

北秦岭四方台基性-超基性杂岩锆石 LA-ICP-MS 年代学研究

刘军锋¹, 孙 勇², 李洪英³, 杨 磊⁴

- (1. 长安大学 地球科学与国土资源学院, 西部地质资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;
2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069;
3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 中海石油研究中心, 北京 100027)

摘要:四方台杂岩体是北秦岭沿商-丹带出露的基性-超基性杂岩体中最大的一个, 出露面积约 40 km², 由超基性-基性-中性岩石组成, 侵入到丹凤群中。对四方台杂岩体中辉长岩锆石进行 LA-ICP-MS 微区定年研究, 获得岩体的成岩时代为 460 ± 29 Ma。获得的 32 个测点可明显地分为 400~500 Ma、700~900 Ma、1 800~2 600 Ma 和 2 700~2 918 Ma 这 4 个时段, 可能分别代表了北秦岭造山带不同地质时期的构造-岩浆事件的时代信息。其中 400~500 Ma 与北秦岭地区表现强烈的加里东运动时限一致, 而 700~900 Ma 则可能与 830~740 Ma 中国中西部地区响应积极的、造成 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱活动有关。

关键词:北秦岭; 四方台; LA-ICP-MS; 基性-超基性杂岩; 锆石 U-Pb 定年

中图分类号: P588.12⁺4; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)04-0524-07

LA-ICP-MS zircon dating of Sifangtai mafic-ultramafic complex in the North Qinling orogenic belt

LIU Jun-feng¹, SUN Yong², LI Hong-ying³ and YANG Lei⁴

- (1. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Research Center, CNOOC, Beijing 100027, China)

Abstract: Sifangtai complex is the largest mafic-ultramafic intrusion along the Shangdan fault in the North Qinling orogenic belt, covering an area of ~40 km². It consists mainly of ultramafites, pyroxenite and minor intermediate rocks, intruding into the Danfeng Group. A combined study of cathodoluminescence images (CL) and *in situ* LA-ICP-MS U-Pb isotope dating was carried out for zircons from the Sifangtai gabbro. Cathodoluminescence images show two kinds of zircon grains, i. e., prismatic ones with clear magmatic zonations and round ones with complicated internal structure, some of the latter ones having no magmatic zonation. Altogether 32 U-Pb analyses were made for cores and overgrowths of 26 zircon grains, and the magmatic age 460 ± 29 Ma of Sifangtai mafic-ultramafic complex was obtained. The 32 data can be divided into 4 phases: 400~500 Ma, 700~900 Ma, 1 800~2 600 Ma and 2 700~2 918 Ma. The result of 400~500 Ma is consistent with the Caledonian movement in the Qinling orogenic belt, while the result of 700~900 Ma is probably related to the mantle superplume that broke up Rodinia in middle and west China during 830~740 Ma.

收稿日期: 2012-02-12; 修订日期: 2012-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30773044); 长安大学中央高校基金(CHD2010JC042); 中央级公益性科研院所基本业务费资助项目(K1019)

作者简介: 刘军锋(1979-), 男, 副研究员, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: ljfnwu2002@163.com

Key words: North Qinling; Sifangtai; LA-ICP-MS; mafic-ultramafic complex; zircon U-Pb dating

秦岭山脉横贯中国大陆中部,位于我国南北两个最大陆块中朝克拉通华北陆块和扬子板块结合域,其形成和演化历史一直是地质学的研究热点。由于秦岭是由复杂地壳组成的复杂的大陆碰撞造山带,并且其结构历经长期不同构造体制演化,因此有关秦岭构造演化等基础地质问题长期意见不一致。

在北秦岭地区,沿秦岭造山带主缝合带商-丹断裂呈线性分布着许多透镜状镁铁-超镁铁质杂岩体,如陕西周至县后畛子、四方台、商州拉鸡庙、商南县富水关岩体等。这些岩体多为镁铁-超镁铁质杂岩体,由于位置特殊,加之来源较深,它们形成时代的确定对秦岭造山带的演化历史有重要的约束作用,对于探讨秦岭-大别造山带的演化模式至关重要。目前对这些岩体的成岩时代存在较大分歧(约 400~1 000 Ma)(张国伟等,1987;李曙光等,1989;裴先治,1997;苏犁等,2004;李惠民等,2006)。笔者曾对四方台做过岩石地球化学和成因方面的研究工作(刘军锋等,2008)。本次研究工作选择四方台岩体中的辉长岩,进行高精度 LA-ICP-MS 锆石定年,以探讨该岩体时代,为秦岭造山带的演化提供重要的年代学约束。

1 地质概况

秦岭造山带位于华北和扬子板块之间,横亘于中国中部。传统上商-丹带把秦岭分为南秦岭和北

秦岭,北秦岭主要由秦岭群、宽坪群和古生代二郎坪岛弧火山岩系组成。秦岭群是北秦岭最老的结晶基底,是一套中高级变质岩系,主要由大理岩和片麻岩组成。在秦岭群的南侧出露古生代丹凤群岛弧火山岩系。南秦岭主要是一套前寒武纪变质火山岩系,主要由陡岭、长角坝、五关和武当等岩群组成(张国伟等,1987;张本仁等,1996;裴先治,1997)。

四方台杂岩体地理上位于陕西省周至县境内,构造位置上位于北秦岭商-丹带的北侧,商-丹带在其南侧约 1.5 km 处通过(图 1)。该岩体平面上呈东西宽、南北窄的椭圆形,东西长约 13 km,南北宽约 4 km,出露面积大于 40 km²。岩体除北侧与金井岩体呈断层接触外,其余均与丹凤岩群火山岩呈侵入接触,岩体边部和近边部可见丹凤群火山岩的捕虏体。岩体中各单元基本上未变质,保存很好的火成结构,表明辉长岩是在丹凤群主变质期后侵入的。杂岩体从边部到中心部位,岩石由基性向超基性过渡,西部较东部基性程度更高。四方台岩体可分为 4 个构造单元:大滩沟单元、前梁上单元、黑沟梁单元和三道沟单元(刘军锋等,2008)。详细的野外工作和室内显微镜岩石学研究将四方台杂岩体划分为 4 个单元的岩石类型,由岩体中心到岩体边缘依次为橄榄岩+辉石岩相、苏长岩+辉长苏长岩相、辉长岩+辉绿岩相、闪长岩相。4 个岩相之间呈渐变过渡关系(刘军锋等,2008)。

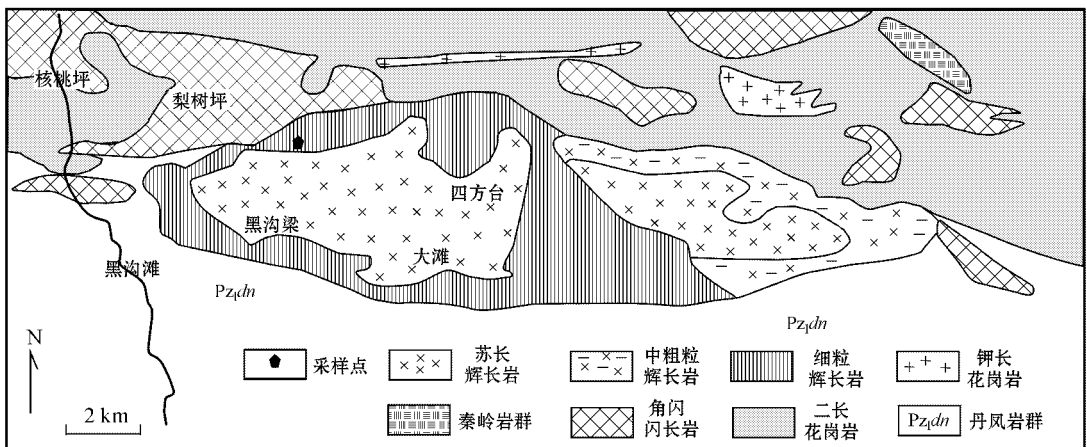


图 1 四方台杂岩体地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Sifangtai mafic-ultramafic complex

2 定年样品与分析方法

已有的野外地质、岩石学和地球化学研究表明(刘军锋等, 2008), 辉长岩是该杂岩体的重要组成部分。本次研究工作采样点位于该杂岩体的中部, 为辉长岩+辉绿岩相段。从约 30 kg 辉长岩样品中分离出锆石, 进行微量元素和 U-Pb 定年分析。首先, 将辉长岩样品用机械方法粉碎至 $\sim 200 \mu\text{m}$, 再用传统的重选和磁选方法分离出锆石 100 多颗。锆石大多呈无色透明, 少数淡黄色, 柱状, 半自形-自形, 长宽比在 2:1 左右, 部分呈现浑圆状, 该样品锆石颗粒大小中等, 长轴一般不超过 $150 \sim 200 \mu\text{m}$, 短轴在 $50 \sim 70 \mu\text{m}$ 之间。多数晶体的棱面显得不是很平整。

锆石的 CL 图像拍照在西北大学扫描电镜实验室完成, 采用 FEI 公司的 XL30 型 SFEG 电子束进行锆石内部结构显微照相分析。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。首先把锆石分为不同的粒级, 根据尽可能选择粒度较大且均匀、无包裹体、无裂隙和不同颜色、晶形的原则, 在双目镜下挑选出 26 颗锆石。将选好的锆石用环氧树脂固定, 用不同型号的砂纸和磨料将锆石磨去近一半后抛光。分析前, 用扫描电镜对锆石做了阴极发光 (CL) 照相。测试点的选取首先根据锆石反射光和透射光照片进行初选, 再与 CL 照片进行反复对比, 力求避开包裹体, 以获得尽可能可靠的年龄信息。

测试使用的 ICP-MS 为 Agilent 7500, 采用德国 193nm ArF 准分子 (excimer) 激光器的 Geo Las200 M 剥蚀系统。测定时采用 10 Hz 的激光频率和 $30 \mu\text{m}$ 的激光直径, 激光剥蚀深度为 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ 。实验中用 He 气作为剥蚀物质的载气, 并以 91500 作为外标, ^{29}Si 作为内标, 普通铅校正采用 Andersen (2002) 方法, 其年龄结果采用 ISOPLOT 程序计算。元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标。单点分析的相对标准偏差 (RSD) 对于大多数元素 RSD 介于 $1\% \sim 2.6\%$ 之间 (柳小明等, 2002)。样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER (ver4.0, Macquarie University), 具体实验方法及实验参数见文献 (Yuan *et al.*, 2003)。

3 分析结果

对挑选的好的锆石, 共进行了 32 个有效点分

析。阴极发光 (CL) 图像 (图 2) 显示, 锆石明显可以分为两类: 一类多为晶形完好的自形晶, 粒度比较均匀, 粒度为 $150 \sim 200 \mu\text{m}$, 锆石具有典型的岩浆振荡环带结构; 另一类锆石晶形较差, 有的隐约可以看到早期的岩浆环带, 但大多数看不到这一特征。

锆石 32 个有效测试点的 U-Pb 同位素测年结果见表 1 (年龄 $< 900 \text{ Ma}$ 的样品采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 其余的采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值)。由表 1 可见, 所有测点的 Th、U 含量较高, 其中 U 含量为 $70 \times 10^{-6} \sim 949 \times 10^{-6}$; Th/U 除 1、2 个点外, 其余都 > 0.3 , 最高达 2.28, 可以认为整体上是岩浆成因锆石。U-Pb 一致年龄谐和图见图 3。测试结果年龄数据变化较大, 所有测点都在谐和线上或附近的区域内。其中位于下交点附近的 4 个数据点 (图 2a), 均沿不一致线分布, 所得加权年龄为 $460 \pm 29 \text{ Ma}$ (图 4), 该年龄数据可以代表四方台岩体的成岩年龄。其他 28 个样点的年龄变化范围比较大, 其中 2 个年龄值在 $700 \sim 900 \text{ Ma}$ 之间, 其余年龄均 $> 900 \text{ Ma}$, 年龄值分布在 $1817 \sim 2918 \text{ Ma}$ 之间。结合 CL 图像观察, 认为它们均为捕获锆石。

对所测的 32 个锆石年龄进行统计分析, 发现年龄数据可明显地分为 $0.4 \sim 0.5 \text{ Ga}$ 、 $0.7 \sim 0.9 \text{ Ga}$ 、 $1.8 \sim 2.6 \text{ Ga}$ 和 $2.7 \sim 2.9 \text{ Ga}$ 这 4 个时段 (图 5), 可能分别代表了北秦岭造山带不同地质时期构造-岩浆事件的时代信息。其中 $0.4 \sim 0.5 \text{ Ga}$ 与北秦岭地区表现强烈的加里东运动时限一致, 而 $0.7 \sim 0.9 \text{ Ga}$ 则可能与 $830 \sim 740 \text{ Ma}$ 中国中西部地区响应积极的、

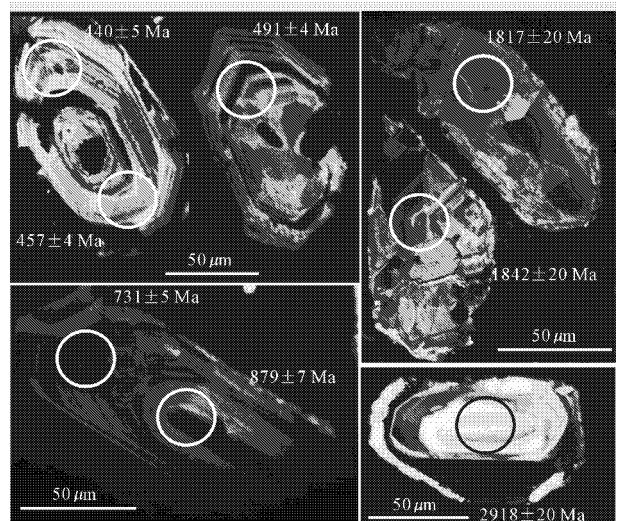


图 2 四方台杂岩体辉长岩中代表性锆石 CL 照片
Fig. 2 Cathodoluminescence (CL) images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of representative zircons from gabbro

表 1 四方台辉长岩 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results for gabbrro from the Sifangtai mafic-ultramafic complex

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	1σ			
SFT.1	57.48	106.6	0.54	8.37	0.0816	0.42	0.0032	2.270	20.82	2.271.8	8.84	2.273.4	14.6
SFT.2	50.56	159.6	0.32	7.36	0.0763	0.4	0.0031	2.160	21.98	2.155.7	9.28	2.150.1	14.1
SFT.3	72.89	146.8	0.5	8.57	0.0685	0.43	0.003	2.292	18.45	2.293.2	7.26	2.293.7	13.6
SFT.4	65.57	119.9	0.55	8.52	0.0731	0.43	0.0031	2.287	19.22	2.287.5	7.8	2.287.4	13.9
SFT.5	62.37	612.4	0.1	8.26	0.0628	0.42	0.0029	2.263	18.02	2.260.1	6.88	2.256	13.2
SFT.6	320.17	229.6	1.39	4.93	0.0409	0.32	0.0023	1.817	19.93	1.807.7	6.99	1.798.9	11
SFT.7	409.65	245.1	1.67	5.16	0.0422	0.33	0.0023	1.843	19.73	1.846.1	6.96	1.848.1	11.3
SFT.8	217.38	755.4	0.29	5.53	0.0395	0.34	0.0023	1.906	18.22	1.905.1	6.15	1.904.4	11.2
SFT.9	298.97	949.6	0.31	5.09	0.0363	0.33	0.0022	1.832	18.34	1.834.7	6.04	1.836.3	10.8
SFT.10	109.13	156.9	0.7	1.45	0.0271	0.15	0.0013	984	41.08	909.7	11.25	879.3	7.06
SFT.11	27.55	1.176	0.02	5.59	0.0397	0.34	0.0023	1.930	18.11	1.915.1	6.11	1.901.4	11.2
SFT.12	49.22	147.7	0.33	7.74	0.0693	0.43	0.0032	2.101	20.13	2.201.5	8.5	2.311	14.2
SFT.13	166.08	175	0.95	0.73	0.0181	0.08	0.0008	837	54.08	557.3	10.62	491.2	4.48
SFT.14	273.2	265.2	1.03	14.7	0.11	0.54	0.0038	2.799	16.94	2.797.2	7.11	2.794.8	15.9
SFT.15	46.45	182.2	0.25	15.1	0.1596	0.52	0.0043	2.918	20.55	2.819.7	10.09	2.683.9	18.4
SFT.16	95.36	126.1	0.76	15.8	0.1347	0.55	0.0041	2.895	18	2.865	8.14	2.822.5	17.1
SFT.17	1.356.1	507.6	2.67	5.15	0.0397	0.33	0.0023	1.842	19.11	1.844.5	6.55	1.846.3	11.1
SFT.18	42.75	70.78	0.6	11.2	0.0105	0.48	0.0037	2.543	19.75	2.538.2	8.74	2.532.1	16
SFT.19	856.55	877.8	0.98	14.7	0.1023	0.54	0.0037	2.795	16.41	2.794.7	6.62	2.793.7	15.5
SFT.20	78.28	142.3	0.55	9.62	0.0797	0.45	0.0033	2.391	18.68	2.398.6	7.62	2.407.3	14.5
SFT.21	858.24	376.2	2.28	5.67	0.0552	0.34	0.0025	1.977	21.62	1.926.4	8.4	1.879.7	12.1
SFT.22	3.011.7	2.370	1.27	8.28	0.0572	0.42	0.0028	2.280	17.21	2.261.9	6.26	2.242.2	12.9
SFT.23	44.69	72.52	0.62	7.21	0.107	0.37	0.0034	2.250	28.5	2.137.9	13.23	2.022.7	16.1
SFT.24	267.2	187.7	1.42	6.02	0.0593	0.33	0.0025	2.102	21.5	1.978.5	8.58	1.862.4	12.1
SFT.25	64.58	127	0.51	10.3	0.0988	0.48	0.0037	2.418	20.29	2.463.1	8.87	2.517.6	16
SFT.26	130.07	247	0.53	10.4	0.0843	0.44	0.0032	2.581	18.08	2.475	7.48	2.348.4	14.1
SFT.27	91.14	137.8	0.66	8.76	0.0776	0.43	0.0032	2.321	19.58	2.313	8.07	2.303.6	14.2
SFT.28	326.92	361.8	0.9	0.68	0.0151	0.12	0.0009	958.7	30.57	789.5	7.07	730	5.03
SFT.29	155.43	185	0.84	0.59	0.0194	0.07	0.0008	628.1	72.56	472	12.4	440.4	4.56
SFT.30	132.05	136.8	0.97	0.6	0.021	0.07	0.0008	573	77.71	476.9	13.33	457.1	4.89
SFT.31	113.36	119.9	0.95	0.59	0.0152	0.07	0.0007	554.17	58.17	473.7	9.67	457	4.03
SFT.32	456.33	254.6	1.79	5.88	0.0533	0.34	0.0024	2.052	20.68	1.959	7.86	1.872.4	11.6

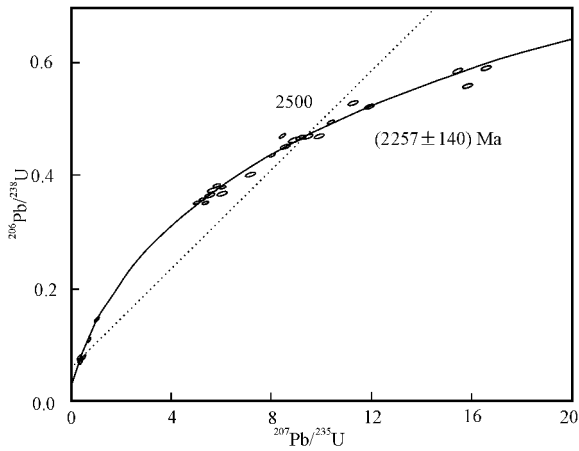


图 3 四方台辉长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Concordia diagram showing LA-ICP-MS U-Pb data for zircons from Sifangtai gabbro

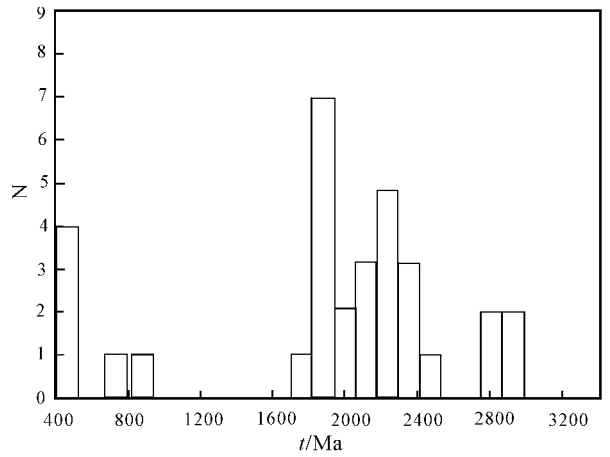


图 5 四方台锆石 U-Pb 年龄直方图

Fig. 5 Histograms of LA-ICP-MS U-Pb data for zircons from Sifangtai gabbro

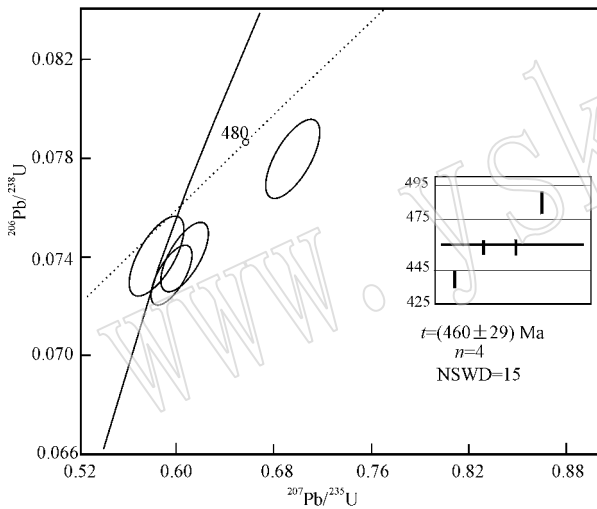


图 4 四方台辉长岩加权年龄

Fig. 4 Diagram of weighted ages for zircons from Sifangtai gabbro

造成 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱 (Li *et al.*, 2003) 活动有关。

本次研究结果中,代表成岩年龄的数据点较少,捕获锆石反而较多。这可能是多方面因素造成的:首先,锆石挑选和用于分析的样品都是随机的,可能所选的样品代表性不强;其次,地球化学特征显示,样品具有明显的 Zr 负异常, Zr 的低含量也是导致锆石生长缓慢的一个重要原因(刘军锋等, 2008);最后,从岩性组合看,从中性岩到超基性岩都有,指示其成岩过程中熔融程度不高,熔融温度也不够高,导致新生锆石生长时间有限。

4 地质意义

(1) 四方台岩体锆石整体上颗粒较大(长轴大都大于 $70 \mu\text{m}$), 大多数锆石形状规则, 透明, 呈长柱状, CL 图像表明, 具有明显的岩浆震荡环带, 是典型的岩浆锆石。还有一部分锆石, 透明, 色微黄, 形状较规则, CL 图像可隐约看到早期的岩浆环带, 这类锆石代表早期的捕获锆石。根据分析结果, 该批锆石具有较高的 Th、U 含量, Th/U 普遍大于 0.3, 具有岩浆成因锆石特征。依据上述 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 研究结果, 下交点加权平均年龄为 $460 \pm 29 \text{ Ma}$, 是岩浆锆石年龄, 代表四方台镁铁-超镁铁岩体的形成时代。岩体地球化学特征指示其形成于俯冲作用引发的板块断离, 导致壳-幔物质交换, 该岩体应该是古生代板块俯冲碰撞的产物(刘军锋等, 2008)。秦岭沿商丹带存在大量古生代地质事件(李曙光等, 1989; 苏犁等, 2004; 李惠民等, 2006; Liu *et al.*, 2009) 这些古生代地质事件被认为是秦岭微陆块与华北南缘(北秦岭)之间的碰撞(Meng and Zhang, 1999, 2000)或者是弧后盆闭合的结果(Sun *et al.*, 2002)。考虑到该岩体紧邻商-丹断裂, 该定年结果很好地指示了该地区商-丹断裂的闭合时间。

(2) 四方台岩体中捕获锆石的年龄有 2 个点的年龄数据在 $0.7 \sim 0.9 \text{ Ga}$ 之间, 该年龄数据与发育于扬子板块和南秦岭、造成 Rodinia 超大陆裂解的 $830 \sim 740 \text{ Ma}$ 地幔柱活动时代一致(Li *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2006)。部分研究者已从 Pb 同位

素填图等研究发现,北秦岭基底岩层高放射性 Pb 同位素组成与华北板块有明显差异,而与华南板块相似,据此认为北秦岭属于华南板块(张本仁等,1996;朱炳泉,1998)。地质和地球化学研究已经表明华南板块、北秦岭和南秦岭之间有紧密的联系(欧阳建平等,1996;张本仁等,1998),据此可以推测在晚元古代,北秦岭离扬子陆块较近。

(3) 众多研究已经表明北秦岭不同于稳定克拉通,而具有岛弧体系特征(孙勇等,1991;李曙光等,1993;Lerch,1993;孙卫东等,1995;张旗等,1995;Xue *et al.*,1996)。新的地球化学和 Pb 同位素填图研究显示北秦岭具有高放射性成因 Pb,与华北和扬子陆块都不相同,因而可能是具有独立发展历史的微陆块(黄萱等,1995;Zhu,1995;张本仁等,1996;欧阳建平等,1996;朱炳泉,1998;董云鹏等,2003)。

本次研究,有 26 个点的年龄大于 1.8 Ga,其中有 4 个点的年龄大于 2.7 Ga,最老一颗锆石年龄为 2.918 ± 20 Ma。1.8~2.9 Ga 的定年结果,可能指示了北秦岭地区早期岛弧体系演化的时代特征。

5 结论

本研究对北秦岭四方台基性-超基性杂岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,主要取得如下认识:

(1) 四方台杂岩体的成岩时代为 460 ± 29 Ma。

(2) 在四方台杂岩体中获得的 700~900 Ma 的捕获锆石年龄,指示在晚元古代,北秦岭离扬子陆块较近。

(3) 26 个 1.8~2.9 Ga 的捕获锆石年龄,可能指示了北秦岭地区早期岛弧体系演化的时代特征。

References

Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.

Chen Zhihong, Lu Songnian, Li Shuguang, *et al.* 2006. Constraining the role of the Qinling orogen in the assembly and break-up of Rodinia: tectonic implications for Neoproterozoic granite occurrences [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 28: 99~115.

Dong Yunpeng, Zhang Guowei and Zhu Bingquan. 2003. Proterozoic tectonics and evolutionary history of the North Qinling terrane [J]. *Acta Geo-*

scientia Sinica, 24(1): 3~10 (in Chinese with English abstract).

Huang Xuan, Sun Baoshan, Pan Jun, *et al.* 1995. The ages of igneous rocks from Eastern Qinling of North China Platform and the crustal growth and reworking of the terrane [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 171~178 (in Chinese with English abstract).

Lerch M. 1993. Early Paleozoic tectonic evolution of the Qinling Orogenic Belt in the Heihe area, Central China [D]. University of Mainz, 98.

Li Huimin, Li Huaikun, Chen Zhihong *et al.* 2006. Comparison of three methods for baddeleyite U-Pb isotope dating of basic rocks [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 653~659 (in Chinese with English abstract).

Li Shuguang, Chen Yizhi and Zhang Zongqing. 1993. Trace elements and Sr, Nd isotopic geochemistry of the Lajimiao norite-gabbro from the North Qinling belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 67(4): 310~321 (in Chinese with English abstract).

Li Shuguang, Hart S R, Zheng Shuangen, *et al.* 1989. Evidences of Sm-Nd age for collision of the North and South China Blocks [J]. *Science in China (B)*, 19(3): 312~319 (in Chinese).

Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, *et al.* 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 122: 85~109.

Liu Junfeng, Sun Yong, Feng Tao, *et al.* 2008. Geochemistry and petrogenesis of Sifangtai mafic-ultramafic complex from North Qinling [J]. *Geochemistry*, 37(2): 174~186 (in Chinese with English abstract).

Liu J F, Sun Y, Tong L X, *et al.* 2009. Emplacement age of the Songshugou ultramafic massif in the Qinling orogenic belt, and geologic implication [J]. *International Geology Review*, 51(1): 58~76.

Liu Xiaoming, Gao Shan, Yuan Honglin, *et al.* 2002. Analysis of 42 major and trace element in glass standard reference material by 193nm LA-ICPMS [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 408~418 (in Chinese with English abstract).

Meng Qinren and Zhang Guowei. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation [J]. *Geology*, 27: 123~126.

Meng Qinren and Zhang Guowei. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling Orogen, central China [J]. *Tectonophysics*, 323: 183~196.

Ouyang Jianping and Zhang Benren. 1996. Geochemical evidence for the formation and evolution of North Qinling microcontinent [J]. *Science in China (series D)*, 26: 42~48 (in Chinese).

Pei Xianzhi. 1997. Composition and Tectonic Evolution of the Shangdan Structural Zone in the East Qinling, China [M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 60~75 (in Chinese).

- Su Li, Song Shuguang, Zhou Dingwu, *et al.* 2004. Petrogenesis of Songshugou dunite body in the Qinling orogenic belt, Central China: Constraints from geochemistry and melt inclusions [J]. Science in China (D), 35(1): 38~47.
- Sun Weidong, Li Shuguang, Sun Yong, *et al.* 2002. Mid-paleozoic collision in the north Qinling: Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and their tectonic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 21: 69~76.
- Sun Weidong, Li Shuguang, Xiao Yilin, *et al.* 1995. The discovery of island arc andesite from Danfeng group Heihe, North Qinling area and its tectonic significance [J]. Geotectonic et Metallogenia, 19(3): 227~236 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yong and Yu Zaiping. 1991. A discussion on an ancient ocean and Caledonian orogeny in the east Qinling [A]. Ye Lianjun, Qian Xi-anling and Zhang Guowei. A Selection of Papers Presented at the Conference on the Qinling Orogenic Belt [C]. Xi 'an: Northwest University Press, 167~173 (in Chinese with English abstract).
- Xue Feng, Lerch M, Kroner A, *et al.* 1996. Tectonic evolution of the east Qinling mountains, China, in the Palaeozoic: a review and new tectonic model [J]. Tectonophysics, 253: 271~284.
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircon from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS [J]. Chinese Science Bulletin, 48: 1 511~1 520.
- Zhang Benren, Han Yinwen, Xu Jifeng, *et al.* 1995. Geological evidence for North Qinling being a part of Yangtze plate prior to Neoproterozoic [J]. Geological Journal of China Universities, 4: 369~382 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Benren, Zhang Hongfei, Zhao Zhidan, *et al.* 1996. Geochemical subdivision and evolution of the lithosphere in East Qinling and adjacent regions-implications for tectonics [J]. Science in China (series D), 26(3): 201~208 (in Chinese).
- Zhang Guowei, Mei Zhichao, Zhou Dingwu, *et al.* 1987. Formation and Evolution of the Qinling Orogenic Belt [M]. Xi 'an: Northwest University Press, 11: 87~192 (in Chinese).
- Zhang Qi, Zhang Zongqing, Sun Yong, *et al.* 1995. Trace element and isotopic geochemistry of metabasalts from Danfeng Group (DFG) in Shangxian-Danfeng area, Shaanxi Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 11(1): 43~54 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan. 1995. The mapping of geochemical provinces in China base on Pb isotopes [J]. Journal of Geochemical Exploration, 55: 171~181.
- Zhu Bingquan. 1998. Study on chemical heterogenities of mantle crustal systems and geochemical boundaries of blocks [J]. Earth Science Frontiers, 5(1~2): 72~82 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 董云鹏, 张国伟, 朱炳全. 2003. 北秦岭构造属性与元古代构造演化 [J]. 地球学报, 24(1): 3~10.
- 黄 萱, 孙宝山, 潘 均, 等. 1995. 东秦岭华北地台区岩浆活动的时代及地壳增生和再改造 [J]. 岩石学报, 11(2): 312~319.
- 李惠民, 李怀坤, 陈志宏, 等. 2006. 秦岭造山带商南-西峡地区富水杂岩的变辉长岩中斜锆石与锆石 U-Pb 同位素年龄的差异 [J]. 地质通报, 25(6): 653~659.
- 李曙光, 陈移之, 张宗清, 等. 1993. 北秦岭拉鸡庙苏长辉长岩的痕量元素和 Sr、Nd 同位素地球化学 [J]. 地质学报, 67(4): 310~322.
- 李曙光, Hart S R, 郑双根, 等. 1989. 中国华北、华南陆块碰撞时代的钐-铈同位素年龄证据 [J]. 中国科学 (B), 19(3): 312~319.
- 刘军锋, 孙 勇, 冯 涛, 等. 2008. 北秦岭四方台基性-超基性杂岩的地球化学特征及其成因 [J]. 地球化学, 37(2): 174~186.
- 柳小明, 高 山, 袁洪林, 等. 2002. ^{193}nm LA-ICPMS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析 [J]. 岩石学报, 18(3): 408~418.
- 欧阳建平, 张本仁. 1996. 北秦岭微古陆形成与演化的地球化学证据 [J]. 中国科学 (D 辑), 26(增刊): 42~48.
- 裴先治. 1997. 秦岭商-丹带的组成与构造演化 [M]. 西安: 西安地图出版社, 60~75.
- 苏 犁, 宋述光, 周鼎武, 等. 2004. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约 [J]. 科学通报, 49(12): 1 209~1 211.
- 孙卫东, 李曙光, 肖益林, 等. 1995. 北秦岭黑河丹凤群岛弧火山岩建造的发现及其构造意义 [J]. 大地构造与成矿, 19(3): 227~236.
- 孙 勇, 于在平. 1991. 夭折了的东秦岭加里东运动 [A]. 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟. 秦岭造山带学术讨论会论文选集 [C]. 西安: 西北大学出版社, 167~173.
- 张本仁, 韩吟文, 许继锋, 等. 1998. 北秦岭新元古代前属扬子板块的地球化学证据 [J]. 高校地质学报, 4: 369~382.
- 张本仁, 张宏飞, 赵志丹, 等. 1996. 东秦岭及邻区壳、幔地球化学分区和演化及大地构造意义 [J]. 中国科学 (D 辑), 26(3): 201~208.
- 张国伟, 梅志超, 周鼎武, 等. 1987. 秦岭造山带的形成及其演化 [M]. 西安: 西北大学出版社, 11: 87~192.
- 张 旗, 张宗清, 孙 勇, 等. 1995. 陕西商县-丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学 [J]. 岩石学报, 11: 43~54.
- 朱炳泉. 1998. 壳幔地球化学不均一性与块体地球化学边界研究 [J]. 地学前缘, 5(1~2): 72~82.