

·学术争鸣·

编者按:本文讨论了C型埃达克岩的成因,提出其成因的复杂性,认为其是高压环境(深度>50 km)的产物。埃达克岩(尤其是C型埃达克岩)的概念一问世,就引起了地质学家的广泛争论,至今仍为岩石学和地球化学领域的热点问题之一。对埃达克岩这一概念持反对意见的专家认为本文作者忽视了岩石学中一个重要的岩石命名原则,即岩石命名是以矿物组成为基础的,只有在无法辨认矿物时才采用化学成分命名的方法,但也只限于利用主要元素来进行岩石命名,因此埃达克岩作为一个岩石类型的提法不合适。本文作者却认为,按照国际岩石学的命名准则(根据矿物组合和结构构造特征或地名命名),埃达克岩的命名也是合理的。针对其他关于C型埃达克岩的形成压力等实验证据方面的异议,作者也尽可能地做出了解释,并提出了今后的研究方向。作为一个学术交流的平台,本刊鼓励持不同见解的专家们各抒己见,就C型埃达克岩甚至埃达克岩的相关研究充分发表自己的意见,相互讨论,真正做到“百花争鸣”,为提高该领域的研究水平做出自己的贡献。希望本文能够抛砖引玉,让更多的专家参与到相关学术讨论中来。

关于C型埃达克岩成因的再探讨

张旗

(中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘要:文中回顾了对C型埃达克岩认识的过程,归纳了C型埃达克岩的产出特征、存在问题、研究意义及今后研究的方向,指出中国东部C型埃达克岩是高钾钙碱性的,可能是变质的中钾和高钾的中基性岩在高压条件下部分熔融形成的。不同于O型埃达克岩,它的成因、源区特征、熔融机制,是今后研究的重点,需要大量实验研究的支持。钾质的C型埃达克岩是新的大陆构造学研究的切入点,比钠质的O型埃达克岩具有更重要的意义。

关键词:C型埃达克岩;O型埃达克岩;成因;意义

中图分类号:P581

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2011)04-0739-09

Reappraisal of the origin of C-type adakitic rocks from East China

ZHANG Qi

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: A comprehensive summary of the definition, mode of occurrence and remaining problems in the studies of C-type adakitic rocks is given in this paper for better understanding the implications of C-type adakite rocks in East China. It is pointed out that C-type adakitic rocks are high-K calc-alkaline and are likely derived from partial melting of intermediate- to high-K meta-andesitic-basaltic rocks under the high pressure condition. Unlike things of O-type adakite, the origin, source rocks and partial melting processes of C-type adakite remain unclear and hence more experimental work may have to be involved in future work.

Key words: C-type adakite; O-type adakite; origin; implications

收稿日期:2010-11-02;修订日期:2011-02-28

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91014001, 90714011, 90714007);中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室自主研究课题资助项目(专0904)

作者简介:张旗(1937-),研究员,岩石学和地球化学专业, E-mail: zq1937@sina.com.

1 对C型埃达克岩的认识过程

C型埃达克岩命运多舛,一出生即争论不断。最近,学术界对C型埃达克岩进行了比较集中的讨论(汪洋,2007;汪洋等,2009,2010;Moyen,2009;黄方等,2010),这些讨论对推进埃达克岩的研究是很有益处的,笔者欢迎这样的讨论。

“C型埃达克岩”是笔者在2001年提出来的,当时是为了与阿留申埃达克岩区别开来,表明其源于下地壳的熔融而非板块俯冲的结果(张旗等,2001a,2001b)。对于C型埃达克岩的成因,当时是这样认识的:“C型埃达克岩是加厚下地壳底部的中基性岩部分熔融的产物。C型埃达克岩富K(大部分仍然是钠质的,少数为钾质的),产于大陆内部,可能是玄武岩岩浆底侵到加厚的陆壳(>50 km)底部导致的下地壳中基性变质岩部分熔融的产物”(张旗等,2001a)。“C型埃达克岩推测是来自软流圈地幔的玄武岩底侵到加厚的陆壳(>50 km)底部导致下地壳基性岩部分熔融形成的”(张旗等,2001b)。

因此,我们最初认为C型埃达克岩是基性岩部分熔融形成的,然后又依据一些高温高压实验的资料进一步指出,C型埃达克岩是加厚的下地壳中基性变质岩部分熔融的产物(张旗等,2008)。但当我们详细考察了华北下地壳的组成和Sr-Nd同位素特征后,发现华北埃达克岩的Sr-Nd成分变化很大,尤其Nd同位素比值,不仅变化大且出奇的低,在辽西 $\epsilon_{Nd}(t)$ 可以为正值,而在胶东和大别可低至-21,后

者显然不可能是玄武岩部分熔融形成的(张旗等,2001c)。因此,在随后讨论埃达克岩的多样性时指出:“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。埃达克岩的多样性是由于构造环境的差异(消减带或下地壳)、源区性质的差异(基性岩或酸性岩以及不同成分的基性岩)、压力的差异(地壳厚度的大小)以及围岩的差异(与地幔或地壳发生混合作用)造成的”(张旗等,2004)。

在2008年我们进一步总结道:“中国东部C型埃达克岩是高钾钙碱性的,不同于O型埃达克岩,它的成因、源区特征、下地壳熔融机制,是今后研究的重点,也是埃达克岩研究的前缘领域。与板块消减作用有关的埃达克岩的研究已经取得相当的成绩,其地球动力学意义比较明确。而与地壳加厚有关的埃达克岩研究正处于起步阶段,是现阶段国际埃达克岩研究的焦点和中心之一。”“有大量的问题等待我们去回答,有众多的现象需要我们去解释”(张旗等,2008,第175~176页)。另外还明确指出:“埃达克岩是以高温高压实验为基础的,它的解释也离不开实验的成果。因此,开展不同源岩在不同条件下的高温高压研究就是一个紧迫的课题,也是一个难度非常大的课题”(张旗等,2008,第176页)。

我们注意到,C型埃达克岩比O型埃达克岩有更宽的成分范围,O型埃达克岩贫K而C型埃达克岩富K(图1的右图)(张旗等,2010),这也是有些学者认为钾质的C型埃达克岩不可能是玄武质源岩部分熔融的结果(汪洋,2007;汪洋等,2009,2010;黄方

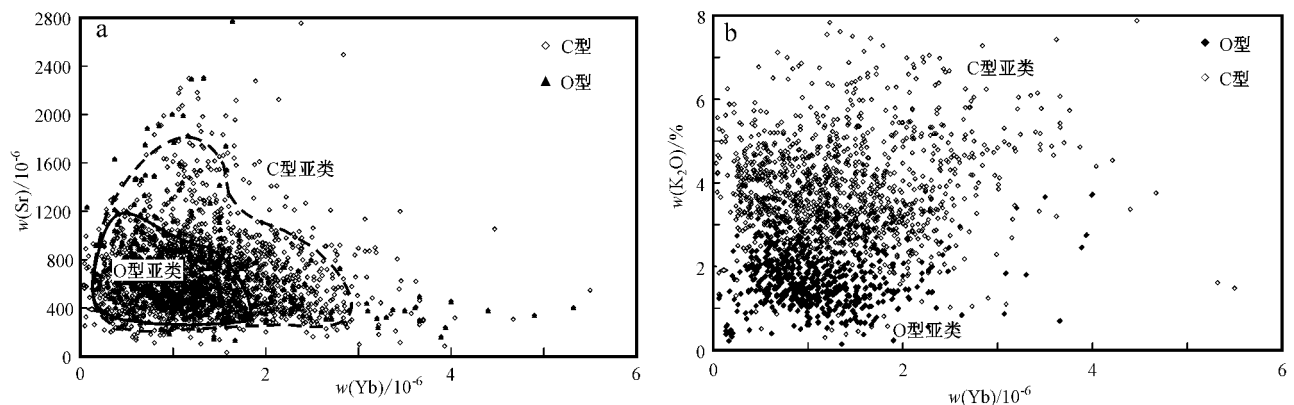


图1 O型和C型埃达克岩的Sr-Yb图(a)和K₂O-Yb图(b)(据张旗等,2010)

Fig. 1 Plots of Sr versus Yb (a) and K₂O versus Yb (b) for O-type and C-type adakites (after Zhang Qi *et al.*, 2010)

等 2010)。但最近的实验表明,由玄武质角闪岩以及干的玄武岩或麻粒岩+少量 H_2O 部分熔融,残留相在低压下是角闪石麻粒岩,在高压下是角闪榴辉岩和榴辉岩,产生的熔体是中酸性的, K_2O 含量主要取决于源岩 K_2O 含量(熊小林等,2011)。经高温高压实验产生的中钾和高钾变质玄武岩部分熔融的熔体的 SiO_2 和 K_2O 含量与华北埃达克质岩石的相应范围几乎完全一致,而代表华北下地壳成分的麻粒岩地体和变质基性火山岩的成分是以中钾和高钾为主的,低钾和钾玄岩系列很少(沈其韩等,1996;张宗清等,1996;黄小龙等,2001;刘勇胜等,1999,2004)。这充分说明华北下地壳中钾和高钾基性变质岩可能是华北 C 型埃达克岩的主要源区岩石(熊小林等,2011)。

O 型埃达克岩 Yb 含量低也许与源岩贫钾(由 MORB 或玄武岩部分熔融形成的)有关。但是 O 型埃达克岩的 Sr 和 Yb 仍然有较大的变化(图 1 的左图)推测可能与部分熔融程度和压力的变化有关。因为随着部分熔融程度的降低和压力的增加(反映在残留相中有更多的石榴子石以及石榴石/角闪石比例的增加),导致 Sr 增加和 Yb 降低(Defant and Drummond, 1990)。

华北有 C 型埃达克岩的广泛出露,它必定来自华北下地壳底部,华北下地壳主要由太古宙和元古宙的中基性变质岩组成,它们应当是 C 型埃达克岩的源岩。中基性的高压变质岩与(直接来自幔源的)玄武岩(浆)是不一样的,至少它们的 $Sr-Nd$ 同位素组成不一样。玄武质岩浆很难部分熔融形成 C 型埃达克岩,但是,中基性变质岩的部分熔融应当可以形成 C 型埃达克岩。

2 C 型埃达克岩出现在何处?

C 型埃达克岩出现在何处?它的产出有什么特别之处,它的意义何在,能够给我们什么启示?

(1) 目前世界上有三大高原:青藏高原、安第斯高原和科罗拉多高原,而最新的产于大陆上的第三纪和第四纪埃达克岩仅出露在安第斯和青藏高原,科罗拉多高原未见报道。青藏高原和安第斯高原是全球地壳厚度最大的地区(>50 km),科罗拉多高原地壳厚度不超过 43 km。看来,地壳厚度 >50 km 可能是埃达克岩产出的重要条件。

(2) 现已知道,青藏高原大约是 20 Ma 后整体

抬升成为高原的,20 Ma 后形成的中酸性岩浆岩都是些什么岩石呢?主要是埃达克岩(主要在冈底斯和可可西里),其次是喜马拉雅型花岗岩(在喜马拉雅山),很少见有浙闽型和南岭型花岗岩的报道。冈底斯、可可西里的埃达克岩都是在青藏高原加厚到 50~80 km 以后出现的,安第斯 9 Ma 以后的埃达克岩也是在安第斯地壳加厚以后出现的。上述埃达克岩怎么解释呢?只有高压是最可能的。这些埃达克岩有什么特点呢?从钠质和钾质的角度至少可以分为 3 类:一类是富钠的,一类是高钾钙碱性的,还有一类是钾玄岩质的。如果考虑到安第斯还有一类广泛发育的钙碱性花岗岩,那么,在加厚地壳的情况下可以出现 4 类花岗岩,它既包括钠质的,也包括钾质的甚至超钾质的。

(3) 华北中生代(在推测的中国东部高原范围内)165~130 Ma 侵位的花岗岩绝大多数都是埃达克岩,其他类型的花岗岩几乎未见(图 2)。而浙闽地区中生代(140~110 Ma)产出的花岗岩绝大多数是浙闽型的。华北花岗岩富 Sr 贫 Yb ,浙闽花岗岩贫 Sr 富 Yb 。这种不同的最大原因是什么?是压力:华北埃达克型花岗岩压力大,源区残留石榴石;浙闽地区的浙闽型花岗岩压力小,源区残留相为斜长石(无石榴石)。至于源区组成,华北和浙闽同样复杂,各种可能的源岩都有,它们的部分熔融程度、水和挥发分含量、受混合的可能性都是变化的,我们虽然不了解,但是,都涵盖在各自变化范围之中了。也就是说,浙闽地区源区组成变化非常复杂,但是,它对花岗岩地球化学的影响大体只能在 $Yb = 1 \times 10^{-6} \sim$

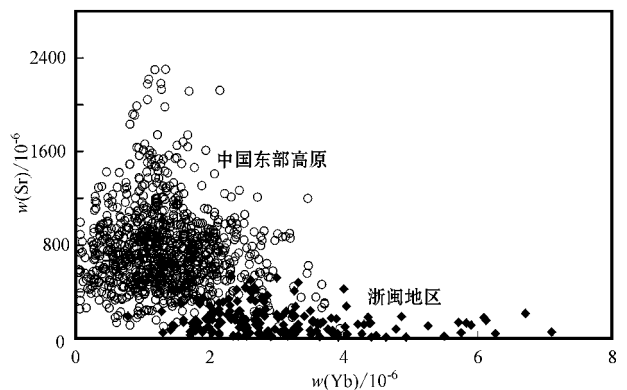


图 2 华北和浙闽地区中酸性岩浆岩 $Sr-Yb$ 图
(据张旗等,2010)

Fig. 2 $Sr-Yb$ diagram of middle-acid magma between North China and Zhemian (Zhejiang and Fujian) area (after Zhang Qi et al., 2010)

7×10^{-6} 、 $Sr = 30 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 之间变化,一般不超出上述范围。同样,华北埃达克型花岗岩的源岩、部分熔融程度、水和挥发分含量、受混合的可能性也是变化极大的。但是,无论上述因素怎样变化,变化多大,都大体限制在埃达克岩范围之内,不大可能落入浙闽型花岗岩范围(张旗等,2010)。

(4)埃达克岩与斑岩铜矿有关,可以这样说,凡是斑岩型铜矿的斑岩绝大多数都是埃达克岩。此外,埃达克型和喜马拉雅型花岗岩与金矿有关,不论金矿是石英脉型、破碎蚀变岩型、剪切带型还是卡林型,只要它们与中酸性岩浆岩有关,这个中酸性岩十有八九是埃达克岩或喜马拉雅型花岗岩。相反,钨锡与A型(即南岭型)花岗岩有关已经是众所周之的了。

(5)埃达克岩与南岭型花岗岩,一个是高压下形成的,一个是低压下形成的,因此,二者不可能同时同地共存。因为按照排他论,一个地区在同一时间内地壳不可能既是厚的又是薄的。如果一个地区既有埃达克型还有南岭型花岗岩出露,我们解释要么二者是叠加的(时代不同),要么是相邻的(该区恰处于地壳厚度变化带上),要么是后期构造所为(将原本不在一起的不同厚度的地壳移到一起了)。我们分析了国内外的许多实例,例外的情况很少(张旗等,2010),当然,还需要继续检验。为了得到正确的信息,这种检验应当在3个条件下进行:精确的年龄、精确的地球化学数据和精确的岩体定位。在这样的情况下得出的结论,不论是肯定的还是否定的,才令人信服。

3 当前C型埃达克岩研究存在的问题

C型埃达克岩的概念广受质疑,虽然研究工作取得了一些进展,但是,问题仍然成堆。这主要表现在以下几个方面:

(1)中国已经对C型埃达克岩进行了广泛的研究,发表了许多资料,提出了许多见解,但是,大多限于地球化学领域。

(2)C型埃达克岩最需要的实验岩石学研究,国内外开展很少。相比TTG,国外研究了半个世纪,做了成千上万次实验,发表了成百上千篇文章,才基本搞明白TTG的形成条件,而TTG是花岗岩类中相对最简单的。就以阿留申群岛的埃达克岩来说,其研究的程度也不算高。例如,Defant和Drummond

(1990)推测埃达克岩形成的深度在70~90 km,而我们认为70~90 km深度是不必要的,30~50 km足矣(张旗等,2008)。因为,与板块俯冲有关的O型埃达克岩形成的最佳条件应当是在角闪岩相转变为榴辉岩相的深度上(含水的)角闪岩的部分熔融最易形成埃达克岩,残留相为榴辉岩。根据对俯冲板片的研究,这个深度不会超过50 km。深度太深,压力太大,在干的榴辉岩相条件下部分熔融就很困难了。

花岗岩熔融实验国外做了不少,积累了许多资料,但大多是以玄武岩作为初始物,原因可能是受板块构造学说的影响并且实验条件比较容易控制。依笔者所见,国外的实验存在两个问题:①主要研究主元素,很少有微量元素资料;②很少有针对已知某地花岗岩的实际资料做针对性研究的实验,而这绝对是最需要的。按照现在的认识,这种研究应该说还是很初步很粗糙的。当然,存在上述问题也与实验技术手段不足有关。国外针对玄武岩的实验已经比较成熟了,而针对非玄武岩的实验还很少,针对变质基性岩、变质中基性岩和变质中性岩的实验尤其少,针对C型埃达克岩的实验几乎是空白。因此,C型埃达克岩究竟是怎样形成的,从实验岩石学角度还不能得出明晰的结论。好在已经有人开始尝试这项工作(如Xiao and Clemens,2007;熊小林等,2011)。国外许多实验讨论了高钾钙碱性岩类,但是,高钾钙碱性系列从低压到高压的都有,国外做了许多不同压力下的实验,这些实验比起国外对TTG的实验,似乎成熟的还不多,而且,是否有高Sr低Yb的数据也不清楚。早先的实验对K和Na有不少讨论,但大多探讨的是富钠的花岗岩,而对不同K含量花岗岩的实验较少。对于微量元素则很少探讨,Sr和Yb的资料更是凤毛麟角。因此,上述实验对于C型埃达克岩是远远不够的。例如,涑源花岗岩和房山花岗闪长岩都是典型的C型埃达克岩,是否可以考虑用各种初始物作为源岩来进行模拟,看看在什么条件下可以出现类似涑源和房山那样的岩石(包括主元素和微量元素)。铜陵与铜矿有关的埃达克岩(石英闪长岩)显然不同于涑源和房山埃达克岩,铜陵埃达克岩的源岩是什么?在什么条件下形成的?最近,Xiao和Clemens(2007)对大别山具埃达克岩特征的天堂寨二长花岗岩进行的实验研究,虽然可能存在某些不足,但是,毕竟是一个良好的开端。中国东部需要大量这样的研究。

(3) 现在国内外的模拟、实验和讨论大多以 Sr/Y 比值作为判别是否埃达克岩的标志。笔者已经指出 Sr/Y 比值不是一个好的判断压力的标志,比 Sr/Y 比值好的是 Sr 和 Yb 的含量(张旗等,2008)。 Sr 主要与斜长石有关, Yb 主要与石榴石相关,而 Y 与石榴石和角闪石两种矿物有关。埃达克岩主要关注的是石榴石而非角闪石,因此,选择 Yb 比选择 Y 更科学和合理,此其一。其二, Sr/Y 比值的概念是模糊的,因为,目前学术界对 Sr 和 Yb 还没有一个明确的定量认识,只大体限定埃达克岩的 $Sr > 400 \times 10^{-6}$, $Y < 19 \times 10^{-6}$ 和 $Yb < 1.8 \times 10^{-6}$ 。如果一件样品的 $Sr > 1000 \times 10^{-6}$, $Y < 5 \times 10^{-6}$ 是什么含义并不清楚。例如一件样品, $Sr = 600 \times 10^{-6}$, $Y = 15 \times 10^{-6}$, $Sr/Y = 40$, 为埃达克岩;另外一件样品,其 $Sr = 200 \times 10^{-6}$, $Y = 5 \times 10^{-6}$, $Sr/Y = 40$, 它是否也是埃达克岩呢?按照 Sr/Y 的标志它是,按照 Sr 含量 ($< 400 \times 10^{-6}$) 的标志它不是。我们如何抉择?按照笔者的见解,以 Sr 和 Yb 的含量为标志(如果假定 $Y = Yb \times 10$ 的话),前者是埃达克岩,后者是喜马拉雅型花岗岩。因此,学术界现在讨论的 Sr/Y 比值,如果不考虑 Sr 的含量,它是否埃达克岩并不清楚。例如,国外许多人认为 TTG 统统具有埃达克岩的特征,而按照笔者的统计,至少有近一半的 TTG 的 Sr 含量并不高 ($< 400 \times 10^{-6}$),并非埃达克岩(张旗等,2008)。但由于 TTG 特别贫 Y ,导致 Sr/Y 比值依然很高,符合埃达克岩的标志 ($Sr/Y > 40$)。而按照笔者的认识,这些低 Sr 的 TTG 属于喜马拉雅型花岗岩而非埃达克型花岗岩。

(4) 钠质和钾质系列有什么意义,主要与源岩有关还是与压力有关?其实,学术界对如何区分钠质与钾质还没有一个统一的标准。以 $Na_2O - 2 > K_2O$ 作为钠质的标志是一种见解,以 $Na/K > 1$ 区分钠质和钾质也是一种见解;前者主要适合 TTG,后者主要针对钙碱性和高钾钙碱性系列。能够解释 TTG 的不一定能够解释大多数富钠的花岗岩,因为,TTG 是太古宙特有的东西,元古宙以后很少。国外对 TTG 特别青睐有他们的道理,但是,搬到元古宙以后就不一定适用。Atherton 和 Petford(1993) 报道的秘鲁富钠质岩浆岩,其 $Na_2O - 2$ 并不大于 K_2O ,其 Na/K 比却与中国东部 C 型埃达克岩相差无几,可是,并没有人怀疑它不是钠质的花岗岩,可见学术界对钠钾比的标志有不同的认识。

花岗岩微量元素很多,不同微量元素的地球化

学行为不同,有些可能主要受源岩控制,有些与部分熔融程度有关,有些与压力有关,有些可能主要反映了水和挥发分的贡献等等,不一而足。应当具体问题具体分析,不能笼统地认为微量元素统统与源岩有关。例如 Sr 和 Yb ,可能主要与压力有关而不是与源岩性质有关(张旗等,2006,2008,2010)。但是,就 Na 和 K 而言,富钠可以是高压下形成的,富钾就不可能吗?我们的统计表明,高压下形成的埃达克岩既有富钠的,也有富钾的;同样,在低压下形成的南岭型花岗岩也有富钠的和富钾的。最典型的实例就是所谓的与蛇绿岩有关的“幔源花岗岩(即斜长花岗岩)”,那绝对是钠质的 ($Na/K > 10 \sim 20$),但肯定不是高压下形成的(形成深度不超过 8 km,据张旗等,2008)。钾质的也一样,可可西里中酸性火山岩具有埃达克岩的特征,属于钾玄岩系列(极端贫 Sr 的)A 型花岗岩也富钾,却是低压下形成的。因此,富钾和富钠,可能主要与源岩有关而不是与压力有关。

(5) 有一种观点认为埃达克岩不需要高压条件,玄武岩与花岗岩混合即可以形成,认为岩浆混合既有熔体之间混合,也有熔体与晶体之间的混合,大部分花岗岩是熔体 + 晶体的混合物,因此,如果有外体系富钙斜长石等混入也会使体系 Sr 含量增加。笔者不赞同上述见解,理由如下:

首先,混合作用对于花岗岩来说是存在的,但是,对于 $Sr - Yb$ 的变化来说,混合作用的影响是无足轻重的。因为:①花岗岩可以发生混合作用,但是,由于花岗质岩浆的黏性很大,混合的发生和混合的程度是极其有限的;②混合作用发生的最佳地点在哪里?在下地壳底部。花岗岩熔融需要高温,没有足够的热,花岗岩不可能熔融。热来自哪里?地幔是最可能的来源。因此,下地壳底部是花岗岩形成的最佳部位,也是花岗质岩浆发生混合作用的最佳部位。一旦花岗质岩浆离开熔融源区向上运移,即处于降温状态,使花岗质岩浆黏性急剧增加而不利于岩浆的混合。③下地壳底部是不均一的,同一地区同一时间来源于同一下地壳底部的不同源岩熔出的不同花岗岩之间的混合,虽然会使花岗岩产生各种各样的变化,但是,无论成分和结构怎样变化,它们的类型不会变。如果地壳很厚,不同源岩形成的花岗岩可能具有不同的特点(I型、S型、M型),但都属于埃达克岩(富 Sr 贫 Yb)。在这里发生的混合,只能是不同源岩形成的不同埃达克岩之间的混

合,其结果仍然是埃达克岩,不可能由于混合而改变花岗岩的类型(例如变为南岭型花岗岩)。最新的实验结果表明,无论是岩浆混合还是拆沉作用成因的高 $Mg^{\#}$ 埃达克质岩石,其地壳端员岩浆均起源于 50 km 以上的厚地壳(熊小林等,2011)。同样,在正常地壳厚度的地壳下形成的是浙闽型花岗岩,岩浆的混合也只能是一个浙闽型花岗岩与另一个(或另几个)浙闽型花岗岩之间的混合,混合的结果仍然是浙闽型花岗岩,也不可能把浙闽型花岗岩改变为埃达克岩。

其次,有人认为,花岗岩的形成,尤其大规模花岗岩的形成必然有幔源岩浆的参与,因此,可能有幔源岩浆组分的加入,而幔源岩浆(尤其是富集地幔岩浆)的 Sr 含量是很高的,因此,埃达克岩的形成无需加厚的地壳。这种说法貌似有理,实际上是不对的,因为:①上述假设并不成立。幔源的玄武质岩浆富 Sr 是对的,但下地壳 Sr 含量也不低。据文献资料,上地壳、下地壳、平均地壳、MORB 和 OIB 的平均 Sr 含量分别为 350×10^{-6} 、 569×10^{-6} 、 503×10^{-6} 、 136×10^{-6} 和 800×10^{-6} (Rollison, 1993, 见杨学明等译 2000, 第 116 页的表 4.9),其中, MORB 的 Sr 含量是最低的(而这恰恰是 O 型埃达克岩的源岩),C 型埃达克岩的源岩是下地壳 Sr 含量(569×10^{-6})比 MORB(136×10^{-6})高得多,底侵的玄武质岩浆如果是拉斑质的, Sr 含量也不算高,只有碱性的玄武岩 Sr 含量最高(800×10^{-6})。因此,下地壳与底侵玄武质岩浆的 Sr 含量在数量级上是近似的。②幔源岩浆与花岗质岩浆混合的程度有多大并不清楚,一份玄武质岩浆与一份花岗质岩浆可以完全混合形成安山质成分的岩浆吗?考虑到玄武质岩浆与花岗质岩浆物理性质上的差异,这种可能性是很难想象的。花岗岩中的暗色微粒包体是玄武质岩浆与花岗质岩浆混合的很好实例,但是,由于包体数量很少,这种混合对花岗岩成分(Sr 和 Yb)的影响也是微不足道的。③玄武质岩浆与花岗质岩浆混合的可能性在下地壳底部无处不在,如果华北埃达克岩 Sr 高可以用有富 Sr 的幔源岩浆混合来解释,那么,在浙闽和南岭也有富 Sr 的幔源岩浆的混合,为什么浙闽和南岭中生代花岗岩的 Sr 含量就很低,高 Sr 的埃达克岩只出现在华北呢?华北与华南的下地壳同样是富 Sr 的,而花岗岩 Sr 含量却明显不同,用混合解释好还是用压力(深度)解释好,不是一目了然吗?

(6)此外,还有一种结晶分离的说法,认为基性

岩的结晶分离作用可以产生埃达克岩,花岗岩本身也会经历分离结晶作用,该过程会导致 Sr 含量的巨大变化(取决于分离结晶相),因此,不能简单地把花岗岩 Sr 含量与其形成的压力联系起来,认为这是花岗岩按照 Sr-Yb 分类的最大错误。笔者认为,上述说法基本上是没有依据的,原因在于:①玄武质岩浆可以发生结晶分离,闪长质岩浆也能够结晶分离,但是,富硅的花岗质岩浆(如 $SiO_2 > 65\%$)不行,由于花岗质岩浆的粘性很大,野外和镜下没有花岗岩结晶分离的证据(张旗等,2007,2008);②花岗岩演化会导致 Sr 含量很大的变化的说法也是靠不住的。华北中生代有石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩(例如八达岭岩基)。八达岭薛家石梁辉长岩-石英闪长岩是能够演化的,它们是幔源岩浆。但是,富硅的花岗闪长岩-二长花岗岩-花岗岩是否演化的不清楚,笔者持否定态度。即使能够演化,它们都是埃达克岩,不论 SiO_2 含量多少,都是高 Sr 的,未见 Sr 含量巨大的变化。当然,这里要排除掉淡色花岗岩和 A 型花岗岩,如涞源岩体中的淡色花岗岩(相当于本文的喜马拉雅型)和八达岭岩体中的 A 型花岗岩(相当于本文的南岭型)。后二者与埃达克岩为侵入接触关系,与主体埃达克岩是不同期的,不是结晶分离形成的。同样,浙闽和南岭也有许多花岗岩,它们的成分也有很大的不同, SiO_2 含量变化很大,笔者也不认可它们是结晶分离形成的。即使按照结晶分离来考虑,浙闽地区浙闽型花岗岩 Sr 含量无论怎样变化也在浙闽型和南岭型范围内。而南岭地区的 A 型(南岭型)花岗岩,无论怎样变化, SiO_2 含量多寡, Sr 含量都是很低的。因此,说花岗岩能够演化,且演化会带来 Sr 含量的巨大变化是没有根据的。文献中花岗岩结晶分离的说法很多,但是几乎没有任何野外实践能够证明它(张旗等,2007,2008),有的只是哈克图解的证据。但是,哈克图解的结论如果没有野外和岩相学观察的佐证依然不是证据。实践是检验真理的唯一标准,没有实践检验的说法是靠不住的。

4 研究 C 型埃达克岩的意义

(1)C 型埃达克岩是下地壳底部各种成分的源岩在高压条件下部分熔融形成的。如果世界上有 1 000 种岩石,至少 800 种可以发生部分熔融形成埃达克岩。现有的资料表明,C 型埃达克岩的出现反映了地壳加厚事件,其地壳厚度至少 > 50 km。

(2)有人坚持埃达克岩必须是钠质的,钾质的就不是埃达克岩。实际上,埃达克岩主要反映的是岩浆来源的深度,而不论其是钠质还是钾质的。我们认为,钾质的C型埃达克岩比钠质的O型埃达克岩有更重要的意义。国外发现和研究的埃达克岩大多是O型的,而O型埃达克岩的意义是有限的。出露于造山带中的O型埃达克岩并非统统是板片熔融形成的,O型埃达克岩不能判断构造环境,O型埃达克岩可以产于板块消减带,也可以是加厚下地壳低钾玄武岩部分熔融形成的。所谓O型C型的区别,据笔者理解,主要是源区不同所致,其他的原因可能是次要的。O型埃达克岩最有价值之处可能是它与斑岩铜矿的密切关系,世界上特大型斑岩铜矿不少与O型埃达克岩有关。事实表明,C型埃达克岩对花岗岩有重要的启示,它开启了花岗岩与压力关系研究的新领域,使人们对花岗岩的认识上了一个台阶,是新的大陆构造学研究的切入点,将推动花岗岩研究进入新时代。

5 C型埃达克岩今后怎样研究?

对于C型埃达克岩,今后大体应当注意以下一些方面:

(1)开展对Sr、Yb地球化学性质的研究。影响花岗岩Sr和Yb含量变化的因素有哪些?压力、残留相和源岩组成、部分熔融方式和程度、蚀变作用、结晶分离作用以及混合作用等等,哪些是主要的,哪些是次要的?Sr和Yb在不同矿物相中的分配系数是怎样的和在什么条件下变化的?花岗岩能否演化,Sr和Yb是否随岩浆演化发生变化,源区花岗岩和最终侵位的花岗岩的Sr和Yb是否发生了变化或发生了怎样的变化?Sr和Yb可以作为花岗岩压力的指标吗?

(2)开展对C型埃达克岩的实验研究。以八达岭花岗岩为例,它由121个侵入体组成,我们是否可以选择其中的一些侵入体开展比较深入的实验研究。如对白峪二长花岗岩和铁炉子花岗闪长岩,它们都是埃达克岩。二长花岗岩和花岗闪长岩是中国东部最常见的花岗岩类型,不仅华北有,华南也不少。那么,它们是在什么条件下形成的?如果假定对白峪二长花岗岩可能有3种源岩(例如高压基性麻粒岩、高压中性麻粒岩、中基性榴辉岩),实验选择3种不同的温度(800、900、1000℃)、4种不同的压力

(1.0、1.5、2.0和2.5 GPa),水加入选择3种不同的情况(无水、含水3%、含水6%)。那么,把上述实验全部做完至少需要108次。实验研究得出的最终产物的标志假设为: $\text{SiO}_2 > 70\%$, $\text{K}_2\text{O} > 4\%$, $\text{Na}_2\text{O} < \text{K}_2\text{O}$, $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$, $\epsilon\text{Nd} < -10$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.706$ 。如果实验结果满足了上述标志,则实验成功,否则还需改变条件继续实验。对铁炉子花岗闪长岩也进行同样的实验。笔者猜想,如果真想真正搞清楚对白峪和铁炉子岩体的形成条件,没有几百次实验是不可能的。而且,结论可能不止一个,可以一直研究下去而没有穷尽。搞清楚TTG的形成条件国外花了近半个世纪的时间,搞清楚八达岭花岗岩不说半个世纪,至少得20年吧。那么,20年以后我们再来讨论,看看八达岭埃达克岩究竟是怎样形成的。

(3)开展对花岗岩演化的熔融实验研究。花岗岩浆能否演化,能否结晶分离,能否混合,已经争论几百年了,谁也说不清楚。笔者猜想现在可能有条件开展这方面的实验研究了,我们可以仿效炼钢的方法设计一个容器,按照不同的温度、压力,加入不同比例的水,看看花岗质岩浆怎样分离、怎样混合、怎样演变?这样的实验可能目前还不现实,但是,总有突破的一天,那对于花岗岩研究将具有划时代的意义。

(4)开展花岗岩(以及C型埃达克岩)的地质研究。研究花岗岩(以及C型埃达克岩)的地球化学性质和物理性质,研究不同侵入体自身成分变化的趋势、原因,研究不同侵入体之间的关系,研究岩浆侵位的过程及其与周围地质体的关系,研究构造变动对岩体的影响等等。将岩体放到大的地质背景中去研究,考察它的地球动力学意义。

我们相信,通过这样的研究,我们就有发言权了,就能够对C型埃达克岩的真实面貌说出个子丑寅卯了。

6 结语

(1)10年来,中国在C型埃达克岩研究上已经取得了许多成绩,其中不少在世界上占有重要地位。但激烈的争论仍然存在,这种争论可能还要持续许多年,并将推动对C型埃达克岩成因的深入认识。

(2)C型埃达克岩不仅具有重要的理论意义,而且具有实实在在的经济意义,这是非常难能可贵的。

C型埃达克岩的研究刚刚起步,现在还处于积累资料的阶段,还没有到理论认识的阶段。

(3) C型埃达克岩的成因可能还需要更多的从实验岩石学的角度进行深入探讨。

(4) 学术界对C型埃达克岩的成因提出质疑和争论是非常必要和可贵的,C型埃达克岩的研究还任重道远。我们的任务是老老实实在地野外实践做起,踏踏实实地积累资料,认真真地琢磨问题,深入探讨,不断创新,提出新认识,开拓新方向,推进埃达克岩研究更上一层楼,推进花岗岩研究步入新时期。

致谢 汪洋对本文初稿提出了许多批评,王焰对本文做了许多有益的修改,熊小林允许笔者使用他尚未发表的论文,特此致谢。还感谢匿名审稿人对本文的批评和评论。

References

- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 347 : 662 ~ 665.
- Huang Fang and He Yongsheng. 2010. Partial melting of the dry mafic continental crust : Implications for petrogenesis of C-type adakites [J]. *Bulletin in China*, 55 : 2 428 ~ 2 439.
- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Chu Xuelei, *et al.* 2001. Geochemical comparative studies of some granulite terranes and granulite xenoliths from North China craton [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20 (3) : 318 ~ 328 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan and Luo Tingchuan. 1999. Geochemistry of granulites in North China Craton : implications for the composition of archean lower crust [J]. *Geology-geochemistry*, 27 (3) : 40 ~ 46 (in Chinese).
- Moyen J F. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios : The meaning of the " adakitic signature " [J]. *Lithos*, 112 : 556 ~ 574.
- Rollison H R. 1993. *Using Geochemical Data : Evaluation, Presentation, Interpretation* [M]. Longman Scientific and Technical Limited.
- Shen Qihan and Geng Yuansheng. 1996. The Petrological and Geochemical Characteristics of Archean Banded Granulites in Northwestern Hebei Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12 : 247 ~ 260 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang. 2007. A discussion on some problems in the research on the Mesozoic potassic igneous rocks in eastern China [J]. *Geological Review*, 53 : 198 ~ 206 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang and Cheng Suhua. 2009. A Preliminary Discussion on the Relationship Between C-type Adakite and Mesozoic Metallogeny of eastern China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (Sup.) : 27 ~ 28 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang and Cheng Suhua. 2010. The " C-type adakite " : a concept based on misunderstanding [J]? *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 29 : 284 ~ 292, 298 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Long and Clemens J D. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas : experimental and field constraint [J]. *Lithos*, 95 : 399 ~ 414.
- Xiong Xiaolin, Liu Xingcheng, Zhu Zhimin, *et al.* 2011. Adakitic rocks and destruction of the North China Craton : evidence from experimental petrology and geochemistry [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 : 858 ~ 870.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2010. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents : Index [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 : 985 ~ 1 015 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, *et al.* 2007. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing : new viewpoints on granitic magma mixing process : some curcial questions on granite study (1) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (5) : 1 141 ~ 1 152 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, *et al.* 2001b. Existence of East China Plateau in mid-late Yanshan Period : implicateon from adakites [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 36 : 248 ~ 255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. A grantie classification based on pressure [J]. *Geological Bulletin of China*, 25 (11) : 1 274 ~ 1 278 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2001a. The characteristics and tectonic- metallogenic significance of the adakites in Yanshan Period from eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17 : 236 ~ 244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan and Wang Yuanlong. 2001c. Preliminary study on the components of the lower crust in East China Plateau during Yanshanian Period : Constrants on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks [J]. *Acta Petrologica, Sinica*, 17 : 505 ~ 513 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, *et al.* 2008. Adakite and Granite : Challenge and Opportunity [M]. Beijing : China Land Press (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Xu Jifeng, Wang Yan, *et al.* 2004. Deversity of adakit [J]. *Geological Bulletin of China*, 23 : 959 ~ 965 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Shen Qihan, Geng Yuansheng, *et al.* 1996. Geochemistry and Ages of Archean Metamorphic Rocks in Northwestern Hebei Province, China, and Formation Time of the Paleocrust in the Region [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12 : 315 ~ 328 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 黄方,何永胜. 2010. 干的基性大陆下地壳部分熔融:对C型埃达克岩成因的制约[J]. 科学通报, 55: 1255~1267.
- 黄小龙,徐义刚,储雪蕾,等. 2001. 华北地台部分麻粒岩地体及包体的地球化学特征对比[J]. 岩石矿物学杂志, 20: 318~328.
- 刘勇胜,高山,骆庭川. 1999. 华北克拉通麻粒岩的地球化学特征及其对太古宙下地壳组成的指示意义[J]. 地质地球化学, 27(3): 40~46.
- 刘勇胜,高山,王选策,等. 2004. 太古宙-元古宙界限基性火山岩 Nb/Ta 比值变化及其对地球 Nb/Ta 平衡的指示意义[J]. 中国科学(D): 34: 1002~1014.
- 沈其韩,耿元生. 1996. 冀西北太古宙条带状麻粒岩的岩石学和地球化学特征[J]. 岩石学报, 12: 247~260.
- 汪洋. 2007. 中国东部中生代钾质火成岩研究中的几个问题[J]. 地质论评, 53: 198~206.
- 汪洋,程素华. 2009. 浅议“C型埃达克岩”与中国东部中生代金属成矿作用的关系[J]. 矿物学报(增刊): 27~28.
- 汪洋,程素华. 2010. “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, 29: 284~292, 298.
- 熊小林,刘星成,朱志敏,等. 2011. 华北埃达克质岩与克拉通破坏: 实验岩石学和地球化学依据[J]. 中国科学(D), 41(5): 654~667.
- 杨学明,杨晓勇,陈双喜(译). 2000. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 张旗,金惟俊,李承东,等. 2010. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志[J]. 岩石学报, 26: 985~1015.
- 张旗,潘国强,李承东,等. 2007. 花岗岩混合问题: 与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一[J]. 岩石学报, 23(5): 1141~1152.
- 张旗,钱青,王二七,等. 2001b. 燕山中晚期的“中国东部高原”: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 36: 248~255.
- 张旗,王焰,李承东,等. 2006. 花岗岩按照压力的分类[J]. 地质通报, 25(11): 1274~1278.
- 张旗,王焰,钱青,等. 2001a. 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, 17: 236~244.
- 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: 505~513.
- 张旗,王焰,熊小林,等. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社.
- 张旗,许继峰,王焰,等. 2004. 埃达克岩的多样性[J]. 地质通报, 23: 959~965.
- 张宗清,沈其韩,耿元生,等. 1996. 赤城伙房村和崇礼上新营变质岩的地球化学特征、年龄及其区域地壳形成时间[J]. 岩石学报, 12: 315~328.