

陕西南秦岭四海坪岩体锆石 U-Pb 年龄及地质意义

陈清敏, 郭岐明, 王强, 王喆, 张拴厚

(陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要:通过对四海坪岩体地质学、岩石学以及主量、微量、稀土元素地球化学研究,表明四海坪岩体主要岩石类型有灰白色中细粒黑云母二长花岗岩和灰白色似斑状黑云母二长花岗岩,属于高钾钙碱性系列,具有准铝质-过铝质的特点,富集 Rb、Th、K、Nd 等,贫 Ba、Nb、Ta、La、P、Eu 等,明显亏损 Nb、Ta、P。稀土含量中等偏低,轻重稀土分异程度高,稀土元素对球粒陨石标准化分配曲线呈明显的右倾分配模式,反映四海坪花岗岩形成于板内环境,岩浆主要来源于地壳熔融。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,显示四海坪花岗岩形成于中侏罗世(168.2 ± 1.1 Ma),偏晚于前人获得的胭脂坝岩体锆石 U-Pb 年龄,反应四海坪-胭脂坝岩体群多期次侵入,从晚三叠世到中侏罗世存在多期次岩浆活动。

关键词:四海坪花岗岩;地球化学;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

中图分类号:P595

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2017)03-0065-09

Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of Sihaiping Pluton from Southern Qinling Orogenic Belt in Shaanxi

CHEN Qingmin, GUO Qiming, WANG Qiang, WANG Zhe, ZHANG Shuanhou

(Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the geology, petrology and geochemistry studies, off whitemedium-granule-biotite-adamellite and porphyritic biotite-adamellite from the Sihaiping intrusion were identified. The Sihaiping-granitoid belongs to high-K calc-alkaline series with aluminous-peraluminous characteristics, which was enriched in Rb, Th, K and Nd, depleted in Ba, Nb, Ta, La, P and Eu, with significant loss of Nb, Ta and P. In addition, this intrusion has moderate-low REE concentration and right deviated distribution curve. It suggests that Sihaiping granite mass might be formed in intra-plate setting. The magma came from the partial melting of earth crust. LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis suggested that Sihaiping intrusion was formed at 168.2 ± 1.1 Ma, which is later than U-Pb age of Yanzhiba intrusion. Combining with previous researches, Sihaiping-Yanzhiba intrusions had experienced several magmatism from late Triassic to middle Jurassic.

Keywords: Sihaiping granitoid; geochemistry; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating

秦岭造山带处于中国大陆中部,是构成中国大陆的重要单元,它是由多期不同的构造运动叠加改

造而形成的复合型造山带(张国伟等,2001)。在南秦岭构造带出露 3 个大型中生代花岗岩体群:光头

收稿日期:2017-01-10;修回日期:2017-04-23

基金项目:陕西省公益性地勘专项项目“陕西秦岭造山带中生代构造体制与成矿作用研究”(20130301)资助

作者简介:陈清敏(1984-)女,博士,从事中生代岩浆岩研究工作。E-mail:156396685@qq.com

山岩体群、五龙岩体群和东江口岩体群(严阵等, 1985)。这些岩体以岩基的形式侵入到古生代地层中, 并且与成矿作用关系密切, 其成因对于研究南秦岭板块构造演化和深部动力学乃至多金属成矿作用等问题具有重要意义。

前人对南秦岭中生代侵入岩的研究工作不断深入, 不仅得到一系列南秦岭花岗岩体锆石 U-Pb 年龄数据, 对岩浆成因和构造环境也有不同的理解。前人大都认为南秦岭五龙岩体群中胭脂坝花岗岩为陆壳重熔形成(严阵等, 1985; 李先梓等, 1993; 张本仁等, 1994)。骆金诚等(2010)认为胭脂坝岩体为准铝-弱过铝质壳源 S 型花岗岩, 可能是印支运动晚期的造山作用造成本区地壳加厚, 之后在伸展-减薄的背景下, 中部地壳深度的变质砂屑质岩石, 通过黑云母脱水发生部分熔融而形成的产物。岩浆源区的物质组成和熔融机理还需要进一步研究。此外, 四海坪岩体与胭脂坝岩体侵入关系也需要进一步探讨。

鉴于此, 笔者通过详细的岩石学、地球化学及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学的研究, 并结合前

人的研究成果, 探讨了四海坪-胭脂坝岩体的侵入年代、成因机制和地质意义, 以期为解释南秦岭晚三叠世-中晚侏罗世花岗岩的成因和反演秦岭造山带演化过程提供新的资料。

1 区域地质概况与岩相学特征

1.1 区域地质概况

四海坪岩体出露于陕西省宁陕县胭脂坝岩体以东(图 1), 产状为北东-南西向, 呈椭圆状, 侵入到古生代地层中。岩体边部分布有大量的花岗岩脉, 岩体与围岩一般呈明显的切层侵入关系, 并形成数米至几十米宽的角岩带, 出露面积约 50 km²。北部围岩主要是泥盆纪砂岩、灰岩、片岩和大理岩等; 南部围岩主要为寒武纪-石炭纪地层, 其中以泥盆纪地层为主; 岩性包括砂岩、片岩、板岩、千枚岩、白云质灰岩和大理岩等; 西部与老城岩体石英闪长岩相接(张宏飞等, 1997); 岩体边部常分布有大量的花岗岩脉, 岩体与围岩一般呈明显的切层侵入关系, 并形成数米至几十米宽的角岩带(严阵等, 1985)。

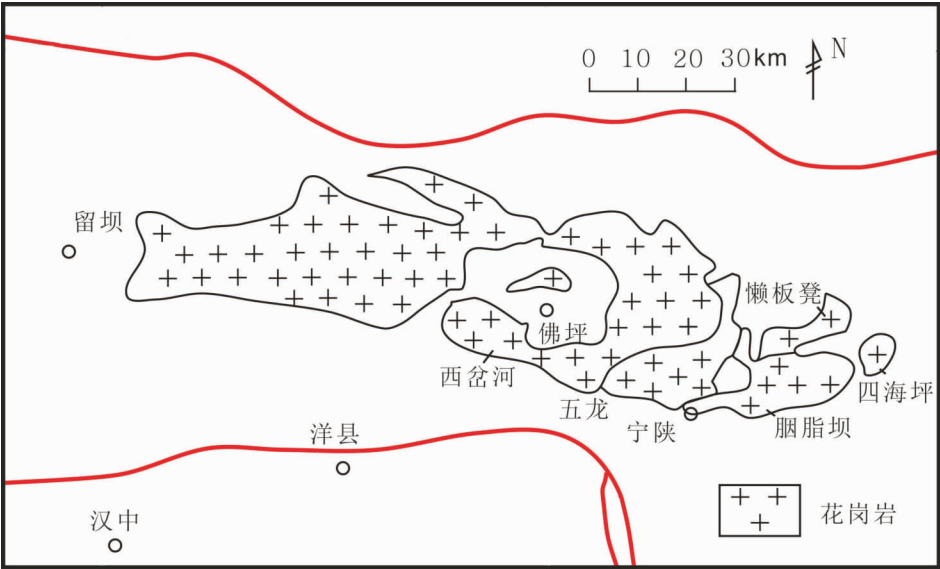


图 1 南秦岭四海坪-胭脂坝岩体分布示意图

Fig. 1 The distribution of Sihai ping-Yanzhiba pluton in South Qinling Mountains

1.2 岩石学特征

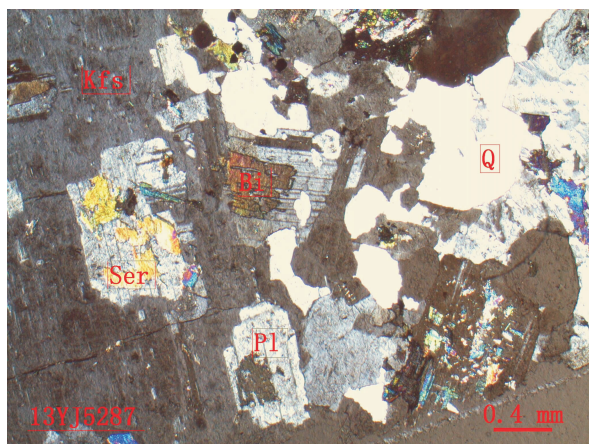
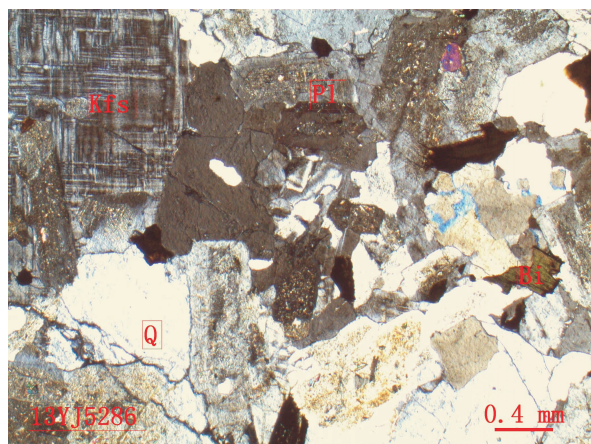
四海坪岩体主要岩石类型有: 灰白色中细粒黑云母二长花岗岩、灰白色似斑状黑云母二长花岗岩等。

(1)灰白色中细粒黑云母二长花岗岩。中细粒花岗结构, 交代蠕虫结构, 块状构造, 矿物成分: 石英 30%, 斜长石 28%, 钾长石 32%, 黑云母 8%, 金属矿物 2%, 绿泥石、白云母、绢云母少量, 另见褐帘石和金

属矿物等。岩石的主要特征:一是黑云母含量较多;二是主要矿物粒径为中细粒级。斜长石部分为板柱状,一般粒度 $0.18\text{mm} \times 0.30\text{mm} \sim 0.54\text{mm} \times 1.62\text{mm}$,部分为不规则粒状。钾长石见2种,一为板柱状,薄片中所见最大粒度 $1.45\text{mm} \times 2.43\text{mm}$,个别可见卡氏双晶,为正长石;另一种为不规则粒状,粒径 $0.72 \sim 4.50\text{mm}$,格状双晶明显,为微斜长石(图2a)。

(2)灰白色似斑状黑云母二长花岗岩。似斑状结构,二长结构,交代(蠕虫、净边)结构,块状构造。矿物成分:石英28%,钾长石30%,斜长石35%,黑

云母6%,白云母+绢云母1%,少量磷灰石、锆石,金属矿物微量。岩石的主要特征是标本上见明显的似斑状特征,长石斑晶最大 15.00mm 。斜长石大部分为板柱状,粒度一般介于 $0.20\text{mm} \times 0.43\text{mm} \sim 1.57\text{mm} \times 3.00\text{mm}$,斑晶可到 $2.30\text{mm} \times 4.00\text{mm} \sim 7.00\text{mm} \times 15.00\text{mm}$;少数为他形粒状,与钾长石接触部位可见被交代溶蚀和被石英呈蠕虫状交代的现象;泥化、绢云母化明显,聚片双晶常见,双晶纹细密具更长石特征。钾长石多为不规则他形粒状,一般粒径 $0.50 \sim 2.00\text{mm}$ (图2b)。



a. 正交偏光;Kfs. 钾长石;Q. 石英;Pl. 斜长石;Bi. 黑云母;b. 正交偏光;Kfs. 钾长石;Q. 石英;Pl. 斜长石;Bi. 黑云母

图2 四海坪岩体主要岩性显微镜下特征图

Fig. 2 Microscopic characteristics of Sihaiping granite

2 样品测试、地球化学特征和年代学研究

2.1 样品测试

四海坪岩体花岗岩样品主量元素、微量和稀土元素测试分析在陕西省地质矿产实验研究所(国土资源部西安矿产资源监督检测中心)完成。其中主量元素采用X射线荧光光谱(XRF)分析完成,微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄样品采样点坐标为 $N33^{\circ}26'37.70''$, $E108^{\circ}43'20.79''$, 样品岩性为黑云母二长花岗岩。锆石挑选工作在河北省地调所实验室完成,锆石样品的制靶、锆石阴极发光(CL)图像照摄以及锆石 U-Pb 同位素组成分析工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。使用环

氧树脂将挑选好的晶型完整、透明度好的锆石样品固定制靶并抛光,然后进行 CL 图像照摄及定年测试分析。样品锆石的 CL 图像照摄由 MonoCL3+ 型阴极荧光光谱仪装置完成;锆石 U-Pb 同位素分析由 LA-ICP-MS 仪器完成,该系统由 ELAN 6100DRC 四级杆质谱仪、ComPex102 激光器以及 GeoLas200M 光学系统组成,激光剥蚀孔径为 $30\mu\text{m}$;样品同位素及元素组成分析通过 GLITTER 程序完成。

2.2 主量元素特征

四海坪岩体 10 个黑云母二长花岗岩样品主量元素分析结果及特征参数见表1。二长花岗岩具有较高的 SiO_2 ($71.56\% \sim 73.57\%$) 和 Al_2O_3 ($13.68\% \sim 15.08\%$) 含量,具有较高的 K_2O ($4.06\% \sim 4.69\%$) 含量和全碱含量,里特曼指数 ($\sigma = 2.07 \sim 2.62$) 较低,以上这些地球化学特征显示四海坪岩体属于高钾钙碱性系列。A/NK

表 1 四海坪岩体样品主量元素(10⁻²)、微量及稀土元素(10⁻⁶)分析结果表
Tab.1 Samples of the main elements (10⁻²), trace and rare earth elements (10⁻⁶) analysis results

样品号	Yshp-1	Yshp-2	Yshp-3	Yshp-4	Yshp-5	Yshp-6	Yshp-7	Yshp-8	Yshp-9	Yshp-10
SiO ₂	72.89	73.25	73.31	73.47	73.15	72.51	72.94	71.56	72.78	73.57
TiO ₂	0.3	0.29	0.32	0.31	0.3	0.34	0.33	0.31	0.28	0.3
Al ₂ O ₃	13.68	13.99	13.63	13.57	14.3	14.4	13.78	15.08	13.99	13.89
TFe ₂ O ₃	1.99	2.21	2.23	2.13	1.99	2.22	2.19	2.15	2.01	2.07
MnO	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
MgO	0.4	0.42	0.46	0.44	0.42	0.5	0.49	0.47	0.42	0.43
CaO	1.88	1.7	1.82	1.73	1.7	1.72	1.71	1.79	1.63	1.73
Na ₂ O	3.66	3.66	4.12	3.78	3.79	3.82	3.93	4.03	3.95	3.72
K ₂ O	4.47	4.19	4.06	4.21	4.29	4.27	4.37	4.32	4.69	4.16
P ₂ O ₅	0.1	0.09	0.1	0.09	0.1	0.11	0.11	0.1	0.1	0.1
LOI	0.14	0.17	0.13	0.13	0.25	0.4	0.17	0.16	0.2	0.32
TATAL	99.56	100.02	100.24	99.92	100.33	100.34	100.08	100.02	100.1	100.34
ACNK	0.96	1.02	0.94	0.97	1.02	1.03	0.96	1.04	0.96	1.01
Mg [#]	28.58	27.4	29.14	28.9	29.68	30.72	30.88	30.13	29.08	28.91
Ba	913.48	937.25	950.17	869.61	832	1032.62	1048.02	855.23	877.81	768.57
Rb	150.48	146.6	151.97	147.27	148.63	145.86	141.66	140.51	157.07	151.84
Sr	272.13	266.62	262.93	265.66	253.85	288.32	284.62	279.38	284.63	257.46
Y	14.3	16	19.8	16.6	14.2	18.8	17.5	16.5	15.3	20.3
Zr	180.03	172.88	145.98	169.64	159.89	182.22	188.89	164.91	143.59	162.58
Nb	14.05	13.78	12.2	13.56	13.31	11.93	12.42	13.2	11.59	13.76
Th	12.71	15.12	10.38	11.88	10.94	12.93	13.07	12.04	10.3	16.12
Ga	19.67	18.92	18.93	19.96	19.23	19.33	19.69	20.16	20.07	20.03
Ni	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.37	2.12	2.2	4.86
Cr	9.69	10.95	9.73	5.86	6.49	16.45	12.51	10.87	8.12	12.4
Hf	4.31	4.44	4.09	4.48	3.17	5.11	4.84	4.22	4.26	4.63
Sc	5.27	5.24	3.81	5.08	4.78	4.99	5.04	5.53	4.79	5.53
Ta	1.29	1.21	1.43	1.4	1.01	1.26	1.27	1.18	1.35	1.3
Co	2.75	2.56	2.1	2.36	2.01	2.73	2.9	2.86	2.31	2.92
U	2.93	4.31	3.52	3.49	2.71	1.73	1.66	2.18	1.87	3.11
Pb	29.18	28.52	28.59	26.18	23.98	26.29	25.06	26.6	26.87	27.22
Cs	3.37	3.44	3.49	4.3	3.88	5.11	6.92	4.07	6.59	5.09
La	25.9	30	33.6	30.2	23.3	33.4	32.3	31.1	26.6	29.4
Ce	55.3	61.8	70.6	63.1	57.3	73.4	71.2	64.2	55.6	61.9
Pr	6.25	6.9	8.01	7.22	5.55	8.46	8.13	7.05	6.06	6.84
Nd	22.4	24.8	28.6	25.9	19.8	30.5	29.6	25	21.7	24.8
Sm	3.9	4.58	5.21	4.65	3.65	5.4	5.34	4.47	3.88	4.57
Eu	0.67	0.77	0.86	0.75	0.72	0.88	0.83	0.74	0.7	0.76
Gd	3.18	3.71	4.28	3.76	3.09	4.48	4.37	3.66	3.29	3.92
Tb	0.5	0.59	0.68	0.61	0.49	0.72	0.68	0.57	0.51	0.65
Dy	2.74	3.28	3.72	3.31	2.83	3.98	3.77	3.16	2.91	3.93
Ho	0.5	0.6	0.71	0.6	0.52	0.72	0.66	0.57	0.54	0.74
Er	1.43	1.68	2.04	1.74	1.46	1.96	1.78	1.68	1.55	2.1
Tm	0.22	0.26	0.3	0.27	0.23	0.31	0.27	0.26	0.25	0.33
Yb	1.45	1.58	2.01	1.7	1.5	1.85	1.65	1.65	1.58	2.08
Lu	0.23	0.25	0.32	0.26	0.24	0.29	0.26	0.28	0.26	0.34

注:主量元素的含量为 10⁻²,微量元素和稀土元素为 10⁻⁶,A/CNK=x(Al₂O₃)/x(CaO+Na₂O+K₂O);Mg[#]=Mg²⁺/[Mg²⁺+Fe²⁺(全铁)]×100。

$(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})_{\text{mol}}) = 1.21 \sim 1.33$ 和 $\text{A/CNK}(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})_{\text{mol}}) = 0.96 \sim 1.04$, 显示岩石具有准铝质-过铝质的特点(图 3)。

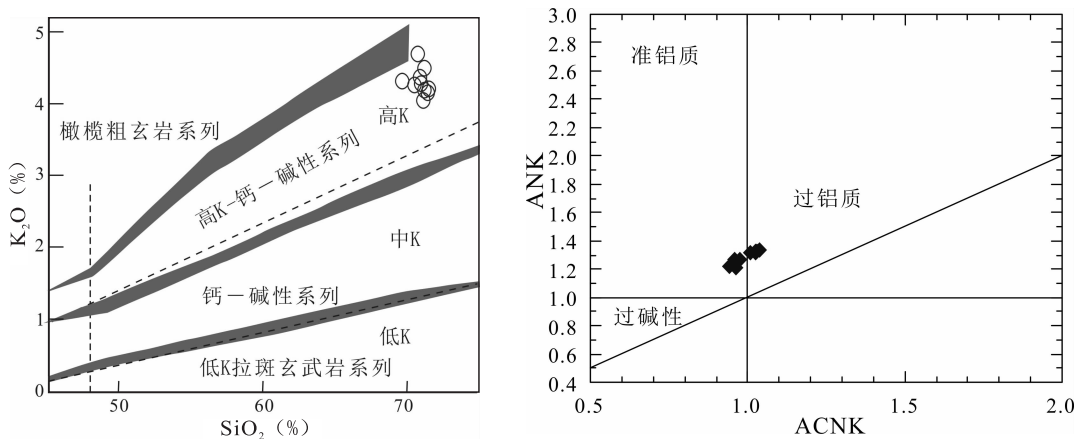


图 3 四海坪岩体 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解、 $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ 图解

Fig. 3 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram and $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ diagram of Sihaijing granite

2.3 稀土元素、微量元素特征

四海坪岩体 10 个黑云母二长花岗岩样品微量元素、稀土元素分析结果见表 1。四海坪岩体原始地幔标准化微量元素蛛网图和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 4), 显示本区花岗岩以富集 Rb、Th、K、Nd 等, 贫 Ba、Nb、Ta、La、P、Eu 等, 明显

亏损 Nb、Ta、P。稀土含量中等偏低, $\sum \text{REE} = 120.68 \sim 166.35$, 平均 130.28×10^{-6} 。轻重稀土分异程度高, 稀土元素对球粒陨石标准化分配曲线呈明显的右倾分配模式(图 4), 反映了岩浆作用过程中轻重稀土之间发生了分异作用。Eu 异常明显, 反应斜长石分离结晶。

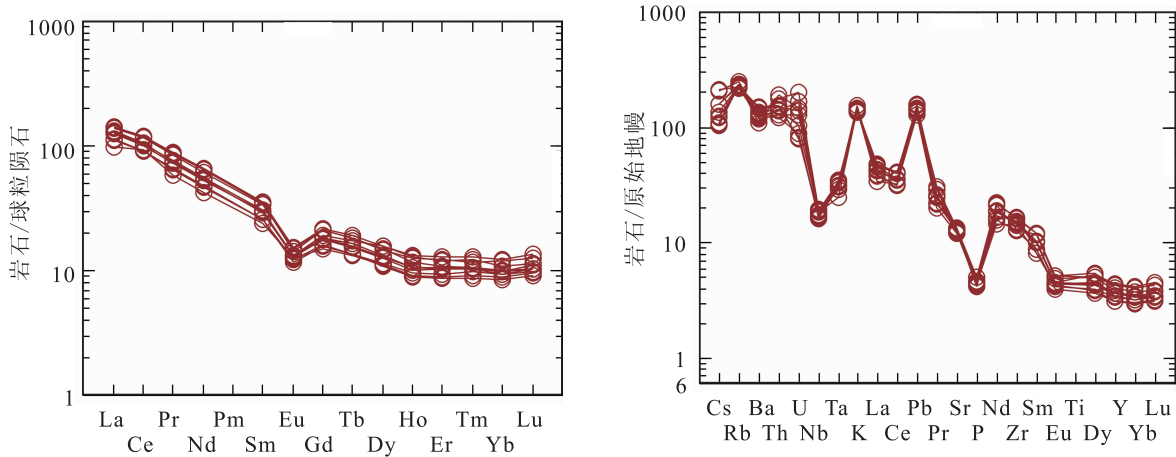


图 4 四海坪岩体球粒陨石标准化稀土元素和原始地幔标准化微量元素蛛网图
配分模式图(标准化数据据文献 Sun&Mcdonough,1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized of REE patterns and primitive mantle-normalized spider grams of trace elements of Sihaijing granite

2.4 锆石 U-Pb 年代学

四海坪黑云母二长花岗岩锆石颜色以淡黄色为主, 个别锆石颜色为淡玫瑰色, 金刚光泽, 透明-半透

明, 浑圆度为棱角状-次棱角状, 晶体晶面有小麻点状熔(溶)蚀, 包裹体有小锆石和不明性质的黑色包裹体(图 5)。粒度一般为 $0.08 \text{ mm} \times 0.04 \text{ mm} \sim$

0.32 mm×0.12 mm,长宽比为 2:1~3:1,个别晶体为 4:1,晶体歪晶及“异极状”晶体较普遍。紫外灯照射下发黄光。样品分析测试结果见表 2。18 个样品测点中有 14 个锆石 Th/U 值>0.4,而且 Th、U 含量呈较好的正相关关系,属典型的岩浆成因锆石;另外 4 个测点锆石 Th/U 值<0.4,反应锆石结晶时可能受到热液的影响。四海坪花岗岩锆石 CL 图像及年龄见图 5,18 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸Pb 谐和年龄为 (168.3±1.9)Ma,总体上比较统一,位于谐和线上或曲线附近的表面年龄,表明该岩浆岩锆石对 U-Pb 同位素体系保持完全封闭(图 6),未受后期变质作用扰动。18 个锆石最终测定的加权平均²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 (168.2±1.1) Ma (95% 置信度;MSWD=0.13),反应四海坪岩体侵位于中侏罗世。

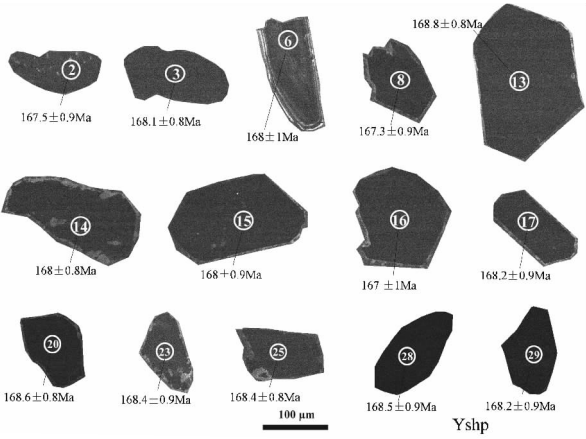


图 5 四海坪花岗岩锆石 CL 图像及年龄

Fig. 5 Zircon CL images and ages of Sihaijing granite

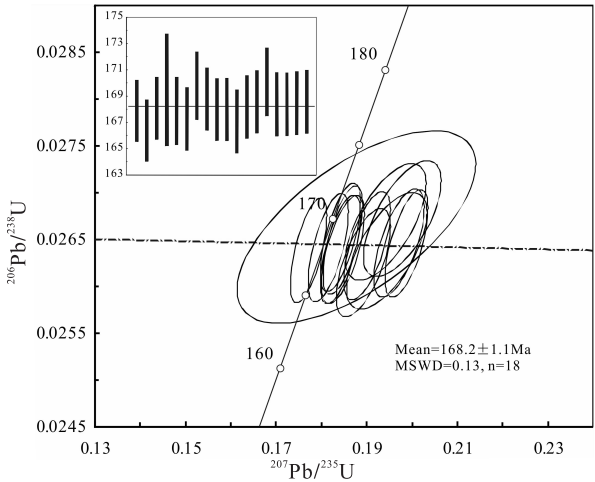


图 6 四海坪花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄图

Fig. 6 LA-ICP-MS Zircon U-Pb diagrams of Sihaijing granite

3 讨论

3.1 岩浆成因探讨

四海坪花岗岩在化学成分上具有较高的 K₂O、Na₂O 含量,和高的 FFeOt/MgO 值,在 I-A 型图中主要投在“A 型花岗岩”区(图 7),富集 Rb、K 等大离子亲石元素及 Zr 等高场强元素,强烈亏损 Ba、Sr、Eu、P,具有典型的右倾“海鸥型”稀土元素配分模式。此外,10000×Ga/Al 值较高(平均值为 2.64),明显高于 I 型和 S 型花岗岩的平均值(分别为 2.1 和 2.28) (WHALEN et al., 1987),属于典

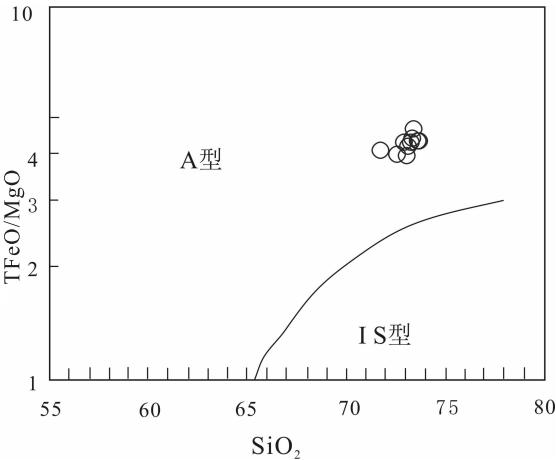
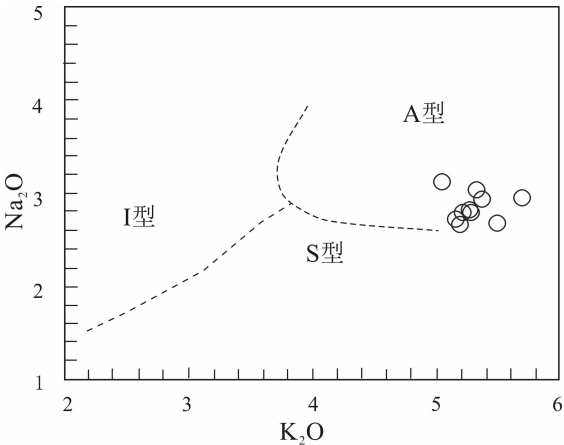


图 7 四海坪岩体 I-A 型图

Fig. 7 I-Adiagrams of Sihaijing granite

表 2 四海坪岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果表
Tab. 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Sihai ping granite samples

序 号	测点号	同 位 素 比 值						同 位 素 年 龄(Ma)						同位素含量(10 ⁻⁶)						
		207 Pb/235 U			206 Pb/238 U			208 Pb/232 Th			207 Pb/232 Th			206 Pb/238 U			208 Pb/232 Th			Th/U
		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	232 Th	238 U	
1	Ysnp-1RZ-1	0.048 66	0.001 49	0.177 03	0.002 68	0.026 39	0.000 37	0.008 15	0.000 11	131.3	70.59	165.5	2.31	167.9	2.34	164.1	2.16	790 156.44	97 805.4	8.078 863 13
2	Ysnp-1RZ-2	0.053 26	0.001 72	0.192 04	0.003 5	0.026 15	0.000 37	0.007 97	0.000 11	339.8	71.7	178.4	2.98	166.4	2.35	160.5	2.12	638 368.63	57 442.19	11.113 236 28
3	Ysnp-1RZ-3	0.049 8	0.001 56	0.181 41	0.002 95	0.026 42	0.000 38	0.008 17	0.000 11	185.5	71.23	169.3	2.54	168.1	2.36	164.5	2.17	1 538 717.25	114 409.58	13.449 199 36
4	Ysnp-1RZ-4	0.051 05	0.005 02	0.187 55	0.017 4	0.026 64	0.000 68	0.008 65	0.000 55	243	211.78	174.5	14.87	169.5	4.27	174	11.01	146.4	450.05	0.325 297 189
5	Ysnp-1RZ-6	0.053 42	0.002 18	0.194 37	0.005 89	0.026 38	0.000 41	0.008 7	0.000 23	346.7	89.46	180.3	5.01	167.9	2.57	175.2	4.58	457.61	1 951.99	0.234 432 553
6	Ysnp-1RZ-8	0.053 24	0.001 76	0.193 07	0.003 74	0.026 3	0.000 38	0.008 05	0.000 11	338.8	73.25	179.2	3.18	167.3	2.39	162	2.14	1 862 777.38	96 886.87	19.226 313 95
7	Ysnp-1RZ-9	0.052 75	0.002 15	0.194 15	0.005 9	0.026 69	0.000 41	0.009 22	0.000 23	318.2	90.18	180.2	5.02	169.8	2.58	185.5	4.64	485.96	1 993.17	0.243 812 62
8	Ysnp-1RZ-13	0.050 3	0.001 56	0.184 08	0.002 92	0.026 53	0.000 38	0.008 06	0.000 11	209.1	70.49	171.6	2.5	168.8	2.38	162.3	2.14	1 733 317.5	124 307.38	13.943 802 05
9	Ysnp-1RZ-14	0.050 55	0.001 57	0.184 05	0.002 9	0.026 4	0.000 38	0.007 91	0.000 11	220.2	70.28	171.5	2.49	168	2.37	159.3	2.11	1 909 204	406 854.53	4.692 596 147
10	Ysnp-1RZ-15	0.050 73	0.001 6	0.184 68	0.00311	0.026 4	0.000 38	0.008 03	0.000 11	228.4	71.44	172.1	2.66	168	2.38	161.6	2.13	1 580 196.13	108 391.88	14.578 547 12
11	Ysnp-1RZ-16	0.052 23	0.001 77	0.189 19	0.003 93	0.026 26	0.000 38	0.007 92	0.000 11	295.6	75.59	175.9	3.35	167.1	2.41	159.4	2.12	1 580 053.25	117 832.89	13.409 271 81
12	Ysnp-1RZ-17	0.052 1	0.001 68	0.189 98	0.003 4	0.026 44	0.000 38	0.007 97	0.000 11	289.9	71.89	176.6	2.9	168.2	2.4	160.5	2.12	2 116 984	104 213.04	20.314 002 93
13	Ysnp-1RZ-20	0.050 49	0.001 57	0.184 56	0.002 89	0.026 5	0.000 38	0.008 06	0.000 11	217.8	70.21	172	2.48	168.6	2.38	162.3	2.14	1 683 525.63	117 913.01	14.277 691 92
14	Ysnp-1RZ-22	0.053 63	0.002 13	0.197 72	0.005 71	0.026 73	0.000 41	0.008 19	0.000 22	355.3	87.08	183.2	4.84	170.1	2.6	164.9	4.32	397.87	2 228.7	0.178 521 111
15	Ysnp-1RZ-23	0.053 94	0.001 76	0.196 93	0.003 68	0.026 47	0.000 38	0.008 03	0.000 11	368.6	71.9	182.5	3.13	168.4	2.42	161.6	2.14	1 443 410.63	104 610.31	13.797 976 8
16	Ysnp-1RZ-25	0.054 42	0.001 69	0.198 63	0.003 16	0.026 46	0.000 38	0.007 81	0.000 1	388.3	68.13	184	2.68	168.4	2.39	157.2	2.09	1 385 353.5	398 187.16	3.479 151 613
17	Ysnp-1RZ-28	0.049 91	0.001 57	0.182 36	0.003 04	0.026 49	0.000 38	0.008 03	0.000 11	191	71.76	170.1	2.61	168.5	2.4	161.7	2.14	1 789 321	123 753.05	14.458 803 24
18	Ysnp-1RZ-29	0.050 91	0.001 63	0.186 03	0.003 25	0.026 49	0.000 38	0.008 03	0.000 11	236.6	72.16	173.2	2.78	168.6	2.41	161.6	2.15	1 822 634.25	163 728.97	11.132 020 5

型的铝质 A 型花岗岩。反应四海坪花岗岩可能形成于板内环境。 $Mg^\#$ 可以很好的指示岩浆的性质,典型的 MORB 的 $Mg^\#$ 在 60 左右,玄武质地壳部分熔融可产生 $Mg^\# < 45$ 的熔体(RAPP et al., 1995; RAPP, 1997)。四海坪花岗岩的 $Mg^\# = 27.40 \sim 30.88$, 平均为 29.34 (< 45)。此外,主量元素特征反应四海坪花岗岩属于高钾钙碱性系列,具有准铝质-过铝质的特点,说明本地区岩浆岩主要来源于地壳熔融。

前人大多认为胭脂坝花岗岩为准铝-弱过铝质壳源花岗岩(严阵等,1985;李先梓等,1993;张本仁等,1994;骆金诚等,2010)。四海坪花岗岩与胭脂坝花岗岩的地球化学特征非常相似,反应四海坪-胭脂坝岩体具有相似的物源和成因。

3.2 岩体形成时代探讨

前人的研究得到一系列南秦岭花岗岩体锆石 U-Pb 年龄数据:张家坝岩体(219 ± 2)Ma,新院岩体(214 ± 2)Ma,姜家坪岩体(206 ± 2)Ma,迷坝岩体(218 ± 2)Ma(孙卫东等,2000),光头山岩体($221 \pm 6, 199 \pm 4$)Ma(吴峰辉等,2009),东江口岩体(218.7 ± 2.4)Ma,曹坪岩体(220 ± 2)Ma(JIANG et al, 2010),沙河湾环斑花岗岩体(240.6 ± 1.5)Ma、(228.2 ± 1.5)Ma(刘春花等,2013),五龙岩体(225.3 ± 6)Ma(王娟等,2008)。可见光头山岩体群、东江口岩体群以及五龙岩体主要侵位于晚三叠世。此外,骆金诚等获得胭脂坝花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(200 ± 4)Ma(骆金诚等,2010);JIANG 等测得胭脂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(210.8 ± 5)Ma(JIANG et al,2010);YANG 等测得胭脂坝岩体 2 个 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别是(208 ± 2)Ma、(209 ± 2)Ma(YANG et al,2012);董云鹏等获得胭脂坝岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(201.6 ± 1.2)Ma,佛坪岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(207.3 ± 2.1)Ma(DONG et al,2012)。综合看来,宁陕一带的佛坪-胭脂坝岩体主要形成于晚三叠世,偏晚于光头山岩体群、东江口岩体群。

本次研究 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究结果显示四海坪花岗岩形成于中侏罗世(168.2 ± 1.1 Ma),偏晚于前人获得的临近的胭脂坝岩体年龄(200 ± 4 Ma、 208 ± 2 Ma、 210.8 ± 5 Ma、 201.6 ± 1.2 Ma、 201.6 ± 1.2 Ma)(骆金诚等,2010;JIANG

et al,2010;YANG et al,2012;DONG et al,2012),说明四海坪-胭脂坝岩体在燕山早期多期次侵入。燕山期早期环太平洋板块向西俯冲远程效应伸展体制下($210 \sim 162$ Ma)形成鄂尔多斯、四川晚三叠世大型内陆盆地和秦岭一系列早-中侏罗世山间小盆地,深部地壳的增厚,导致了中下地壳的部分熔融、深部物质上涌,形成贯穿秦岭南北的大规模燕山早期岩浆活动事件,产生了大量中-酸性花岗岩体。

4 结论

(1)通过对四海坪岩体地质学、岩石学以及主量、微量、稀土元素地球化学研究,表明四海坪岩体主要岩石类型有灰白色中细粒黑云母二长花岗岩和灰白色似斑状黑云母二长花岗岩,属于高钾钙碱性系列,具有准铝质-过铝质的特点,富集 Rb、Th、K、Nd 等,贫 Ba、Nb、Ta、La、P、Eu 等,明显亏损 Nb、Ta、P。稀土含量中等偏低,轻重稀土分异程度高,稀土元素对球粒陨石标准化分配曲线呈明显的右倾分配模式,反映四海坪花岗岩形成于板内环境,岩浆主要来源于地壳熔融。

(2)通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,显示四海坪花岗岩形成于中侏罗世(168.2 ± 1.1 Ma),偏晚于前人获得的临近胭脂坝岩体锆石 U-Pb 年龄,反应四海坪-胭脂坝岩体群多期次侵入,从晚三叠世到中侏罗世存在多期次岩浆活动。燕山期早期环太平洋板块向西俯冲远程效应伸展体制下形成贯穿秦岭南北的大规模岩浆活动事件,产生了大量中-酸性花岗岩体。

参考文献(References):

- 骆金诚, 赖绍聪, 秦江锋, 等. 南秦岭晚三叠世胭脂坝岩体的地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 2010, 56(6):792-800.
- LUO Jincheng, LAI Shaocong, QIN Jiangfeng, et al. Geochemistry and Geological Significance of Late Triassic Yanzhiba Pluton from the Southern Qinling Orogenic Belt[J]. Geological Review, 2010, 56(6):792-800.
- 张国伟, 袁学诚, 张本仁, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-806.
- ZHANG Guowei, YUAN Xuecheng, ZHANG Benren, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M].

- Beijing: Science Publishing House, 2001: 1-806 (in Chinese).
- 李先梓, 严阵, 卢欣祥. 秦岭-大别山花岗岩[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-214.
- LI Xianzi, YAN Zhen, LUXinxiang. Qinling-dabie granite [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-214 (in Chinese).
- 张本仁, 骆庭川, 高山. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994: 1-446.
- ZHANG Benren, LUO Tingchuan, GAO Shan. Geochemistry research of Qinba lithosphere structure and metallogenic regularity[M]. Wuhan: China university of geosciences press, 1994: 1-446 in Chinese).
- 吴峰辉, 刘树文, 李秋根, 等. 西秦岭光头山花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, (5): 811-818.
- WU Fenghui, LIU Shuwen, LI Qiugen, et al. Zircon U-Pb geochronology and geological significance of Guangtoushan granitoids from Western Qinling, Central China [J]. Journal of Beijing University (natural science), 2009, (5): 811-818.
- 孙卫东, 李曙光, CHEN Yadong, et al. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球化学, 2000, 29 (3): 209-216.
- SUN Weidong, LI Shuguang, CHEN yadong, et al. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance[J]. Geochimica, 2000, 29(3): 209-216.
- 刘春花, 吴才来, 郜源红, 等. 南秦岭麻池河乡和沙河湾花岗岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素组成[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 36-56.
- LIU Chunhua, QU Cailai, GAO Yuanhong, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of Machihe country and Shahewangranitoid rock masses, South Qinling belt, central China[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 36-56.
- 王娟, 金强, 赖绍聪, 等. 南秦岭佛坪地区五龙花岗质岩体的地球化学特征及成因研究[J]. 矿物岩石, 2008, 28 (1): 79-87.
- WANG Juan, JIN Qiang, et al. Research of geochemistry and petrogenesis of the Wulong granites in the Foping region, south Qinling mountains[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 79-87.
- BARBARIN B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46: 605-626.
- DONG Y. P, LIU X. M, ZHANG G. W, et al. Triassic diorites and granitoids in the Foping area: Constraints on the conversion from subduction to collision in the Qinling orogen, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 47: 123-142.
- JIANG Y. H, JIN G. D, LIAO S. Y, et al. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, central China: Implications for a continental arc to continent-continent collision [J]. Lithos, 2010, 117 (s1-4): 183-197.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins[J]. London: Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- RAPP R. P., WATSON E. B. Dehydration melting of metabasalts at 8 ~ 32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. Journal of petrology, 1995, 36: 891-931.
- RAPP R. P. Heterogeneous source regions for Archean granitoids. In: (de.) Wit MJ. Ashwal LD (ed.). Greenstone Belts [M]. Oxford: Oxford University Press, 1997, 35-37.
- YANG P. T, LIU S. W, LI Q. G, et al. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopic systematics of the Ningshan granitoid batholith, middle segment of the south Qinling belt, Central China: Constraints on petrogenesis and geodynamic processes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 61: 166-186.