

北秦岭两河口岩体的地球化学特征及其成因^{*}

陈隽璐^{1,2} 王宗起³ 徐学义² 曾佐勋¹ 王洪亮² 何世平² 李平¹

CHEN JunLu^{1,2}, WANG ZongQi³, XU XueYi², ZENG ZuoXun¹, WANG HongLiang², HE ShiPing² and Li Ping¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

2. 西安地质矿产研究所, 西安 710054

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

1. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2007-02-15 收稿, 2007-04-22 改回.

Chen JL, Wang ZQ, Xu XY, Zeng ZX, Wang HL, He SP and Li P. 2007. Geochemical characteristics and petrogenetic investigation of the Lianghekou granite pluton, northern Qinling Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):1043–1054

Abstract The Lianghekou granite pluton in west segment of northern Qinling Mountains shows high contents of SiO_2 (68.48% ~ 72.45%) and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (1.35 ~ 2.07), and weakly peraluminous, belonging to high K calc-alkaline I-type granite. The chondrite-normalized REE-patterns are characterized by LREE enrichment with variable degree of negative Eu anomalous sizes ($\delta\text{Eu} = 0.417 \sim 0.621$). The multi-element normalized spidergrams show that they are enriched in LILE (K, Th, Rb, Ba) and depleted in HFSE (Ta, Nb, Y and Yb), and quite similar to the typical continent-continent syn-collisional granite. These geochemical characteristics are similar to syn-collisional granites of Dehe, Saigen and Niujaoshan granitoids in the east segment of northern Qinling Mountains. The Pb, Sr and Nd isotopes on the Lianghekou granite pluton are similar to the Qinling Group and Maqianshan Group with high contents of Pb, indicating that the granitic melts were generated from lower crust. It is provide the important data for Mesoproterozoic-Neoproterozoic tectonic evolution and geodynamics of Qinling Orogenic Belt.

Key words Syn-collisional, Neoproterozoic, Lianghekou granite pluton, Northern Qinling Mountains

摘要 北秦岭西段新元古代两河口岩体, 岩性为眼球状片麻状二长花岗岩, 含少量黑云母、角闪石及榍石, 属钾质钙碱性花岗岩类; 主量元素 $\text{SiO}_2 = 68.48\% \sim 72.45\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.35 \sim 2.07$, 为钾质; 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 关系图上投入高钾钙碱性区; A/CNK 介于 1.03 ~ 1.31, 总体为钾质钙碱性弱过铝质花岗岩。岩石富集 LILE 元素 (K、Th、Rb、Ba 等), 亏损 HFSE 元素 (Ta、Nb、Y、Yb 等); 稀土元素总量较高 ($\sum \text{REE} = 126.82 \times 10^{-6} \sim 267.359 \times 10^{-6}$), 轻重稀土强烈分馏 ($\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE} = 5.447 \sim 8.894$), 稀土元素分配模式为轻稀土富集型, 具中等程度 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.417 \sim 0.621$)。微量、稀土元素分配模式与北秦岭东部的碰撞型德河岩体、寨根岩体及牛角山岩体一致。Pb-Sr-Nd 同位素组成具低的 $\varepsilon_{\text{Nd}} = -3.9180 \sim -6.0064$ 、较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.70760 \sim 0.71675$ 、富放射性成因 Pb 同位素组成, 模式年龄 $t_{\text{DM}} = 1849.73 \sim 2022.79\text{Ma}$, 指示两河口岩体源岩特征与秦岭岩群、马街山群相近, 岩浆源区为下地壳成因。结合区域资料, 认为两河口岩体形成于同碰撞末期—后碰撞初期的构造转换时期; 这一认识细化了北秦岭新元古代碰撞造山过程; 其所确立的汇聚碰撞时间与我国晋宁运动时限一致; 为研究中国古陆块在新元古代时期汇聚时限、过程、方式及 Rodinia 超大陆事件在秦岭地区的响应提供了重要证据。

关键词 同碰撞; 新元古代; 两河口岩体; 北秦岭

中图法分类号 P588.121

^{*} 国家自然科学基金重点项目 (40334044) 和中国地质调查局国土资源大调查研究项目 (1212010610319、1212010611807) 共同资助。

第一作者简介: 陈隽璐, 男, 1964 年生, 博士生, 高级工程师, 构造地质学专业, 主要从事区域地质调查研究, E-mail: chjl719@sohu.com

1 引言

横贯我国中部的秦岭,是一个经历长期的地质历史时期演化形成的复合型大陆造山带,其内部被商丹缝合带及勉略缝合带分隔为北秦岭、南秦岭和扬子地块北缘三个次级构造带。北秦岭地区出露古元古界秦岭岩群、中新元古界宽坪岩群、早古生界二郎坪群、丹凤岩群。对中新元古代北秦岭构造格局,有多种解释,归纳起来主要有:大洋板块观点,认为华北板块与扬子板块以秦岭洋相隔(吴正文,1991;杨巍然,1995;康维国,1996;张宗清等,2001);大陆裂谷说,认为华北与扬子只是裂陷分割而后闭合(耿树方和严克明,1991)或者认为秦岭新元古代表现为类似于“红海型裂谷”的形成与闭合过程(陆松年等,2005);还有一种观点认为秦岭由一系列裂谷和小洋盆构成的洋陆复杂裂谷系(张国伟等,1996,2001)。产生分歧的原因在于秦岭至今未发现新元古代缝合带。为探讨这一问题并恢复重建 Rodinia 超大陆,一些学者对北秦岭新元古代变形花岗岩从年代学、成因类型、形成机制等方面进行了深入研究,发现其中残存有新元古代造山带遗迹(Wang *et al.*, 2003; 王涛等,1998,2002;张成立等,2004),并且认为北秦岭是中元古代早期由扬子地块裂离出并向北拼贴于华北地块南缘的块体(张本仁等,1998,2003;陆松年等,2003,2004,2005)。然而,这些认识主要基于对北秦岭东部新元古代变形花岗岩研究。至今,有关北秦岭西段同一时期变形花岗岩研究,多侧重于年代学研究(陆松年等,2003;陈隽璐等,2004;Chen *et al.*, 2006),缺乏有关岩石成因和动力学背景研究。因此,本文对出露于北秦岭西段秦岭岩群中的新元古代两河口岩体,进行了系统的元素地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素地球化学分析,探讨其岩石成因、形成构造环境及构造属性,进而为新元古代北秦岭构造体制及碰撞造山作用过程的细节研究提供新的依据。

2 地质特征

两河口岩体出露于北秦岭的西段陕西太白县鹦鸽咀、桃川、唐口、两河口和凤县唐藏一带(图1),平面上呈多个大小不等的透镜状、椭圆状。其中以太白两河口出露面积最大,约20km²。岩体经历了长期复杂的变形变质作用改造,以发育旋转碎斑、糜棱面理、动力塑性流变褶皱等为特征;岩体片麻理产状与区域构造线展布方向一致。该岩体主要由眼球状片麻状二长花岗岩、片麻状细粒二长花岗岩组成,与黑云母斜长片麻岩、斜长角闪片(麻)岩、含夕线石榴石二云石英片岩、含石墨大理岩、变粒岩等组合之间表现为侵入接触关系。长期以来被视为秦岭岩群的重要组成部分^①(肖思云等,1988)。

作者于2003年在完成1:25万《宝鸡市幅》区域地质填图过程中,根据岩性组合和接触关系将眼球状片麻状二长花

岗岩、片麻状细粒二长花岗岩组合从秦岭岩群中解体出来,命名为“两河口岩体”。该岩体岩石呈浅肉红色、浅灰色,粒度5~10mm,具变余粗粒花岗结构,片麻状、糜棱构造和眼球状构造。主要矿物成分:斜长石30%~40%,半自形板状,聚片双晶;钾长石30%~35%,半自形板状,多呈眼球状斑晶,成分以微斜长石为主,具格子双晶;石英25%~30%,他形粒状;次要矿物黑云母5%~10%,显微鳞片状;少量角闪石(1%~2%)。副矿物为锆石、榍石、磷灰石、磁铁矿。蚀变特征主要为斜长石的绢云母化,黑云母的绿帘石化等。矿物组成特征显示属钾质钙碱性花岗岩类(Barbarin,1999;肖庆辉等,2002)。陈隽璐等(2004)采用TIMS法对两河口岩体进行了锆石U-Pb测年,得到不一致上交点年龄为852±2Ma。最近,Chen *et al.* (2006)报道了TIMS锆石U-Pb不一致上交点年龄863±17Ma,并对同一样品SHRIMP锆石U-Pb定年获得了两组表面加权平均年龄,分别为929±16Ma和877±17Ma。其中前者(929±16Ma)与王涛等(2005)在牛角山岩体中的变形花岗岩脉体的形成时代(929±25Ma)相一致,后者与TIMS法获得的年龄相近,也与张成立等(2004)在蔡凹岩体中获得的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄相似。

3 样品采集及分析

野外采集样品通过室内显微镜下详细观察后,挑选出蚀变相对较弱、较新鲜且具代表性的样品,在西北大学大陆动力学国家重点实验室研磨至200目,然后在中国科学院地质与地球物理所进行系统的主量、微量以及Sr、Nd和Pb同位素测试。主量元素测定采用XRF方法完成,精度优于5%;微量元素测定采用ICP-MS方法完成,精度优于10%,样品的Nd、Sr和Pb同位素测定在VG354上进行。具体方法参见Chen *et al.* (2000,2002)和马中平等(2006)。根据前人对两河口岩体测年的结果(陈隽璐等,2004;Chen等,2006),在本文中,我们采用 $t=870\text{Ma}$ 对样品的Sr、Nd、Pb同位素进行时间校正。

4 主量、微量元素特征

4.1 主量元素特征

样品的主量元素分析结果见表1,其SiO₂为68.48%~72.45%;K₂O/Na₂O=1.35~2.07,表现为钾质。在K₂O-SiO₂关系图上,样品落入高钾钙碱性区域(图2),在图3上样品落入碱性与钙碱性区域之间,但总体投入钙碱性区域。各氧化物百分含量与SiO₂百分含量关系变化显示,K₂O、FeO^T与SiO₂含量正相关,其他常量元素含量与SiO₂呈反消

^① 陕西区调队,1965。(内部资料)

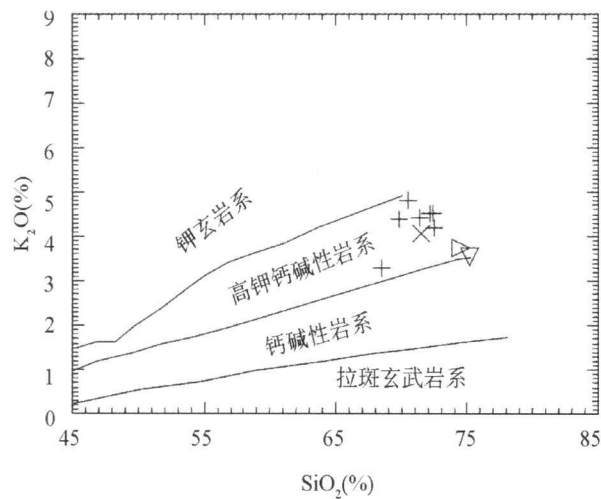


图2 两河口岩体 K₂O-SiO₂ 关系图
Fig. 2 K₂O-SiO₂ graph of Lianghekou granitic pluton

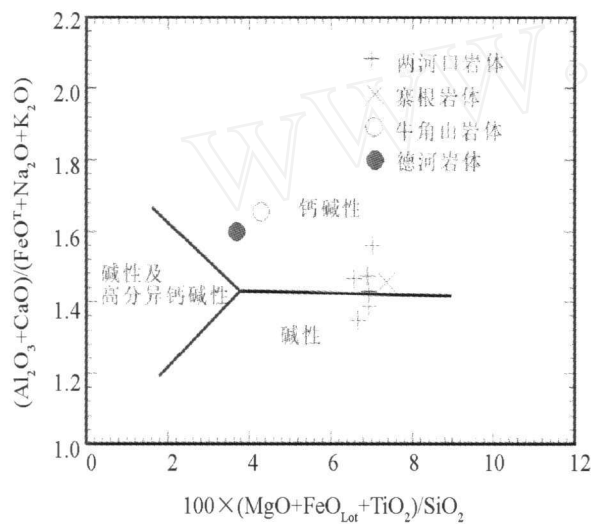


图3 $(Al_2O_3 + CaO)/(FeO^T + Na_2O + K_2O) - 100$
 $(MgO + FeO^T + TiO)/SiO_2$ 图解 (据 Sylvester, 1989)
Fig. 3 $(Al_2O_3 + CaO)/(FeO^T + Na_2O + K_2O) - 100$
 $(MgO + (FeO_{Lot} + TiO)/SiO_2$ graph (after Sylvester, 1989)

长关系, P₂O₅ 含量在一定程度上保持不变(图略)。以 SI(固结指数)为横坐标,与各氧化物百分含量对比,Na₂O、K₂O 与 SI 呈负相关外,其余均为正向相关;与正常岩浆分异趋势一致。

4.2 微量元素特征

样品微量元素分析结果见表2。两河口岩体各微量元素含量变化较小,Rb = 159 × 10⁻⁶ ~ 224 × 10⁻⁶,Sr = 106 × 10⁻⁶ ~ 122 × 10⁻⁶,Ba = 513.632 × 10⁻⁶ ~ 852.347 × 10⁻⁶,Y = 21 × 10⁻⁶ ~ 52.091 × 10⁻⁶,Nb = 8 × 10⁻⁶ ~ 15.9 × 10⁻⁶,Ta = 1.004 × 10⁻⁶ ~ 1.4 × 10⁻⁶。在以洋中脊花岗岩标准化的微

量元素分布图中,大离子亲石元素(LILE)K、Th、Rb、Ba 等富集,高场强元素(HFSE)Ta、Nb、Y、Yb 等较相邻元素相对亏损且向右逐渐降低。其样式与西藏、阿曼等碰撞型花岗岩相似(李昌年,1992;高秉璋等,1991),且与北秦岭东部的德河岩体、寨根岩体及牛角山岩体相一致(图4)。

两河口岩体以稀土总量较高($\Sigma REE = 126.82 \times 10^{-6} \sim 267.359 \times 10^{-6}$),Eu 负异常中等($\delta Eu = 0.417 \sim 0.621$)为特征。在稀土元素配分图中(图5),呈现出轻稀土富集的配分样式,反映岩浆分异较强(高秉璋等,1991;王中刚,1986)。另外,样品的稀土配分曲线与北秦岭东部的德河岩体、寨根岩体及牛角山岩体配分曲线相近(图5)。

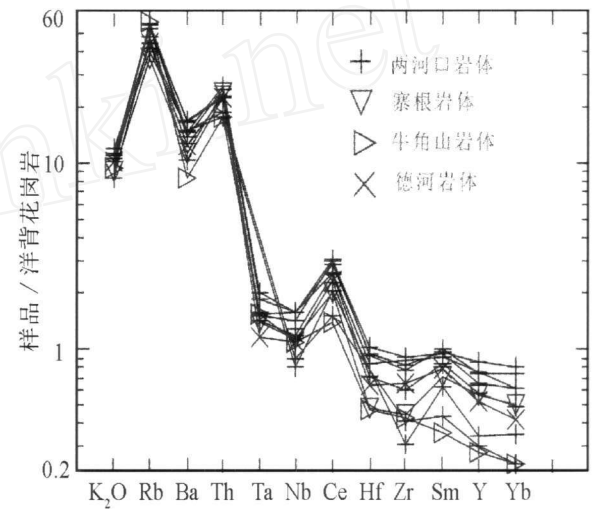


图4 两河口岩体微量元素配分曲线
Fig. 4 ORG-normalized trace element patterns of Lianghekou granitic pluton

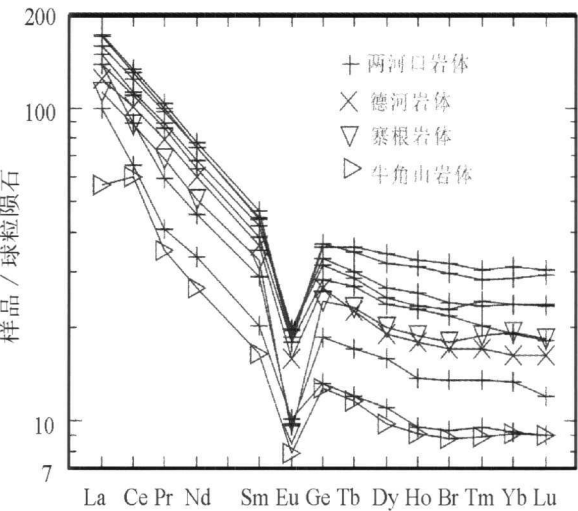


图5 两河口岩体稀土配分曲线图(标准化值引自 Boynton et al., 1984)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of Lianghekou granitic pluton (Normalized data after Boynton et al., 1984)

表 2 两河口岩体微量元素分析表($\times 10^{-6}$)
Table 2 Trace elements data($\times 10^{-6}$) of Lianghekou granitic pluton

样品编号	D2538/1	D2538/2	T01	D06 - 1	D06 - 2	D06 - 3	D06 - 4	DQ14	QL15T01	T24
Sc	10.00	12.47	10.61	10.67	11.13	8.60	5.04	7.70		
V	39.00	31.00	22.00	65.91	22.63	22.98	22.15	34.00	21.30	15.00
Ga	18.50	18.03	19.45	19.00	19.53	15.90	16.70	16.20		
Cu	28.00	9.00	12.00	28.77	9.64	12.03	8.26	13.00	11.00	4.30
Zn	54.00	56.00	63.30	66.60	69.83	67.83	63.63	49.20	53.50	36.00
Co	9.00	8.00	4.40	12.35	5.72	5.40	5.23	6.80	4.28	3.20
Ni	23.00	21.00	5.00	18.42	8.52	6.49	4.92	7.00	6.80	4.60
Cr	46.00	50.00	11.00	251.70	253.44	213.48	44.46	20.00	13.04	12.00
Rb	159.00	177.00	224.00	190.38	221.26	210.71	220.25	178.00	232.00	146.00
Ba	744.00	748.00	824.00	513.63	726.34	852.35	693.51	617.00	412.00	566.00
Th	14.00	15.00	17.80	18.15	20.75	18.40	20.05	17.80	14.00	19.00
U	4.20	3.66	3.56	3.55	5.19	4.20	3.00	3.10		
Nb	8.00	9.00	15.90	11.86	15.78	14.30	15.68	11.00	10.90	11.30
Ta	1.09	1.00	1.40	1.07	1.30	0.82	1.09	0.97		
Sr	122.00	153.00	123.00	110.91	104.08	118.15	106.12	113.00	67.20	99.00
Zr	104.00	139.00	298.00	206.62	265.04	308.71	281.66	225.00	145.00	150.00
Hf	7.55	6.37	8.28	9.25	8.61	5.73	4.27	4.35		
Y	24.00	21.00	53.00	40.59	52.09	45.96	59.88	37.00	19.30	40.00
Cs	10.00	12.68	9.92	8.51	10.21	9.00	12.50	3.80		
La	42.70	31.00	46.00	42.62	53.14	52.45	48.96	38.20	17.50	34.90
Ce	72.20	53.00	91.00	88.28	106.95	104.18	99.62	81.00	48.70	71.00
Pr	7.25	4.97	10.90	10.54	12.62	12.08	11.79	9.70	4.26	8.37
Nd	27.50	20.00	40.90	38.49	46.41	44.59	44.64	36.20	15.90	30.50
Sm	5.66	3.95	8.20	7.55	9.11	8.59	8.73	7.11	3.22	6.39
Eu	0.71	0.75	1.43	1.31	1.37	1.44	1.32	1.17	0.58	0.67
Gd	4.79	3.45	8.16	7.29	9.56	8.60	9.27	6.88	3.30	6.29
Tb	0.81	0.57	1.35	1.28	1.64	1.42	1.71	1.06	0.55	1.09
Dy	5.14	3.57	8.00	7.59	10.29	8.54	10.99	6.10	3.18	6.40
Ho	0.99	0.69	1.68	1.64	2.22	1.83	2.34	1.29	0.66	1.35
Er	2.86	1.96	4.80	4.56	6.19	5.03	6.71	3.58	1.85	3.78
Tm	0.44	0.31	0.78	0.66	0.92	0.75	0.99	0.55	0.29	0.61
Yb	2.79	1.93	4.90	3.97	5.98	4.94	6.47	3.38	1.92	4.00
Lu	0.40	0.30	0.77	0.60	0.97	0.78	1.00	0.54	0.30	0.61
Pb	26.00	30.00	29.00	21.13	30.84	29.71	27.99	11.00	32.90	30.00
Σ REE	174.24	126.45	228.87	216.37	267.36	255.23	254.55	196.76	102.21	175.96
LREE/HREE	8.56	8.89	6.52	6.84	6.08	7.00	5.45	7.42	7.48	6.29
CeN/YbN	6.69	7.10	4.80	5.75	4.63	5.46	3.99	6.20	6.56	4.59
Ba/Sr	6.10	4.89	6.70	4.63	6.98	7.21	6.53	5.46	6.13	5.72
Rb/Sr	1.30	1.16	1.82	1.72	2.13	1.78	2.08	1.58	3.45	1.47
Ba/La	17.42	24.13	17.91	12.05	13.67	16.25	14.16	16.15	23.54	16.22
Nb/La	0.19	0.29	0.35	0.28	0.30	0.27	0.32	0.29	0.62	0.32
Th/La	0.33	0.48	0.39	0.43	0.39	0.35	0.41	0.47	0.80	0.54
Sc/Th	0.00	0.00	0.56	0.69	0.51	0.58	0.56	0.48	0.36	0.41
Ni/Co	2.56	2.63	1.14	1.49	1.49	1.20	0.94	1.03	1.59	1.44
Cr/Ni	2.00	2.38	2.20	13.66	29.76	32.90	9.03	2.86	1.92	2.61
Zr/Nb	13.00	15.44	18.74	17.42	16.79	21.59	17.97	20.45	13.30	13.27
La/Nb	5.34	3.44	2.89	3.59	3.37	3.67	3.12	3.47	1.61	3.09
Ba/Nb	93.00	83.11	51.82	43.30	46.02	59.61	44.24	56.09	37.80	50.09
Rb/Nb	19.88	19.67	14.09	16.05	14.02	14.74	14.05	16.18	21.28	12.92
Th/Nb	1.75	1.67	1.12	1.53	1.31	1.29	1.28	1.62	1.28	1.68
δEu	0.42	0.62	0.53	0.54	0.45	0.51	0.45	0.51	0.54	0.32
Rb/Ba	0.214	0.237	0.272	0.371	0.305	0.247	0.318	0.288	0.563	0.258

5 Pb-Sr-Nd 同位素特征

花岗质岩浆源区地球化学示踪是揭示地壳基底组成与性质的有效途径(Downes and Duthou, 1988; Farmer, 1992; Zhang *et al.*, 2004; 肖庆辉等, 2005)。利用 Pb-Sr-Nd 同位素对两河口岩体进行了示踪研究, 其分析结果见表 3、4。两河口岩体样品 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值的变化范围较小, 介于 0.511885 ~ 0.51199; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较高, 其变化范围为 0.769709 ~ 0.789466; 据 Rb、Sr 含量及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值计算的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 5.001 \sim 6.198$, 表明岩浆分异强烈(魏菊英和王金玉, 1988; 韩吟文等, 1996); Pb 同位素组成为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 19.31 \sim 18.73$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.5921 \sim 15.6701$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.922 \sim 39.4649$, 表现富放射性成因 Pb 同位素的特征。

取 $t = 870\text{Ma}$ 计算两河口岩体 Sr、Nd 同位素组成, 结果表明 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 、 ϵ_{Sr} 变化范围较大, 分别为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.70760 \sim 0.71675$, $\epsilon_{\text{Sr}} = 56.17 \sim 128.89$, 表明岩浆源区主要为下地壳物质部分熔融; $\epsilon_{\text{Nd}} = -3.9180 \sim -6.0064$, 属低负值, 与同熔型系列相似。在 $\epsilon_{\text{Nd}}-\epsilon_{\text{Sr}}$ 图解(图 6)中投入 IV 象限中部, 介于陆壳改造型和同熔型系列之间。

花岗岩类的 t_{DM} 值反映花岗岩源区物质在地壳中的平均存留年龄(Arndt and Goldstein, 1987; 张宏飞等, 1995), 或者说反映区域性地壳的增长特征(张宏飞等, 2006), 由表 3 可知, 两河口岩体 t_{DM} (Ma) 主要集中于 1849.73 ~ 2022.79Ma, 明显大于两河口岩体的侵位年龄, 反映岩浆物质来自元古代的存留地壳物质(张宏飞等, 2005)。

花岗岩全岩的 Pb 同位素组成代表岩石现今的 Pb 同位素比值(张宏飞等, 1997; 张理刚等, 1988); 采用 $t = 870\text{Ma}$ 对两河口岩体及其围岩的 Pb 同位素组成进行了校正, 结果表明两河口岩体 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 17.3885 \sim 18.0276$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.5166 \sim 15.5907$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 36.3964 \sim 37.3404$ 。样品的 Pb 同位素具有较高的比值, 较围岩秦岭岩群斜长角闪岩 Pb 同位素组成低; $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 、 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 略高于宽坪岩群斜长角闪岩 Pb 同位素组成, 而 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 与宽坪岩群斜长角闪岩 Pb 同位素组成近于一致(表 4)。

6 讨论

6.1 构造环境分析

两河口岩体以钾长石眼球状结构, 含少量黑云母、角闪石、榍石及围岩捕虏体为特征, 矿物组合显示为钾质钙碱性花岗岩类(KCG), 形成于构造转换期(Barbarin, 1999)。主量元素含量表明 SiO_2 、 K_2O 高, $\text{Mg}^\#$ 低, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, $\text{A}/\text{CNK} > 1$ 。 SiO_2 与 $\text{FeO}^\text{T} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 总体呈负相关性; 且两河口岩体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i > 0.706$, $\epsilon_{\text{Nd}} = -3.9180 \sim -6.0064 <$

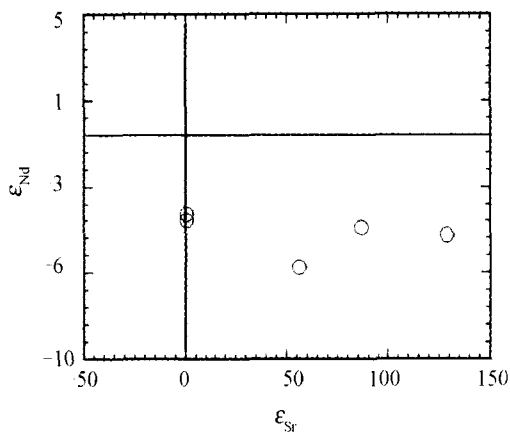


图 6 两河口岩体 $\epsilon_{\text{Nd}}-\epsilon_{\text{Sr}}$ 图解

Fig. 6 $\epsilon_{\text{Nd}}-\epsilon_{\text{Sr}}$ graph of Lianghekou granitic pluton

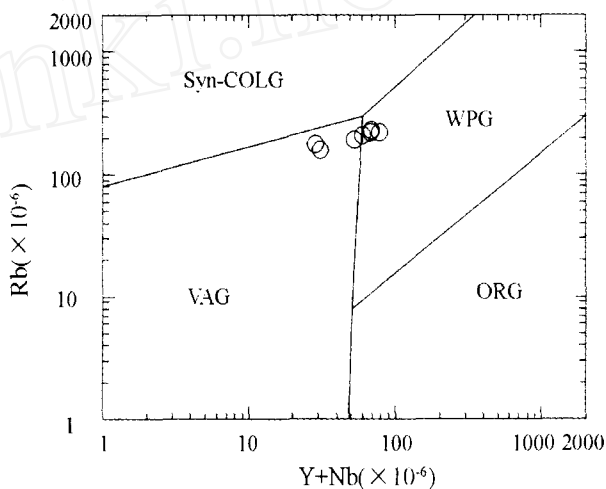


图 7 两河口岩体 Rb-(Y+Nb) 图(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 7 Rb-(Y+Nb) graph of Lianghekou granitic pluton (after Pearce *et al.*, 1984)

-2.0, 显示出后碰撞花岗岩的地球化学特征(Sylvester, 1998)。

两河口岩体微量元素以富集大离子亲石元素 Rb、K、Th、Rb、Ba 等, 亏损高场强元素 Ta、Nb、Zr、Y、Yb、Hf 等, 具消减带岩浆生成物相对富集 LILE, 贫化 HFSE 及亏损 Nb、Ta 的特征(Pearce, 1982; Tatsumi and Kogiso, 1997; 张成立等, 2004), 显示碰撞型钾质钙碱性花岗岩曲线特征。在 Rb-(Y+Nb)(图 7)及 Nb-Y 图解(图 8)中, 各点投入弧花岗岩靠近板内花岗岩区; 说明岩体侵位较晚, 可能为同碰撞末期到后碰撞转化时期侵入就位。

北秦岭东部牛角山、德河、寨根岩体为强过铝质钙碱性花岗岩, 以发生强烈变形并含有白云母、黑云母、石榴子石等过铝质矿物为特征; 各岩体分别形成的锆石 U-Pb(SHRIMP)年龄为 $955 \pm 13\text{Ma}$ (王涛等, 2005), $943 \pm 18\text{Ma}$, $914 \pm 10\text{Ma}$ (陆松年等, 2003)。岩石学及岩石地球化学研究表明这些岩体为同碰撞构造环境产物(王涛等, 1998, 2002, 2005;

表 3 两河口岩体及其围岩 Nd、Sr 同位素组成表

Table 3 Nd-Sr elements data of Lianghekou granitic pluton and its wall rocks

单位	样品编号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{测}}$	2σ	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{测}}$	2σ	t_{DM}	ε_{Nd}	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	ε_{Sr}
两河口岩体	D06/1	7.548	38.487	0.511912	12	190.376	110.908	0.778916	12	1979.91	-5.4786	0.71675	186.23
	D06/2	9.113	46.410	0.511973	13	221.255	104.081	0.786798	12	1885.88	-4.3026	0.70975	86.76
	D06/3	8.594	44.588	0.511945	11	210.708	118.148	0.777294	12	1887.21	-4.6060	0.71272	128.89
	D06/4	8.730	44.635	0.51199	13	220.251	106.123	0.789466	11	1849.73	-3.9180	0.71423	150.34
	D145/1	8.200	40.900	0.511885	10	224.000	123.000	0.769709	12	2022.79	-6.0064	0.70760	56.17
秦岭岩群	D026/7-1	4.900	16.600	0.512835	11	8.400	106.000	0.709413	20	1367.81	5.8800	0.70760	41.43
	D026/8-1	4.970	17.300	0.51275	14	4.000	208.000	0.705315	13	1527.71	4.7514	0.70462	13.88
	D027/3-2	3.490	11.600	0.51286	15	8.000	156.000	0.71521	14	1396.01	5.9853	0.71336	138.10
	D029/8-1	3.830	14.000	0.512713	15	102.000	139.000	0.733659	16	1382.07	4.9532	0.70720	50.50
	D134/4SZ	3.504	12.670	0.5127	11	17.175	301.581	0.707017	12	1478.21	4.4976	0.70497	18.78
	D142/1	4.572	17.040	0.512711	11	6.822	235.450	0.703988	11	1302.64	5.2691	0.70295	-9.96
宽坪岩群	D04/1	3.791	11.508	0.51276	11	4.724	160.677	0.705494	11	4099.84	2.1041	0.70444	11.22
	D04/2	2.341	7.310	0.512953	12	1.697	204.832	0.703287	11	1506.85	6.4953	0.70299	-9.35
	D04/3	2.198	6.925	0.512961	11	1.400	241.390	0.703199	10	1331.34	6.8436	0.70299	-9.33

用 $t = 870\text{Ma}$ 统一计算, t_{DM} 计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2137$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51315$.

表 4 两河口岩体及其围岩 Pb 同位素组成表

Table 4 Pb elements data of Lianghekou granitic pluton and its wall rocks

样品名称	样品编号	Pb 测 ($\times 10^{-6}$)	Th 测 ($\times 10^{-6}$)	U 测 ($\times 10^{-6}$)	$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{测}}$	$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{测}}$	$\left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{测}}$	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$
两河口岩体二长花岗片麻岩	D06/1	21.134	18.151	3.662	19.31	15.6651	38.9229	17.6925	15.5548	36.3964
	D06/2	30.839	20.751	3.563	19.11	15.6643	39.2222	18.0276	15.5907	37.2402
	D06/3	29.705	18.397	3.549	18.75	15.5921	39.0264	17.6445	15.5166	37.2174
	D06/4	27.993	20.048	5.188	19.39	15.6723	39.4649	17.6459	15.5534	37.3404
	D145	29	17.8	4.2	18.73	15.6701	38.9312	17.3885	15.5786	37.1393
秦岭岩群斜长角闪岩	D134/4	11.657	1.118	0.385	18.33	15.6356	38.5639	18.0226	15.6150	38.2869
	D026/7-1	2.7	0.48	0.103	18.43	15.6355	38.2378	18.0845	15.6117	37.7260
	D026/8-1	5.4	0.74	0.28	18.59	15.6354	38.1709	18.1157	15.6031	37.7759
	D027/3-2	6.9	0.55	0.13	18.24	15.639	38.2489	18.0673	15.6273	38.0200
	D029/8-1	2.8	0.36	0.19	18.82	15.6679	38.6528	18.1906	15.6252	38.2784
	D134/4SZ	11.657	1.118	0.385	18.33	15.6356	38.5639	18.0253	15.6150	38.2869
	D142/1	5.447	1.599	0.468	19.9	15.7224	38.5275	19.0961	15.6675	37.6610
宽坪岩群斜长角闪岩	D04-1	1.67	0.418	0.248	18.36	15.5259	38.0232	17.0078	15.4339	37.3065
	D04-2	1.195	0.361	0.149	18.22	15.4957	37.9814	17.0889	15.4187	37.1183
	D04-3	1.499	0.341	0.132	18.16	15.5221	38.0406	17.3621	15.4677	37.3905

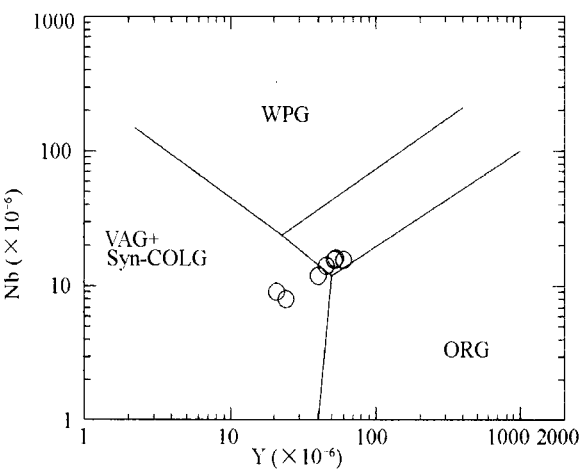


图8 两河口岩体 Nb-Y 图(据 Pearce *et al.* , 1984)
Fig. 8 Nb-Y graph of Lianghekou granitic pluton (after Pearce *et al.* , 1984)

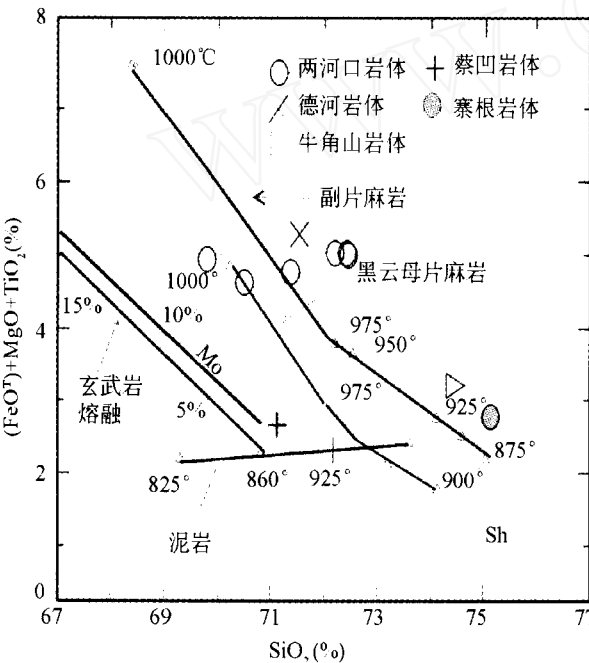


图9 (FeO^T + MgO + TiO₂)-SiO₂ 图解(引自肖庆辉等, 2002)
Fig. 9 (FeO^T + MgO + TiO₂)-SiO₂ graph (after Xiao *et al.* , 2002)

王晓霞等,1997;游振东等,1991;陈志宏等,2004)。两河口岩体与其比较,除岩石钙碱指数显示出钙碱性和碱性的过渡特征,岩石矿物组合显示为弱过铝质外;它们的稀土配分模式及微量元素配分曲线型式近于一致; $\epsilon_{Nd}(t) = -3.9180 \sim -6.0064$, $t_{DM} = 1849.73 \sim 2022.79$ Ma,与牛角山岩体和德河岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值一致($-4.3 \sim -5.4$),模式年龄也相近(1999~2232Ma)(王晓霞等,1997;王涛等,2005),可能说明两河口岩体属同碰撞花岗岩,但就位时期较晚。

张成立等(2004)对北秦岭东部蔡凹岩体研究认为,岩体

形成于 889 ± 10 Ma(锆石 LA-ICP-MS),为一套变形弱,富铝、高钾和铈,富集 LIL 元素,贫化 HFS 元素的过铝质高钾钙碱性“ I ”型花岗岩,形成于后碰撞构造环境。与其相比较,两河口岩体遭受强变形变质作用改造,Al₂O₃、Sr 含量相对较低,Y、Yb 含量相对高于蔡凹岩体。据此认为两河口岩体形成就位于蔡凹岩体之前,两河口岩体形成时间可以做为主碰撞结束-后碰撞开始的转折时期。

6.2 成因及构造属性

两河口岩体矿物组成上属 KCG 花岗岩,CaO/Na₂O = 0.54~1.02>0.3, Al₂O₃/TiO₂ = 20.79~43.36<100,其形成温度>875℃(Sylvester,1998)。在图9上,两河口岩体样品投入片麻岩区,同样显示形成温度较高;图10和图11上各点投入变质火山岩部分熔融区与变杂砂岩部分熔融区交界处,说明两河口岩体岩浆来自下地壳。

两河口岩体 $\epsilon_{Nd}(t)$ 较低, $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ 较高,亏损 Sm;显示两河口岩体源岩直接来自消减带板块俯冲而使玄武岩洋壳重熔的可能性不大,可以认为是古老大陆地壳重熔的产物,来源于下地壳较深处。两河口岩体 t_{DM} 年龄与秦岭岩群形成时间一致,也证明两河口岩体源岩来源于秦岭岩群古陆结晶基底。

源区物质的钾组分很大程度上决定了花岗质熔体中的钾组分特征(张宏飞,2005),两河口岩体 K₂O 平均值>4.3%,证明其岩浆源区以高钾为特征;Pb-Sr-Nd 同位素与秦岭岩群斜长角闪岩近于一致(表3,4),似乎说明秦岭岩群

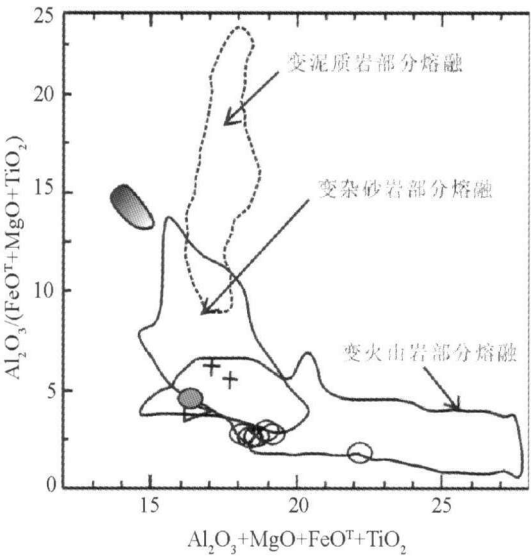


图10 两河口岩体 Al₂O₃/(FeO^T + MgO + TiO₂)-(Al₂O₃ + MgO + FeO^T + TiO₂)图解(据 Patiño Douce, 1999; 图例同图9)
Fig. 10 Al₂O₃/(FeO^T + MgO + TiO₂)-(Al₂O₃ + MgO + FeO^T + TiO₂) graph of Lianghekou granitic mass (after Patiño Douce,1999; Sample from Fig. 9)

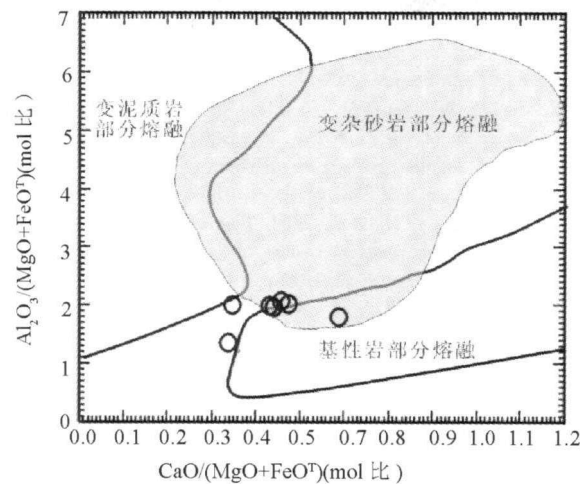


图 11 两河口岩体 $[Al_2O_3/(MgO + FeO^T)]_{mol} - [CaO/(MgO + FeO^T)]_{mol}$ 图解 (据 Alther *et al.*, 2000)
Fig. 11 Molar $[Al_2O_3/(MgO + FeO^T)]_{mol} - [CaO/(MgO + FeO^T)]_{mol}$ graph of Lianghekou granitic pluton (after Alther *et al.*, 2000)

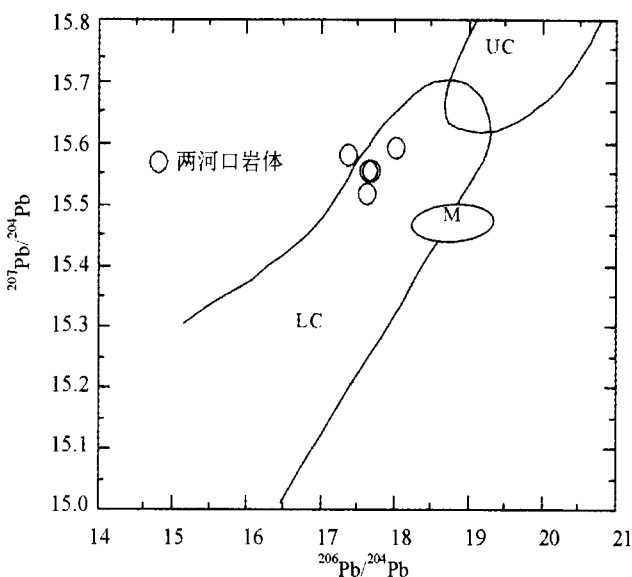
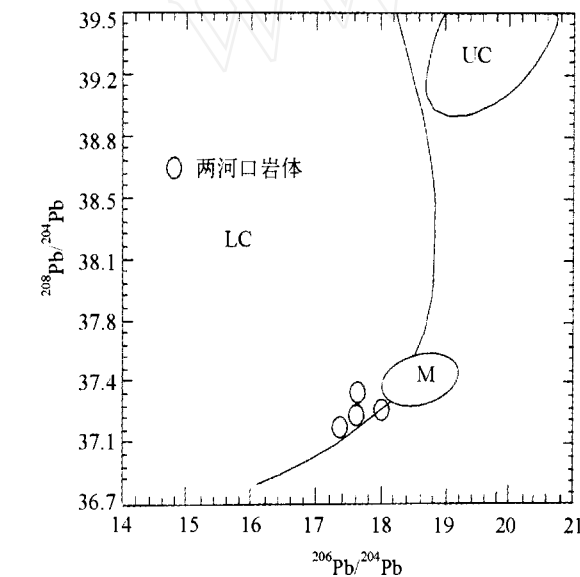


图 12 两河口岩体 $^{208}Pb/^{204}Pb - ^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb - ^{206}Pb/^{204}Pb$ 图解 (据 Zartman and Doe, 1981; 张宏飞等, 1997)。UC-上地壳, LC-下地壳, M-地幔
Fig. 12 $^{208}Pb/^{204}Pb - ^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb - ^{206}Pb/^{204}Pb$ graph of Lianghekou granitic pluton (after Zartman and Doe, 1981; Zhang *et al.*, 1997). UC-Upper continental crust, LC- Lower continental crust, M-Mantle

6.3 地质意义

两河口岩体与户县涝峪岩体、蔡凹岩体、牛角山岩体、德河岩体、寨根岩体等,由西向东近 500km 呈线状断续展布于商丹断裂带之北的秦岭岩群中;构成北秦岭新元古代构造-岩浆岩带,代表新元古代时期北秦岭存在碰撞造山带。含白云母高压变质相矿物的牛角山等岩体已被认为属陆壳深俯冲过程相对高压环境增厚的陆壳熔融产物(王涛等, 2005);

斜长角闪岩为其主要源区岩性之一,这与图 10 所得结论一致。

与 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比较,时间校正对 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值变化不显著(张宏飞等, 2006), $^{207}Pb/^{204}Pb$ 现代比值基本可以代表岩石形成时的初始比值(Hamelin *et al.*, 1984; 邢光福, 1997; 侯青叶等, 2005)。因此,选择 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值作为一个对比参数,借以讨论古老基底构造属性。

两河口岩体 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 现代比值变化范围为 15.5921 ~ 15.6723,明显的高于华北陆块南缘玄武岩 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值(15.198 ~ 15.490),略高于宽坪岩群变玄武岩(15.4957 ~ 15.5259)、陇山岩群比值(15.446 ~ 15.725)(张宏飞, 2006)及扬子陆块北缘西段玄武岩 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值(15.473 ~ 15.667);但是与马街山群斜长角闪岩(15.633 ~ 15.710)(张宏飞, 2005, 2006)和秦岭岩群斜长角闪岩(15.6355 ~ 15.7224)的 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值比较接近。说明两河口岩体源自秦岭岩群等古老的变质基底。在图 12 各点均投入下地壳边界线一侧,更进一步反映两河口岩体岩浆源区主体来自下地壳。

蔡凹岩体被认为在碰撞造山过程地壳增厚背景下,在后碰撞拉张阶段由卷入有消减带物质的下地壳部分熔融所形成(张成立等, 2004);介于其间的两河口岩体形成温度高($>875^{\circ}C$),岩浆源自下地壳基性火山岩,指示岩体的形成可能为碰撞过程导致地壳增厚致使下部地壳基性物质部分熔融而成,其形成的时限可以代表同碰撞结束一后碰撞开始。这不但为碰撞造山过程的动力学机制变化研究提供了地质依据,同时细化了该区的碰撞造山过程,也是对研究新元古

代北秦岭碰撞造山带的补充完善。

目前对“1”型俯冲型户县涝峪岩体(锆石 U-Pb TIMS 年龄为 955.5 ± 8.4 Ma; 陆松年等, 2003) 的时代及其性质还存在疑虑, 如果其时代早于牛角山岩体, 则说明该区存在洋盆构造体制; 其与南秦岭同时代洋盆构造格局相似(凌文黎等, 2002)。问题是其所代表相互碰撞的陆块还不清楚; 出露于秦岭岩群北侧的宽坪岩群还没有准确的变质变形年龄限定, 因此这次汇聚碰撞事件是否属于扬子陆块北缘(陆松年等, 2004) 还是华北南缘陆块的一次汇聚增生, 抑或是大陆块边缘的一次小陆块汇聚碰撞增生, 还有待进一步深入研究(王涛等, 2005); 但仍可能属于扬子陆块、华北陆块总体汇合趋势的一种表现(陆松年等, 2004)。这次汇聚碰撞时间略晚于 Grenville 碰撞造山时间, 但与我国晋宁运动时限一致; 为研究中国古陆块在新元古代时期汇聚时限、汇聚过程、汇聚方式及 Rodinia 超大陆事件在秦岭地区的响应提供了重要证据。

7 结论

(1) 两河口岩体为钾质钙碱性花岗岩, 形成于同碰撞向后碰撞这一特殊构造转换时期, 与北秦岭东部的牛角山岩体、德河岩体、寨根岩体在产出部位、地球化学特征、Sr-Nd 同位素组成等方面相似, 共同构成新元古代时期北秦岭同碰撞构造岩浆岩带。这一认识对新元古代时期北秦岭地区陆-陆汇聚碰撞作用的时限、过程、方式以及 Rodinia 超大陆的形成在北秦岭地区的响应提供了重要证据。

(2) 两河口岩体以 Pb 同位素含量高为特征, 与秦岭岩群、马衔山群相似, 略高于宽坪岩群、陇山岩群, 说明两河口岩体的源区与秦岭岩群、马衔山群古老的基底岩石亲缘, 这为北秦岭古大地构造格局的研究提供了新的资料依据。

致谢 Pb、Sr、Nd 同位素比值及元素 IC-PMS 分析在中科院地质与地球物理所测试, 野外工作中得到陈家义、李海平、张占武、陈永杰、赵选社、陈有仓等的支持, 在成文过程中得到李秋根博士、张维吉教授、冯益民研究员的帮助, 就一些问题得到夏林圻研究员、夏祖春研究员及杨永成教授级高工的指导。两位评审人提出了建设性意见。谨致谢忱。

References

- Alther R, Holl A, Hegner E *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and north Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50: 51–73
- Arndt NT and Goldstein SL. 1987. Use and abuse of crust formation ages. *Geology*, 15: 893–895
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605–626
- Chen F, Hegner E and Todt W. 2000. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogenesis from the Black Forest, Germany – evidence for a Cambrian magmatic arc. *International Journal of Earth Sciences*, 88: 791–802
- Chen F, Siebel W, Satir M, Terzioglu N and Saka K. 2002. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone. *International Journal of Earth Sciences*, 91: 469–481
- Chen JL, Zhang ZW, Li HP *et al.* 2004. Characteristics of metamorphic intrusion in Qinling complex. *Geology of Northwest*, 37(1): 34–39 (in Chinese with English abstract)
- Chen ZH, Lu SN, Li HK *et al.* 2004. The age of the Dehe biotite monzogranite gneiss in the North Qinling: TIMS and SHRIMP U-Pb zircon dating. *Geological bulletin of China*, 23(2): 136–141 (in Chinese with English abstract)
- Chen ZH, Lu SN, Li HK *et al.* 2006. Constraining the role of the Qinling orogen in the assembly and break-up of Rodinia: Tectonic implications for Neoproterozoic granite occurrences. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 99–115
- Downes H and Duthou JL. 1988. Isotopic and trace element arguments for the lower crustal origin of Hercynian granitoids and pre-Hercynian orthogenesis, Massif Central (France). *Chemical Geology*, 68: 291–308
- Farmer GL. 1992. Magmas as trace of lower crustal composition: an isotopic approach. In: Fountain DM, Arculus R, Kay R. W., eds. *Continental Lower Crust Development in Geotectonics*. Amsterdam: Elsevier, 363–390
- Gao BZ, Hong DW, Deng JJ *et al.* 1991. A guide to the method of 1: 50000 regional geological survey in igneous granite area. Wuhan: Ching university of Geosciences Press, 20–37 (in Chinese)
- Geng SF and Yan KM. 1991. The Yangtze platform and the North China platform as of the same lithospheric plate. *Regional Geology of China*. 10(2): 97–113 (in Chinese with English abstract)
- Hamelin B, Dupre B and Allegre CJ. 1984. The lead isotope systematic of ophiolite complexes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 67: 351–366
- Han YW, Liu JH and Xu JF. 1996. Precambrian chemical division of mantle and crust-mantle interaction in Qinling region: evidence from Pb-Nd isotopic and trace element studies. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 21(5): 457–463 (in Chinese with English abstract)
- Hou QY, Zhang HF, Zhang BR *et al.* 2005. Characteristics and tectonic affinity of Lajishan paleo-mantle in Qinian orogenic belt: a geochemical study of basalts. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 62–70 (in Chinese with English abstract)
- Kang W, Hu K, Liang W *et al.* 1996. Proterozoic High-Pressure Metamorphic Belt in Central East of China. Beijing: Geological Publishing House, 1–98 (in Chinese with English abstract)
- Li CN. 1992. Trace element and petrology of igneous rock. Wuhan: China University of Geosciences Press, 87–130 (in Chinese)
- Ling WL, Cheng JP, Wang XH and Zhou HW. 2002. Geochemical features of the Neoproterozoic igneous rocks from the Wudang region and their implications for the reconstruction of the Jinning tectonic evolution along the south Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 25–36
- Lu SN, Chen ZH, Li HK *et al.* 2004. Late Mesoproterozoic Early Neoproterozoic evolution of the Qinling orogen. *Geological Bulletin of China*, 23(2): 107–112
- Lu SN, Chen ZH, Li HK *et al.* 2005. Two magmatic belts of the Neoproterozoic in the Qinling orogenic belt. *Acta Geologica sinica*, 79(2): 166–173 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Li HK, Chen ZH *et al.* 2003. Meso – Neoproterozoic geological evolution in the Qinling orogeny and its response to the supercontinental events of Rodinia. Beijing: Geological Publishing House, 85–87 (in Chinese)
- Ma ZP, Xia LQ, Xu XY *et al.* 2006. Geochemical characteristics of basalts: evidence for the tectonic setting and geological significance of Kulehu ophiolite, South Tianshan Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(5): 87–400 (in Chinese with English abstract)

- Patiño Douce AE. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds). *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*, 55 - 75 Geological Society of London, Special Publicationno. 168
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. *THOPRE R S. Andesites*. 525 - 548
- Sylvestre PJ. 1989. Post-collisional granites. *J. Geology*, 97: 261 - 280
- Tatsumi Y and Kogiso T. 1997. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: Origin of chemical and physical characteristics in arc magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 207 - 221
- Wang T, Wang XX, Li WP *et al.* 1998. U-Pb Isotopic age of granitic gneisses core complex of Qinling orogeny and its geological significance. *Regional Geology of China*, 17(3): 262 - 265 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Wang X, Zhang G *et al.* 2003. Remnants of a neoproterozoic collisional orogenic belt in the core of the Phanerozoic Qinling orogenic belt (China). *Gondwana Research*, 6(4): 699 - 710
- Wang T, Zhang GW, Pei XZ *et al.* 2002. Possibility of the existence of a Neoproterozoic NW trending orogenic belt in the North Qinling and convergence and breakup of blocks on its two sides. *Geological Bulletin of China*, 21(8-9): 516 - 522 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Zhang ZQ, Wang XX *et al.* 2005. Neoproterozoic Collisional Deformation in the Core of the Qinling Orogen and Its Age: Constrained by Zircon SHRIMP Dating of Strongly Deformed Syn-collisional Granites and Weakly Deformed Granitic Veins. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 320 - 332 (in Chinese with English abstract)
- Wang XX, Wang T and Li WP. 1997. The geochemistry characteristics and genesis of the granitic gneisses in the Qinling complex. *Mineral. Petrol.*, 17(3): 76 - 82 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZG. 1989. Trace element geochemistry. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Wei JY and Wang GY. 1988. The isotopic geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 22 - 25 (in Chinese)
- Wu ZW, Chai YC, Huang WF *et al.* 1991. The nappe tectonic framework of the Qinling orogenic belt. Xi'an: Northwest University Press, 111 - 120 (in Chinese)
- Xiao QH, Deng JF, Ma DQ *et al.* 2002. The ways of investigation on granitoids. Beijing: Geological Publishing House, 4 - 50 (in Chinese)
- Xiao QH, Qiu RZ, Deng JF *et al.* 2005. Granitoids and continental crustal growth modes in China. *Geology in China*, 32(3): 343 - 352 (in Chinese with English abstract)
- Xiao SY, Zhang WJ, Song ZJ *et al.* 1988. The metamorphic strata of the Northern Qinling in China. Xi'an: Xi'an Traffic University Press, 29 - 142 (in Chinese)
- Xing GF. 1997. The concept, genesis and geological significance of Dupal isotopic anomaly. *Volcanic Geology and Mineral Resource*, 18(4): 281 - 291 (in Chinese with English abstract)
- Yang WR, You ZD, Han YJ *et al.* 1995. The tectonic characteristics and evolution of the Qinling-Dabie high-pressure and ultrahigh pressure metamorphic belt, central China. *Geological Journal of China Universities*, 1(2): 53 - 63 (in Chinese with English abstract)
- You Z, Suo S, Han Y *et al.* 1991. The Metamorphic Processes and Tectonic Analyses in the Core Complex of an Orogenic Belt: An Example from Eastern Qinling Mountains. Wuhan: China University of Geosciences Press, 166 - 311 (in Chinese)
- Zartman RE and Doe BR. 1981. Plumbotectonics the model. *Tectonophysics*, 75: 135 - 162
- Zhang BR, Gao S, Zhang HF *et al.* 2003. Geochemistry of the Qinling orogenic belt. Beijing: Science Press, 50 - 72 (in Chinese)
- Zhang BR, Han YW, Xu JF *et al.* 1998. Geochemical evidence for north Qinling being a part of Yangtze plate prior to the Neoproterozoic. *Geological Journal of China Universities*, 4(4): 369 - 382 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Liu L, Zhang GW *et al.* 2004. Determination of Neoproterozoic post collisional granites in the north Qinling Mountains and its tectonic significance. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 11(3): 33 - 42 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Meng QR, Yu ZP *et al.* 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen. *Science in China (Series D)*, 26(3): 193 - 200 (in Chinese)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 397 - 401 (in Chinese)
- Zhang HF, Jin LL, Zhang L *et al.* 2005. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of granitoids from western Qinling belt: Constrains on basement nature and tectonic affinity. *Science in China (Series D)*, 35: 914 - 926 (in Chinese)
- Zhang HF, Jin LL, Zhang L *et al.* 2006. Pb and Nd Isotopic compositions of Basement and Granitoid in the Qilingshan: Constraints on tectonic affinity. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 31(1): 7 - 65 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Zhang BR, Luo TC *et al.* 1997. Geochemical study of genesis and tectonic setting for late-Proterozoic granitoid, North Qinling. *Journal of China University of Geosciences*, 18(2): 194 - 202 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Zhao ZD, Luo TC *et al.* 1995. Crustal growth and lower crust nature of North Qinling: study of Sm-Nd isotopic model ages. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 60 - 170 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Zhong ZQ, Gao S *et al.* 2004. Pb and Nd isotopic composition of the Jigongshan Granite: Constraints on Crustal structure of Tongbaishan in the middle part of the Qinling-Tongbaishan orogenic belt. *Central China. Lithos*, 73: 215 - 227
- Zhang LG. 1988. The Pb-isotopic composition of the feldspar and implication. *Mineral deposits*, 7(2): 55 - 64 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Zhang GW and Tang SH. 2002. Study on the Isotopic Chronology of Metamorphic Strata in south Qinling. Beijing: Geological Publishing House, 217 - 245 (in Chinese)

附中文参考文献

- 陈隽璐, 张占武, 李海平等. 2004. 秦岭杂岩中变质侵入体特征. *西北地质*, 37(1): 34 - 39
- 陈志宏, 陆松年, 李怀坤等. 2004. 北秦岭德河黑云二长花岗片麻岩德成岩时代-TIMS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素年代学. *地质通报*, 23(2): 136 - 141
- 高秉璋, 洪大卫, 郑基俭等. 1991. 花岗岩类区 1: 5 万区域地质填图方法指南. 武汉: 中国地质大学出版社(武汉), 20 - 37
- 耿树方, 严克明. 1991. 论扬子地台与华北地台同属一个岩石圈板块. *中国区域地质*, 2: 97 - 112
- 韩吟文, 柳建华, 许继锋. 1996. 秦岭造山带前寒武纪地幔化学分区及壳幔物质循环——Pb, Nd 同位素及微量元素证据. *地球科学——中国地质大学学报*, 21(5): 457 - 463
- 侯青叶, 张宏飞, 张本仁等. 2005. 祁连造山带中部拉脊山古地幔特征及其归属: 来自基性火山岩的地球化学证据. *地球科学(中国地质大学学报)*, 30(1): 62 - 70
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 87 - 130
- 凌文黎, 程建萍, 王歆华等. 2002. 武当地区新元古代岩浆岩地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示. *岩石学报*, 18(1): 25 - 36

- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤等. 2004. 秦岭造山带中-新元古代(早期)地质演化. 地质通报, 23(2): 107-112
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤等. 2005. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带. 地质学报, 79(2): 166-173
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏等. 2003. 秦岭中-新元古代地质演化及对 RODINIA 超级大陆事件的响应. 北京: 地质出版社, 85-87
- 马中平, 夏林圻, 徐学义等. 2006. 南天山库勒湖蛇绿岩形成环境及构造意义-基性熔岩的地球化学证据. 岩石矿物学杂志, 25(5): 387-400
- 康维国, 胡克, 梁万通等. 1996. 华中元古宙高压变质带. 北京: 地质出版社, 1-98
- 王涛, 王晓霞, 李伍平等. 1998a. 秦岭造山带核部杂岩花岗质片麻岩体的 U-Pb 同位素年龄及意义. 中国区域地质, 17(3): 262-265
- 王涛, 张国伟, 裴先治等. 2002. 北秦岭新元古代北西向碰撞造山带存在的可能性及两侧陆块的汇聚与裂解. 地质通报, 21(8-9): 516-522
- 王涛, 张宗清, 王晓霞等. 2005. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代——强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄限定. 地质学报, 79(2): 320-332
- 王晓霞, 王涛, 李伍平. 1997. 秦岭杂岩中花岗质片麻体的岩石地球化学特征及成因. 矿物岩石, 17(3): 76-82
- 王中刚. 1989. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社
- 魏菊英, 王关玉. 1988. 同位素地球化学. 北京: 地质出版社, 22-25
- 吴正文, 柴育成, 黄万夫等. 1991. 秦岭造山带的推覆构造格局. 见: 叶连俊等主编. 秦岭造山带学术讨论会选集. 西安: 西北大学出版社, 111-120
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 4-50
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福等. 2005. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究. 中国地质, 32(3): 343-352
- 肖思云, 张维吉, 宋子季等. 1988. 北秦岭变质地层. 西安: 西安交通大学出版社, 29-142
- 邢光福. 1997. Dupal 同位素异常的概念、成因及其地质意义. 火山地质与矿产, 18(4): 281-291
- 杨巍然, 游振东, 韩郁菁等. 1995. 秦岭-大别高压超高压变质带构造特征及构造演化. 高校地质学报, 1(2): 53-63
- 游振东, 索书田, 韩郁菁等. 1991. 造山带核部杂岩变质过程与构造解析: 以东秦岭为例. 武汉: 中国地质大学出版社, 166-311
- 张成立, 刘良, 张国伟等. 2004. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩德确定及其构造意义. 地学前缘(中国地质大学. 北京), 11(3): 33-42
- 张本仁, 高山, 张宏飞等. 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社, 50-72
- 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. 高校地质学报, 4(4): 369-382
- 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(3): 193-200
- 张国伟, 张本仁, 袁学成等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 397-401
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利等. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制. 中国科学 D 辑, 35(10): 914-926
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利等. 2006. 基底岩系和花岗岩类 Pb-Nd 同位素组成限制祁连山带的构造属性. 地球科学(中国地质大学学报), 31(1): 57-65
- 张宏飞, 张本仁, 洛庭川. 1997. 北秦岭新元古代花岗岩类成因与构造环境的地球化学研究. 地球科学, 18(2): P194-202
- 张宏飞, 赵志丹, 罗庭川等. 1995. 从岩石 Sm-Nd 同位素模式年龄论北秦岭地壳增生和地壳深部性质. 岩石学报, 11(2): 160-170
- 张理刚. 1988. 长石铅和矿石铅同位素组成及其意义. 矿床地质, 7(2): 55-64
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒. 2002. 南秦岭变质地层同位素年代学. 北京: 地质出版社, 217-245