

皖南中生代高钾钙碱性埃达克岩 地球化学特征及岩石成因

翁望飞, 支利庚, 蔡连友, 徐生发, 王邦明
(安徽省地质矿产勘查局332队地调院, 安徽 黄山 245000)

摘 要: 皖南晚侏罗世-早白垩世早期酸性岩浆岩产于扬子陆块江南古隆起东段, 岩体类型为花岗闪长岩, 主矿物组合为斜长石+石英+钾长石+角闪石+黑云母, 副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿、钛铁矿。岩石主量元素含量(%)具有高 SiO_2 、 Al_2O_3 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, 低 TiO_2 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 的特征, $\text{A}/\text{CNK} \approx 1.06$, $\sigma \approx 1.97$, 为弱过铝钙碱性系列。稀土元素表现为LREE富集, HREE亏损, 具弱的负Eu异常, 元素Y和Yb($\times 10^{-6}$)含量低, 但具有较高的 Sr/Y 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值; 微量元素表现为富集LILE(Rb、La、Ba、Sr)和亏损HFSE(Nb、Ta、Zr、Y), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i > 0.704$, $\varepsilon_{\text{Nb}} < 0$ 。通过岩石学及地球化学特征分析, 认为皖南晚侏罗世-早白垩世早期酸性岩浆岩为“C”型、高钾钙碱性埃达克岩。晚侏罗世-早白垩世早期, 皖南地区大地构造环境处于由挤压到伸展的转折时期, 埃达克岩浆来源于印支期加厚的下地壳受地幔物质上涌影响而拆层熔融形成。皖南埃达克岩的发现, 可为该地区寻找与之有密切成因联系的Au、Ag、Mo及斑岩铜矿等提供理论依据。

关键词: 埃达克岩; 地球化学特征; 岩浆岩; 中生代; 加厚地壳; 皖南

中图分类号: P581; P588; P591

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2011)02-0098-10

埃达克岩(Adakite)是1990年Defant和Drummond在研究Aleutian(阿留申群岛)的Adak(埃达克岛)新生代火山岩基础上引入地质领域的一个岩石学术语^[1], 它的提出在地学界引起了广泛的关注^[2-13]。2000年, 王焰^[14]、王强^[15-17]、张旗^[18-20]等将埃达克岩引入国内。张旗等在研究中国东部中生代火成岩的基础上, 将埃达克岩划分为“O”型(太平洋及其周边)和“C”型(中国东部中生代火成岩)两类。并认为“O”型埃达克岩由年轻洋壳俯冲熔融形成, 而“C”型埃达克岩的形成则与玄武岩浆底侵到加厚陆壳(>50 km)底部导致下地壳部分熔融有关。对埃达克岩研究运用过程中扩展而来的“C”型埃达克岩, 是近年来我国埃达克岩研究中充满争议性的话题, 焦点集中在Defant和Drummond厘定的埃达克岩概念是否可以扩展? 埃达克岩产出的构造背景是否仅仅局限于年轻洋壳俯冲带? 不同学者对此提出了众多的看法和认识^[21-36]。笔者赞同张旗等学者的理解, “认为埃达克岩的命名只是一种描述性的表述, 不当与其成因及其形成的构造环境联系起来”^[32-33]; “埃达克岩只是一个一般意义上的术

语, 指的是具有埃达克岩地球化学特征的那些岩石, 而没有特定的构造含义”^[12]。

皖南地区作为中国长江中下游成矿带及扬子陆块江南古隆起成矿带的一部分, 前人曾对本区及其周边中生代火成岩体的地球化学特征、构造环境、侵入时代等进行了很多有益的探讨^[37-47], 但论及埃达克岩的文献则较少^[16, 36]。本文从岩体的地质特征、主量元素、稀土及微量元素等方面, 探讨了皖南晚侏罗世-早白垩世早期钙碱性埃达克岩的地化特征、形成机制及地质意义, 以期对皖南乃至中国东部地区中生代埃达克岩的研究及Cu、Au、Mo等多金属矿床的地质勘探提供一些依据。

1 地质概况

皖南地区大地构造位置隶属扬子陆块江南古隆起东段, 涵盖了下扬子地块、江南地块及浙西地块三个构造单元, 主体区域为江南地块的江南造山带和太平褶皱带, 包括历口构造区、障公山隆起区和白际岭岛弧区三个次级构造单元。区内地质构造演化较

收稿日期: 2011-02-21

基金项目: 安徽省国土资源厅公益性地质调查基金项目: 闪里幅(H50E013014)1/5万区域地质矿产调查(2010-g-11)

作者简介: 翁望飞(1980-), 男, 工程师, 硕士, 毕业于西北大学地质学系构造地质学专业, 现从事构造地质及区域地质、矿产调查工作, Email: fiyan@163.com。

为复杂,经历了晋宁、加里东、海西、印支、燕山及喜山期构造运动,不同构造运动时期的沉积特征、岩浆活动、变质变形及成矿作用均各具特色,且后期构造对前期构造形迹多加以叠加改造,其中中生代构造运动表现最为强烈,奠定了现今的构造格局。印支期,江南古隆起自南东向北西挤压造山,在皖南地区发育了一系列逆冲-推覆构造,致使前南华纪(中、新元古代)基底岩系和古生代盖层岩系相互叠置,缩短并隆升造山。燕山期,中国东部地区进入了大陆边缘滨太平洋构造域发展的大陆边缘活动带阶段,地壳构造由挤压造山转变为应力伸展阶段,伴随着区域内北东向断裂的活动,发生了大规模钙碱性岩浆侵入与喷发活动。而晚侏罗世-早白垩世是区内最重要的岩浆活动时期。

依据现有的岩石年龄数据^[37-41],皖南地区燕山期花岗岩类可以划分出两个较大规模的侵入(喷发)幕次,第一幕在130~170 Ma,平均年龄为145 Ma,时代是晚侏罗世-早白垩世早期,岩性为花岗闪长岩,典型岩体有太平、旌德、黟县岩体等(图1);第二幕在109~132.2 Ma,平均年龄123.5 Ma,时代为早白垩世中-晚期,以花岗岩为主,如黄山、九华山、伏岭花岗

岩等。燕山期先后两个幕次形成的花岗岩,在岩性、侵入层位、地球化学特征及构造环境等方面均各不相同,已有学者注意到这两幕燕山期花岗岩的迥异,并进行了相关研究^[41, 45, 48-49]。笔者通过对这两幕花岗岩体地球化学数据分析,认为晚侏罗世-早白垩世早期形成的花岗闪长岩为一套“C”型、高钾钙碱性埃达克岩,发育于由挤压造山到伸展变形这一转折时期,岩浆来源于印支期加厚下地壳在燕山早期的部分熔融;而早白垩世中-晚期的花岗岩则可能为A₂型,产生于造山后的完全伸展环境。下文笔者仅就皖南“C”型埃达克岩的地球化学特征及构造成因详加探讨。

2 岩石地球化学特征

2.1 岩石学及主量元素

2.1.1 岩石学特征

皖南晚侏罗世-早白垩世早期岩浆岩体在TAS图解(图2)中投影显示以花岗闪长岩为主。造岩矿物为斜长石、石英、钾长石,斜长石An编号在30~50之间,属中长石,暗色矿物普遍含有黑云母,角闪石,副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿、钛铁矿。岩

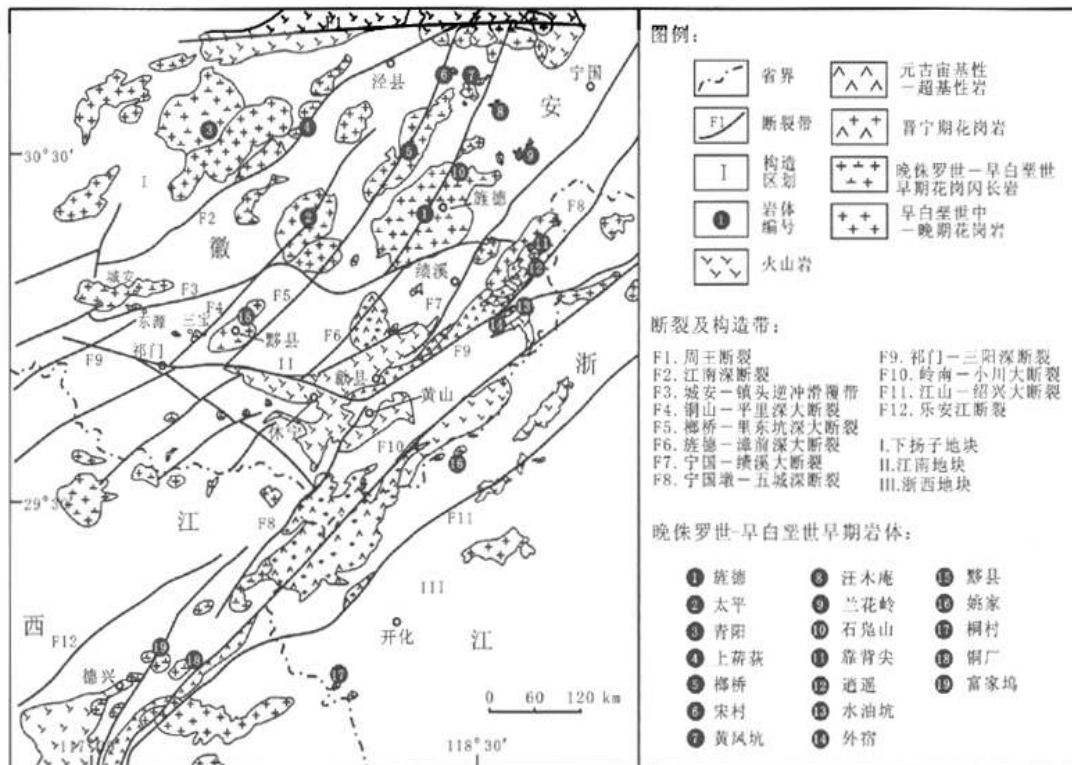


图1 皖南地区构造及岩浆岩分布图

Fig.1 Distribution map of the structure and magmatic rock in south Anhui

元素球粒陨石标准化蛛网图(图5)显示为显著陡右倾型,说明轻、重稀土元素分异明显。岩体Yb元素含量普遍较低,为 $(0.61 \sim 2.16) \times 10^{-6}$,平均 1.53×10^{-6} ,小于 1.9×10^{-6} ; δ Eu值在0.61~1.12,平均0.76,具

弱的负Eu异常; $\epsilon_{Nd} < 0$,平均为 $-8.18^{[40,50-51]}$ 。从元素比值看,La/Yb值较大,为13.82~68.31,平均23.42; $(La/Yb)_N$ 比值亦较高,为9.34~35.14,平均15.35; $(La/Sm)_N$ 比值平均为4.14,表明轻稀土元素

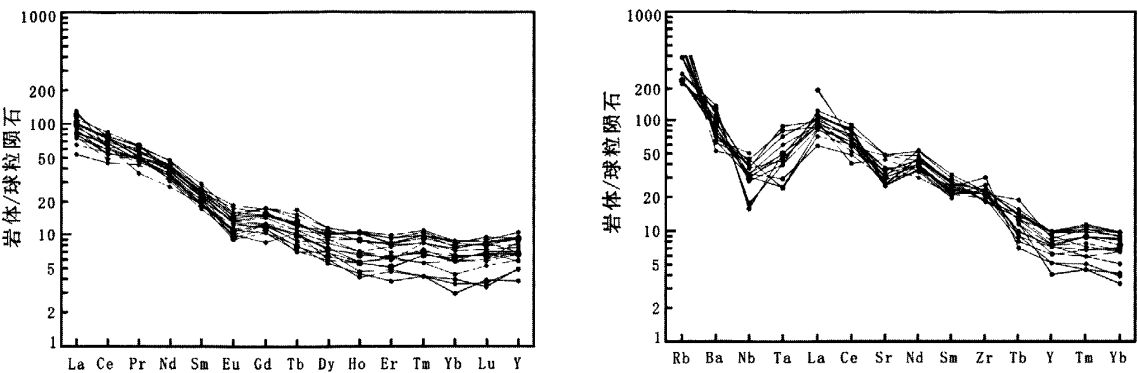


图5 皖南晚侏罗世–早白垩世早期岩浆岩稀土元素及微量元素蛛网图
Fig.5 Spider diagrams of rare earth elements and trace elements of the magmatic rocks of late Jurassic–early Cretaceous in South Anhui

表1 皖南晚侏罗世–早白垩世早期侵入岩主量元素含量(%)

Table 1 Major element content(%) of the intrusive rocks of late Jurassic–early Cretaceous in south Anhui

岩体	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Mg [#]	A/ CNK	σ	资料来源
旌德-1	67.14	0.52	15.59	1.58	2.95	0.07	1.17	3.24	3.40	3.01	0.15	23.53	1.12	1.70	[52]
旌德-2	70.64	0.35	14.26	2.54	0.70	0.07	0.80	2.05	3.56	4.20	0.20	47.00	0.99	2.18	[52]
旌德-1	67.03	0.58	15.48	1.98	2.43	0.13	1.37	3.45	3.25	2.99	0.20	30.43	1.11	1.62	[53]
旌德-2	66.42	0.48	14.73	1.38	2.03	0.07	1.38	2.74	3.33	3.98	0.17	34.53	1.01	2.28	[53]
太平-1	66.38	0.63	15.34	1.55	2.64	0.10	1.64	3.77	3.06	3.52	0.22	32.52	1.03	1.85	[52]
太平-2	68.43	0.50	14.99	2.52	1.52	0.09	1.17	2.97	3.28	3.87	0.26	37.39	1.02	2.01	[52]
太平	68.95	0.48	14.74	0.93	1.85	0.06	1.14	2.94	3.16	3.78	0.15	32.35	1.03	1.86	[48]
青阳	67.79	0.49	15.13	1.67	1.97	0.05	1.25	3.00	2.96	3.61	0.17	32.99	1.09	1.74	[46]
上蒺荻-1	69.11	0.45	15.31	1.77	2.08	0.10	1.11	2.78	3.73	3.50	0.11	29.28	1.06	2.00	[47]
上蒺荻-2	71.66	0.29	14.27	1.55	1.30	0.09	0.75	1.68	3.40	4.15	0.09	30.92	1.05	1.99	[47]
外宿	68.03	0.47	15.48	1.81	1.92	0.10	1.47	2.06	3.27	3.13	0.24	37.27	1.26	1.64	[52]
水油坑	63.48	0.67	16.46	2.00	2.88	0.08	2.16	4.15	3.28	2.49	0.28	36.79	1.17	1.63	[52]
石龟山	68.72	0.48	14.73	1.15	2.33	0.06	1.08	2.91	3.15	4.13	0.16	26.45	0.99	2.06	[53]
宋村	66.96	0.56	14.77	1.57	2.38	0.12	1.66	2.02	3.22	4.10	0.18	35.12	1.08	2.24	[53]
兰花岭	68.21	0.46	15.49	1.03	2.2	0.07	0.99	2.81	3.49	3.42	0.15	25.88	1.10	1.89	[53]
江木庵	66.01	0.59	15.48	1.26	3.03	0.10	1.69	2.97	3.37	3.23	0.20	30.21	1.12	1.89	[53]
黄凤坑	67.00	0.56	15.41	1.10	3.00	0.11	1.37	3.51	3.23	3.00	0.21	26.16	1.10	1.62	[53]
黟县	67.74	0.49	15.12	0.81	3.12	0.08	1.40	3.14	3.25	3.85	0.18	25.83	1.02	2.04	[52]
榔桥	66.91	0.50	15.64	1.59	2.53	0.06	1.32	3.72	3.27	3.64	0.12	28.82	1.02	2.00	[52]
逍遥	65.15	0.55	15.69	1.77	2.43	0.05	1.82	3.20	3.47	3.67	0.16	36.76	1.05	2.30	[52]
犁背尖	64.89	0.59	15.61	1.20	2.94	0.08	1.95	4.17	3.63	3.43	0.13	33.98	0.97	2.28	[52]
姚家	67.35	0.47	15.22	1.91	2.10	0.08	1.09	3.32	3.46	3.43	0.19	28.71	1.03	1.95	[44]
桐村	68.40	0.35	14.73	0.68	1.54	0.04	1.00	2.82	3.47	3.38		33.50	1.05	1.85	[44]
铜厂	63.00	0.43	15.39	2.36	2.69	0.06	2.43	4.15	3.72	3.20	0.25	41.21	0.97	2.39	[44]
富家坞	65.05	0.41	15.74	1.69	2.51	0.11	1.69	3.57	3.88	3.21	0.21	34.32	1.03	2.28	[44]

表 2 皖南晚侏罗世–早白垩世早期侵入岩微量元素含量($\times 10^{-6}$)

Table 1 Trace element content($\times 10^{-6}$) of the intrusive rocks of late Jurassic–early Cretaceous in south Anhui

岩体	V	Cr	Co	Ni	Cu	Sn	W	Zn	Rb	Sr	Zr	Nb	Ta	Mo	Ba	资料来源
旌德-1	45.5	10.5	9.5	7.0	39.5	5.2	13.0	113.5	130.0	345.0		11.6	0.6	2.7	645.0	[52]
旌德-2	34.0	7.0	6.5	6.5	25.5	5.2	7.5	102.5	221.0	227.5		15.8	0.5	2.7	435.0	[52]
旌德-1		10.8	9.3	4.8			2.4		80.9	367.6	154.5	13.2	1.4	0.4	546.0	[53]
旌德-2		27.2	7.5	2.5			2.6		128.8	388.4	158.0	13	0.9	1.1	773.0	[53]
太平-1	96.9		19.7	7.3	7.7	2.3		81.2	250.0	310.4		11.6	1.0	1.8	513.0	[52]
太平-2	75.6		20.6	4.8	9.6	2.2		72.4	227.0	232.5		10.9	0.5	2.9	439.0	[52]
太平									181.0	358.0	148.0	15.4	1.6		367.0	[48]
青阳	52.0	6.1	7.7	9.6	9.6	1.7	1.7	61.0	129.0	437.0	177.0	15.2			507.0	[46]
上杭荻-1	31.5	9.3	4.9	2.2	18.4			43.6	156.4	433.5	134.1	14.0			500.0	[47]
上杭荻-2	30.0	9.3	4.1	6.3	12.6			45.1	165.8	300.3	147.5	17.9			457.0	[47]
外宿			7.6	18.0	65.0	0.9	0.8	206.0	92.0	580.0	125.0	5.6	1.0	2.9	940.0	[52]
水油坑			10.5	21.0	29.0	1.1	0.2	174.0	74.0	570.0	150.0	6.1	0.8	2.9	880.0	[52]
石龟山		8.7	6.4	2.7			2.7		171.4	234.4	127.1	11.4	1.2	1.7	503.2	[53]
宋村		17.6	9.7	9.3			2.1		80.9	562.9	145.6	12.9	1.8	0.3	730.7	[53]
兰化岭		8.6	7.2	4.0			3.0		80.9	360.2	145.8	10.4	1.0	45.0	663.4	[53]
江木庵		15.5	10.1	6.8					80.9	415.1	158.5	9.8	0.8	3.1	683.7	[53]
黄风坑		10.2	9.1	4.8			20.3		80.9	414.4	159.7	10.9	0.9	20.9	598.0	[53]
桐村		167.0		5.5					93.0	516.0	248.0	6.3			836.0	[44]
铜厂		120.0	14.0	32.0	230.0			44.0		679.0	200.0				1100.0	[44]
富家坞			15.0		132.0			36.0	91.0	861.0					1335.0	[44]

表 3 皖南晚侏罗世–早白垩世早期侵入岩稀土元素含量($\times 10^{-6}$)

Table 3 Rare earth element content($\times 10^{-6}$) of the intrusive rocks of late Jurassic–early Cretaceous in south Anhui

岩体	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	资料来源
旌德-1	19.56	42.00	5.80	21.50	4.00	0.87	2.65	0.61	2.30	0.35	1.15	0.15	0.73	0.30	8.10	[52]
旌德-2	23.50	52.50	6.15	24.50	4.50	0.87	3.75	0.59	2.90	0.48	1.55	0.20	1.10	0.39	12.5	[52]
旌德-1	34.88	57.94	8.26	33.59	6.56	1.38	5.33	0.81	4.02	0.87	2.06	0.35	1.94	0.32	19.42	[53]
旌德-2	33.40	63.70	6.44	25.30	4.41	1.07	3.65	0.52	3.19	0.60	1.46	0.30	1.87	0.32	14.40	[53]
太平-1	35.96	72.88	8.40	28.80	5.40	1.22	4.79	0.76	3.71	0.76	2.05	0.33	1.97	0.31	18.98	[52]
太平-2	27.07	55.52	6.54	22.32	4.19	0.95	3.78	0.59	2.81	0.58	1.54	0.26	1.44	0.27	14.72	[52]
太平	29.00	55.50	6.47	24.30	4.45	0.99	3.85	0.51	2.61	0.48	1.51	0.20	1.43	0.23	14.60	[48]
青阳	61.48	58.07	6.56	24.00	4.32	0.97	3.20	0.47	2.11	0.38	0.95	0.15	0.90	0.14	10.13	[46]
上杭荻-1	31.30	60.90	4.92	19.20	4.37	0.79	3.23	0.42	2.26	0.47	1.25	0.23	1.53	0.26	12.20	[47]
上杭荻-2	37.20	70.15	6.93	22.70	4.86	0.82	3.49	0.46	2.44	0.47	1.28	0.23	1.51	0.26	14.30	[47]
外宿	36.00	69.00	6.80	30.00	5.50	1.53	4.90	0.68	4.20	0.75	2.00	0.30	1.80	0.28	16.00	[52]
水油坑	40.00	79.00	8.60	33.00	6.00	1.63	5.20	0.98	4.40	0.88	2.30	0.35	2.10	0.30	17.00	[52]
石龟山	29.91	65.04	7.70	28.70	5.74	1.17	4.60	0.74	3.45	0.60	1.58	0.24	1.43	0.23	17.90	[53]
宋村	32.26	50.27	6.98	27.03	5.08	1.16	4.36	0.65	3.84	0.90	2.47	0.39	2.16	0.33	20.01	[53]
兰化岭	29.43	51.07	6.65	25.44	4.69	1.16	3.89	0.65	3.19	0.60	1.93	0.30	1.63	0.25	15.07	[53]
江木庵	27.77	45.68	6.94	27.42	5.62	1.37	4.65	0.73	3.85	0.87	2.11	0.35	1.95	0.32	19.09	[53]
黄风坑	29.17	50.37	6.94	27.97	5.43	1.29	4.54	0.71	3.91	0.89	2.31	0.37	2.11	0.36	19.49	[53]
榔桥	43.17	74.24	8.64	26.58	5.04	0.95	3.75	0.57	2.88	0.55	1.55	0.25	1.58	0.25	14.04	[52]
逍遥	37.10	72.00	7.37	30.30	5.29	1.12	3.55	0.41	2.71	0.40	1.20	0.15	0.99	0.13	10.4	[52]
靠背尖	30.20	62.90	6.46	30.40	5.16	1.12	3.80	0.59	3.40	0.77	1.72	0.24	1.42	0.22	14.00	[52]
姚家	37.50	71.20	7.82	30.50	5.95	1.30	5.37	0.88	4.38	0.88	2.30	0.35	2.16	0.34	22.20	[44]
桐村	32.10	35.60	4.23	21.80	5.04	0.64	1.96	0.26	1.08	0.31	0.66	0.17	0.86	0.14	10.10	[44]
铜厂	13.64	21.98	3.48	10.29	1.81	0.54	1.21	0.24	1.05	0.22	0.68	0.12	0.61	0.08	5.04	[44]

分馏明显; (Gd/Yb)_n 比值 2.12, 表明重稀土元素分馏不明显。岩浆岩体微量元素表现为富集 LILE (Rb、La、Ba、Sr) 和相对亏损 HFSE (Nb、Ta、Zr、Y), 在微量元素球粒陨石标准化蛛网图上呈现明显的 Nb、Ta、Y 负异常谷 (图 5)。特征元素 Y 含量较低, 为 $(5.04 \sim 22.2) \times 10^{-6}$, 平均 14.77×10^{-6} , 小于 18×10^{-6} ; 富集元素 Sr, 其含量为 $(227.5 \sim 861) \times 10^{-6}$, 平均 429.66×10^{-6} , 大于 400×10^{-6} 。且具有较高的 Sr/Y 比值, 为 $13.1 \sim 134.72$, 平均达 32.99; 较高的 Y/Yb 比值, 为 $5.21 \sim 36.39$, 平均 11.06; 岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 $0.70040 \sim 0.72267$, 平均 $0.70920^{[40, 50-51]}$, 稍大于 0.704。在 Sr/Y-Y 图解及 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ -Yb_n 图解 (图 6) 中, 多数岩体落入埃达克岩区内, 表明皖南晚侏罗世-早白垩世早期花岗闪长岩具埃达克岩性质的稀土与微量元素特征。

2.3 与“O”型及“C”型埃达克岩对比

皖南晚侏罗世-早白垩世早期的埃达克岩地球化学特征与“O”型 (即 Defant 所定义的经典埃达克岩) 及“C”型埃达克岩对比 (表 4), 其主要的地化指标十分近似。岩石主元素 SiO₂、Al₂O₃、MgO 等含量均在埃达克岩的限制范围内; 微量元素及稀土元素显示富集 LILE 和 LREE, 而相对亏损 HREE 及 HFSE, Y 和 Yb 含量较低, 富集 Sr, 且具 Sr/Y、La/Yb 高比值等特征, 符合埃达克岩的地化特征。两者主要区别在于:

(1) “O”型埃达克岩 K₂O/Na₂O 比值比较小, 为 <0.5, 而皖南埃达克岩普遍富 K 贫 Na, 因而其 K₂O/Na₂O 比值相对较大, 平均为 1.05, 这与张旗所提的“C”型埃达克岩相符。高 K₂O/Na₂O 比值也合理地解释了皖南埃达克岩中通常含有一定的钾长石, 而含有 Na 元素

的角闪石含量较“O”型埃达克岩要低。其高 K₂O 特点可能是源区成分的差异、富钾幔源熔体的大量参与和地壳物质混染造成的。

(2) “O”型埃达克岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i < 0.704$, $\epsilon_{\text{Nd}} > 0$, 富含相容元素 Mg (Mg[#] 平均为 71)、Cr (平均 165×10^{-6})、Ni (平均为 125×10^{-6}) 等。而现有资料表明皖南埃达克岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值普遍较大, 平均为 0.7092; ϵ_{Nd} 也多小于 0, 平均为 -8.18; 相容元素含量较低, 其 Mg[#] 平均 32.48, Cr 含量为 30.55×10^{-6} 、Ni 含量为 8.62×10^{-6} 。这明显与“C”型埃达克岩相一致, 分析其原因为“O”型埃达克岩形成过程中受到地幔楔物质的混染, 而皖南埃达克岩则是源自加厚下地壳的部分熔融, 其混染源为中、上壳源物质。

(3) “O”型埃达克岩的熔融残留相为榴辉岩, 而皖南埃达克岩源区残留相为角闪榴辉岩。皖南埃达克岩亏损 HREE 和 HFSE, 表明源区残留相为石榴石, 而 Y/Yb 比值 (平均 11.06) 大于 10, $(\text{Ho}/\text{Yb})_n$ 比值平均为 1.16, 也指示残留相以石榴石为主, 但存在有少量的角闪石; 其稀土元素蛛网图中 HREE 表现为较为平坦的配分模式, 同样表明其残留相中有角闪石存在。这说明皖南埃达克岩来自加厚下地壳的部分熔融, 但是其厚度不大, 深度 (≈ 50 km) 亦不及形成“O”型埃达克岩的地幔楔混染板片熔体 (75~85 km)。

综上所述, 皖南晚侏罗世-早白垩世早期埃达克岩属于“C”型、高钾钙碱性埃达克岩。

3 岩石成因及地质意义

3.1 岩石成因

两种成因类型 (“O”型和“C”型) 的埃达克岩均由

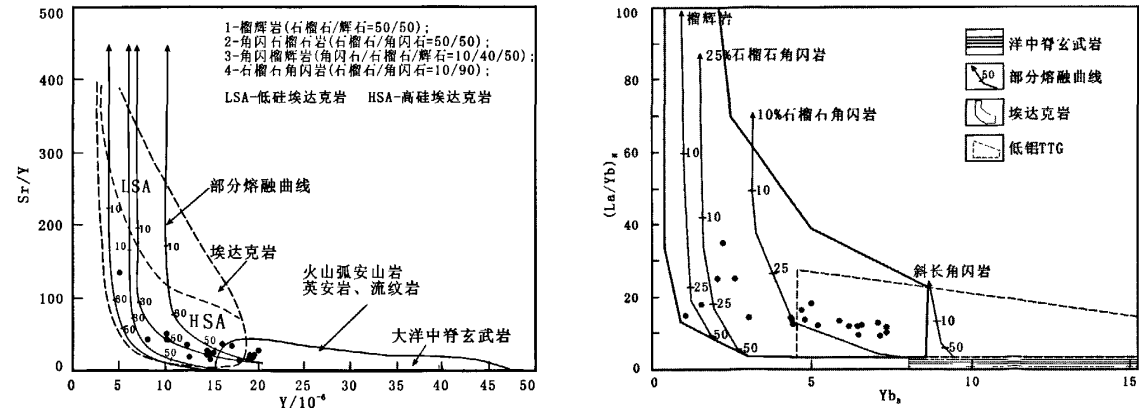


图6 皖南晚侏罗世-早白垩世早期埃达克岩微量元素与稀土元素图解

Fig.6 Trace element and rare earth diagram for Adakite of late Jurassic-early Cretaceous in south Anhui

表4 皖南埃达克岩与“O”型及“C”型埃达克岩地球化学参数对比表
Table 4 Comparison of geochemical parameters between two types
of Adakite and Mesozoic Adakite in South Anhui

地球化学特征	“O”型埃达克岩	“C”型埃达克岩	本文高钾钙碱性埃达克岩
SiO ₂ /%	≥56%	≥ 56%	63~71.66%/Ave: 67.22%
Al ₂ O ₃ /%	≥15%	≥ 15%	14.26~16.46%/Ave: 15.23%
MgO/%	<3%,很少超过6%	<3%	0.75~2.43%/Ave: 1.4%
K ₂ O/Na ₂ O	<0.5	=1或>1或<1	0.76~1.31/Ave: 1.05
Mg*	>50	<50	23.53~47.0/Ave: 32.48
ΣCe>ΣY	LREE 富集	LREE 富集	LREE 富集
Y/10 ⁻⁶	≤18	≤ 18	5.04~22.2×10 ⁻⁶ /Ave: 14.77×10 ⁻⁶
Yb/10 ⁻⁶	≤1.9×10 ⁻⁶	≤ 2×10 ⁻⁶	0.61~2.16×10 ⁻⁶ /Ave: 1.53×10 ⁻⁶
Sr/10 ⁻⁶	>400×10 ⁻⁶	>400×10 ⁻⁶	227.5~861×10 ⁻⁶ /Ave: 429.66×10 ⁻⁶ ;
La/Yb	>20	>20	13.82~68.31/Ave: 23.42
(La/Yb) _N	>10	>10	9.34~35.14/Ave: 15.35
Sr/Y	>20~40	> 20~40	13.1~134.72/Ave: 32.99
Eu 异常	无 Eu 异常 (或有轻微的负 Eu 异常)	≥ 0.6	弱的负 Eu 异常/Ave: 0.76
εNd	>0	< 0, 很少> 0	Ave: -8.18
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	<0.704	> 0.704	Ave: 0.7092
熔融残留相	榴辉岩	榴辉岩/角闪榴辉岩	角闪榴辉岩
混染源	地幔楔	中、上地壳	中、上地壳
混染的结果	Mg、Cr、Ni、Co 增加	LILE、(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)增加, εNd 降低	LILE 富集 (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)>0.704, εNd <0
岩类	岛弧安山岩、英安岩、 流纹岩或英云闪长岩 和奥长花岗岩类	安粗岩、粗安岩、粗面岩, 闪长岩、花岗闪长岩、 石英二长岩、正长岩	花岗闪长岩, 二长花岗岩, 斜长花岗岩和英云闪长岩
岩性	钙碱性, 次为低钾拉斑系列	高钾钙碱性, 次为钙碱性 和橄榄玄粗岩系列	钙碱性

注: “O”型及“C”型埃达克岩参数参照[1, 19, 30, 57]

玄武质岩石在榴辉岩相或角闪岩相向榴辉岩相过渡条件下发生部分熔融形成,因而具有十分相似的地球化学特征。张旗等^[18-20]学者认为,除了年轻洋壳板片俯冲熔融形成埃达克岩外,加厚的下地壳底部基性岩部分熔融也可以形成埃达克岩。这种由加厚地壳部分熔融形成的埃达克岩常常发生在碰撞造山作用的后期阶段,其构造体制处于碰撞期挤压环境转变为碰撞后期拉张环境的转折时期。此时热的软流圈地幔物质受应力状态的改变而上涌,玄武质岩浆底侵至下地壳的底部,由于处于高热状态及地热梯度的增加,促使加厚下地壳底部基性岩发生部分熔融,从而形成“C”型埃达克岩岩浆。可见,碰撞造山地壳增厚是形成“C”型埃达克岩的前提,而应力的转变(挤压-伸展)是其重要的触发条件,地壳增厚产生的火山弧是形成“C”型埃达克岩的主要构造环境。

印支期构造旋回是我国乃至全球挤压造山运动

最为活跃、剧烈的时期。早、中侏罗世,皖南江南古隆起发生自南东向北西的挤压逆冲活动,基底岩系和古生代盖层岩系相互叠置、缩短并隆升。因此有理由相信,在印支期构造挤压造山作用后发生了地壳加厚现象。到晚侏罗世,印支运动逐渐停止,皖南的大地构造环境开始由板内挤压造山转变为伸展变形阶段,而增厚的高密度地壳在软流圈物质上涌减压熔融作用下随即发生拆沉形成埃达克质岩浆,并且伴随着区域内众多北-东向断裂的活动,发生了岩浆的侵入与喷发,从而形成了现今的埃达克岩。国内已有多位学者也关注过中国东部中生代曾经存在过地壳加厚的问题^[54-56],张旗等^[18, 27, 31]研究认为中国三叠纪以来曾经存在过7条大型古山脉和3个古高原,中国东部曾经存在过中侏罗世的湘赣山脉、早白垩世的浙闽山脉以及中侏罗-早白垩世的中国东部高原。湘赣山脉大致从湘东北延伸至赣东北,时

代在 160~171 Ma; 中国东部高原最大范围北起内蒙古赤峰—辽宁彰武, 西抵陕西华县, 南达长江中下游, 东部进入东海之下, 时代从 165~125 Ma。皖南地区即在古湘赣山脉和古中国东部高原范围内, 从岩石年龄上看, 皖南埃达克岩为 >145 Ma, 与古山脉、古高原存在的时间相当。可以推测古山脉、古高原大约在中侏罗世开始整体抬升, 晚侏罗世—早白垩世早期埃达克岩形成时开始发生塌陷, 直至晚白垩世古山脉、古高原完全湮灭消亡。

3.2 地质意义

对于“C”型埃达克岩, 由于其形成于特殊的地壳加厚—拆沉消减的地球动力学背景, 因此有着特殊的地质意义和指示。^①可用于揭示壳幔相互作用的信息, 追踪地质历史上地壳增厚、拆沉作用及其相关事件。皖南埃达克岩的发现, 进一步证实了中国东部地区存在过地壳加厚现象, 其隆升时代应该为早、中侏罗世。通过对中生代活动剧烈的北—东向深大断裂分析看, 其挤压造山的方向是由南东向北西, 这也是地质主应力的方向。随后(晚侏罗世—早白垩世)因应力由挤压转变为伸展变形, 导致发生加厚地壳部分熔融而形成埃达克岩。中国东部埃达克岩发育时限大多在 165~125 Ma, 在 113 Ma 之后没有可靠的埃达克岩发现^[18,27,31], 表明此时曾经存在的中国东部占高原已彻底塌陷, 到晚白垩世中国东部地区开始正式进入大陆边缘滨太平洋构造活动阶段。^②可用于研究埃达克岩与斑岩铜矿及 Au、Ag、Mo 等多金属矿床的成矿联系。国际上 Thieblemont^[8], Oyarzun^[10], Bellon^[11]等统计分析认为在全球规模上, 多数埃达克岩省也是重要的成矿省; 在地区规模上, 多数矿床的主岩为埃达克岩; 在矿区规模上, 当埃达克岩与非埃达克岩共存时, 成矿的主要是埃达克岩。国内张旗等^[28,31]亦对我国主要的斑岩铜矿(如安徽沙溪、黑龙江多宝山、内蒙古乌奴格吐山、新疆乌伦布拉克和土屋、四川西范坪、江西德兴、西藏玉龙等)进行了初步研究, 认为这些斑岩铜矿的成因均与埃达克岩有关。

4 结论

(1) 皖南晚侏罗世—早白垩世早期岩浆岩主量元素具高含量 SiO_2 、 Al_2O_3 , 高 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值, 低含量 TiO_2 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 的特征, 稀土元素表现为 LREE 富集, HREE 亏损, 具低 Y 和 Yb 的特征, 且有较高 Sr/Y 和 La/Yb 的比值, 具弱的负 Eu 异常; 微量元素表现为富

集 LILE (Rb、La、Ba、Sr) 和亏损 HFSE (Nb、Ta、Zr、Y), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i > 0.704$, $\varepsilon_{\text{Nd}} < 0$ 。据岩石地球化学特征分析, 岩体为“C”型、高钾钙碱性埃达克岩。

(2) 皖南“C”型埃达克岩的发现, 表明皖南地区受印支期碰撞造山运动影响而存在过地壳加厚现象。燕山早期时, 皖南地区处于陆内挤压造山转变为伸展变形这一转折时期, 即在此构造背景制约下, 埃达克岩浆来源于印支期加厚下地壳的部分熔融。

(3) 埃达克岩是一种十分有利的成矿母岩, 与 Au、Cu、Ag、Mo 等矿产有着密切的成因联系, 我国及世界上绝大多数的大型—超大型的斑岩铜矿床和浅成低温热液型 Au-Ag 矿床均与埃达克岩有关。埃达克岩有利的成矿作用为皖南地区寻找斑岩铜矿床及 Au-Ag-Mo 等多金属矿床提供了一种新的思路和方向。

参考文献:

- [1] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662-665.
- [2] Drummond M S and Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite adakitic genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. Geophys. Res., 1990, 95: 21503-21521.
- [3] Defant M J and 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.
- [4] Kay S M, Ramos V A and Marquez M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America[J]. The Journal of Geology, 1993, 101: 703-714.
- [5] Drummond M S, Defant M J & Kepezhinskis P K. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas[J]. Earth Sciences, 1996, 87: 205-215.
- [6] Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets O N, et al. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implications for slab melting and pressures in the mantle wedge [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1995, 107: 505-519.
- [7] Stern C R and Killian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. Contrib[J]. Mineral. Petrol, 1996, 123: 263-281.
- [8] Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. Gisements épithermaux et porphyriques: la connexion adakite[J]. Earth Planet Sci, 1997, 325: 103-109.
- [9] Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids[J]. Lithos, 1999, 46: 411-429.
- [10] Oyarzun R, Márquez A, Lillo J, et al. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile:

- adakitic versus normal calc-alkaline magmatism[J]. Mineral Deposit, 2001, 36: 794-798.
- [11] Bellon H, Yumul Jr G P. Miocene to Quaternary adakites and related rocks in western Philippine arc sequences[J]. Earth and Planetary Sciences, 2001, 333: 343-350.
- [12] Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, et al. Adakites: some variations on a theme[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18: 129-142.
- [13] Rapp R P, Xiao L, Shimizu N. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 19: 293-302.
- [14] 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.
- [15] 王强, 许继峰, 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, 46(10): 1017-1024.
- [16] 王强, 赵振华, 熊小林等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 353-362.
- [17] 王强, 许继峰, 赵振华. 一种新的火成-埃达克岩的研究综述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 201-207.
- [18] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中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.
- [19] 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.
- [20] 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): 505-512.
- [21] 钱青. Adakite 的地球化学特征及成因[J]. 矿物岩石学杂志, 2001, 20(3): 297-306.
- [22] 葛小月, 李献华, 陈志刚, 等. 中国东部燕山期高 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.
- [23] 朱弟成, 段丽萍, 廖仲礼, 等. 两类埃达克岩(Adakite)的判别[J]. 矿物岩石, 2002, 22(3): 5-9.
- [24] 董中保, 田伟. 埃达克岩的原义、特征及成因[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 2004, 11(4): 585-594.
- [25] 韩江伟, 熊小林, 吴金花. 埃达克岩的 Na 亏损及其对地幔 Na 交代的指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(3): 381-391.
- [26] 汪洋, 程素华. “C 型埃达克岩”: 一个基于误解的概念[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(3): 284-292.
- [27] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄: 与大火成岩省的关系[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 2009, 16(2): 21-51.
- [28] 张旗, 秦克章, 许继峰, 等. 中国与埃达克质岩有关的矿床分布、找矿方向及找矿方法刍议[J]. 华南地质与矿产, 2004, 2: 1-8.
- [29] 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示[J]. 地质通报, 2008, 27(90): 1404-1430.
- [30] 张旗, 许继峰, 王焰, 等. 埃达克岩的多样性[J]. 地质通报, 2004, 23(9-10): 959-965.
- [31] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. “上山”找金铜, “下山”找钨锡及其理由[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2009, 34(4): 547-568.
- [32] 张旗, 王焰, 王元龙. 埃达克岩与构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(3): 101-108.
- [33] 张旗, 王焰, 刘红涛, 等. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景, 附: 国内关于埃达克岩的争论[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 2003, 10(4): 385-400.
- [34] 张旗. 埃达克岩研究的回顾和前瞻[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 32-39.
- [35] 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.
- [36] 余良范, 杨晓勇, 孙卫东, 等. 埃达克岩与皖中沙溪斑岩铜矿的成矿作用[J]. 中国地质, 2008, 35(6): 1150-1161.
- [37] 周泰禧, 陈江峰, 李学明, 等. 安徽省印支期岩浆活动质疑[J]. 岩石学报, 1988, (3): 46-53.
- [38] 张理刚, 邢凤鸣. 安徽中生代花岗岩铅同位素组成与铅同位素省划分[J]. 岩石学报, 1993, 9(2): 105-114.
- [39] 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 江西中生代花岗岩的 Nd-Sr 同位素研究[J]. 科学通报, 1998, 43(24): 2653-2657.
- [40] 陈江峰, 周泰禧, 李学明, 等. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区锶、钕同位素制约[J]. 地球化学, 1993, (3): 261-268.
- [41] 周涛发, 袁峰, 侯明金, 等. 江南隆起带东段皖赣相邻区燕山期花岗岩类的成因及形成的地球动力学背景[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3): 65-71.
- [42] 赵玉琛. 皖南两花岗岩体的岩石学特征及成矿属性判别[J]. 安徽地质, 1994, 4(4): 31-43.
- [43] 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 皖赣相邻区燕山期花岗岩类构造背景及其意义[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(9): 1130-1134.
- [44] 姜耀辉, 戚建中, 刘红樱, 等. 浙赣皖相邻地区 A₂ 型花岗岩[J]. 火山地质与矿产, 1999, 20(1): 48-55.
- [45] 邢凤鸣, 徐祥. 安徽两条 A 型花岗岩带[J]. 岩石学报, 1994, 10(4): 358-368.
- [46] 邱瑞龙. 青阳岩体微粒包裹体及岩浆动力学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(4): 323-332.
- [47] 钟华明, 姚仲伯, 许卫. 九华山复式杂岩体的构成及主要特征[J]. 安徽地质, 1996, 6(3): 37-47.
- [48] 薛怀明, 汪应庚, 马芳, 等. 高度演化的黄山 A 型花岗岩: 对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄的约束[J]. 地质学报, 2009, 83(2): 247-259.
- [49] 张舒, 张招崇, 艾羽, 等. 安徽黄山花岗岩岩石学、矿物学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 25-38.
- [50] 邢凤鸣, 徐祥. 皖南中生代花岗岩类 Nd, Sr, Pb 同位素特点[J]. 安徽地质, 1993, 3(1): 35-40.
- [51] 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 江南隆起带皖赣相邻区燕山期岩浆岩 Nd-Sr 同位素特征[J]. 地质科学, 2006, 41(1): 133-142.

- [52] 唐永成, 曹静平, 支利庚, 等. 皖东南区域地质矿产评价[M]. 北京: 地质出版社, 2010, 1-64.
- [53] 钱辉, 夏军. 皖南宁国-旌德一带花岗岩地球化学特征及成因[J]. 安徽地质, 2010, 20(3): 183-188.
- [54] 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山深部过程[J]. 地质论评, 2000, 46: 41-48.
- [55] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造-大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996, 1-110.
- [56] 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 等. 论东亚大陆的构造翘变-燕山运动的全球意义[J]. 地质论评, 2000, 46: 8-13.
- [57] 李印, 凌明星, 丁兴, 等. 中国东部埃达克岩及成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 448-464.

Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the Mesozoic Adakite in South Anhui Province

WENG Wang-fei, ZHI Li-geng, CAI Lian-you, XU Sheng-fa, WANG Bang-ming

(332 Geological Team of Anhui Bureau of Geology and Mineral Exploration, Huangshan 245000, China)

Abstract: The Acidic magmatic rocks of late Jurassic-early Cretaceous in South Anhui are indigenous to the eastern part of Jiangnan paleoupift in Yangtze landmass, and the rock type is calc-alkaline granodiorite with the major mineral assemblage being plagioclase+quartz+potassium feldspar+amphibole±biotit and some accessory minerals being apatite, zircon, titanite, magnetite, ilmenite. The magmatic rocks belong to calc-alkaline series with geochemical characteristics of higher SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ and lower TiO_2 , MgO , CaO , P_2O_5 . They are also obviously rich in LREE and LILE(Rb, La, Ba, Sr), and deplete in HREE and HSFE(Nb, Ta, Zr, Y) with slightly negative δEu , higher Sr/Y and La/Yb, lower Y and Yb, and meanwhile $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) > 0.704$, $\epsilon_{\text{Nd}} < 0$. Through the analysis of petrological and geochemical characteristics, the magmatic rocks of late Jurassic-early Cretaceous in South Anhui are "C" type, high-K calc-alkaline adakite(HKCAA), which formed from partial melting of the thickened lower crust by delamination in Mesozoic in eastern China. Discovery of the Adakite in south Anhui can provide theoretical evidence for the exploration of its closely related Au, Ag, Mo and porphyry copper in this area.

Keywords: Adakite; geochemical characteristic; magmatic rock; Mesozoic; thickened lower crust; south Anhui

“中国第四纪地质环境演化及现代过程研究”计划项目 工作会议在津召开

5月31日-6月1日,在天津召开了“中国第四纪地质环境演化及现代过程研究”计划项目第一次工作会议,6个工作项目共计20余人到会。此次会议,是在目标任务已经确定之后的一次统一思想、交流情况的会议,中心金若时主任到会提出贯彻任务书确定的研究目标、力争获得高水平研究成果的期望。

根据加强基础研究的基本思路,此次会议高度重视对基本知识、基本技术规范的培训。围绕国际地科联新近批准的第四纪、晚更新世和全新世下限和层型剖面、晚更新世以来冰期-间冰期转换、氧同位素曲线、海面变化(绝对海面变化、相对海面变化)、千年-百年尺度的事件(如MWP事件)、沉积学和层序地层学、年代学(^{14}C 、 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 、OSL和磁性年代地层学)、沉积相(深覆盖区岩心地层划分及对比、剖面与岩心中的典型沉积特征与相判别、海区声学剖面解译)及地球化学等内容,刘健、王强、魏乃颐、阎玉忠、王福及王宏等做了重点发言。各工作项目负责人分别介绍了各自基本的研究思路、需解决的关键问题和技术难点。沈阳、南京和武汉3个工作项目的年轻人分别就一篇新的研究论文,介绍了读书心得。会后,邀请北京大学周力平就 ^{14}C 和OSL测年结果的对比、天津中心阎玉忠就软体动物鉴定做了学术报告。此外,还就机械全取心钻探、岩心野外编录与保存、综合研究等细节,进行了专门的讲解,并就相关技术规范提出了建议。

天津地质调查中心总工办、海岸带与第四纪地质研究所