

埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展

许继峰^{1,2}, 邬建斌^{1,3}, 王 强¹, 陈建林¹, 曹 康^{1,3}

1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 桂林理工大学 地球科学学院, 桂林 541004;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要:综述了从 2000 年至现今中国科学家研究板片熔融形成的埃达克岩与非板片熔融产生的埃达克质岩所取得的代表性研究进展和重要贡献。作者提出埃达克质岩的 4 种成因类型:(1)下地壳部分熔融的埃达克质岩;(2)拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩;(3)基性岩浆高压分异的埃达克质岩;(4)混合成因的埃达克质岩。并总结出拆沉下地壳部分熔融、岩石圈拆沉、岩浆混合机制形成埃达克质岩是中国科学家提出的新成因模型,最后讨论了埃达克质岩与非俯冲环境的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的成因联系。

关 键 词:埃达克岩;埃达克质岩;板片熔融;拆沉下地壳熔融;岩浆混合;斑岩 Cu-Mo-Au 矿床

中图分类号:P581 文献标志码:A 文章编号:1007-2802(2014)01-0006-08 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2014.01.015

Research Advances of Adakites and Adakitic Rocks in China

XU Ji-feng^{1,2}, WU Jian-Bin^{1,3}, WANG Qiang¹, CHEN Jian-lin¹, CAO Kang^{1,3}

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

2. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: This paper reviews important progresses and contributions achieved by Chinese scientists on the researches of adakites from slab melting and adakitic rocks from non-slab melting from the year 2000 to present. We divided adakitic rocks into four origin types as following: (1) adakitic rock produced by direct partial melting of lower crust; (2) adakitic rock generated by partial melting of delaminated lower crust; (3) adakitic rock by differentiation of a basaltic magma at high pressure condition; (4) adakitic rock by magma mixing. We conclude that “partial melting of delaminated lower crust”, “lithospheric delamination”, and “magma mixing” to form adakitic rock are new origin models suggested by Chinese scientists. Finally, we address and discuss the genetic relationship between adakitic rock and porphyry Cu-Mo-Au deposit from non-subduction setting.

Key words: adakite; adakitic rocks; slab melting; partial melting of delaminated lower crust; magma mixing; porphyry Cu-Mo-Au deposit

“adakite”这个术语在中国首先出现于 2000 年^[1,2], 大约在 1990 年 Defant 和 Drummond^[3] 提出“adakite”这个术语的 10 年之后, 至今中国学者的埃达克岩(adakite)和埃达克质岩(adakitic rock)的论文在国内外广泛发表, 中国学者于 2000 年至 2013 年期间在 SCI 期刊上发表的有关埃达克岩和埃达克质岩的文章约占所有此领域论文的 45%

(327 篇, 不包括在岩石学报上发表论文), 另据不完全统计, 该时期在中国国内期刊上发表的有关埃达克岩和埃达克质岩的论文超过 434 篇, 相关研究成果也获得了国外学者的广泛关注。有关埃达克岩和埃达克质岩在中国的研究已超过 13 年了, 中国科学家已取得了很大的成绩, 但是对于埃达克岩、埃达克质岩和它们的岩石学意义等仍有一些不正确

收稿日期: 2014-01-01 收到, 01-07 改回

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B)(XDB03010300), 国家自然科学基金资助项目(41121002, 40930316)

第一作者简介: 许继峰(1963-), 男, 研究员, 研究方向: 岩石地球化学与同位素地球化学. E-mail: jifengxu@gig.ac.cn.

或不同的理解,为此本文拟对埃达克岩和埃达克质岩在中国的研究进展做一个简单的综述,鉴于篇幅所限,观点难免过于简略,也很难展开详尽的讨论,无法囊括所有的相关工作,在此深表歉意。

1 埃达克质熔体的概念

板片熔融与埃达克岩:Kay 在研究阿留申 Adak 岛的火山岩时,提出其中的高镁安山岩其可能是由俯冲的太平洋板片发生板片熔融(slab melting)形成的^[4]。Defant 和 Drummond^[3]首先在 Nature 杂志上命名由板片熔融形成的一套中酸性火成岩为“adakite”,从此 adakite 这个术语在国际上得到广泛的关注和应用。Defant 和 Drummond 对 adakite 的原始定义是其产生在俯冲消减环境由板片熔融形成的一套中酸性火山岩,其独特的地球化学特征就是亏损重稀土元素(HREE)与 Y(如 Yb 为 1.9×10^{-6} , Y 为 18×10^{-6})、高 Sr($>400 \times 10^{-6}$),很少小于 400×10^{-6})、La/Yb($>7.6 \sim 15.0$)与 Sr/Y($>20.0 \sim 40.0$),一般具有正铈异常(少数具有极弱负铈异常),本文称之为埃达克质地球化学成分特征,因此将产生在俯冲消减环境并由板片熔融形成、并具有上述地球化学特征的中酸性火成岩称之为埃达克岩(adakite)。

埃达克质岩:在板片熔融形成埃达克岩的概念提出之后,研究者发现一些具有埃达克岩的地球化学成分特征的中酸性火成岩,不一定产出在岛弧环境,也不是俯冲板片熔融产生的。如 Atherton 和 Petford^[5]注意到一些富钠的中酸性侵入岩也具有埃达克岩的组成特征,但不是板片熔融产物,而提出是新底垫的玄武质下地壳部分熔融形成的。又如 Castillo 等^[6]指出菲律宾南部的一套具有埃达克岩成分特征的火山岩,可能是玄武岩浆高压分异的产物。之后中国的科学家也发现中国东部的一些具有埃达克岩成分特征的中酸性火成岩^[7-13],如张旗等^[7]、王强等^[9]等研究较早提出这些岩石是大陆下地壳物质部分熔融产物。因此,本文将具有埃达克质地球化学组成特征但不是板片熔融形成的火成岩统称为埃达克质岩(adakitic rock 或 adakite-like rocks)。

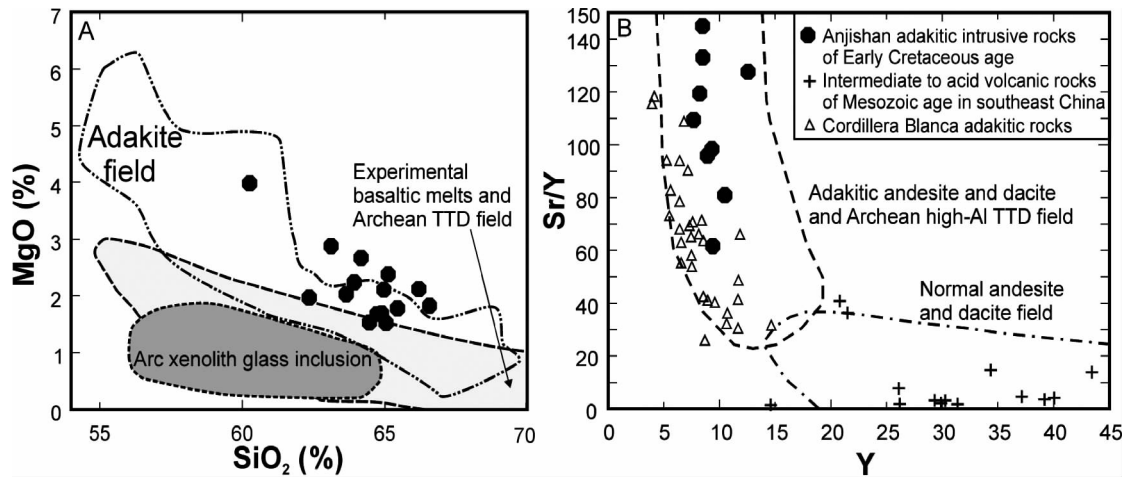
埃达克质熔体(岩浆):无论是埃达克岩还是埃达克质岩,其可形成在不同的构造环境,它们的形成过程、特别是埃达克质岩成因可以是多样的,但是它们都是由具有埃达克质地球化学成分的熔体(岩浆)结晶形成。本文所指的埃达克质熔体是指

镁铁质的源岩在石榴石(+金红石)为残留相条件下,部分熔融形成的,或者中基性岩浆在石榴石(+金红石)稳定相条件下,经历高压分离结晶,或者是在相同条件下,通过岩浆混合过程形成的中酸性熔体。

本文认为不同成因或构造背景的埃达克质熔体具有的共性是熔体形成时石榴石+金红石为稳定相或残留相存在,这表明该种中酸性熔体起源或产生在一个约大于或等于 40~50 km 的地壳(下地壳)深处,而明显不同于不具有埃达克质成分组成的中酸性岩,后者很可能主要起源或形成在比埃达克岩或埃达克质岩相对浅(如小于 40 km)的中上地壳内。作者强调首先埃达克质熔体是中酸性的,这表明它们不是直接来自于地幔部分熔融的产物,其源岩或母岩(浆)很可能是基性物质;其次,它们具有埃达克质的地球化学组成特征,反映出它们产出一个深的地壳部位。因此本文认为正确理解埃达克岩、埃达克质岩特别是埃达克质熔体的概念对于探寻它们所蕴含的岩石学乃至其地球动力学意义是至关重要的。

2 埃达克岩与埃达克质岩的类型和多样性

埃达克岩是产出在俯冲消减带环境的俯冲板片熔融的产物,对此概念尚无争议,典型的埃达克岩的出露产地位于北美的 Adak 岛,其是一套俯冲成因的高镁英安岩和安山岩^[4]。在 Defant 和 Drummond^[3]的最初定义中,埃达克岩应该是低 MgO 含量的(不超过 3%),但是后来的许多研究都显示实际上板片熔融形成的埃达克岩石都有相对高的 MgO 含量,并且这可能是埃达克岩的固有特征,比如典型板片熔融产地的 Adak 岛的岩石大部分也是相对高 MgO 或高 $Mg^\#$ (图 1),导致埃达克岩富镁的原因,通常被解释为俯冲板片部分熔融形成的中酸性埃达克质熔体(低镁的),在上升穿过弧下地幔楔时与地幔橄榄岩反应而导致 MgO 或 $Mg^\#$ 升高。据此埃达克岩可分成两类:(1)低 $Mg^\#$ 的埃达克岩,由板片熔融形成的初始埃达克质熔体直接结晶形成,这类岩石可能在自然界不太常见,因为这类未经演化的埃达克质熔体很难上升到地表;(2)高 $Mg^\#$ 的埃达克岩,其是初始的埃达克质熔体在上升过程中与地幔楔橄榄岩反应然后在地表喷发或者上侵到地壳浅部形成的,后一类岩石在俯冲带更为普遍存在。



埃达克岩有相对高的 MgO 含量和 Sr/Y 比值,同时拆沉下地壳成因埃达克质岩(Anjishan)也有高的 MgO 含量和 Sr/Y 比值

图 1 埃达克岩、埃达克质岩和实验玄武质熔体的 MgO-SiO₂ 和 Sr/Y-Y 关系^[14]

Fig. 1 MgO-SiO₂ and Sr/Y-Y diagram of adakites, adakitic rocks and basaltic melts^[14]

另外一个埃达克岩的分类是高硅埃达克岩与低硅埃达克岩,最早由 Martin 等^[15]提出,也被一些研究者所使用。所谓高硅的埃达克岩实际上就是大家所认知的板片熔融形成的埃达克岩,它们的成分是中酸性的,但是 Martin 等^[15]把与埃达克岩共生的或相关的中基性岩石划归为低硅的埃达克岩。作者认为,低硅埃达克岩已经超出了 Defant 和 Drummond^[3]定义的埃达克岩的范畴,这些低硅的“埃达克岩”可能与板片熔融过程无关,它们的成分是中基性的,有可能是消减带地幔楔的部分熔融产物或者共生的玄武岩浆的演化产物。因此低硅的“埃达克岩”可能会导致对埃达克岩概念的不正确理解,建议最好不要使用“低硅埃达克岩”的术语。

相对于板片熔融形成的埃达克岩,非板片熔融形成的埃达克质岩更是多种多样,它们在自然界也更为常见,可产出在不同的构造环境,并且有多种成因机制,由于其成因复杂和产出构造环境的多样性,目前对埃达克质岩还没有一个统一与合理的分类。比如根据这类岩石产出构造环境,可简单地将其划分为:俯冲环境埃达克质岩、造山带埃达克质岩、大陆内部埃达克质岩等等。作者认为,埃达克质岩是非板片熔融形成的具有埃达克质成分特征的中酸性岩石,因此最合理的分类是按照它们不同的成因机制进行划分,为此将埃达克质岩石初步划分成以下成因类型:

(1)下地壳部分熔融的埃达克质岩:此类埃达克质岩由下地壳中的基性物质直接部分熔融形成,它们应涵盖前人曾提出的新底侵基性岩的部分熔融的埃达克质岩石。不论年轻的下地壳基性岩石,还是相对古老的下地壳基性物质,都可在一定的构

造条件下发生部分熔融形成埃达克质岩石,作者把所有来自下地壳源区的这类岩石称为下地壳直接部分熔融的埃达克质岩,它们的一个共同的地球化学特征应该是低 Mg[#]的(图 1)。

(2)拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩:由下地壳拆沉到下伏地幔过程中地壳基性岩物质部分熔融形成或者是岩石圈拆沉过程中下地壳基性物质部分熔融形成的埃达克质岩。此类岩石有类似于板片熔融的形成机制,可能经历了与地幔橄榄岩的反应过程,因此它们应该是相对高镁的(图 1)。

(3)基性岩浆高压分异的埃达克质岩:此类埃达克质岩石是由其基性母岩浆在相对高压条件下(如下地壳部位)通过分异形成的岩石。此类埃达克质岩石应该与一系列有成因联系的中基性岩石密切共生。

(4)混合成因的埃达克质岩:此类埃达克质岩是由基性岩浆与酸性岩浆在地壳深处通过两单元混合形成岩浆后结晶形成,此类埃达克质岩石应该保留有岩浆发生混合作用的证据。

3 高温高压实验对埃达克质熔体形成条件制约

埃达克岩与埃达克质岩的形成条件一直是存在争议的,玄武岩质的高温高压熔融实验是限定埃达克质熔体形成条件的最佳途径。在 2000 年之前,国际上已有一些高温高压实验研究揭示埃达克质熔体的形成条件,如依据石榴石作为基性岩源区的稳定残留相将其形成深度限定大于或等于约 40 km 以上^[16~18],但是这些实验研究成果对埃达克质熔体

的形成条件还缺乏精确的限制。中国科学家熊小林等随后在埃达克质熔体的形成条件的高温高压实验研究方面开展了一系列原创性的工作^[19~21],取得了重要的研究进展,因此中国科学家近年来在高温高压实验对埃达克质熔体形成条件研究方面做出了重要的贡献。

埃达克和 TTG 岩浆由变质玄武岩在俯冲带或下地壳熔融产生,高温高压实验是阐明埃达克岩和 TTG 岩石成因和形成条件的关键。针对埃达克岩/TTG 岩石独特微量元素特征,特别是 Ti、Nb、Ta 亏损的岩石成因含义等科学问题,使用活塞圆筒实验技术系统开展了变质玄武岩体系相平衡和部分熔融实验,限定了金红石在变质玄武岩体系稳定的压力和温度条件,揭示金红石是导致埃达克质熔体和 TTG 岩浆 Ti, Nb, Ta 亏损的必要残留矿物,由金红石稳定的最小压力 1.5 GPa 限定埃达克岩和 TTG 岩浆产生深度大于 50 km(图 2),这比前人所认为埃达克质熔体形成在约 40 km 之下的深度^[17, 18]加深了约 10 km;由金红石(TiO₂)在长英质熔体中的溶解度限定埃达克和 TTG 岩浆形成温度 750°C~950°C;为俯冲洋壳、下地壳基性岩石的熔融条件和古地壳增厚事件提供了关键依据^[18]。

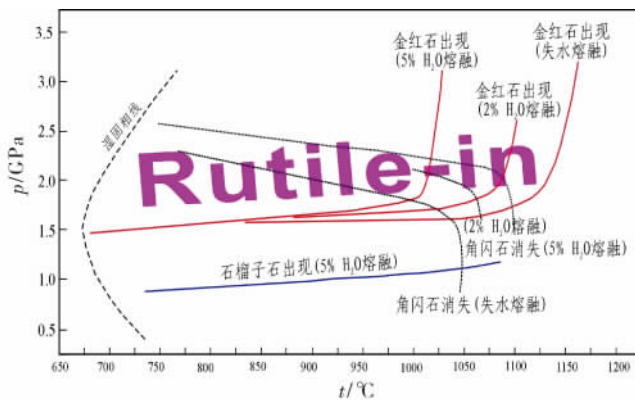


图 2 玄武岩部分熔融 $p-t$ 图和金红石和角闪石相平衡关系^[19]

Fig. 2 $p-t$ diagram of basaltic melts and phase equilibrium relation between rutile and amphibole^[19]

针对现有微量元素分配系数资料,难以满足埃达克/TTG 岩石成因模拟的需要,通过高温高压实验,系统测定了变质玄武岩部分熔融过程中角闪石、石榴子石、单斜辉石和金红石与熔体之间 27 个微量元素(包括大离子亲石元素、稀土元素、高场强元素和过渡元素)的分配系数,使用这套完整成套的分配系数,限定具有与埃达克岩/TTG 微量元素特征一致的熔体主要由含金红石角闪榴辉岩熔融

产生,而不是由角闪岩或无角闪石的榴辉岩熔融产生,明确揭示含金红石角闪榴辉岩熔融是埃达克/TTG 质岩浆产生的最佳模型^[20]。

4 下地壳或岩石圈拆沉形成埃达克质岩的成因模型

埃达克质岩的形成有多种成因机制,但是在 2000 年之前,国外科学家提出的最可能机制是新近底侵的玄武岩的部分熔融^[5],即新近形成的玄武岩质下地壳通过部分熔融形成埃达克质岩石;此后 Castillo 等^[22]也提出通过玄武岩浆的高压分离结晶形成埃达克质岩石。但是这些建议的模型不能解释所有出露在大陆内部埃达克质岩石是如何形成的。中国科学家在埃达克质岩的成因机制研究方面做出了重要的贡献,提出了埃达克质岩石通过下地壳拆沉和岩石圈拆沉过程形成埃达克质岩石的新模式^[10, 14, 23],并得到国内外学者的广泛关注。

Xu 等^[14]通过对华中地区一些燕山期中酸性侵入岩的研究,确定它们具有埃达克质成分特征,但不可能是俯冲过程板片熔融的产物,应该属于埃达克质岩石。但是用常用的新近底垫玄武岩质下地壳部分熔融产生埃达克质岩石的模型,不能合理地解释这些华中地区燕山期埃达克质岩的成因,这些埃达克质岩具有埃达克质地球化学组成特征,但是相对那些来之下地壳基性物质直接部分熔融形成的埃达克质岩,它们具有明显高的 MgO (>3%) 和 Mg[#] (>60), 而表现出与俯冲环境板片熔融形成的埃达克质岩石类似的成分特征。高温高压实验研究均揭示,玄武岩部分熔融形成的熔体均不具有高的 MgO 和 Mg[#] 值^[17, 18],因此假如这些埃达克质岩石直接来自于陆内下地壳,它们不应该具有如此高的 MgO 和 Mg[#] 值,要导致这种高镁的埃达克质岩石的形成,需要来自下地壳直接部分熔融的埃达克质熔体加入额外的 Mg 组分,类似于俯冲带的埃达克质熔体与地幔楔橄榄岩的反应增加了埃达克岩 MgO 含量。另外一个重要的地质特征是华中地区的地壳厚度现今仅 30 km,而实验岩石学研究指示埃达克质熔体形成时其形成深度至少大于或等于约 40 km,表明燕山期时该地区的地壳厚度应该大于 40 km,因此从燕山期到现代,华中地区的地壳厚度从至少 40 km 变薄到现今的 30 km,约 10 km 的下地壳消失了。为此,Xu 等^[14]提出了角闪榴辉岩下地壳拆沉到下伏地幔之中,进入到地幔之中的下地壳发生部分熔融形成埃达克质熔体并与地幔橄榄岩反应,从而形成了高 MgO 和 Mg[#] 的埃达

克质岩(图 3)。这个形成埃达克质岩的模型被国内外学者广泛引用。

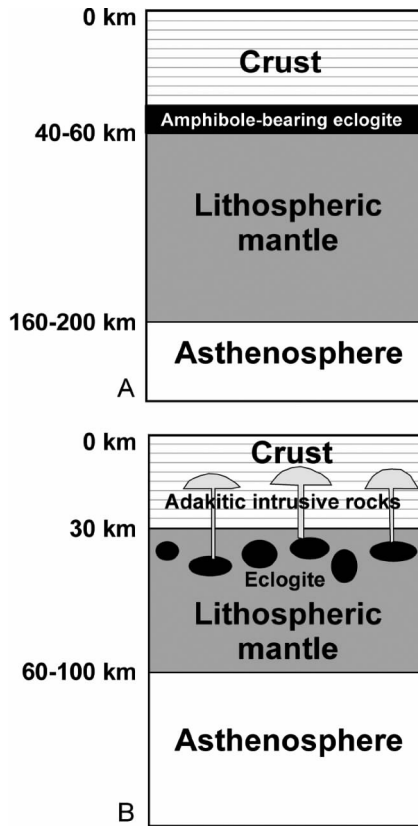


图 3 下地壳拆沉形成埃达克质岩石的模型^[14]
Fig. 3 Model of adakitic rocks by partial melting of delaminated lower crust^[14]

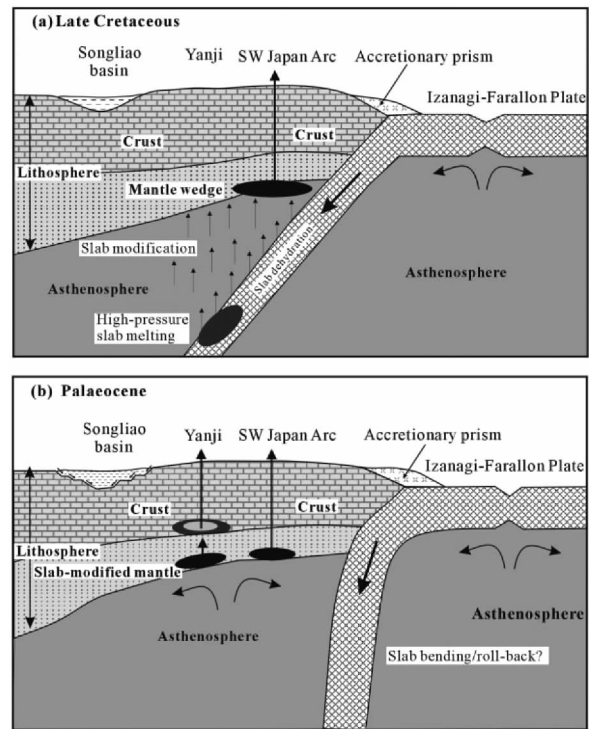
相关的另一项中国科学家的代表性研究成果是 Gao 等^[23]对华北地区河北兴隆沟组中酸性埃达克质岩与共生火成岩的研究,他们同样识别出这套中酸性的埃达克质火山岩具有相对高的 MgO 和 Mg[#] 值,并且这些埃达克质岩矿物中具有不可思议的辉石反环带,即单斜辉石斑晶发育斜方辉石的反环带。据此 Gao 等^[23]在 Nature 上提出了华北岩石圈地幔在燕山期发生拆沉,然后进入到下伏地幔之中的下地壳部分发生部分熔融,形成的初始埃达克质熔体与周边的橄榄岩反应,从而形成了该地区高的 MgO 和 Mg[#] 值与具有斜方辉石的反环带的埃达克质岩。这项工作首次建议在大陆内部通过岩石圈拆沉形成高的 MgO 和 Mg[#] 值埃达克质岩的新模式,也被国际地学界的广泛关注和引用。

5 岩浆混合能形成埃达克质岩吗？

从 2000 年之后,中国科学家在国内已识别出很多埃达克质岩产地,并认为这些埃达克质岩石是下地壳直接部分熔融的产物^[7, 8],张旗等^[7]称为 C-型

埃达克岩,但是一直存在不同的意见是这些埃达克质岩可能不是下地壳直接部分熔融成因,而可能是基性岩浆与酸性岩浆混合的产物^[24, 25],并存在很大得争议。

Guo 等^[26]的研究在东北延吉地区识别出一套埃达克质火山岩,这套岩石也不可能是俯冲带板片熔融的产物,而应该是埃达克质岩。一个有意思的现象是 Guo 等^[8]通过对该套岩石中斑晶环带的微量元素原位分析,发现这些斑晶矿物曾经历岩浆混合作用,因此这套埃达克质岩石很可能是基性岩浆单元与酸性岩浆单元发生混合而形成这套具有埃达克质成分特征的火山岩(图 4)。这个研究揭示通过岩浆混合作用也可形成埃达克质岩石。



板片熔体交代的地幔楔发生减压熔融形成原始埃达克质熔体,其在上升过程中在下地壳与长英质熔体发生两单元岩浆混合形成延吉埃达克质安山岩

图 4 岩浆混合形成埃达克质岩石模型^[26]
Fig. 4 Model of adakitic rocks by magma mixing^[26]

最近 Chen 等^[27]在 Geology 上发表的成果,也揭示华北地区的中生代埃达克质侵入岩是经历了岩浆混合作用形成的。Chen 等^[27]对华北地区那些被认为是来自下地壳直接熔融的埃达克质岩石^[7]及其相关火成岩开展了 Sr-Nd-Os 同位素和元素地球化学系统研究,从而得出这些华北地区的中生代埃达克质侵入岩应该是基性岩浆与酸性岩浆混合形成的结论。

因此,岩浆混合作用可能是形成埃达克质岩的一种可能方式,这种埃达克质岩的形成模式是中国科学家首先提出来的,也是中国科学家对埃达克岩和埃达克质岩领域研究的重要贡献。本文认为,岩浆混合作用可能形成一些埃达克质岩石,但是不能认为如华北所有的中生代埃达克质岩都是岩浆混合的产物,具体研究实例还需要具体分析,对于混合成因的埃达克质岩,需要找到这些埃达克质岩曾经历过岩浆混合的岩石学和地球化学证据,才能分析得出正确的结论。另外,需要指出的是混合作用形成埃达克质的2个岩浆单元,其中基性岩浆单元应该具有低的Sr/Y比值和低的重稀土元素含量,它们与具有相对高Sr/Y比值和重稀土元素含量的酸性岩浆单元混合,才能形成混合成因的埃达克质岩石。

6 埃达克质岩与斑岩 Cu-Mo-Au 成矿

斑岩 Cu-Mo-Au 矿床主要产出在俯冲消减环境,但直到本世纪初才有科学家提出世界上的大型-超大型斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的成矿母岩可能是埃达克岩^[28],从此埃达克岩与斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的成因联系得到广泛的关注和讨论。但是需要指出的是,尽管大多数的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的成矿斑岩是埃达克岩,但是一些南美的重要斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的成矿斑岩并不具有埃达克质成分特征,它们属于正常安山岩-英安岩-流纹岩岩系。因此,埃达克岩与斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的内在联系还需要深入地探讨,目前看来埃达克岩为成矿斑岩还不能作为斑岩 Cu-Mo-Au 矿床形成的必要条件。

上述讨论仅提及俯冲带斑岩 Cu-Mo-Au 矿床以及埃达克岩,而埃达克质岩石与斑岩成矿的关系在2002年之前国内外均未涉及。可以说是从2002年之后,中国科学家和地质找矿工作者在埃达克质岩与非俯冲环境的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床方面的研究乃至找矿有重大的突破和贡献,如张旗等^[29, 30]、侯增谦等^[31, 32]、王强等^[33]很早提出了埃达克质岩和埃达克岩与斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的成因联系,并强调它们是斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的成矿母岩。从那个时间之后,大批各类不同时代的埃达克质岩在中国被识别出,同时一批新的非俯冲环境的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床也被陆续发现,例如在年轻的现今仍在活动的青藏造山带地区,冈底斯中新世的斑岩 Cu-Mo-Au 成矿带,是中国近年来发现的最大的斑岩成矿带,所有已有的研究成果显示,这些与中新世斑岩矿床相关的成矿斑岩都是埃达克质的。

Chung 等^[34]最早揭示在西藏冈底斯存在一条东西向的中新世(10~26 Ma)埃达克质岩带,并提出它们不是板片熔融产物,而是冈底斯之下加厚地壳的下地壳部分熔融的产物。Hou 等^[35~37]系统研究也揭示出这条埃达克质岩带的存在,并指出这套中新世的埃达克质岩与陆续发现的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的成因联系,明确指出这些埃达克质岩应该是斑岩矿床的成矿母岩;随后有更多的地质工作者开展了埃达克质岩与斑岩矿床的深入研究,本文不再一一叙述。归纳以上,作者认为中国科学家在埃达克质岩与 Cu-Mo-Au 成矿研究方面有以下重要或重大贡献:(1)西藏冈底斯的中新世埃达克质岩形成在10~26 Ma,在这个时期青藏高原已是造山带并成为陆内环境,因此这些埃达克质岩不可能与俯冲成因的埃达克岩相关,表明具有埃达克质成分特征的火成岩可以由非板片熔融过程形成;(2)通过造山带的埃达克质岩与相关的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的研究,揭示出斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的确可以产出一个非俯冲的陆内或造山带环境;(3)非俯冲的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床,如冈底斯中新世斑岩成矿带,其成矿母岩浆都应该具有埃达克质组成特征,这种母岩浆很可能是此类斑岩 Cu-Mo-Au 矿床形成的必要条件,暗示这些成矿岩浆应起源于下地壳深处,而不同于俯冲成因的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床形成条件。

需要指出的是,埃达克质岩与非俯冲成因的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的成因联系仍不十分清楚的,需要进一步深入探讨,例如起源于陆内下地壳的埃达克质岩浆为什么能携带如此大量的斑岩成矿金属?它是如何演化导致斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的形成?非板片熔融的埃达克质岩与斑岩 Cu-Mo-Au 矿床形成所需的流体与高氧逸度是如何产生的?这些不仅是埃达克质岩和斑岩矿床形成的理论问题,而且对斑岩 Cu-Mo-Au 矿床的找矿勘探也有重要指导意义。

7 结 论

(1)自然界存在俯冲板片熔融形成的埃达克岩与非板片熔融形成的埃达克质岩,尽管两者都是埃达克质熔体的结晶产物,但是它们形成的构造环境和成因机制是不同的。

(2)埃达克质岩石可分为以下4种成因类型:①下地壳部分熔融的埃达克质岩;②拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩;③基性岩浆高压分异的埃达克质岩;④混合成因的埃达克质岩。

(3)中国科学家提出了拆沉下地壳部分熔融和岩石圈拆沉形成埃达克质岩、岩浆混合形成的埃达克质岩的成因新模型,并得到国内外的广泛关注和引用。

(4)埃达克质岩与非俯冲环境的斑岩 Cu-Mo-Au 矿床具有成因联系。

致谢:非常感谢周新华老师的多次约稿和持续鼓励,才有这篇论文的刊出。熊小林研究员在论文的高温高压撰写方面有贡献,特表谢意。另外,中国科学家近年来在埃达克岩和埃达克质岩的研究领域取得了很多的成果,本文仅引用和评述了发表在国内外刊物上的部分代表性成果,挂一漏十,不妥之处请谅解,谨向所有被引用论文的作者表示感谢!

参考文献 (References):

- [1] Xu J F, Wang Q, Yu X Y. 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[J]. *Geochemical Journal*, 2000, 34: 359-377.
- [2] 王焰, 张旗, 钱青. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 251-256.
- [3] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347: 662-665.
- [4] Kay R W. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1978, 4: 117-132.
- [5] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362: 144-146.
- [6] Castillo P R, Janney P E, Solidum R. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights into the source of adakite and other lavas in a complex arc tectonic setting[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134: 33-51.
- [7] 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236-244.
- [8] 许继峰, 王强, 徐义刚, 赵振华, 熊小林. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 576-584.
- [9] 王强, 许继峰, 赵振华, 王人镜, 邱家骥, 包志伟. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 551-564.
- [10] 王强, 赵振华, 简平, 许继峰, 包志伟, 马金龙. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 315-324.
- [11] 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 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[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 351-360.
- [12] 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 许继峰, 王强. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因:Nd 和 Sr 同位素组成的限制[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 514-522.
- [13] 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 北大别东部白垩纪埃达克质火山岩及其锆石 U-Pb 年代学[J]. *地球化学*, 2002, 31(5): 455-463.
- [14] Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q, Rapp R P. 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.
- [15] Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champion D. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79: 1-24.
- [16] 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.
- [17] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chemical Geology* 1999, 160: 335-356.
- [18] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: Implications for the origin of adakites [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1994, 117: 394-409.
- [19] Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis [J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 339-359.
- [20] Xiong X L. Trace element evidence for the growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite [J]. *Geology*, 2006, 34: 945-948.
- [21] 熊小林, 韩江伟, 吴金花. 变质玄武岩体系相平衡及矿物-熔体微量元素分配: 限定 TTG/埃达克岩形成条件和大陆壳生长模型 [J]. *地学前缘*, 2007, 14(2): 149-158.
- [22] Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51: 257-268.
- [23] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Lin W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. Recycling lower continental crust in the North China Craton [J]. *Nature*, 2004, 432: 892-897.
- [24] 陈斌. 内蒙古苏尼特左旗南白音宝力道岩体特征与成因——是岛弧岩浆岩而不是埃达克岩 [J]. *地质论评*, 2002, 48(3): 261-266.
- [25] 陈斌, 陈长健, 贺敬博, 刘安坤. 华北东部中生代高镁埃达克质岩浆的起源: 岩石学和 Nd-Sr-Os 同位素证据 [J]. *科学通报*, 2013, 58(20): 1941-1953.
- [26] Guo F, Nakamura E, Fan W M, Kobayoshi K, Li C W. Generation of Paleocene adakitic andesites by magma mixing;

- Yanji Area, NE China[J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48: 661–692.
- [27] Chen B, Jahn B M, Suzuki K. Petrological and Nd-Sr-Os isotopic constraints on the origin of high-Mg adakitic rocks from the North China Craton: Tectonic implications[J]. *Geology*, 2013, 41: 91–94.
- [28] Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits [J]. *Geology*, 2002, 30: 915–918.
- [29] 张旗, 王元龙, 张福勤, 王强, 王焰. 埃达克岩与斑岩铜矿[J]. *华南地质与矿产*, 2002, (3): 85–90.
- [30] 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 195–204.
- [31] 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 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[J]. *矿床地质*, 2003, 23(1): 1–12.
- [32] 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 曲晓明, 黄卫. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克质斑岩成因与构造控制[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 239–248.
- [33] 王强, 许继峰, 赵振华. 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[J]. *地学前缘*, 2003, 10(4): 561–572.
- [34] Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, Chu M F, Lee H Y, Wen D J, Lo C H, Lee T Y, Qian Q, Zhang Q. Adakites from continental collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. *Geology*, 2003, 31: 1021–1024.
- [35] Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, Rui Z Y, Mo X X. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, 220: 139–155.
- [36] Hou Z Q, Zeng P S, Gao Y F, Du A D, Fu D M. Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: constraints from Re-Os dating of molybdenite[J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41: 33–45.
- [37] Hou Z Q, Zhang H R, Pan X F, Yang Z M. Porphyry (Cu-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: Examples from the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 39: 21–45.

· 学会之声 ·

《矿物岩石地球化学通报》第五届编委会 第一次会议在京召开

2013年12月15日上午,《矿物岩石地球化学通报》(以下简称《通报》)第五届编委会第一次会议在北京召开。欧阳自远主编、刘丛强、周新华、胡瑞忠副主编等33名编委参加会议,李世杰秘书长列席会议。会议由欧阳自远主编主持。

首先,常务副主编刘莉全面汇报了《通报》2009—2013年的工作,包括稿件情况、主要计量评价数据,以及编辑部运行、出版发行等。报告回顾既往,立足当前,就《通报》的发展问题进行了思考。与会编委充分肯定了《通报》取得的成绩,肯定了编辑部在主编和编委会的领导下,为提高期刊质量做出的积极努力。但在面临期刊同质化竞争加大,数字化、集群化时代,《通报》面临着很多的困难。

经过充分而热烈的讨论,与会编委就《通报》的发展和改革的必要性和可能性取得了共识。会议认为,《通报》要走可持续性发展的道路,一是要重新调整定位,强化特色,要体现《通报》作为学会会刊,以及短、平、快的特点,以提高其自身

价值。二是要充分发挥编委会、学会理事会的作用,深层次、多渠道挖掘稿源。三是要顺应当前科技期刊数字化、集群化和网络化的发展趋势;四是加强编辑队伍建设,提高编辑人员的综合素质。会上编委们讨论热烈,拓展思路,群策群力,提出了很多建设性的意见。

最后,欧阳自远主编作了总结发言。他指出,此次会议规划了《通报》今后的发展方向,并为提升《通报》的影响力做出了具体的策划,达到了预期目的。会议相信在全体编委努力下,在学会广大会员和我国矿物岩石地球化学界科技人员参与下,《通报》一定会走出一条既符合我国国情,又富于学会自身特色的发展道路,将《通报》办成一份具高信息量,高可读性,高学术含金量,栏目精彩纷呈,文字简练通俗,广受学术界及青年学子欢迎的刊物。

(刘莹 供稿)