

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

裴先治¹ 王 涛² 丁仁平^{1,3} 李 勇¹ 胡 波¹

(1. 长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:东秦岭商丹构造带北侧的商南花岗岩体和吊庄花岗岩体属于钙碱性系列, 具有岛弧花岗岩特征。这些岩石富 Na₂O (3.54%~5.52%)、贫 K₂O (0.75%~3.46%)、Na₂O/ K₂O 比值为 1.09~6.16, SiO₂ 含量 >56% (61.84%~74.57%), Al₂O₃ 含量变化于 13.41%~19.01%, 多数 ≥15%, MgO 含量均小于 3% (0.65%~2.41%), Mg[#] 为 43.87~66.12, 低 Y (<18×10⁻⁶, 为 1.90×10⁻⁶~18.4×10⁻⁶) 和 Yb (<1.9×10⁻⁶ 为 0.27×10⁻⁶~2.27×10⁻⁶), Sr 含量高 (350×10⁻⁶~830×10⁻⁶), 多数大于 400×10⁻⁶, Sr/Y 比值在 25.29~216.71 之间, 大于 20~40; LREE 富集, HREE 亏损, 多数 La/Yb 比值 >20 (47.60~110.93), (La/Yb)_N >20 (32.09~99.13), 不显 Eu 异常或有弱的 Eu 正异常, 大离子亲石元素 (Rb、Ba、Th、Sr) 相对富集, 高场强元素 (如 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti) 相对亏损。同位素组成表明, 花岗岩体具有相对低的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值 (0.512127~0.512134), 与商南松树沟蛇绿岩的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值 (0.512651~0.512917) 比较接近, ε_{Nd}(t) 为正值 (+1.23~+2.51), 暗示源岩以 N-MORB 为主。这些地球化学特征与洋壳俯冲 MORB 的部分熔融形成的埃达克质岩相似, 表明这些晋宁期的花岗岩类可能属于埃达克质岩。研究表明, 商丹地区埃达克质花岗岩类与新元古代沿商丹带一线曾发育有一个以松树沟蛇绿岩和黑河玄武岩为代表的古洋盆 (古秦岭洋) 向北发生俯冲消减作用有关, 造成古洋壳俯冲板片 MORB 岩石部分熔融而形成。

关键词:埃达克质岩; 花岗岩类; 地球化学; 洋壳俯冲; 古岛弧; 新元古代; 商丹地区; 东秦岭

中图分类号: P584, P581 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2003)04-0372-10

埃达克质岩是近年来受到广泛关注的一种新的火成岩^[1], 是产于现代岛弧中的具有独特地球化学组成的中酸性火成岩, 是早期俯冲消减的大洋板块中 MORB 岩石部分熔融及其演化的产物^[1-5]。研究埃达克质岩石对于探讨弧下岩浆过程、壳幔相互作用、大陆地壳的生长与演化以及一些造山带的古构造演化等均具有重要科学意义。近来, 国内一些学者对埃达克质岩的分布、地球化学特征、成因模式和实验岩石学资料进行了研究评述^[6-13], 并召开学术研讨会, 有力地推动了国内地学界有关埃达克质岩石或高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的研究^[7-23]。与绝大多数来自地幔楔的火山弧火成岩不同, Defant 等^[1]提出的埃达克质岩是指形成于火山弧环境、由俯冲的年轻的洋壳板片 (≤25 Ma) 熔融所形成的具有独特地球化学特征的一类中酸性火山岩或侵入岩。根据有关研究,

埃达克质岩的典型地球化学特征是: 高铝 (SiO₂ ≥56%, Al₂O₃ ≥15%), 富钠 (Na₂O/K₂O ≥1), MgO <3%; 高锶 (大多数 Sr >400×10⁻⁶), 亏损 Y 和 HREE (Y ≤18×10⁻⁶, Yb ≤1.9×10⁻⁶), REE 强烈分异, La/Yb 和 Sr/Y 比值很高 (La/Yb >20, Sr/Y >20~40); 高场强元素 (HFSE) 亏损, Eu 和 Sr 一般呈正异常或没有异常; 主要矿物组合为: 斜长石+角闪石±黑云母, 副矿物为磷灰石、锆石、榍石及钛磁铁矿等^[1-3, 24-25]。埃达克质岩主要分布于新生代环太平洋周边岛弧地区, 也见于中生代的花岗岩岩基以及一些古老的造山带中 (如埃塞俄比亚西部 Birbir 新元古代岩浆弧)^[26]。

东秦岭商丹构造带北侧的北秦岭构造带分布有大量不同时代和成因类型的侵入岩类, 其中以中酸性花岗岩类为主, 形成于秦岭造山带不同构造演化阶段^[27]。近年来通过区域

收稿日期: 2002-12-10; 改回日期: 2003-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40072065, 49732080)、国土资源部“十五”重点科技项目 (20010201)、国土资源部地质大调查项目 (200013000154) 资助。

作者简介: 裴先治, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事区域地质、构造地质学研究; E-mail: peixzh@sina.com.cn。

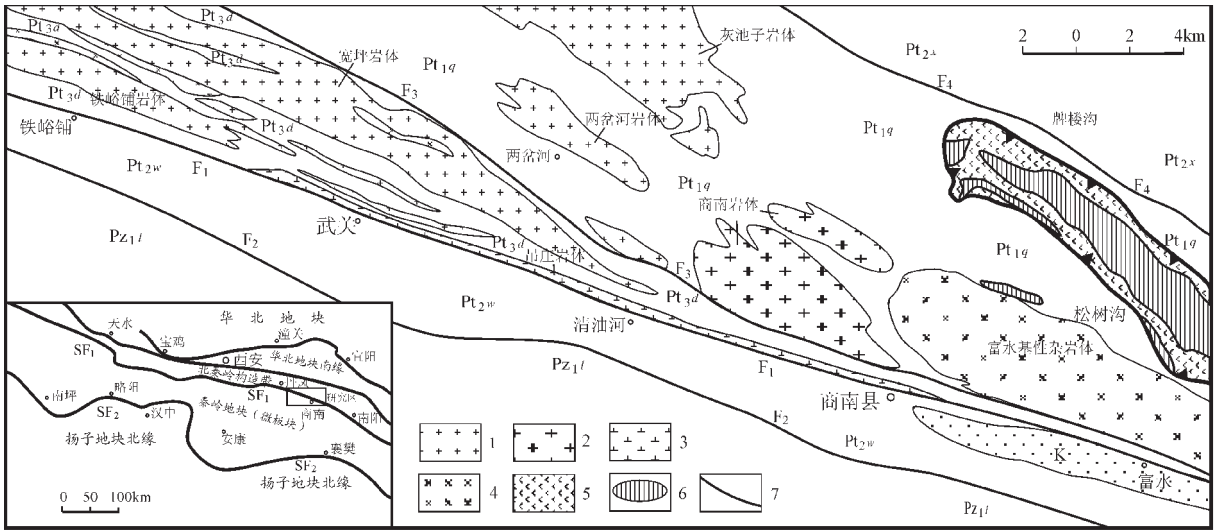


图 1 东秦岭商丹地区中酸性侵入岩地质简图

K—白垩系;Pz₁l—下古生界刘岭岩群;Pt₃d—新元古界丹凤岩群;Pt₂w—中元古界武关岩群;

Pt₂x—中元古界峡河岩群;Pt₁q—古元古界秦岭岩群;

1—晚加里东—早海西期花岗岩;2—晋宁期花岗岩;3—晋宁期石英闪长岩;4—基性侵入杂岩;5—松树沟斜长角闪岩;6—超镁铁岩;7—主要边界断裂;SF₁—商丹古缝合带;SF₂—勉略古缝合带;F₁—商丹断裂;F₂—勉鱼嘴韧性剪切变形带;F₃—粮食沟断裂;F₄—牌楼沟韧性剪切变形带

Fig. 1 Geological sketch map of intermediate-acid intrusions in the Shangnan-Danfeng area, East Qinling

K—Cretaceous;Pz₁l— Lower Paleozoic Liuling Group-complex;Pt₃d— Neoproterozoic Dangfeng Group-complex;Pt₂w— Mesoproterozoic Wuguan Group-complex;Pt₂x— Mesoproterozoic Xiahe Group-complex;Pt₁q— Paleoproterozoic Qinling Group-complex;1—Late Caledonian-Early Hercynian granitoid;2— Jinningian granitoid;3— Jinningian quartz diorite;4—basic intrusive complex;5—Songshugou amphibolite;6—ultramafic rocks;

7—main boundary fault;SF₁—Shangdan paleosuture zone;SF₂—Mianlue paleosuture zone;F₁—Shangdan fault;F₂—Mianyuzui ductile shear zone;

F₃—Liangshigou fault;F₄—Pailougou ductile shear zone

地质调查和专题研究,已在东秦岭商丹地区发现了一些新元古代花岗岩类^[28-32],这对探讨秦岭造山带晋宁期的构造体制以及新元古代 Rodinia 超大陆的聚合与裂解过程等具有重要意义。根据这些资料的研究发现,在商丹带北侧发育有晋宁期具有埃达克质岩成分特征的花岗岩类,其中以商南岩体和吊庄岩体中的岩石最为典型。笔者根据商南岩体和吊庄岩体的岩石地球化学资料,探讨该类花岗岩的成因,并揭示其大陆动力学意义。

1 地质背景和岩体地质

已有的研究表明,秦岭造山带可以两条板块古缝合带(商丹和勉略古缝合带)为界划分为 3 个部分,即北秦岭造山带、秦岭微板块、扬子地块北缘^[7]。然而在元古代和早古生代期间,在勉略洋盆未出现之前,可以划分为北秦岭、南秦岭和扬子地块北缘。位于商丹带北侧的北秦岭广泛发育不同时代的花岗岩类,形成时代从新元古代、早古生代、晚古生代到中生代。

本文研究区域是位于东秦岭商丹构造带北侧的北秦岭造山带,以出露秦岭古老的核部杂岩为特征。北秦岭主要由古元古代秦岭岩群中深变质杂岩和中元古代峡河岩群含高

压—超高压变质岩的构造拼合体以及花岗岩类侵入体组成,在商南地区上覆有中元古代—新元古代松树沟蛇绿岩构造岩片。在商丹带中发育有呈 NWW 向展布的新元古代丹凤岩群变质沉积—火山岩系和大量晚加里东—早海西期线状花岗岩类,同时韧性剪切变形带和糜棱岩类构造岩非常发育。商南岩体和吊庄岩体就位于商丹带北侧,后者由于紧邻商丹带发生变形而呈 NWW 向线状展布(图 1)。

商南岩体位于商南县城西北,包括商南主岩体及北侧的小岩体,侵入于秦岭岩群中,岩体总面积 26.5 km²,与围岩之间有清楚的侵入接触界面,围岩侧未见热接触变质。岩体普遍发育片麻理,边部强烈,其产状大体与岩体边界协调。根据花岗岩的单颗粒锆石 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄 (889±22)Ma^[28-31],表明岩体是新元古代的产物。该岩体主要岩石类型为花岗闪长岩,其次为英云闪长岩、二长花岗岩,灰白—浅灰—灰色,主要组成矿物为斜长石、石英、少量黑云母、钾长石,副矿物包括磷灰石、锆石、榍石等,中细粒—中粒—中粗粒等粒花岗岩结构,片麻状构造。

吊庄岩体紧靠商丹断裂北侧呈狭长带状展布,分布于商南蒲沟、清油河至丹凤吊庄、武关等地,长 25 km,宽 50~

300 m,多已受韧性剪切变形作用而普遍糜棱岩化。主体岩性为浅灰绿色细—中细粒石英闪长岩, 侵位于丹凤群中,但侵位关系已遭受构造改造。由于其与侵入于丹凤群中的古生代花岗岩类在岩性和变形方面差异较大,而且改造程度比相邻的古生代岩体更强,故推测其应为晋宁期花岗岩类^[29-31]。该岩体主要组成矿物为斜长石(50%~70%)及暗色矿物(20%~30%)。斜长石多发生成分转变,使岩石中出现了绿帘石、斜黧帘石、绿泥石、绢云母等绿片岩相变质矿物,少数变形较弱岩石中暗色矿物以角闪石、黑云母为主。副矿物有磷灰石、锆石、榍石、金属矿物等。

2 花岗岩类的地球化学特征

商南岩体的7个样品和吊庄岩体的4个样品的主元素、微量元素和稀土元素的成分见表1。

商南岩体 SiO₂ 含量>56%(62.53%~74.57%), 有4个样品的 Al₂O₃ ≥15%(15.23%~16.86%),3个样品 Al₂O₃ <15%(13.41%~14.93%),但接近15%;里特曼指数 δ=1.03~1.72,富钠(Na₂O> K₂O, Na₂O/ K₂O=1.09~3.31),碱度率 AR=1.92~2.96,

A/CNK=1.08~1.17,均大于1,属钙碱性系列、过铝质岩石^[28-29]。MgO 含量均<3%(0.65%~0.73%),Mg[#] 为43.87~61.48,多数大于47。在微量元素特征上,Sr 含量高,有2个样品接近 400×10⁻⁶外,其余均大于 400×10⁻⁶(403×10⁻⁶~830×10⁻⁶);Sr/Y 比值在 70.16~216.71 之间,明显大于 40;Y<18×10⁻⁶(1.90×10⁻⁶~6.95×10⁻⁶),Yb<1.9×10⁻⁶ (0.27×10⁻⁶~0.70×10⁻⁶),显示出低的HREE 含量,La/Yb 比值>20(47.60~110.93), (La/Yb)_N>20(32.09~99.13)。上述成分特点与典型埃达克质岩相同,在Sr/Y—Y 和(La/Yb)_N—Yb_N 图解上主要落入埃达克质岩区域,并有别于典型的岛弧钙碱性中酸性火成岩(图2)。在N—MORB 标准化不相容微量元素配分图解上总体显示出 Nb 的明显负异常和 Sr 的正异常(图3),在稀土元素球粒陨石标准化图解上显示出强烈的 REE 分异(图4),LREE 富集,HREE 强烈亏损,具有埃达克质岩成分特征的明显低 HREE 含量,δEu=0.96~1.29,总体上不显 Eu 异常或有弱的 Eu 正异常。

吊庄岩体的石英闪长岩 SiO₂ 含量>56%, 平均为 62.78%, Al₂O₃ ≥15%(15.43%~16.59%); 里特曼指数 δ=1.07~3.40, 富钠(Na₂O> K₂O, Na₂O/ K₂O=1.27~6.16), 碱度率 AR=1.58~2.21,

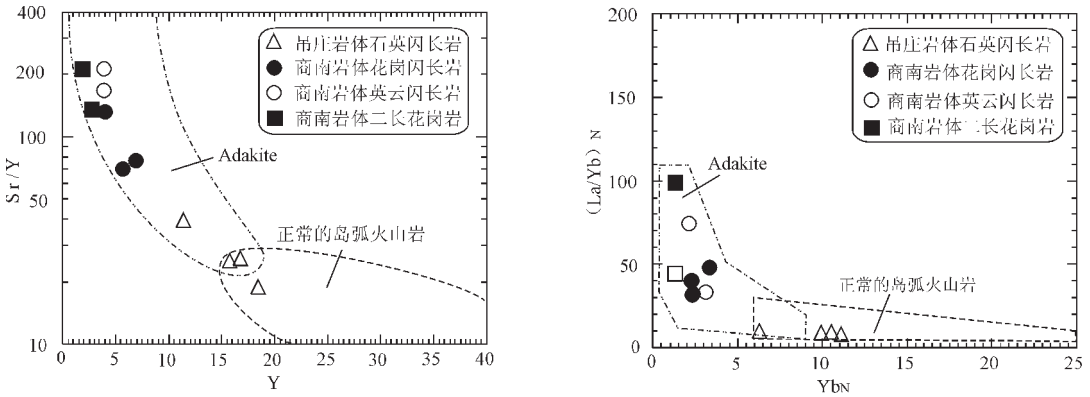


图2 商丹地区花岗岩的 Sr/Y—Y, (La/Yb)_N—Yb_N 图解(据文献[1, 2, 36]和文献[3, 25])

Fig. 2 Diagrams of Sr/Y—Y and (La/Yb)_N—Yb_N of granites in the Shangdan area (from references [1, 2, 36] and [3, 24])

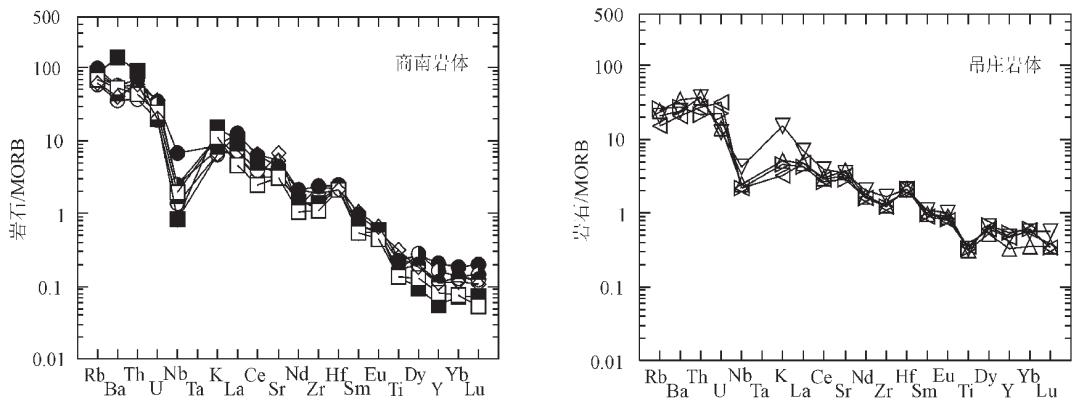


图3 商丹地区花岗岩的微量元素分布

Fig. 3 Distribution diagram of trace elements of granites in the Shangdan area

表 1 东秦岭商丹地区新元古代花岗岩类的主元素氧化物(%)、微量元素和稀土元素(10⁻⁶)分析及有关参数

Table 1 Whole-rock analyses of major (%), trace and rare-earth elements(10⁻⁶)

of Neoproterozoic granites in the Shangdan area of the East Qinling

岩体名称 样号 岩石类型	吊庄岩体							商南岩体			
	D3805/1 石英 闪长岩	D3901/1 石英 闪长岩	D1435/4 石英 闪长岩	D1435/5 石英 闪长岩	S3911/9 英云 闪长岩	S3911/4 花岗 闪长岩	S3911/12 花岗 闪长岩	S3912/7 花岗 闪长岩	S3911/1 二长 花岗岩	S3913/7 二长 花岗岩	S3912/10 英云 闪长岩
SiO ₂	62.55	63.00	63.73	61.84	62.53	72.43	71.10	71.64	74.57	72.98	67.97
TiO ₂	0.53	0.49	0.48	0.50	0.48	0.34	0.25	0.26	0.20	0.20	0.38
Al ₂ O ₃	15.43	16.59	16.01	16.37	19.01	14.22	15.23	15.39	13.41	14.92	16.86
Fe ₂ O ₃	2.93	3.32	2.90	2.51	0.78	0.54	0.33	0.40	0.83	0.22	0.87
FeO	2.20	2.28	2.36	2.20	2.63	1.94	1.55	1.35	0.96	1.24	2.10
MnO	0.12	0.11	0.15	0.13	0.073	0.06	0.08	0.073	0.05	0.13	0.073
MgO	2.41	2.12	2.07	1.93	1.65	1.04	0.68	1.04	0.86	0.65	1.73
CaO	5.52	4.95	5.04	4.90	4.10	2.20	2.25	2.50	1.20	1.60	2.50
Na ₂ O	4.62	4.12	3.54	4.48	5.55	4.36	4.73	4.59	3.77	4.65	5.03
K ₂ O	0.75	1.07	1.18	3.53	1.74	1.94	2.58	1.52	3.46	2.62	1.52
P ₂ O ₅	0.12	0.17	0.13	0.16	0.21	0.14	0.098	0.15	0.13	0.10	0.21
H ₂ O	1.36	1.80	1.32	0.16	0.60	0.46	0.43	0.64	0.42	0.42	0.58
CO ₂	0.48	0.26	0.26	0.12	0.27	1.13	0.55	0.41	0.08	0.07	0.05
LOI			1.47	0.84							
Tatal	99.02	100.28	99.32	99.53	99.62	99.80	99.86	99.96	99.94	99.8	99.87
Na ₂ O/K ₂ O	6.16	3.85	3.00	1.27	3.19	2.25	1.83	3.02	1.09	1.77	3.31
Mg [#]	66.12	62.36	60.98	60.98	52.78	48.85	43.87	57.85	61.48	48.29	59.48
Sr	397	350	454	435	830	533	395	522	403	375	650
Rb	17	29	27	23	97	109	84	67	93	76	69
Ba	298	394	487	345	768	821	818	512	1970	750	576
Th	5	4	7	7	11	13	9	7	17	8	11
Ta	0.78	1.04	1.30	1.20	1.24	1.80	0.72	1.12	0.88	1.12	0.92
Nb	8	8	9	15	9	24	9	5	3	7	3
Zr	110	112	114	150	215	213	108	123	125	97	168
Hf	6	6	6	6	6	7	7	7	6	6	6
Sc	10.8	11.0	9.6	13.0	4.8	2.6	5.2	2.5	2.3	2.5	3.4
Cr	10	97	17	18	23	7	52	9	11	6	6
Co	11	12	12	11	7	5	5	4	3	3	6
Ni	3	4	4	8	9	3	3	3	6	4	5
V	96	96	74	72	81	52	14	52	44	47	66
Cs	7	8	8	8	8	8	10	9	9	9	8
Ga	17.5	16.0	15.0	15.5	15.5	16.7	21.0	14.0	14.0	15.5	19
U	2.39	1.69	1.05	0.94	2.71	2.57	2.43	1.42	1.51	1.83	1.51
La	18.7	16.5	19.2	27.5	25.6	50.3	23.8	28.9	39.7	18.4	47.7
Ce	34.2	31.8	35.7	46.7	36.6	76.3	36.7	47.4	60.3	30.0	78.4
Pr	3.93	3.59	3.36	5.13	1.06	7.63	3.97	5.21	5.62	3.39	8.06
Nd	17.8	17.5	18.4	22.0	13.4	23.1	16.4	15.2	15.7	11.6	23.3
Sm	3.32	3.46	3.54	3.96	2.01	3.53	2.57	2.63	2.38	1.94	3.80
Eu	1.07	1.11	1.18	1.31	0.75	0.73	0.68	0.71	0.76	0.58	0.85
Gd	2.83	3.02	3.12	3.69	1.44	1.89	1.60	1.56	1.09	1.35	1.89
Tb	0.53	0.56	0.46	0.65	0.26	0.36	0.27	0.28	0.19	0.28	0.34
Dy	3.73	4.07	3.18	3.94	1.08	1.65	1.68	1.17	0.57	0.78	1.12
Ho	0.83	0.91	0.61	0.87	0.22	0.31	0.23	0.21	0.12	0.13	0.19
Er	2.45	2.76	1.59	2.56	0.55	0.76	0.64	0.53	0.29	0.30	0.46
Tm	0.38	0.40	0.22	0.35	0.08	0.11	0.088	0.08	0.04	0.04	0.07
Yb	2.21	2.27	1.31	2.10	0.51	0.70	0.50	0.48	0.27	0.28	0.43
Lu	0.19	0.19	0.20	0.32	0.07	0.11	0.081	0.07	0.04	0.03	0.06
Y	15.7	18.4	11.4	16.8	3.83	6.95	5.63	3.98	1.90	2.77	3.87
LREE	79.02	73.96	81.38	106.6	79.42	161.59	84.12	100.05	124.46	65.91	162.11
HREE	13.15	14.18	10.69	14.48	4.21	5.89	5.089	4.38	2.61	3.19	4.56
ΣREE	92.17	88.14	92.07	121.08	83.63	167.48	89.209	104.43	127.07	69.1	166.67
Eu	1.04	1.03	1.06	1.03	1.29	0.78	0.96	0.99	1.26	1.04	0.86
La/Yb	8.46	7.27	14.66	13.10	50.20	71.86	47.60	60.21	147.04	65.71	110.93
Sr/Y	25.29	19.02	39.82	25.89	216.71	76.69	70.16	131.16	212.11	135.38	167.96
Zr/Sm	33.13	32.37	32.20	37.88	106.97	60.34	42.02	46.77	52.52	50.00	44.21
Y/Yb	7.10	8.11	8.70	8.00	7.51	9.93	11.26	8.29	7.04	9.89	9.00
(La/Yb) _N	5.70	4.90	9.88	8.83	33.84	48.45	32.09	40.59	99.13	44.30	74.79

注:主元素由西安综合岩矿测试中心分析,微量元素和稀土元素由宜昌地质矿产研究所岩矿测试中心分析;

$$Mg^{\#} = 100[MgO / (MgO + FeO)]。$$

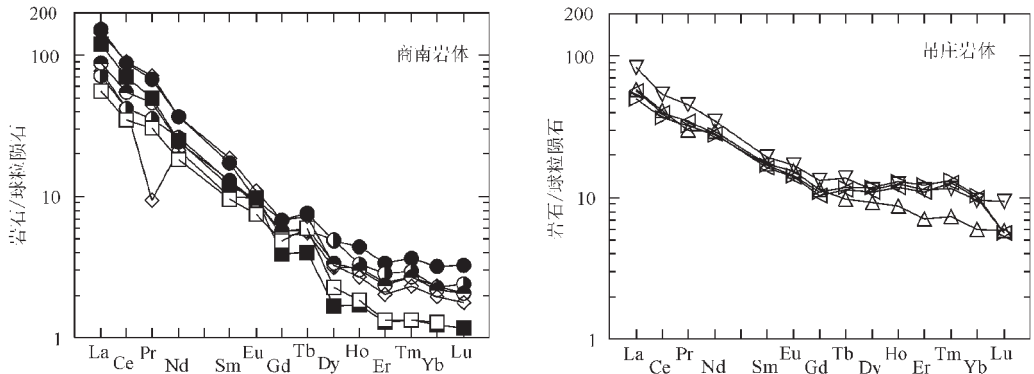


图4 商丹地区花岗岩的稀土元素分布

Fig. 4 Distribution diagrams of rare earth elements of granites in the Shangdan area

A/CNK=0.81~0.98,均小于1,属钙碱性系列、准铝质岩石^[28-29]。MgO含量<3%(1.93%~2.41%), $Mg^{\#}$ 为60.98~66.12,均大于47。在微量元素特征上,Sr含量高,有2个样品接近 400×10^{-6} 外,其余2个样品大于 400×10^{-6} (435×10^{-6} ~ 454×10^{-6});Sr/Y比值在19.02~39.82之间,基本介于20~40之间;Y含量除有1个样品为 18.4×10^{-6} 外,其他均小于 18×10^{-6} (11.4×10^{-6} ~ 16.8×10^{-6}),Yb含量有1个样品 $<1.9 \times 10^{-6}$ (为 1.31×10^{-6}),其余为 2.10×10^{-6} ~ 2.27×10^{-6} ,显示出较低HREE含量,La/Yb比值为7.27~14.66,(La/Yb)_N为4.90~9.88。Yb含量和La/Yb比值、(La/Yb)_N与典型埃达克质岩的Yb含量 $\leq 1.9 \times 10^{-6}$ 、La/Yb比值>20或(La/Yb)_N>10的成分特征有微弱的差异。在Sr/Y—Y和(La/Yb)_N—Yb_N图解上主要落入埃达克质岩区域,并接近典型的岛弧钙碱性酸性火成岩的成分(图2)。在N—MORB标准化不相容微量元素配分图解上总体显示出Nb的明显负异常和Sr的正异常(图3),在稀土元素球粒陨石标准化图解上显示出较强烈的REE分异(图4),LREE富集,HREE亏损,具有埃达克质岩成分特征的较明显的低HREE含量, $\delta Eu=1.03$ ~ 1.06 ,总体上具有弱的Eu正异常。

从上述花岗岩类的地球化学特征看,东秦岭商丹地区花岗岩类基本上符合典型埃达克质岩的地球化学特征,同时也具有岛弧花岗岩类的地球化学特征,即具有高场强元素Nb的亏损和大离子亲石元素的富集,表明它们形成于一个岛弧构造环境,属于俯冲洋壳板片MORB部分熔融形成的埃达克质岩石(I型埃达克岩)^[12]。Y的亏损以及高的Sr/Y、

La/Yb比值说明这些花岗岩的源区部分熔融的残留物应为榴辉岩^[1-3]。此外,较高的 $Mg^{\#}$ 值(43~66)表明俯冲洋壳板片的部分熔融产物在岩浆上升过程中可能与地幔橄榄岩之间发生过明显的相互作用^[4-5,25]。

商南花岗岩体2个样品的Sm、Nd同位素组成及参数见表2。它们的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为正值(+1.23~+2.51),表明源区岩石可能起源于弱亏损地幔或亏损地幔但受到地壳物质的混染,是地幔部分熔融形成的或先存具有洋壳性质的下地壳部分熔融形成的。花岗岩的亏损地幔模式年龄 T_{DM} 为123~135 Ga,大于商南花岗岩体的形成年龄(889 Ma),而远低于元古代秦岭杂岩片麻岩(T_{DM} 为1.72~2.02 Ga)^[33],也略小于松树沟蛇绿岩的形成年龄(Sm—Nd全岩等时线年龄 1030 ± 46 Ma)^[34],但与其亏损地幔模式年龄(T_{DM} 为1.44~1.27 Ga)^[34]接近,而商南花岗岩体的形成年龄(889 Ma)小于松树沟蛇绿岩基性岩石发生高压榴闪岩变质作用的全岩—矿物等时线年龄(983 ± 46) Ma^[35],揭示出它们之间可能存在一定成因联系。商南花岗岩体具有相对低的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值(0.512127~0.512134),与俯冲洋壳MORB部分熔融形成的典型埃达克质岩石($^{143}Nd/^{144}Nd > 0.5129$)有一定差异,而与商南松树沟蛇绿岩的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值(0.512651~0.512917)^[34]比较接近。由此可以推断商南花岗岩的源岩很可能是新元古代早期的俯冲洋壳板片。

3 讨论与结论

埃达克质岩的提出已经引起了广泛关注^[1,4,6,11-13,25,36,38]。Defant等^[1]认为埃达克质岩不可能由基性岩浆的分离结晶、地壳岩石的熔融、分离结晶和混染(AFC)、岩浆混合以及地幔楔(受俯冲板片的流体交代过)的熔融形成,而只能是俯冲的玄武质洋壳部分熔融的结果。然而,最近的研究表明,在增厚(>40 km)的下地壳环境中,底侵玄武岩的部分熔融也可以形成与埃达克岩的地球化学特征类似的岩石^[12-13,37-39]。研究表明,埃达克岩的形成要求源岩必须是基性的、含水、残留相有石榴石存在,因此,只要有合适的物理化学条件,俯冲板片和

表2 东秦岭商南花岗岩体的Sm—Nd同位素组成
Table 2 Sm and Nd isotopic compositions of the Shangnan granites, East Qinling

样品号	岩性	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd \pm 2\sigma$	T (Ma)	$T_{DM}(Ga)$	$\epsilon_{Nd}(t)$
S3911/12	花岗岩闪长岩	0.09826	0.512127 ± 8	889	1.349	1.23175
S3911/1	二长花岗岩	0.08825	0.512134 ± 10	889	1.233	2.51020

注:在宜昌地质矿产研究所MAT261型质谱计测定(2000)。

下地壳的熔融都可以形成埃达克质岩。

东秦岭商丹构造带北侧的商南花岗岩体和吊庄花岗岩体属于钙碱性系列,具有岛弧花岗岩特征。富 Na_2O (3.54%~5.52%) 贫 K_2O (0.75%~3.46%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.09~6.16, SiO_2 含量 >56% (61.84%~74.57%), Al_2O_3 含量变化于 13.41%~19.01%, 多数 $\geq 15\%$, MgO 含量均小于 3% (0.65%~2.41%), $\text{Mg}^\#$ 为 43.87~66.12, 低 Y ($<18 \times 10^{-6}$ (1.90×10^{-6} ~ 18.4×10^{-6})) 和 Yb ($<1.9 \times 10^{-6}$ (0.27×10^{-6} ~ 2.27×10^{-6})), Sr 含量高 (350×10^{-6} ~ 830×10^{-6}), 多数大于 400×10^{-6} , Sr/Y 比值在 25.29~216.71 之间, 大于 20~40; LREE 富集, LREE 与 HREE 分馏明显, 多数 La/Yb 比值 >20 (47.60~110.93), $(\text{La}/\text{Yb})_N > 20$ (32.09~99.13), 不显 Eu 异常或有弱的 Eu 正异常, 高场强元素 (如 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti) 相对亏损, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) > 0$, 暗示源岩以 N-MORB 为主。这些地球化学特征与洋壳俯冲 MORB 的部分熔融形成的 (I 型) 埃达克质岩相似 (表 3), 表明这些晋宁期的花岗岩类可能属于埃达克质岩。

典型 adakite 的 $\text{Mg}^\#$ 平均值为 51, 最高可达 68, $\text{Mg}^\#$ 的大小可以比较灵敏地反映基性岩熔融产物是否受到地幔物质的混染^[25,40]。商丹地区的埃达克质花岗岩类的 $\text{Mg}^\#$ 通常大于 48, 高于典型岛弧钙碱性中酸性火成岩的 $\text{Mg}^\#$ (平均值为 36) 和底侵玄武质下地壳熔融形成的埃达克质岩 (II 型埃达

克岩) 的 $\text{Mg}^\#$ (一般 <50) (表 3), 表明由俯冲洋壳板片 MORB 岩石在深部部分熔融形成的原始埃达克质岩浆熔体在上侵过程中可能与地幔楔物质发生了明显的相互作用^[25], 导致这些岩石的 MgO 含量增高, 这是加厚的下地壳基性岩石直接部分熔融所形成的产物 ($\text{Mg}^\# < 40$)^[27] 所不具备的特征。同时, 俯冲的洋壳板片在俯冲消减过程中在深部发生脱水反应, 熔融形成埃达克质岩, 残留物转变为高压的石榴石辉石岩或榴辉岩^[29], 为北秦岭晋宁期高压变质岩石的形成和保存提供了有利条件。

目前, 在中国所报道的大部分 adakite 质岩石是板内环境下增厚的下地壳底侵的基性岩石 (玄武岩) 部分熔融形成的^[11], 如 C 型 adakite 质岩石^[7-11] 或 II 型 adakite 质岩^[12]。正因如此, 这类岩石是否属于 adakite 质岩石还有不同意见^[41]。而在造山带中寻找与古俯冲有关的 adakite 质岩石具有重要意义。本文论述的秦岭商丹缝合带北侧 adakite 质岩石可能就是属于这类真正的 adakite, 而且是由俯冲洋壳板片熔融形成的埃达克质岩或 I 类埃达克岩^[12] (表 3)。

现有研究已揭示出, 在北秦岭造山带存在晋宁期的强烈地质事件^[27,30-31,42-45], 但在构造解释上存在重大差异, 这涉及到对秦岭造山带晋宁期构造性质及构造体制的认识以及整个造山带构造演化过程的认识。目前已经查明并有证据表明, 晋宁期古秦岭洋壳曾沿商丹构造带向北发生过俯冲消减作用: (1) 在北秦岭及商丹带上发育有新元古代蛇绿岩, 如商南松树沟蛇绿岩构造岩片叠置于秦岭杂岩之上, 主要由变质橄榄岩单元和变质基性火山岩单元组成, 具有初始洋盆的地球化学特征, Sm-Nd 同位素等时线年龄为 $(1030 \pm 46) \text{ Ma}$ ^[29], 形成于小洋盆环境, 同时发育有高压变质特征的榴闪岩、基性麻粒岩和长英质麻粒岩^[46-47], 其全岩—矿物 Sm-Nd 同位素等时线变质年龄为 $(983 \pm 140) \text{ Ma}$ ^[25], $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +6.6 \pm 0.9$; 再如周至黑河地区商丹带北侧的黑河变质玄武岩 (作者认为不属于丹凤群) 具有 N-MORB 地球化学特征, Sm-Nd 同位素年龄为 $(963 \pm 130) \text{ Ma}$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +6.6$ ^[43], 形成于洋盆环境。这表明在商丹带北侧, 松树沟蛇绿岩与黑河变质玄武岩具有大致相同的同位素年龄和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 证实晋宁期沿商丹带一线可能存在一个洋盆——古秦岭洋, 并具有板块构造体制。(2) 在商丹地区, 丹凤群中的火山岩系虽然在时代上和构造属性上存在不同认识, 但丹凤群火山岩主体为岛弧型玄武岩^[29,48-50], 变质玄武岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $(825 \pm 27) \text{ Ma}$ ^[29,50], 形成于北秦岭南缘板块俯冲作用下产生的岛弧环境; 丹凤县郭家沟地区与丹凤群火山岩系同时形成并共生的变质辉长岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $(974 \pm 86) \text{ Ma}$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +4.5$ ^[45]。这是与商丹带北侧埃达克质岩大致同时期形成的岛弧火成岩系。(3) 在商丹带北侧的秦岭杂岩中展布有晋宁期花岗岩带, 包括 S 型花岗岩如西峡地区德河花岗岩体 (794 Ma)、西峡寨根花岗岩体 (821 Ma)、卢氏牛角山片麻状花岗岩体 (959 Ma) 以及 I-S 型商南花岗岩体 (889 Ma)^[31-32] 等。(4) 在北秦岭的商南松树沟地区存在晋宁期高压变质的榴闪岩、高压基性麻粒岩和中酸性麻粒岩^[46-47]。

表 3 东秦岭商丹地区新元古代花岗岩与两类埃达克岩的地球化学特征值
Table 3 Geochemical characteristic values of two kinds of adakites and Neoproterozoic granites in the Shangdan area of the East Qinling

地球化学参数	典型埃达克岩		东秦岭商丹地区花岗岩	
	I 类埃达克岩	II 类埃达克岩	商南岩体 (n=7)	吊庄岩体 (n=4)
$\text{SiO}_2/10^2$	≥ 56.00	56.06 ~ 72.48	70.46	62.78
$\text{Al}_2\text{O}_3/10^2$	≥ 15.00 (很少 <15.0)	14.53 ~ 19.81	15.58	16.10
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$	>1.00	1.00 ~ 5.57	2.35	3.57
$\text{MgO}/10^2$	<3 (很少 >6)	0.10 ~ 2.56	2.13	1.09
$\text{Mg}^\#$	>47	一般 <50	53.23	62.61
$\text{Sr} \times 10^{-6}$	>400 (很少 <400)	355 ~ 1512	530	409
$\text{Y} \times 10^{-6}$	≤ 18.00	2.00 ~ 15.00 (6.9)	4.03	15.58
$\text{Yb} \times 10^{-6}$	≤ 1.90	0.17 ~ 1.03 (0.36)	0.45	1.97
Sr/Y	>20.0 ~ 40.0	38.1 ~ 617.5 (67)	117.16	27.66
La/Yb	≥ 10	26.9 ~ 142.9 (71)	79.05	10.87
Zr/Sm	>50		33.90	57.55
Sr 异常	正异常	正异常	正异常	正异常
Eu 异常	正异常或微弱负异常	≥ 0.60	正异常 (1.04)	正异常 (1.03)
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值	<0.705	0.704 ~ 0.708		
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值	>0.5129	0.5123 ~ 0.5126	0.512127 ~ 0.512134	

注: ① I 类埃达克岩是俯冲洋壳板片熔融形成的埃达克质岩; II 类埃达克岩是底侵玄武质下地壳熔融形成的埃达克质岩;
② 典型埃达克岩地球化学参数由文献 [2, 12, 13, 36, 37, 38] 综合而来。

上述特征结合商丹地区埃达克质花岗岩体的发育表明,在晋宁期,沿商丹带一线曾发育有一个以松树沟蛇绿岩和黑河玄武岩带代表的古洋盆(古秦岭洋),并向北发生过俯冲消减作用,产生丹凤群岛弧型火山岩系和晋宁期花岗岩带等构造岩浆活动以及强烈的变质作用(包括高压变质作用)和构造变形作用^[1],而商丹地区的埃达克质花岗岩就可能形成于俯冲作用的早期阶段的岛弧环境,很可能是一个古洋壳俯冲板片 MORB 部分熔融的产物。反之,该岩石的确认也为古秦岭洋及俯冲作用的存在提供了新证据。

从现有秦岭造山带已报道的埃达克质岩^[21-22]来看,秦岭可能存在 3 期埃达克质岩,即本文报道的北秦岭晋宁期埃达克质花岗岩类以及北秦岭晚加里东—早海西期灰池子埃达克质花岗岩体和南秦岭印支—燕山早期西坝花岗岩体^[2]。正如前述,北秦岭晋宁期花岗岩类属于新元古代古秦岭洋沿商丹构造带向北俯冲有关的洋壳板片 MORB 部分熔融形成的埃达克质花岗岩类。而北秦岭造山带核部规模最大的晚加里东—早海西期灰池子复式花岗岩体的地球化学特征表明,它是由新元古代从地幔分异、底侵于下地壳的玄武质岩石部分熔融形成的埃达克质岩^[21],且其形成锆石 U-Pb 年龄为(437±47) Ma,全岩 Rb-Sr 等时线年龄为(382±2)Ma^[21],与北秦岭官坡地区秦岭杂岩北侧存在的晚加里东期的高压—超高压榴辉岩带的主变质年龄相吻合,榴辉岩的全岩—矿物 Sm-Nd 同位素等时线年龄为(400±16) Ma^[51],暗示它们之间有一定联系,很可能与北秦岭晚加里东—早海西期发生陆内双向俯冲作用造成的下地壳加厚和底侵玄武质岩石发生部分熔融形成埃达克质花岗岩浆并构造侵位^[21]。南秦岭印支—燕山早期西坝花岗岩体侵位于留坝县北的中晚泥盆纪地层中,其锆石 U-Pb 年龄为(201.2±3.3) Ma,花岗岩体及花岗斑岩体的地球化学特征也显示属于埃达克质岩^[2],结合秦岭造山带于中三叠世最终碰撞造山分析,西坝花岗岩体及花岗斑岩体可能代表了扬子与华北两大板块主碰撞造山地壳增厚背景下下地壳部分熔融后的侵入产物,并且它们的出现不但证明秦岭造山带燕山期地壳渐次增厚,而且由于岩浆形成过程中残余的大比重熔融残留物(含大量石榴石矿物相)将与岩石圈地幔一同被拆沉进入到软流圈,指示秦岭地区燕山期地壳厚度达到最大后可能曾发生了下地壳拆沉作用^[2]。显然,秦岭地区存在的 3 期埃达克质岩具有很大的潜在价值和研究意义,深入研究探讨秦岭不同时期埃达克质岩对于揭示秦岭造山带不同造山阶段的构造体制、构造转换过程及其深部动力学提供重要依据。

在论文撰写过程中得到西北大学地质学系张国伟院士和中国科学院地质与地球物理研究所张旗研究员的鼓励和支持,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 47: 662~665.
- [2] 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.
- [3] Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95 (B13): 21503~21521.
- [4] Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism[J]. *Tectonophysics*, 1993, 19: 177~189.
- [5] Kay S M, Ramos V A, Marquez M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America[J]. *Journal of Geology*, 1993, 101: 703~714.
- [6] 王焰,张旗,钱青. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 251~256.
Wang Yan, Zhang Qi, Qian Qing. The geochemical characteristics of adakite and its tectonic implication[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35 (2): 251~256(in Chinese with English abstract).
- [7] 张旗,钱青,王二七,等. 燕山晚期的中国东部高原:埃达克岩的启示[J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 248~255.
Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erchi, et al. An east China plateau in mid-late Yanshanian period: implication from adakites[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2001, 36 (2): 248~255(in Chinese with English abstract).
- [8] 张旗,王焰,钱青,等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造—成矿意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236~244.
Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 236~244(in Chinese with English abstract).
- [9] 张旗,王焰,王元龙. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探:埃达克质岩 Sr,Nd 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 505~513.
Zhang Qi, Wang Yan, Wang Yuanlong. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian Period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 505~513(in Chinese with English abstract).
- [10] 张旗,赵太平,王焰,等. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3): 273~280.
Zhang Qi, Zhao Taiping, Wang Yan, et al. A discussion on the Yanshanian magmatism in Eastern China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(3): 273~280(in Chinese with English abstract).
- [11] 张旗,王焰,刘伟,等. 埃达克岩的特征及其意义[J]. *地质通报*, 2002, 21(7): 431~435.
Zhang Qi, Wang Yan, Liu Wei, et al. Adakite: Its characteristics and implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(7): 431~435(in Chinese with English abstract).
- [12] 王强,许继锋,赵振华. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 201~208.

- Wang Qing, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua. The summary and comment on research on a new kind of igneous rock—adakite[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 201~208 (in Chinese with English abstract).
- [13] 钱青. adakite 的地球化学特征及成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3): 297~306.
- Qian Qing. Adakite: geochemical characteristics and genesis [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(3): 297~306 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王强, 许继锋, 王建新, 等. 北大别山 adakite 型灰色片麻岩的确定及其与超高压变质作用的关系 [J]. *科学通报*, 2000, 45(10): 1017~1024.
- Wang Qing, Xu Jifeng, Wang Jianxin, et al. The recognition of adakite-type gneisses in the North Dabie Mountains and the relationship between them and ultrahigh pressure metamorphism [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 46(10): 1017~1024 (in Chinese).
- [15] 王强, 许继锋, 赵振华, 等. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 551~564.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, et al. The petrogenesis and geodynamic significances of HREE depleted granitoids during Yanshan period in the Dabie Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 551~564 (in Chinese with English abstract).
- [16] 许继锋, 王强, 徐义刚, 等. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 576~584.
- Xu Jifeng, Wang Qiang, Xu Yigang, et al. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of magma HREE and Y depletion [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 576~584 (in Chinese with English abstract).
- [17] 葛小月, 李献华, 陈志刚, 等. 中国东部高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约[J]. *科学通报*, 2002, 47(6): 474~480.
- Ge Xiaoyue, Li Xianhua, Chen Zhigang, et al. Geochemical characteristics and genesis of high Sr and low Y type intermediate-acid igneous rocks in east China during Yanshanian Period: Constraints on crust thickness of east China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(6): 474~480 (in Chinese).
- [18] 熊小林, 赵振华, 白正华. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生[J]. *科学通报*, 2001, 46(4): 281~287.
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(10): 810~817 (in Chinese).
- [19] 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(4): 514~522.
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, et al. Origin of Awulale adakite 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).
- [20] 许继锋, 梅厚钧, 于学元, 等. 准噶尔晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物[J]. *科学通报*, 2001, 46(8): 684~688.
- Xu Jifeng, Mei Houjun, Yu Xueyuan, et al. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: products of slab melting [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(15): 1312~1316 (in Chinese).
- [21] 李伍平, 王涛, 王晓霞. 北秦岭灰池子花岗岩质复式岩体的源岩讨论——元素—同位素地球化学制约[J]. *地球科学*, 2001, 26(3): 269~278.
- Li Wuping, Wang Tao, Wang Xiaoxia. Source of Huichizi granitoid complex pluton in Northern Qinling, Central China: constraints in element and isotopic geochemistry [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2001, 26(3): 269~278 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张成立, 罗静兰. 东秦岭西坝花岗岩体及花岗斑岩脉的地球化学特征及其地质意义[A]. 见: 埃达克质岩及其地球动力学意义学术研讨会论文摘要[C]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2001. 73~76.
- Zhang Chengli, Luo Jinglan. Geochemical characters and geological significance of Xiba granite and granite-porphry in East Qinling [A]. In: Abstracts of Symposium on Adakite-like Rocks and Their Geodynamic Significance [C]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2001. 73~76.
- [23] Xu Jifeng, Wang Qiang, Yu Xueyuan. Geochemistry of high-Mg andesites and adakite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolite melange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Pale-Tethyan crust and its implication[J]. *Geochemical Journal*, 2000, 34: 359~377.
- [24] Martin H. The mechanisms of petrogenesis of the Archaean continental crust—comparison with modern processes [J]. *Lithos*, 1993, 30: 373~388.
- [25] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 1999, 46: 411~429.
- [26] Wolde B, Gore-Gambella Geotraverse Team. Tonalite-trondhjemite—granite genesis by partial melting of newly underplated basaltic crust: an example from the Neoproterozoic Birbir magmatic arc, western Ethiopia[J]. *Precambrian Research*, 1996, 6: 3~14.
- [27] 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, 2001. 421~726.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001. 421~726 (in Chinese).
- [28] 裴先治, 李厚民, 李国光. 北秦岭商南花岗岩体的地球化学特征及其形成的构造环境[J]. *西安地质学院学报*, 1996, 18(3): 29~35.
- Pei Xianzhi, Li Houmin, Li Guoguang. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Shangnan granite pluton in the North Qinling[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1996, 18(3): 29~35 (in Chinese with English abstract).
- [29] 裴先治. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化[M]. 西安: 西安

- 地图出版社,1997. 1~184.
- Pei Xianzhi. Composition and Tectonic Evolution of the Shangdan Structural Zone in the East Qinling,China[M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1997.1~184(in Chinese).
- [30] 裴先治,李厚民,李国光,等. 东秦岭商丹构造带主要地质体的同位素年龄及其构造意义[J]. 地球学报,1997,8(增刊):40~42.
- Pei Xianzhi, Li Houmin, Li Guoguang, et al. Isotopic geochronology of the major geological units in the Shangdan structural zone for Eastern Qinling and its tectonic implication[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997,8(Sup): 40~42(in Chinese with English abstract).
- [31] 裴先治,王涛,王洋,等. 北秦岭晋宁期主要地质事件及其构造背景探讨[J]. 高校地质学报,1999,5(2):137~147.
- Pei Xianzhi, Wang Tao, Wang Yang, et al. Major geological events of Jinning period and their tectonic settings in the North Qinling[J]. Geological Journal of China Universities, 1999,5(2): 137~147(in Chinese with English abstract).
- [32] 王涛,李伍平,王晓霞. 秦岭杂岩牛角山花岗质片麻岩体锆石 U—Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国区域地质,1998,17(3):262~265.
- Wang Tao, Li Wuping, Wang Xiaoxia. Zircon U—Pb age of the Niujiashan granitoid gneisses in the Qinling complex of the Qinling Orogenic Belt - with a discussion of its geological significance[J]. Regional Geology of China, 1998,17(3): 262~265 (in Chinese with English abstract).
- [33] 张宗清,刘敦一,付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京:地质出版社,1994. 8~184.
- Zhang Zongqing, Liu Dunyi, Fu Guomin. Study of Isotopic Age of Metamorphic Strata in North Qinling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 8~184(in Chinese).
- [34] 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.
- Zhou Dingwu, Dong Yunpeng, Liu Liang, et al. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of the Proterozoic ophiolite from Songshugou area[J]. Scientia Geologica Sinica, 1998,33(1):31~38 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李曙光,陈移之,张国伟,等. 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.
- Li Shuguang, Chen Yizhi, Zhang Guowei, et al. A 1 Ga B.P. Alpine peridotite body emplaced into the Qinling Group: evidence for the existence of the Late Proterozoic plate tectonics in the North Qinling area[J]. Geological Review, 1991,37(3): 235~242(in Chinese with English abstract).
- [36] Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone [J]. Contrib Mineral Petrol., 1996,123: 263~281.
- [37] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. Nature, 1993,362:144~146.
- [38] Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: Cordillera Blanca Batholith [J]. Peru. J. Petrol., 1996, 37: 1491~1521.
- [39] Peacock S M, Rushmer T, Dickin A P, et al. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. Earth Planet. Lett., 1994, 121: 227~244.
- [40] Smithies R H. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite [J]. Earth Planet Sci Lett, 2000, 182: 115~125.
- [41] 吴福元,葛文春,孙德有. 埃达克岩的概念、识别标志及其地质意义[A]. 见:肖庆辉等著. 花岗岩研究思维与方法[C]. 北京:地质出版社,2002. 172~191.
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou. The definition, discrimination of adakites and their geological role[A]. In: Xiao Qinghui, et al (ed), The Ways of Investigation on Granitoids[C]. Beijing: Geological Publishing House, 2002. 172~191(in Chinese).
- [42] 张宗清,张国伟,付国民,等. 秦岭变质地层年龄及其构造意义[J]. 中国科学(D辑),1996,26(3):216~222.
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Fu Guomin, et al. Age of Qinling metamorphic strata and its tectonic implication[J]. Science in China (Series D), 1996, 26(3): 216~222 (in Chinese).
- [43] 张宗清,唐索寒,宋彪,等. 秦岭造山带晋宁期强烈地质事件及构造背景[J]. 地球学报,1997,18(增刊):43~45.
- Zhang Zongqing, Tang Suohan, Song Biao, et al. Jinning strong geological events to take place in the Qinling Orogenic Belt and their tectonic setting [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997,18(Sup): 43~45(in Chinese with English abstract).
- [44] 张宗清,张国伟,唐索寒,等. 秦岭黑河镁铁质枕状熔岩年龄和地球化学特征[J]. 中国科学(D辑),2001,31(1):36~42.
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan, et al. Age and geochemical characteristics of Heihe mafic pillow lava in Qinling[J]. Science in China (Series D), 2001,31(1): 36~42(in Chinese).
- [45] 姜常义,苏生瑞,赵太平,等. 北秦岭侵入岩带与晋宁运动[M]. 北京:地质出版社,1998. 1~91.
- Jiang Changyi, Su Shengrui, Zhao Taiping, et al. Intrusion zone of North Qinling and Jinning Movement[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 1~91(in Chinese).
- [46] Chen Nengsong, Yang Yang, Zhou Hanwen, et al. High pressure metamorphism of garnet-amphibole rocks from Songshugou area, Eastern Qinling Mountain and its tectonic implication[J]. Journal of China University of Geosciences, 1993,4(1): 36~45.
- [47] 刘良,周鼎武,王焰,等. 东秦岭秦岭杂岩中的长英质高压麻粒岩及其地质意义初探[J]. 中国科学(D辑),1996,26(sub):56~63.
- Liu Liang, Zhou Dingwu, Wang Yan, et al. Study and implication of the high-pressure felsic granulite in the Qinling complex of East Qinling[J]. Science in China (Series D), 1996,39(sub):56~63 (in Chinese).
- [48] 张旗,周国庆. 中国的蛇绿岩[M]. 北京:科学出版社,2001. 1~182.
- Zhang Qi, Zhou Guoqing. Ophiolites of China [M]. Beijing: Science Press, 2001.1~182 (in Chinese).
- [49] 张本仁,欧阳建平,韩吟文,等. 北秦岭古聚合带壳幔再循环. 地球科学,1996,51(5):469~475.
- Zhang Benren, Ouyang Jianping, Han Yinwen, et al. Crust-Mantle

- recycling at the ancient convergence zone in North Qinling [J]. Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences, 1996, 21(5): 469~475(in Chinese with English abstract).
- [50] 裴先治,李厚民,李国光. 东秦岭丹凤岩群的形成时代和构造属性[J]. 岩石矿物学杂志,2001,20(2):180~189.
Pei Xianzhi, Li Houmin, Li Guoguang. A study of formation epoch and tectonic attribute of the Danfeng group complex in East Qinling Mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(2): 180~189(in Chinese with English abstract).
- [51] 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.
Hu Nenggao, Yang Jiayi, Zhao Donglin. Sm-Nd isochron age of eclogite from Northern Qinling Mountains [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1996, 16(4):349~352 (in Chinese with English abstract).

Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shangdan zone in the East Qinling

PEI Xian-zhi¹, WANG Tao², Ding Sa-ping^{1,3}, LI Yong¹, HU Bo¹

(1. Faculty of Earth Sciences and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

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

3. Gansu Institute of Geological Survey, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: The Shangnan granitoid and Diaozhuang granitoid on the north side of the Shangdan fault zone in the East Qinling belong to the calc-alkaline series and have the characteristics of island-arc granitoids. These rocks have higher Na₂O (3.54%~5.52%) and lower K₂O (0.75%~3.46%), Na₂O/K₂O = 1.09~6.16, SiO₂>56% (61.84%~74.57%), Al₂O₃≥15% (13.41%~19.01%), MgO<3% (0.65%~2.41%) and Mg[#]=43.87~66.12. They are notably depleted in Y with Y<18×10⁻⁶, ranging from 1.90×10⁻⁶ to 18.4×10⁻⁶, and Yb with Yb<1.9×10⁻⁶, ranging from 0.27×10⁻⁶ to 2.27×10⁻⁶, and enriched in Sr with Sr>400×10⁻⁶, ranging from 350×10⁻⁶ to 830×10⁻⁶. Sr/Y ratios vary from 25.29 to 216.71, being >20~40. The granitoid rocks are enriched in LREE and depleted in HREE with most La/Yb>20 (47.60~110.93) and (La/Yb)_N>20 (32.09~99.13), and exhibit no Eu anomaly or only weak positive Eu anomaly. The large ion lithophilous elements (Rb, Ba, Th and Sr) are relatively enriched and high field strength elements (Nb, Ta, Zr, Hf and Ti) are relatively depleted. The isotopic composition indicates that the ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ratios (0.512127~0.512134) of the granitoids are very similar to those (0.512651~0.512917) of the Songshugou ophiolite in the Shangnan area and that their ε_{Nd}(t=889Ma) values are positive (+1.23 to +2.51), implying that the source rocks of these granitoids are dominated by MORB. These geochemical characteristics are similar to those of adakitic rocks formed by partial melting of MORB related to subduction of oceanic crust, suggesting that these Neoproterozoic granitoids in this study area might be adakitic rocks. The adakitic granitoids in the Shangdan area may be the result of the northward subduction of the ancient ocean basin (ancient Qinling ocean), represented by the Songshugou ophiolite and the Heihe N-MORB type basalt, along the Shangdan tectonic zone during the Neoproterozoic. This slab subduction of oceanic crust led to the partial melting of MORB rocks and the formation of the adakitic granitoids in the Shangdan area.

Key words: adakitic rock; granitoids; geochemistry; subduction of oceanic crust; ancient island-arc; Neoproterozoic; Shangdan area, East Qinling