

印支期南秦岭西荏河、五龙岩体成因及构造意义

王 娟¹ 李 鑫² 赖绍聪³ 秦江峰³

- (1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东 东营 257061;
2. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257000;
3. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

提 要:南秦岭西荏河、五龙印支期岩体侵位于中元古代佛坪群变质岩,在五龙岩体南部发育一些暗色包体,它们和寄主花岗闪长岩界限明显或呈渐变关系。笔者对两岩体的岩石学、地球化学、Sr-Nd 同位素年代学进行了详细研究。研究表明,西荏河与五龙花岗质岩具明显似埃达克岩的地球化学特征:强烈亏损重稀土元素 Yb、Y;富集 Sr、Ba,高 Sr/Y 和 Y/Yb 比值;Eu 微弱负异常。表明源区以石榴石、角闪石为主,有少量斜长石。暗色包体富 Mg(MgO=4.15%~8.13%)、Cr(14.8 μg/g~371 μg/g)、Ni(20.0 μg/g~224 μg/g)及轻稀土和大离子亲石元素,推测起源于地幔组分。两岩体的 Sr-Nd 同位素组成类似, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.70445\sim 0.70645$, $\epsilon_{\text{Nd}}=-1.50\sim -3.62$, $T_{\text{DM}}=1.02\sim 1.38$ Ga。结合前人的研究,笔者认为:西荏河、五龙岩体可能是由幔源岩浆底侵于壳幔边界,诱发增厚的基性下地壳达到含角闪石的榴辉岩相或麻粒岩相发生部分熔融形成的埃达克质岩浆。两岩体在部分微量元素含量的差异是由受地幔物质混染程度不同造成,其形成代表了秦岭造山带印支期后碰撞造山阶段勉略洋俯冲板块的断离作用。

关 键 词:西荏河;五龙;暗色微粒包体;埃达克岩;Sr-Nd 同位素;底侵

中图分类号:P588.12⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2008)02-0207-10

秦岭造山带的构造演化过程中,古生代晚期勉略古洋盆向北俯冲,并与中生代发生秦岭微板块与扬子板块的碰撞,形成南部勉略缝合带。沿缝合带北侧发育一条长约 400 km 呈东西向展布的印支期花岗岩带。新的研究表明^[1-3],这些花岗质岩体是秦岭造山带主造山期构造活动的直接记录,对勉—略缝合带恢复重建,探索秦岭—大别造山带的构造格局都有重要意义。以往对勉略带北侧宁陕岩体群的西荏河、五龙岩体的岩石学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素工作涉及较少,故笔者拟对这三方面开展研究,探讨岩体的成因及构造意义,以期对南秦岭印支期花岗质岩体的成因确定和追溯秦岭造山带演化过程提供新的证据。

1 地质概况及岩石学特征

西荏河岩体出露于南秦岭构造带宁陕岩体群的佛坪县的西荏河村,呈近长圆形,约 24 km²,

NWW 向展布。岩体北侧与震旦纪—奥陶纪地层侵入接触。震旦纪为较纯的石英岩、大理岩组合。寒武纪—奥陶纪为深灰色石墨石英岩、黑云钾长片麻岩、硅质岩。东侧见五龙岩体的二长花岗岩脉侵入。岩体主要岩性为石英闪长岩,部分呈构造片理化,发育与地层走向一致的片麻理构造。五龙岩体出露于宁陕岩体群中部的宁陕县和佛坪县呈近椭圆形,出露面积约 1800 km²,侵位于元古宙片麻岩—黑云斜长片麻岩的结晶基底和震旦纪—泥盆纪的变质泥质砂岩、二云母石英片岩、石榴黑云石英片岩盖层岩系^[4](图 1)。岩石类型主要有花岗闪长岩、二长花岗岩和黑云母花岗闪长岩。岩体中有大量成群或独立分布的暗色闪长质微粒包体,其中在花岗闪长岩中分布最多。包体呈浑圆状、倒水滴状、长条状等不规则形状,最大为 200 cm×150 cm,一般为 20 cm×15 cm,。包体与主岩的界线较清晰,但有的呈渐变关系。

收稿日期:2007-09-10;改回日期:2007-11-28

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40234041)资助。

作者简介:王娟,女,1980 年生,博士生,矿产普查与勘探专业,研究方向为岩石地球化学和石油地质学;E-mail:wangjuanb601011@163.com。

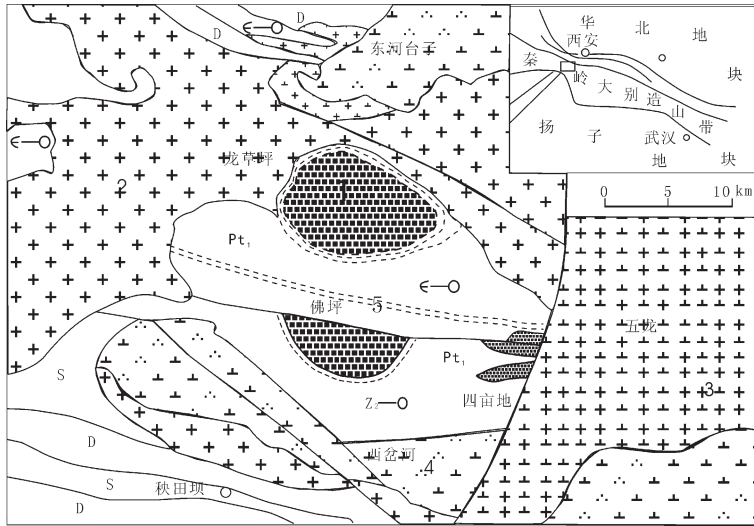


图 1 佛坪地区印支期花岗岩分布简图(据参考文献[5]修改)

Pt₁—古元古界; ε—O—寒武—奥陶系; S—志留系; D—泥盆系; C—石炭系; 1—结晶杂岩; 2—花岗岩;
3—花岗岩闪长岩; 4—石英闪长岩; 5—韧性剪切带

Fig.1 Distribution of Indosinian granite in the Fuping area(modified from reference [5])

Pt₁—Paleoproterozoic; ε—O—Cambrian; O—Ordovician; D—Devonian; S—Silurian; C—Carboniferous;

1—Basement complex; 2—Granite; 3—Granodiorite; 4—Quartz diorite; 5—Ductile shear zone

2 样品处理和分析方法

主量和微量元素分析均由中国科学院贵阳地球化学研究所完成。其中,主量元素采用湿化学法分析,精度一般优于2%~3%。微量元素用VG Plasma-Quad Excell ICP-MS(酸溶)法分析,分析精度优于3%~5%。Sr、Nd同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,其测试仪器为英国Nu公司生产的Nu Plasma HR多接受器等离子体质谱。同位素样品详细分析方法和过程可参见参考文献[6]。

3 分析结果

3.1 地球化学特征

西岔河岩体石英闪长岩的主量元素(表1)SiO₂含量为56.98%~64.40%;K₂O、Na₂O含量均较高分别为2.00%~3.02%和3.10%~4.40%,σ指数为2.4;MgO含量为2.55%~6.51%;TiO₂含量为0.48%~0.65%;富Al₂O₃(14.87%~18.09%),A/CNK值为1.03。主量元素特征属于钙碱系列的钠质花岗岩,具有I型花岗岩化学成分变化大的特征^[7]。微量元素整体显示富集LILE、亏损HREE元素,并有Sr、Ba呈峰和Nb、Ta、

Ti、P呈谷的特征(图2)。其中,Sr>821 μg/g,Sr/Y比值平均为61.5。Cr、Co、Ni元素强烈富集,平均值分别为189 μg/g、51.0 μg/g、71.3 μg/g。稀土含量平均为148 μg/g,(La/Yb)_n平均15.1,δEu平均为0.8。在图3中,呈现轻稀土、重稀土分馏明显,重稀土相对平坦,Eu呈微弱负异常的右倾型。

五龙花岗闪长岩的主要元素(表2)SiO₂含量较高,为65.29%~71.30%;低TiO₂,含量为0.12%~0.33%;富Al₂O₃,含量为13.96%~19.12%,A/CNK=1.14;碱质含量偏高(Na₂O含量为4.0%~4.8%,K₂O含量为2.30%~3.90%),σ=2.2;MgO含量为0.08%~1.31%,Mg[#]=44。其主要元素与Barbarin^[7]总结的产于从挤压转变至拉张过程的富钾钙碱性花岗岩(KCG)相似。微量元素(表1)以Rb明显富集,Zr、Hf、Sm、Y、Yb丰度低于洋脊花岗岩为特征。在稀土配分图解(图3)中,呈现轻稀土、重稀土明显分馏,Eu呈微弱负异常的右倾配分模式。ΣREE含量平均137 μg/g,(La/Yb)_n=22.7~69.4,Y<12.0 μg/g、Yb<1.00 μg/g,δEu平均0.81。

暗色微粒包体中主要元素(表2)SiO₂含量较低(52.86%~55.78%);富Fe₂O₃(2.23%~3.46%),MgO含量为4.15%~6.58%;TiO₂含量为0.82%~1.22%;Na₂O、

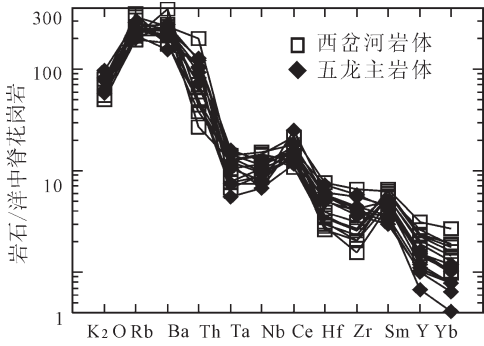


图 2 西荥河与五龙岩体的洋中脊花岗岩标准化微量元素图解^[9]

Fig.2 ORG-normalized trace element patterns for the Xichahe and Wulong plutons

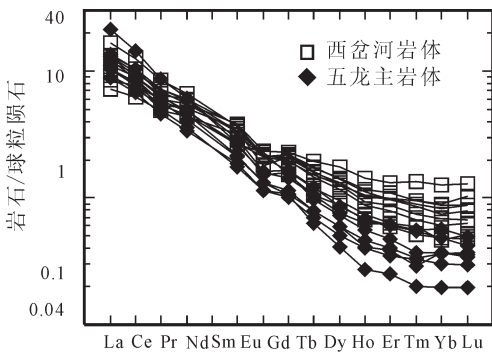


图 3 西荥河与五龙岩体稀土配分模式图解^[9]

Fig.3 REE distribution diagrams for the Xichahe and Wulong plutons

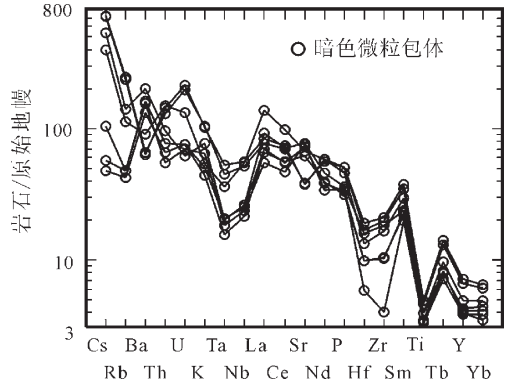


图 4 五龙暗色微粒包体的原始地幔标准化微量元素图解^[9]

Fig.4 Primitive mantle-normalized trace element patterns for mafic microgranular enclaves in the Wulong pluton

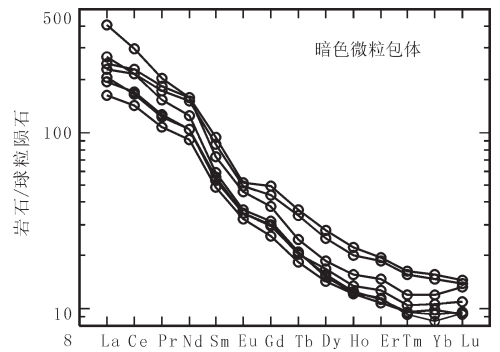


图 5 五龙暗色微粒包体稀土配分模式图解^[9]

Fig.5 REE distribution patterns for mafic microgranular enclaves in the Wulong pluton

K₂O 含量均较高,分别为 2.70%~4.00%,1.30%~3.00%, σ 值 3.1;Al₂O₃ 平均含量为 16.31%,A/CNK 值 0.96。主量元素特征属于钙碱性闪长质岩石。与主岩相比,包体尤其富集 Rb、Sr、Ba、K 等 LILE 和 LREE 元素,亏损 Nb、Ta、P 等 HFSE、HREE 元素(图 4)。 Σ REE 平均含量为 312 μ g/g, δ Eu 平均 0.80;(La/Yb)_n 平均 21.9,Y、Yb 含量均较高,分别为 18.3~34.3 μ g/g 和 1.44~2.67 μ g/g(图 5)。

3.2 Sr-Nd 同位素地球化学特征

西荥河、五龙花岗质岩石及南秦岭部分基底岩石的 Sr、Nd 同位素组成见表 3。

本文采用亏损地幔的 Nd 同位素线性演化,计

算 Nd 模式年龄 T_{DM} 。其中, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{DM}(0) = 0.51315$; $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{DM}(0) = 0.21537$ 。考虑花岗质岩浆在演化过程中的 Sm/Nd 分异,对于 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值偏高 (>0.13) 或偏低 (<0.09) 的样品,采用两阶段法计算模式年龄。初始 Nd 同位素模式年龄 ϵ_{Nd} 的计算参数为 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{CHUR}(0) = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{CHUR}(0) = 0.1967$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{CHUR} = 0.69899$ 。从表 3 可看出:西荥河石英闪长岩的 $\epsilon_{Nd} = -1.53 \sim -3.62$, $I_{Sr} = 0.70543 \sim 0.70645$, $T_{DM} = 1.16 \sim 1.38$ Ga; 五龙花岗质主岩 $\epsilon_{Nd} = -2.26 \sim -2.66$, $I_{Sr} = 0.70445 \sim 0.70503$, $T_{DM} = 1.017 \sim 1.020$ Ga。两岩体的 Sr-Nd 同位素组成相似,表明它们有相似的源区组成。

表 1 西岔河石英闪长岩的主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果**Table 1 Major (%) and trace element (10^{-6}) analyses of quartz diorite in the Xichaha pluton**

样号	XH-03	XH-04	XH-05	XH-06	XH-07	XH-09	XH-10	XH-12	XH-14	XH-15
SiO ₂	62.30	61.75	64.40	60.91	60.03	56.98	60.83	60.23	58.65	59.89
TiO ₂	0.65	0.60	0.48	0.80	0.72	0.57	0.55	0.53	0.65	0.52
Al ₂ O ₃	16.40	18.37	17.50	15.09	18.09	14.87	15.96	15.09	15.40	14.87
FeO	3.61	3.00	2.75	3.74	3.17	4.00	3.91	4.14	4.05	4.09
Fe ₂ O ₃	1.62	1.05	0.65	1.49	1.80	1.75	1.14	1.58	2.25	1.08
MnO	0.10	0.07	0.11	0.09	0.10	0.16	0.13	0.14	0.18	0.09
MgO	3.15	3.05	2.55	3.99	3.42	6.51	4.18	5.99	6.00	4.02
CaO	3.80	3.96	3.49	4.61	4.19	6.25	4.61	6.06	5.83	4.47
Na ₂ O	4.00	4.40	4.00	4.20	4.10	3.80	4.00	3.40	3.80	3.10
K ₂ O	2.20	2.21	2.70	2.60	2.70	2.71	2.90	2.00	2.00	3.20
P ₂ O ₅	0.30	0.23	0.20	0.37	0.36	0.53	0.31	0.30	0.37	0.35
LOI	1.47	1.05	0.92	1.67	1.10	1.31	1.04	0.23	0.37	3.87
ToTal	99.57	99.74	99.65	99.43	99.71	99.79	99.41	99.85	99.67	99.47
La	30.8	24.8	24.2	21.6	17.1	27.9	31.4	20.1	27.4	38.9
Ce	59.8	50.0	47.7	44.3	37.9	58.8	63.1	46.2	62.8	76.3
Pr	6.49	5.51	5.16	5.16	4.60	6.80	6.86	5.62	7.46	8.03
Nd	25.6	22.2	21.1	23.4	20.7	28.0	27.2	25.7	32.8	30.8
Sm	5.01	4.14	4.01	5.36	4.80	5.65	5.14	5.87	6.83	5.57
Eu	1.28	1.21	1.32	1.21	1.23	1.25	1.03	1.36	1.47	1.22
Gd	4.05	3.3	3.10	4.50	3.95	4.23	4.31	4.65	5.31	4.38
Tb	0.54	0.44	0.39	0.65	0.57	0.59	0.64	0.73	0.77	0.60
Dy	2.97	2.40	2.21	3.59	3.19	3.33	3.66	4.42	4.40	3.22
Ho	0.5	0.42	0.38	0.63	0.53	0.57	0.66	0.81	0.82	0.59
Er	1.32	1.05	0.99	1.60	1.44	1.64	1.83	2.19	2.40	1.62
Tm	0.17	0.15	0.13	0.22	0.19	0.23	0.24	0.34	0.33	0.24
Yb	1.04	0.79	0.83	1.27	1.17	1.41	1.49	2.15	2.13	1.51
Lu	0.16	0.13	0.12	0.20	0.17	0.22	0.22	0.33	0.35	0.26
Cs	4.96	5.16	4.34	6.08	6.08	6.47	2.64	3.27	2.72	5.03
Rb	89.8	86.4	84.3	104	104	121	140	78.6	66.9	132
Ba	1243	1086	1964	1363	1365	877	888	904	1002	1297
Th	5.58	4.00	3.88	3.55	2.14	4.04	3.90	3.07	2.50	16.1
U	0.90	0.75	0.68	2.23	0.88	1.19	0.95	2.15	1.29	3.25
Ta	0.74	0.54	0.53	0.90	0.88	0.47	1.00	0.95	0.66	0.87
Nb	11.7	10.5	8.9	14.6	14.0	9.05	15.1	9.72	9.77	14.4
Sr	907	900	903	837	865	957	821	1029	1253	942
Hf	3.11	2.83	2.56	2.34	2.71	3.14	3.49	3.26	3.50	6.91
Zr	86.4	69.9	52.9	69.6	78.7	92.8	107	87.7	110	224
Y	13.4	10.6	10.2	16.1	14.2	16.4	18.3	22.1	22.7	16.6
Sc	11.7	10.1	9.12	13.4	12.9	16.8	17.3	19.6	19.9	14.6
V	97.3	91.4	78.0	117	111	139	105	121	154	119
Ni	39.8	37.8	33.0	51.9	45.8	140	65.6	123	108	67.3
Cr	97.0	88.8	74.8	122	110	366	192	347	295	199
Co	50.7	62.9	71.8	43.3	44.2	51.9	41.2	54.7	43.1	46.6
Ga	15.5	14.9	13.8	15.7	16.0	13.0	13.7	11.6	13.7	13.3
Ge	1.17	1.21	0.98	1.12	1.22	1.18	1.58	1.44	1.59	1.17

表 2 五龙岩体的花岗闪长岩和暗色微粒包体的主量(%)和微量元素(10^{-6})分析
Table 2 Major (%) and trace element (10^{-6}) analyses of granodiorite and mafic microgranular enclaves in the Wulong pluton

岩性	花岗闪长岩							闪长质包体						
样号	WL-02	WL-04	WL-05	WL-10	WL-13	WL-15	WL-18	WL-08	WB-17	WB-25	WB-26	WB-31	WB-33	WB-34
SiO ₂	68.44	65.29	68.92	71.30	70.89	70.54	66.04	53.76	53.97	55.78	54.99	52.86	53.93	53.41
TiO ₂	0.20	0.26	0.12	0.16	0.19	0.21	0.33	0.87	0.82	0.98	0.85	0.97	1.22	1.15
Al ₂ O ₃	17.71	17.73	16.28	13.96	14.87	15.31	17.06	16.62	15.31	13.56	15.53	16.62	17.93	18.59
FeO	1.45	1.96	1.57	1.17	1.15	1.05	1.53	3.89	3.89	5.02	4.15	4.08	4.84	4.13
Fe ₂ O ₃	0.73	0.54	0.67	0.93	1.17	1.24	1.47	3.01	2.23	2.68	2.82	3.46	2.86	3.34
MnO	0.14	0.06	0.13	0.08	0.09	0.08	0.11	0.18	0.19	0.14	0.19	0.20	0.21	0.17
MgO	0.71	1.31	0.85	0.76	0.86	0.85	1.24	6.09	6.26	8.13	6.32	6.58	4.26	4.15
CaO	2.09	2.86	1.81	1.77	1.81	1.67	2.60	7.20	8.58	5.61	7.78	6.72	4.48	4.73
Na ₂ O	4.50	5.00	4.30	4.30	4.30	4.00	4.80	3.80	3.60	2.70	3.50	4.00	3.90	4.00
K ₂ O	2.51	2.30	3.90	3.30	3.10	3.30	2.30	1.30	1.90	2.30	1.50	1.60	3.00	3.10
P ₂ O ₅	0.10	0.25	0.22	0.10	0.20	0.18	0.32	0.63	0.70	0.73	0.67	0.93	1.03	1.02
LOI	1.21	1.78	0.70	1.84	1.05	1.57	2.10	1.46	1.71	1.86	1.50	1.08	1.72	1.78
ToTal	99.71	99.34	99.33	99.47	99.46	99.81	99.80	99.40	99.46	99.49	99.53	99.46	99.38	99.50
La	32.2	30.6	24.7	20.8	29.0	26.2	49.9	46.0	38.3	63.7	48.5	96.1	57.9	53.8
Ce	62.9	54.7	47.0	41.0	52.6	54.8	88.0	104	87.2	132	101	182	139	131
Pr	6.11	5.90	4.74	4.35	5.39	6.10	8.23	12.0	10.1	14.5	11.7	19.3	17.2	16.3
Nd	21.3	22.7	16.9	15.8	19.3	27.7	28.6	48.8	42.6	57.7	48.7	73.4	73.5	70.6
Sm	3.29	3.93	2.68	2.86	3.19	4.46	4.11	8.54	7.49	9.00	8.20	11.1	14.2	13.2
Eu	0.77	0.92	0.66	0.67	0.76	0.93	0.89	2.00	1.88	2.09	2.03	2.66	3.00	2.86
Gd	2.16	2.95	2.18	2.08	2.36	3.38	3.25	6.04	5.30	6.45	6.16	7.82	10.13	9.02
Tb	0.23	0.40	0.29	0.26	0.30	0.46	0.36	0.78	0.69	0.79	0.77	0.93	1.36	1.25
Dy	1.05	1.94	1.51	1.28	1.49	2.19	1.84	3.95	3.61	3.86	4.26	4.77	7.02	6.34
Ho	0.16	0.36	0.23	0.23	0.26	0.39	0.31	0.71	0.68	0.69	0.77	0.88	1.26	1.14
Er	0.42	1.02	0.64	0.58	0.66	1.01	0.78	1.87	1.78	1.90	2.11	2.42	3.22	3.10
Tm	0.05	0.14	0.07	0.08	0.09	0.14	0.10	0.25	0.24	0.24	0.27	0.31	0.42	0.40
Yb	0.33	0.96	0.63	0.52	0.62	0.82	0.63	1.68	1.59	1.44	1.82	2.02	2.66	2.51
Lu	0.05	0.13	0.09	0.08	0.10	0.11	0.09	0.24	0.24	0.24	0.28	0.34	0.37	0.35
Cs	5.81	6.11	3.99	3.63	4.32	3.91	5.46	1.95	1.07	10.1	0.88	7.35	13.1	13.6
Rb	100	85.9	115	98.8	97.1	96.8	80.8	40.2	40.4	117	35.5	94.0	198	205
Ba	1242	775	1224	1081	1025	1185	1386	1197	1156	1497	983	670	462	486
Th	8.12	9.67	10.2	5.76	8.33	7.34	9.82	7.28	5.12	9.07	6.16	14.1	13.5	12.3
U	0.80	2.16	1.58	0.88	0.97	1.27	0.89	2.01	1.86	1.64	2.01	3.48	5.59	5.25
Ta	0.39	1.12	0.85	0.80	0.74	1.01	0.52	0.66	0.77	0.85	0.86	1.53	2.22	1.90
Nb	6.71	12.5	9.54	6.81	7.96	11.4	7.48	12.9	14.3	15.8	15.3	33.4	34.2	31.1
Sr	763	1003	663	643	715	647	1115	1396	1697	1742	1631	1518	836	856
Hf	5.23	6.49	4.57	5.11	4.54	5.06	5.47	3.35	1.99	5.39	3.38	4.57	6.46	5.74
Zr	150	197	125	132	137	144	189	111	43.31	196	113	179	227	212
Y	4.77	10.60	7.27	6.98	7.79	11.2	8.36	19.4	18.3	18.5	20.2	23.4	34.3	31.54
Sc	2.43	2.89	2.65	1.77	2.19	2.29	1.94	2.15	1.75	1.57	1.22	1.49	3.76	3.48
V	33.3	44.3	31.2	29.1	34.4	0.39	0.47	177	199	162	204	209	186	198
Ni	2.50	10.9	7.75	6.13	7.12	8.07	7.58	49.4	69.2	224	68.5	73.0	20.0	20.1
Cr	9.91	23.5	19.4	13.5	16.5	17.8	18.5	110	172	371	176	164	14.8	15.0
Co	48.4	56.7	51.0	85.0	49.0	54.7	49.5	46.2	49.6	63.8	46.1	49.5	42.3	36.6
Ga	16.9	17.9	15.0	13.7	14.5	14.5	1.8	13.1	12.6	12.8	12.2	15.1	23.4	22.6
Ge	1.07	1.16	1.18	0.99	1.26	1.10	1.02	1.49	1.55	1.44	1.46	1.44	1.65	1.57

表 3 西岔河、五龙部分样品及相关岩石的 Sr-Nd 同位素组成
Table 3 Sr-Nd isotopic composition of some samples from the Xichahé and Wulong plutons and related rocks

样品号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	I_{Sr}	I_{Nd}	ε_{Sr}	ε_{Nd}	T_{DM}
XH08	0.365927	0.706546	18	0.12215	0.512455	14	0.70543	0.512283	91	-1.50	1157
XH13	0.154497	0.706922	82	0.12580	0.512353	142	0.70645	0.512176	107	-3.62	1381
WL06	0.501188	0.705945	10	0.09584	0.512363	16	0.70445	0.512232	79	-2.66	1017
WL12	0.393113	0.706204	28	0.10012	0.512389	18	0.70503	0.512252	86	-2.26	1020
渔洞子群	0.238000	0.720080	—	0.12700	0.511415	—	0.71090	—	—	-0.02	2657
佛坪群	8.309200	0.769580	—	0.11540	0.511894	—	0.74560	—	—	6.39	2000
耀岭河群	0.156800	0.706230	—	0.12650	0.512379	—	0.70390	—	—	4.12	1019

注:渔洞子群、佛坪群数据引自参考文献[10],耀岭河群数据引自参考文献[1]。

4 岩体成因探讨

4.1 物质来源

五龙岩体的暗色微粒包体在花岗闪长岩中大量成群分布,在晚期二长花岗岩、似斑状黑云母花岗岩中则较少出现。野外地质特征表明,它既不是围岩的捕虏体、源区的难熔物,也不是早期晶出的“堆晶体”,而应是一种与主岩岩浆有成因关系的结晶产物。包体整体呈近圆形,有较少呈棱角形,反映两种岩浆混合过程。由于采集的样品主要来自岩体核部,多期次酸性、基性岩浆没有经历充分的热平衡和化学平衡阶段,故包体中没有明显索列特扩散现象^[11]、变余斑状结构、嵌晶结构等指示岩浆混合作用及淬冷标志的显微岩石学特征。在 Hark 图解中,暗色微粒包体表现出与主岩明显的成分间断和不同演化趋势,在同分母氧化物比值协变图中,呈线形相关;多元素不同分母氧化物比值图解中呈双曲线相关,这都说明两种岩浆有成因联系。结合野外地质及显微岩相学特征推测,本区应至少发生过规模较大的同期不同源的岩浆混合作用。

包体相对贫 Si, 富 Mg、Fe、Ti 及 Cr、Co、Ni 等元素,微量元素含量变化较大,LELE、 ΣREE 含量明显高于主岩。Nb、Ta 丰度高,Nb/Ta 比值平均为 18.3,接近于原始地幔值(Nb/Ta=17.5±2.0)^[12],Mg[#] 平均为 60.5 略低于原生玄武质岩浆(68~75)。这也说明,包体所代表的基性岩浆尽管受到晚期主岩交代、扩散作用影响,但根本原因是包体与主岩并不是同源岩浆演化产物。根据其地球化学特征,很可能

是起源富集岩石圈地幔熔融,在上升侵位过程中发生了部分岩浆混合。

花岗岩 Nd 模式年龄代表岩浆源区中不同时代地壳物质的加权平均年龄或混合年龄。西岔河、五龙岩体的 Sr-Nd 同位素组成揭示了相似的年龄及源区组成。 T_{DM} 值为 1.02~1.38 Ga,与耀岭河群火山岩模式年龄接近,进一步印证了张宏飞^[10]的南秦岭花岗岩源岩与 1.1Ga 地壳底侵增生事件相关的结论。从图 6 中可看出,如果是来自亏损地幔的下地壳物质熔融形成的岩浆在上升途中与 EM I 或古老地壳发生 10%~20% 混染,可以形成本区 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70445\sim 0.70645$, $\varepsilon_{\text{Nd}} = -1.50\sim -3.62$ 的花岗岩。本区花岗岩较 20 世纪 90 年代所测定的南秦岭其他晚碰撞型花岗岩 ε_{Sr} 值(平均 0.7050)偏低, ε_{Nd} 值偏

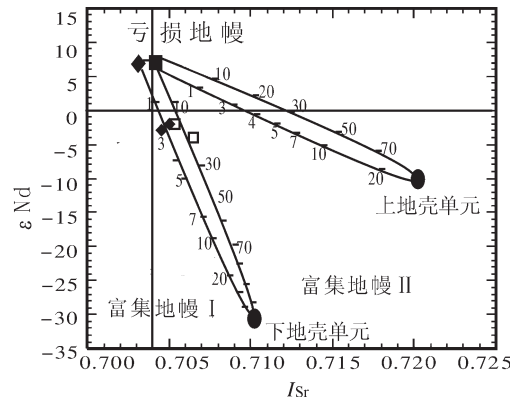


图 6 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}$ 图解(据参考文献[13])
Fig.6 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}$ diagram of the Xichahé pluton and the host granite of the Wulong pluton

高(平均-2.52)^[1]。排除实验方法及精度的差异,这样特征的岩浆不是来自亏损地幔和基性中下地壳物质部分熔融简单混合,可能需要有大量富集地幔物质参与。综上所述,笔者认为,本区岩浆源区主要组成是来自亏损地幔岩浆及包体所代表的从地幔分离的幔源组分,同古老地壳部分物质熔融混合。

4.2 源区环境

La/Sm 和 Zr/Sm 元素对特殊地球化学性质可以判断岩浆岩成因^[14-15]。在图 7 中,西荏河与五龙花岗质岩体没有受明显结晶分异作用。SiO₂ 与主要氧化物之间具有良好的线形关系,随 SiO₂ 含量增加, K₂O 含量也逐渐递增; MgO、TiO₂、P₂O₅、CaO、Fe₂O₃ 含量则降低。Ti 含量主要受温度控制,并有残留在金红石中。花岗岩的 Al₂O₃/TiO₂ 可作为源区部分熔融温度的指示剂^[16]。若 Al₂O₃/TiO₂<100 则部分熔融温度高于 875℃ (平均值分别为 27.2 和 80.5)。由于钾在部分熔融过程中不相容性,当部分熔融<10% 时,则产生高钾高硅,低 Na₂O/K₂O 比值(0.9~1.2)熔体。较高熔融程度(10%~30%),形成富钠质埃达克岩(Na₂O/K₂O>1.5~2.0)^[17]。本区花岗质岩 K 偏高、Na₂O/K₂O 平均值 1.6,属于高钾钙碱性-钙碱性花岗岩。根据镜下发育的条纹长石,推断花岗质岩浆应形成于较高温度、熔融程度和贫水源区环境。

斜长石中 Sr 分配系数高于其他矿物,对于源岩成分类似且未经明显分异作用的岩浆可通过其富集或亏损来判别斜长石是否进入熔体^[14]。较低 Rb/Sr 比值(平均 0.11),不仅反映了岩体没有经历很好的结晶分异,更可能由于 Sr 大量进入熔体使其降低。Sr 呈正异常、较高 Sr/Y 比值及 Eu 微弱负异常,表

明斜长石在源区已经不稳定并开始熔融。较低 Y、Yb 含量及较高 Sr/Y 比值,表现似埃达克岩地球化学特征^[17,18]。Yb 和 Lu 在石榴石的分配系数最大, Gd、Dy、Ho 在角闪石的分配系数较高。当石榴石为主要残留相,形成熔体具有倾斜 HREE 分配模式(Y/Yb>10, Ho/Yb>1.2); 角闪石为主要残留相,熔体 HREE 较平坦(Y/Yb≈10, Ho/Yb≈1)^[19]。综合本区较高 Sr/Y 比值,低 Y、Yb (Y/Yb 平均 12.9, Ho/Yb 平均为 1.3)及较平坦 HREE 特征,推测源区以石榴石±角闪石为主要残留相,不含或少含斜长石。

由上所述,西荏河、五龙花岗质岩具有似埃达克岩的地球化学特征: SiO₂>56%、Al₂O₃>15%、Na₂O>K₂O、MgO<3%; Sr>600 μg/g, 亏损 Y 和 HREE (Y<12 μg/g, Yb<1 μg/g)。但如同中国东部 C 型埃达克岩, K 整体偏高 (Na₂O/K₂O<2), HREE 较平坦, 它与 TTG 和 ADK 岩差异具体是由源区成分还是成因机制不同造成的, 还有待今后进一步工作。相对五龙岩体, 西荏河岩体总体成分更偏中性, Mg、Fe、Ti 及过渡族元素含量更高。实验岩石学表明, 典型 MORB 部分熔融产生 Mg[#] 一般小于 45, 若与橄榄岩发生 10% 混染, 就会使熔体的 Mg[#] 升至 55^[12,17,19]。岩体 Cr、Co、Ni 及 Mg[#] (平均 60.4) 较高, 表明形成过程中受到较强地幔物质混染, 但幔源岩浆混染的机制和程度, 还不清楚。两岩体是在基性下地壳脱水熔融达含角闪石的榴辉岩相或麻粒岩相部分熔融形成的似埃达克质岩浆, 它们在 Mg、Fe、Ti 及微量元素的差异是由于地幔物质不同造成。

4.3 形成过程和机制

已有数据资料表明, 秦岭地区沿勉略带印支期

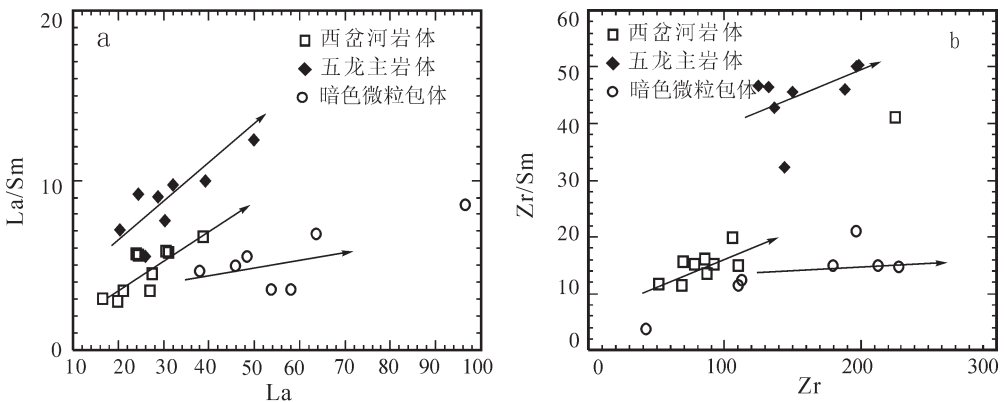


图 7 西荏河、五龙岩体的 La-La/Sm 图解和 Zr-Zr/Sm 图解

Fig.7 La-La/Sm (a) and Zr-Zr/Sm (b) diagrams of the Wulong and Xichahe plutons

发生主碰撞峰期年龄为 254~220 Ma^[2,20]。沿勉略带北侧宁陕、东江口岩体群(220~205 Ma)^[3]和南邻阳坝岩体的锆石 U-Pb 年龄^[12],都稍晚于秦岭造山带的主造山期。西荏河石英闪长岩、五龙花岗质岩石的锆石 U-Pb 定年为(225.3±6) Ma,略晚于秦岭造山带主碰撞期 30 Ma。五龙岩体是大型复式岩基,平面分布呈近椭圆形,无明显变形,基本不发育类似片麻理等定向构造,与震旦纪—泥盆纪围岩侵入接触关系清晰可见。结合以往的研究成果^[1-5,12],本区花岗质岩石应形成扬子、秦岭微板块对接后由挤压向伸展转变的后碰撞构造环境。

地质及地球化学特征表明暗色微粒包体是幔源基性岩浆的物质组成。根据实验岩石结果,玄武质岩石发生熔融,必须是高温(850~1150℃)或有异常热源的加入^[21-22]。从岩体产出的时空位置看,包体所带来地幔热组分可能是花岗岩体形成的主要热源。基性岩浆只有少量上升侵入酸性岩浆房,因密度差异,大部分囤积在壳-幔边界或岩浆房底部^[23-24]。

综合考虑岩石学、地球化学及地球动力学背景,西岔河、五龙岩体的形成机制为:早三叠世,扬子板块沿勉—略缝合带向北俯冲插入秦岭微板块下,华北和扬子板块的对接碰撞使得地壳明显增厚。沿勉略构造带,由于先存俯冲在秦岭微板块岩石圈之下勉略洋壳的向北断离作用^[12,25],造成岩石圈地幔部分熔融和增厚下地壳地温梯度急剧增高,进而分别产生具有幔源特征的熔体和部分埃达克岩特征的花岗质熔体。

目前,尽管在南秦岭地区还没有发现用以证明拆沉作用的榴辉岩存在,但有迹象表明,在南秦岭地区可能存在中生代拆沉作用^[26]。那么,本区花岗岩的形成机制可印证:至少在 220 Ma,残留的镁铁质下地壳还存留于下地壳底部。增厚的基性下地壳达到含角闪石的榴辉岩相或麻粒岩相部分熔融后的残余石榴石,将更加可能导致拆沉、去根作用,造成岩石圈减薄和大陆伸展作用^[12]。西荏河与五龙花岗质岩石的成因厘定,不仅为壳幔混合型花岗岩的存在及形成机制提供了地质证据,还将对示踪中生代南秦岭地区的下地壳物质组成,解释华北、扬子板块碰撞后的岩石圈减薄、构造体制转换,具有重要的地质意义。

5 结 论

岩石学、元素地球化学、Sr-Nd 同位素地球化学表明,西荏河、五龙岩体是壳幔混合型花岗岩,岩

石具有似埃达克岩的地球化学特征,是幔源岩浆底侵引发加厚基性下地壳熔融产物。暗色微粒包体与花岗质岩并不是同源岩浆演化形成,它代表了幔源岩浆的物质组成。

西岔河岩体 $\epsilon Nd = -1.53 \sim -3.62$, $Isr = 0.70543 \sim 0.70645$, $T_{DM} = 1.16 \sim 1.38 Ga$; 五龙主岩体 $\epsilon Nd = -2.26 \sim -2.66$, $Isr = 0.70445 \sim 0.70503$, $T_{DM} = 1.017 \sim 1.020 Ga$ 。同位素组成类似,表明两岩体有相似的源区组成。

晚古生代勉略洋的北向俯冲,先期洋壳断离作用可能导致岩石圈地幔物质熔融和底侵,引发增厚基性下地壳达到含角闪石的榴辉岩相或麻粒岩部分熔融形成埃达克质岩浆。岩石 Mg、Fe、Ti 等微量元素的差异是由地幔物质含量不同造成。岩体的形成代表了印支期秦岭后碰撞造山阶段的勉略洋俯冲板块的断离作用。

致谢:衷心感谢李永飞硕士的无私帮助,以及评审专家提出细致而周详的修改意见,在此一并表示谢意!

参考文献(References):

- [1] 张国伟,张本仁,袁学诚,等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京:科学出版社,2002:1-855.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al, Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2002:1-855 (in Chinese with English abstract).
- [2] 赖绍聪,张国伟,董云鹏,等. 秦岭大别勉略构造带蛇绿岩与相关火山岩性质及时空分布[J]. 中国科学(Ser.D), 2003, 33(12):174-183.
Lai Shaocong, Zhang Guowei, Dong Yunpeng, et al. Geochemistry and regional distribution of ophiolites and associated volcanics in Mianlüe suture, Qinling-Dabie Mountains [J]. Science in China (Series D), 2004, 47(4):289-299(in Chinese).
- [3] 孙卫东,李曙光, Yadong Chen. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年[J]. 地球化学, 2000, 29(1):299-308.
Sun Weidong, Li Shuguang, Chen Yadong, et al. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance [J]. Geochemica, 2000, 29 (3):299-308 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陕西省地质矿产局. 陕西省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1988:285-290.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaan'xi Province. Regional Geology of Shaan'xi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:285-290(in Chinese with English abstract).
- [5] 王居里. 秦岭造山带佛坪基底杂岩的地质特征[J]. 西北地质,2002, 35(2):1-8.
Wang Juli. Geological features of the Fuping basal complex, Qinling orogenic belt[J]. Northwest Geology, 2002,35(2):1-8 (in Chinese

- with English abstract).
- [6] 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入岩的激光锆石探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析 [J]. 科学通报, 2003, 48(4): 511-520.
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, et al. Determination of zircons from cenozoic intrusions in Northeastern China by laser ablation ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(4): 511-520 (in Chinese).
- [7] Barbarin B A. Review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. Lithos, 1999, (46):605-626.
- [8] Pearce J A, Harris N B M, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25:956-983.
- [9] Sun S S, Me, Donough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implication for the mantle composition and process [C]//Saunders A D and Norry M J F (eds.). Geological Society of London Special Publication, 1989, 2:313-345.
- [10] 张宏飞, 欧阳建平, 凌文黎. 南秦岭宁陕地区花岗岩 Pb、Sr、Nd 同位素组成及深部地质信息 [J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 6:22-31.
- Zhang Hongfei, Ouyang Jianping, Ling Wenli. Pb, Sr, Nd isotope composition of Ningshan granitoids, South Qinling and their deep geological information [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1997, 16(1):22-32(in Chinese with English abstract).
- [11] 潘贵, 刘宝山, 李仰春. 伊春地区晚奥陶世花岗岩中闪长质包体的成因 [J]. 中国地质, 2002, 29(4):364-368.
- Pan Gui, Liu Baoshan, Li Yangchun. Genesis of dioritic inclusions in Late Ordovician granitic rocks in the Yichun area [J]. Geology in China, 2002, 29(4):364-368(in Chinese with English abstract).
- [12] 秦江峰, 赖绍聪, 李永飞. 扬子板块北缘碧口地区阳坝花岗岩长岩体成因研究及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2005, 21(3):679-710.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area, Northern margin of Yangtze Plate [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3):697-710(in Chinese with English abstract).
- [13] 孙德有, 吴福元, 林强, 等. 张广才燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用 [J]. 岩石学报, 2001, 17(2):227-235.
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Lin Qiang, et al. Petrogenesis and crust-mantle interaction of early Yanshanian Baishishan pluton in Zhangguangcai Range [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2):227-235 (in Chinese with English abstract).
- [14] Allegre C J, Minster J F. Quantitative method of trace element behavior in magmatic processes [J]. Earth and Planetary Science Letter, 1978, 38:1-25.
- [15] Sylvesler P J. Post-collisional peraluminous granites [J]. Litho, 1998, 45:29-44.
- [16] Lai Shaocong, Zhang Guowei, Dong Yunpeng, et al. Geochemistry and regional distribution of ophiolite and associated volcanics in Mianliensuture, Qinling-Dabie Mountains [J]. Science in China (series D), 2004, 47:289-299.
- [17] 肖龙, Rapp R P, 许继锋, 等. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约 [J]. 岩石学报, 2004, 20(3):219-228.
- Xiao Long, Rapp R P, Xu Jifeng, et al. The role of deep processes controls on variation of composition [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2):219-228(in Chinese with English abstract).
- [18] 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 等. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究 [J]. 中国地质, 2005, 32(3):343-352.
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, et al. Granitoids and continental crustal growth modes in China [J]. Geology in China, 2005, 32(3):343-352(in Chinese with English abstract).
- [19] 裴先治, 王涛, 丁汕平, 等. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义 [J]. 中国地质, 2003, 30(4):372-381.
- Pei Xianzhi, Wang Tao, Ding Sanping, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shandong zone in the East Qinling [J]. Geology in China, 2003, 30(4):372-381 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 等. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩年代学和地球化学-古生代洋盆及其闭合时代的证据 [J]. 中国科学, 1996, 26(3):223-230.
- Li Shuguang, Sun Weidong, Zhang Guowei, et al. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heitoaxia Valley in the Mian-Lue tectonic zone, south Qinling: Evidence for a palaeozoic oceanic basin and its close time [J]. Science in China (Series D), 1996, 39(3):300-310.
- [21] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust mantle recycling [J]. Journal of Petrology, 1995, 36:891-931.
- [22] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. Reaction between slab-derived melt and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J]. Chemical Geology, 1999, 160:335-356.
- [23] 熊小林, 赵振华, 白正华, 等. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因: Nd 和 Sr 同位素组成的限制 [J]. 岩石学报, 2001, 17(3):514-522.
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, et al. Origin of Awulale adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan: Constraints for Nd and Sr isotopic compositions [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4):514-522(in Chinese with English abstract).
- [24] 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳熔融: 安徽沙溪埃达克质富钠石英闪长岩证据 [J]. 地球化学, 2001, 20(2):353-361.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, et al. The geochemical comparison between Tongshankou and Yinzu [J]. Geochemistry, 2001, 20(2):351-360(in Chinese with English abstract).
- [25] 李曙光, 黄方, 李晖, 等. 大别-苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离 [J]. 科学通报, 2001, 46(17):1487-1491.
- Li Shuguang, Huang Fang, Li Hui, et al. Post-collisional lithosphere delamination of Dabie-Sulu orogen [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(17):1487-1491 (in Chinese).
- [26] 高山, 张本仁, 金振民. 秦岭-大别造山带下的拆沉作用 [J]. 中国科学(D 辑), 1999, 42:423-433.
- Gao Shan, Zhang Benren, Jin Zhenmin, et al. Lower crustal delamination in the Qinling-Dabie orogenic belt [J]. Science in China (Series D), 1999, 42:423-433 (in Chinese).

Petrogenesis of the Early Triassic Xichahe and Wulong plutons in the South Qinling Mountains and their tectonic significance

WANG Juan¹, LI Xin², LAI Shao-cong³, QIN Jiang-feng³

(1. Institute of Earth Resources and Information, China University of Petroleum (East China), Dongying 257061, Shandong, China;

2. Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying 257100, Shandong, China;

3. Department of Geology Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: The Early Triassic Indosinian Xichahe and Wulong plutons were emplaced into metamorphic rocks of the Mesoproterozoic Fuping Group in the South Qinling. A few mafic enclaves, which have a clear or obscure boundary with the host granodiorite, occur in the southern part of the Wulong pluton. Intensive petrographical, geochemical and Sr–Nd isotope studies indicate that the two plutons show some adakitic affinities; they are both strongly depleted in Yb and Y and enriched in Sr and Ba with higher Sr/Y and Y/Yb ratios and weak negative Eu anomalies. These patterns suggest a feldspar–poor, garnet ± amphibole–rich fractionation mineral assemblage. The mafic enclaves have higher Mg (MgO=4.15–8.13%), Cr (14.8–371 μg/g) and Ni (20.0–224 μg/g), as well as higher LREE and LILE, with Nb/Ta ratios of 15.42–21.9. It is inferred that the underplated mantle magma was responsible for the generation of the mafic magmas. The two plutons have similar Sr and Nd isotopic compositions, with $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.70445-0.70645$, $\epsilon_{\text{Nd}}=-1.50-3.62$ and $T_{\text{DM}}=1.02-1.38$ Ga. Based on the aforesaid study, combined with previous studies, the authors think that the underplating of mantle–derived magma to the crust–mantle boundary induced amphibole eclogite facies or granulite facies metamorphism and partial melting of the thickened lower crust, thus forming adakitic magma. The difference of the two plutons in contents of some trace elements was caused by different degrees of contamination with mantle materials, and their formation probably represents the breakoff of the subducted Mianlue oceanic slab during the Indosinian late–collisional orogenic stage in the Qinling area.

Key words: Xichahe pluton; Wulong pluton; mafic microgranular enclaves; adakite; Sr–Nd isotopes; underplating

About the first author: WANG Juan, female, born in 1980, Ph.D student, engages in the study of geochemistry and petroleum geology; E–mail: wangjuanb601011@163.com.