSB-43-11	144	0.045921	0.000892	0.001175	0.000019	0.281980	0.000016	0.281976	-28.02	-24.98	1.80	2.77	-0.96
LSB-43-12	145	0.110249	0.001257	0.002782	0.000039	0.281911	0.000017	0.281903	-30.46	-27.55	1.98	2.93	-0.92
LSB-43-13	140	0.082060	0.001324	0.002056	0.000020	0.281974	0.000020	0.281968	-28.23	-25.36	1.85	2.79	-0.94
LSB-46-01	110	0.050663	0.001706	0.001286	0.000040	0.281959	0.000017	0.281956	-28.75	-26.44	1.83	2.84	-0.96
LSB-46-02	138	0.059974	0.001625	0.001676	0.000045	0.282084	0.000014	0.282079	-24.34	-21.47	1.67	2.55	-0.95
LSB-46-03	142	0.070515	0.001931	0.001846	0.000047	0.282080	0.000014	0.282075	-24.47	-21.53	1.69	2.56	-0.94
LSB-46-04	144	0.028325	0.000284	0.000839	0.000008	0.282312	0.000012	0.282310	-16.27	-13.19	1.32	2.03	-0.97
LSB-46-05	149	0.041929	0.000823	0.001102	0.000021	0.281911	0.000017	0.281908	-30.45	-27.30	1.89	2.92	-0.97
LSB-46-06	150	0.048537	0.000413	0.001377	0.000015	0.282044	0.000013	0.282040	-25.75	-22.60	1.72	2.63	-0.96
LSB-46-07	143	0.046819	0.000373	0.001328	0.000005	0.282010	0.000013	0.282007	-26.94	-23.94	1.76	2.71	-0.96
LSB-46-08	145	0.046827	0.000404	0.001279	0.000014	0.282066	0.000013	0.282063	-24.96	-21.90	1.68	2.58	-0.96
LSB-46-09	145	0.054419	0.000753	0.001565	0.000025	0.281994	0.000013	0.281990	-27.52	-24.50	1.80	2.74	-0.95
LSB-46-10	148	0.046230	0.000501	0.001331	0.000019	0.282042	0.000014	0.282038	-25.82	-22.71	1.72	2.64	-0.96
LSB-46-11	147	0.050288	0.000265	0.001385	0.000006	0.282038	0.000016	0.282034	-25.96	-22.87	1.73	2.64	-0.96
LSB-46-12	145	0.044638	0.000397	0.001294	0.000010	0.282065	0.000013	0.282062	-24.99	-21.94	1.68	2.58	-0.96
LSB-46-13	143	0.039388	0.000494	0.001137	0.000015	0.282021	0.000015	0.282018	-26.55	-23.52	1.74	2.68	-0.97
LSB-46-14	152	0.036170	0.000414	0.000998	0.000009	0.282030	0.000014	0.282027	-26.26	-23.03	1.72	2.66	-0.97
LSB-46-15	143	0.053146	0.000959	0.001418	0.000025	0.281973	0.000013	0.281970	-28.24	-25.24	1.82	2.79	-0.96
LSB-46-16	152	0.034903	0.000416	0.001015	0.000013	0.281964	0.000013	0.281961	-28.57	-25.34	1.81	2.80	-0.97
LSB-46-17	150	0.035924	0.000552	0.001004	0.000013	0.282044	0.000012	0.282041	-25.74	-22.55	1.70	2.63	-0.97
LSB-46-18	147	0.056484	0.001322	0.001543	0.000036	0.281998	0.000013	0.281994	-27.37	-24.30	1.79	2.73	-0.95
LSB-47-01	147	0.065615	0.000462	0.001734	0.000004	0.282040	0.000014	0.282035	-25.89	-22.84	1.74	2.64	-0.95
LSB-47-02	150	0.073037	0.000175	0.001942	0.000010	0.282203	0.000013	0.282197	-20.13	-17.04	1.52	2.28	-0.94
LSB-47-03	145	0.148049	0.004386	0.003462	0.000094	0.282078	0.000014	0.282069	-24.53	-21.69	1.77	2.57	-0.90
LSB-47-04	145	0.084670	0.000832	0.002270	0.000019	0.282087	0.000014	0.282081	-24.22	-21.26	1.70	2.54	-0.93
LSB-47-06	146	0.058378	0.000710	0.001544	0.000018	0.282419	0.000015	0.282415	-12.47	-9.42	1.19	1.80	-0.95
LSB-47-07	146	0.097306	0.000504	0.002642	0.000019	0.282264	0.000018	0.282257	-17.95	-15.01	1.46	2.15	-0.92
LSB-47-08	149	0.077659	0.001086	0.002075	0.000019	0.282181	0.000012	0.282175	-20.90	-17.84	1.55	2.33	-0.94
LSB-47-10	148	0.104453	0.000516	0.002854	0.000022	0.281992	0.000013	0.281985	-27.57	-24.61	1.86	2.75	-0.91
LSB-47-11	144	0.140531	0.002819	0.003608	0.000072	0.282107	0.000017	0.282097	-23.52	-20.71	1.73	2.50	-0.89
LSB-47-12	148	0.140167	0.003308	0.003250	0.000065	0.282088	0.000013	0.282079	-24.20	-21.28	1.74	2.54	-0.90
LSB-47-13	145	0.045822	0.001019	0.001254	0.000024	0.282270	0.000014	0.282266	-17.76	-14.70	1.40	2.13	-0.96
LSB-47-14	144	0.116838	0.002311	0.002928	0.000045	0.282136	0.000013	0.282128	-22.51	-19.63	1.66	2.44	-0.91
LSB-47-15	146	0.099417	0.001299	0.002599	0.000045	0.281926	0.000016	0.281919	-29.91	-26.97	1.95	2.90	-0.92

5 讨 论

5.1 岩体的形成时代

八宝山岩体一直缺少精确的同位素定年资料,前人所报道的结果为 K-Ar 法年龄,变化范围是 172 ~ 173.6 Ma (河南省地质局地质四队,1977^②;刘家齐和曾贻美,2001)。由于 K-Ar 同位素体系的封闭温度较低且容易受到后期构造-热事件的干扰,因此其年龄的可信度较低。

锆石 U-Pb 定年结果表明,八宝山钾长花岗斑岩和黑云母二长花岗斑岩的形成时代在误差范围内是一致的,~146 Ma (图 3、表 1),即岩体为晚侏罗世燕山期岩浆活动的产物。在东秦岭造山带的华北南缘构造域发育大量中生代花岗岩,对区内构造岩浆组合的研究结果显示晚侏罗世区域地球动力学背景为碰撞造山后的由挤压到伸展的构造体制转折(翟明国等,2004; Mao et al., 2008, 2010; 王晓霞等,2011)。八宝山岩体正是这一构造体制转换阶段岩浆作用的产物。

5.2 岩浆源区特征

花岗岩的同位素组成是示踪其物源特征的重要手段之一。由于锆石是一种非常稳定的矿物,其封闭温度高,即使在麻粒岩相等高级变质条件下,也很少受到后期岩浆热事件的影响,所测样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 基本可以代表形成时体系的 Hf 同位素组成 (Amelin et al., 1999; 向君峰等, 2010)。八宝山岩体中锆石的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 介于 -0.89 ~ -0.97 之间,明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 值 (-0.34, Amelin et al.,

2000) 和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 值 (-0.72, Vervoort et al., 1996), 故二阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})$ - t 图解 (图 7) 中,均显示八宝山岩体的成岩物质来源于古老地壳。样品投点主要落在 2.5 ~ 3.0 Ga 演化曲线之间,少量落在 1.8 ~ 2.5 Ga 演化曲线之间,具显著的壳源特征。

八宝山岩体产于华北克拉通南缘,其岩浆源区可能为:(1)华北地块南缘的中-下地壳岩层(即太华群和/或熊耳群)(齐秋菊等,2012);(2)俯冲于华北克拉通南缘地壳之下的扬子陆壳(包志伟等,2009)。

根据太华群中岩浆锆石的 Hf 同位素 (第五春荣等, 2007), 计算得到太华群的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t = 146 \text{ Ma})$ 值为 -48 左右,明显比本文所测八宝山花岗斑岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值小,说明太华群不可能单独作为八宝山岩体的源区。将熊耳群的 Nd 同位素组成 (赵太平等, 2007) 计算到八宝山岩体形成时 ($t = 146 \text{ Ma}$) 的 ε_{Nd} 值为 -25 左右,再采用“地壳 Hf-Nd 相关公式” ($\varepsilon_{\text{Hf}} = 1.34 \times \varepsilon_{\text{Nd}} + 2.82$) (Vervoort et al., 1999), 换算得到熊耳群的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(146 \text{ Ma})$ 为 -30 左右,也明显小于所测八宝山花岗斑岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,表明熊耳群也不可能单独作为八宝山岩体的源区。中生代扬子陆块携同南秦岭俯冲进入华北陆块南缘下部地壳,俯冲陆壳可能是八宝山岩体的主要源区。

我们将南秦岭的 Nd 同位素组成 (沈洁和张宗清, 1997) 计算到八宝山岩体形成时 ($t = 146 \text{ Ma}$) 的 ε_{Nd} 值为 -15 左右,再采用“地壳 Hf-Nd 相关公式”

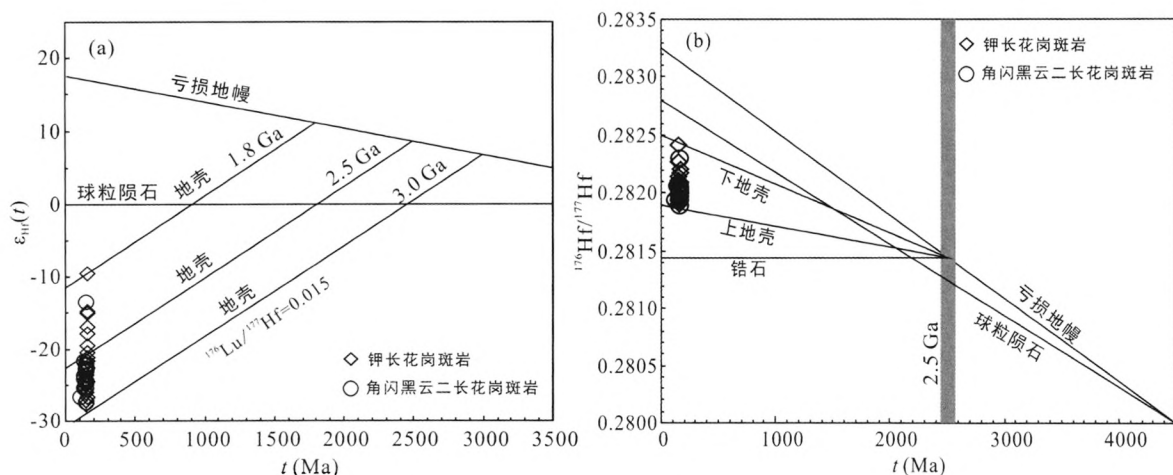


图 7 八宝山岩体的锆石 Hf 同位素特征

Fig. 7 Hf isotopic composition of zircons from the Babaoshan granite porphyries

② 河南省地质局地质四队. 1977. 河南省卢氏县八宝山矿区铁铜矿勘探地质报告.

表 4 二端元混合模拟计算表
Table 4 Simulation calculation for the mixing of the two end members

端元成分	Hf	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	F(南秦岭)	Hf _{mix}	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)_{\text{mix}}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 八宝山
太华群	3.49	-48	60%	4.08	-27.62	-27.55 ~ -20.71
南秦岭	4.47	-17	85%	4.32	-20.76	

模拟参数来自：第五春荣等,2007;沈洁和张宗清,1997;赵子然等,1995。

(Vervoort et al., 1999), 换算得到南秦岭的 ε_{Hf} (146 Ma) 为 -17 左右, 略大于所测八宝山花岗斑岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。

综上所述, 我们可以推断八宝山岩体的源区可能是俯冲的扬子克拉通陆壳与太华群和熊耳群的混合。为了进一步确定他们之间的混合关系, 我们进行了简单的二端元混合模拟计算(表 4), 结果表明八宝山岩体的源区可能主要来源于南秦岭和扬子陆块的部分熔融(60% ~ 85%), 但在岩浆形成过程中混入少量太华群和熊耳群的物质。

5.3 地球动力学背景探讨

秦岭全面的陆陆碰撞发生在中生代初期(245 ~ 235 Ma), 并在侏罗纪达到高峰(张国伟等, 1996b)。扬子陆块携同南秦岭逐步向华北陆块南缘俯冲(Zheng, 2003; 刘福来, 2003), 到中侏罗世秦岭造山带完成最终拼合(Gilder and Courtillot, 1997)。晚侏罗世 - 早白垩世, 造山带发育大量钾长花岗岩、富碱中酸性火山岩, 并广泛发育侏罗纪断陷盆地和红色磨拉石建造。在约 160 ~ 136 Ma 期间, 由于受到特提斯构造域和太平洋构造域构造动力的影响, 整个中国东部处于地球动力学体制转换的过程(任纪舜, 1991; 赵越, 1994; 牛宝贵等, 2003), 构造体制由挤压向伸展转变。而八宝山岩体的形成年龄正对应于晚侏罗世至早白垩世由挤压向伸展减薄转换的阶段。增厚的岩石圈拆沉作用、软流圈隆升, 导致由于比重差异上浮并滞留在华北南缘下地壳部位的扬子俯冲陆壳发生部分熔融, 在熔浆汇聚和上侵过程与太华群和熊耳群发生相互作用而形成八宝山岩体。

6 结 论

(1) 八宝山岩体主要由钾长花岗斑岩和黑云母二长花岗斑岩组成, 其锆石 U-Pb 年龄为 ~146 Ma, 为同期岩浆作用的产物。

(2) 八宝山岩体可能为造山后挤压向伸展转换过程中扬子俯冲陆壳部分熔融的产物, 成岩过程中可能混入少量太华群和熊耳群的物质。

致谢：野外工作得到了卢氏县北方矿业有限公司的大力支持, 锆石挑选得到了河北廊坊诚信地质服务公司的帮助, 锆石 U-Pb 定年测试和 Hf 同位素测试得到中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的支持, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References):

包志伟, 曾乔松, 赵太平, 原振雷. 2009. 东秦岭钼矿带南泥湖 - 上房沟花岗斑岩成因及其对钼成矿作用的制约. 岩石学报, 25(11): 2523 - 2536.

陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式与找矿潜力. 中国地质, 33(6): 1181 - 1196.

陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. 岩石学报, 25(11): 2695 - 2726.

第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 柳小明, 王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. 岩石学报, 23(2): 253 - 262.

刘福来. 2003. 南苏鲁毛北地区片麻岩锆石中的特殊矿物包体: 指示 >120 km 深俯冲的证据. 岩石学报, 19(3): 479 - 489.

刘家齐, 曾贻美. 2001. 豫西八宝山斑岩型铜铁矿床包裹体研究. 华南地质与矿产, (2): 43 - 51.

卢欣祥, 于在平, 冯有利, 王义天, 马维峰, 崔海峰. 2002. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景. 矿床地质, 21(2): 168 - 178.

罗铭钦, 张辅民, 董群英. 1991. 中国钼矿床. 郑州: 河南科学技术出版社: 1 - 408.

牛宝贵, 和政军, 宋彪, 任纪舜. 2003. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义. 地质通报, 22(2): 140 - 141.

齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 李金宝. 2012. 华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据. 岩石学报, 28(1): 279 - 301.

任纪舜. 1991. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征. 中国区域地质, (4): 289 - 293.

沈洁, 张宗清. 1997. 东秦岭陡岭群变质杂岩 Sm-Nd、Rb-Sr、⁴⁰Ar/³⁹Ar、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄. 地球学报, 18(3): 248 - 254.

涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东.

2011. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用. 地球化学, 40(1): 83-98.
- 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 李舫. 2011. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布, 成因演变及构造意义. 岩石学报, 27(6): 1573-1593.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 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.
- 肖中军, 孙卫志. 2007. 河南卢氏夜长坪钼钨矿床成矿条件及找矿远景分析. 地质调查与研究, 30(2): 141-148.
- 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报, 53(2): 220-228.
- 颜正信, 孙卫志, 张年成, 周梅, 黄智华. 2007. 河南灵宝银家沟硫铁多金属矿床成矿地质条件及找矿方向. 地质调查与研究, 30(2): 149-157.
- 杨德彬, 许文良, 王冬艳, 王清海, 裴福萍. 2004. 河南三门峡市曲里石英闪长斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 中国地质, 31(4): 379-383.
- 印修章, 胡爱珍. 2004. 以闪锌矿标型特征浅论豫西若干铅锌矿成因. 物探与化探, 28(5): 413-417.
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟, 邵济安, 朱日祥. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘, 11(3): 285-297.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996a. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学(D 辑), 26(3): 193-200.
- 张国伟, 郭安林, 刘福田, 孟庆任, 肖庆辉. 1996b. 秦岭造山带三维结构及其动力学分析. 中国科学(D 辑), 26(增刊): 1-6.
- 赵太平, 徐勇航, 翟明国. 2007. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩的成因与构造环境: 事实与争议. 高校地质学报, 13(2): 1-206.
- 赵越. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29(2): 105-119.
- 赵子然, 万渝生, 张寿广, 魏春景. 1995. 早元古陡岭群变质杂岩的岩石地球化学特征. 岩石学报, 11(2): 148-159.
- Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24): 4205-4225.
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N and Pidgeon R T. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399(6733): 252-255.
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C R, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567-1574.
- Gilder S and Courtillot V. 1997. Timing of the North-South China collision from new middle to late Mesozoic paleomagnetic data from the North China Block. *Journal of Geophysical Research*, 102(B8): 17713-17727.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L and Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 11(1-2): 47-69.
- Ludwig. 2003. ISOPLOT 3: A geochronological toolkit for Microsoft excel. *Berkeley Geochronology Centre, Special Publication*, 4: 74.
- Mao J W, Wang Y, Zhang Z H, Yu J J and Niu B G. 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 46(8): 838-851.
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qu W J, Du A D, Ye H S, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F and Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(18): 4607-4626.
- Mao J W, Xie G Q, Pirajno F, Ye H S, Wang Y B, Li Y F, Xiang J F and Zhao H J. 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(1): 51-78.
- Meng Q and Zhang G. 2000. Geological framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 323(3-4): 183-196.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, Webb L E, Grimmer J C, McWilliams M O, Ireland T, Dong S and Hu Jianmin. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 366(1-2): 1-53.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publications*, 42(1): 313-345.
- Vervoort J D, Patchett P J, Blichert-Toft J and Albarede F. 1999. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system. *Earth and Plane-*

- tary Science Letters, 168(1): 79–99.
- Vervoort J D, Patchett P J, Gehrels G E and Nutman A P. 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. *Nature*, 379: 624–627.
- Wilde S A, Valley J W, Peck W H and Graham C M. 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409(6817): 175–178.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1): 105–126.
- Zheng Y. 2003. Mineralogical evidence for continental deep subduction. *Chinese Science Bulletin*, 48(10): 952–954.

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition of the Babaoshan Granite Porphyries in Lushi County, Henan Province

ZENG Lingjun^{1,2}, XING Yucai³, ZHOU Dong^{1,2}, ZHAO Taiping¹,
YAO Junming¹ and BAO Zhiwei¹

(1. CAS Key Laboratory for Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. No. 1 Institute of Geological Survey, Geological Bureau of Henan Province, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: The Babaoshan granite intrusion in Lushi county, Henan province, is tectonically located in the southern margin of North China Craton, on the western part of East Qinling orogen. The granite intrusion occurs as circular column which might have been the neck of volcanic edifice; while the associated iron ore deposit with accompanying Cu-Mo-Pb-Zn mineralization makes it a unique target for metallogenetic investigation in East Qinling area. The Babaoshan granite intrusion is a zoned granitic stock consisting of syenogranite porphyry in the outer zone and biotite monzogranite porphyry in the inner zone. LA-ICP-MS zircon U-Pb determination indicates that the syenogranite porphyry and biotite monzogranite porphyry are roughly coeval, formed at 146.6 ± 1.6 Ma and 145.9 ± 1.9 Ma, respectively. Zircon Hf isotope compositions of the syenogranite porphyry and biotite monzogranite porphyry are proximately identical, with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values vary in ranges of $-27.55 \sim -20.71$ and $-27.30 \sim -21.90$, with Hf crustal model ages($t_{\text{DM}2}$) of $1.80 \sim 2.93$ Ga and $2.03 \sim 2.92$ Ga, respectively, indicative of crustal origin. Considering the tectonic evolution and geochemical characteristics of the granite as well as other Mesozoic granites in the southern margin of North China Craton, we suggest that the Babaoshan granite along with other Mesozoic granites was most likely derived from partial melting of subducted crust of Yangtze Craton, and possibly with minor involvement of the Taihua Group and Xiong'er Group under extensional tectonic regime following depression of the subduction-collision between the Yangtze and North China cratons.

Keywords: Babaoshan granite; southern margin of the North China Craton; zircon U-Pb age; zircon Hf isotope; petrogenesis