

埃达克岩与皖中沙溪斑岩铜矿的成矿作用

余良范¹ 杨晓勇² 孙卫东^{2,3} 池月余⁴ 张千明⁴

(1.安徽省公益性地质调查与管理中心,安徽合肥 230001;2.中国科学技术大学矿产资源研究中心,安徽合肥 230026;
3.中国科学院广州地球化学研究所,广东广州 510640;4.安徽省 327 地质队,安徽合肥 230030)

摘要:埃达克岩是一组从安山质到长英质系列岩石,具有高硅($\geq 56\%$)、富钠($3.5\% \geq \text{Na}_2\text{O} \geq 7.5\%$)及低的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (~ 0.42),高 $\text{Mg}\#$ (~ 0.51)和高 Ni ($20 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$)和 Cr ($30 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$)的岩浆岩;其主要特点还有高铈($> 400 \times 10^{-6}$),最高可以达到 3000×10^{-6} ,轻重稀土强烈分异 ($(\text{La}/\text{Yb})_N > 10$)以及非常低的重稀土元素含量 ($\text{Yb} < 1.8 \times 10^{-6}$, $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$),具有明显 Nb、Ta 负异常的火山岩和侵入岩。埃达克岩构造环境仍存在很多争议。主要的观点:(1)年轻的俯冲洋壳 ($< 25 \text{ Ma}$) 在俯冲过程中脱水熔融;(2)加厚下地壳环境下的镁铁质下地壳(如榴辉岩和石榴辉石岩)底垫岩浆作用或拆沉作用下熔融。与埃达克岩有关的矿产资源主要为铁、铜、金、钼矿床。在对安徽省沙溪斑岩型铜金矿床岩石和同位素地球化学资料分析和处理基础上,笔者认为沙溪侵入岩属于埃达克岩,其成因是燕山晚期西太平洋板块俯冲至扬子地块深部所导致的洋壳板片熔融作用有关,洋壳俯冲过程的大量流体参与,所携带的幔源大离子亲石元素及铜金物质在地壳浅部形成 adakite 岩石,同时形成该区斑岩型铜金矿床。

关键词:埃达克岩;地球化学;斑岩型铜矿;沙溪;太平洋板块俯冲

中图分类号: P588.1; P618.41; P617.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)06-1150-12

埃达克岩是 1978 年 Kay 在阿留申群岛的 Adak 岛上发现(Kay, 1978),术语由 Defant et al^[1]在 1990 年提出;国内对埃达克岩的研究起步较晚,在埃达克岩的术语提出 10 年后才有少数学者关注。张旗等^[2]在 2001 年把中国东部中生代具埃达克岩地球化学标志的中酸性火山岩和侵入岩定为埃达克岩(C 型),引起国内学术界的广泛争论,2001 年在中国地质大学(北京)举办了“埃达克质岩(adakite-like)及其地球动力学意义学术研讨会”。2002 年至今,国内对埃达克岩的研究进入新的阶段,在理论和实践上都取得了较多的成果。特别是埃达克岩与中国东部的斑岩型铜金矿床成矿的研究尤其引人注目,笔者系统综述了埃达克岩的地球化学特征和构造环境判别,在此基础上对安徽省沙溪斑岩型铜金矿床岩石同位素地球化学资料进行了处理,提出沙溪侵入岩属于埃达克岩,其成因是燕山晚期西太平洋板块俯冲至扬子地块深部所导致的洋壳板片熔融作用有

关,进而对该区斑岩型铜金矿床的主要成因机制进行了深入探讨。

1 埃达克岩地球化学特征

埃达克岩最初是用来定义那些富硅、高 Sr/Y 和 La/Yb 的源于俯冲带玄武质洋壳部分熔融形成的火山岩或侵入岩。最初,人们认为埃达克岩仅形成在年轻未冷却的大洋板块俯冲带,但随后研究表明埃达克岩也可以形成于岛弧的一些特殊环境,在这里某些异常构造条件可以降低古老板块的熔融温度。目前认为,埃达克岩蕴涵了一系列的岛弧火山岩,包括原生俯冲洋壳熔体,埃达克岩-橄辉岩混合熔体以及源于板块熔体交代后地幔楔橄辉岩的熔融产物。Defant et al^[1]在 1990 年提出,埃达克岩是一套火山岩或侵入岩,形成于岛弧地区,是 $\leq 25 \text{ Ma}$ 、热的俯冲洋壳部分熔融形成的;主要矿物组合是斜长石和角闪石,可以出现黑云母、辉石和不透明矿物。这

收稿日期:2008-11-12;改回日期:2008-12-03

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-15)、科技部 973 项目(2006CB403500)和安徽省公益性地质找矿项目资助。

作者简介:余良范,男,1964 年生,矿床地质专业,高级工程师。

通讯作者:杨晓勇, E-mail:xyyang555@163.com。

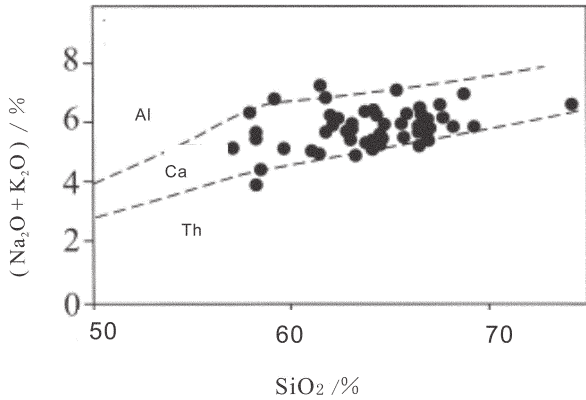


图 1 埃达克岩在 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解^[5]
Fig.1 Adakite in $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ vs. SiO_2 diagram^[5]

些岩石的地球化学特征为:埃达克岩以 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ 和 MgO 通常小于 3%为特点,Y 和重稀土元素含量低 ($\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$),Sr 含量高(很少小于 400×10^{-6}), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i < 0.7040$ (表 1),富钠 ($3.5\% \leq \text{Na}_2\text{O} \leq 7.5\%$)及低的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (~ 0.42)。在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ 图解中埃达克岩落在钙碱性区域 (图 1);而在 $\text{K}-\text{Na}-\text{Ca}$ (图 2)三角图解中,落

在奥长花岗质分异的趋势上,没有显示出任何与钙碱性趋势的相关性。它们的 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2$ 组分中等偏高 ($\sim 7\%$),高 $\text{Mg}\#$ (~ 0.51)和高 Ni 和 Cr 含量 (分别为 24×10^{-6} 和 36×10^{-6})。从这一点看,它们与典型钙碱性火山岩 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2 = 6\%$; $\text{Mg}\# = 0.36$) 明显不同。

Defant et al^[6]指出其典型的高锆特征 ($> 400 \times 10^{-6}$),最高可以达到 3000×10^{-6} 。稀土图解呈现强烈的轻重稀土分异 ($(\text{La}/\text{Yb})_N > 10$)以及非常低的重稀土元素含量 ($\text{Yb} < 1.8 \times 10^{-6}$, $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$)。在这些特征常被用来识别埃达克岩,被广泛应用的两个判别图解分别是 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$ ^[5,7]和 $(\text{Sr}/\text{Y}) - \text{Y}$ (图 3)。

在多元素图解中,所有的埃达克岩均表现出相同的特征,如明显的 Sr 正异常,反映缺少斜长石的结晶分异。明显负 Nb、Ta 异常,而同时表现出弱的或缺少 Zr 和 Ti 的异常。与埃达克岩不同,典型的钙碱性岩石不仅表现出高的 HREE 含量,还表现出负的 Sr 异常 (图 4)。

Castillo^[8]系统地总结了埃达克岩的地球化学特征和大地构造成因联系,如表 2 所示。

表 1 埃达克岩、岛弧岩浆岩、TTG 以及玄武岩熔融试验产生熔体的平均组成^[5]
Table 1 Average chemical compositions of adakite, arc magma, Archean TTG and liquids generated by experimental melting of basalts^[5]

元素含量及参数值	埃达克岩		埃达克质侵入体		岛弧英安岩		岛弧花岗闪长岩		TTG 岩石		实验流体	
	N=81	δ	N=9	δ	N=80	δ	N=250	δ	N=355	δ	N=1	3
$\text{SiO}_2/10^{-2}$	64.66	3.2	67.30	1.1	68.22	5.6	68.10	6.2	69.79	4.9	69.75	69.76
Al_2O_3	16.77	1.0	15.78	0.2	14.63	1.8	15.07	1.6	15.56	1.2	16.89	15.59
Fe_2O_3	4.20	1.2	3.30	0.2	4.28	1.4	4.36	2.0	3.12	1.5	2.96	3.8
MnO	0.08	0.02	0.05	0.01	0.09	0.03	0.09	0.10	0.05	0.03	0.09	0.03
MgO	2.20	1.0	1.96	0.3	1.0	1.55	1.55	1.0	1.18	0.7	1.26	0.71
CaO	5.00	1.3	3.67	0.4	1.8	3.06	3.06	0.6	3.19	1.0	3.93	3.16
Na_2O	4.09	0.4	4.19	0.1	4.15	0.5	3.68	0.5	4.88	0.8	4.2	4.5
K_2O	1.72	0.6	2.15	0.3	3.37	1.1	3.40	1.1	1.76	0.7	1.31	1.81
TiO_2	0.51	0.2	0.54	0.0	0.46	0.2	0.54	0.3	0.34	0.2	0.54	0.85
P_2O_5	0.17	0.1	0.12	0.0	0.21	0.1	0.15	0.1	0.13	0.1		
Mg 指数	0.51	0.1	0.54	0.03	0.36	0.15	0.41	0.15	0.43	0.10	0.46	0.26
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	0.42	0.2	0.51	0.15	0.81	0.3	0.92	0.4	0.36	0.15	0.31	0.40
FeO^+	6.99	1.5	5.86	0.5	6.05	2.4	6.54	3.0	4.69	1.6	4.85	5.39
$\text{Ni}/10^{-6}$	24	19	24	8.0	5	4.0	10	8.0	14	10.0		
Cr	36	34	46	8.0	8	5.0	23	15.0	29	30.0		
Sr	706	439	280	24.0	380	240.0	316	150.0	454	200.0		
La	19	11	17.7	3.0	48.1	17.0	31	9.0	32	20.0		
Yb	0.93	0.37	1.1	0.2	4.4	1.2	3.2	0.5	0.55	0.3		
Y	10	4	17	10.0	47	21.0	26	5.0	7.5	4.0		
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	14.2		11.0		7.5		6.6		39.7			
Sr/Y	68.7		16.5		8.1		12.2		60.5			

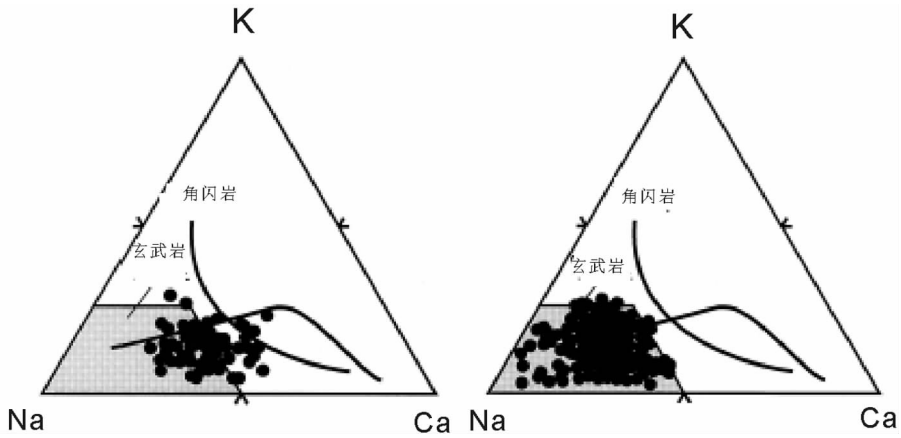


图 2 埃达克岩 K-Na-Ca 三角图解^[6]
 Fig. 2 Adakite in K-Na-Ca diagram^[6]

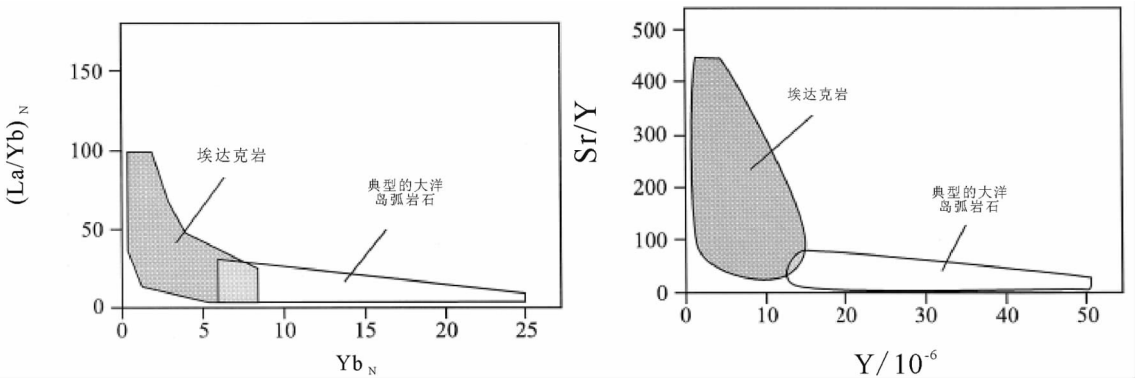


图 3 $(La/Yb)_N - Yb_N$ ^[5,7] 和 $Sr/Y - Y$ 图解^[1]
 Fig.3 $(La/Yb)_N - Yb_N$ diagram^[5,7] and $Sr/Y - Y$ diagram^[1]

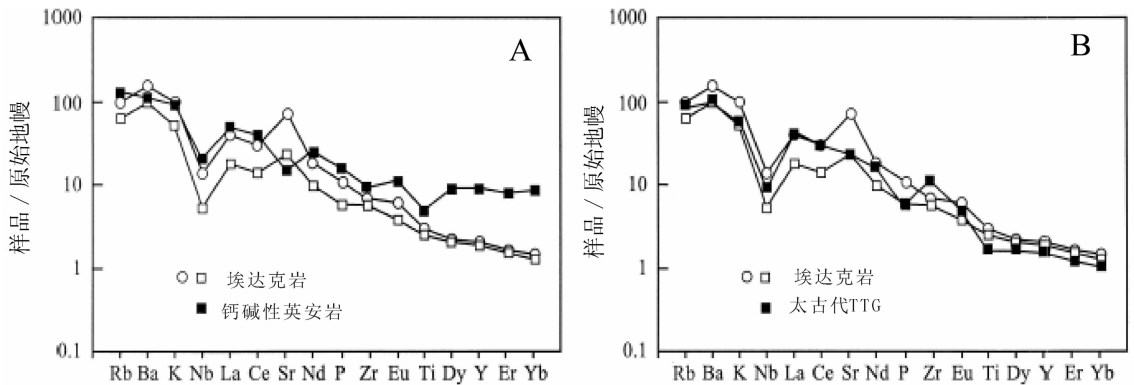


图 4 埃达克岩的微量元素原始地幔标准化多元素图解^[5]
 A—埃达克岩与典型钙碱性英安岩对比；B—埃达克岩与 TTG 对比
 Fig.4 The trace element distribution patterns normalized by primitive mantle^[5]
 A—adakite vs. typical calc-alkaline dacite; B—adakite vs. TTG

2 埃达克岩成因探讨

关于埃达克岩的成因有两派意见：即板块熔融派^[1]和多成因派^[2-4,9]。张旗等^[2-4]研究认为板块熔融并

非产生埃达克岩的唯一机制。通过俯冲玄武岩洋壳的熔融可以产生埃达克岩熔体已被实验和地质观察所证实。实验研究表明，水饱和熔融或角闪石脱水熔融可以产生埃达克岩熔体。埃达克岩玻璃包裹体

表 2 埃达克岩主要地球化学特征与对应的成因联系^[8]Table 2 The geochemical characteristics of adakite and its genetic links^[8]

埃达克岩的地球化学特征	与板块熔融的成因联系
高 SiO ₂ (≥6%)	榴辉岩/含石榴子石角闪岩在高压下的部分熔融
高 Al ₂ O ₃ (≥15%)	SiO ₂ 在 70%左右时, 为高压下榴辉岩或角闪岩的部分熔融
低 MgO(<3%)	低的 Cr, Ni 含量相联系, 如果是初始熔体, 表明岩浆并不是源于地幔橄榄岩
高 Sr(>300 / 10 ⁻⁶)	斜长石参与熔融或残留相中无斜长石保留
无负 Eu 异常	源区仅有微量斜长石残留或源区玄武岩本身 Eu 亏损
低 Y(<15 / 10 ⁻⁶)	表明石榴石为残留相
高 Sr/Y(>20)	高于正常结晶分异的 Sr/Y 比值, 表明有石榴子石和角闪石为残留相
低 Yb(<1.9) 10 ⁻⁶	意味着低的 HREE 含量, 表明残留相中有石榴石
高 La/Yb(>20)	轻重稀土强烈分异, 表明石榴子石为源区的残留相
低 HFSE (如 Nb, Ta)	与大部分的岛弧火山岩一样, 表明源区有富 Ti 相或是角闪石残留相
低 ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(<0.704)	为 MORB 特征

在岛弧火山岩中, 与俯冲有关的火山岩捕虏体矿物内以及蛇绿岩内中酸性混合岩脉中均已发现。此外, 阿留申地区的镁质安山岩中单斜辉石离子探针分析显示 Mg# 和 Sr、Nd/Yb 之间具有典型的相关性, 这意味着与地幔橄榄岩处于平衡状态的板块熔体对于产生典型的埃达克岩是必须的^[9]。

Defant et al^[1] 最初定义的 adakite 是在小于 25 Ma 的年轻并尚未冷却的玄武岩洋壳俯冲时才能产生。但随后的研究发现下地壳的熔融作用也可以产生, 而且还发现一些地区的埃达克岩源自相对较老 (>25 Ma) 的正在俯冲的洋壳。可能是它们有着特殊的构造环境和地温梯度异常。例如, 在 Andes 北部存在着由于低角度俯冲 (flat-subduction) 而形成的埃达克岩^[9]。

由于古老板块俯冲同样可能产生类似埃达克质的岩石, 所以需要鉴别埃达克岩的标准进行一定的修改。目前用于区别埃达克岩两个关键的微量元素的比值 La/Yb (LREE 的富集程度) 已经适当降低, 在埃达克岩定义上一个更重要的变化就是从强调板块熔融形成原生的埃达克岩到认识到埃达克岩的形成有地幔橄榄岩直接或间接的参与。在阿留申西部 (典型的埃达克岩产地) 的一些镁质安山岩确实具有很高 Sr 含量和高 La/Yb 比值等板块熔融的证据, 但是它们有中等 MgO 和高 Ni、Cr 含量的特征, 被认为是俯冲板块与地幔橄榄岩相平衡的产物^[10]; 研究表明有一种低硅的埃达克岩变种, 它被认为是经过原生板块熔体交代的地幔橄榄岩熔融作用的产物^[10]。低硅的埃达克岩与高硅的相比, 具有 LREE、Sr 和 Rb 含量低的特征。以上都很好地表明了地幔橄榄岩直接

或间接参与大多数埃达克岩的形成 (表 2)。

埃达克岩体通常和富 Nb 玄武岩共生, 这种共生关系反过来又可以看作是俯冲板块熔融的证据。通常我们认为板块熔体在上升过程中与地幔橄榄岩发生平衡形成相对富高场强元素 (HFSE) 的角闪石, 后来这些角闪石分解, 导致地幔楔 HFSE 的富集, 形成了富 Nb 玄武岩的交代地幔源区^[5,7]。

尽管大多数现代俯冲带的岩浆被认为是来自于交代地幔楔的部分熔融, 最近的研究表明俯冲带的岩浆也可以由玄武质俯冲洋壳熔融产生。Defant et al^[1] 在 Kay^[9] 研究关于来自阿留申岛弧火山链的 Adak 岛镁质安山岩工作的基础上, 将这些富钠的长英质“板片熔体”定义为埃达克岩 (adakite)。其他一些类似岩石的研究工作中板片熔融的概念也已被提出^[11]。实验岩石学研究^[12-17], 俯冲相关岩浆中捕虏体包裹的埃达克质玻璃及蛇绿岩中埃达克质脉体等证据支持埃达克岩作为板片熔体的论点^[18-21]。

主量和微量元素及同位素分析表明, 埃达克岩可以由高压下玄武质源区部分熔融产生 (表 1)。试验岩石学的工作也支持这一论点。Barker et al^[22] 的研究表明玄武岩和角闪岩的熔融可以产生奥长花岗质的熔体。Rapp et al^[14] (图 5-a) 以及 Wolf et al^[16] (图 5-b) 的玄武质或变玄武质岩石熔融试验表明, 在相对低的压力下 (不含石榴子石) 时, 重稀土元素 (HREE) 几乎没有改变, 轻稀土元素 (LREE) 表现出不同程度的富集。当石榴子石作为稳定残留相存在时, 熔融产生了轻重稀土强烈分异具有埃达克岩特点的熔体 (图 5)。

与实验岩石学产生的熔体成分相比, 埃达克岩一般具有高的 Mg# 和 Cr、Ni 含量。实验岩石学表明,

玄武岩部分熔融产生熔体的 Mg# 极限值为~0.45^[4], 故任何 Mg# 高于 0.5 的板片熔体肯定经过了与比玄武岩更基性的物质——地幔橄榄岩的相互作用。

国内关于埃达克岩的争论焦点主要在埃达克岩的定义及其形成环境上。按照 Defant et al^[1]对埃达克岩的定义,埃达克岩形成于岛弧环境。在埃达克岩定义上一个重要的变化就是从强调板块熔融形成原生埃达克岩到认识到埃达克岩的形成有地幔橄榄岩的直接或间接参与。埃达克岩具有中等的 MgO, 高 Mg# 和高的 Ni、Cr 含量,显示出相当的原始成分特征。这被认为是俯冲板片熔体与地幔橄榄岩相互作用的产物^[9,10,23]。近期的研究表明有一种原始镁质安山岩或低硅的埃达克岩变种,它被认为是经过原生

板片熔体交代的地幔橄榄岩熔融作用的产物^[24-25]。

Atherton et al^[26]提出埃达克岩也可以由加厚的玄武质下地壳部分熔融产生,并受到南美、北美和新西兰中生代、新生代花岗岩类^[26-29]以及中国东部埃达克岩研究的支持^[30-38]。与俯冲洋壳形成的埃达克岩一样,镁铁质下地壳在石榴子石为稳定相或残留相的条件下熔融形成埃达克岩也得到了高压下玄武岩熔融实验的支持。通常地壳熔体的 MgO 含量不高,但是有一些源于下地壳的埃达克岩表现出高 MgO, 在给定 MgO 含量的条件下显示出高 Mg# 和高 Cr、Ni 含量,这些特征清楚地表现出了熔体与地幔橄榄岩的平衡。特别是高镁的埃达克岩,被认为是源于拆沉下地壳熔融的产物^[34,36,39-41]。

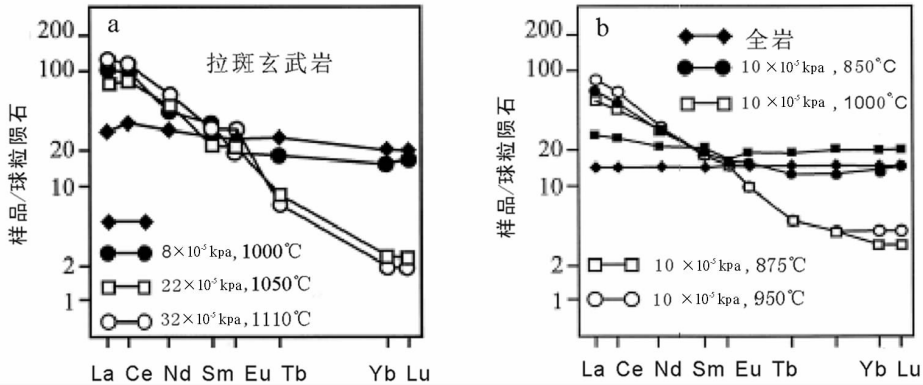


图 5 埃达克岩球粒陨石标准化 REE 图解
Fig.5 Chondrite-normalized REE Patterns of adakite

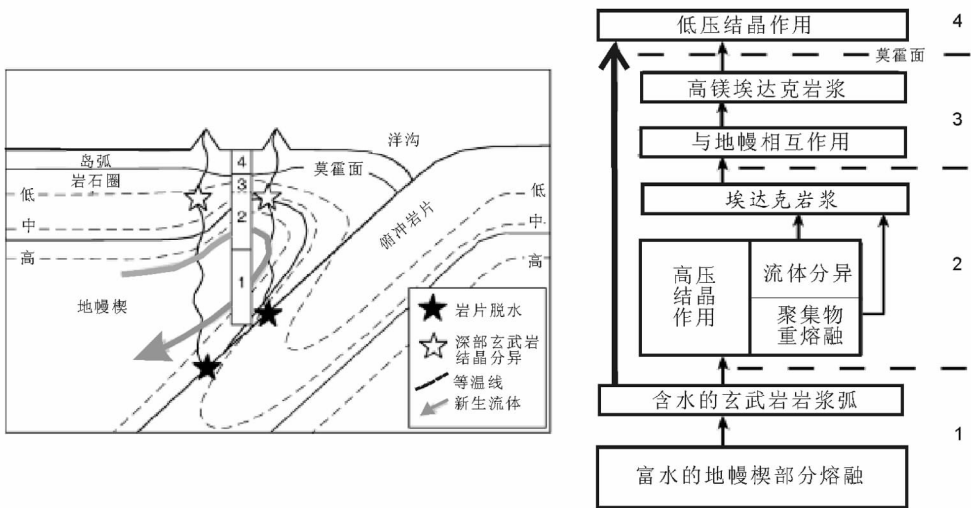


图 6 洋壳俯冲及深部物质的分异作用在埃达克岩形成过程的示意图^[46]
Fig.6 Schematic illustration of adakite production by oceanic plate subduction and deep differentiation process^[46]

稍早于这些关于埃达克岩的工作,关于太古代富钠的奥长花岗岩、英云闪长岩、花岗闪长岩组成的研究揭示了富钠长英质岩浆作用与玄武质地壳在足够压力下(足以使石榴子石作为稳定相存在,榴辉岩相或含石榴子石角闪岩相)熔融作用之间的关联^[42-45]。Martin et al^[7, 24]提出将智利 Austral Volcanic Zone 的埃达克岩作为 TTG 的现代版本。埃达克岩和 TTG 岩套地球化学特征的相似性反映的成因上的相似性从此被广泛接受,并得到进一步的拓展^[5]。

埃达克岩的另一种可能成因是通过玄武质母岩浆的分异。例如在菲律宾棉兰老岛(Mindanao)东部的马帕瓦半岛(Surigao)更新世的埃达克岩,认为这些先前被认为是埃达克岩的岩石其实并不是板块熔融的产物。除了 LREE 外,这些更新世的埃达克岩与岛上那些跟俯冲有关的上新世的岛弧熔岩有相似的不相容元素比值,此外,这些所谓的埃达克岩中宽的 SiO₂ 含量的变化与微量元素的浓度和比值之间有很好的相关性。Macpherson 等再结合大地构造方面的证据,认为这些埃达克质岩最终是来自地幔楔的熔融。地幔楔熔融产生的原始岛弧岩浆在上地幔高压(约 35 km)发生有石榴子石和角闪石形成的分异结晶。分异后的液相和结晶的玄武岩的重熔最终形成埃达克质岩浆,它在上升至莫霍面的过程中与地幔岩发生反应,导致高 Mg# 的埃达克岩质岩浆,该岩浆最后侵位到地壳中分异结晶(含石榴子石相),形成一系列埃达克质岩(图 6)^[46]。

3 埃达克岩多样性、分布与铜金矿床成矿

3.1 埃达克岩多样性

张旗等^[30, 31]认为埃达克岩具有多样性,大体可分为以下 6 种:

(1)典型的埃达克岩(adakite),源于贫 K 的拉斑玄武岩,大多是由俯冲板片熔融形成的;

(2)高镁埃达克岩(high Mg adakite, HMA),以富 Mg# 和 Cr、Ni 为特征,是板片熔融的埃达克质熔体与上覆地幔楔混合的产物;

(3)TTG 岩套,不同于典型的 adakite,太古宙的 TTG 更富 Si 和贫 Mg,可能是加厚地壳底部含水玄武质岩石部分熔融形成的;

(4)高钾钙碱性埃达克岩(high-K calc-alkaline adakite, HKCAA),以富 K 和贫 Mg、Cr、Ni 为特征,

推测由加厚下地壳底部的中酸性-基性岩部分熔融形成,岩浆上升时还可能受陆壳的混染;

(5)高钾和镁的埃达克岩(high K and Mg adakite, HKMA),通常解释为拆沉的下地壳被地幔加热后再熔融形成的;

(6)钾质埃达克岩(Super K adakite, SKA),可能是在很高的压力和很低的部分熔融程度条件下形成的。

上述埃达克岩中的第 1~3 类属于 O 型埃达克岩,也就是所谓的大洋型,第 4~6 类为 C 型埃达克岩,就是所谓的大陆型。研究还表明只要达到形成埃达克岩所需要的高压条件,有足够的热源使源区物质发生部分熔融,所形成的熔体即具有埃达克岩的特征。

反对意见认为只有岛弧环境下由俯冲的 MORB 板片的部分熔融形成的岩石才是埃达克岩,反对将 adakite 的概念笼统地引入中国东部,理由如下^[47]:

(1)adakite 产于岛弧环境,是俯冲的 MORB 部分熔融形成,而中国东部非岛弧环境;

(2)典型的 adakite 富 Na, Na₂O/ K₂O 比值通常大于 2,而中国东部 Na₂O 与 K₂O 含量相近;

(3)典型的 adakite 具很高的 ϵ (Nd)(正值)和很低的 I_{Sr} (<0.705)同位素比值,而中国东部相反, ϵ (Nd)为很低的负值,很高的 I_{Sr} (>0.705)

(4)Adakite 只有地球化学指标,没有明确的岩相学和矿物学标志。

但是,Defant^[48]在 2002 年又重新解释 adakite 的定义:adakite 只是一个一般意义上的术语,指的是具有 adakite 地球化学特征的那些岩石,而没有特定的构造含义。Kay 等^[49]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 adakite。

通常认为岛弧和大陆边缘钾玄质岩浆的源区是曾与俯冲沉积物发生过交代作用的富集地幔。而且,交代作用被认为是随着时间过去增加地幔的 $\log f_{\text{O}_2}$ 的重要机制。

地幔中的亲铜元素主要存在于硫化物中。地幔亲铜元素通过岩浆的移动只有当熔化的源区岩石没有硫化物时才会发生。需要氧化值 $\log f_{\text{O}_2}$ (氧逸度) > FMQ(铁橄榄石-磁铁矿-石英氧缓冲器)+2(也就是高于硫化物-硫氧(SSO)缓冲器)。Mungall(2002)指出,只有来自板块的埃达克质岩浆或是超临界的流

体才有高的氧化潜力产生浅成热液和斑岩 Cu-Au 矿床,然而,来自下地壳基座玄武质或辉长质岩石熔融产生的埃达克质岩浆会保留它们源区的低 f_{O_2} ,因此不利于形成 Cu-Au 矿床。除了 f_{O_2} 之外,另一个控制 Cu-Au 成矿作用的因素是亲铜元素的可用性。前面说过直接来源于厚的下地壳源区的埃达克质岩浆没有穿过富铜地幔源区,它们没有什么发生 Cu-Au 成矿作用的潜力。地幔对发生 Cu 成矿作用扮演了至关重要的角色,联系到沙溪埃达克质岩浆,当它们是来自拆沉下地壳时是唯一的可能。沙溪埃达克岩最与众不同的化学和同位素特征是那些确保它们的接近亲铜库和运输 Cu 和 Au。

3.2 埃达克岩分布

新生代以来的 adakite 主要分布于环太平洋周边的下列地区:新几内亚的 Arid Hills、菲律宾、日本西南、堪察加半岛、Aleutian 群岛的 Adak 以及西部的科曼多尔岛、北美 Cascade、Mount St Helens、墨西哥 Baja California、巴拿马和哥斯达黎加、厄瓜多尔、阿根廷 Patagonia、安第斯的 Austral Volcanic Zone 和 Southern Volcanic Zone、智南端的 Cook 岛。上述地区的 adakite 大多数与年轻洋壳板片 (< 25 Ma) 的俯冲有关,板片的熔融深度一般为 70~90 km。

埃达克岩的识别是岛弧岩浆作用研究中的一个明显的进步,它提高了笔者对于在汇聚板块边缘洋壳物质循环过程的理解^[46]。此外,它也揭示出构成陆壳主要部分的太古代 TTG 岩套的一个可能的形成机制,因此可以指示地壳演化过程。此外,埃达克岩对于成矿作用有着十分重要的意义,大部分世界著名的 Cu-Au 矿床都与埃达克岩之间有联系。在中国分布较广,长江中下游地区广有分布^[2,3,30,31],形成环境还存有很大争议,主要有加厚的下地壳底部基性岩部分熔融说和太平洋板块俯冲说^[35,50];东北部地区埃达克岩分布较广,以吉林居多,内蒙古东部和黑龙江较少,分别形成于古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋和环太平洋 3 个构造带,时代为早古生代中期—中生代^[51]。

3.3 埃达克岩与长江中下游地区的铜金成矿

Thieblemont et al^[52]最早探讨了埃达克岩与成矿作用的关系,他们统计了全球 43 个 Au、Ag、Cu、Mo 低温热液和斑岩矿床,发现其中的 38 个与埃达克岩有关。南美地区的斑岩型铜矿的最近研究也是类似的结果^[50]。安徽庐枞地区的沙溪岩体因岩体中产有

斑岩铜(金)矿床而闻名^[54-55]。

长江中下游地区是中国重要的铜资源基地之一。该成矿带广泛发育与 Cu-Au 成矿作用密切相关的早白垩世火成岩。大多数与成矿有关的中酸性侵入岩具有类似埃达克岩的地球化学特征,即富集 Sr 而贫 Y 和 Yb;但它们具有负的 $\epsilon Nd(t)$ 值和相对富集的 Sr 同位素初始比值(>0.704)。大量的岩石化学数据显示长江中下游地区的铜金成矿岩浆岩具有埃达克质的特征。以皖中的沙溪斑岩型铜金矿床为例,沙溪分布的与斑岩型铜金矿床相联系的燕山期岩浆岩就具有比较典型的埃达克岩的地球化学特征。

根据沙溪矿区已发表的资料^[33,54-56],笔者认为:(1)沙溪埃达克质斑岩的 MgO 含量和 Nd-Sr 同位素组成表明它们跟地幔物质发生过相互作用;(2)高 Fe_2O_3 含量有能力提高地幔的 f_{O_2} (除了 SSO 缓冲器)和吸引地幔橄榄岩中的硫化物。由于埃达克岩石来自深部,与之有关的矿产资源主要为铁、铜、金、钼矿床。沙溪埃达克质侵入岩富 Na,富集 LREE,亏损 HREE,有高的 Al_2O_3 、MgO 和 Sr 含量、高 Sr/Y 和 La/Yb 值,低 Y 和 Yb 含量。它们的结晶年龄为 (136 ± 3) Ma。它们有低 $\epsilon Nd(t)$ 值(-3.46 ~ -6.28)和高 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 比值(0.7051~0.7057)。岛弧和大陆边缘钾玄质火成岩(140~125 Ma)富 K,富集 LREE 和 LILE,亏损 Ti、Nb 和 Ba。它们的同位素组成比埃达克岩相对低的 $\epsilon Nd(t)$ 值(-4.65~-7.03),相对高的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 比值(0.7057~0.7062)。除了一些晚期的响岩和粗面岩表现出轻微的 Nb 正异常和有稍高的 $\epsilon Nd(t)$ 值(-3.21~-3.30)和低 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 比值(0.7050~0.7056),尽管两套火成岩有与众不同的化学特征,它们的 Pb 同位素组成几乎一样。

虽然国内不少学者对中国东部 adakite 的成因解释为地壳的拆沉模式,但是下面的一些地球化学证据表明该模式存在局限性:(1)德兴斑岩型铜矿的 ϵNd 值为 0 ± 2 ,明显不同于下地壳的 Nd 同位素组成,这也不能用地壳拆沉或简单的地幔混熔的模式来解释;(2)德兴斑岩型铜矿的成矿氧逸度很高,表明在成矿作用过程中有大量与俯冲带有关的流体加入,同样不支持下地壳拆沉模式;(3)安徽沙溪斑岩型铜矿的 Sr-Nd-Pb 同位素组成,指示了大量的幔源物质的加入,显示俯冲带海水加入的特征^[34]。

综合分析沙溪地区的大地构造背景,笔者提出沙溪地区斑岩型铜矿的成矿模型(图 7)。根据该模

型可清楚的看出,沙溪地区的 adakite 及其斑岩型铜金矿床的成因与中生代太平洋板块向中国大地的俯冲有关。再结合德兴、九瑞及铜陵等地区的年代学数据^[34,56,57],长江中下游地区自西南向东北具有逐渐变年轻趋势,可能代表显示板块俯冲的轨迹。

过程中,形成 I 型花岗岩(130~160 Ma)及其有关矿床,达到该地区铜金成矿高峰期,随着地壳减薄作用进一步加强,岩浆活动和成矿作用减弱。不但强调 I 型花岗岩的成矿专属性,而且也强调成矿时间、大地构造环境转换期成矿。

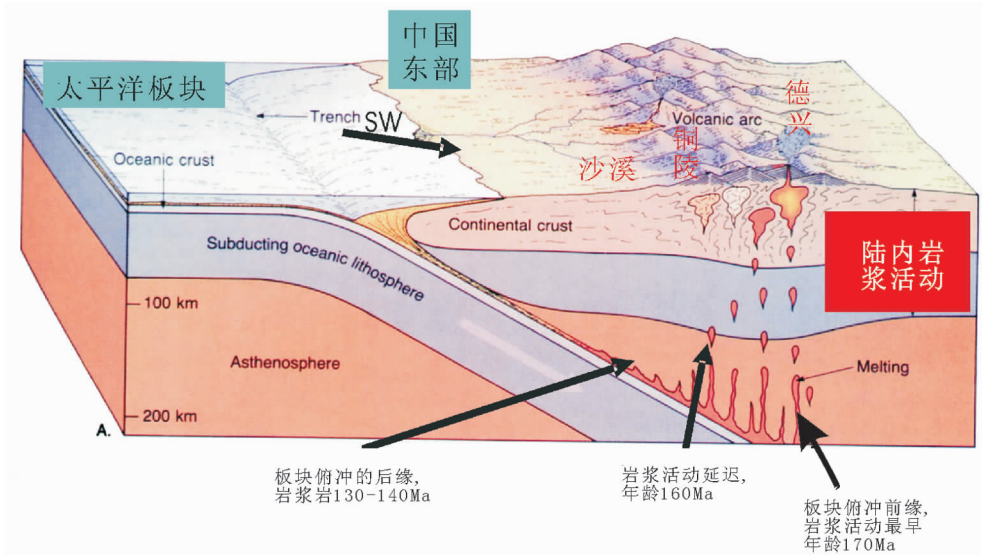


图 7 长江中下游地区燕山期太平洋板块向中国东部大陆俯冲诱发岩浆活动示意图

Fig.7 The model of the Pacific plate subduction induced Yanshanian magmatism along Yangtze metallogenic valley

3.4 中国东部其他地区埃达克岩与铜金成矿

虽然埃达克岩在引入中国岩石学界的过程还存在很多反对意见,但是笔者的倾向是在中国东部燕山期岩浆岩与铜金矿床研究引用中应该使用 adakite 概念,因为其有效的地球化学指标有利于建立相关岩石和矿床的地球化学找矿标志,也比较容易为大地学工作者所掌握和接受,在新的形势和条件下开展相关区域内与 adakite 成矿作用的深入研究,有利于东部铜金矿床的勘探与寻找。笔者认为沙溪侵入岩属于埃达克岩,其成因是燕山晚期西太平洋板块俯冲至扬子地块深部所导致的洋壳板片熔融作用有关,洋壳俯冲过程的大量流体参与,所携带的铜金物质在岩浆形成过程带入浅部地壳是该区斑岩型铜金矿床的主要成因机制。

罗小洪^[58]研究认为在九瑞地区中生代不同时期形成(160~200 Ma)的花岗岩为 C 型埃达克岩,这时的地壳是增厚的地壳(一般大于 40 km),随后在该地区的软流圈地幔上涌和岩石圈的伸展减薄作用

在东北和内蒙古地区以埃达克岩为成矿主岩的热液矿床矿种主要为 Au 和 Cu,其次为 Mo;成因类型主要为斑岩型、岩浆热液型和浅成低温热液型^[48,59];成矿时代主要为早古生代中期、晚古生代晚期及中生代中晚期。最近还有在东秦岭商丹带北侧发现的新元古代埃达克质花岗岩的报道^[60]。依据本地区埃达克岩和与其相关的热液矿床特征及产出的构造部位,将本区以埃达克岩为含矿岩的热液矿床划分为大兴安岭北部、蒙吉黑和吉黑东部 3 个成矿区。最近李曙光院士课题组在大别山赤土岭鉴定出一套典型的高镁的 Adakite^[61],岩石的地球化学特征显示其 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.70691~0.70775),具有很低的 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 值 (-20.7 ~ -24.9),没有高放射成因铅同位素,十分富集大离子亲石元素,年代学资料显示其形成年龄为(131±3)Ma。他们根据这些地球化学特征和构造环境分析,认为这类岩石是板块俯冲的重熔的产物,这个发现对于认识中国东部的 adakite 岩石的成因具有十分重要的指导意义。

4 结 论

(1)埃达克岩是富钠火成岩,被认为是源自俯冲洋壳的部分熔融。相反,富钾 Shoshonities 主要来自富集地幔的部分熔融。玄武岩成因可有两种:一是来自富集和亏损成分的混合地幔边界;二是来自埃达克质岩浆板片交代的地幔部分熔融形成。

(2)与 Cu-Au-Fe 成矿作用有关的庐枞岛弧和大陆边缘钾玄质岩来自被俯冲洋壳沉积物交代过的地幔源区。沙溪早白垩世石英闪长玢岩表现出与埃达克岩类似的地球化学特征显示其石英闪长玢岩为埃达克岩,区内的斑岩型铜金矿床与该类埃达克岩的成因密切相关。该 adakite 及其斑岩型铜金矿床的形成机制系中生代太平洋板块向中国大陆的俯冲带来的洋壳物质重熔结晶分异的结果。

致谢:关于埃达克岩石与金属矿床的形成作用,与研究生蓝翔华、何永胜、李佩等同学进行了深入的交流和讨论,对笔者在本文的写作中起到了很好的促进作用,在此深表感谢。笔者谨以此文奉献给胡受奚教授 80 华诞,敬贺先生几十年如一日在地学教学和科研上的辛勤耕耘和累累硕果。

参考文献(References):

- [1] Defant M J and Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347:662-665.
- [2] 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, 17(2):248-255.
Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, et al. An east China plateau in mid-late Yanshanian period: Implication from adakites [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 17(2):248-255 (in Chinese with English abstract).
- [3] 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):236-242.
Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the Mesozoic adakites in eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17:236-244 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张旗,王焰,王元龙. 2001c. 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*, 17(4):505-512.
Zhang Qi, Wang Yan, Wang Yuanlong. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4):505-512 (in Chinese with English abstract).
- [5] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean

- granitoids [J]. *Lithos*, 1999, 46:411-429.
- [6] Martin H. Petrogenesis of Archaean trondhjemites, tonalites and granodiorites from eastern Finland: major and trace element geochemistry [J]. *J. Petrol*, 1987, 28 (5):921-953.
- [7] Martin H. Archaean and modern granitoids as indicators of changes in geodynamic processes [J]. *Rev. Bras. Geocienc.*, 1988, 17:360-365.
- [8] Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51:257-268.
- [9] Kay R W J. Aleutian magnesium andesite melts from subducted Pacific oceanic crust [J]. *Journal of Volcanic and Geothermal Rsearch*, 1978, 4:117-132.
- [10] Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets O N, et al. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implications for slab melting and processes in the mantle wedge [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1995, 107 (5):505-519.
- [11] Lopez-Escobar L, Frey F A, Vergara M. Andesites and high-alumina basalts from Central South Chile high Andes: geochemical evidences bearing to their petrogenesis [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1977, 63:199-228.
- [12] Beard J S, Lofgren G E. Effect of water on the composition of partial melts of greenstones and amphibolites [J]. *Science*, 1989, 244:195-197.
- [13] Beard J S, Lofgren G E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6.9 kb [J]. *Journal of Petrology*, 1991, 32:465-501.
- [14] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalites [J]. *Precambrian Research*, 1991, 51:1-25.
- [15] Winther T K and Newton R C. Experimental melting of an hydrous low-K tholeiite: evidence on the origin of Archaean cratons [J]. *Bulletin of Geological Society of Denmark*, 1991, 39.
- [16] Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of solid amphibolite at 10 kbar: textural development, liquid interconnectivity and applications to the segregation of magmas [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1993, 44:151-179.
- [17] Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1994, 115:369-383.
- [18] Sorensen S S. Petrology of amphibolite-facies mafic and ultramafic rocks from Catalina schist, southern California: metamorphism and migmatization in a subduction zone metamorphic setting [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1988, 6:405-435.
- [19] Sorensen S S, Barton M D. Metasomatism and partial melting in a subduction complex: Catalina schist, southern California [J]. *Geology*, 1987, 15:115-118.
- [20] Sorensen S S, Grossman J N. Enrichment in trace elements in garnet amphibolites from a paleo-subduction zone: Catalina schist, southern California [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53:3155-3177.

- [21] Bebout G E, Barton M D. Metasomatism during subduction: products and possible paths in the Catalina schist, California [J]. *Chemical Geology*, 1993, 108:61-92.
- [22] Barker F, Arth J G. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archaean bimodal trondhjemite-basalt suites [J]. *Geology*, 1976, 4:596-600.
- [23] Tatsumi Y. Chemical characteristics of fluid phase released from a subduction lithosphere and origin of arc magma; evidence from high pressure experiments and natural rocks [J]. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 1986, 29:293-309.
- [24] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite - trondhjemite - granodiorite (TTG), and sanukitoid; relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos*, 2005, 79:1-24.
- [25] Rapp P R, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melt and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8GPa [J]. *Chemical Geology*, 1999, 60:335-356.
- [26] Atheron M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 1993, 362:144-146.
- [27] Kay R W, Kay S M. Creation and destruction of lower continental crust [J]. *Geologische Rundschau*, 1991, 80:259-278.
- [28] Morris P A. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwestern Japan [J]. *Geology*, 1995, 23:395-398.
- [29] Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholith, Peru [J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(6):1491-1521.
- [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.
Zhang Qi, Xu Jifeng, Wang Yan, et al. Diversity of adakite [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23 (9/10):959-965 (in Chinese with English abstract).
- [31] 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*, 2003, 10: 385-400.
Zhang Qi, Wang Yan, Liu Hongtao, et al. On the space-time distribution and geodynamic environments of adakites in China annex: Controversies over differing opinions for adakites in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10:385-400 (in Chinese with English abstract).
- [32] 张旗. 埃达克岩研究的回顾和展望 [J]. *中国地质*, 2008, 35(1): 32-39.
Zhang Qi. Adakite research: retrospect and prospect [J]. *Geology in China*, 2008, 35(1):32-39 (in Chinese with English abstract).
- [33] 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.
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, et al. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite -porphyrites, Anhui Province, China [J]. *Geochimica*, 2001. 30 (4):353-362 (in Chinese with English abstract).
- [34] 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakite)的侵入岩地球化学特征对比:(折沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(2):351-360.
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, et al. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(2):351-360 (in Chinese with English abstract).
- [35] 王元龙, 王焰, 张旗, 等. 铜陵地区中生代酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿-地球动力学意义 [J]. *岩石学报*, 2004, 20: 325-338.
Wang Yuanlong, Wang Yan, Zhang Qi, et al. The geochemical characteristics of Mesozoic intermediate-acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis-geodynamic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20:325-338 (in Chinese with English abstract).
- [36] Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. *Geology*, 2002, 30:1111-1114.
- [37] Wang Qiang, Wyman Derek A, Xu Jifeng, et al. Petrogenesis of Cretaceous adakite and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization [J]. *Lithos*, 2006, 89:424-446.
- [38] Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, et al. Adakites from continental collision zone: Melting of thickened lower-crust beneath southern Tibet [J]. *Geology*, 2003, 31(11):1021-1024.
- [39] Gao Shan, Rudnick Roberta L, Yuan Hongling, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 2004, 432:893-897.
- [40] Kay S M, Ramos V A, Marques M. Evidence in Cerro Pampa Volcanic Rocks for Slab-Melting Prior to Ridge-Trench Collision in Southern South American [J]. *Journal of Geology*, 1993, 101: 703-714.
- [41] Kay S M and Mpodozis C. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust [J]. *GSA Today*, 2001, 11(3):4-9.
- [42] Barker F. Trondhjemites: definition, environment and hypotheses of origin [C]//Barker F (ed.). *Trondhjemites, Dacites and Related Rocks*. Elsevier, Amsterdam, 1979:1-12.
- [43] Hunter D R, Barker F, Millard H T. The geochemical nature of the Archaean Ancient Gneiss Complex and granodioritic suite. Swaziland: a preliminary study [J]. *Precambrian Research*, 1978, 7: 105-127.
- [44] Sheraton J W, Black L P. Geochemistry of Precambrian gneisses: relevance for the evolution of the east Antarctic shield [J]. *Lithos*, 1983, 16:273-296.

- [45] Tarney J, Jones CE, Trace element geochemistry of orogenic rocks and crustal growth models [J]. *Journal of Geological Society of London*, 1994, 151:855-868.
- [46] Castillo P R. The origin of some of the adakite-like and Nb-enriched lavas in southern Philippines [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18:143-151.
- [47] Niu Yaolin. Generation and evolution of basaltic magmas; some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic - Cenozoic basaltic volcanism in eastern China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11:9-46.
- [48] Defant M J, Xu Jifeng, Kepezhinskas P, et al. Adakites: Some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18:129-142.
- [49] Kay R W, Kay S M. Andean adakites: Three ways to make them [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18:303-311.
- [50] Sun Weidong, Ding Xing, Hu Yanhua, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262:533-542.
- [51] 张炯飞, 李之彤, 金成洙. 中国东北部地区埃达克岩及其成矿意义 [J]. *岩石学报*, 2004, 20:361-368.
Zhang Jiongfai, Li Zitong, Jin Chengzhu. Adakites in northeastern China and their mineralized implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20:361-368 (in Chinese with English abstract).
- [52] Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. Epithermal and porphyry deposits: The Adakitic connection [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 325:103-109.
- [53] Charles R, Stern M, Alexandra S. Origin of giant Miocene and Pliocene Cu-Mo deposits in Central Chile: role of ridge subduction, decreased subduction angle, subduction erosion, thickening crustal, and long-lived, batholith-size, open-system magma chambers. *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective* [J]. PGC Publishing Adelaide, 2005, 1:65-82.
- [54] Yang Xiaoyong, Huang Jing, Sun Liguang, et al. Geochemical studies on REE and trace elements from several Cu-Au deposits along the lower Yangtze metallogenic valley, central-southern Anhui Province [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2006, 27, 170-181.
- [55] 杨晓勇. 长江中下游铜金成矿远景区-安徽几个典型铜金矿床成矿地球化学研究 [D]. 中国科学技术大学/中国科学院地球化学研究所博士学位论文, 1996:1-214.
Yang Xiaoyong. The Cu-Au metallogenic prospecting areas from middle-lower reaches of Changjiang River. A study on metallogenic geochemistry of some typical copper and gold ore deposits [D]. Unpublished Ph.D. Thesis of University of Science and Technology of China/Institute of Geochemistry of CAS, Hefei, 1996:1-214 (in Chinese with English abstract).
- [56] Yang Xiaoyong, Zheng Yongfei, Du Jianguo, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Shaxi porphyry Cu-Au deposit, South Tancheng-Lujiang fault belt, Anhui Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 76(3):477-487.
- [57] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 铜陵地区中生代侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Cu-Au 成矿指示意义 [J]. *岩石学报*, 2008, 24:1782-1800.
Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong, Du Jianguo, et al. Zircon and U-Pb geochronology of the Mesozoic intrusive rocks in Tongling region: Implications for Copper-gold mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24:1782-1800 (in Chinese with English abstract).
- [58] 罗小洪. 九瑞中生代岩浆活动及其大地构造意义 [J]. *东华理工大学学报*, 2006, 29:121-126.
Luo Xiaohong. Magmatism and geotectonic significance in Mesozoic Era in Ruichang, Jiujiang area [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 2006, 29:121-126 (in Chinese with English abstract).
- [59] 张连昌, 万博, 焦学军, 等. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2006, 33(3):626-631.
Zhang Lianchang, Wan Bo, Jiao Xuejun, et al. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, western Junggar [J]. *Geology in China*, 2006, 33(3):626-631 (in Chinese with English abstract).
- [60] 裴先治, 王涛, 丁仁平, 等. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2003, 30(4):372-381.
Pei Xianzhi, Wang Tao, Ding Saping, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shangdan zone in the East Qinling [J]. *Geology in China*, 2003, 30(4):372-381 (in Chinese with English abstract).
- [61] Huang Fang, Li Shuguang, Dong Feng, He Yongsheng, Chen Fukun. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust [J]. *Chemical Geology*, 2008, 255:1-13.

The adakite and mineralization of the Shaxi porphyry copper-gold deposit, Central Anhui

YU Liang-fan¹, YANG Xiao-yong², SUN Wei-dong^{2,3}, CHI Yue-yu⁴, ZHANG Qian Ming⁴

(1. The Public Geological Survey Management Center of Anhui Province, Hefei 230001 Anhui, China;

2. Center of Mineral Resources, University of Science and Technology of China, Hefei 230026 Anhui, China;

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640 Guangdong, China;

4. No.327 Geological Party of Anhui Province, Hefei 230011 Anhui, China)

Abstract: Adakites are intermediate to felsic igneous rocks, andesitic to rhyolitic in composition (basaltic members are lacking). They have trondhjemitic affinities (high- Na_2O contents and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 0.5) and their Mg no. (0.51), high contents of Ni (20×10^{-6} – 40×10^{-6}) and Cr (30×10^{-6} – 50×10^{-6}) contents are higher than in typical calc-alkaline magmas. Sr contents are high ($>300 \times 10^{-6}$, until 2000×10^{-6}) and REE show strongly fractionated patterns with very low heavy REE (HREE) contents ($\text{Yb} \leq 1.8 \times 10^{-6}$, $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$). These rocks are depleted in Nb and Ta compared with other igneous rock. The tectonic formation of adakites are still disputed at present, the points of views are: 1) the melting of young oceanic crust during the subduction; 2) delamination or foundering of dense mafic lower crust rocks (e.g., eclogite and garnet pyroxenite) in mafic lower crust to the mantle during continental orogenesis. Consequently, the Fe-Cu-Mo mineralization is closed related to the formation of adakites. On detailed review of geochemical data and geological environment in Shaxi porphyry Cu-Au deposit (central Anhui), we fund the close link between adakite and the regional Cu-Au mineralization. The mineralized model for Shaxi porphyry Cu deposit can be explained by the subduction of the western Pacific plate in the early Cretaceous, whose process released large ion lithophile element (LILE)-rich fluids rise up into the mantle wedge, inducing both its metasomatism and partial melting, trigger a large mount of Cu-Au and fluids materials to the crust environment and melting the subduction plate formed the adakitic assemblage and Shaxi porphyry Cu-Au deposit.

Key words: Adakite; Geochemistry; Porphyry Cu-Au deposit; Shaxi; Subduction of Pacific plate

About the first author: YU Lian-fan, male, born in 1964, senior Engineer of deposit geology.

Corrsponding author: YANG Xiao-yong, E-mail: xyyang555@163.com.