

北淮阳中生代 adakite 岩石地球化学特征及成因讨论^{*}

潘国强 陆现彩 于航波

PAN GuoQiang, LU XianCai and YU HangBo

南京大学地球科学系, 南京 210093

Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2001-06-18 收稿, 2001-09-10 改回.

Pan GQ, Lu XC and Yu HB. 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic adakite from Northern Huaiyang and discussion on its genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4):541-550

Abstract Mesozoic magmatic rocks are widely emerged in north Huaiyang belt located in the backland of the Dabieshan orogenic belt. The geochemistry characteristics of igneous rocks formed from late Jurassic epoch to early Cretaceous epoch (150~130Ma) are similar to those of adakites with $\text{SiO}_2 > 56\%$, high Al content ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ while $\text{SiO}_2 > 70\%$), high Sr content ($\text{Sr} > 400\mu\text{g/g}$), enrichment of Na ($\text{Na}_2\text{O} = 3.34\% \sim 4.75\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$), low Y and Yb content ($\text{Y} \leq 18\mu\text{g/g}$, $\text{Sr}/\text{Y} > 20 \sim 40$), $\text{La}/\text{Yb} > 20$, Sr positive, and without obvious Eu anomaly. The adakites in this district present five rock types as (quartz) diorite, monzodiorite - granodiorite - monzogranite - granite, in which primary rock-forming minerals are aligoclase-andesine, microcline or orthoclase, Mg-biotite, quartz, and accessory minerals are assemblage of magnetite-titanite-zircon-apatite. Mica-riched and diorite-like xenocr are found in adakites, which proved that it belongs to the I-type granitoid in Origin. The igneous rocks at ages $< 130\text{Ma}$ belong to the A-type granitoid in origin instead of adakite. The origin of adakite may be ascribed to the partial melt of basaltic rocks underplated to lower crust, with the partial melt ratio at about $10 \sim > 20\%$, and subsequently assimilation-fraction-crystallization (AFC) process occurred during the evolution of magma.

Key words Adakite; Mesozoic; Northern Huaiyang;

摘要 大别山造山带后缘的北淮阳带发育大面积的中生代岩浆岩。其中,晚侏罗世至早白垩世早期(150~130Ma)的岩体具有与 adakite 类似的地球化学特征, $\text{SiO}_2 > 56\%$, 高铝($\text{SiO}_2 > 70\%$ 时, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$)、高铯($\text{Sr} > 400\mu\text{g/g}$)、钠质($\text{Na}_2\text{O} 3.34\% \sim 4.75\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$)、低 Y 和 Yb ($\text{Y} \leq 18\mu\text{g/g}$), $\text{Sr}/\text{Y} > 20 \sim 40$, $\text{La}/\text{Yb} > 20$, Eu 无明显异常, Sr 正异常。Adakite 岩石类型为(石英)闪长岩、二长闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-花岗岩。矿物成分以更长石、微斜长石或正长石、镁质黑云母、石英为主,副矿物为磁铁矿+榍石+榍石+磷灰石组合,岩石富含云质和闪长质包体,属 I 型花岗岩类。而早白垩世晚期 $< 130\text{Ma}$ 的岩体,属 A 型花岗岩,为非 adakites 花岗岩类。北淮阳 adakites 的形成可能与底侵到下地壳的玄武质岩石部分熔融有关,部分熔融比例在 $10\% \sim > 20\%$,并且在岩浆演化中有 AFC 过程。

关键词 adakite; 中生代; 北淮阳

中图分类号 P588.12; P595

^{*} 国家自然科学基金(49272099)资助项目。

第一作者简介:潘国强,男,1938年生,教授,主要从事岩石学和区域地质学研究。

1 引言

Adakite 是一种具特殊地球化学特征的中酸性火成岩。以高铝(SiO_2 70%时, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$)、高锶($\text{Sr} > 400 \mu\text{g/g}$)、钠质($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$)、HREE 亏损($\text{Y} \leq 18 \mu\text{g/g}$ $\text{Yb} \leq 1.9 \mu\text{g/g}$)为特征。 $\text{Sr}/\text{Y} > 20 \sim 40$, $\text{La}/\text{Yb} > 20$, Eu 与 Sr 一般为正异常。因其首先发现于阿留申群岛的 Adak 岛(Kay, 1978),故将其命名为 adakite(Defant *et al.*, 1990)。目前在新生代岛弧中已发现不少类似岩石。有趣的是,太古代 TTG 或 TTD 岩系具有与 adakite 相似的地球化学特征。近年来,我国也开始有此类岩石的报导(王焰等 2000; 王强等 2000; 熊小林等 2001; 张旗等 2001)。

随着此类岩石研究的开展,提出了这样的问题:从时代上讲,除了新生代和太古代,其它地质时代有无 adakite?从构造单元上讲,除了岛弧环境,它们还可产于何种地质背景?我们在对大别山造山带北淮阳地区岩浆岩的研究过程中,发现某些中生代侵入岩具有与 adakite 相似的岩石地球化学特征,但它们形成于陆内碰撞造山带的抬升阶段,其成因显然无法用新生代热的消减洋壳在深达角闪岩-榴辉岩过渡带的

部分熔融解释。因此,报导这些岩石,并讨论其成因,对进一步认识大别山造山带岩浆岩的成因演化及其构造环境无疑都是有益的。

2 地质背景

大别山造山带北缘的北淮阳地区通常是指六安-确山断裂与磨子潭-晓天断裂之间的狭长地带,它东至郑庐断裂,西至南阳盆地以东。其地质特征可以商(城)-麻(城)断裂以东地段为代表(图 1)。该地段出露有 Pt_3 - PZ_1 梅山群、 PZ_{1+2} 佛子岭群、C 石炭系、 J_3 - K_1 火山岩系(毛坦厂组、金刚台组、响洪甸组),以及 J_2 -E 陆源碎屑岩沉积。 J_2 朱集组陆源砂、砾岩层的出现,表明北淮阳中侏罗世时曾局部抬升。近年来,在信阳以东光山县凉亭一带沿龟(山)-梅(山)断裂带发现了秦岭群的露头,这表明晋宁运动之后,在华北与扬子板块之间,秦岭岛弧至少已延伸到信阳以东(李云安等,1997)。区内 NWW 向逆掩断层和韧性剪切带比较发育,逆冲推覆构造格局被认为是 J_2 - J_3 期间形成的(王瑜,1994)。秦岭群-梅山群在区内的空间分布及其非地层性质被认为是一种混杂堆积

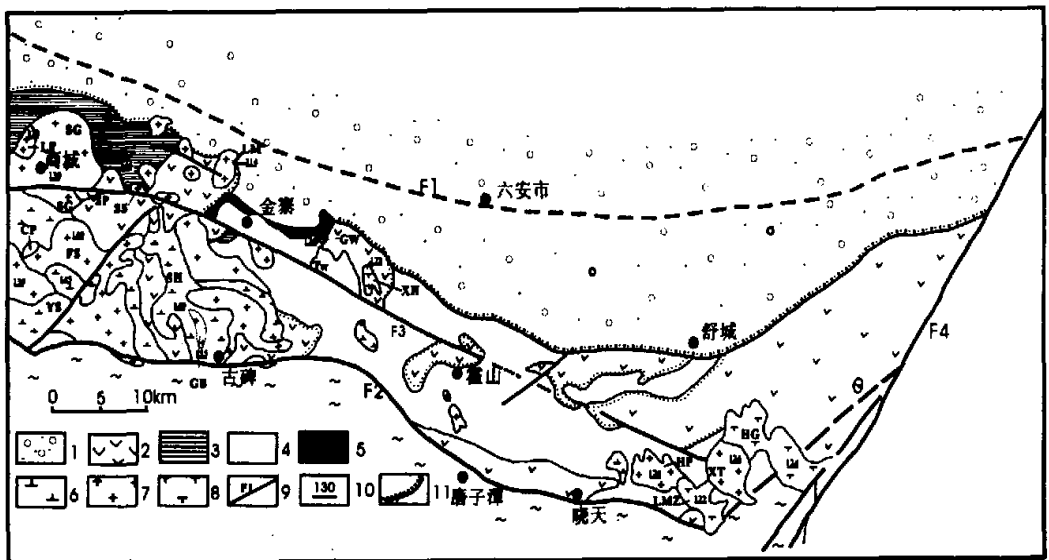


图 1 北淮阳(东段)地质略图

1. 中、新生代陆源沉积岩; 2. J_3 - K_1 火山岩; 3. 石炭系; 4. 古生代佛子岭群; 5. 新元古代-早古生代梅山群; 6. 石英闪长岩、二长闪长岩; 7. 花岗岩、正长花岗岩、二长花岗岩; 8. 正长岩; 9. 主要断裂带及编号; 10. 同位素年龄值(Ma); 11. 不整合接触界线;

F1 六安-确山断裂; F2 磨子潭-晓天断裂; F3 龟山-梅山断裂; F4 郑城-庐江断裂

岩体名称及代号: GB 古碑; SS 苏仙石; SH 双河; YS 银砂畈; CP 程香铺; FS 伏山; LF 楼坊弯; SG 石鼓注; SD 肆顾墩; GW 汞湾-鲍冲; HG 华盖山; HP 河棚; XH 响洪甸; LMZ 龙眠寨; XT 西汤池; LM 老猫洞

Fig. 1 A geological sketch map of the North Huaiyang (East Part)

表 1 北淮阳中生代侵入岩同位素年龄表

Table 1 Isotopic ages of Mesozoic zone intrusive rocks in North Huaiyang block

岩体名称 (代号)	岩石类型	同位素测年方法及数值(Ma)				资料来源
		U-Pb (锆石)	K-Ar (全岩或黑云母)	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar (角闪石)	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar (黑云母)	
古碑 (GB)	角闪石英二长岩 黑云正长花岗岩			166.4±0.3	155.0±2.4	1 1
苏仙石 (SS)	角闪二长闪长岩 黑云二长花岗岩				146.0±0.9	1
双河 (SH)	石英二长闪长岩	140.2				
银砂畈 (YS)	石英二长闪长玢岩		145			2
程香铺 (CP)	斑状角闪黑云二长花岗岩				135.73 138.42	2
伏山 (FS)	斑状角闪黑云二长花岗岩				139.95	2
楼坊弯 (LF)	斑状黑云母花岗岩闪长岩				133.03	2
石鼓洼 (SG)	斑状中粒二长花岗岩				130.48	2
辟顾墩 (SD)	巨斑状粗中粒二长花岗岩				128.04	2
汞湾—鲍冲 (GW)	二长岩				125.9	3
华盖山 (HG)	石英正长斑岩			124.1		3
河棚 (HP)	花岗岩				124.1	3
响洪甸 (XH)	霞石正长岩 正长岩			121.9 122.7		3
龙眠寨 (LMZ)	石英正长斑岩				121.7	3
西汤池 (XT)	花岗岩		124.4		120.6	
汤家坪	二长花岗岩斑岩	120				2
菊花尖	二长花岗岩斑岩	125				2
金刚山	二长花岗岩	130				2
通城店	二长花岗岩		122			2
吴老弯	含斑中粒二长花岗岩	121				4
莲花岩	黑云角闪石英二长岩		104,111			4
老猪洞 (LM)	黑云正长花岗岩斑岩		114			4
小店子	辉石石英二长闪长岩		106			4

资料来源: 1. (Ma, 1999); 2. 1:5 万商城幅、达权店幅区调查报告(1992); 3. (周泰禧等, 1992); 4. (李家振等, 1997); 5. 杨坤光等, 1999

(张以熔, 1985, 马文璞等, 1997)。在北淮阳地区不同时代地质体保存有不同的变质程度。加里东期和海西期侵入岩尚有少量出露。因此, 在北淮阳地区记录有扬子板块与华北板块多次俯冲—碰撞的地质证据。

中生代该地区广泛发育岩浆活动。中生代侵入岩同位素年龄见表 1。从岩浆岩的分布及其同位素年龄分析, 区内存在两个岩浆中心, 一个是金寨-商城-古碑中心式岩浆中心; 另一个是霍山-晓天-舒城岩浆中心。后者沿龟-梅断裂带两侧分布, 可能为裂瓣式与中心式复合类型。在这两个岩浆中心都出露有安山质-英安质-粗安质-流纹质火山岩, 并伴有石英闪长岩、二长闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩等侵入体, 后一中心内正长岩、含副长石正长岩更为发育。同位素年龄在 150~130Ma, 即晚侏罗世至早白垩世早期的岩体均分布于前一岩浆中心, 而 <130Ma, 即早白垩世晚期的岩体分布于前者外围和后一岩浆中心内。据现有岩石地球化学资料, 中生代 adakite 全都分布在金寨-商城-古碑岩浆中心内, 其外围及霍山-晓天-舒城岩浆中心皆为非 Adakite 岩。

3 Adakite 岩石学特征

北淮阳 adakite 的岩石类型主要有三种: 石英闪长岩-二长闪长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩。

程香铺岩体、苏仙石岩体中可见第一种岩性, 并可以程香铺岩体为例。岩石呈似斑状结构, 基质为细粒-微晶结构。主要矿物成分有更-中长石 ($An=26\sim39$), 其结构有序度指数为 44.93~47.18, 属中高温过渡型斜长石; 中微斜长石 (Or 91%); 镁质黑云母 ($MF=0.49\sim0.62$) 及少量普通角闪石, 角闪石内可见辉石残留。石英中常有单相 L_{H_2O} 包体。副矿物组合为磁铁矿+榍石+磷灰石+锆石。岩石中常见深源暗色闪长质包体。

伏山、石鼓洼、肆顾墩等岩体主要岩性为二长花岗岩。岩石呈似斑状结构, 斑晶含量在 10%~20%。岩石主要矿物成分为更长石 ($An=15\sim28$); 高微斜长石 (Or 89%~94%); 镁质黑云母 ($MF=0.58\sim0.60$) 及石英。石英中含 L_{H_2O} 和 V_{H_2O} 两相气液包体。副矿物组合为磁铁矿+榍石+锆石+磷灰石, 并可见榍石与独居石。岩石常见富云质或石英二长闪长岩质包体。

楼坊湾岩体及苏仙石岩体中可见花岗闪长岩岩性。岩石呈似斑状结构。主要矿物成分为更长石 ($An=22\sim25$), 其结构有序度指数为 47.81, 属部分有序过渡型斜长石; 中正长石 ($\Delta P=0, \Delta Z=0.597, Or 89.5\%$); 石英含 L_{H_2O} 和 NaCl 包体; 镁质黑云母 ($MF=0.55\sim0.63$)。副矿物组合为磁铁矿+榍石+磷灰石。岩体常见富云质包体和少量闪长质微粒包体。

4 北淮阳 adakite 地球化学特征

4.1 岩石主量元素

岩石主量元素氧化物含量见表 2。北淮阳 adakite $SiO_2 > 56\%$ (57%~71%), 平均为 65.64%, Al_2O_3 含量较高, 当 $SiO_2 > 70\%$ 时, $Al_2O_3 \geq 15\%$; $Na_2O + K_2O$ 为 6.60%~8.70%, 平均为 7.52%, Na_2O/K_2O 为 0.85~1.27, 平均 1.10, 属钠质类型岩石; Mg^{II} ($MgO/(MgO + FeO + 0.9Fe_2O_3)$) 为 0.14~0.46, 平均 0.31。北淮阳 adakite K_2O 含量高是一个明显特征, $K_2O=3.00\%~4.70\%$, 平均 3.61%。在 K_2O-SiO_2 图解上, 投影点落在高钾钙碱性岩区 (图 2), 而世界上, 除美国加州 Baja 部分样品外, 新生代 adakite 全投影于钙碱性岩区。这正是产于大陆与产于洋岛的 adakite 不同之处, 为此, 张旗等将其分别划分为 O 型与 C 型 adakite 是十分恰当的 (张旗等, 2001)。CaO, MgO 含量与世界上 adakite 基本一致 (图 3)。

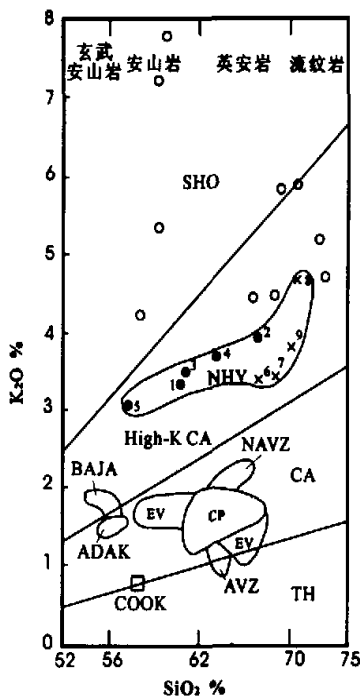


图 2 K_2O-SiO_2 图解

北淮阳 ● 晚侏罗世 (128~133Ma) adakite; × 早白垩世 (128~133Ma) adakite; ○ 早白垩世 (<130Ma) non adakite 资料来源: Cook adakite (Stern *et al.*, 1984); Adak adakite (Kay, 1978); Baja adakite (Saunders *et al.*, 1987); Cerro pampa adakite (CP) (Kay *et al.*, 1993); EI Valle adakite (EV) (Defant *et al.*, 1991); AVZ and NAVZ adakite (Futa and Stern, 1988);

Fig. 2 Diagram of K_2O vs. SiO_2

表 2 北淮阳中生代 adakite 主量(%)和微量元素及稀土元素($\mu\text{g/g}$)分析结果Table 2 Whole rock analyses of major elements (%), trace elements and REE ($\mu\text{g/g}$) of adakites in north Huaiyang block

时代 岩体名称 样品号 序号	晚侏罗世					早白垩世				Adakite 特征值
	程香铺	伏山	苏仙石			楼坊弯	石鼓洼	吴家河	摩顾墩	
	2189-1	2194	S12-1	S22-5	S13-2	2174-1	2176-1	2171-1	2185-1	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
SiO ₂	60.90	67.70	61.22	64.30	57.41	68.22	69.38	70.98	70.62	>56
TiO ₂	0.78	0.55	0.64	0.54	0.73	0.58	0.42	0.35	0.40	
Al ₂ O ₃	18.01	15.03	17.30	15.21	20.39	15.47	14.92	14.92	15.25	≥15
Fe ₂ O ₃	2.38	1.83	2.53	2.45	2.12	1.79	1.63	1.11	0.57	
FeO	2.68	1.84	1.74	2.07	2.23	1.59	1.47	1.14	1.76	
MnO	0.12	0.03	0.10	0.09	0.07	0.04	0.04	0.02	0.02	
MgO	2.09	2.05	1.56	1.65	0.65	1.48	1.48	0.79	1.88	<3
CaO	4.02	2.30	5.13	3.65	6.23	1.93	1.80	1.66	1.43	
Na ₂ O	4.05	3.50	3.34	3.71	3.60	4.75	4.20	4.00	4.05	
K ₂ O	3.20	3.90	3.54	3.64	3.00	3.35	3.40	4.70	3.75	
P ₂ O ₅	0.22	0.19	0.19	0.20	0.25	0.17	0.12	0.12	0.13	
H ₂ O	1.06	0.68	1.11	1.76	1.62	0.98	0.73	0.37	0.46	
总和	99.51	99.60	98.40	99.27	98.30	100.35	99.59	100.16	100.32	
Na ₂ O/K ₂ O	1.27	0.90	0.94	1.02	1.20	1.42	1.24	0.85	1.08	
A/NKC	1.04	1.06	0.93	0.91	1.00	1.03	1.07	1.00	1.15	
La	43.14	53.62	46.36	53.98	51.74	51.65	44.48	36.39	33.42	
Ce	76.60	91.56	79.09	90.39	85.08	92.39	81.24	66.69	56.72	
Pr	7.46	8.58	9.24	10.05	9.73	9.63	8.66	6.76	5.91	
Nd	28.06	32.45	30.11	33.73	33.01	37.63	33.23	26.53	22.06	
Sm	5.85	5.42	5.17	5.53	5.33	6.09	5.53	4.41	3.75	
Eu	1.61	1.24	1.72	1.34	1.77	1.49	1.30	1.12	0.92	
Gd	3.41	3.91	3.79	4.01	3.69	3.75	3.38	2.69	2.61	
Tb	0.40	0.50	0.52	0.59	0.54	0.45	0.39	0.34	0.33	
Dy	2.48	2.81	2.85	3.20	2.71	1.97	1.73	1.50	1.79	
Ho	0.48	0.55	0.58	0.65	0.54	0.34	0.30	0.25	0.34	
Er	1.38	1.53	1.59	1.72	1.39	0.82	0.73	0.64	0.96	
Tm	0.21	0.26	0.26	0.29	0.24	0.11	0.10	0.09	0.15	
Yb	0.42	1.55	0.56	1.77	1.33	0.64	0.58	0.55	0.98	≤1.9
Lu	0.23	0.25	0.25	0.28	0.21	0.09	0.09	0.08	0.16	
ΣREE	171.73	204.23	183.08	207.53	197.31	207.06	181.74	148.06	130.21	
La/Yb	102.71	34.59	82.79	30.50	38.90	80.70	76.69	66.16	34.10	>20
(La/Yb) _N	69.6	23.3	58.8	20.6	26.2	54.4	51.6	44.6	23.0	>10
Eu/Eu*	0.97	0.86	1.19	0.87	1.22	0.96	0.92	0.99	0.93	正异常
δ ¹⁸ O(‰)	11.95	8.39	—	—	—	10.93	10.40	8.04	8.61	
Rb	89	154	112	115	39	85	93	110	90	
Ba	2229	1580	2240	1450	2610	1961	1778	1809	394	
Sr	883	475	693	504	948	882	811	478	449	正异常
Nb	9.6	17.9	10.9	11.1	10.2	8.8	6.5	8.3	7.4	
Zr	324	118	237	192	156	213	130	169	122	
Y	13.9	7.7	15.1	17.9	12.3	9.0	7.5	7.7	8.3	≤18
U	1.67	2.67	—	—	—	1.50	1.70	2.17	2.00	
Th	9.8	16.4	16.1	12.9	14.5	8.1	8.6	9.3	11.1	
Sc	—	—	7.07	3.70	7.32	—	6.21	—	—	<10
Th/U	5.87	6.14	—	—	—	5.40	5.06	4.29	5.55	
Sr/Y	63.5	61.7	45.8	28.2	77.1	98.0	108.1	62.1	54.1	>20-40

资料来源: 1,2,6,7,8,9 据 1:5 万商城幅、达权店幅区调报告(1992); 3,4,5 据杨坤光等(2000);

Adakite 特征值据 Defant MJ *et al.* (1990, 1993)

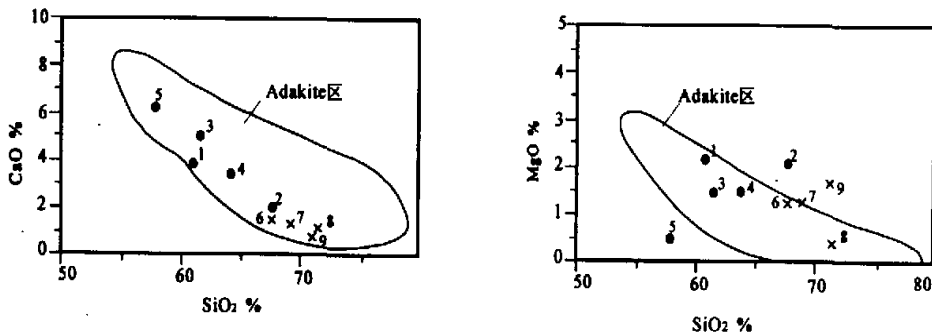


图3 CaO-SiO₂, MgO-SiO₂ 图解(据 Martin, 1999)

Fig.3 Diagrams of CaO vs. SiO₂ and MgO vs. SiO₂(After Martin, 1999)

4.2 岩石稀土元素

北淮阳 adakite 稀土元素含量及某些元素比值见表 2。岩石 LREE 富集, HREE 强烈亏损。Yb < 1.9 μg/g (0.42 ~ 1.77 μg/g), 平均 0.93 μg/g, La/Yb > 20 (30.5 ~ 102.7), 平均 60.8, Eu/Eu* 正异常或轻微负异常, Eu/Eu* = 0.86 ~ 1.22, 平均为 0.99, 总体上不显异常(图 4)。Defant, Martin 等都强调 adakite 的特征之一是 Eu 为正异常, 但在他们所举实例中也不乏存在轻微 Eu 负异常的, 如阿根廷的 Cerro pampa adakites 中 Eu/Eu* 为 0.9 ~ 1.01 (Kay et al., 1993), 类似情况在日本也存在 (Morris 1995)。而非 adakite 花岗岩类一般都具明显的 Eu 负异常, 北淮阳地区非 adakite 花岗岩 Eu/Eu* 均 < 0.7 ~ 0.8 (周秦禧等 1993)。

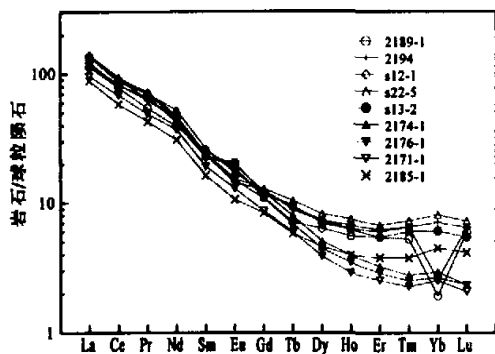


图4 北淮阳 adakite 的 REE 配分模式

(球粒隕石值参考 Taylor & McLennan (1985) 的数据)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of the adakites in North Huaiyang

4.3 岩石微量元素

北淮阳 adakite 某些微量元素含量及元素比值见表 2。岩石 Sr/Y > 20 (28.2 ~ 108.1), 平均为 66.5; Sr > 400 μg/g

(448.5 ~ 948 μg/g), 平均 680.3 μg/g。在 Sr/Y - Y 和 (La/Yb)_N - Y_N 图解上, 投影点全落在 adakite 区(图 5, 6)。在原始地幔标准化不相容元素配分图上总体显示出 Sr 的正异常和 Nb 负异常(图 7)。

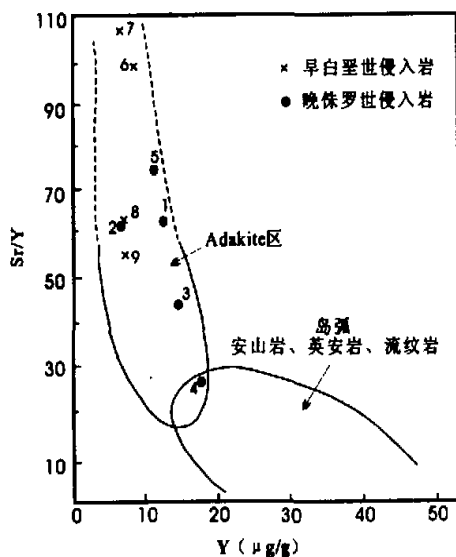


图5 Sr/Y - Y 图解(据 Defant and Drummond, 1993)

Fig. 5 Plot of Sr/Y - Y (After Defant and Drummond, 1993)

Martin (1998) 强调 Ni 和 Cr 的高含量是 adakites 的一个特征。(据 81 个样品统计, 平均 Ni 为 24 μg/g, Cr 36 μg/g), 他甚至认为据此可与岛弧钙碱性岩相区别。但据一些地区 adakite 实际资料, 如西南日本 adakite Ni 平均为 11.5 μg/g, Cr 16.8 μg/g (Morris 1995), 巴拿马 El Valle 火山 adakite Ni 为 7 μg/g, Cr 6.3 μg/g, 而岛弧钙碱性岩 Ni 平均 39.9 μg/g, Cr 38.3 μg/g (Defant et al., 1991), 与 Martin 的结论恰恰相反。北淮阳 adakite 的 Ni 为 6.7 μg/g, Cr 15.1 μg/g, 也并不高。

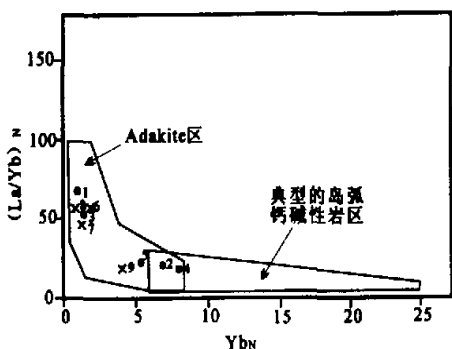


图6 $(La/Yb)_N - Yb_N$ 图
Fig. 6 Graph of $(La/Yb)_N$ vs Yb_N (After Martin, 1999)

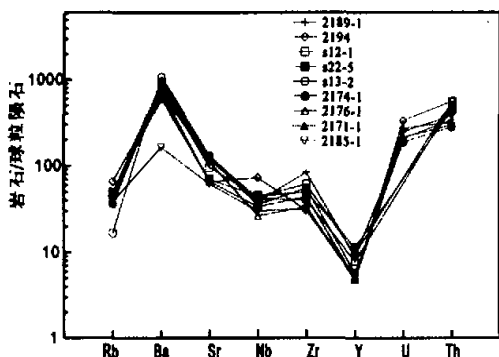


图7 原始地幔标准化不相容元素配分图解
Fig. 7 Primitive mantle-normalized distribution patterns of incompatible elements for the adakites in North Huaiyang block

事实上, Ni、Cr 的高含量主要出现在富镍的 adakite 型安山岩或英安岩套内 (Smithies *et al.*, 2000, Kelemen, 1995)。

5 成因讨论

目前, 新生代高弧上的 Adakites 被认为是年轻俯冲板片以小角度俯冲, 并在角闪岩相—榴辉岩相过渡带发生板片部分熔融作用形成 (Defant and Drummond 1990, 1993; Martin 1999; Defant *et al.*, 1991; Kay *et al.*, 1993; 王焰等, 2000), 或是由热点—底侵的玄武质地壳部分熔融形成 (Aatherton *et al.*, 1993; Petford *et al.*, 1996; Martin 1999)。对于第一种成因假说, 有人认为并未得到实验岩石学的完全证实, 因为当角闪岩在 2.0GPa 下脱水熔融至 10%~15% 时, 虽然 REE 含量与 adakite 相似, 但 adakite 所特有的高 Sr/Y 比并未出现 (Sen *et al.*, 1994)。此外, 一些研究者对

某些地区 adakite 研究后认为, adakite 并不是形成于俯冲阶段, 而是在碰撞或碰撞后背景下形成的 (Kay *et al.*, 1993; Sajona *et al.*, 2000)。

北淮阳 adakite 产于大别山陆—陆碰撞造山带的碰撞后抬升阶段 (150~130Ma), 显然无法用岛弧上俯冲板片部分熔融解释。而有可能与下地壳玄武质成分部分熔融有关。据最新的大别山造山带地震测深资料, 地壳厚度由扬子板块下方的 35.5km 增加到北淮阳南界晓天下方的 41.5km, 自晓天往北, 地壳厚度由 37km 减少到 35km, 即目前北淮阳带地壳厚度在 37~41.5km 之间 (王榕鏞等, 1997)。考虑到三叠纪, 尤其是侏罗世以来, 北淮阳带抬升剥蚀作用相当强烈, 因此在侏罗纪时地壳厚度可能接近 45~50km (杨坤光等, 1999; 潘国强等, 1997), 这种加厚的陆壳可能是幔源玄武质岩浆底侵作用造成的。底侵的玄武质岩浆不仅带来热源, 使地壳温度增大, 而且在陆壳厚度达到 40~50km 时, 其静岩压力相当于 1.2~1.5GPa。在高压作用下, 玄武质地壳 (相当于角闪岩相/榴辉岩相过渡带) 发生部分熔融, 在 10%~40% 脱水熔融下可以熔出 adakite 熔体, 其残留相为石榴石和辉石, 而不含斜长石, 形成 adakite 特有的富 Al、Sr, 亏损 HREE 和无 Eu 异常等地球化学特征 (Rapp *et al.*, 1991, 1995; 熊小林等, 2001; 张旗等 2001)。根据北淮阳 adakite 的 Sr/Y 和 La/Yb 比可大致估算出玄武质地壳在高压下有 10%~20% 熔出量 (图 8) (Sajona *et al.*, 2001)。

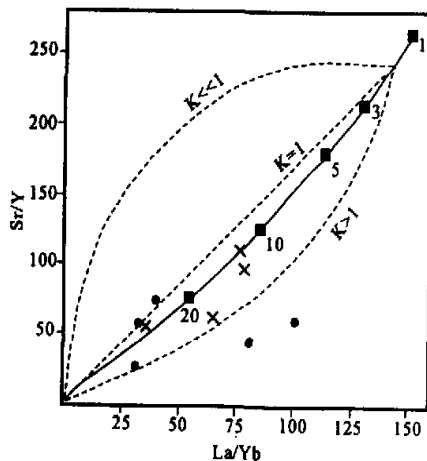


图8 Sr/Y—La/Yb 图解
Fig. 8 Plot of Sr/Y vs. La/Yb of adakites from North Huaiyang block

北淮阳 adakite 的 $\delta^{18}O$ 在 8.04~11.95‰, 平均为 9.72‰ (见表 2), 岩石高 $\delta^{18}O$ 的出现表明其在演化中不是单一的结晶分异过程 (FC), 而是有陆壳物质的混染, 因此是一个结晶分异与同化混染的联合作用过程 (AFC)。在 Sr/Y—Y 图上, 显示出陆壳物质的混染量可能达到 15%~30% 以上 (Stern *et al.*, 1996) (图 9)。Adakite 形成过程中的 AFC 作用, 在已

研究过的世界上若干地区 adakite 中经常可见 (Defant *et al.*, 1991; Kay *et al.*, 1993; Stern *et al.*, 1996; Castillo *et al.*, 1999), 我国长江中下游的 adakite 型月山岩体也具有与北淮阳类似的 AFC 过程, 正是由于同化了围岩中高 $\delta^{18}\text{O}$ 岩石, 使演化中岩浆的 $\delta^{18}\text{O}$ 随 AFC 过程进行而增高 (周涛发等, 2001)。

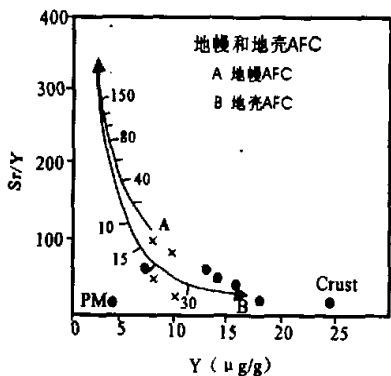


图 9 Sr/Y-Y 图解

Fig. 9 Plot of Sr/Y vs. Y

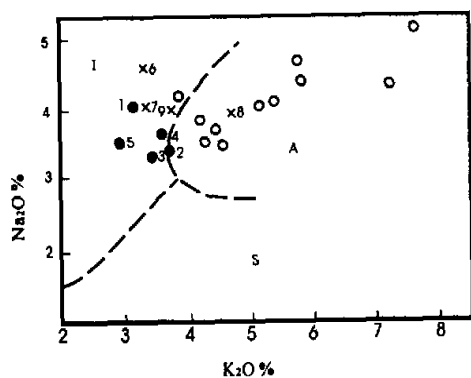


图 10 花岗岩成因类型划分 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解 (据 Collins 等, 1982)

○ <130Ma 的非 adakite 侵入体

Fig. 10 K_2O vs. Na_2O diagram of genetic types of granites (After Collins *et al.*, 1982)

北淮阳 adakite 按花岗岩成因类型划分基本上属 I 型, 这与其所含磁铁矿+榍石+磷灰石+锆石副矿物组合及岩石化学 $\text{A/NKC} < 1.1$ 等特征是一致的。岩石中未见钛铁矿与富铝矿物, 也证明其物质来源较深, 不可能为上地壳沉积物, 而极有可能为下地壳玄武质成分部分熔融物质。在北淮阳地区, adakite 形成之后侵入的诸多花岗岩体, 如汞湾-鲍冲岩体 (GW)、西汤池岩体 (XT)、河棚岩体 (HP)、龙眠寨岩体 (LMZ)、华盖山岩体 (HG)、响洪甸岩体 (XH) 等基本上都属 A 型岩体 (图 10), 而且不具 adakite 的地球化学特征。

北淮阳 adakite 形成时期正是大别山造山带快速抬升时期, 快速抬升作用给予造山带后缘的北淮阳带的侧向挤压是明显的, 使其形成了一个晚侏罗世至早白垩世早期相对挤压的构造环境, 从而使此时产生的 adakite 具有钙碱性岩系的基本特点。Adakite 形成之后, 即从早白垩世晚期开始, 受折沉作用影响, 地壳减薄, 抬升作用的幅度大大降低, 北淮阳带也由相对挤压构造环境转化为相对拉张环境, 岩浆岩系列亦随之由 CA 向 SHO 转变 (潘国强等, 1993)。与岩浆岩系列转变相伴生的是, 从中侏罗世开始至白垩纪, 陆相沉积盆地面积不断扩大, 显示出拉伸作用下伸展盆地的形成与岩浆作用的地球动力学关系。从大别山造山带的抬升早于岩浆活动和伸展作用可间接判别出这些主动型裂陷盆地的发育与热地幔的上隆有关。据研究, 幔源岩浆直接到达地表的不足其总量的 25%, 其余则底侵入下地壳 (Wilson, 1993)。如前所述, 这种成因的加厚陆壳当达到相当厚度时, 是形成 adakite 的重要条件。

致谢: 本文在成文过程中得到中国科学院张旗研究员和南京大学徐士进教授的帮助, 在此一并致谢。

References

- Aatherton MP, Petford N. 1993. Generation of Sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362:144-146
- Castillo P R, Janney PE, Solidum RU. 1999. Petrology and Geochemistry of Camiguin Island, Southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134:33-51
- Defant MJ, Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted Lithosphere. *Nature*, 347:662-665
- Defant MJ, Clark LF, Stewart RH, Drummond MS, de Boer JZ, Maury RC, Bellon H, Jackson TE and Restrepo JF. 1991. Andesite and dacite genesis via contrasting processes: The geology and geochemistry of El Valle volcano, Panama. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 106:309-324
- Defant MJ, Drummond MS. 1993. Mount st. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted Lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21:547-550
- Drummond MS, Defant MJ. 1990. A model for trondjénite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archaean to modern composition. *J. Geophys. Res.*, 95:21503-21521
- Kay SM, Ramos VA and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa Volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *The Journal of Geology*, 101:703-714
- Kelemen PB. 1995. Genesis of high Mg^{2+} andesites and the continental crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120:1-19
- Li Yunan Fu Zhaoren. 1997. Eastward extension of Qinling Group

- and its significance. *Geoscience*, 11(1):125-129 (in Chinese with English abstract)
- Ma Wenpu Liu Wencan Wang Guosheng. 1997, Replacing of Meishan group in north Dabie mountains and its correlation and tectonic implication. *Geoscience*, 11(1):95-101 (in Chinese with English abstract)
- Martin H. 1999. Adakitic magmas; modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46:411-429
- Morris PA. 1995. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and a seismicity in southwest Japan. *Geology*, 23(5):395-398
- Pan Guoqiang Wu Haiquan. 1993. Volcanism in the backland of the Dabieshan collision orogenic belt. In: Li Z and Wang B (eds.) *Volcanic Rocks, Volcanism and Related Mineral Resources*. Beijing: Geological Publishing House, 45-51 (in Chinese with English abstract)
- Pan Guoqiang Zhao Lianzhi, Xia Mulin. 1997. Tectonic model of the Dabieshan collision orogen and its geological evolution. *Regional Geology of China*, 16(1):43-50 (in Chinese with English abstract)
- Petford N and Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust; the cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6):1491-1521
- Rapp RP, Watson EB, Miller CF. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalities. *Precambrian Research*, 51:1-25
- Rapp RP, Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 Kbar; Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4):891-931
- Sajona FG, Maury RC, Pubellier M, Leterrier J, Bellon H, Cotton J. 2000. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos*, 54:173-206
- Sen C, Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa; Implications for the origin of adakites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117:394-409
- Stern CR, Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123:263-281
- Smithies R H and Champion D C. 2000. The Archaean High-Mg diorite suite; Links to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and Implications for Early Archaean crustal growth. *Journal of Petrology*, 41(12):1653-1671
- Wang Yu. 1994. The tectonic frame work in the northern piedmont area of the Dabie mountains. *Regional Geology of China*, 2:141-146 (in Chinese with English abstract)
- Wang Chunyong, Zhang Xiankang, Cheng Buyun Chen Xuebo, Song Songyan, Zheng Jinhua, Hu Hongxiang, Lou Hai. 1997. Study on the crustal structure of the Dabieshan orogenic belt in China. *Science in China (Series D)*, 27(3):221-226 (in Chinese)
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Wang Jianxin, Zaho Zhenhua, Wang Renjing, Qiu Jiexiang, Xiong Xiaolin. 2000. Determination of adakite-type gray gneiss and its relation with super high pressure metamorphism in north Dabieshan. *Chinese Science Bulletin* 45(10):1017-1024 (in Chinese)
- Wang Yan, Zhang Qi, Qian Qing. 2000. Adakite: Geochemical characteristics and tectonic significances. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2):251-256 (in Chinese with English abstract)
- Wilson M. 1993. Magmatism and the geodynamics of basin formation. *Sedimentary Geology*, 86(1-2):5-29
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenhua, Mei Houjun, Wang Yixian, Wang Qiang, Xu Jifeng, Bao Zhiwei. 2001. The adakite-type Na-rich intermediate-acid igneous rocks and crustal growth from Awulalei of west Tianshan. *Chinese Science Bulletin*, 46(4):281-286 (in Chinese)
- Yang Kunguang, Ma Changqion, Xu Chang hai, Yang Weiran. 1999. The different uplift between north Huaiyang tectonic belt and Dabie orogen belt. *Science in China (series D)*, 29(2):97-103 (in Chinese)
- Zhang Yirong. 1985. The ancient Tongbo-Xinyang ophiolite zone and melanges. *Regional Geology of China*, (13):143-158 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, Yang Jianhui, Wang Yuanlong, Zhao Taiping, Guo GUangjun. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2):236-244 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Faixi, Chen Jiangfeng, Zhang Xun, Li Xueming. 1993. Geochemistry of the North Huaiyang granite-syenite zone and its tectonics implication. *Reviews in Geology*, 41(2):144-151 (in Chinese)
- Zhou Taofa, Yue Shucang, Yuan Feng, Liu Xiaodong, Zhao Yong. 2001. A discussion on petrological characteristics and genesis of Yueshan intrusion, Anhui Province. *Geological Journal of China Universities*, 7(1):70-80 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 李云安, 傅昭仁. 1997. 秦岭群的东延及其意义. *现代地质*, 11(1):125-129
- 马文璞, 刘文灿, 王果胜. 1997. 梅山群的再定位、区域对比和构造含义. *现代地质*, 11(1):95-101
- 潘国强, 吴海权. 1993. 大别山碰撞造山带后缘的火山作用. 见: 李兆熊, 王碧香主编. *火山岩、火山作用及有关矿产*. 北京: 地质出版社, 45-51
- 潘国强, 赵连洋, 夏木林. 1997. 大别山碰撞造山带的构造模型及其地质演化. *中国区域地质*, 16(1):43-50
- 王瑜. 1994. 大别山北麓地区的构造格局. *中国区域地质*, (2):141-146
- 王榕鏞, 张先康, 陈步云, 陈学波, 宋松岩, 郑金涵, 胡鸿翔, 楼海. 1997. 大别造山带的地壳结构研究. *中国科学(D辑)*, 27(3):221-226

- 王强,许继峰,王建新,赵振华,王人镜,邱家骥,熊小林,桑隆康,彭练红. 2000. 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. 科学通报, 45(10):1017-1024
- 王榕,张旗,钱青. 2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义. 地质科学, 35(2):251-256
- 熊小林,赵振华,白正华,梅雪钧,王一先,王强,许继峰,包志伟. 2001. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生. 科学通报, 46(4):281-286
- 杨坤光,马昌前,许长海,杨巍然. 1999. 北淮阳构造带与大别造山带的差异性隆升. 中国科学(D辑), 29(2):97-103
- 张以熔. 1985. 桐柏-信阳古蛇绿岩及混杂堆积. 中国区域地质, (13):143-158
- 张旗,王焰,钱青,杨进辉,王元龙,赵太平,郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236-244
- 周秦禧,陈江峰,张翼,李学明. 1993. 北淮阳花岗岩-正长岩带地球化学特征及其大地构造意义. 地质论评, 41(2):144-151
- 周涛发,岳书仓,袁峰,刘晓东,赵勇. 2001. 安徽月山岩体地球化学特征及成因机理分析. 高校地质学报, 7(1):70-80