

# 北秦岭灰池子花岗质复式岩体的源岩讨论

## ——元素—同位素地球化学制约

李伍平<sup>1,2</sup>, 王涛<sup>3</sup>, 王晓霞<sup>2</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640; 2. 长安大学地球科学系, 陕西西安 710054; 3. 北京大学地质学系, 北京 100871)

**摘要:** 灰池子复式岩体是北秦岭造山带核部规模最大的花岗岩体, 它由 3 个深成岩体组成。花岗岩具有高  $\text{SiO}_2$  (66.86%~73.48%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.44%~16.32%) 和  $\text{Na}_2\text{O}$  (4.17%~4.78%), 低  $\text{TiO}_2$  (<0.74%),  $\text{MgO}$  (<1.18%) 和  $\text{K}_2\text{O}$  (<3.33%) 的特征。花岗岩轻稀土元素富集 ( $27.45 < w(\text{La})_N / w(\text{Yb})_N < 72.99$ ),  $\text{Eu}$  为负—弱正异常, 微量元素  $\text{Y}$  的质量分数为  $(3.70 \sim 9.77) \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb}$  为  $(0.30 \sim 1.14) \times 10^{-6}$ ,  $\text{Sr}$  为  $(310 \sim 775) \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  为 47.87~114.36, 大离子亲石元素 ( $\text{Rb}, \text{Ba}, \text{Th}, \text{Sr}$  等) 相对富集, 高场强元素 ( $\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti}, \text{Zr}$ ) 相对亏损。同位素组成比较均匀,  $0.51231 < w(^{143}\text{Nd})/w(^{144}\text{Nd}) < 0.51238$ ,  $0.70783 < w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr}) < 0.70880$ ,  $0.95 \text{ Ga} < t_{\text{DM}} < 1.09 \text{ Ga}$ ,  $-0.81 < \epsilon(\text{Nd}, 437 \text{ Ma}) < 0.93$ , 且  $18 < \epsilon(\text{Sr}, 437 \text{ Ma}) < 32$ , 这些特征与 Adakititic 质岩相似。笔者认为灰池子花岗岩是由深部下地壳新元古代玄武质岩石部分熔融形成的 Adakititic 质岩, 其形成与晚加里东—早海西期北秦岭杂岩体地南北裂陷海盆发生陆内双向俯冲有关。

**关键词:** 灰池子复式岩体; Adakititic 质岩; 下地壳; 部分熔融; 晚加里东—早海西期; 北秦岭。

中图分类号: P591.1 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)03-0269-10

**作者简介:** 李伍平(1963), 男, 1999年毕业于中国地质大学地球科学学院, 获博士学位, 主要从事区域地质和岩石学研究。

灰池子花岗质复式岩体是北秦岭造山带核部规模最大的花岗岩体。前人曾对该复式岩体进行过一定程度的岩体地质学、岩石学、元素地球化学<sup>[1~7]</sup>、年代学<sup>[1,2,8]</sup>、部分同位素地球化学<sup>[6~15]</sup>、岩体构造<sup>[16,17]</sup>和侵位机制研究<sup>[18~21]</sup>, 取得了不少成果。但对灰池子花岗岩的起源仍存在分歧, 一种观点认为是原地熔融或交代形成的混合花岗岩, 源岩为中元古界秦岭杂岩副变质岩<sup>[1,2,4~6]</sup>; 另一种观点认为是岩浆成因, 源岩由地幔与地壳岩浆混合形成的壳幔型花岗岩<sup>[11]</sup>。本文通过对花岗岩进行较系统的元素—同位素分析, 对该复式岩体的地球化学特征及其源区作进一步探讨。

## 1 区域地质

灰池子复式岩体就位于商丹断裂与朱夏断裂之

间的秦岭杂岩核部。近年来研究表明<sup>[18,22]</sup>, 秦岭杂岩由秦岭岩群( $\text{Pt}_2\text{ql}$ )和峡河岩群( $\text{Pt}_3\text{xh}$ )组成, 其中秦岭岩群( $\text{Pt}_2\text{ql}$ )是北秦岭造山带最古老的结晶基底, 分布在牌楼沟韧性变形带与商丹断裂之间, 主要由一套变质程度为角闪岩相—麻粒岩相的富铝长英质片麻岩、二云长英质片麻岩、大理岩—钙硅酸粒岩及斜长角闪岩组成; 峡河岩群( $\text{Pt}_3\text{xh}$ )分布在朱夏断裂与牌楼沟韧性变形带之间, 主要由一套变质程度为低角闪岩相—高绿片岩相的富铝质和富钙质石英(斜长)片岩、变粒岩夹石英岩、大理岩、钙硅酸粒岩及斜长角闪岩组成。在灰池子复式岩体周围变质程度增高, 形成一套片麻岩系<sup>[18]</sup>。秦岭杂岩南界与新元古代丹凤群变质岩或商丹断裂带接触, 北界以朱夏断裂与中元古代宽坪群和新元古代—早古生代二郎坪群接触, 在峡河岩群( $\text{Pt}_3\text{xh}$ )内部狮子坪强变形带以北—朱夏断裂以南发现了高压—超高压榴辉(闪)岩,  $\text{Sm}-\text{Nd}$  等时线年龄为  $(400 \pm 16) \text{ Ma}$ , 其形成可能与商丹断裂带向北俯冲有关<sup>[23~25]</sup>。丹凤群主

体处于商丹强变形带中,为一套具岛弧性质的基性火山岩、陆源碎屑岩和泥质岩夹少量的碳酸盐岩沉积建造,晚加里东—早海西期遭受强烈变质变形改造;宽坪群是华北克拉通南缘弧后盆地拉伸环境的产物;二郎坪群以基性火山岩夹陆源碎屑岩为主,属于陆内微型扩张裂陷构造环境<sup>[22]</sup>。另外,沿商丹断裂带分布有著名的新元古代具裂陷小洋盆性质的松树沟蛇绿构造岩片<sup>[26~30]</sup>。

## 2 岩体地质学和岩石学特征

灰池子复式岩体由 3 个深成岩体组成,出露总面积约 340 km<sup>2</sup>。总体形态近椭圆形,椭圆长轴与区域构造线方向基本一致,并受岩体空间配制形式控制。从早到晚依次是蔡家沟岩体、淇河岩体和明朗河岩体,每个岩体可进一步划分为 3 个填图单位<sup>[3]</sup>(图 1)。

蔡家沟岩体分布在西北部,3 个填图单位的岩石类型依次为中细粒黑云母斜长花岗岩、中细粒黑云母花岗闪长岩和中—中细粒黑云母花岗闪长岩;淇河岩体是该复式岩体的主体,3 个填图单位的岩石类型依次为中—中细粒黑云母花岗闪长岩、中粒含斑黑云母二长花岗岩(钾长石斑晶<5%,下同)、中粒—中粗粒少斑黑云母二长花岗岩(5%~15%);明朗河岩体规模较小,分布在东北部,3 个填图单位

的岩石类型依次为中—中细粒含斑黑云母花岗闪长岩(<5%)、中粗粒少斑黑云母二长花岗岩(5%~15%)和粗粒多斑黑云母二长花岗岩(15%~20%)。主要造岩矿物为石英、钾长石、斜长石和富镁黑云母<sup>[6]</sup>,缺失角闪石和白云母,未发现富铝质矿物。在岩体内部,各填图单位侵入体之间为侵入接触关系,具有同源岩浆演化趋势<sup>[3,7]</sup>。在岩体中常见到围岩捕虏体,如各种变质岩及基性杂岩(如黄柏沟基性杂岩<sup>[18]</sup>)、斜长角闪岩等。岩体内部普遍发育叶理构造,其产状平行于岩体边界。从岩体边部向内部,叶理有从强变弱的趋势。对叶理的变形组构研究表明<sup>[16]</sup>,灰池子花岗岩的叶理应变型式均为压扁型。叶理的形成主要是岩浆流动和结晶过程中高温固态流动变形的结果<sup>[16,21]</sup>。

蔡家沟花岗岩锆石 U—Pb 年龄为(437±47) Ma,淇河岩体花岗岩的全岩 Rb—Sr 等时线年龄和 K—Ar 等时线年龄分别为(382±2) Ma 和 399.1 Ma<sup>[1,2,8]</sup>,故灰池子复式岩体形成于晚加里东—早海西期。

## 3 元素—同位素地球化学特征

本文采集了代表性的岩石样品(图 1)。样品新鲜。主量元素和微量元素样品由国土资源部宜昌地

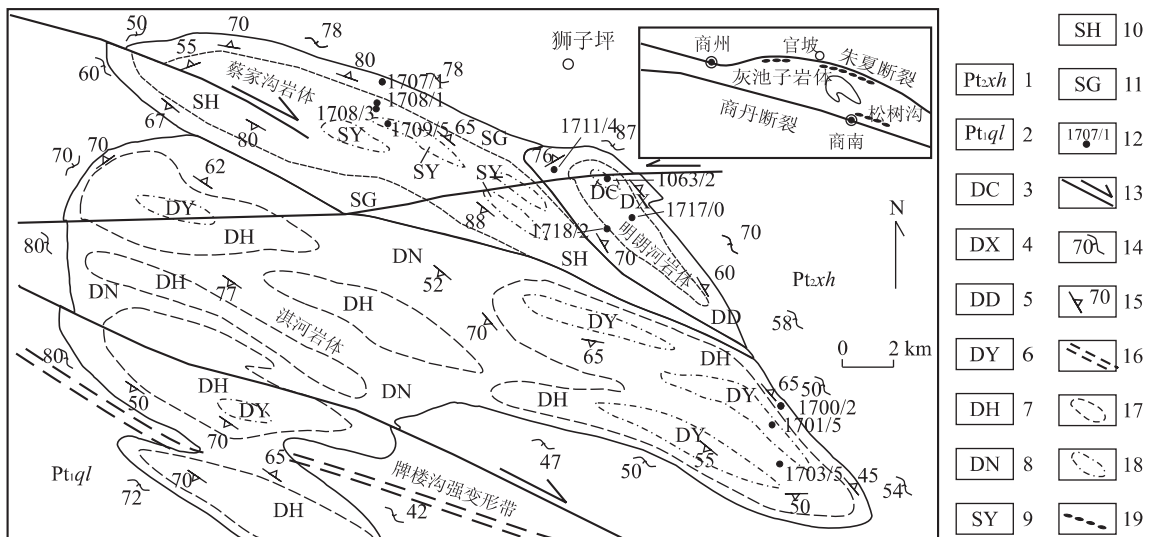


图 1 灰池子花岗质复式岩体区域地质简图

Fig. 1 Regional geological map of Huichizi granitoid complex pluton in northern Qinling, Central China

1. 峡河岩群; 2. 秦岭岩群; 3. 明朗河岩体草沟单元; 4. 明朗河岩体下庄单元; 5. 明朗河岩体东沟单元; 6. 淇河岩体颍坪单元; 7. 淇河岩体黄泥盖单元; 8. 淇河岩体南坪单元; 9. 蔡家沟岩体姚家岔单元; 10. 蔡家沟岩体后拐岔单元; 11. 蔡家沟岩体谷台庵单元; 12. 采样位置及编号; 13. 平移断层; 14. 片麻理产状; 15. 叶理产状; 16. 韧性剪切带; 17. 涌动型侵入接触界线; 18. 脉动型侵入接触界线; 19. 高压、超高压变质带

表 1 灰池子复式岩体花岗岩和秦岭岩群变质岩主量元素分析结果

Table 1 Analysis data of major elements for granites of Huichizi complex pluton and for metamorphic rocks of Qinling Group

岩体	蔡家沟			淇河			明朗河			秦岭杂岩副变质岩					
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
样号	1709/5	1708/3	1708/1	1707/1	1701/5	1703/5	1700/2	1063/2	1717/0	1718/2	1711/4	822/3	11102/4	11106/1	1114/1
SiO <sub>2</sub>	69.78	71.10	69.38	69.36	68.04	66.86	71.49	71.73	71.50	72.09	73.48	72.38	73.16	72.24	67.09
TiO <sub>2</sub>	0.34	0.27	0.27	0.44	0.39	0.46	0.24	0.18	0.18	0.24	0.13	0.39	0.68	0.40	0.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.32	15.49	15.81	15.30	15.52	15.94	14.52	15.34	15.07	15.12	14.44	13.44	13.16	13.46	16.07
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.44	0.44	0.23	1.04	1.48	1.63	0.82	1.02	0.62	0.39	0.14	1.66	1.42	1.27	3.57
FeO	1.10	1.52	2.12	1.64	1.58	1.62	1.19	1.16	1.40	1.52	1.28	1.60	1.50	2.00	2.68
MnO	0.06	0.04	0.06	0.05	0.08	0.06	0.06	0.01	0.01	0.02	0.05	0.06	0.03	0.07	0.06
MgO	0.76	0.68	0.81	1.03	0.99	1.18	0.63	0.72	0.75	0.87	0.31	0.81	1.21	0.86	1.19
CaO	2.20	2.49	2.52	2.86	2.84	2.39	2.17	1.35	1.85	2.10	1.45	1.27	0.80	1.53	0.20
Na <sub>2</sub> O	4.78	4.73	4.53	4.28	4.55	4.41	4.17	4.51	4.77	4.51	4.29	2.57	0.06	2.78	0.88
K <sub>2</sub> O	1.62	1.68	2.42	2.32	2.74	2.83	2.95	3.33	3.23	2.65	3.25	3.50	3.46	3.40	3.88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.10	0.13	0.25	0.32	0.39	0.16	0.09	0.09	0.10	0.06	0.12	0.14	0.13	0.12
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	1.10	0.50	0.52	0.36	0.46	0.54	0.40	0.20	0.12	0.10	0.34	1.52	2.56	1.10	1.38
CO <sub>2</sub>	0.25	0.12	0.12	0.06	0.23	0.15	0.46	0.16	0.16	0.10	0.11				
LOS	1.22	0.40	0.44	0.32	0.64	0.56	0.52	0.41	0.12	0.10	0.24	1.32	3.02	1.26	3.23
Total	101.13	99.56	99.36	99.31	99.86	99.02	99.78	100.21	99.87	99.91	99.57	100.64	101.20	100.50	101.16
$w(Na_2O)/w(K_2O)$	2.95	2.82	1.87	1.84	1.66	1.56	1.41	1.35	1.48	1.70	1.32	0.73	0.02	0.82	0.23

注:1. 样品由中国地质科学院宜昌地质矿产研究所分析;2. 样品 822/3 和 11102/4 为花岗岩片麻岩,11106/1 和 1114/1 岩性分别为二云母片麻岩和白云石英片岩;表中氧化物为  $w_B/\%$ 。

表 2 灰池子复式岩体花岗岩 CIPW 标准矿物计算

Table 2 CIPW standard minerals calculated data for granites of Huichizi complex pluton

岩体	蔡家沟			淇河			明朗河				
样号	1709/5	1708/3	1708/1	1707/1	1701/5	1703/5	1700/2	1063/2	1717/0	1718/2	1711/4
Q	30.64	30.61	26.45	28.30	24.19	24.62	30.73	28.75	25.90	29.36	32.10
Or	9.72	10.08	14.56	13.92	16.45	17.12	17.73	19.81	19.21	15.74	19.44
Ab	40.99	40.57	38.96	36.70	39.03	38.12	35.82	38.33	40.53	38.27	36.67
An	10.13	11.95	11.95	12.91	12.40	9.79	9.99	6.21	8.70	9.88	6.92
C	3.08	1.59	1.45	1.09	0.59	2.15	0.86	2.05	0.54	1.22	1.36
Hy-en	1.93	1.73	2.06	2.61	2.51	3.02	1.60	1.81	1.88	2.18	0.78
Hy-fs	0.38	2.08	3.42	1.54	1.20	1.00	1.24	1.01	1.79	2.11	2.13
Mt	2.12	0.65	0.34	1.53	2.18	2.42	1.21	1.49	0.90	0.57	0.21
Il	0.66	0.52	0.52	0.85	0.75	0.89	0.46	0.34	0.34	0.46	0.25
Ap	0.35	0.22	0.29	0.55	0.71	0.87	0.35	0.20	0.20	0.22	0.13

注:原始分析数据见表 1。

质矿产研究所分析。Nd 和 Sr 同位素样品由中国地质科学院地质研究所分析,实验方法和流程见文献 [31]。分析结果及主要参数见表 1~3。

### 3.1 主量元素(表 1)

(1)SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Na<sub>2</sub>O 质量分数较高(分别为 66.86%~73.48%, 14.44%~16.32%和 4.17%~4.78%), TiO<sub>2</sub>, MgO 和 K<sub>2</sub>O 质量分数较低(各为 < 0.74%, < 1.18%, < 3.33%),  $w(Na_2O) > w(K_2O)$  ( $w(Na_2O)/w(K_2O)$  为 1.32~2.95),  $Mg^\# (Mg/(Mg+Fe))$  分子数比)小于 0.5(0.28~0.45),  $A/NK$

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 分子数比)比值为 1.33~1.70;里特曼指数  $\sigma < 3.3$ (1.46~2.25), CIPW 标准矿物(表 2)中出现刚玉分子(C),表明源区可能受到地壳物质的混染,未出现 Lc+Ne+Ac+Ns+Di,显然灰池子花岗岩属于钙碱性花岗岩。

(2)与秦岭杂岩中的副变质岩(表 1 中 1822/3~1114/1)及其中的 S 型花岗岩(如牛角山片麻状花岗岩<sup>[32]</sup>、漂池花岗岩<sup>[33]</sup>)相比,灰池子花岗岩相对富 Mg, Ca, Na, 贫 K, Ti;与秦岭杂岩中的基性岩<sup>[35,36]</sup>或幔源型黄柏沟基性杂岩<sup>[18]</sup>相比,则相对富 Al,

表 3 灰池子复式岩体花岗岩和秦岭岩群变质岩微量元素分析结果

Table 3 Analysis data of trace elements for granites of Huichizi complex pluton and for metamorphic rocks of Qinling Group

岩体 序号	蔡家沟			淇河			明朗河			秦岭群副变质岩								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
La	28.30	19.40	28.60	57.70	68.40	116.00	46.30	25.70	28.00	20.30	19.90		34.50	36.50	29.80	75.70	44.50	18.60
Ce	107.00	41.70	44.60	84.90	104.00	183.00	74.10	49.50	44.80	35.80	33.60		59.80	64.30	63.00	133.00	76.50	33.70
Pr	3.63	3.09	4.36	9.17	10.90	17.90	7.47	4.08	4.18	3.34	3.46		7.73	7.60	6.72	17.20	10.80	4.98
Nd	15.00	15.00	23.70	32.00	36.00	59.30	28.50	17.20	16.80	14.60	14.70		27.20	29.50	23.10	64.50	39.80	17.90
Sm	4.50	2.20	2.77	5.66	6.71	11.40	5.16	2.31	2.44	2.14	2.69		5.71	6.37	5.22	13.80	8.73	4.21
Eu	0.74	0.55	0.65	1.04	0.94	1.50	0.79	0.58	0.60	0.67	0.53		0.80	0.85	0.96	1.99	1.43	1.14
Gd	1.83	1.03	1.54	3.21	3.95	5.77	3.29	1.46	1.44	1.56	1.84		5.05	5.58	3.87	10.30	6.56	4.07
Tb	0.33	0.18	0.26	0.46	0.53	0.70	0.50	0.19	0.21	0.24	0.28		0.74	0.97	0.86	1.68	1.12	0.74
Dy	1.55	0.79	1.17	2.11	2.33	3.16	2.46	1.00	1.48	1.15	1.52		4.69	6.57	6.14	11.10	7.24	5.02
Ho	0.27	0.17	0.20	0.36	0.42	0.56	0.43	0.19	0.20	0.21	0.25		0.83	1.16	1.25	2.29	1.50	0.99
Er	0.67	0.39	0.43	0.96	0.91	1.20	1.01	0.50	0.46	0.56	0.59		2.29	3.47	3.31	6.54	4.20	2.77
Tm	0.10	0.06	0.06	0.14	0.15	0.19	0.15	0.08	0.07	0.08	0.09		0.28	0.43	0.51	0.95	0.61	0.44
Yb	0.61	0.30	0.33	0.82	0.83	1.14	0.87	0.48	0.30	0.52	0.52		1.70	2.72	3.06	5.70	3.66	2.64
Lu	0.09	0.05	0.05	0.13	0.13	0.18	0.13	0.07	0.06	0.08	0.08		0.26	0.36	0.47	0.89	0.57	0.41
Y	5.86	3.75	3.87	6.82	8.67	9.77	9.15	3.70	3.97	3.77	4.83		15.60	22.70	23.80	46.20	30.90	21.50
Cr	10.00	8.00	11.00	6.00	3.00	8.00	8.00	112.00	129.00	75.00	3.00	17.00	28.00	18.00	207.00	391.84	238.12	119.11
Co	1.40	5.00	3.00	2.80	0.80	1.20	1.80	3.00	4.00	4.00	4.00	7.00	6.00	7.00	13.00	3.57	3.22	2.09
Ni	3.90	0.09	0.69	6.60	8.60	6.30	4.30	3.00	4.00	6.00	0.06	12.00	15.00	11.00	20.00	13.28	12.16	7.05
V	42.00	25.00	32.00	42.00	44.00	47.00	25.00	29.00	29.00	35.00	20.00	36.00	84.00	32.00	112.00	0.49	0.55	0.83
Th	6.04	1.72	3.08	5.04	8.32	5.08	4.48	10.00	9.00	7.00	3.40	12.36	9.98	11.56	12.00	8.97	8.22	4.76
Rb	33	53	79	65	86	75	98	105	104	93	111	183	110	170	205			
Sr	342	410	380	488	580	775	438	404	454	347	310	96	100	78	66			
Ba	182	555	700	740	825	1400	908	907	880	757	600	440	900	430	697			
Cs	1.40	3.80	4.30	1.30	2.50	1.50	2.30	9.00	9.00	9.00	4.90	7.70	5.20	7.20	8.00			
Ta	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.22	0.56	1.80	0.40	0.80	0.80	0.80	0.44			
Nb	7.3	3.2	4.3	8.2	10.4	8.2	8.0				6.0	8.1	11.1	8.9				
Hf	3.4	4.1	3.1	4.1	4.1	1.5	2.3	6.0	6.0	6.0	2.9	3.7	7.3	4.5	5.0			
Zr	92.0	137.0	132.0	128.0	136.0	220.0	120.0	122.0	120.0	114.0		160.0	370.0	156.0	202.0			
Ga	26.0	18.5	23.0	15.0	17.5	15.0	20.0	19.2	20.0	19.8	23.0	16.0	32.0	15.0	26.8			
Sc	7.0	2.5	2.8	4.3	4.4	4.3	4.2	3.3	3.4	3.9		8.0	6.5	8.2	14.0			
Li	30.7	29.5	25.2	30.8	14.7	19.3	39.6	50.5	42.5	33.7	29.4	28.3	33.5	24.1	47.6			
Be	4.50	2.50	2.40	2.90	3.00	3.00	3.70	1.90	1.90	1.72	2.90	3.50	0.50	4.90	2.77			
W	0.00	0.65	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.37	0.42	0.75	1.55	1.55	2.05	5.75			
Mo	1.33	4.68	4.86	0.34	0.37	0.14	0.30	4.10	4.55	2.50	4.76	4.68	4.38	4.68	5.75			
Sn	3.6	1.8	3.3	2.3	3.1	2.4	2.1	4.9	8.1	2.2		15.0	7.1	11.0	8.9			
$w(\text{Sr})/$ $w(\text{Y})$	58.4	109.3	98.2	71.6	66.9	79.3	47.9	109.2	114.4	92.0	64.2		6.4	3.4	2.8			
$w(\text{La})_{\text{N}}/$ $w(\text{Yb})_{\text{N}}$	33.3	46.4	62.2	50.5	59.1	73.0	38.2	38.4	66.9	28.0	27.5		14.6	9.6	7.0	9.5	8.7	5.1

注:1. 样品由中国地质科学院宜昌地质矿产研究所分析;2. 序号 1~15 的样号同表 1,16 为 11081/1 号样,17 为 751/6,18 为 752/6;3. 12~18 号样均为秦岭杂岩副变质岩,其中 12,13 为花岗质片麻岩,14~18 的岩性分别为二云母片麻岩、白云石英片岩、条带状夕线石黑云片麻岩、条带状黑云母片麻岩和含绿帘石斜长角闪岩;4.  $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$  中的球粒陨石标准值采用 Sun 等<sup>[34]</sup>数据;表中稀土元素为  $w_{\text{B}}/10^{-6}$ .

Na, 贫 Mg, Ca, Ti. 显然,由秦岭杂岩中的副变质岩部分熔融形成灰池子花岗岩的可能性不大,但岩浆中有少量长英质物质的加入.

### 3.2 微量元素(表 3)

(1)除样品 1703/5 稀土元素总量( $402.0 \times 10^{-6}$ )较高外,其他样品稀土元素总量( $80.05 \times 10^{-6} \sim$

$236.2 \times 10^{-6}$ )偏低,但轻重稀土分馏强烈( $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}=27.45 \sim 72.99$ ),稀土配分曲线均为轻稀土富集型(图 2). 除样品 1700/5,1701/5 和 1703/5 的  $\delta(\text{Eu}) < 0.60$  外,其他样品  $\delta(\text{Eu}) > 0.60$ .

(2)微量元素 Y 的质量分数为  $3.70 \times 10^{-6} \sim 9.77 \times 10^{-6}$ , Yb 为  $0.30 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-6}$ ,

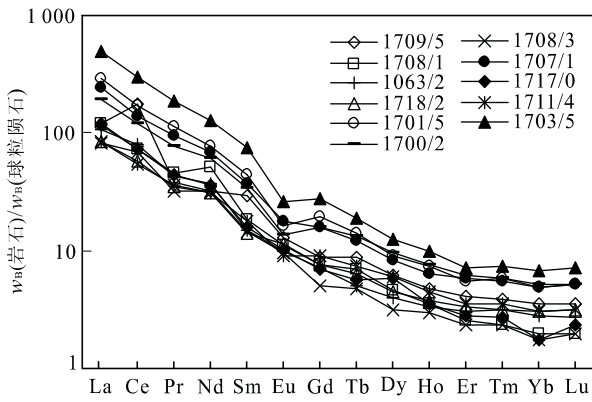


图 2 灰池子复式岩体花岗岩稀土元素配分曲线(球粒陨石标准值见文献[34])

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns for granites of Huichizi complex pluton

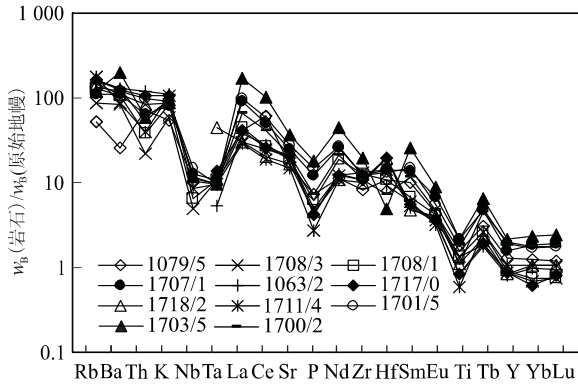


图 3 灰池子复式岩体花岗岩微量元素蛛网图(原始地幔标准值见文献[34])

Fig. 3 Primitive mantle-normalized spider diagram for granites of Huichizi complex pluton

$w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  为 47.87~114.36, 除部分样品(1708/1, 1709/5, 1711/4 和 1718/2) Sr 质量分数小于  $400 \times 10^{-6}$  ( $310 \times 10^{-6} \sim 380 \times 10^{-6}$ ), 大多数样品 Sr 质量分数大于  $400 \times 10^{-6}$  ( $404 \times 10^{-6} \sim 775 \times 10^{-6}$ ). 显然, 灰池子花岗岩微量元素特征不同于正常火山弧火成岩(如安山岩、英安岩、流纹岩,  $w(\text{Y}) > 15 \times 10^{-6}$ ) [37,38], 而与底侵玄武质下地壳熔融形成的 Adakitic 质岩相似 [39~41].

(3) 在与原始地幔 [34] 标准化微量元素蛛网图(图 3)中, 大离子亲石元素(Rb, Ba, Th, K, Sr)和轻稀土元素(La, Ce, Sm, Nd)相对富集, 高场强元素(Nb, Ta, Ti, P, Zr)相对亏损, 与火山弧火成岩相似. 在洋中脊花岗岩 [42] 标准化微量元素图解中  $\text{K}_2\text{O}$ , Rb, Ba, Th, Ce 相对富集, Nb, Ta, Hf, Y, Yb 相对亏损. 在判断花岗岩形成构造环境的有关图解

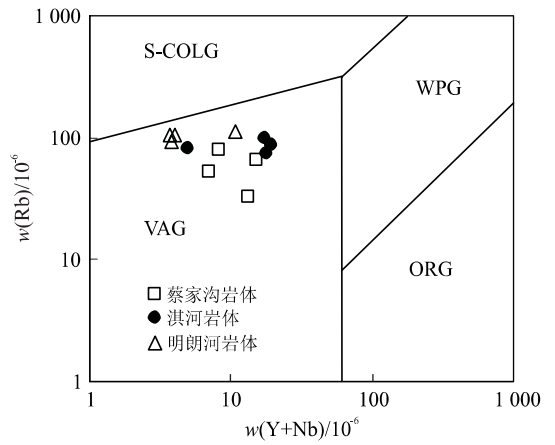


图 4  $w(\text{Y+Nb})/w(\text{Rb})$  关系图解(据 Pearce 等 [42])

Fig. 4  $w(\text{Y+Nb})$  vs  $w(\text{Rb})$  diagram

VAG. 火山弧花岗岩; S-COLG. 同碰撞花岗岩; ORG. 洋中脊花岗岩; WPG. 板内花岗岩

中, 如  $w(\text{Rb}) - w(\text{Y+Nb})$  (图 4) 和  $\text{Ta} - \text{Yb}$  [42],  $\text{Rb}/30 - \text{Hf} - 3 \times \text{Ta}$  [43] 落在火山弧区.

### 3.3 同位素

分析资料见表 4. 归纳以下几点: (1)  $w(^{143}\text{Nd})/w(^{144}\text{Nd})$  比值较高(0.51231~0.51238),  $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$  为 0.70783~0.70880,  $\epsilon(\text{Nd}, 437 \text{ Ma})$  为  $-0.81 \sim +0.93$ ,  $\epsilon(\text{Sr}, 437 \text{ Ma})$  为 20.27~33.12.  $w(^{87}\text{Sr})_i/w(^{86}\text{Sr})_i$  为 0.70525~0.70621,  $w(^{143}\text{Nd})_i/w(^{144}\text{Nd})_i$  为 0.51203~0.51212, 与前人获得的淇河花岗岩  $w(^{87}\text{Sr})_i/w(^{86}\text{Sr})_i$  (分别为 0.7062 [2] 和 0.7050 [4]) 基本一致. 花岗岩同位素组成及特征参数接近(如  $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ ,  $t_{\text{DM}}$ ,  $\epsilon(\text{Nd})$  和  $\epsilon(\text{Sr})$  等), 表明源区非常均匀. 这与年轻洋中脊玄武岩的同位素组成 ( $w(^{87}\text{Sr})_i/w(^{86}\text{Sr})_i < 0.704$ ,  $w(^{143}\text{Nd})_i/w(^{144}\text{Nd})_i > 0.513$ ) 以及与俯冲有关的 Adakitic 岩 ( $w(^{87}\text{Sr})_i/w(^{86}\text{Sr})_i < 0.705$ ,  $w(^{143}\text{Nd})_i/w(^{144}\text{Nd})_i > 0.5125$ ) 及秦岭杂岩中 S 型花岗岩(表 4, 11068/1) [44~48] 差别较大, 而与下地壳玄武质岩石熔融形成的 Adakitic 质岩 [39~41, 49] 及松树沟蛇绿岩 [28] 相似. (2) 亏损地幔模式年龄  $t_{\text{DM}}$  大约为 1.0 Ga, 大于花岗岩体的形成年龄, 而远低于秦岭群片麻岩 ( $t_{\text{DM}} = 1.72 \sim 2.02 \text{ Ga}$  [36]) 及其中的 S 型花岗岩(如牛角山片麻状花岗岩  $t_{\text{DM}} = 1.99 \text{ Ga}$ ,  $\epsilon(\text{Nd}, t) = -9.18$ ,  $\epsilon(\text{Sr}, t) = 795$  (表 4), 漂池花岗岩  $t_{\text{DM}} = 1.81 \sim 1.91 \text{ Ga}$ ) [14, 33]. 与区域上的同时代同成因花岗岩相比, 如黄伯岔花岗岩体 ( $t_{\text{DM}}$  为 1.02~1.15 Ga,  $\epsilon(\text{Nd}, t)$  为  $-0.85 \sim -1.89$ )、石门花岗岩体 ( $t_{\text{DM}}$

表 4 灰池子复式岩体花岗岩同位素分析结果

Table 4 Nd and Sr isotopic analysis data for granites of Huichizi complex pluton

样号	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	$w(^{147}\text{Sm})/w(^{144}\text{Nd})$	$w(^{143}\text{Nd})/w(^{144}\text{Nd})\pm 2\sigma$	$t_{\text{DM}}/\text{Ga}$	$\epsilon(\text{Nd}, t)$	$w(^{143}\text{Nd})_i/w(^{144}\text{Nd})_i$
1707/1	4.09	26.43	0.093 69	0.512 343 $\pm$ 0.000 010	1.02	0.00	0.512 075
1701/5	3.65	24.48	0.090 28	0.512 343 $\pm$ 0.000 009	1.00	0.19	0.512 085
DK-11	2.00	12.80	0.094 77	0.512 305 $\pm$ 0.000 009	1.08	-0.81	0.512 034
DK-13	1.51	8.80	0.103 90	0.512 365 $\pm$ 0.000 011	1.09	-0.14	0.512 068
HCZ-G5			0.090 57	0.512 362 $\pm$ 0.000 020	0.98	0.54	0.512 103
1717/0	1.91	12.93	0.089 24	0.512 378 $\pm$ 0.000 006	0.95	0.93	0.512 123
11068/1	5.04	24.84	0.122 70	0.511 956 $\pm$ 0.000 008	1.98	-9.18	0.511 605

样号	$w(\text{Rb})19^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$w(^{87}\text{Rb})/w(^{86}\text{Sr})$	$w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})\pm 2\sigma$	$\epsilon(\text{Sr}, t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$w(^{87}\text{Sr})_i/w(^{86}\text{Sr})_i$
1707/1	73.69	424.69	0.502 4	0.708 525 $\pm$ 0.000 010	20	-0.52	0.705 398
1701/5	98.87	628.86	0.455 2	0.708 196 $\pm$ 0.000 017	20	-0.54	0.705 363
DK-11	65.00	448.00	0.422 9	0.707 880 $\pm$ 0.000 020	18	-0.52	0.705 248
DK-13	63.40	383.00	0.478 9	0.708 330 $\pm$ 0.000 020	20	-0.47	0.705 349
HCZ-G5			0.260 1	0.707 828	32	-0.54	0.706 209
1717/0	95.12	506.24	0.454 1	0.708 804 $\pm$ 0.000 019	28	-0.55	0.705 977
11068/1	154.58	100.41	4.46	0.787 684 $\pm$ 0.000 012	795	-0.38	0.759 934

注: 1. 样品由中国地质科学院地质研究所张宗清分析; 2.  $\epsilon(\text{Nd}, t)$ ,  $\epsilon(\text{Sr}, t)$ ,  $w(^{143}\text{Nd})_i/w(^{144}\text{Nd})_i$  和  $w(^{87}\text{Sr})_i/w(^{86}\text{Sr})_i$  均以  $t=437$  Ma 计算; 3. 11068/1 为秦岭岩群中牛角山片麻状花岗岩; 4. DK-11 和 DK-13 据文献[11], HCA-G5 据文献[9].

为 1.04 Ga,  $\epsilon(\text{Nd}, t)$  为 -1.11)、石家庄花岗岩体 ( $t_{\text{DM}}$  为 1.17 ~ 1.26 Ga,  $\epsilon(\text{Nd}, t)$  为 -1.56 ~ 2.07)<sup>[14,15,35]</sup>, 亏损地幔模式年龄和同位素组成相似, 说明这些花岗岩的源岩从地幔分异比较早(大约 1.0 Ga), 并且源岩非常相似. 但灰池子花岗岩亏损地幔模式年龄  $t_{\text{DM}}$  与商南松树沟蛇绿岩的形成年龄 (Sm-Nd 等时线年龄  $t=(983\pm 140)$  Ma<sup>[26]</sup>) 接近, 灰池子花岗岩的形成年龄与北秦岭官坡地区的榴辉岩的主变质年龄 (Sm-Nd 等时线年龄为  $(400\pm 16)$  Ma)<sup>[24]</sup> 吻合, 揭示出它们之间可能存在一定联系. 由此推断灰池子花岗岩源岩很可能是新元古代从地幔分异的玄武质岩石, 不可能是秦岭杂岩副变质岩.

## 4 讨论

自 Defant 等<sup>[37]</sup> 提出 Adakite 岩以来, Adakite 岩已引起广泛关注. 这种 Adakite 岩是从现代火山弧厘定出来的一种新的富钠火成岩, 由俯冲的年轻 ( $\leq 25$  Ma) 大洋板片熔融形成<sup>[37,46]</sup>. 因此, Adakite 岩与绝大多数来源于地幔的火山弧火成岩不同. 近年来地质学家认识到具有与 Adakite 岩地球化学特征类似的火成岩并非仅由俯冲板片熔融形成, 在增厚 ( $>40$  km) 的下地壳环境、底侵玄武质下地壳岩石的部分熔融也可形成<sup>[39~41,50]</sup>, 这种岩石称之为 Adakitic 质岩 (埃达克质岩或埃达克型岩)<sup>[39~41]</sup>. 目前已涉及到古生代<sup>[48,51]</sup> 或太古宙<sup>[47]</sup> Adakite 岩或

Adakitic 质岩的研究. 上述两种岩石对探讨岩浆动力学过程、壳幔相互作用、岩石圈的增生及岩浆起源具有重要意义.

灰池子复式岩体花岗岩属于钙碱性系列, 具有火山弧特征.  $w(\text{SiO}_2) \geq 56\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  变化于 14.44% ~ 16.32%, 轻重稀土分馏明显 ( $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N \geq 27.45$ ), Sr 质量分数变化于  $310 \times 10^{-6} \sim 775 \times 10^{-6}$ , 大部分样品出现 Eu 负-弱正异常, 低 Y ( $< 18 \times 10^{-6}$ ) 和  $w(\text{Sr})/w(\text{Y}) (< 115)$ , 高场强元素 (如 Nb, Ta, Zr, Hf, Ti) 相对亏损, 高  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\epsilon(\text{Nd})$ , 这些特征与典型的 Adakite 岩 (如  $w(\text{Al}_2\text{O}_3) > 15\%$ ,  $w(\text{Sr}) > 400 \times 10^{-6}$ , Eu 正异常或微弱负异常, 高  $\epsilon(\text{Nd})$ , 低  $\epsilon(\text{Sr})$ ) 和典型火山弧中酸性火成岩 (如  $w(\text{Sr})/w(\text{Y}) < 50 \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Y}) > 18 \times 10^{-6}$ ) 地球化学特征截然不同, 而与玄武质岩石部分熔融形成的 Adakitic 质岩相似, 因此, 灰池子花岗岩可能为 Adakitic 质岩.

从同位素示踪分析, 灰池子花岗岩的源岩有 4 种可能性, 第一种可能性是岩浆起源于原始地幔; 第二种可能性是岩浆直接来自于亏损地幔或残留洋壳, 岩浆在上升及就位过程中曾受到少量地壳物质的混染; 第三种可能性是岩浆直接来自于亏损地幔岩浆与壳源岩浆混合, 模式年龄为新生岩浆与古老地壳的混合年龄; 第四种可能性是岩浆起源于岩石圈地幔下地壳基性岩石的部分熔融, 可能受到地壳的混染.

从目前研究成果来看,前三种可能性比较小<sup>[11,18,52]</sup>,第四种可能性较大,因为新元古代是北秦岭南缘发生古陆块裂解和古洋壳俯冲及地壳增生时期<sup>[12,26,28,53~55]</sup>,大约在 1.0 Ga,北秦岭以松树沟蛇绿岩构造岩片为代表的秦岭小洋盆沿商丹断裂带向北发生大规模俯冲消减,北秦岭广泛发育极为强烈的构造—变质—岩浆活动,如沿商丹断裂带形成的丹凤郭家沟辉长岩<sup>[56]</sup>、松树沟蛇绿岩<sup>[26]</sup>、秦岭岩群中斜长角闪岩<sup>[27,28]</sup>和丹凤涌峪斜长角闪岩<sup>[36]</sup>、丹凤郭家沟丹凤群(Pt<sub>2</sub>df)斜长角闪岩<sup>[29]</sup>、周至黑河斜长角闪岩<sup>[30]</sup>、河南峡河岩群界牌岩组斜长黑云钙质片岩<sup>[22]</sup>及北秦岭牛角山同碰撞型 S 型片麻状花岗岩<sup>[18]</sup>。正是由于小洋盆的俯冲事件,诱发了北秦岭深部地幔的部分熔融、玄武岩岩浆的底侵和地壳增生,在下地壳形成大量的玄武质岩石,这为灰池子花岗岩的形成奠定了物质基础。

要使下地壳玄武质岩石发生大规模的熔融,需要提供足够的和持续的热能。首先 Adakitic 质岩形成于增厚(>40 km)的下地壳环境和底侵玄武质下地壳岩石的部分熔融<sup>[39]</sup>。蚀变玄武岩或斜长角闪岩在高压(1.0~4.0 GPa,即石榴石的稳定压力)高温(950~1150 °C)条件下发生部分熔融能够形成 Adakitic 质岩浆已得到实验岩石学证实<sup>[57~59]</sup>。增厚的下地壳封闭性好、渗透性弱,有利于对岩石圈的加热,尤其是来自深部地幔的玄武质岩浆的底侵作用,不仅可使地壳加厚,而且可给下地壳提供并使下地壳保持高热流状态,为下地壳岩石熔融创造有利条件<sup>[60]</sup>。加之在下地壳水不饱和环境下斜长石变得极不稳定,也能诱发下地壳玄武质岩石大规模的部分熔融,形成 Adakitic 质花岗岩浆<sup>[39~41]</sup>。由于密度之间的差异,Adakitic 质岩浆被抽取上侵就位于中、上地壳,含石榴石的残留体发生麻粒岩—榴辉岩相变质作用。其次,在灰池子北部官坡地区峡河群中发现了高压—超高压榴辉岩,其源岩多为玄武质岩石。虽然无证据说明榴辉岩与灰池子花岗岩之间存在成因联系,但是榴辉岩主变质年龄与灰池子花岗岩形成年龄基本一致<sup>[23~25]</sup>,这至少说明晚加里东—早海西期北秦岭地区地壳厚度较大、下地壳玄武质岩石发生过部分熔融事件。榴辉岩为下地壳玄武质岩石的残留体的事实,间接说明灰池子花岗岩为下地壳玄武质岩石部分熔融形成的可能性。第三,晚加里东—早海西期北秦岭杂岩地体南侧(商丹断裂带)裂隙海盆向北<sup>[22,61,62]</sup>与北侧(朱夏断裂带)二郎坪裂隙海盆

向南发生陆内双向俯冲<sup>[22]</sup>,造成北秦岭地体大规模的斜向抬升<sup>[20]</sup>。在这样陆内俯冲碰撞背景下,都可能引起下地壳加厚和玄武质岩浆的底侵作用,诱发下地壳玄武质岩发生部分熔融形成花岗质岩浆,这些花岗质岩浆经多次侵位形成了灰池子复式岩体<sup>[3,19~21]</sup>。因此,晚加里东—早海西期北秦岭地体两侧裂隙海盆陆内双向俯冲所引起下地壳加厚和玄武质岩浆的底侵作用可以为下地壳玄武质岩石的大规模熔融、岩浆形成与构造成位提供足够持续的热能。结合区域上同时代具有相似地球化学特征花岗岩(如黄伯岔花岗岩体、石门花岗岩体、王家庄花岗岩体),本文认为晚加里东—早海西期北秦岭地区下地壳玄武质岩石的部分熔融应当是区域性的岩浆热事件。

因此,本文认为灰池子花岗岩既不是就地熔融或交代形成的混合花岗岩,也不是由亏损地幔与地壳岩浆混合形成壳幔型花岗岩,而是由新元古宙从地幔分异、底侵于下地壳的玄武质岩石部分熔融形成的 Adakitic 质岩。

## 5 结论

(1) 灰池子复式岩体花岗岩具有高 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, 低 TiO<sub>2</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O 的特征。花岗岩轻稀土元素富集, Eu 为负—弱正异常,微量元素  $w(Y) < 18 \times 10^{-6}$ ,  $w(Yb) < 1.90 \times 10^{-6}$ , Sr 质量分数为  $310 \times 10^{-6} \sim 775 \times 10^{-6}$ ,  $w(Sr)/w(Y)$  为 47.87~114.36。大离子亲石元素(Rb, Ba, Th, K, Sr 等)相对富集,高场强元素(Nb, Ta, Ti, Zr)相对亏损。同位素组成比较均匀,  $0.51231 < w(^{143}\text{Nd})/w(^{144}\text{Nd}) < 0.51238$ ,  $0.70783 < w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr}) < 0.70880$ ,  $0.95 \text{ Ga} < t_{\text{DM}} < 1.09 \text{ Ga}$ ,  $-0.81 < \epsilon(\text{Nd}, 437 \text{ Ma}) < 0.93$ , 且  $18 < \epsilon(\text{Sr}, 437 \text{ Ma}) < 32$ , 这些特征与 Adakitic 质岩基本相似,其源岩为地幔分异、底侵于下地壳的玄武质岩石。(2) 灰池子复式岩体花岗岩的源岩形成与新元古代北秦岭发生的古洋壳俯冲有关,这一事件诱发了北秦岭深部地幔的部分熔融、玄武质岩浆的底侵和地壳增生,侵位于下地壳的玄武质岩石为灰池子花岗岩的形成奠定了物质基础。(3) 晚加里东—早海西期北秦岭杂岩地体南北裂隙海盆发生了陆内双向俯冲造成北秦岭地体大规模的斜向抬升,诱发下地壳深部新元古代玄武质岩石发生部分熔融形成 Adakitic 质岩浆,这些岩浆经多次上侵形

成了灰池子复式花岗岩体。这一时期北秦岭杂岩体南北两侧裂隙海盆的陆内双向俯冲所引起下地壳加厚和玄武质岩浆的底侵作用为下地壳玄武质岩石的大规模熔融、岩浆形成与构造成位提供了热动力条件。

#### 参考文献:

- [1] 严阵,尚瑞钧. 陕西花岗岩[M]. 西安:西安交通大学出版社,1985. 68—71, 293—302.
- [2] 尚瑞钧,严阵. 秦巴花岗岩[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1988. 69—137.
- [3] 李伍平,王涛,曹惠锋. 东秦岭灰池子复式杂岩体岩石谱系单位划分及其地质意义[J]. 中国区域地质, 1995, (2): 136—141.
- [4] 胡受奚,郭继春,卢欣祥. 东秦岭加里东褶皱带原地—准原地改造型花岗岩特征[J]. 岩石学报,1989, (1): 49—58.
- [5] 张正伟. 东秦岭灰池子花岗岩基岩石地球化学特征及其成因[J]. 岩石学报,1991, (3): 88—94.
- [6] 郭继春,胡受奚,卢欣祥,等. 东秦岭灰池子花岗岩成岩机理的研究[J]. 地球化学,1994, 23(增刊): 154—161.
- [7] 李伍平,王涛. 北秦岭灰池子复式杂岩体的地质特征及其成因[J]. 矿物岩石,1995, (4): 8—15.
- [8] 李伍平,王涛,王晓霞. 北秦岭灰池子复式岩体单颗粒锆石年龄及其地质意义[J]. 中国区域地质, 2000, 19(2): 172—174.
- [9] 黄萱,吴利仁. 陕西地区岩浆岩 Nd、Sr 同位素特征及其与大地构造发展的联系[J]. 岩石学报,1990, (2): 1—8.
- [10] 骆庭川,张宏飞,张本仁. 北秦岭丹凤—西峡地区古岛弧花岗岩类成分极性及其原因探讨[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1993, 18(1): 67—72.
- [11] 张宏飞,骆庭川,张本仁. 北秦岭灰池子花岗岩基成岩物质来源探讨[J]. 矿物岩石,1994, (1): 67—73.
- [12] 张宏飞,赵志丹,骆庭川,等. 从岩石 Sm—Nd 同位素模式年龄论北秦岭酸性组分增生和酸性组分深部性质[J]. 岩石学报,1995, 11(2): 160—170.
- [13] 张宏飞,张本仁,赵志丹,等. 东秦岭造山带花岗岩类长石铅同位素组成及其构造意义[J]. 地质学报,1997, 71(2): 142—149.
- [14] 陈岳龙,张本仁,帕拉提. 阿布都卡得尔. 北秦岭丹凤地区早古生代花岗岩的 Pb、Sr、Nd 同位素地球化学特征[J]. 地质科学,1995, 30(3): 247—258.
- [15] 陈岳龙,杨忠芳. 北秦岭花岗岩类形成的 Sm—Nd 同位素分馏与混合作用[J]. 地球学报,1997, 18(增刊): 45—48.
- [16] 李伍平,王涛. 北秦岭灰池子复式岩体的面理特征及其地质意义[J]. 西北地质,1996, 17(2): 6—9.
- [17] 王晓霞,王涛,李伍平. 北秦岭灰池子花岗岩体叶理的形成初探[J]. 地质构造学刊,1996, (1): 18—22.
- [18] 王涛,李伍平. 中华人民共和国 1:5 万狮子坪幅区域地质图及说明书[M]. [s. l.]: [s. n.], 1996.
- [19] 王涛,王晓霞,李伍平. 试论花岗岩体的复合岩体机制及其岩体空间问题[J]. 地质论评,1999, 45(2): 142—150.
- [20] 王涛,张国伟,王晓霞,等. 花岗岩体生长方式及构造运动学、动力学意义——以东秦岭造山带核部花岗岩体为例[J]. 地质科学,1999, 34(3): 326—335.
- [21] Wang T, Wang X X, Li W P. Evaluation of multiple emplacement mechanisms: the Huichizi pluton, Qinling orogenic belt, Central China [J]. J Struct Geol, 2000, 22: 505—518.
- [22] 张维吉,王全庆,胡能高,等. 东秦岭地质走廊研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1996. 5—41.
- [23] 胡能高,杨家喜,王涛,等. 东秦岭秦岭群中榴辉岩的发现及其地质意义[J]. 西安地质学院学报,1994, 16(2): 105—106.
- [24] 胡能高,杨家喜,赵东林. 北秦岭榴辉岩 Sm—Nd 同位素年龄[J]. 矿物学报,1996, 16(4): 349—352.
- [25] 胡能高,徐伯青,赵东林. 北秦岭造山带榴辉岩及相关岩石的地球化学特征[J]. 西安地质学院学报,1997, 19(1): 7—13.
- [26] 李曙光,陈移之,张国伟. 一个距今 10 亿年侵位的阿尔卑斯型橄榄岩体:北秦岭晚元古代板块构造体制的证据[J]. 地质论评,1991, 37(3): 235—242.
- [27] 董云鹏,周鼎武,张国伟. 东秦岭松树沟超镁铁岩侵位机制及其构造演化[J]. 地质科学,1997, 32(2): 173—180.
- [28] 周鼎武,董云鹏,刘良,等. 松树沟元古宙蛇绿岩 Nd、Sr、Pb 同位素地球化学特征[J]. 地质科学,1998, 33(1): 31—38.
- [29] 张国伟,张宗清,董云鹏. 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[J]. 岩石学报,1995, 11(2): 101—114.
- [30] 周鼎武,张成立,韩松,等. 东秦岭早古生代两条不同构造—岩浆杂岩带的形成构造环境[J]. 岩石学报,1995, 11(2): 115—126.
- [31] 张宗清,伍家善,叶笑江. 阜平群下部太古代变质岩石的 REE、Rb—Sr 和 Sm—Nd 年龄及其意义[J]. 地球化学,1991, 2: 119—126.
- [32] 王晓霞,王涛,李伍平. 秦岭杂岩中花岗质片麻岩的地球化学特征及成因[J]. 矿物岩石,1997, (3): 76—82.
- [33] 张宏飞,骆庭川,张本仁. 北秦岭漂池岩体的源区特征



- 及其形成的构造环境[J]. 地质论评, 1996, 42(3): 209—214.
- [34] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. In: Saundern A D, Norry M J, eds. Magmatism in the ocean basins [C]. Geological Society Special Publication, 1989, (42): 313—345.
- [35] 欧阳建平, 张本仁, 韩吟文, 等. 北秦岭基性火山岩地球化学特征与上地幔岩浆源区性质[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1993, 18(1): 73—83.
- [36] 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代学研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 11—56.
- [37] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990, 347: 662—665.
- [38] Defant M J, Drummond M S. Mount St Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc [J]. Geology, 1993, 21: 547—550.
- [39] Atherton M P, Petord N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. Nature, 1993, 362: 144—146.
- [40] Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholith [J]. J Petrology, 1996, 37: 1491—1521.
- [41] Muir R J, Weaver S D, Bradshaw J D, et al. Geochemistry of the Cretaceous separation point batholith, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere [J]. J Geol Soc Lond, 1995, 152: 689—701.
- [42] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. J Petrol, 1984, 25: 956—983.
- [43] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [A]. In: Coward M P, Reis A C, eds. Collision tectonics [C]. [s. l.]: Spec Publ Geol Soc, 1986. 67—81.
- [44] Kay S M, Ramous V A, Marquez M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks of slab melting prior to ridge trench collision in southern South American [J]. J Geol, 1993, 101: 703—714.
- [45] Morris P S. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwest Japan [J]. Geology, 1995, 23: 395—398.
- [46] Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Austral volcanic zone [J]. Contrib Miner Petrol, 1996, 123: 263—281.
- [47] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids [J]. Lithos, 1999, 46: 411—429.
- [48] Xu J F, Wang Q, Yu X Y. Geochemistry of high-Mg andesites and Adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qinling mountains, Central China: evidence of partial melting of the subducted paleo-Tethyan crust [J]. Geochemical Journal, 2000, 34: 359—377.
- [49] 吴福元, 江博明, 林强. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义[J]. 科学通报, 1997, 42(20): 2188—2192.
- [50] Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust [J]. Earth Planet Sci Lett, 1994, 121: 227—244.
- [51] Wang Q, Xu J, Wang J, et al. The recognition of Adakite-type gneisses in the north Dabie mountains and its implication to ultrahigh pressure metamorphic geology [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(21): 1927—1933.
- [52] Hirose K. Melting experiments on lherzolite LKB-1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melt [J]. Geology, 1997, 25(1): 42—44.
- [53] 张国伟, 孟庆仁, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造[J]. 中国科学(B辑), 1995, 25(9): 994—1003.
- [54] 张宗清, 唐索寒, 宋彪, 等. 秦岭造山带晋宁期强烈地质事件及其构造背景[J]. 地球学报, 1997, 18(增刊): 43—45.
- [55] 王涛, 张国伟, 王晓霞, 等. 一种可能的多陆块、小洋盆、弱俯冲的动力学特征及其花岗岩演化特点——以秦岭造山带核部花岗岩为例[J]. 南京大学学报(自然科学), 1999, 35(6): 660—667.
- [56] 姜常义, 苏生瑞, 赵太平, 等. 北秦岭侵入带与晋宁运动[M]. 北京: 地质出版社, 1998. 22—23, 62—76.
- [57] Rapp R P, Wastson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8—32 kbar: implication for continental growth and crust-mantle recycling [J]. J Petrol, 1995, 36: 891—931.
- [58] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J]. Chemical Geology, 1999, 160: 335—356.
- [59] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 GPa and 2.0 GPa: implication for the origin of Adakites [J]. Contrib Mineral

Petrol, 1994, 117: 394—409.

[60] Guffanti M, Clynne M A, Muffler L J P. Thermal and mass implications of magmatic evolution in the Lassen volcanic region, California and minimum constraints on basalt influx to the lower crust [J]. *J of Geophysical Research*, 1996, 101: 3001—3013.

[61] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. *中国科学(D)*, 1997, 26(3): 193—200.

[62] 张本仁. 秦巴区域地球化学文集[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990. 67—84.

## SOURCE OF HUICHIZI GRANITOID COMPLEX PLUTON IN NORTHERN QINLING, CENTRAL CHINA: CONSTRAINED IN ELEMENT AND ISOTOPIC GEOCHEMISTRY

Li Wuping<sup>1,2</sup>, Wang Tao<sup>3</sup>, Wang Xiaoxia<sup>2</sup>

(1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;*  
2. *Department of Earth Science, Chang'an University, Xi'an 710054, China;* 3. *Department of Geology, Peiking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** Huichizi complex pluton, the largest granitoid pluton in the core of northern Qinling orogenic belt, is composed of three sequences. These granitoid rocks have higher  $\text{SiO}_2$  (66.86%—73.48%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.44%—16.32%), abundant  $\text{Na}_2\text{O}$  (4.17%—4.78%), and lower  $\text{TiO}_2$  (<0.74%),  $\text{MgO}$  (<1.18%) and  $\text{K}_2\text{O}$  (<3.33%) mass fraction, and more enriched in LREE ( $27.45 < w(\text{La})_N / w(\text{Yb})_N < 72.99$ ), and distinct negative and weak positive Eu anomaly. In these granitoid rocks, Y, Yb, Sr mass fractions and  $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  ratio of trace elements vary respectively from  $3.70 \times 10^{-6}$  to  $9.77 \times 10^{-6}$  (<  $18 \times 10^{-6}$ ),  $0.30 \times 10^{-6}$  to  $1.14 \times 10^{-6}$  (<  $1.90 \times 10^{-6}$ ),  $310 \times 10^{-6}$  to  $775 \times 10^{-6}$  and 47.87 to 114.36. While those of Huichizi complex display multi-element patterns with large positive ion lithophile elements (Rb, Ba, Th and Sr) anomalies and high negative field strong elements (Nb, Ta, Ti and Zr) anomalies and indicate the geochemical characteristics of calc-alkalic granites and volcanic arc granites. All the granitoid rocks exhibit a similar range of Nd and Sr isotopic ratios:  $0.51231 < w(^{143}\text{Nd})/w(^{144}\text{Nd}) < 0.51238$ ,  $0.70783 < w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr}) < 0.70880$ ,  $0.95 \text{ Ga} < t_{\text{DM}}$  (depleted mantle model age) < 1.09 Ga,  $-0.81 < \epsilon(\text{Nd}, 437 \text{ Ma}) < 0.93$  and  $18 < \epsilon(\text{Sr}, 437 \text{ Ma}) < 32$ , and show the source of Huichizi complex from basic rocks. These characteristics are similar to those of the Adakitic rocks. The authors think that the granitoid rocks of Huichizi complex may have been the result of the subduction of the southern intracontinent rift along the Danfeng-Shangnan fault by a north-dipping of the northern intracontinent rift (Erlangping rift) and that along the Zhuyangguan-Xiaguanying fault by a south-dipping under the Northern Qinling block during late Caledonian—early Hercynian period. This subduction of the intracontinent rifts leads to the partial melting of Late Proterozoic underplating basic rocks of lower crust and the formation of the granitoid rocks of Huichizi complex.

**Key words:** Huichizi complex pluton; Adakitic rocks; lower crust; partial melting; late Caledonian—early Hercynian; northern Qinling.