卷(Volume) 33 期(Number) 3 总(SUM) 122
页(Pages) 448~464 2009 8(August 2009)

大地构造与成矿学
Geotectonica et Metallogenia

中国东部埃达克岩及成矿作用

李印[1,2], 凌明星[1,2], 邢 军[1,2], 刘健[1,2], 韩峰[1,2], 孙卫东[1]
(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 埃达克岩(adakite)最初是指与俯冲洋壳部分熔融有关的一类高铝的中酸性侵入岩或火山岩。主要地球化学特点有: 高 Sr, 低 Y 和 Yb, 轻重稀土元素强烈分异, 不具有明显的 Eu 负异常, K_2O/Na_2O 比值低。埃达克岩从发现、命名以来, 一直是国际地学界关注的前沿课题之一。埃达克岩研究之所以方兴未艾, 一则是其特殊的地球化学性质, 二则是其成矿专属性。中国东部是目前国内发现埃达克岩最多的地区, 主要为中生代侵入岩和火山岩, 分布在长江中下游区、胶东地区及晋京辽区(或京冀区、东北区)。其中, 长江中下游是重要的铜金多金属成矿带, 胶东是重要的金矿带。目前, 对中国东部埃达克岩成因的解释有四种模式: 加厚古老下地壳的直接部分熔融、底侵玄武质下地壳部分熔融、拆沉下地壳部分熔融以及洋中脊俯冲。埃达克岩与铜金成矿的机制目前的研究还不是很透彻。一般认为埃达克质岩浆富流体、高氧逸度和基性源岩, 这些特点均有利于 Cu、Au 等深源金属元素的萃取与富集成矿。

关键词: 中国东部; 埃达克岩; 成因模式; 成矿机制; 综述
中图分类号: P594 文献标识码: A 文章编号: 1001-1552(2009)03-0448-17

0 引 言

关于洋壳在俯冲过程中是否发生部分熔融曾经有过很多争议。最初一般认为板片熔融产生普通的岛弧火山岩, 后来发现俯冲板片的热结构通常达不到部分熔融的条件(Defant and Drummond, 1990; Peacock, 1990)。但是在特殊的情况下, 俯冲洋壳可以发生部分熔融, 例如前人在阿留申群岛的埃达克岛发现了一类具有特殊地球化学特征的岩石, 经过详细的研究认为其中有俯冲洋壳部分熔融的组份(Kay, 1978)。Defant 和 Drummond 根据俯冲板片熔融产生的埃达克岩与上覆地幔楔相互作用的程度和性质, 提出了埃达克岩-高镁安山岩-玻安岩的一套岩浆系列, 突破了以前单一的以板片脱水产生流体交代地幔楔部分熔融产生岛弧岩浆岩的传统模式(Defant and Drummond, 1990)。

Defant 依据埃达克岩的地球化学特征及推断的岩浆起源条件, 结合俯冲带岩石圈物质结构、热结构及构造岩浆演化, 推测埃达克岩可能起源于板块俯冲的初始阶段(Defant and Drummond, 1990)。自从埃达克岩的概念提出以后, 有关埃达克岩的研究一直是国际地学界关注的前沿课题, 地质学家们以新的视野来重新认识岛弧地区的岩浆作用, 并将埃达克岩的研究从新生代火成岩拓展到更古老的岩系, 例如太古宙高铝 TTG(Drummond et al., 1996; Martin, 1999; Rapp and Watson, 1995; Smithies, 2000)。十几年来, 埃达克岩的研究取得了长足的进步, 已经远远超出对埃达克岩本身的研究。尽管由于埃达克岩源区物质的多样性, 学者们不再强调其岛弧的唯一形成环境, 但其形成构造环境的多样性更表明其重要的"岩石探针"意义, 其中包括它与 TTG 的对比及其对地壳形成与演化的意义。对埃达克岩的研究, 有可能识别多种动力学机制, 如俯冲作用、底侵作用、地壳加厚作用、地幔交代作用等, 具

收稿日期: 2008-11-18; 改回日期: 2009-01-08
第一作者简介: 李印(1985-), 男, 硕士研究生, 地球化学专业. 通讯作者: 孙卫东, weidongsun@gig.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有非常重要的地球动力学意义。

2000年初, 埃达克岩的概念被广泛引入国内岩石学研究 (王焰等, 2000; 王强等, 2000; 2001b; 张旗等, 2001a), 随后张旗等在 2001年提出了洋壳熔融形成的 O型和陆壳熔融形成的 C型埃达克岩的分类方案 (张旗等, 2001b; 2001c), 认为 C型埃达克岩的形成可能与新的底侵玄武质岩石的部分熔融有关。赵振华等 (2006) 以新疆北部为研究对象, 发现分布有两类埃达克岩, 一是俯冲型, 形成于早、中泥盆世 – 早石炭世晚期, 第二类是底侵型, 形成于中晚二叠世, 并对两者的地球化学性质、岩石组合以及构造环境进行了对比。随后, 我国学者陆续发表了很多有关埃达克岩的论文 (Wang et al., 2007a; 2007c; 2006b; Xiong, 2006; Xiong et al., 2005b; Xu et al., 2002; 2000; Zhao et al., 2008; 王焰等, 2000; 熊小林等, 2001; 张旗等, 2001a; 2001b; 赵振华等, 2006)。但是中国埃达克岩还存在很多争论。

鉴于此, 本文以国内出露埃达克岩最多的中国东部为例, 总结国内外关于埃达克岩的主要观点, 对中国东部埃达克岩的分布、岩石地球化学特征、成因模式、成矿意义及争议作一总结, 让大家能有一个更清楚的认识。

1　埃达克岩的定义

埃达克岩的名称来源于阿留申群岛的埃达克岛。埃达克岛火山岩系中有一类 FeO^*/MgO 比值低的 Mg质安山岩 (Kay, 1978)。研究认为此类岩石是玄武质俯冲板块 (已变质为榴辉岩或石榴二辉岩) 经部分重熔形成含水英安质熔体。该熔体富含挥发份, LILE, 具高 Sr, 高 Sr/Y, 及高 La/Yb。此类富含挥发份的熔体具有很强的助熔作用, 少量 (约 4%) 上升和大量上覆亏损 LILE 的高温地幔楔橄榄岩 (约 96%) 相互作用, 在 H_2O 不饱和状态下与亏损橄榄岩中橄榄石和斜方辉石处于平衡, 并进一步演化产生岩浆, 喷发形成安山岩 (Kay, 1978)。这种由英安质熔体与橄榄石反应生成的安山岩称为埃达克岩。

Defant和 Drummond以 Kay (1978) 的研究为基础把埃达克岩定义如下: 它是新生代年轻的 ($\leqslant$ 25 Ma) 与俯冲弧有关的洋壳 (榴辉岩相) 重熔形成的火山岩或深成岩, 其特点是 $SiO_2 \geqslant 56\%$、$Al_2O_3 \geqslant 15\%$、MgO 经常 < 3% (很少超过 6%)、低 Y和 HREE, $Y \leqslant 18 \times 10^{-6}$、高 Sr (很少 < 400×10^{-6})、低 HFSE、$I_{Sr} < 0.7040$, 岩相学有变化, 斜长石较多, 角闪石常见, 但富 Mg的斜方和单斜辉石亦常见, 有黑云母、不透明矿物, 常见的矿物组合是斜长石和角闪石 (Defant and Drummond, 1990)。

然而, 目前国际上对于埃达克岩的定义也存在分歧, 原因在于埃达克岩本身并没有特定的或标志性的矿物组合, 主要从岩石的地球化学特点出发, 由此导致部分学者怀疑埃达克岩术语存在的必要性。部分国内学者认为应该遵循埃达克岩来源于俯冲板片熔融的定义, 同时认为中部东部的中酸性侵入岩并不是形成在俯冲环境, 因而不能称之为埃达克岩, 建议改为高 Sr/低 Y型岩石或者高 Ba-Sr花岗岩, 以免造成混乱 (Chen et al., 2003; Ge et al., 2002; 钱青等, 2002)。但是不可否认的是, 国际上主流观点所认为的埃达克岩已经逐步脱离了岩相学而侧重地球化学特点和构造环境; Kay等也指出, 与榴辉岩矿物残留相 (富石榴石和贫斜长石) 平衡的任何安山质和英安质岩浆均是典型的埃达克岩 (Kay and Mpodozies, 2001)。Defant在 2002年也重新解释埃达克岩的定义, 认为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 (Defant, 2002)。

2　埃达克岩的分类

最初埃达克岩是指在板块俯冲环境下热的板片部分熔融的产物 (Defant and Drummond, 1990)。近年来, 底侵的玄武岩和加厚下地壳 (> 40 km) 基性岩熔融形成埃达克质岩的模式也受到普遍的关注 (Atherton and Petford, 1993; Muir et al., 1995; Petford and Atherton, 1996; Xu et al., 2002; 2001; 王焰和张旗, 2001; 王强等, 2001b; 熊小林等, 2001; 张旗等, 2001b; 2001c)。还有一些学者认为同源基性岩浆的分离结晶作用可以产生埃达克质岩 (Castillo, 2002; Castillo et al., 1999; 钱青等, 2002)。此外, 还有玄武质岩浆与陆壳混染及岩浆混合成因的见解 (Chen et al., 2002; Davis et al., 2001; Feeley and Hacker, 1995; Ma et al., 1998; 陈斌等, 2002)。

从其形成的构造环境上, 中国有些学者将埃达克岩分为 O型和 C型。张旗等通过研究中国东部燕山期的中酸性火山岩和侵入岩, 发现大多是陆相的, 产于板内环境, 地球化学指标与环太平洋埃达克岩的 Si、Al、Sr、MgO、Y和 Yb以及 Eu异常的上述指标是一致的 (张旗等, 2001b)。但是与环太平洋的

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

埃达克岩比较, 前者更富 K_2O 和 I_{Sr}, 而 ε_{Nd} 偏低 ($Na_2O/K_2O \geqslant 1$, $I_{Sr} > 0.704$, ε_{Nd}往往小于 0) (张旗等, 2002, 2001c)。因此提出其成因与板块的消减作用无关, 而可能是加厚的陆壳底部的基性岩部分熔融形成的。因此, 把埃达克岩分为 O型和 C型的两类: O型埃达克岩与板块的消减作用或玄武岩底侵作用有关, C型埃达克岩则是加厚的地壳底部的中–基性岩部分熔融的产物 (张旗等, 2001b)。王强等也将其分为两种不同成因的类型: Ⅰ型由俯冲年轻 ($\leqslant$25~30 Ma) 板片熔融形成, Ⅱ型由增厚玄武质下地壳熔融形成 (王强等, 2001a)。Chung et al (2003) 和翟明国等 (2004) 把由增厚下地壳熔融形成的中酸性火成岩称为埃达克岩。Gao et al (2004) 把由拆沉下地壳熔融形成的中酸性火成岩称为埃达克岩。董申保等 (2004) 和牛耀龄等 (2005) 则强调, 仅仅岛弧区由俯冲洋壳熔融形成的中酸性火成岩才能称为埃达克岩。许多学者指出, 由增厚 (或拆沉) 榴辉质下地壳熔融形成的中酸性火成岩由于具有板片形成的埃达克岩类似的元素地球化学特征, 也可以称为埃达克 (质) 岩 (Xu et al, 2002; 侯增谦等, 2003)。

部分学者还依据地球化学成分特征划分对埃达克岩作了进一步的分类, 例如: 张旗把埃达克岩分为六类: (1)典型的埃达克岩: 由俯冲的拉斑玄武岩或 MORB熔融而成; (2)高镁安山岩: 具有很高的 $Mg^{\#}$ 和 Cr, Ni; (3) TTG系列: 以高 Si低 Mg为特征; (4)高钾钙碱性埃达克岩: 具有很高的 K, Na_2O/K_2O 接近 1, 低 Mg, Cr和 Ni; (5)高钾高镁埃达克岩; (6)超钾质埃达克岩: K/Na> 1 (张旗等, 2005, 2004c)。最近, Martin et al (2005) 则依据 SiO_2的含量将埃达克岩分为两类: 一类为高硅埃达克岩 (high-silica adakites, $SiO_2 > 60\%$), 为俯冲板片熔融形成, 并常与地幔楔发生交换作用, 类似于晚太古代的 TTG系列; 另一类为低硅埃达克岩 (low-silica adakites, $SiO_2 < 60\%$), 为俯冲板片熔体交代的地幔部分熔融形成, 类似于赞岐岩 (sanukitoid) 的特征。

综上所述, 到目前所发现的埃达克岩岩石中, 学者们的观点大致可分成两大类, 一是产于岛弧或活动大陆边缘环境; 一是产于陆内环境, 不管其是板片的部分熔融产物、典型岛弧岩浆的分异产物, 还是加厚陆壳的部分熔融或拆沉下地壳的部分熔融的产物。但是要准确地区别上述两种埃达克岩有时是很困难的。国际上的主流观点还是认为只要有合适的物理化学条件, 板片和下地壳熔融都可以形成埃达克岩, 这是埃达克岩形成的主要机制。

3 埃达克岩的岩石学和地球化学特征

埃达克岩的主要矿物组合为: 斜长石+角闪石±黑云母, 单斜辉石和斜方辉石极少, 只在阿留申群岛和墨西哥的高镁安山岩中有所发现 (Kay, 1978; Rogers et al, 1985)。副矿物包括磷灰石、锆石、榍石及钛磁铁矿等, 其含量一般高于典型的岛弧岩浆岩 (Martin, 1999)。与经典的岛弧玄武岩–安山岩–英安岩–流纹岩组合不同, 埃达克岩很少有相关的玄武岩或玄武安山岩相伴生 (钱青, 2001), 如果有, 则与富 Nb玄武岩伴生, 其 LILE也非常富集 (Defant and Drummond, 1990; Sajona et al, 1994, 1993; Wyman et al, 2000)。

埃达克岩的典型地球化学特征如下: 见表 1, $SiO_2 \geqslant 56\%$, $Al_2O_3 \geqslant 15\%$, K_2O/Na_2O 比值低 (< 0.5), 高 MgO、Ni和 Cr, $Mg^{\#}$ [$Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{total})$] 一般大于 0.47, 甚至高达 0.70, 表明俯冲板片的熔融产物与地幔橄榄岩发生了反应 (Kay, 1978; Kay et al, 1993; Martin, 1999; Sajona et al, 1994); 图 1中, 埃达克岩的 REE强烈分异 [$(La/Yb)_N > 10$], Sr含量高 ($400 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$), LREE富集 ($La_N = 40 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$), Y和 HREE含量低 ($Y \leqslant 18 \times 10^{-6}$, $Yb \leqslant 1.9 \times 10^{-6}$), 高场强元素 (HFSE) 亏损。在蛛网图中, 埃达克岩具有明显的 Sr正异常, Eu呈正异常或没有异常, 但一般不具负异常, Sr和 Eu在斜长石中的分配系数远远高于其他矿物, 说明源区残留相中缺少斜长石, 也没有斜长石的分离结晶 (Drummond and Defant, 1990); La/Yb和 Sr/Y很高, K/Rb较低, Y/Yb$\geqslant$10, 由于埃达克岩源区部分熔融的残留相为榴辉岩或石榴角闪岩, 而在角闪石、石榴石和单斜辉石中, Sr的分配系数很小 (分别为 0.058、0.015和 0.2), 而 Y的较高 (分别为 3.2、12.5和 2.0), 因为导致埃达克岩岩浆亏损 Y和 HREE, 并具有高的 La/Yb和 Sr/Y比值 (Drummond and Defant, 1990)。埃达克岩具有负 Nb异常, 但其 Zr和 Ti一般不具有异常, Nb的亏损可能与角闪石的分离有关, 也可能与俯冲板片中存在难熔的含 Ti矿物相有关 (Martin, 1999)。Tatsumi等认为, 俯冲洋壳脱水形成的流体富含 LILE, 但不携带 HFSE, 因此可形成 HFSE亏损的岛弧岩浆, 而俯冲洋壳熔融形成的熔体

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　埃达克岩的典型地球化学特征及实例

Table 1　Geochemical characteristics and examples of typical adakites

	Adak岛	日本岛	菲律宾	安第斯	Cook岛	Mt Burney	Reclus	Lautaro	Viedma	Aguilera	Martin, 2005	Drummond, 1996
SiO_2	59.7	64.01	64.5	59.56	60.81	65.6	66.41	66.7	65.29	63.19	60.53	65.9
TiO_2	0.89	0.45	0.38	0.78	0.79	0.45	0.4	0.56	0.61	0.71	1.03	0.515
Al_2O_3	15.43	16.54	17.95	18.35	18.24	17.89	16.72	16.63	4.07	16.73	16.17	16.99
FeO	1.65	4.04	4.1		3.6	4.05	4	3.63	0.08	4.85	5.61	3.62
MnO	1.89			3.65	0.07	0.09	0.09	0.08	2.28	0.09	0.09	0.07
MgO	4.76	1.93	1.57	4.42	3.83	2.31	1.54	1.99	4.92	2.66	3.67	2.0
CaO	7.48	4.58	5.18	8.54	8.05	5.65	4.58	4.16	3.68	5.49	6.16	4.56
Na_2O	3.69	4.12	4.13	4.51	4.41	4.47	4.19	3.48	1.86	4.17	4.15	4.585
K_2O	2.08	2.05	1.24	0.6	0.59	0.93	1.46	2.12	0.09	2.1	2.17	1.595
P_2O_5	0.39	0.21	0.14	0.29	0.31	0.2	0.18	0.17	0.21	0.24	0.43	0.165
Sum	99.3	97.99	100.19	100.77	100.76	100.12	99.58	99.55	99.86	100.29	100.01	100
La	30.3	23.4	6.5	35.3	31.3	11.4	20.8	30.9	26.9	30.2	30.15	20.085
Ce	70.9	41.6	15	75.7	70	24.6	43.9	61.18	50.4	59.05	78.83	37.84
Nd	39.8	20.8	8.5	28.1	23.6	11.1	22.3	23	18.65	21.2	32.65	19.335
Sm	6.85	2.9		4.2	4.7	2.3	3	3.62	3.5	3.83	5.6	3.015
Eu	1.74	0.77	0.5	1.6	1.63	0.9	0.8	1	1.1	1.2	1.45	0.94
Tb	0.48	0.26		0.64	0.7	1.14	0.4	0.59		0.66		0.335
Dy			1.5								2.35	1.325
Er			1									0.7
Yb	0.62	0.55	0.85	0.99	0.95	1.14	1.15	0.91	0.99	1.29	0.905	0.78
Lu	0.07			0.03	0.37	0.17	0.16	0.16	0.135	0.22	0.125	0.13
Y		15.2	10	6	4.7	7.2	10.5	12	16.5	11.75	11.5	9.15
Sc	8.9	8	9.4	9	9	9	7	10	10.5	13		
Rb	13	51.4	26	3	3	11.7	29	61.7	52.5	59.1	35.5	35.5
Sr	2366	864	464	2003	1894	604.5	532.5	503	604	480.5	1308	768.5
Ba	320	375	240	177	134	296	411.5	557	476	468.8	904	550
Nb		11.6	2	12	11	3	7				8.5	7.4
Ta	0.23	0.7		0.61	0.61	0.29	0.6	0.73	0.62	0.745		0.54
Zr		142	58	122	125	94.2	154.5	141.5	195.5	142.8	148	124
Hf	4.01	3.3		3.3	3.6	2.5	3.6	3.9	4	4.1		3.4
U	0.97	1.9		1.3	1.33	0.6	1.45	1.63	1.75	2.15		0.99
Th	2.88	6.7		4.4	4.4	1.38	6.2	10.83	9.9	11.58		4.01
Cr	161	20	41	76	64	17.5	9	26	26.5	26.3	99	46
Ni	126	9.7	21	65	55		23.75	16	10.5	18.5	61.5	32.5
Co	17		12									14
资料来源	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

资源来源: 1- (Kay, 1978); 2- (Morris, 1995); 3- (Sajona et al, 1994); 4- 10- (Stern and Kilian, 1996); 11- (Martin et al, 2005); 12- (Drummond et al, 1996). 所有数据均取平均值.

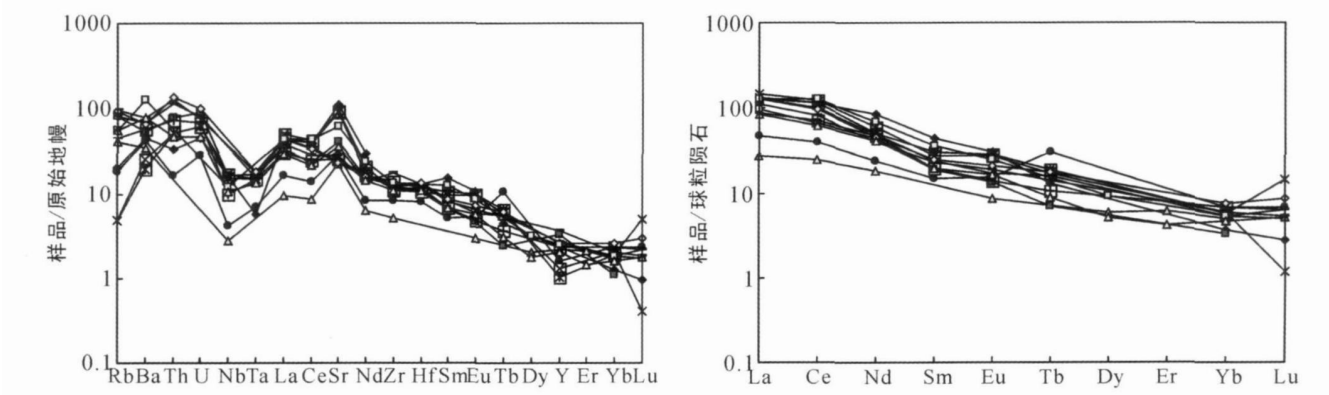


图 1　典型埃达克岩的微量元素和 REE配分图 (数据来源于表 1; 原始地幔和球粒陨石数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 1　Trace element and REE distribution diagram for typical adakites

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

则携带 HFSE (Tatsumi et al., 1986)。埃达克岩的同位素组成类似 MORB ($^{144}Nd/^{143}Nd > 0.5129$, $^{87}Sr/^{86}Sr < 0.705$)。

4 中国东部埃达克岩

4.1 中国东部埃达克岩的分布

中国东部是目前国内发现埃达克岩最多的地区。这些埃达克岩 (埃达克质岩)主要形成于中生代,主要分布在 3个区 (见图 2): 长江中下游区、胶东区及晋京辽区 (或京冀区、东北区)。长江中下游区出露的地区有上海张埝, 江苏安基山、冶山, 安徽滁州琅琊山、铜陵铜官山、老庙基、天鹅抱蛋山、狮子山、白芒山、凤凰山、新桥头、雨山、缪家、鸡冠山、沙滩角、冬瓜山, 安庆月山、沙溪、总铺、洪镇, 江西武山、城门山、铜厂、富家坞、朱砂红, 湖北铁山、阳新、殷祖、灵乡、封山洞等。胶东区: 郭家岭、玲珑、昆仑山等。晋京辽区: 京冀区, 八达岭、矾山、房山、大河南、大海坨、涞源、麻棚、云蒙山、口前、寿王坟、东坪等; 东北区, 安家营子、山岳沟、裴家屯 -旧门、碱厂、大梁顶、都山、肖营子、南猴顶等。此外, 沿郯庐断裂带和徐淮地区也有零星早侏罗世的埃达克岩分布 (张旗等, 2003, 2001b)。

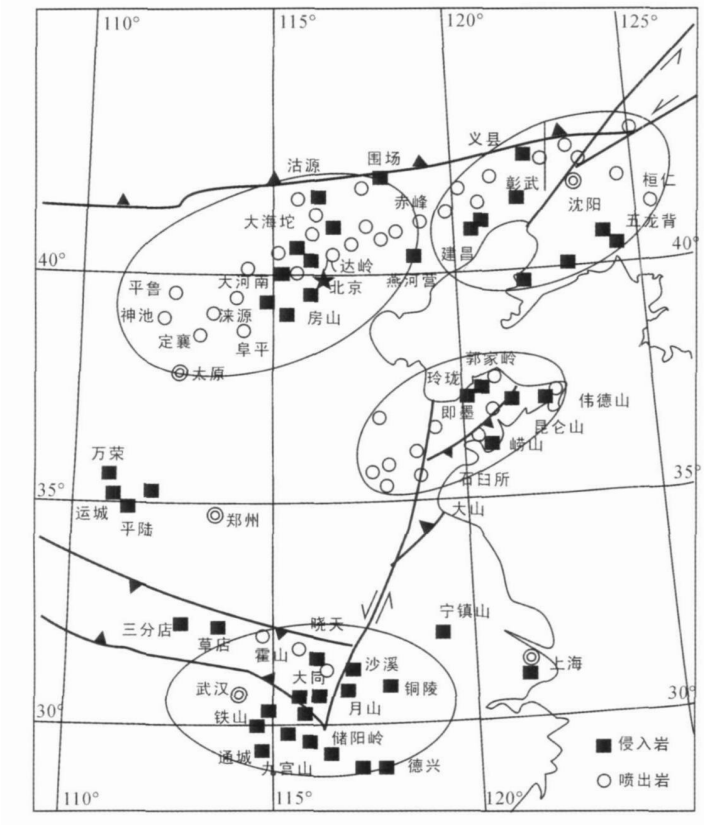


图 2 中国东部埃达克岩的分布 (据张旗等, 2001b修改)

Fig. 2 Distribution of adakites in Eastern China

4.2 中国东部埃达克岩的地球化学特征

图 3和图 4为按照图 1的中国东部埃达克岩分布 (4个区), 收集资料整理出的埃达克岩微量元素蛛网图和稀土配分图, 4个地区虽有差异, 但大体趋势相同: 分配曲线陡倾, 无明显铕异常 - 正铕异常, 富集轻稀土元素, 但强烈亏损重稀土元素, 具有 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti亏损, 无明显 Sr异常 - 正 Sr异常, 高 Sr、低 Y和 Yb含量。

与典型的埃达克岩比较, 中国东部的埃达克岩基本具备上述特征, 只不过更富 K_2O, $^{87}Sr/^{86}Sr$比值较高, 而 ε_{Nd}值较低 (张旗等, 2001b)。张旗解释为: C型埃达克岩产于大陆内部, 可能是玄武质岩浆底侵到加厚的陆壳 (> 50 km) 底部, 促使下地壳中的基性变质岩部分熔融形成, 因而富 K, 但大部分仍然是钠质的, 少数为钾质的。吴福元等 (2002) 归纳了中国东部中生代火成岩与典型的埃达克岩的区别, 指出中国东部的 $(La/Yb)_N$值相对较高; Sr为正或负异常; 主要由高钾钙碱性系列组成, 部分为钾玄岩及钙碱性系列 (国外大多为钙碱性系列); Al_2O_3含量较低 (平均 15.3%, 典型的埃达克岩为 17.1%); $Mg^{\#}$值较低; 具较平坦的 HREE配分模式, Y/Yb比值主要变化于 8~15之间, 平均 12, 接近于球粒陨石 10 (吴福元等, 2002)。

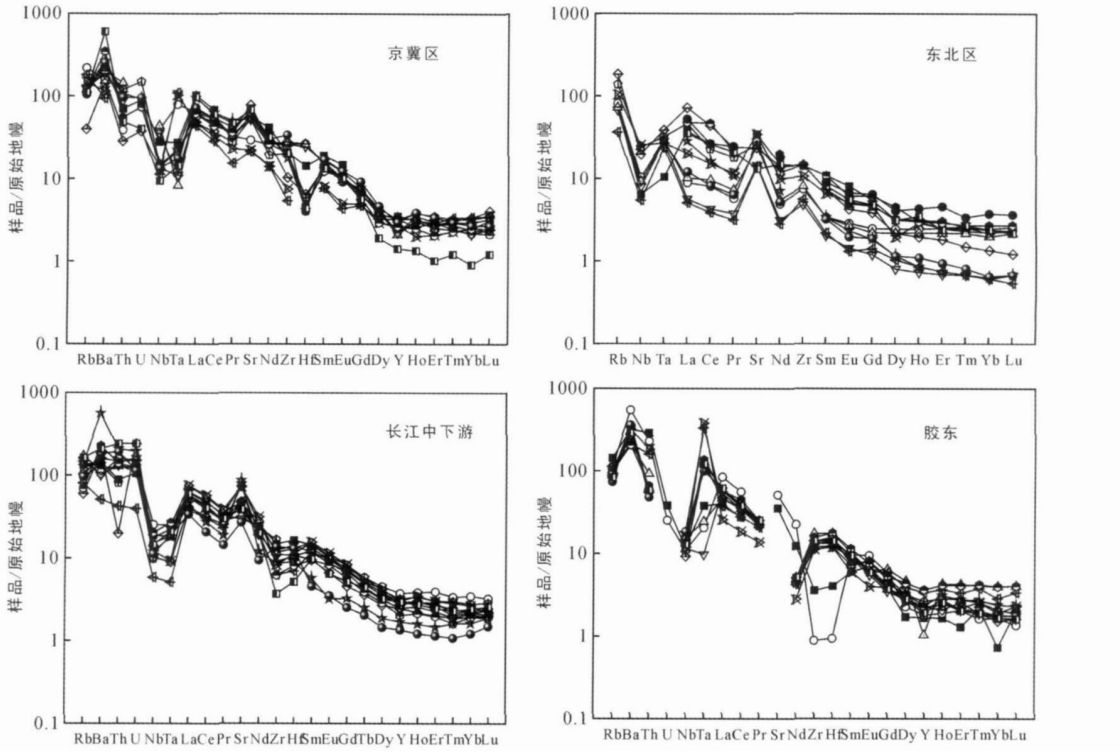
中国东部埃达克岩与典型埃达克岩在 K_2O含量、Al_2O_3含量、$Mg^{\#}$指数和 δSr_N值上的区别的原因比较复杂, 可能与源区组成、部分熔融程度、熔融深度、同化混染、结晶分异 (AFC) 以及深部 (富钾)流体等对下地壳的改造有关 (Rapp and Watson, 1995; Rapp et al., 2002; 张旗等, 2003)。关于此, 学者们争议很大, 目前还没有给出明确的解释, 下文将详细阐述, 以及国内学者根据这些地球化学差异提出的中国东部埃达克岩的成因机制。

4.3 形成机制

4.3.1 实验岩石学的制约

Defant等提出埃达克岩时, 认为埃达克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, 只可能是俯冲的玄武质洋壳熔融的结果 (Defant and Drummond, 1990)。但

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



资料来源: 长江中下游 (Li, 2000; 王强等, 2002; 陈江峰等, 1993); 胶东区 (张华锋等, 2004; 杨进辉, 2000); 冀区 (李承东等, 2004; 蔡剑辉等, 2005; 张旗等, 2001b); 北区 (张炯飞等, 2004; 陈义贤和陈文寄, 1997); 原始地幔数据引自 (Sun and McDonough, 1989)

图 3　中国东部埃达克岩微量元素配分图

Fig 3　Trace element distribution diagrams for adakites in Eastern China

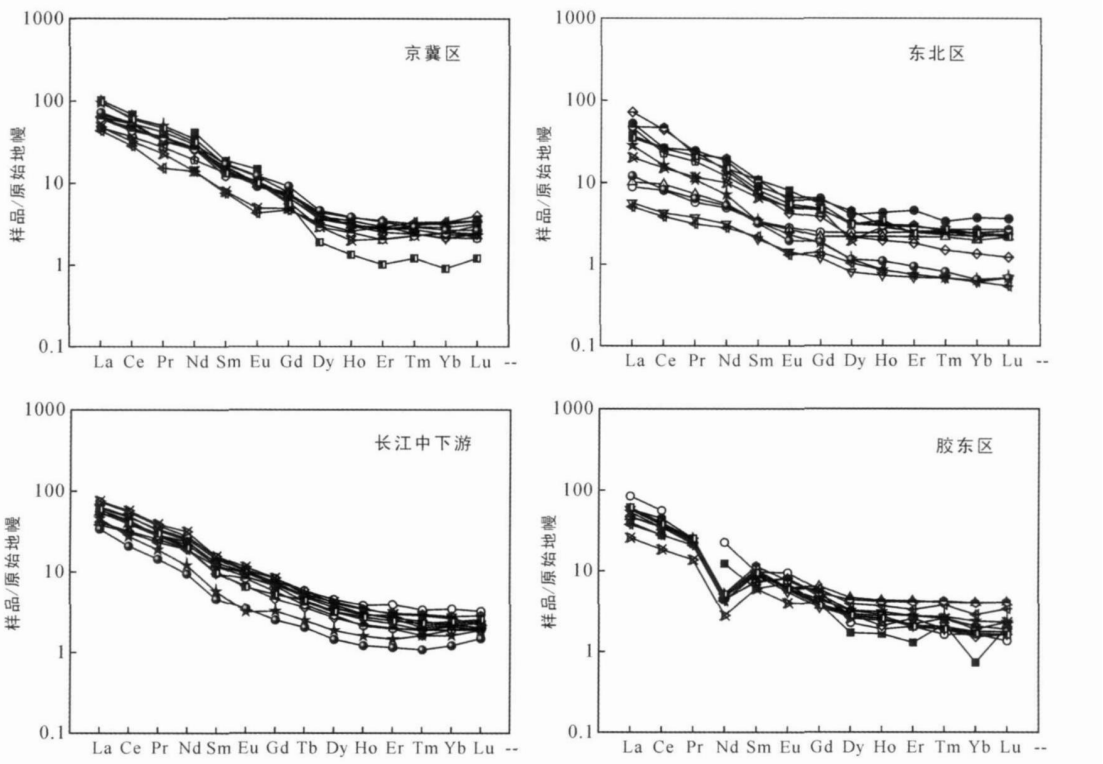


图 4　中国东部埃达克岩 REE配分图 (资料来源同图 3)

Fig 4　REE distribution diagrams for adakites in Eastern China

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

研究表明 (Atherton and Petford, 1993; Muir et al., 1995; Peacock et al., 1994; Petford and Atherton, 1996), 在增厚 (> 40 km) 的下地壳环境中, 底侵玄武质下地壳的熔融也可形成与埃达克岩地球化学特征类似的岩石。而且大量的变玄武岩脱水熔融实验 (Rapp and Watson, 1995)表明: 制约埃达克岩形成的主要因素是源岩、水和地壳结构 (*P-T* 轨迹)。变玄武岩低到中等程度 (10% ~ 40%) 的部分熔融过程中, 含水矿物 (主要是角闪石)脱水反应产生埃达克岩熔体, 残余相组合为石榴石 + 单斜辉石 ± 斜方辉石 ± 角闪石 (没有斜长石)。在俯冲带, 当压力为 1.6~ 2.2 GPa(约 70~ 90 km)和温度为 800~ 1150℃时, 具有高的剪切热速率和非常年轻的 (< 25 Ma)、热的俯冲大洋岩石圈就会发生脱水熔融形成埃达克岩熔体 (Peacock et al., 1994)。在增厚的地壳内, 具有高的热状态的底侵玄武质下地壳在压力 ≥0.8 GPa (> 35 km) 和温度介于 800~ 1100℃之间发生部分熔融形成埃达克质熔体 (Wyllie and Wolf, 1993)。

可见, 符合 Defant定义的埃达克岩的成因类型起码有两种: 俯冲板片的熔融形成; 底侵玄武质下地壳的熔融形成。然而以上实验的初始物质都是富 Na低 K的埃达克岩, 而像中国东部异常富 K的高 Sr/Y 比值花岗岩类, 目前实验岩石学研究的报道不是很多。续海金和马昌前 (2003) 认为中国东部的埃达克岩形成于地壳从挤压向伸展转换的环境, 可能由底侵的富碱玄武岩在 1.0~ 1.5 GPa和 850~ 1080℃条件下发生部分熔融形成, 残留相为辉石岩类。

这里值得一提的是国内学者熊小林的研究, 他的成果对研究达克岩的成因是很重要的, 特别是达克岩成岩的相条件, Nb、Ta等分配数据在国内外有重要影响 (Xiong et al., 2005a, 2005b, 2006)。其研究表明: 在 1.0~ 2.5 GPa和 900~ 1100℃条件下, 金红石在加了 2% 或 5% 水的玄武岩部分熔融过程中, 稳定的压力下限为 1.5 GPa, 主要受控于水的含量和全岩成分 (尤其是 TiO_2 和 K_2O), 证明 Nb和 Ta 的分配系数 DNb和 DTa随着温度的降低而升高, 随着水含量的增加而减小 (Xiong et al., 2005a, 2006)。Xiong et al. (2005a) 认为金红石是控制太古宙 TTG 熔体 Nb-Ta的负异常所必须的残留相。根据金红石出现的最小压力 (1.5 GPa), 推测俯冲洋壳熔融形成的 TTG深度超过 45~ 50 km。Xiong et al. (2005b) 研究表明: 新生代埃达克岩的 Na_2O 含量低于 5.8%, 大约 95% 的新生代埃达克岩样品的 Na_2O含量低于 5%。但是在 1.5~ 3.0 GPa, 实验的玄武岩部分熔体大多数 Na_2O含量超过 5%, 最高达到 9.0%, 表明埃达克岩有明显的 Na亏损现象。Xiong et al. 给出的解释是埃达克熔体在热的地幔楔中与地幔橄榄岩反应的结果。在俯冲带, 大洋板片熔融产生的埃达克熔体上升并与地幔橄榄岩交代, 原始的埃达克岩熔体捕获了 MgO、CaO、Cr、Ni等地幔组分, 但 Na_2O、SiO_2(还可能有 K_2O等)通过反应进入地幔, 导致地幔交代作用。根据长英质熔体与橄榄岩反应体系的相关性, 他们认为, 在适当的温压条件下地幔单斜辉石、橄榄石、尖晶石的混染作用以及钠质角闪石和斜方辉石的分离结晶作用, 是改变埃达克熔体组成并导致 Na亏损的一个重要的过程 (Xiong et al., 2005b)。

Xiao and Clemens (2007) 对埃达克岩富 K提供了实验依据, 认为中生代中国东部 C型或者高 K埃达克质侵入体更像是在压力大于 2 GPa, 温度大于 1050或者可能大于 1075℃, 以及无流体相的情况下, 原岩为变质英云闪长岩、变质安山岩、以及含 K变质玄武岩, 经过较低程度部分熔融 (< 10%) 产生的含水 (~ 6% H_2O) 岩浆生成, 而在稍高温度和熔融程度 (10% ~ 30%)时将产生富 Na埃达克岩 ($Na_2O/K_2O > 1.5~ 2.0$) (Xiao and Clemens, 2007; 肖龙等, 2004)。

4.3.2 中国东部埃达克岩成因模式探讨

中国东部燕山期埃达克岩主要有四种成因模型: (1)加厚古老下地壳的直接部分熔融 (张旗等, 2002, 2001c); (2)底侵玄武质下地壳部分熔融 (王强等, 2001b); (3)拆沉下地壳部分熔融 (Wang et al., 2006b; Xu et al., 2002; 王强等, 2004; 侯增谦等, 2007)等; (4)中生代洋中脊俯冲 (Ling et al., 2009; 孙卫东等, 2008)。

(1) 加厚古老下地壳的直接部分熔融

2001年张旗系统研究了中国东部类似于埃达克岩特征的中酸性火山岩和侵入岩, 发现年代主要为晚侏罗世 – 早白垩世的, 岩石类型以高钾钙碱系列为主, 少数落入橄榄玄粗岩系列和钙碱系列, 主要岩石组合为安粗岩 – 粗面岩 – 粗面安山岩 – 流纹岩; 侵入岩为闪长岩 – 花岗闪长岩 – 二长花岗岩 – 花岗岩。地球化学指标与环太平洋埃达克岩的 Si、Al、Sr、MgO、Y和 Yb以及 Eu异常的上述指标是一致的。但是与环太平洋的埃达克岩比较, 前者更富 K_2O ($Na_2O/K_2O = 0.9~ 1.3$)和 I_{Sr} ($^{87}Sr/^{86}Sr$>

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0. 704), 而 ε_{Nd}偏低 ($\varepsilon_{Nd} < 0$, 很少 > 0) (张旗等, 2002, 2001c)。结合吴福元等 (吴福元等, 2002)的观点: 源岩的 K 含量明显影响派生熔体的 K 含量, 中国东部燕山期埃达克质岩的平均 K_2O 含量为 3. 57%, 表明源岩具有较高的 K_2O, 结合 Sr-Nd 同位素资料, 认为源岩有可能主要来自于富集的岩石圈地幔的熔融, 导致较高的 K_2O 含量和较强烈的稀土元素分馏。

由此, 张旗认为: 中国东部具有埃达克岩特征的火山岩是陆相的, 是陆内岩浆作用的产物, 和板块的削减作用无关, 定义为“C 型埃达克岩”, 其主要特征是高 K (平均 K_2O/Na_2O 小于 1), 认为其源区为富钾的下地壳, 主要由加厚陆壳 (> 50 km) 底部的下地壳中基性麻粒岩部分熔融形成的, 少数可能是底侵的大陆溢流玄武质岩浆或岩石圈地幔中的基性岩部分熔融的产物 (张旗等, 2002, 2001c)。而且, 张旗根据埃达克岩的实验岩石学资料推测: 中国东部燕山中晚期埃达克岩的源区深度至少大于 50 km, 在燕山中晚期中国东部可能形成一个类似于现今青藏高原可以类比的高原 (张旗等, 2001c), 他们首次提出了“中国东部燕山期高原”的概念。

目前对这种认识尚有分歧, 主要因为 C 型埃达克岩具有高 K、高碱特征, 与埃达克岩的原始定义不符, 构造环境也与埃达克岩具有明显差别。而且虽然加厚古老下地壳直接部分熔融可以解释低 ε_{Nd}和高的 Sr同位素, 但是下扬子带的埃达克岩具有高的 MgO 和 $Mg^{\#}$ (侯增谦等, 2007), 暗示埃达克岩浆和地幔橄榄岩之间的交互作用, 这点无法用增厚的地壳模型来解释。更重要的是, 地壳增厚模型也与大地构造和岩石学的研究结果矛盾。从侏罗纪到白垩纪, 中国东部经历了大规模的拉张和岩石圈的拆沉 (Sun et al, 2007a; Wu et al, 2005a, 2005b; Xu, 2001)。从三叠纪到白垩纪的下扬子地区的岩相古地理研究也表明此地区不太可能是增厚环境 (王鸿祯, 1985)。

(2) 底侵玄武质下地壳部分熔融

很多学者认为, 增厚陆壳下的底侵玄武岩部分熔融, 可以形成埃达克岩, 增厚的地壳在伸展过程中, 软流圈上涌产生的热足以使玄武质岩石发生部分熔融 (Atherton and Petford, 1993; Gromet and Silver, 1987; Peacock et al, 1994)。典型的例子有秘鲁的 Blanca侵入岩和火山岩 (Atherton and Petford, 1993), 具有与埃达克岩类似的地球化学特征, 但它们由新底侵的玄武质下地壳熔融形成; 以及埃塞俄比亚西部的 Birbir杂岩 (Wolle and Teoame, 1996), 其源区为底侵的玄武质岩石, 变质程度为石榴角闪岩相, 熔融条件为 800~ 1000℃, 0. 8~ 1. 2 GPa。

此类埃达克岩的同位素具有如下特征: ① $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ = 0. 704~ 0. 708, $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ = 0. 5123~ 0. 5126 (Atherton and Petford, 1993; Muir et al, 1995; Petford and Atherton, 1996), 与洋壳熔融形成的埃达克岩的同位素特征相比, $(^{87}Sr/^{86}Sr)$ 略微偏高、$(^{143}Nd/^{144}Nd)$ 略微偏低, 但有小范围重合; ② 明显不同于洋中脊玄武岩的同位素特征; ③可能受到地壳混染 (Muir et al, 1995)。

王强在沙溪也发现了由玄武质下地壳熔融形成的埃达克岩 (王强等, 2001b), 他们发现沙溪石英闪长玢岩具有高 Al_2O_3、Sr, Sr/Y、La/Yb, 低 Y、Yb, Sr 正异常, Eu 弱负异常 – 正异常, 表现出与埃达克岩类似的地球化学特征, 详见表 2。而且沙溪侵入岩与周边庐枞火山盆地双庙组粗面玄武岩的微量元素及 Nd-Sr同位素组成特征类似, 表明两者来源相似, 都来自古老的富集地幔。提出沙溪侵入岩不是由俯冲的洋壳熔融形成, 而是由出于角闪 – 榴辉岩相过渡区的底侵下地壳岩石熔融形成 (王强等, 2001b)。

底侵玄武质下地壳的熔融可以很好的解释下扬子带埃达克岩高的 MgO 和 $Mg^{\#}$的特征, 即侏罗到白垩纪伸长期间, 玄武质下地壳的底侵为埃达克岩的形成提供了热源, 形成高 $Mg^{\#}$ 埃达克岩浆 (侯增谦等, 2007)。但是埃达克岩通常形成于榴辉岩的部分熔融 (Xiong, 2006), 而底垫的热的玄武质成分阻碍了榴辉岩的生成, 很难形成榴辉岩。所以要形成埃达克岩, 下地壳就必须在底侵之前就是榴辉质的。而且, 此模型不能解释 Pb同位素的特征: 即无法解释富集地幔源区的沉积特征 (Wang et al, 2006b); 也无法解释长江中下游地区的三条岩浆带的时空分布和地球化学成分的变化。

(3) 拆沉下地壳部分熔融

拆沉作用指密度大的岩石圈沉没到密度较小的软流圈之中。现在的拆沉作用只限于盆岭、西藏及安第斯等少数地区。在挤压增厚的地区 (> 50 km), 下地壳玄武质岩石可以转变为榴辉岩相, 发生拆沉作用, 一些与拆沉作用有关的岩浆可能与年轻的、热的俯冲板片熔融产生的岩浆有相似的地球化学特征, 如具有高的 Sr含量和 Sr/Y、La/Yb比值 (Kay et al, 1993)。

Xu et al (2002)首先运用下地壳拆沉模型来解释宁镇安基山的花岗闪长玢岩。首先他们从构造上

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 两类典型埃达克岩与沙溪侵入岩的地球化学特征对比(王强等, 2001b)

Table 2 Geochemical characteristic comparison among two typical adakites and Shaxi intrusive rocks

岩石	俯冲板片熔融成因的 adakites	底侵玄武质下地壳熔融成因的 adakite	安徽沙溪侵入岩
样品数		35	7
SiO_2(%)	≥56.00	56.06~72.48	57.46~61.06
Al_2O_3(%)	≥15.00(很少小于 15.0)	14.53~19.81	14.54~17.45
Na_2O/K_2O	>1.00	1.00~5.57	1.14~3.54
MgO(%)	<3.00(很少大于 6.00)	0.10~2.56	2.13~3.55
Y(ug/g)	≤18.00	2.00~15.00	9~17(1个样品为 19)
Yb(ug/g)	≤1.90	0.07~1.03	0.80~1.73(1个样品为 1.97)
Sr(ug/g)	>400(很少小于 400)	355~1512	490~2182
Sr/Y	≥20.0~40.0	38.1~617.5	28.8~176.1
La/Yb	≥10.0	26.9~142.9	14.1~24.3
Sr异常	正异常	正异常	正异常
δEu	正异常或微弱负异常	≥0.60	0.69~1.12

论证中生代长江中下游处于陆内环境, 而不是俯冲环境: A型花岗岩、陆内镁铁质岩、高钾钙碱性侵入岩和火山岩以及非典型火山岛弧花岗岩的紧密分布说明中国东部在白垩纪时期处于陆内伸展环境(Li, 2000); 而且在宁镇地区发现白垩纪过碱性火山岩, 即响岩和霓石-辉石正长岩, 都否定白垩纪此处处于活动俯冲环境。然后再从地球化学特征上论证: 安基山埃达克质侵入岩具有高的 Sr/Y、La/Yb、低 Y和 Yb以及高 MgO和 $Mg^{\#}$ (0.4~0.6), 说明是板块熔融的产物; 但是低 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-6.8~-9.7)以及高 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值 (0.7053~0.7066) 暗示是陆内板片熔融的产物。较高的 Sr/Y和 La/Yb比值说明在部分熔融的过程中, 榴辉岩稳定的保存在残留相中, 暗示此处在早白垩纪时期地壳厚度至少在 40 km以上, 然而现今宁镇地区的地壳厚度只有 30 km (王谦生, 1992), 也就是说, 在早白垩纪时期地壳至少减薄了 10 km。再结合高 MgO和 $Mg^{\#}$, Xu提出下地壳拆沉模型 (Xu et al, 2002)。

紧接着王强提出鄂东南铜山口花岗闪长玢岩可能也是由拆沉下地壳熔融形成的埃达克岩 (王强等, 2004)。他通过对比鄂东南铜山口花岗闪长玢岩与殷祖花岗闪长岩, 发现铜山口和殷祖侵入岩的元素地球化学特征与埃达克岩的地球化学特征非常类似, 如高 Al_2O_3, Sr含量与 La/Yb、Sr/Y比值, 富 Na_2O ($Na_2O/K_2O>1.0$), 亏损 Y与 Yb, 极弱负 Eu异常-正 Eu异常以及正 Sr异常等。两者也存在明显的差别: 铜山口侵入岩更偏酸性, 具有较高的 K_2O、MgO、Cr、Ni和 Sr含量, 较低的 Y和 Yb含量。轻重稀土元素分异更明显, 前者有明显的正铕异常, 后者极弱负 Eu异常。而且铜山口侵入岩的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ (-5.19~-5.38) 高于殷祖侵入岩的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ (-7.22~-8.67), T_{DM} (1.19~1.21 Ga) 和 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (0.7060~0.7062) 低于后者的 T_{DM} (1.42~1.53 Ga) 和 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (0.7065~0.7074), 这些都说明铜山口埃达克质侵入岩的岩浆来源可能比殷祖埃达克质侵入岩的岩浆来源更深, 前者比后者含有较多的地幔物质或前者可能有新生地幔物质的加入, 据此, 王强等认为前者由拆沉的下地壳熔融形成, 残留物主要含石榴子石; 后者由增厚的下地壳熔融形成, 残留物为石榴子石 ±斜长石 ±角闪石 (王强等, 2004)。

随后, Wang在 2007年又详细诠释了自己的观点, 提出了埃达克岩的增厚或拆沉下地壳部分熔融成因模型以及埃达克岩 Cu-Au成矿机理 (Wang et al, 2007b), 如图 5。侏罗纪之前, 中国东部岩石圈和地壳相对较厚, 大于 40 km。较厚的地壳下部主要由含角闪石的榴辉岩构成, 见图 5(A)中颜色较暗且用右倾斜线填充区域。侏罗-白垩纪, 中国东部增厚的下地壳部分拆沉, 软流圈熔体会随着深大断裂上涌, 如: 痰炉断裂带, 长江, 德兴-益阳断裂带或者十航带, 岩石圈地幔减薄, 如图 5(B)。拆沉的下地壳部分熔融产生埃达克质岩浆, 这些岩浆与周边的地幔橄榄岩交代反应形成混合的 Cu-Au矿化熔浆, 携带亲铜元素至上地壳成矿。图 5(C)是大规模的榴辉岩下地壳和岩石圈的拆沉, 上覆地壳也有图 5(B)中的 Cu-Au矿化带分布。另一种埃达克岩成因模式如图 5(D), 增厚的下地壳没有发生拆沉, 而是热的岩石圈地幔底辟侵入增厚的下地壳, 促使含角闪石榴辉岩相的下地壳发生部分熔融, 形成埃达克质岩浆, 如大别地区, 只有玄武质岩浆的底侵,

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而没有幔缘富集端元的交代混染过程, 从而导致 Cu-Au矿化贫瘠带的形成, 这也解释了为什么大别地区埃达克岩分布集中, 然而矿床分布几乎没有 (Wang et al, 2007b)。

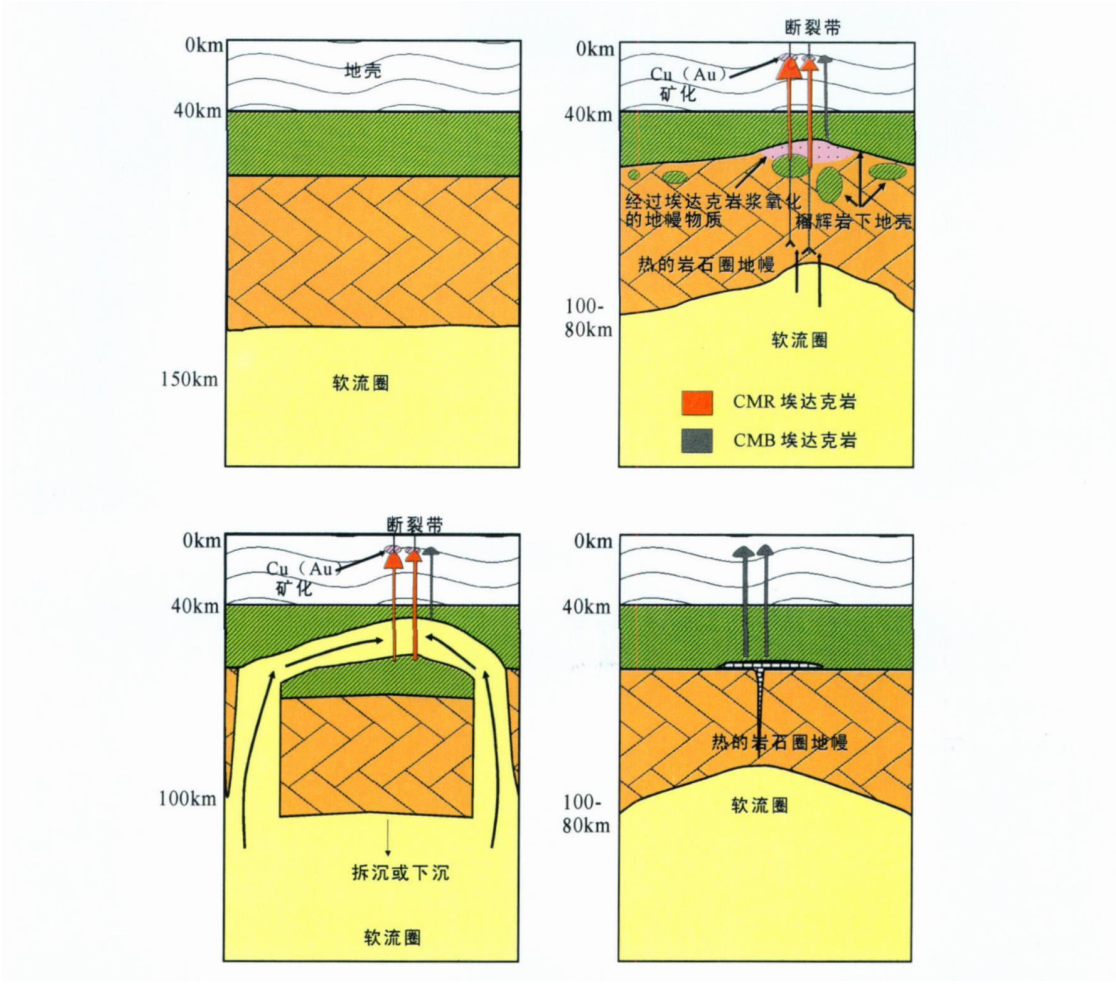


图 5　埃达克岩的增厚或拆沉下地壳部分熔融成因模型 (据 Wang et al, 2007b修改)

Fig 5　Adakite genetic model: the partial melting of thickening or delamination of the lower crust

拆沉下地壳部分熔融可以很好的解释 Mg和 Nd、Sr同位素特征。但是由于拆沉下地壳下沉和板块俯冲都是增压增温的过程, 要发生部分熔融需要升温速度超过增压作用引起的固相线温度升高的速度。俯冲板块在特定的情况下 (如年轻洋壳、低角度俯冲等) 可以发生部分熔融 (Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999; Sajona et al, 1993)。相比之下, 基性的下地壳通常远比俯冲洋壳含水少, 能否在下沉过程中发生部分熔融是一个值得思考和有待实验验证的问题。

(4) 中生代洋中脊俯冲

在 ~ 125 Ma之前, 太平洋板块向南西方向俯冲 (图 6), 而依泽纳吉板块则快速向北北西方向俯冲 (Maruyama et al, 1997; Sun et al, 2007a)。此时, 上述两个板块之间的洋中脊正对着欧亚大陆 (Sun et al, 2007a), 而且漂移方向显示很可能发生了洋中脊俯冲。根据太平洋板块和依泽纳吉板块的漂移历史 (Maruyama et al, 1997), 推测洋中脊俯冲在 125~ 145 Ma间大体指向长江中下游, 并且可能形成过板片窗, 是形成长江中下游成矿带及相关岩体的主要原因。埃达克岩代表俯冲板片的熔体, 通常被认为是俯冲带的岩浆活动产物。考虑到中国东部岩石圈较厚、存在富集组分等特点, 埃达克岩的低 ε_{Nd}、高初始 Sr同位素组成的特点通过少量富集组份的加入来解释: 俯冲洋壳熔融产生的埃达克岩浆在上升的过程中, 与高 Nd/Sm, Rb/Sr和 U/Pb的岩石圈地幔混染所致 (Ling et al, 2009; 孙卫东等, 2008)。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

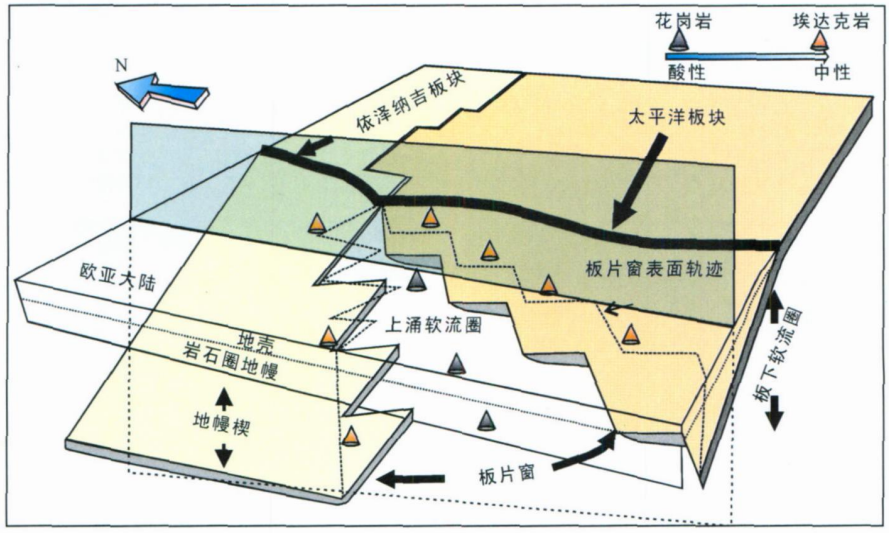


图 6长江中下游地区洋中脊俯冲与板片窗构造示意图(据孙卫东等, 2008修改)

Fig 6 Schematic diagram for ridge subduction and slab window in the middle-lower Yangtze area

可见,上述的四种模式虽然都有各自的依据,但每种模式都还有许多地质现象难以解释。所以,目前对中国东部早白垩世包括埃达克岩在内的火成岩的成岩机制和岩石大地构造解释不是唯一的,有待于进一步探讨的必要。

5 埃达克岩的成矿作用

5.1 中国东部与埃达克岩相关的矿床分布

中国东部与埃达克岩相关的矿床较多,成矿时代主要是晚侏罗世–早白垩世,依旧按照前面划分的埃达克岩分布的四个区来阐述:

中国东北区与埃达克岩有关的矿床达 10个之多,其中大型矿床有 5个:多宝山铜矿、大黑山钼矿、二道甸子金矿、团结沟金矿和甲乌拉银铅锌矿。该区与埃达克岩有关的热液矿床的主要矿种是金和铜,其次为钼、银、铅和锌。矿床类型包括斑岩型、岩浆热液型、浅成低温热液型等,成矿环境大多为火山弧环境,成矿阶段可初步划分为:早古生代中期(510~440 Ma,如多宝山铜矿、白音宝力道金矿)、晚古生代晚期(260~250 Ma,如二道甸子金矿和八道卡金矿)和中生代晚期(180~110 Ma,如大黑山钼矿、小西南岔金铜矿、团结沟金矿和甲乌拉银铅锌矿)(张炯飞等, 2004, 2003)。

冀北区埃达克岩分布集中,多呈规模较大的岩基产出,暗示剥蚀程度较大,不利于成矿,目前仅发现燕山–太行山南段的金矿较有规模。

胶东地区黄金资源丰富,是中国最重要的金矿集中区之一,胶东金矿星罗棋布,从西到东分布着诸如三山岛、苍上、玲珑、焦家、尹格庄、台上、乳山、金牛山、金青顶、马家窑等大型、特大型金矿以及众多的小型金矿床。金矿的分布具有“东西成行,北东成带”的特点,分为 4个金矿带:招掖金矿带、蓬莱–栖霞成矿带、牟乳金矿带和文登–威海金矿带,成矿时代集中在 160~120 Ma(大约 J_3–K_1),成矿类型有两种:石英脉型(玲珑式)和蚀变岩型脉状金矿化(焦家式)(吕古贤等, 2004)。

长江中下游是中国最重要的成矿带之一,目前发现分布有 200多个多金属矿床(Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag),成矿类型主要为矽卡岩型、斑岩型以及层控矿床型,成矿时代集中在 125~140 Ma,如图 8,按地理位置从西到东分为 7个成矿区:(1)鄂东,位于湖北省东部,矿床类型主要为矽卡岩铁矿和斑岩铜矿,典型矿床有程潮铁矿、铜山口以及铜绿山铜矿;(2)九瑞地区,九江–瑞昌,矿床类型为矽卡岩、斑岩和层控铜、金、钼矿,典型矿床有吉隆山、封山洞;(3)安庆–贵池地区,矽卡岩和层控铜、钼矿床,如月山铜矿;(4)庐枞地区,庐江–枞阳,主要侵入岩系铁矿和斑岩铜矿,如罗河铁矿、沙溪斑岩铜金矿床;(5)铜陵地区,主要分布矽卡岩和层控铜、金矿床,如铜官山和狮子山;(6)宁芜地区,南京–芜湖地区,成矿类型有侵入岩系铁矿和矽卡岩系铁矿,典型矿床如姑山、凹山铁矿;(7)宁镇地区,南京–镇江,成矿类型主要为层控铅–锌–银矿和矽卡岩铜–钼矿,如栖霞山和安基山。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5.2 成矿意义

自埃达克岩提出以来,一直受到地质学界的广泛关注,埃达克岩的研究不仅与其所代表的动力学背景有关,还和其潜在的成矿能力有关。Defant (2002) 指出,埃达克岩可以作为找矿标志来使用,埃达克岩和富 Nb岛弧玄武岩对于找金和铜矿可以与金伯利岩找金刚石相媲美。近十年的研究发现不管世界范围内还是中国范围,埃达克岩都和铜金矿床有着密切的关系,比如安第斯,西藏岗底斯等。Thieblemont et al (1997)统计了全球 43个 Au、Ag、Cu、Mo低温热液和斑岩矿床,发现其中 38个与埃达克岩有关。Oyarzun et al (2001) 通过对智利北部斑岩铜矿的研究发现,世界上最大的斑岩铜矿床(如 Chuquicamata,铜金属储量超过 6000万吨)也与埃达克岩有关。Bellon & Yumul (2001)调查了菲律宾 16个斑岩铜矿,其中 14个在时间和空间上与埃达克岩有关。Morozumi (2003)认为蒙古国中部的 Erdanet超大型斑岩铜矿,也可能与埃达克岩有关。张旗等 (2004b)认为中国与埃达克岩有关的三条重要成矿带为古亚洲洋造山带、东北吉黑东部和西藏冈底斯。我国最近发现的一些重要铜金矿床或区(带),如新疆土屋-延东 (Zhang et al, 2006)、冈底斯 (Hou et al, 2006)、云南普朗 (冷成彪等, 2007; 曾普胜等, 2006),也都与埃达克(质)岩有关。我国与铜矿有关的斑岩几乎都具有埃达克岩的地球化学特征。中国东部成矿区,包括长江中下游区,是中国目前最大的 Cu、Au和 Mo矿产地之一 (Wang et al, 2006a, 2006b; 王元龙等, 2003; 汪洋等, 2004; 张旗等, 2004a, 2004b),且矿化大多与埃达克(质)岩关系密切。这些充分表明埃达克岩在成矿作用中的重要性。

目前主要认为埃达克质岩浆富流体、高氧逸度和基性源岩,有利于 Cu、Au等深源金属元素的萃取与富集成矿,因此,这可能是一种潜在的岩浆成矿属性关系,但是对产生这种关系的原因与机制仍然不十分清楚。根据目前的研究可以归纳如下:

(1) 流体/熔体: 流体在 Cu-Au等金属矿床的形成过程中发挥了重要的作用 (Hedenduist and Lowenstern, 1994)。典型埃达克岩形成与 70~90 km的深度,是角闪岩脱水向榴辉岩相转变的过程。此高温高压流体/熔体必然可以携带大量的金属物质和一些金属物质的络合物,如 F、Cl和高的挥发份等。毕竟俯冲过程中携带大量的水而且洋壳本身具有相对高的铜含量。

(2) 高的氧逸度一直是和板块俯冲过程密切相连的。但发现并不是所有的俯冲流体都有成矿能力。有的学者认为 (Mungall, 2002; Oyarzun et al, 2001; 王强等, 2003),板片熔体之所以比流体更具有成矿能力是因为板片熔融过程中带入大量的 Fe_2O_3。Fe_2O_3的加入可以直接氧化地幔楔中的铜金硫化物,从而释放铜金到岩浆熔体中,提高溶体的金属含量。而且高温高压试验表明在上地幔条件下,硅酸盐岩浆的铜金溶解度的确随氧逸度的增加而提高。Sun等 (2007b) 认为 SO_2 的加入对于岛弧成矿的作用更大: 钛磁铁矿结晶过程中岩浆的氧逸度基本保持不变,硫可能是一个重要的氧化还原缓冲剂: 硫酸根被还原为氢硫酸根,金、铜等元素以氢硫酸根络和物的形式被萃取到流体相。岛弧火山岩演化到安山岩时岩浆中金、铜含量大幅度降低,该变化伴随铁、钛由不相容元素变为相容元素-钛磁铁矿结晶 (Sun et al, 2007b)。钛磁铁矿结晶使大量硫酸根被还原为氢硫酸根,岩浆中大量金、铜等元素以氢硫酸根络合物的形式被萃取到流体相,进而形成成矿热液 (Sun et al, 2004, 2007b)。

(3) 至于拆沉的下地壳的部分熔融与成矿: 在下地壳环境中,埃达克质岩浆将通过下列方式产生: 角闪石+斜长石±石英=石榴石+辉石+埃达克质熔体+新生的钠长石,上述反应中,角闪石在高压(1.2~4.0 GPa)、高温(850~1150℃)条件下的分解将产生大量的流体 (Rapp, 1995; Rapp et al, 1999; Sen and Dunn, 1994)。也就是说下地壳玄武质岩石在向榴辉岩转变的过程中将释放出大量的流体,这些流体不仅对产生埃达克质岩浆非常有利,而且对 Cu-Au等金属的富集也非常有利。但是在减薄(< 40 km)地壳环境和低温 (< 850℃) 条件下,角闪石将处于稳定区,流体的产生非常有限,不利于金属矿床的形成 (王强等, 2003)。但是增厚下地壳环境中流体的作用也不能忽视 (王强等, 2001b; 张旗等, 2001b)。

(4) 有的学者认为,不是所有的埃达克岩都是和铜金成矿相关的 (王强等, 2002; 芮宗瑶等, 2006)。

6 结　论

(1) 中国东部是目前国内发现埃达克岩最多的地区,主要分布在 3个区: 长江中下游区、胶东区及晋京辽区(或京冀区、东北区)。长江中下游、胶东、东北区都是重要的铜金等多金属成矿带,冀北区目

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

前仅发现燕山－太行山南段的金矿较有规模, 推测由于该区埃达克岩多呈规模较大的岩基产出, 暗示剥蚀程度较大, 不利于成矿。

(2) 东部埃达克岩成因机制: 有四种成因模式, 加厚古老下地壳的直接部分熔融、底侵玄武质下地壳部分熔融、拆沉下地壳部分熔融、洋中脊俯冲。前三种模式虽然有各自的依据, 但都还有许多地质现象难以解释, 洋中脊俯冲可以更好地解释长江中下游地区早白垩世岩浆岩的成分和空间分布特点。

(3) 成矿意义: 埃达克岩在成矿作用中的重要性不言而喻, 但是埃达克岩与铜金成矿的机制目前的研究还不是很透彻。目前主要认为埃达克质岩浆富流体、高氧逸度和基性源岩, 有利于 Cu、Au等深源金属元素的萃取与富集成矿。因此, 这可能是一种潜在的岩浆成矿属性关系, 但是对产生这种关系的原因与机制仍然不十分清楚, 以及为什么有的埃达克岩有矿, 有的无矿? 这有待于今后深入研究。

致谢: 衷心感谢中国科学院广州地球化学研究所赵振华研究员和中国科学技术大学杨晓勇教授对文章的修改所提出的宝贵意见和建议!

参考文献 (References):

蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 任康绪, 宋彪, 李凤棠. 2005. 北京房山岩体锆石 U-Pb年龄和 Sr、Nd、Pb同位素与微量元素特征及成因探讨. 岩石学报, 21(3): 776－788.

陈斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. 中国科学(D辑), 32(11): 896－907.

陈江峰, 周泰禧, 李学明, Foland K A, 黄承义, 卢伟. 1993. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区锶、钕同位素制约. 地球化学, 22(3): 261－268.

陈义贤, 陈文寄. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩－年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1－279.

侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 2003. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例. 矿床地质, 22(1): 1－12.

侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. 现代地质, 21(2): 332－351.

冷成彪, 张兴春, 王守旭, 秦朝建, 苟体忠. 2007. 云南中旬地区两个斑岩铜矿容矿斑岩的地球化学特征——以雪鸡坪和普朗斑岩铜矿床为例. 矿物学报, 27: 414－422.

李承东, 张旗, 苗来成, 孟宪锋. 2004. 冀北中生代高 Sr低 Y和低 Sr低 Y型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系. 岩石学报, 20(2): 269－284.

吕古贤, 韦昌山, 郭涛, 胡宝群. 2004. 胶东矿集区金矿成矿地质事件研究初探. 黄金地质, 10(2): 1－7.

钱青. 2001. adakite的地球化学特征及成因. 岩石矿物学杂志, 20(3): 297－306.

钱青, 钟孙霖, 李通艺, 温大任. 2002. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别－苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比. 岩石学报, 18(3): 275－292.

芮宗瑶, 张洪涛, 陈仁义, 王志良, 王龙生, 王义天. 2006. 斑岩铜矿研究中若干问题探讨. 矿床地质, 25(4): 491－500.

孙卫东, 凌明星, 汪方跃, 丁兴. 2008. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件. 矿物岩石地球化学通报, 27(3): 218－225.

王鸿祯. 1985. 中国地理图籍. 北京: 中国地图出版社, 143.

王强, 许继锋, 王建新, 赵振华, 王人镜, 邱家骧, 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.

王强, 许继锋, 赵振华. 2001a. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述. 地球科学进展, 16(2): 201－208.

王强, 赵振华, 熊小林, 许继锋. 2001b. 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. 地球化学, 30(4): 353－362.

王强, 赵振华, 许继峰, 李献华, 熊小林, 包志伟, 刘义茂. 2002. 扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite-like)岩与成矿. 中国科学 D辑, 32(S1): 127－136.

王强, 许继峰, 赵振华. 2003. 强烈亏损重稀土元素的中酸性火成岩(或埃达克质岩)与 Cu、Au成矿作用. 地学前缘, 10(4): 561－572.

王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因. 岩石学报, 20(2): 351－360.

王谦生. 1992. 中国东南浙皖地区的区域重磁场特征与地壳构造的研究. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社, 287－294.

王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗杂岩的组成、地球化学特征及其意义. 岩石学报, 17(4): 533－540.

王焰, 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.

王元龙, 张旗, 王强, 刘红涛, 王焰. 2003. 埃达克质岩与 Cu-Au成矿作用关系的初步探讨. 岩石学报, 19(3): 543－550.

汪洋, 邓晋福, 姬广义. 2004. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义. 岩石学报, 20(2): 297－314.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

吴福元, 葛文春, 孙德有. 2002. 埃达克岩的概念、识别标志及其地质意义. 北京: 地质出版社, 172－191.

肖龙, Robert P R, 许继峰. 2004. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约. 岩石学报, 20(2): 219－228.

熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 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, 17(4): 281－287.

续海金, 马昌前. 2003. 实验岩石学对埃达克岩成因的限定——兼论中国东部富钾高 Sr/Y比值花岗岩类. 地学前缘, 10(4): 417－427.

杨进辉. 2000. 胶东地区金矿床成矿时代及其成矿地球动力学背景: 兼论壳幔相互作用与成岩成矿. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1－133.

曾普胜, 李文昌, 王海平, 李红. 2006. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征. 岩石学报, 22(4): 989－1000.

张华锋, 翟明国, 何中甫, 彭澎, 许保良. 2004. 胶东昆嵛山杂岩中高锶花岗岩地球化学成因及其意义. 岩石学报, 20(3): 369－380.

张炯飞, 李之彤, 金成洙. 2004. 中国东北部地区埃达克岩及其成矿意义. 岩石学报, 20(2): 361－368.

张炯飞, 庞庆邦, 朱群, 金成洙. 2003. 试论与埃达克岩有关的热液矿床成因类型和成矿系列——以中国北方若干矿床为例. 地质与资源, 12(3): 171－176.

张旗, 王元龙, 王焰. 2001a. 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. 岩石学报, 17(4): 505－513.

张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001b. 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.

张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001c. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248－255.

张旗, 王焰, 刘伟, 王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义. 地质通报, 21(7): 431－435.

张旗, 王焰, 刘红涛, 王元龙, 李之彤. 2003. 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》. 地学前缘, 10(4): 385－400.

张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004a. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu, Au等找矿工作的新局面. 岩石学报, 20(2): 195－204.

张旗, 秦克章, 许继峰, 刘红涛, 王元龙, 王焰, 贾秀琴, 韩松. 2004b. 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. 华南地质与矿产, (2): 1－8.

张旗, 许继峰, 王焰, 肖龙, 刘红涛, 王元龙. 2004c. 埃达克岩的多样性. 地质通报, 23(Z2): 959－965.

张旗, 李承东, 王焰, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤, 韩松. 2005. 中国东部中生代高 Sr低 Yb和低 Sr高 Yb型花岗岩: 对比及其地质意义. 岩石学报, 21(6): 1527－1537.

赵振华, 王强, 熊小林, 张海祥, 牛贺才, 许继峰, 白正华, 乔玉楼. 2006. 新疆北部的两类埃达克岩. 岩石学报, 22(5): 1249－1265.

Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144－146.

Castillo P R. 2002. The origin of some of the adakite-like and Nb-enriched lavas in southern Philippines. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 143－151.

Castillo P R, Janney P E and Solidum R U. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33－51.

Chen B, Jahn B M and Wei C. 2002. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex, Central China: Trace element and Nd-Sr isotope evidence. *Lithos*, 60(1－2): 67－88.

Chen B, Zhai M G and Shao J. 2003. Petrogenesis and significance of the Mesozoic North Taihang complex: Major and trace element evidence. *Science in China (Series D-Earth Sciences)*, 46(9): 941－953.

Davis G A, Zheng Y, Wang C, Darby B J, Zhang C and Gehrels G E. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China. *Geological Society of America Memoir*, 194: 171－197.

Defant M J. 2002. Reply for comment by R. Conner on the "Evidence suggests slab melting in arc magmas" by M. Defant and P. Kepezhinskas (EOS, 2001, 82: 65, 68－69). *EOS*, 66: 256－257.

Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662－665.

Drummod M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95(B13): 21503－21521.

Drummond M S, Defant M J and Kepezhinskas P K. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 87: 205－215.

Feeley T C and Hacker M D. 1995. Intracrustal derivation of Na-rich andesitic and dacitic magmas: An example from Volcano Ollague, Andean Central Volcanic Zone. *Journal of Geology*, 103: 213－225.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Ge X Y, Li X H, Chen Z G and Li W P. 2002. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr/low Y granitoids in eastern China: Constrains on crustal thickness. *Chinese Science Bulletin*, 47(11): 962–968.

Gromet L P and Silver L. 1987. REE variations across the peninsular ranges batholith: Implications for batholithic petrogenisis and crustal growth in magmatic arcs. *Journal of Petrology*, 28: 75–125.

Hedenduist J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370: 519–527.

Hou Z Q, Zeng P S, Gao Y F, Du A D and Fu D M. 2006. Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: Constraints from Re-Os dating of molybdenite. *Mineralium Deposita*, 41: 33–45.

Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesite: Melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4: 117–132.

Kay R W and Mpodozis C. 2001. Central Andean ore deposits linker to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *GSA Today*: 4–9.

Kay S M, Ramos V A and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South American. *Journal of Geology*, 101(6): 703–714.

Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293–305.

Ling M X, Wang F Y, Ding X, Hu Y H, Zhou J B, Zartman R E, Yang X Y and Sun W D. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China. *Economic Geology*, in review.

Ma C, Li Z, Ehlers C, Yang K and Renjing W. 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China. *Lithos*, 45(1–4): 431–456.

Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429.

Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24.

Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G and Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6(1): 121–142.

Morris P A. 1995. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwest Japan. *Geology*, 23(5): 395–398.

Muir R J, Weaver S D, Bradshaw J D, Eby G N and Evans J A. 1995. Geochemistry of the Cretaceous Separaton Plint Batholith, New Zealand: Granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere. *Journal of the Geological Society*, 152: 689–701.

Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30(10): 915–918.

Oyarzun R, Marquez A and Lillo J. 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36: 794–798.

Peacock S M. 1990. Fluid processes in subduction zones. *Science*, 248: 329–337.

Peacock S M, Rushmer T and Thompson A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(1–2): 227–244.

Petford N and Atherton M P. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37: 1491–1521.

Rapp R P. 1995. Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt, its control over liquid fraction and composition and source permeability. *Journal of Geophysical Research*, 100: 15601–15610.

Rapp R P, Shimizu N, Norman M D and Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356.

Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931.

Rapp R P, Xiao L and Shimizu N. 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 293–302.

Rogers G, Saunders A D and Terrell D J. 1985. Geochemistry of Holocene volcanic rocks associated with ridge subduction in Baja Califonia, Mexico. *Nature*, 315: 389–392.

Sajona F G, Bellon H, Maury R C, Pubellier M, Cotten J and Rangin C. 1994. Magmatic response to abrupt changes in geodynamic settings: Pliocene-Quaternary calc-alkaline and Nb-enriched lavas from Mindanao (Philippines). *Tectonophysics*, 237(1–2): 47–72.

Sajona F G, Maury R C, Bellon H, Cotten J, Defant M J and Pubellier M. 1993. Initiation of subduction and the genera-

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

tion of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, 21(11): 1007–1010.

Sen C and Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: Implications for the origin of adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(4): 394–409.

Smithies R H. 2000. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182(1): 115–125.

Stern C R and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral volcanic zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263–281.

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Implications for Mantle Composition and Processes, Magmatism, 42. *Ocean Basins Geological Society Special Publication*, 313–345.

Sun W D, Arculus R J, Kamenetsky V S and Binns R A. 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization. *Nature*, 431(7011): 975–978.

Sun W D, Ding X, Hu Y H and Li X H. 2007a. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3–4): 533–542.

Sun X M, Tang Q, Sun W D, Xu L, Zhai W, Liang J L, Liang Y H, Shen K, Zhang Z M, Zhou B and Wang F Y. 2007b. Monazite, iron oxide and barite exsolutions in apatite aggregates from CCSD drillhole eclogites and their geological implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(11): 2896–2905.

Tatsumi Y, Hamiton D L and Nesbitt R W. 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc lavas: Evidence from high-pressure experiments and natural rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29: 293–309.

Wang J R, Wu C J, Cai Z H, Guo Y S, Wu J C and Liu X H. 2006a. Early Paleozoic high-Mg adakite from Yindongliang in the eastern section of the North Qilian: Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2655–2664.

Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Jian P, Zhao Z H, Li C F, Xu W, Ma J L and He B. 2007a. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609–2636.

Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Li C F and Bai Z H. 2006b. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89(3–4): 424–446.

Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Zhao Z H, Jian P and Zi F. 2007b. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization. *Journal of Geology*, 115(2): 149–161.

Wang Q, Wyman D A, Zhao Z H, Xu J F, Bai Z H, Xiong X L, Dai T M, Li C F and Chu Z Y. 2007c. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alatav area, northern Tianshan Range (western China): Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt. *Chemical Geology*, 236(1–2): 42–64.

Wolde B and Team G G G. 1996. Tonalite-trondhjemite-granite genesis by partial melting of newly underplated basaltic crust: An example from the Neoproterozoic Bitbir magmatic arc, western Ethiopia. *Precambrian Research*, 76(1–2): 3–14.

Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O and Yang J H. 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1–2): 103–119.

Wu F Y, Yang J H, Wilde S A and Zhang X O. 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chemical Geology*, 221(1–2): 127–156.

Wyllie P J and Wolf M B. 1993. Amphibolite dehydration-melting: Sorting out the solidus. In: Prichard H M, Alabaster T and Harris N B W (eds), Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geological Society Special Publication, 405–416.

Wyman D A, Ayer J A and Devaney J R. 2000. Niobium-enriched basalts from the Wabigoon subprovince, Canada: Evidence for adakitic metasomatism above an Archean subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 179(1): 21–30.

Xiao L and Clemens J D. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. *Lithos*, 95: 399–414.

Xiong X L. 2006. Trace element evidence for growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite. *Geology*, 34(11): 945–948.

Xiong X L, Adam J and Green T H. 2005a. Rutile stability and

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218(3-4): 339-359.

Xiong X L, Adam J, Green T H, Niu H C, Wu J H and Cai Z Y. 2006. Trace element characteristics of partial melts produced by melting of metabasalts at high pressures: Constraints on the formation condition of adakitic melts. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 49(9): 915-925.

Xiong X L, Xia B, Xu J F, Niu H C and Xiao W S. 2005b. Na depletion in modern adakites via melt / rock reaction within the sub-arc mantle. *Chemical Geology*, 229(4): 273-292.

Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q and Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30(12): 1111-1114.

Xu J F, Wang Q, Xu Y G, Zhao Z H and Xiong X L. 2001. Geochemistry of Anjishan Intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 576-584.

Xu J F, Wang Q and Yu X Y. 2000. 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. *Geochemical Journal*, 34(5): 359-377.

Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth Part a-Solid Earth and Geodesy*, 26(9-10): 747-757.

Zhao Z H, Xiong X L, Wang Q, Wyman D A, Bao Z W, Bai Z H and Qiao Y L. 2008. Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan, China. *Lithos*, 102: 374-391.

Zhang L C, Xiao W J, Qin K Z and Zhang Q. 2006. The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: Trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Mineralium Deposita*, 41(2): 188-200.

Adakites or Adakitic Rocks and Associated Metallogenesis in Eastern China

LI Yin[1,2], LING Mingxing[1,2], DING Xing[1,2], LIU Jian[1,2], HAN Feng[1,2] and SUN Weidong[1]

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academic of Sciences, Guangzhou 510640, Guangzhou, China; 2. Graduate University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Adakites were proposed over a decade ago to be products of the melting of young subducted oceanic crust, belonging to the intermediate-acid volcanic and intrusive rock, which have distinct characteristics of high Al_2O_3, Sr contents and Sr/Y ratios, but low Y, Yb contents and K_2O/Na_2O ratios, without obvious Eu anomalies. Since discovered and named 30 years ago, adakite is universally acknowledged as one of the frontier topics in earth science. There are two main reasons why the study on adakites is not forwarding rapidly. One is their special geochemical nature, the other is metallogenesis. Eastern China is the most abundant adakites concentrated area, mostly distributed in the Lower Yangtze Region and Eastern Shandong and Shanxi-Beijing-Liaoning (subdivided into Beijing-Hebei and northeast region) three districts. Among them except Beijing-Hebei, other three regions are all important copper-gold metallogenic belts. Four genetic model proposed before by other geologists are as follows: ancient thickening lower continental crust melting, underplated basaltic lower crust melting, melting of delaminated lower continental crust and mid-ocean ridge subduction. However, the relationship between copper-gold metallogenesis and adakites is still controversial. Generally, adakitic magmas are thought to be enriched in fluid, with high oxygen fugacity and mafic source rock, which are favored by Cu, Au and other deeply-source metals to be extracted, enriched, and finally mineralized.

Keywords: Eastern China; adakites; genetic model; ore-forming model; review

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net