

# 秦岭拉鸡庙镁铁质岩体锆石 LA-ICP-MS 年代学研究\*

刘军锋<sup>1,2</sup> 孙勇<sup>1\*\*</sup> 孙卫东<sup>2,3</sup>

LIU JunFeng<sup>1,2</sup>, SUN Yong<sup>1\*\*</sup> and SUN WeiDong<sup>2,3</sup>

1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室,地质学系,西安 710069

2. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室,广州 510640

3. 中国科学技术大学地球和空间科学学院矿产资源研究室,合肥 230026

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. Research Center for Mineral Resources, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2008-09-23 收稿, 2008-12-02 改回.

Liu JF, Sun Y and Sun WD. 2009. LA-ICP-MS zircon dating from the Lajimiao mafic complex in the Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2):320–330

**Abstract** The Lajimiao mafic complex, located on the south limb of the North Qinling orogenic belt, consists mainly of gabbro (80%) and norite-gabbro (15%), with minor diorite. A combined study of cathodoluminescence images (CL), in situ LA-ICP-MS U-Pb isotope dating and trace element analysis were carried out for zircons from the Lajimiao diorite. Cathodoluminescence images show two kinds of zircon grains, prismatic with clear magmatic zonations and round with complicated internal structure, some of which have no magmatic zonation. All together 28 U-Pb analyses have been taken on cores and overgrowths of 26 zircon grains. Two groups of ages were obtained, with weighted average  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of  $973 \pm 60\text{Ma}$  for round zircons, and  $422 \pm 7\text{Ma}$  for prismatic ones, respectively. All analyses show high concentrations of Th, U, and HREE, with positive Ce anomaly and negative Eu anomaly. The high Th/U ratios indicate these zircons are magmatic in origin. The younger group ( $422 \pm 7\text{Ma}$ ) represents the formation age of the Lajimiao gabbro complex, which is probably relative to Paleozoic collision of the North China Block with the South China Block or a micro-block separated from it, which led to the closure of the Qinling Ocean. The older group ( $973 \pm 60\text{Ma}$ ) is likely to be inherited zircon, formed in magmatic event(s) during the assemblage of Rodinia supercontinent. Given that no typical North China craton ages were detected, we speculate that the North Qinling was closer to the South China Block than the North China Block in the Proterozoic.

**Key words** Zircon U-Pb dating; LA-ICP-MS; Diorite; Lajimiao; Qinling

**摘要** 秦岭拉鸡庙镁铁质岩体位于北秦岭南缘,主要由辉长岩(80%)、苏长辉长岩(15%)和少量闪长岩等侵入杂岩组成。对采自该岩体闪长岩的锆石进行阴极发光图像、微区原位 LA-ICP-MS 微量元素分析和 U-Pb 定年。CL 图像显示这些锆石可以分为两类,一类锆石呈长柱状,具有明显的岩浆生长环带;另一类则呈浑圆状,阴极发光图像复杂,部分颗粒岩浆生长环带较模糊,个别样品外围存在一窄的亮色环边,推测为后期地质事件影响的结果。对 26 颗锆石核部和生长边进行 28 次 U-Pb 同位素分析,获得两组  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄,分别为  $973 \pm 60\text{Ma}$  和  $422 \pm 7\text{Ma}$ 。分析结果显示,所有样品具有高的 Th, U, REE 含量,明显富集 HREE,其 Th/U 比值普遍高于 0.6,表明这些锆石应属于岩浆成因。其中,  $422 \pm 7\text{Ma}$  应该代表拉鸡庙镁铁质岩体的成岩时代,这可能与古生代扬子陆块或者是具有扬子板块属性的微陆块和华北陆块的碰撞有关,该碰撞导致了秦岭洋的闭合;而  $973 \pm 60\text{Ma}$  应为捕获锆石年龄,代表北秦岭早期与 Rodinia 超大陆拼合有关的岩浆事件。考虑到没有检测到典型的华

\* 本研究得到国家 973 计划项目“华北大陆边缘造山过程与成矿”(2006CB403500), 杰出青年基金(40525010) 和国家自然科学基金(40773044)资助。

第一作者简介: 刘军锋,男,1978 年生,博士后,从事岩石地球化学研究, E-mail: ljfnwu2002@163.com

\*\* 通讯作者: 孙勇,教授,从事岩石大地构造研究, E-mail: sunyong@nwu.edu.cn

北克拉通的年龄,推测元古代北秦岭更接近华南板块。

**关键词** 锆石 U-Pb 定年; LA-ICP-MS; 闪长岩; 拉鸡庙; 秦岭

**中图法分类号** P588.124; P597.3

## 1 引言

板块消减和碰撞具有重要的地质意义。秦岭-大别造山带由于大别-苏鲁地区三叠纪含金刚石和柯石英的超高压变质岩而闻名(Li *et al.*, 1993; 李曙光等, 1989; Ames *et al.*, 1996; Hacker *et al.*, 1995; Sun *et al.*, 2002a; Zheng *et al.*, 2003), 是研究板块消减、碰撞的理想场所。但到目前为止, 对这条 2000km 长的造山带的演化存在很多争议, 一个主要的争议就是华北和华南板块的碰撞时间。很多学者根据苏鲁大别造山带大规模出露的三叠纪榴辉岩, 认为华南华北最后的碰撞时代是三叠纪(Li *et al.*, 1994; Ames *et al.*, 1996; Jahn *et al.*, 1995; Rowley *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 2002a)。在秦岭有相应的三叠纪勉略缝合带(张国伟等, 1995a, b; 李曙光等, 1996), 同时有近东西向展布的约 400 km 长的同碰撞花岗岩出露于南秦岭, 也支持三叠纪碰撞的模式(Sun *et al.*, 2002b)。与大别形成鲜明对比的是在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.*, 2002c)。而另一部分研究者则提出华北和华南板块的碰撞时间发生在晚志留纪(Mattauer *et al.*, 1985; 许志琴等, 1991; 任纪舜等, 1991; Zhang *et al.*, 1997), 南秦岭地区早中生代花岗岩和三叠纪大别-苏鲁地区超高压变质带, 被认为是华南板块陆内消减的结果(Mattauer *et al.*, 1985; 许志琴等, 1991; Zhang *et al.*, 1997; 张宏飞

等, 1997)。但是这一模式很难解释大别-苏鲁地区超高压变质带的形成, 其中最重要的是板内消减如何解释大陆地壳被俯冲到 >100km 深度的动力来源问题。上述争论的一个主要原因就是北秦岭地区一些关键部位的地质事件的性质和年代学研究不够。

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-超镁铁质岩体, 如: 陕西周至县后畛子、四方台、商州拉鸡庙(又称秦王山或三十里铺, 与李曙光等(1993)的垃圾庙岩体是同一岩体)、商南县富水关(图 1)。以上岩体多为镁铁-超镁铁质杂岩体, 由于特殊的位置, 加之其来源较深, 这些岩体形成时代的确定, 对秦岭造山带的演化历史有重要的约束, 对于探讨秦岭-大别造山带的演化模式至关重要。但是对这些岩体的成岩时代存在较大分歧(约 400~1000Ma)(李曙光等, 1989; 张国伟等, 1987; 裴先治等, 1997; 苏犁等, 2004; 李惠民等, 2006)。因此, 本次研究工作选择秦岭造山带紧邻商-丹缝合带的拉鸡庙镁铁质岩体, 选择其中的闪长岩, 进行高精度 LA-ICP-MS 锆石定年, 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。

## 2 地质背景和岩石组合特征

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(张国伟等, 2001)。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, 这些岩石以

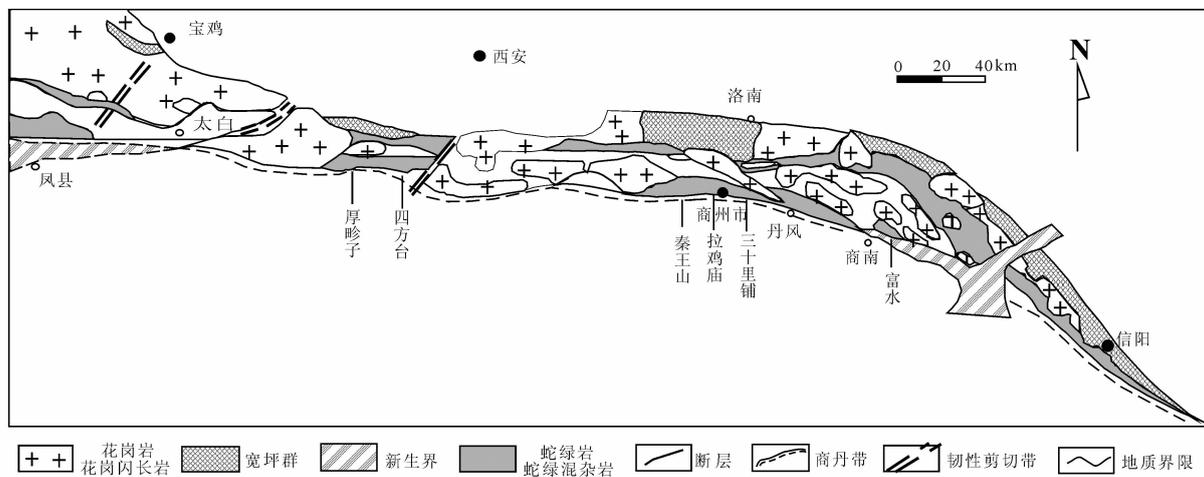


图 1 北秦岭地质简图

Fig. 1 Sketched geological map of North Qinling

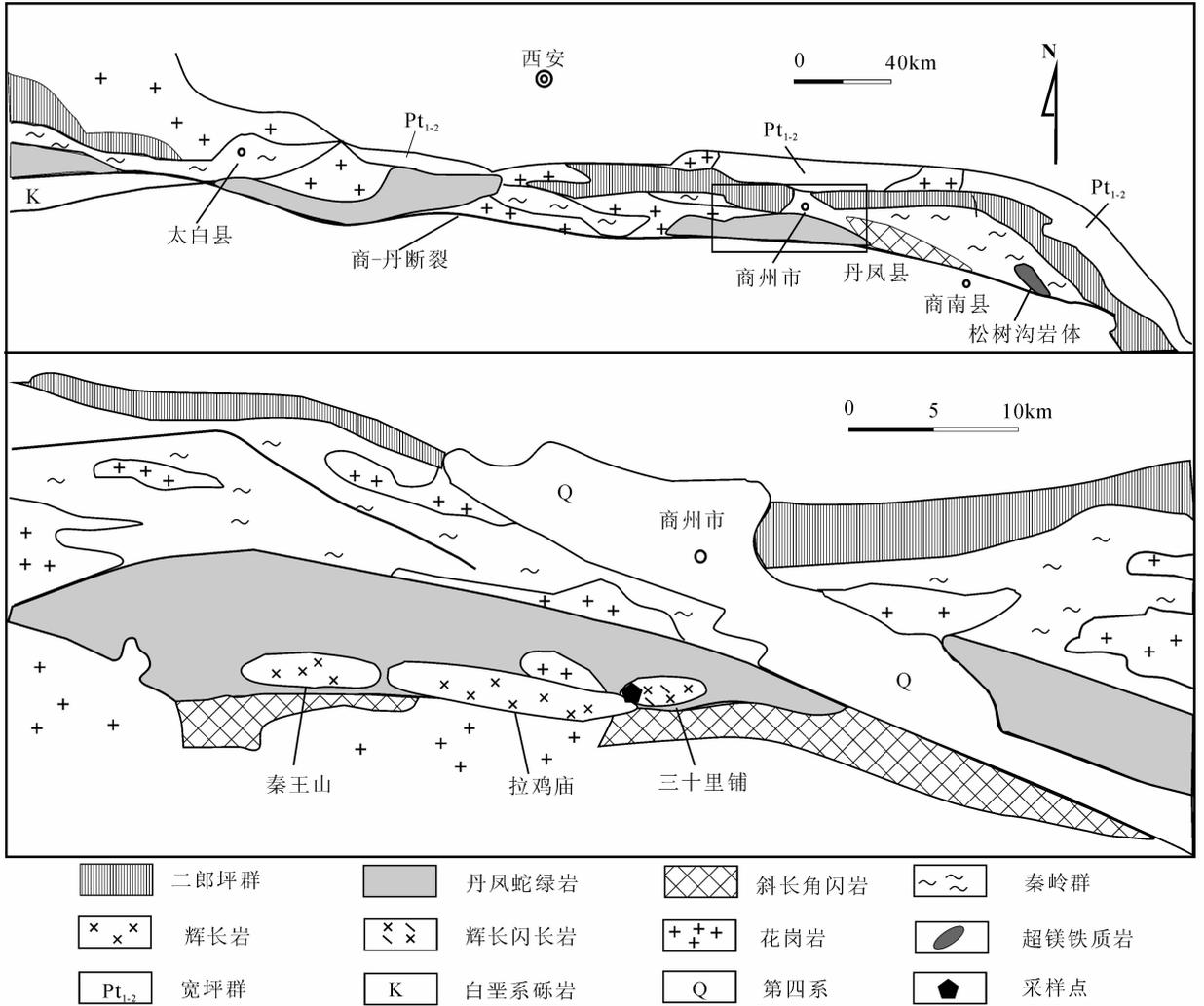


图2 拉鸡庙镁铁质岩体地质简图

Fig.2 Simplified geological map of Lajimiao mafic complex

富铝和钙为特征,大多数岩石经受角闪岩相变质作用,局部可见麻粒岩相变质岩。宽坪群主要分布于北秦岭北半部,呈宽窄变化很大的狭长带状展部。强烈变形,变质达高绿片岩相-低角闪岩相的中浅变质岩系。原岩主要由基性火山岩、碎屑岩和碳酸岩组成。其中碎屑岩研究证明来自南侧秦岭杂岩和北侧太华杂岩而具有双源性。二郎坪岛弧火山岩系分布在北秦岭中部,介于秦岭群和宽坪群之间,呈断续透镜状东西向延伸,主要是一套低绿片岩相-低角闪岩相变质火山-沉积岩系。该岩群北部是低绿片岩相的绢云母石英岩、石英片岩、变质砂岩与少量夹层结晶灰岩组合的柿树园组,沉积特征显著,是一套泥砂质为主的复理石浊积岩系。丹凤群位于北秦岭构造带南缘,它是一个板块俯冲碰撞的蛇绿岩构造混杂岩带又叠加后期多次断裂构造混杂改造,包括不同时代、不同来源的构造岩块的混杂组合体,并不是单一的真正地层单位(张国伟等,2001)。南秦岭主要是一套前寒武纪变质火山-沉积岩系,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,1998;裴先治,1997)。

拉鸡庙镁铁质杂岩体位于商州市(原商县)以南约20km,呈东西延长的豆荚状,商-丹断裂从其南侧通过。岩体出露面积约19km<sup>2</sup>,该岩体主要为辉长岩,西部有部分苏长辉长岩,东部有少量闪长岩(图2)。辉长岩呈灰黑色,中粗粒结构,主要由基性斜长石,单斜辉石、角闪石及少量磁铁矿组成。苏长辉长岩呈紫黑色,矿物粒度较粗,主要由斜长石、紫苏辉石、单斜辉石组成,磁铁矿含量较少。两种岩石均为块状构造。同时还有少量的闪长岩,主要由斜长石和角闪石组成,含有少量磁铁矿(图3)。

### 3 地球化学特征

从80年代后期以来,对拉鸡庙镁铁质岩体作过初步的研究。如:李曙光等(1989)给出了拉鸡庙岩体的Sm-Nd等时线年龄为402Ma。张稳胜和安三元(1990)对秦王山辉长岩的研究指出该岩体为LREE富集的钙碱性岩体,<sup>87</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr

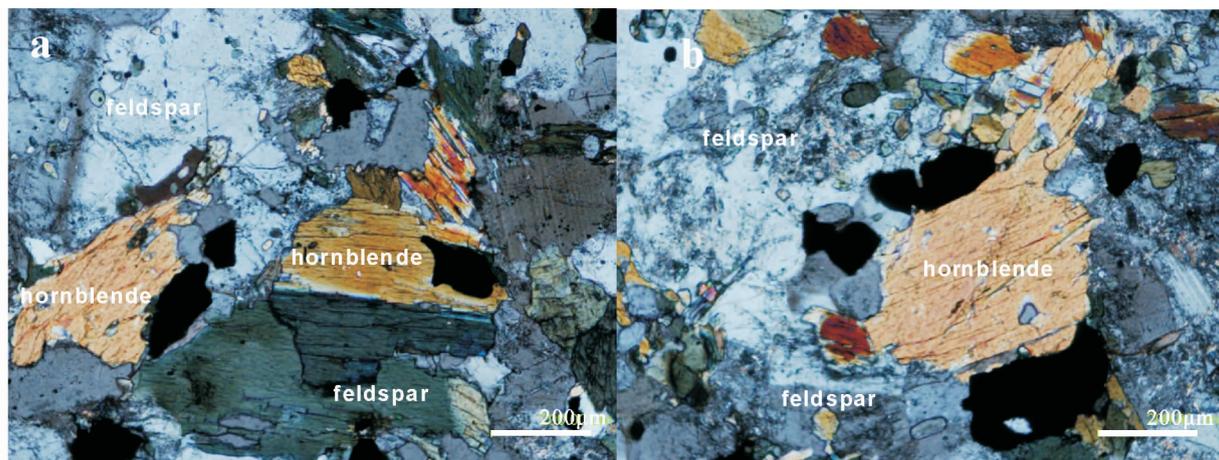


图3 拉鸡庙镁铁质岩体中用于定年的闪长岩主要矿物

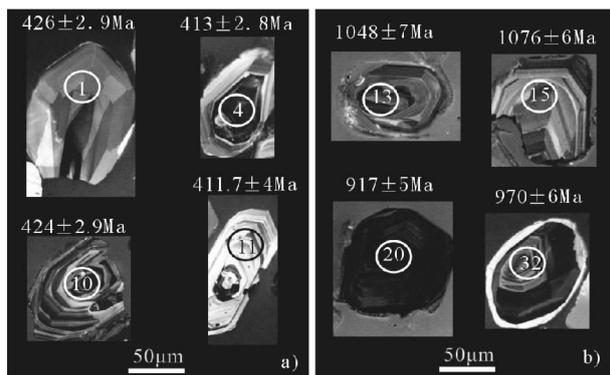
Fig.3 Major minerals of diorite from the Lajimiao mafic complex

比值低(0.7038 ~ 0.7050 之间),源于地幔源区。随后,李曙光等(1993)又根据微量元素和 Sr、Nd 同位素地球化学研究,认为拉鸡庙岩体具有类似岛弧蛇绿岩的特征,产于岛弧环境。辉长岩的  $\epsilon_{Nd}(t) = +2.5 \sim +0.1$ ,推测来自轻度亏损地幔。同时,岩体富 Ba、Sr 和 LREE, 贫 Ta 和 Cr, Th/Ta 较高(4 ~ 20),指示辉长岩的形成受到了消减作用的影响,产于岛弧环境, LILE 丰度高说明还与陆壳混染作用有关(韩松, 1993)。

新近对拉鸡庙岩体的地球化学分析表明拉鸡庙主要组成岩石辉长岩的  $SiO_2$  含量介于 48% ~ 52%, 属于基性岩石。 $Mg^{\#}$  指数 ( $Mg/(Mg + Fe)$ ) 除个别样品外, 大都在 60 左右, 跟下地壳岩石  $Mg^{\#}$  平均值 60.1 (Sun and McDonough, 1989) 很接近。整体上所有样品 A/CNK ( $A/NCK = Al_2O_3/CaO + Na_2O + K_2O$ ) 值大于 1.1,  $K_2O$  相对于  $Na_2O$  含量明显降低。拉鸡庙岩体辉长岩整体上都具有相似的 LREE 富集的稀土配分模式, 富含斜长石的样品呈现随长石含量变化而程度不等的 Eu 的正异常, 但是  $\Sigma REE$  差异很明显。La/Sm 为 1.7 ~ 12.6, LREE 相对 HREE 明显富集, 具有微弱的 Ce 的负异常。稀土配分模式一致但总量呈现规律性的变化, 显示分离结晶作用主导的成岩作用过程。拉鸡庙辉长岩微量元素表现出 Nb、Ta 相对 La 出现负异常, 同时 Zr、Hf 含量也亏损, 和 Sr 的正异常, 显示出与岛弧玄武岩微量元素蛛网图相似的特点, 但同时有出现低的 Ti 含量, 和明显 Th 的负异常(刘军锋, 2008; 刘军锋等, 2008)。

#### 4 定年样品与分析方法

考虑到辉长岩锆石含量低, 本研究从所采约 30kg 闪长岩样品中分离出进行微量元素和 U-Pb 定年分析的锆石样品。首先, 将闪长岩样品用机械方法粉碎至 200 目, 再用传统的重选和磁选方法分离出锆石一百多颗。锆石大多呈无

图4 闪长岩中部分锆石阴极发光图像及分析点位置、 $^{206}Pb/^{238}U$  年龄值Fig.4 Cathodoluminescence (CL) image and  $^{206}Pb/^{238}U$  age of representative zircons of the diorite

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 ~ 200  $\mu m$ , 短轴在 50 ~ 70  $\mu m$  之间。多数晶体的棱面显得不是很平整(图 4)。

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, 根据尽可能的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)。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 Las200M 剥蚀系统。测定时采用 10Hz 的激光频率和 30 $\mu\text{m}$  的激光直径,激光剥蚀深度为 20~40 $\mu\text{m}$ 。实验中用 He 气作为剥蚀物质的载气,并以 91500 作为外标;<sup>29</sup>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,<sup>29</sup>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%~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)。

## 5 分析结果

### 5.1 锆石的 CL 图像特征

北秦岭拉鸡庙镁铁质岩体闪长岩中锆石的 CL 图像如图 4 所示。根据 CL 图锆石样品可以分为两大类。一类为无色

透明的短柱状,自形程度高,锆石的 CL 图像色调较为均匀,晶形具有明显的岩浆震荡环带(图 4a)。另一类锆石为浑圆状,颜色较为复杂,褐色至深棕色,自形程度相对较差,CL 图像显示锆石内部结构较为复杂,个别锆石环带不清楚,还有一些颗粒外围有一个窄的亮色边,可能是锆石后期遭受变质或重结晶的结果(图 4b),这些应为不同类型的捕获锆石。

### 5.2 锆石的微量元素特征

表 1 列出了拉鸡庙闪长岩中锆石微区微量元素的测试结果。从表 1 可以看出,该锆石 Th 含量为  $57.7 \times 10^{-6} \sim 602 \times 10^{-6}$ ,平均含量为  $256 \times 10^{-6}$ ;U 含量为  $143 \times 10^{-6} \sim 764 \times 10^{-6}$ ,平均含量为  $369 \times 10^{-6}$ ;Th/U 比值从 0.18~0.92,平均为 0.7。稀土元素含量整体上很高,介于  $253 \times 10^{-6} \sim 1342 \times 10^{-6}$ ,平均为  $536 \times 10^{-6}$ ,整体上表现为稀土,尤其是重稀土富集的稀土配分模式,具有明显 Ce 的正异常和 Eu 的负异常(图 5)。

表 1 北秦岭拉鸡庙闪长岩锆石稀土元素含量( $\times 10^{-6}$ )

Table 1 REE concentration ( $\times 10^{-6}$ ) of zircons for diorite from Lajimiao gabbro complex

	LJF.1	LJF.2	LJF.3	LJF.4	LJF.5	LJF.6	LJF.7	LJF.8	LJF.9	LJF.10	LJF.11	LJF.12	LJF.13	LJF.14
La	0.0121	0.022	8.16	0.0151	1.491	0.081	0.0108	0.0116	7.24	10.88	0.11	0.087	0.98	0.057
Ce	6.57	8.14	20.77	7.73	13.03	8.71	7.24	6.95	44.12	43.5	7.81	11.67	13.71	1.562
Pr	0.0278	0.14	1.36	0.105	0.301	0.169	0.0268	0.075	2.255	3.54	0.107	0.213	0.477	0.1
Nd	0.62	1.95	5.01	1.61	2.93	2.19	0.219	1	10.92	18.46	1.06	3.29	3.59	1.33
Sm	1.2	2.71	1.44	2.29	4.62	2.79	0.97	1.61	5.02	6.61	1.8	5.23	4.38	4.19
Eu	0.588	1.209	0.716	0.889	0.771	1.168	0.479	0.718	1.178	0.905	0.745	1.102	0.414	0.168
Gd	6.21	11.93	4.88	10.02	21.87	12.59	6.78	8.92	16.89	22.74	8.61	24.69	20.11	31.12
Tb	2.081	3.56	1.58	3.08	7.6	3.99	2.38	2.82	5.38	8.41	2.95	7.88	7.46	13.39
Dy	25.6	41.49	19.5	37.86	91.98	46.92	30.44	34.22	65.25	112.17	34.91	91.26	94.14	176.27
Ho	10.19	15.34	7.69	14.77	34.65	17.76	11.88	13.17	24.7	46.16	13.13	32.38	35.06	66.61
Er	49.29	71.65	37.73	69.64	160.11	82.73	56.48	61.89	120.76	228.7	60.93	142.77	160.29	301.97
Tm	11.02	15.26	8.52	15.08	34.11	17.53	12.12	13.3	27.25	51.45	13.13	28.64	32.66	60.97
Yb	120.03	157.69	95.08	160.16	349.03	182.16	124.88	139.07	292.97	544.83	136.18	286.66	321.26	584.13
Lu	24.3	30.89	18.98	30.97	63	34.16	24.39	27.62	56.01	102.58	25.38	49.64	51.88	100.49
	LJF.15	LJF.16	LJF.17	LJF.18	LJF.19	LJF.20	LJF.21	LJF.22	LJF.23	LJF.24	LJF.25	LJF.26	LJF.27	LJF.28
La	0.365	3.97	2.85	0.984	0.13	0.102	0.059	0.067	0.122	0.043	0.061	0.397	0.024	0.0146
Ce	6.43	11.15	43.99	13.83	10.02	7.74	8.15	8.91	23.76	8.45	9.25	7.71	8.75	7.51
Pr	0.33	0.267	5.08	2.105	0.307	0.156	0.143	0.227	0.623	0.201	0.166	0.278	0.14	0.059
Nd	2.87	4.09	39	16.29	4.06	1.63	1.33	2.99	6.54	2.58	1.88	2.65	2.17	1.44
Sm	4.09	4.82	30.65	15.48	4.59	2.49	2.73	3.68	6.85	2.75	2.72	4.49	3.32	2.57
Eu	0.573	1.83	6.9	2.04	1.74	0.976	0.935	1.388	1.51	0.855	0.928	0.423	1.258	1.116
Gd	17.74	19.44	63.73	48.69	17.31	10.64	10.33	13.71	22.31	10.14	10.14	23.01	15.49	12.19
Tb	6.35	6.14	18.23	15.02	5.3	3.38	3.38	4.4	7.19	3.08	3.24	8.97	5.04	3.72
Dy	71.19	75.57	180.67	152.57	60.01	38.49	39.97	50.49	79.54	34.63	37.56	108.01	59.19	44.5
Ho	23.45	29.91	54.86	46.87	22.25	14.21	14.22	19.08	27.82	12.12	13.63	39.31	22.08	16.19
Er	104.04	141.98	220.1	186.9	104.18	65	65.05	88.56	124.17	55.36	63.31	175.02	102.31	74.09
Tm	22.05	29.97	41.35	35.48	22.12	13.59	13.38	18.59	25.66	11.66	13.32	34.91	21.08	15.4
Yb	220.78	307.95	375.99	321.41	232.14	139.81	134.41	194.61	252.48	120.42	142.78	327.66	208.53	153.47
Lu	39.06	58.48	59.57	50.47	43.77	25.48	24.41	36.11	44.78	21.09	26.02	55.08	40.22	28.71

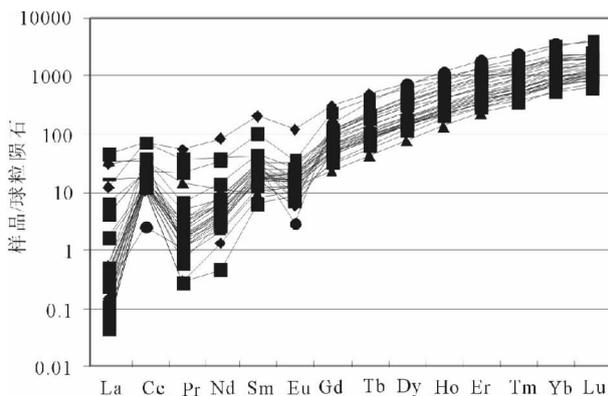


图5 拉鸡庙岩体闪长岩中锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(球粒陨石标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE-patterns of zircons from Lajimiao diorite (Normalization after Sun and McDonough, 1989)

### 5.3 锆石 U-Pb 定年结果

对 26 颗锆石核-幔部进行 28 点分析,测试结果见表 2 和

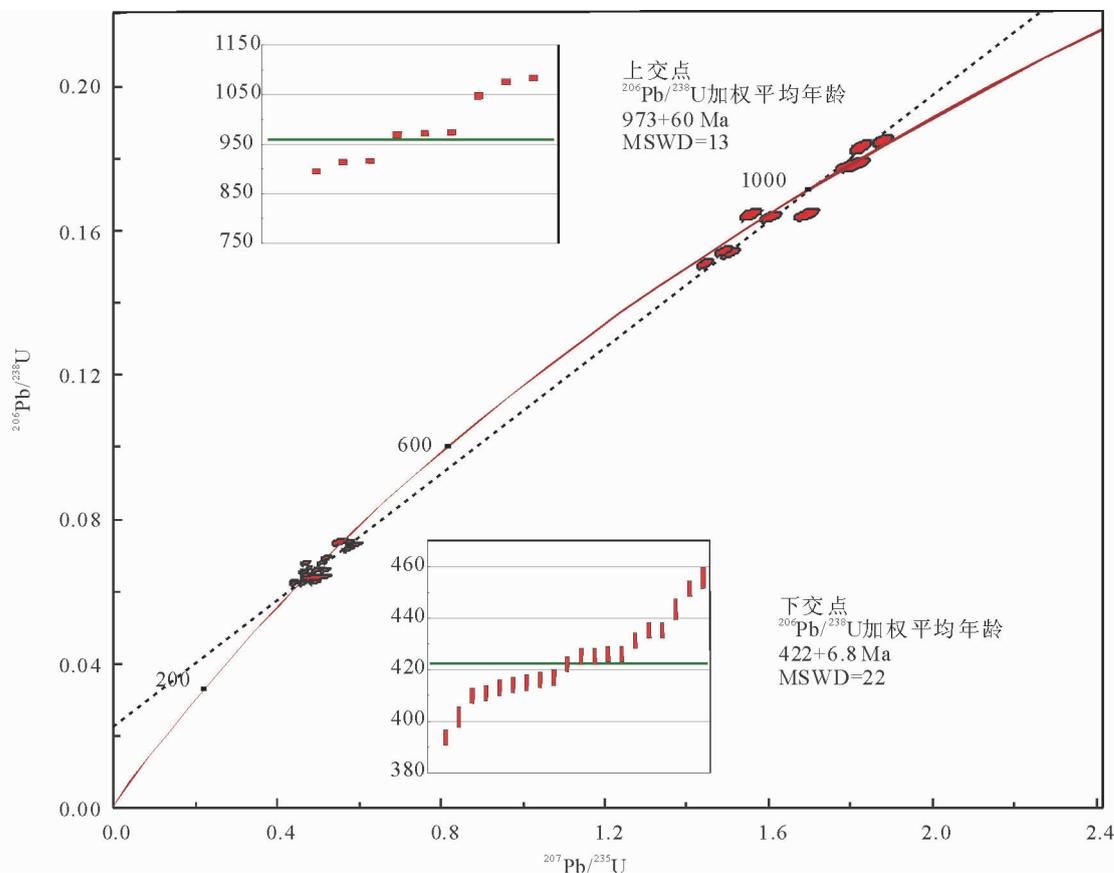


图6 拉鸡庙闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig.6 Concordia diagram showing LA-ICP-MS U-Pb data for zircons from Lajimiao diorite

图6。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上(图6),测试的各有效点分布在谐和线或其附近很小的区域。所测锆石年龄分为两组,所得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $973 \pm 60\text{Ma}$ (9个点)和 $422 \pm 7\text{Ma}$ (19个点)。

## 6 讨论

### 6.1 岩石成因

沿秦岭商-丹构造带北侧分布着一系列透镜状镁铁-超镁铁质杂岩体,如拉鸡庙镁铁质岩体,四方台、厚珍子基性-超基性杂岩体,富水基性杂岩体等,由于这些岩体紧临秦岭造山带的主缝合带,这些岩体的成因成为秦岭造山带研究的关键问题之一。前人根据对拉鸡庙镁铁质岩体 Sr、Nb 同位素和微量元素研究,认为该岩体形成于岛弧环境,同时有壳源物质加入,显示出与岛弧蛇绿岩类似的特征(李曙光等,1993)。作者根据对四方台基性-超基性岩体的岩石学、地球化学研究,认为该岩体是板块俯冲过程中,俯冲板块断离或者山根拆沉,扰动软流圈,发生下地壳部分熔融和壳-幔物质交换形成的(刘军锋等,2008)。而富水杂岩则代表受到陆壳混染的基性岩浆侵入体(董云鹏等,1997)。综合分析,认为这些岩石很可能是在板块俯冲,导致商-丹带闭合过程中,壳-

表2 拉鸡庙闪长岩 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results for diorite from Lajimiao gabbro complex

点号	含量( $\times 10^{-6}$ )		U-Th-Pb 同位素比值										年龄(Ma)			
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$		
LJM.1	244.77	345.13	0.709211022	0.05265	0.00094	0.49573	0.00786	0.06832	0.00048	313.7	40.01	408.8	5.34	426	2.9	
LJM.2	314.34	421.9	0.745058071	0.05349	0.00088	0.4872	0.00703	0.06609	0.00045	349.6	36.95	403	4.8	412.6	2.73	
LJM.3	223.01	327.37	0.681216972	0.05459	0.0011	0.49441	0.00907	0.06572	0.00049	395.4	44.38	407.9	6.17	410.3	2.96	
LJM.4	291.53	439.19	0.663790159	0.05308	0.00098	0.48469	0.008	0.06626	0.00047	332.1	41.18	401.3	5.47	413.6	2.86	
LJM.5	194.96	328.76	0.593016182	0.06945	0.00091	1.5607	0.0165	0.16307	0.00107	912	26.75	954.7	6.54	973.8	5.96	
LJM.6	335.34	465.04	0.72109926	0.05587	0.00106	0.50667	0.00868	0.0658	0.00048	447	41.5	416.2	5.85	410.8	2.9	
LJM.7	228.09	328.53	0.694274495	0.05965	0.00128	0.51861	0.01022	0.06308	0.00049	591	46.01	424.2	6.83	394.3	2.98	
LJM.8	194.02	288.7	0.672047108	0.05382	0.0012	0.49439	0.01019	0.06665	0.00052	363.5	49.72	407.9	6.92	415.9	3.15	
LJM.9	258.73	392.55	0.659100751	0.06009	0.00104	0.56323	0.0086	0.06801	0.00048	606.7	37.03	453.6	5.58	424.2	2.91	
LJM.10	92.91	143.2	0.648812849	0.07723	0.00233	0.70204	0.01986	0.06595	0.00068	1127.1	58.9	540	11.85	411.7	4.12	
LJM.11	239.95	303.71	0.790062889	0.05464	0.00115	0.51501	0.00992	0.06838	0.00052	397.5	46.19	421.8	6.65	426.4	3.15	
LJM.12	143.42	165.28	0.867739593	0.07433	0.00123	1.80882	0.02628	0.17654	0.00131	1050.5	33.07	1048.7	9.5	1048	7.2	
LJM.13	199.98	357.06	0.560073937	0.07175	0.00098	1.51113	0.01686	0.15276	0.00103	979	27.46	934.9	6.82	916.4	5.75	
LJM.14	57.73	329.86	0.175013642	0.07291	0.00088	1.8262	0.01707	0.18168	0.00118	1011.4	24.3	1054.9	6.13	1076.1	6.42	
LJM.15	136.07	538.9	0.252495825	0.07453	0.00084	1.88127	0.01576	0.18306	0.00116	1055.7	22.87	1074.5	5.55	1083.7	6.33	
LJM.16	602.52	764.56	0.788061107	0.05342	0.00092	0.50203	0.00763	0.06815	0.00048	346.6	38.45	413.1	5.16	425	2.88	
LJM.17	518.79	698.48	0.742741381	0.07089	0.00082	1.49526	0.01305	0.15297	0.00098	954.1	23.52	928.5	5.31	917.6	5.45	
LJM.18	316.55	570.83	0.554543384	0.07035	0.00084	1.45037	0.01329	0.14952	0.00096	938.5	24.27	910	5.51	898.3	5.39	
LJM.19	442.4	591.65	0.747739373	0.05705	0.00103	0.54973	0.00884	0.06988	0.0005	492.8	39.42	444.8	5.79	435.4	3.04	
LJM.20	210.11	260.68	0.806007365	0.07799	0.00153	0.78145	0.01381	0.07266	0.00058	1146.7	38.59	586.3	7.87	452.1	3.47	
LJM.21	234.28	272.19	0.86072229	0.05523	0.0013	0.53159	0.01156	0.06979	0.00057	421.6	50.94	432.9	7.66	434.9	3.42	
LJM.22	332.01	449.85	0.738046015	0.05445	0.00094	0.49918	0.00763	0.06647	0.00047	389.9	38.12	411.1	5.16	414.9	2.83	
LJM.23	211.93	248.77	0.851911404	0.07533	0.00107	1.69645	0.02024	0.16329	0.00114	1077.4	28.36	1007.2	7.62	975	6.29	
LJM.24	170.37	223.59	0.761975044	0.05592	0.00131	0.56363	0.01223	0.07308	0.00059	448.8	50.94	453.9	7.94	454.7	3.56	
LJM.25	226.56	306.89	0.738244974	0.05617	0.00108	0.53577	0.00932	0.06915	0.00051	458.8	42.04	435.6	6.16	431	3.09	
LJM.26	173.17	338.67	0.511323707	0.07183	0.00093	1.60885	0.01668	0.16238	0.00108	981.1	26.05	973.7	6.49	970	6	
LJM.27	399.98	433.52	0.922633327	0.05312	0.00087	0.48937	0.00701	0.06679	0.00046	333.8	36.62	404.5	4.78	416.8	2.79	
LJM.28	245.67	293.25	0.837749361	0.05422	0.00121	0.5095	0.01048	0.06812	0.00054	380.1	49.27	418.1	7.05	424.8	3.25	

幔物质交换形成的。

## 6.2 年龄意义

锆石成因是讨论锆石定年的基础。本次研究所获得的锆石, CL 图像显示可以明显的分为两类, 一类自形程度高, LA-ICP-MS 定年结果为  $422 \pm 7\text{Ma}$ ; 另一类自形程度较差, CL 图像显示内部结构较复杂, 部分颗粒没有岩浆环带, LA-ICP-MS 定年结果为  $973 \pm 60\text{Ma}$ 。锆石微量元素特征可以清楚的看到, 此次研究的锆石明显具有 REE, 尤其是 HREE 富集特征, Th、U 含量高, 且变化范围不大, Th/U 比值较高, 除两个分析点外(分别为 0.2 和 0.3), 普遍  $> 0.6$ , 整体上所有测试点均具有岩浆成因锆石特征。

根据以上对拉鸡庙锆石 CL 图像、稀土元素含量, 及 Th、U 含量和 Th/U 比值的讨论, 认为此次研究的拉鸡庙闪长岩中锆石, 一类晶形好且具有明显岩浆生长环带的锆石, 进行测试时, 核边部获得一致的年龄结果, 可以确定寄主岩石的年龄  $422 \pm 7\text{Ma}$ , 应代表拉鸡庙镁铁质岩体的成岩时代。而另一类自形程度差, 内部结构复杂的锆石, 个别锆石虽然具有亮的后期生长边, 但由于太窄(小于激光剥蚀直径), 而无法获得有效测年结果。核部所得到的年龄  $973 \pm 60\text{Ma}$ (9 个点在 898 ~ 1083Ma 之间), 显然为捕虏的早期锆石, 应代表北秦岭早期的构造岩浆事件。拉鸡庙岩体形成与岛弧环境, 其中包含大量早期捕获锆石, 表明拉鸡庙镁铁质岩体与陆壳混染有关, 并不代表新生洋壳, 不是典型蛇绿岩的组成部分。

## 6.3 地质意义

秦岭造山带是我国华北与华南板块碰撞形成的(Zhang *et al.*, 1997; 张国伟等, 1995a, b, 2001; Sun *et al.*, 2002c; 任纪顺等, 1991; 高山等, 1999)。很多研究者认为秦岭造山带是华北板块(包括北秦岭)、南秦岭和华南板块, 包括商-丹和勉-略两条缝合带, 长期相互作用形成的(张国伟等, 1995a, b, 2004; Meng and Zhang, 1999, 2000)。商-丹缝合带形成于中生代中期华北板块和南秦岭的碰撞, 勉-略带则是秦岭与华南板块在三叠纪碰撞形成的。研究表明, 秦岭造山带是一个经历了从晚太古代-早古生代基底形成、晚元古代-中三叠纪构造和中新元古代陆内造山 3 个阶段长期演化的一个复合造山带, 秦岭现今的构造面貌, 即各板块、地块、岩块的基本定位与相互关系是其在不同的构造时期以不同的构造体制、不同的造山作用和造山过程复合叠加而成(张国伟等, 1996)。然而, 部分研究者从 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), 商-丹带不是古生代华北与华南板块的主缝合带(Zhang *et al.*, 1997, 1998)。另一些研究者认为北秦岭高的放射性 Pb 特征与北秦岭的岛弧背景是一致的, 并不能代表其隶属与扬子陆块(Sun and Li, 1998)。最近, 对秦岭造山带同碰撞花岗岩片麻岩利用 SHRIMP

和 TIMS 锆石定年, 获得的成岩年龄为 960 ~ 900Ma, 该类岩石形成很可能与 Rodinia 超大陆的会聚有关(Chen *et al.*, 2006)。本文获得的继承锆石的年龄也落在此范围内。从现有数据来看, 北秦岭在 900 ~ 960Ma 跟华南板块和南秦岭有紧密的联系可以较好地解释铅同位素的结果。当然也不能排除继承锆石通过板块俯冲和再循环被捕获到古生代岛弧岩浆中的可能性。但是考虑到继承锆石中没有华北的典型年龄信息(1.8Ga 和 2.5Ga), 说明北秦岭在古生代以前可能远离华北板块。

本次研究结果表明, 拉鸡庙镁铁质岩体形成于 422Ma, 由于其特殊的位置和出露特征, 表明沿商-丹带的构造活动就在这个时段附近, 这很可能是北秦岭与南秦岭碰撞, 并导致商-丹缝合带闭合。事实上, 不同的同位素地质年代学方法( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , Rb-Sr 和 Sm-Nd), 已经用于北秦岭岛弧体系古生代中期构造热事件的研究, 获得年龄结果为 406 ~ 426Ma(Sun *et al.*, 2002c; 李曙光等, 1989), 这些定年结果与拉鸡庙成岩年龄吻合。考虑到这些年龄数据采样点都属于北秦岭, 这些事件很可能是同一构造活动的结果。但奇怪的是, 这些年龄数据在商-丹缝合带的南侧, 南秦岭造山带和华南板块北缘却很少有报道。一个可能的原因就是, 伴随华南板块和南秦岭向北俯冲, 此时只是商-丹洋壳消减殆尽, 并没有出现真正意义上陆-陆碰撞和大幅度抬升, 北秦岭只是处在一种挤压环境, 即秦岭加里东期碰撞不造山(孙勇和于在平, 1991)。

秦岭拉鸡庙镁铁质岩中获得的加权年龄为  $973 \pm 60\text{Ma}$  的捕获锆石年龄, 9 个点的年龄从 898 ~ 1083Ma, 显然记录了北秦岭元古代一段时间的构造岩浆活动, 明显不同于单一的构造热事件。该定年结果与秦岭造山带大规模的同碰撞花岗岩侵入岩的形成时代下限一致, ~960Ma。指示了陆-陆碰撞过程结束的时代与 Grenvillian (1.3 ~ 1.0Ga)(Dalziel, 1991; Hoffman, 1991; Moores, 1991; Keppie *et al.*, 2001) 造山带时代基本一致。

新元古代的构造岩浆活动在秦岭造山带很发育。同时, 华南板块新元古代大规模的火山活动很发育, 尤其在扬子板块北缘和内部(Li, 1999; Li *et al.*, 2005; Ling *et al.*, 2003)。这些事件表明北秦岭、南秦岭和华南板块共同经历了新元古代的构造热事件。然而, 与其相邻的华北板块并没有报道有普遍的新元古代岩浆事件, 这些均表明华北板块可能并没有卷入新元古代与秦岭造山带相同的构造过程。综合以上分析, 可以认为新元古代, 北秦岭、南秦岭和华南板块之间距离很近, 而它们与华北板块之间相距较远。这与铅同位素的结果相吻合。

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(欧阳建平和张本仁, 1996; 张本仁等, 1998)。秦岭造山带大规模的同碰撞花岗岩侵入体的锆石定年结果是 960 ~ 900Ma(Chen *et al.*, 2006)。因此, 新元古代秦岭造山带的陆-陆碰撞事件应该代表南、北秦岭的会聚过

程,这些又跟华南板块的地质演化有紧密的联系。一种可能是华南陆块、塔里木陆块和澳洲大陆在新元古代是接连在一起的,并构成 Rodinia 超级大陆的一部分 (Li *et al.*, 1995, 1996, 2003; Li, 1999; 陆松年等, 2003)。但是在板块俯冲的影响 (Sun and Li, 1998; Sun *et al.*, 2002c) 排除之前,还不能给出明确的答案。

## 7 结论

(1) 本次研究 LA-ICP-MS U-Pb 锆石定年结果,所获得的  $422 \pm 7\text{Ma}$  的年龄记录,代表拉鸡庙镁铁质岩体的成岩时代。由于其紧邻商-丹缝合带,很可能指示了南秦岭和北秦岭在古生代的碰撞时代,即商-丹缝合带的闭合时间。

(2) 898 ~ 1083Ma 的捕获锆石年龄,该年龄数据与秦岭造山带广泛发育的 960 ~ 900Ma 的同碰撞花岗岩侵入体年龄下限完全一致,表明二者是同一岩浆构造事件的不同反映。可能与新元古代早期的陆-陆碰撞事件以及 Rodinia 超大陆的形成密切相关。

(3) 地质和地球化学资料以及大量早期捕获锆石的存在,表明拉鸡庙镁铁质岩体,与陆壳混染有关,并不代表新生洋壳,不是典型蛇绿岩的组成部分。

(4) 考虑到华北板块南缘在新元古代并没有明显的岩浆事件,结合前人的结果,可以认为,在新元古代,华北板块和华南板块之间还有一定距离。

**致谢** 本文得到了陈衍景、陈福坤研究员和匿名审稿人细致认真的审阅,他们的修改意见,对我们提高文章的质量有很大帮助。LA-ICP-MS 锆石测年得到西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明高工的协助,作者表示衷心感谢。

## References

Ames L, Zhou GZ, Xiong BC *et al.* 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 15: 472 - 489

Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chem. Geol.*, 192: 59 - 79

Chen ZH, Lu SN, Li SG *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. Asian Earth Sci.*, 28: 99 - 115

Dalziel IWD. 1991. Pacific margin of Laurentia and east Antarctica Australia as a conjugate rift pair: Evidence and implication for an Eocambrian supercontinent. *Geology*, 19: 598 - 601

Dong YP, Zhou DW and Zhang GW. 1997. Geochemistry and formation setting of Fushui complex, Eastern Qinling. *Geochemica*, 16(3): 79 - 87 (in Chinese with English abstract)

Gao S, Zhang BR, Jin ZM *et al.* 1999. Lower crustal delamination in the Qinling-Dabie orogenic belt. *Science in China (series D)*, 29(6): 532 - 541

Hacker BR, Ratschbacher L, Webb L *et al.* 1995. What brought them up? Exhumation of the Dabie Shan ultrahigh-pressure rocks.

*Geology*, 23 (8): 743 - 746

Hacker BR, Ratschbacher L and Webb L. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Sci. Lett.*, 161: 215 - 230

Han S. 1993. Forming setting of Qinwangshan-Lajimiao mafic complex. *Acta Petrologica Sinica (suppl.)*, 9: 122 - 129 (in Chinese with English abstract)

Hoffman PF. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland insideout? *Science*, 252: 1409 - 1412

Jahn BM, Cornichet J, Cong BL *et al.* 1995. Ultrahigh  $\epsilon_{\text{Nd}}$  eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China. *Chemical Geology*, 107: 61 - 79

Keppie JD, Dostal J, Ortega-Gutierrez F *et al.* 2001. A Grenvillian arc on the margin of Amazonia: Evidence from the southern Oaxacan complex, southern Mexico. *Precambrian Research*, 112: 165 - 181

Li SG, Xiao YL, Liou D *et al.* 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-eclogites: Timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 89 - 111

Li SG, Wang SY, Chen YZ *et al.* 1994. Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  methods. *Chemical Geology*, 112: 343 - 350

Li SG, Hart SR, Zheng SY *et al.* 1989. Timing of collision between the North and South China blocks the Sm-Nd isotopic age evidence. *Science in China (Ser. B)*, 3: 312 - 319

Li SG, Chen YZ, Zhang ZQ *et al.* 1993. Trace elements and Sr, Nd isotopic geochemistry of the Lajimiao noritegabbro from the North Qinling belt. *Acta Geologica Sinica*, 67(4): 310 - 322 (in Chinese with English abstract)

Li SG, Sun WD, Zhang GW *et al.* 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in the Mian-Lue tectonic zone, South Qinling-Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time. *Science in China (series D)*, 26(3): 223 - 230 (in Chinese)

Li ZX, Zhang LH, Powell CM *et al.* 1995. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia east Antarctic and Laurentia? *Geology*, 23: 407 - 410

Li ZX, Zhang LH, Powell CM *et al.* 1996. Positions of the east Asian cratons in the Neoproterozoic super-continent Rodinia. *Australia Journal of Earth Science*, 43: 593 - 604

Li ZX, Li XH, Kinny PD *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. *Precambrian Research*, 122: 85 - 109

Li XH. 1999. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze block: Timing of Neoproterozoic Jinning orogen in SE China and implications for Rodinia assembly. *Precambrian Research*, 97: 43 - 57

Li WX, Li XH, Li ZX *et al.* 2005. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. *Precambrian Research*, 136: 51 - 66

Li HM, Li HK, Chen ZH *et al.* 2006. Comparison of three methods for baddeleyite U-Pb isotope dating of basic rocks. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 653 - 659 (in Chinese with English abstract)

Ling WL, Gao S, Zhang BR *et al.* 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwest Yangtze craton, south China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Research*, 122: 111 - 140

Liu JF, Sun Y, Feng T *et al.* 2008. Geochemistry and petrogenesis of Sifangtai mafic-ultramafic complex from Qinling. *Geochemica*, 37(2): 174 - 186 (in Chinese with English abstract)

Liu JF. 2008. Studies of mafic and ultramafic rocks along the Shang-Dan suture from Qinling orogenic belt and their implications. Ph. D thesis. Xi'an: Northwest University, 63 - 70 (in Chinese with English abstract)

Liu JF, Sun Y and Sun WD. 2009. Emplacement age of the Songshugou ultramafic massif in the Qinling orogenic belt, and geologic implications. *International Geology Review*, (in press)

- Liu XM, Gao S, Yuan HL *et al.* 2002. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193nm LA-ICPMS. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 408–418 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Li HK and Chen ZH. 2003. Characteristics, sequence and ages of neoproterozoic thermo-tectonic events between and Yangtze blocks and Yangzi blocks—a hypothesis of Yangtze-Tarim connection. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 321–326 (in Chinese with English abstract)
- Mattauer M, Matte Ph, Malavieille J *et al.* 1985. Tectonics of the Qinling belt: Build-up and evolution of eastern Asia. *Nature*, 317: 496–500
- Meng QR and Zhang GW. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 27: 123–126
- Meng QR and Zhang GW. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 323: 183–196
- Moore EM. 1991. Southwest U. S. East Antarctic (SWEAT) connection: A hypothesis. *Geology*, 19: 425–428
- Ouyang JP and Zhang BR. 1996. Geochemical evidence for the formation and evolution of North Qinling microcontinent. *Science in China (series D)*, 26: 42–48
- Pei XZ, Li HM, Li GG *et al.* 1997. Isotopic ages of main rocks along the Shang-Dan zone in East Qinling and its tectonic significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(suppl.): 40–42 (in Chinese with English abstract)
- Pei XZ. 1997. Composition and Evolution of Shang-Dan Zone in Qinling Orogenic Belt. Xi'an: Xi'an Map Press, 60–75 (in Chinese)
- Ren JS, Zhang ZK, Niu BG *et al.* 1991. Discussion of the Qinling orogenic belt. In: Ye LJ, Qian XL and Zhang GW (eds.). *A Selection of Papers Presented at the Conference on the Qinling Orogenic Belt*. Xi'an: Northwest University Press, 99–110 (in Chinese with English abstract)
- Rowley DB, Xue F, Tucker RD *et al.* 1997. Ages of ultra high pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U-Pb zircon Geochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 151: 191–203
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society Special Publication of London, 42:313–345
- Sun WD, Williams IS and Li SG. 2002a. Carboniferous and Triassic eclogites in the western Dabie Mountains, east-central China: Evidence for protracted convergence of the North and South China Blocks. *J. Metamorphic Geol.*, 20: 873–886
- Sun WD, Li SG, Chen YD and Li YJ. 2002b. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. *The Journal of Geology*, 110: 457–468
- Sun WD, Li SG, Sun Y *et al.* 2002c. Mid-Paleozoic collision in the north Qinling: Sm-Nd, Rb-Sr and <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar ages and their tectonic implications. *J. Asian Earth Sci.*, 21: 69–76
- Sun WD and Li SG. 1998. Pb isotopes of granitoids suggest Devonian accretion of Yangtze (South China) craton to North China craton: Comment. *Geology*, 26: 859–860
- Sun Y and Yu ZP. 1991. A discussion on an ancient ocean and Caledonian orogeny in the east Qinling. In: Ye LJ, Qian XL and Zhang GW (eds.). *A Selection of Papers Presented at the Conference on the Qinling Orogenic Belt*. Xi'an: Northwest University Press, 167–173 (in Chinese with English abstract)
- Su L, Song SG, Zhou DW *et al.* 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of garnet pyroxenite and Fushui gabbroic complex in Songghugou region and constraints on tectonic evolution of Qinling Orogenic belt. *Chinese Science Bulletin*, 49(12): 1209–1211
- Xu ZQ, Niu BG, Liu ZG *et al.* 1991. Multiple mountain chains of the Qinling orogenic belt. In: Ye LJ, Qian XL and Zhang GW (eds.). *A Selection of Papers Presented at the Conference on the Qinling Orogenic Belt*. Xi'an: Northwest University Press, 139–147 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Wu FY, Gao S *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. *Chinese Science Bulletin*, 48: 1511–1520
- Zhang BR, Han YW, Xu JF and Ouyang JP. 1998. Geological evidence for North Qinling being a part of Yangtze plate prior to Neoproterozoic. *Geological Journal of China Universities*, 4: 369–382 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BR, Zhang HF, Zhao ZD *et al.* 1996. Geochemical subdivision and evolution of the lithosphere in East Qinling and adjacent regions – implications for tectonics. *Science in China (ser. D)*, 26(3): 201–208
- Zhang HF, Gao S, Zhang BR *et al.* 1997. Pb isotopes of granitoids suggest Devonian accretion of Yangtze (South China) craton to North China craton. *Geology*, 25: 1015–1018
- Zhang HF, Zhang BR, Ling WL *et al.* 1997. Late Proterozoic crustal accretion of south Qinling: Nd isotopic study from granitic rocks. *Geochemica*, 26: 16–24 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Gao S, Zhang BR *et al.* 1998. Pb isotopes of granitoids suggest Devonian accretion of Yangtze (South China) craton to North China craton: Reply. *Geology*, 26: 860–861
- Zhang GW, Meng QR and Lai SC. 1995a. Structure and tectonics of the Qinling orogen. *Science in China (ser. B)*, 25(9): 994–1003 (in Chinese)
- Zhang GW, Zhang ZQ, Dong YP *et al.* 1995b. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogen: Implications for the tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 101–114 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Meng QR, Yu ZP *et al.* 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen. *Science in China (Ser. D)*, 26: 193–200 (in Chinese)
- Zhang GW, Mei ZC, Zhou DW *et al.* 1987. Formation and Evolution of the Qinling Orogenic Belt. Xi'an: Northwest University Press, 11: 87–192 (in Chinese)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. *Qinling Orogen and Dynamics*. Beijing: Science Press, 117–155
- Zhang GW, Cheng SY, Guo AL *et al.* 2004. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the central orogenic system in Qinling-Dabie: With a discussion of the assembly of the main part of the continent of China. *Regional Geology of China*, 23: 846–853 (in Chinese with English abstract)
- Zhang WS and An SY. 1990. Characteristics and origin of the Qingwangshan mafic body. *Acta Petrologica Sinica*, 11(4): 53–57 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF, Fu B, Gong B and Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Science Reviews*, 62:105–161
- Zhu BQ. 1998. Study on chemical heterogenities of mantle crustal systems and geochemical boundaries of blocks. *Earth Science Frontiers*, 5(1–2): 72–82 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟. 1997. 东秦岭富水基性杂岩体地球化学特征及其形成环境. *地球化学*, 16(3): 79–87
- 高山, 张本仁, 金振民等. 1999. 秦岭-大别造山带下地壳拆沉作用. *中国科学(D辑)*, 29(6): 532–541
- 韩松. 1993. 秦王山-拉鸡庙基性杂岩体的形成环境. *岩石学报(增刊)*, 9: 122–129
- 李曙光, Hart SR, 郑双根等. 1989. 中国华北-华南陆块碰撞时代的钐-钕同位素年龄证据. *中国科学(B辑)*, 3: 312–319

- 李曙光, 陈移之, 张宗清等. 1993. 北秦岭拉班庙苏长辉长岩痕量元素和 Sr, Nd 同位素地球化学. 地质学报, 67(4): 310-322
- 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 陈家义, 杨永成. 1996. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据. 中国科学(D辑), 26(3): 223-230
- 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. 地质通报, 25(6): 653-659
- 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. 地球化学, 37(2): 174-186
- 刘军锋. 2008. 秦岭商-丹构造带镁铁质、超镁铁质岩体研究及其地质意义. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 63-70
- 柳小明, 高山, 袁洪林等. 2002. 193nm 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. 岩石学报, 18(3): 408-418
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 2003. 塔里木与扬子新元古代热-构造事件特征、序列和时代——扬子与塔里木连接(YZ-TAR)假设. 地学前缘, 10(4): 321-326
- 裴先治. 1997. 秦岭商-丹带的组成与构造演化. 西安: 西安地图出版社, 60-75
- 裴先治, 李厚民, 李国光等. 1997. 东秦岭商丹构造带主要地质体的同位素年龄及其构造意义. 地球学报, 18(增刊): 40-42
- 欧阳建平, 张本仁. 1996. 北秦岭微陆块形成与演化的地球化学证据. 中国科学(D辑), 26: 42-48
- 任纪舜, 张正坤, 牛宝贵等. 1991. 论秦岭造山带. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟主编. 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 99-110
- 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. 科学通报, 49(12): 1209-1211
- 孙勇, 于在平. 1991. 夭折了的东秦岭加里东运动. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟. 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 167-173
- 许志琴, 牛宝贵, 刘志刚等. 1991. 秦岭-大别“碰撞-陆内”型复合山链的构造体制及陆内板块动力学机制. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟. 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 139-147
- 张宏飞, 张本仁, 凌文黎等. 1997. 南秦岭晚元古代地壳增生事件: 花岗质岩石 Nd 同位素地球化学示踪. 地球化学, 26: 16-24
- 张本仁, 韩吟文, 许继锋, 欧阳建平. 1998. 北秦岭新元古代前属扬子板块的地球化学证据. 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. 中国科学(D辑), 26(3): 201-208
- 张国伟, 孟庆任, 于在平等. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学(D辑), 26: 193-200
- 张国伟, 程顺有, 郭安林等. 2004. 秦岭-大别中央山系南缘勉略古缝合带的再认识-兼论中国大陆主体的拼合. 地质通报, 23: 846-853
- 张国伟, 孟庆任, 赖少聪. 1995a. 秦岭造山带的结构构造. 中国科学(B辑), 25(9): 994-1003
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏等. 1995b. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. 岩石学报, 11(2): 101-114
- 张国伟, 梅志超, 周鼎武等. 1987. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社, 11: 87-192
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 117-155
- 张稳胜, 安三元. 1990. 陕西商县秦山王山镁铁质岩体的特征及成因. 岩石学报, 11(4): 53-57
- 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. 地学前缘, 5(1-2): 72-82