

深部过程对埃达克质岩石成分的制约*

肖龙¹ Robert P RAPP² 许继峰³

XIAO Long¹, Robert P RAPP² and XU JiFeng³

1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences 430074 Wuhan, China

2. Department of Geosciences, Center for High Pressure Research and Mineral Physics Institute, State University of New York, Stony Brook, NY 111794, USA

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

2003-07-22 收稿, 2003-12-03 改回.

Xiao L, Rapp PR and Xu JF. 2004. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 219–228

Abstract There are many geochemical similarities and significant dissimilarities among Adakite, early Archean TTG suites and Yanshanian intermediate-acid magmatic rocks (“adakitic rocks” or potassic adakite) in eastern China. Simple geochemical parameters, such as silica content, $Mg^{\#}$ and K_2O content, show that TTG and “adakitic rocks” from eastern China are distinct from adakite, suggesting that they experienced different deep processes. Comparing with slab-melting generated adakite, the early Archean TTG suites have higher SiO_2 and lower $Mg^{\#}$ and, potassic adakite from eastern China show lower $Mg^{\#}$ and higher K_2O . The higher- $Mg^{\#}$ adakites imply that the ocean slab melting generated pristine adakite melts interacted with the mantle wedge. There is little convincing evidence for a direct mantle component in TTG, implying that accommodate TTG production through melting of hydrous basaltic material at the base of thickened crust, without modern-style subduction processes. The potassic adakite from eastern China may predominately experienced partial melting of underplated basaltic rocks (lower $Mg^{\#}$ potassic adakite), or delamination-melting of lower crust and interacted with mantle peridotite (higher $Mg^{\#}$ potassic adakite), and followed assimilation and contamination of crustal intermediate-acid rocks. Potassic adakite might be generated from a basaltic underplated layer that was metasomated by small melt fractions from asthenosphere mantle. Adakitic magmatism is then an accompanying product of Yanshanian lithosphere thinning and magmatism, which may be related to a upwelling of mantle plume.

Key words Adakite, Archean TTG, Thickened crust, Crust delaminating and melting, Deep processes, Mantle plume

摘要 埃达克岩、太古宙 TTG 和中国东部广泛出露的燕山期埃达克质中酸性火山-侵入岩在岩石地球化学特征方面有许多相似之处,也有一些显著的差异。与典型的埃达克岩相比,太古宙 TTG 具有相对高 Si 和低 $Mg^{\#}$ 的特点;中国东部埃达克质岩石多表现为低 $Mg^{\#}$ 、贫 Al_2O_3 和高 K 特征。埃达克岩相对高 $Mg^{\#}$ 是由于俯冲洋壳部分熔融产生的原生埃达克岩熔体受到了地幔橄榄岩的混染,太古宙 TTG 多无明显的地幔混染印记,反映其可能主要形成于下地壳底侵玄武岩的部分熔融,而与洋壳俯冲没有直接联系。中国东部埃达克质岩石相对低 $Mg^{\#}$ 、富 K,暗示其可能是下地壳底侵玄武岩部分熔融或拆沉-熔融的产物,而幔源富钾熔体的混合、壳内分异和混染过程都有可能影响其成分特征。中国东部部分地区的高镁埃达克质岩石可能揭示了下地壳拆沉-熔融和地幔混染过程。钾质埃达克岩的源区可能是被小比例软流圈熔体交代富集的底侵玄武岩层(增厚的下地壳)。结合燕山期岩浆作用和构造转换的特点来看,埃达克岩的形成是中国东部晚中生代岩石圈强烈减薄和大规模岩浆作用产物的一部分,这一重大构造体制的转换可能与地幔柱上涌对岩石圈的侵蚀和导致的伸展作用有关。

关键词 埃达克岩; 太古代 TTG; 加厚地壳; 地壳拆沉-熔融; 深部过程; 地幔柱

中图法分类号 P588.122

* 国家自然科学基金(40272040),中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-122)和 973 项目 2002CB412601 资助研究成果。

第一作者简介:肖龙,男,1963 年生,博士,教授,岩石学和矿床学专业, E-mail: longxiao@cug.edu.cn

1 引言

太古宙新生的大陆地壳成分以 TTG (英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩) 为主, 地球化学和实验岩石学研究表明其为玄武质岩石相变为含石榴石角闪岩或榴辉岩时部分熔融的产物 (Condie, 1981; Barker, 1979; Arth and Hanson, 1975; Barker and Arth, 1976; Martin, 1999; Martin, 1986; Martin, 1987; Drummond and Defant, 1990; Rapp *et al.*, 1991; Rapp, 1997)。在化学成分上, 绝大多数 TTG 岩套与 Barker (1979) 所指的高铝奥长花岗岩套相似, 主要成分特征为 $\text{SiO}_2 \approx 70\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$, $\text{Yb} < 1\mu\text{g/g}$, La_N/Yb_N 多数大于 30, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$, Sr 和 $\text{Ba} > 500\mu\text{g/g}$ 。这些地球化学特征标志着斜长石进入融体, 而石榴石和角闪石残留在源区造成的。与之成分相似的岩石在显生宙少见, 但在新生代的一些岛弧火山岩中发现一些地球化学特征与 TTG 十分相似的岩石 (Kay, 1978), 这些岩石被定名为埃达克岩 (Adakite) (Drummond and Defant, 1990)。其最初的含义为产生于岛弧环境, 由年轻且热的大洋板片部分熔融直接产生的火山岩, 而不同于源自被流体交代过的地幔楔的安山-英安质火山岩 (Gill, 1981)。后来其形成环境被认为还有底侵玄武岩的部分熔融 (Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1996; Petford and Kerry, 2001)、拆沉下地壳的部分熔融 (Kay and Kay, 1991; Gao *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 2002) 和俯冲陆壳的部分熔融 (Wang *et al.*, 2003)。这两类地球化学成分相似的岩石的形成环境对比研究, 无疑对太古宙是否存在板块俯冲和太古宙陆壳增生机制具有极其重要的研究意义。Martin (1999) 认为埃达克岩类似于太古宙的 TTG, 后者产生于与现代埃达克岩完全相似的板块俯冲环境。他将 TTG 中普遍的低 Mg 和 Ni, Cr 解释为地幔物质的贡献小 (板片熔融的深度小)。与之相反, Smithies (2000) 认为太古宙 TTG 与现代埃达克岩的形成环境完全不同, 前者是增厚的含水玄武质岩石部分熔融的产物, 而后者是俯冲板片熔融的产物。近年来多数学者倾向于认为埃达克岩的形成环境既可以是俯冲板片熔融的产物, 亦可以是底侵增厚玄武岩熔融的产物 (Petford and Kerry, 2001; Kay and Kay, 1991; Sun and Dunn, 1994)。Casitillo *et al.* (1999) 认为 AFC (同化混染及分离结晶) 过程也可以产生埃达克岩。

近年来对中国东部燕山期火山岩/侵入岩的研究发现, 它们的许多地球化学特征与埃达克岩十分相似 (王强等, 2001a, b; 张旗等, 2001a, b; 许继峰等, 2001) 被称为“埃达克质岩” (adakite-like rock or adakitic rock) 或“C 型” Adakite (张旗等, 2001b)、钾质埃达克岩, 为相关岩石的研究提供了新的思路。对于这类岩石的形成是否与太平洋板块的俯冲有关存在较大的争议。尽管多数研究者认为中国东部燕山期火山岩及花岗岩与太平洋俯冲作用无关 (陶奎元等,

1988; 毛建仁等, 1990; 董树文等, 2000), 但也有人提出了不同的意见 (邓晋福等, 2000; Zhou and Li, 2000)。

由于这类岩石的形成往往要求较高的压力条件 (> 10 kbar (Winther and Newton, 1991; Rapp and Watson, 1995; Wolf and Wyllie, 1994)), 以及它们可能暗示的重要深部过程信息 (如板片熔融, 底侵玄武岩熔融, 地壳拆沉等), 本文拟将中国东部的埃达克质岩石与埃达克岩及 TTG 进行特征和成因对比, 并提出识别其成因类型的实验岩石学解决方案。结合区域构造-岩浆演化的特点, 本文初步提出中国东部埃达克岩形成与燕山期深部构造体制转换关系的模式。

此外, 近年来的研究发现, 埃达克质岩石在空间、时间及成因方面可能与 Cu-Au-Fe 等元素的富集成矿有密切的关系 (Thieblemont *et al.*, 1997; Sajona and Maury, 1998; 王强等, 2000; Mungall, 2002; Defant *et al.*, 2002; Gonzalez Partida *et al.*, 2003; 王强等, 2002; 张旗等, 2003)。要正确认识埃达克岩与成矿作用的关系, 了解埃达克岩成岩机制是重要的前提。在这方面, 实验岩石学可以提供基础性的资料。只有查明埃达克岩的成因和相关矿床的成因, 并将二者联系起来, 才能谈埃达克岩与成矿的关系。从这一思路出发, 着重讨论埃达克岩在实验岩石学方面的进展。作者认为, 对这一过程的深入探讨无疑有助于拓宽成矿理论的研究和提供新的找矿思路。

2 不同构造环境和深部过程对埃达克岩成分的制约

类似的构造环境和深部过程一般应产生成分相同或相似的岩石。同理, 不同构造环境产生的岩浆应有所差异, 尽管地球深部过程的复杂性会产生多解性。形成具有埃达克岩地球化学特征的岩石可能有三种途径: 俯冲洋壳的熔融、底侵玄武岩质地壳的熔融和弧安山岩的 AFC 过程。鉴于已有大量文献对比讨论了 TTG、埃达克岩及中国东部燕山期类似岩石的相同或相似性 (王强等, 2001a, b; 张旗等, 2001b; 葛小月等, 2002; Defant *et al.*, 2002; Rapp *et al.*, 2002), 本文在侧重探讨不同构造环境和深部过程对这类火山岩成分的制约基础上, 揭示其可能的内在本质差异和联系。

2.1 岛弧环境俯冲洋壳的部分熔融

最初 Kay (1978) 和 Defant and Drummond (1990) 等对 Cook 岛和 Adak 岛的埃达克岩进行了详细研究, 并提出了一系列识别埃达克岩的地球化学指标。这里需要强调的是, 俯冲的洋壳在下插到地幔楔之下发生部分熔融产生原生岩浆之后, 至最终喷出地表或侵入于上部地壳之前, 这类岩浆必然经过地幔楔和中下地壳, 它们会或多或少地与地幔楔和地壳发生作用, 使原生岩浆遭受混染。因此, 岩石中地幔组分的印记是板片熔融最直接的证据 (Beard *et al.*, 1993), 如

高 MgO 、 Ni 和 Cr , 低 SiO_2 等 (Kay, 1978)。由于典型 MORB 的 Mg^* ($Mg^* = Mg/(Mg + Fe)$) 约为 60, 它所产生的岩浆的 Mg^* 应远低于 60。实验岩石学证明玄武岩的部分熔融产生的熔体 $Mg^* < 45$ (Rapp, 1997)。因此, 一些新生代与俯冲有关的埃达克岩具有的低 SiO_2 ($< 65\%$) 和高 Mg^* ($> 47 \sim 70$) 即被解释为板片熔体被地幔橄榄岩混染的结果 (Kay, 1978; Mahlborg *et al.*, 1993; Yogodzinski, 1995)。

板片熔体受地幔橄榄岩混染 (AFC, Yogodzinski, 1995) 的程度以及 Mg^* 和 SiO_2 等成分变化的敏感性是一个重要指标。Cook 岛中高 Mg^* (68), 低 SiO_2 (58%) 埃达克岩也仅仅需要 10% ~ 20% 地幔橄榄岩的加入 (Stern and Kilian, 1996)。Rapp *et al.* (1999) 的实验岩石学研究也得出了相似的认识, 即添加 10% 的橄榄岩即可使 Mg^* 从 44 升高到 55。因此在埃达克岩中找寻地幔橄榄岩混染的印记是简单易行, 而且是证明其形成背景的重要依据 (Smithies, 2000)。

2.2 底侵玄武岩/下地壳玄武质岩石的熔融

指在增厚 ($> 40\text{km}$) 的下地壳环境中, 底侵玄武质下地壳的熔融形成与埃达克岩地球化学特征类似的岩石 (Atherton and Petford, 1993; 张旗等, 2001a, b; Smithies, 2000; Peacock, 1994; Muir *et al.*, 1995)。这一过程可能会出现两种不同的情形, 一是构成下地壳的玄武质岩石的部分熔融直接产生的岩浆, 二是增厚的地壳在拆沉过程中熔出的岩浆。

这类岩浆由于没有和地幔橄榄岩发生交代混染作用, 故表现出低 Mg^* 和高 SiO_2 的特征, Ni , Cr 等元素亦偏低。

2.2.1 增厚玄武质下地壳直接熔融产生的岩浆

增厚下地壳熔融已获得许多实验岩石学的证明, 一些实验岩石学工作者 (Rapp *et al.*, 1991; Sun and Dunn, 1994; Winther and Newton, 1991; Wolf and Wyllie, 1994; Rapp *et al.*, 1999; Peacock, 1994) 分别在不同压力条件下对变玄武岩、高 Al 玄武岩、天然低 K 钙质角闪岩、角闪岩等进行了高压熔融实验。结果表明, 高压 ($> 10\text{kbar}$) 条件下当石榴石为残留相时, 熔体出现强烈的重稀土亏损和诸多类似埃达克岩的地球化学特征。这一过程的野外直接证据可在加利福尼亚 Catalina 岛见到。根据 Sorensen and Barton, (1987)、Sorensen (1988) 和 Bebout and Barton (1993) 的研究, 该地区由洋壳向含石榴石角闪岩或角闪榴辉岩转变时形成的变质玄武岩中, 记录了其形成温度为 $650 \sim 750^\circ\text{C}$, 压力为 $9 \sim 11\text{kbar}$, 其中具混合岩结构的脉体成分即为固相线之上的熔体, 其成分具有高 Al_2O_3 奥长花岗岩 (埃达克岩) 成分特征。

大量推测直接来源于增厚下地壳物质熔融产生的埃达克质岩石有新西兰 (Muir *et al.*, 1995)、秘鲁 (Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1996)、北美西部半岛山脉 (Gormet and Silver, 1987)、安底斯 (Kay and Kay, 1991)、加利福尼亚和 Oregon 的 Klamath Mountains (Barnes *et al.*, 1996; Barnes *et al.*, 1992) 和中国东部 (王强等, 2001a, b;

张旗等, 2001a, b; 许继峰等, 2001; Barnes *et al.*, 1996)。与其它地区不同的是, 中国东部埃达克质岩石明显富 K_2O , 其成因将在后文中重点讨论。

2.2.2 地壳拆沉物的熔融

Kay *et al.* (1993) 首先提出, 当地壳厚度足够大时, 下地壳岩石将向榴辉岩转变, 由于榴辉岩的密度大于地幔岩, 榴辉岩即可能因重力差异脱离地壳而沉入地幔中 (拆沉作用) (Nelson, 1992; 高山, 金振民, 1997)。这时会发生两种情况, 一是地幔软流圈物质上涌加热下地壳, 使玄武质的下地壳发生熔融产生埃达克岩岩浆 (这一过程同 1.2.1); 另一种情形是拆离下沉的榴辉岩相下地壳物质在热的地幔物质作用下发生熔融, 产生埃达克岩。后者熔出的岩浆将通过地幔岩区上升到地壳或喷出地表, 在这一过程中熔体可能受地幔橄榄岩的交代混染, 从而产生与俯冲板片熔融更为接近的岩浆, 即高 Mg^* 和低 Si 等。考虑到华北陆块内在 $120 \sim 160\text{Ma}$ 期间没有强烈的具有软流圈来源的岩浆作用, 其经历的拆沉过程可能是下地壳拆沉到岩石圈地幔中, 所以没有引起有软流圈物质的回涌和显示软流圈来源的岩浆作用。但需要指出的是晚中生代华北南部和北大别基性火成岩的地球化学特征强烈暗示了地幔源区已经被富硅熔体改造, 这有理由推测确实发生过地壳物质部分熔融产生的富硅熔体交代地幔源区的过程。

2.3 岛弧火山岩的 AFC 过程

除前述两种主要机制外, Castillo *et al.* (1999) 通过对菲律宾 Camiguin 岛的详细研究, 提出岛弧幔源岩浆经 AFC 过程可以产生埃达克岩。对于用 AFC 模拟岩浆成分演化可能存在的一些问题 Defant *et al.* (2002) 已作了评述。鉴于中国东部如此大面积分布的类似埃达克岩岩石, 能否用 AFC 过程给予全部合理的解释需要更加深入的研究。本文不予详细探讨。

3 TTG、埃达克岩和中国东部埃达克质岩石的成分对比

中国东部晚中生代花岗岩类具有埃达克岩的所具有的地球化学属性, 如高 SiO_2 和 Al_2O_3 含量, 高 La/Yb 和 Sr/Y 比值, 强烈亏损 HREE、Y 和 HFSE。然而中国东部的许多埃达克岩较与俯冲有关的富钠埃达克岩更高钾, 其 Na_2O/K_2O 比值接近 1 (图 1), 也较富 Na 的 Cascades、Antarctica 和安第斯埃达克岩更富钾。这些“埃达克质”花岗岩被称为大陆型或“C 型”埃达克岩 (张旗等, 2001b), 以区别与大洋俯冲有关的埃达克岩。因为它们似乎与俯冲作用不存在时间和空间上的关系。同时提出了下地壳熔融成因模式 (王强等, 2001b; 王焰, 张旗, 2001a, b)。“C 型”埃达克岩不同于明显与俯冲有关的富钠的“大洋型”或“O 型”埃达克岩 ($Na_2O/K_2O > 2.0$)。如果中国东部富钾埃达克岩也是来自

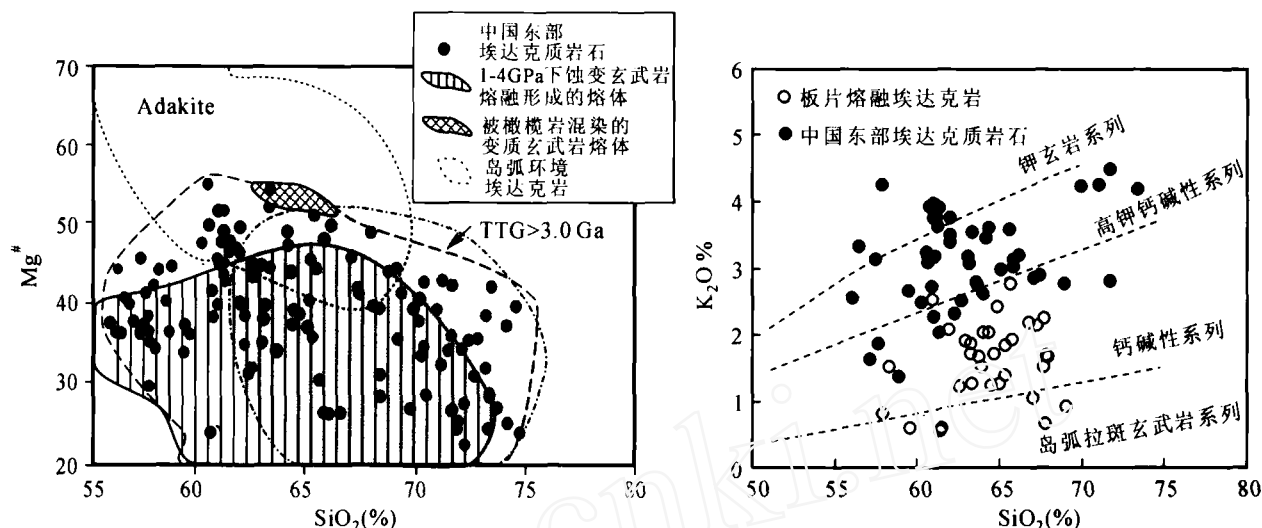


图1 太古宙 TTG、埃达克岩、实验熔体 (Sun and Dunn, 1994; Rapp and Watson, 1995; Rapp *et al.*, 1999) 和中国东部埃达克质岩石 (王焰等, 2001) 的 $Mg^{\#}$ - SiO_2 , K_2O - SiO_2 图解

Fig. 1 $Mg^{\#}$ vs. SiO_2 and K_2O vs. SiO_2 variation diagrams comparing the field for "Adakitic rocks" from eastern China with early Archean TTG, Cenozoic adakite and Phanerozoic Na-rich garnitoid

于含石榴石、含水基性源区的部分熔融,那么它们在成分上有别于埃达克岩的原因可能是源区的不同,或者岩浆结晶分异和同化混染过程(AFC)的不同。后者改造了原始埃达克岩母岩浆的成分,熔融实验可以提供一个为熔体-岩石反应、围岩同化、壳内分异对埃达克岩成分影响评价的地球化学参考点。

由不同构造背景和深部过程所产生的埃达克岩岩浆成分差异来看,太古宙 TTG、新生代埃达克岩和中国东部的埃达克质岩石是可以区分其形成背景的。这里要强调的是(1)板片熔融和增厚地壳的拆沉-熔融产生的岩浆成分相似;(2)玄武质地壳直接熔融会产生相对高 Si 低 $Mg^{\#}$ 的岩浆。

值得指出的是,中国东部的大部分埃达克质岩石较 TTG 和埃达克岩有明显偏高的 K_2O 含量 ($>2\%$) 和低 Na_2O/K_2O 比值 (<2)。这一特点与 Cordillera Blanca 岩基相似 (Petford and Atherton, 1996), 后者被解释为新底侵玄武岩质地壳部分熔融的产物。中国东部埃达克质岩石表现在成分上的差异是源区成分不同造成的,还是与 Blanca 岩基有相同的成因,显然还需要实验岩石学的验证。

4 实验岩石学研究提供的成因制约

4.1 关于板片熔融形成的埃达克岩成因的实验研究

实验岩石学研究的目的是主要有三点,一是天然岩石熔出类似 TTG / 埃达克岩成分岩石的可能性;二是定量模拟温度、压力、流体等对熔出岩浆成分的制约;三是用定量模拟结果反演产生这类岩石的构造背景。埃达克岩“板片熔融”模型的地球化学基础即来自于实验岩石学研究。近年来针对

埃达克岩成因的岩石学实验模拟研究了含水天然玄武岩 (以 MORB 为主,相当于岛弧背景下洋壳俯冲的压力范围) 的熔融行为 (Sun and Dunn, 1994; Winther and Newton, 1991; Rapp and Watson, 1995; Wolf and Wyllie, 1994; Rapp *et al.*, 1999; Peacock, 1994)。实验研究结果表明在压力 1 ~ 4 GPa 条件下,不同的含水玄武岩经 10% ~ 30% 部分熔融即产生富 Na 的花岗质熔体,其主要元素成分与一些大陆和岛弧环境下的埃达克岩相似。

然而实验研究的结果仅提供对埃达克岩源区的成分 (玄武质) 和矿物学 (石榴石、角闪岩和/或榴辉岩) 制约。决定埃达克岩岩浆最终成分的因素有多个,其中主要包括:(1) 玄武岩源岩的总成分、熔融的压力-温度条件和产生熔体的比例;(2) 结晶残留相的实际矿物组成,尤其是是否存在副矿物相,如金红石、锆石或磷灰石等。它们在很大程度上影响熔体微量元素特征;(3) 板片熔融模型和拆沉-熔融模型条件下与上覆地幔橄榄岩相互作用和混染的程度;(4) 壳内分异和混染对埃达克岩母岩浆的影响。其中影响因素 (1) 和 (2) 决定原生埃达克岩熔体的成分,(3) 和 (4) 为后续过程对原始岩浆成分的改造。

板片熔融和增厚下地壳拆沉-熔融机制下熔出的原生埃达克岩受上述四个因素的制约,而下地壳玄武岩直接熔融受 (1)、(2) 和 (4) 三个因素的影响。

从已有的实验结果 (Rapp *et al.*, 1991; Winther and Newton, 1991; Peacock, 1994; Rapp and Watson, 1995; Rapp *et al.*, 1999) 来看,要使得石榴石作为部分熔融的结晶残留相,其压力下限为 1.0 ~ 1.2 GPa (33 ~ 40 km 深度)。这时温度是影响熔融程度的最主要的因素。对于含水玄武岩,熔融

作用起始于温度 700 ~ 800℃ 和压力 1 ~ 4GPa, 涉及角闪石、黝帘石和多硅白云母的连接脱水反应产生埃达克岩熔体(可达 30%)的温压上限为 1100 ~ 1150℃、3 ~ 4 GPa。玄武岩的总成分将决定何种矿物相以多少比例存在, 而熔体中主量元素成分随熔融程度升高而变化。

由于 K 在部分熔融过程中的不相容行为, 在最低温度条件和最小熔融程度(<5%)熔出的熔体为相对高 K 的花岗质熔体(如 $\text{SiO}_2 > 70\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 2.0$), 而当温度和熔融程度升高时, 便快速变为高 Na 熔体(如 $\text{SiO}_2 = 63\% \sim 70\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2.0$)。

熔体中的 Nb、Ta 和 Ti 含量主要依赖于温度, 并受残留金红石的控制。低温条件下金红石不分解, 绝大部分 Nb、Ta 和 Ti 都存留在金红石中, 从而使熔体强烈亏损这些元素; 只有当温度足够高时, 金红石才会分解, 其中的 Nb、Ta 和 Ti 才会进入熔体中。因此, 很低程度的部分熔融将产生相对富 K 和低 TiO_2 (<0.3%) 的埃达克岩熔体, 中等程度部分熔融产生富 Na 和较高 TiO_2 (0.5% ~ 1.0 wt%) 的埃达克岩熔体。同时低程度部分熔融的熔体亦随压力的变化而演化, 在高压(4 ~ 7 GPa)条件下低 Al_2O_3 、高 K_2O 花岗岩熔体将取代富 Na 的埃达克岩熔体, 同时提高高压下残留单斜辉石中硬玉分子的含量。

尽管在实验岩石学研究方面取得了很大进展, 但还存在一些问题, 主要包括: 1) 实验初始物局限于 MORB 和低钾拉斑玄武岩($\text{K}_2\text{O} < 0.8\%$), 很少对相对富钾的大陆玄武岩(如中国玄武岩 K_2O 的平均值为 2.51%; 全球玄武岩 K_2O 的平均值为 1.1%) 进行相关熔融实验; 2) 实验模拟结果(原生埃达克岩浆与地幔橄榄岩混染)产生的熔体较实际埃达克岩低 $\text{Mg}^\#$; 3) 尚无实验对小于 3GPa 压力条件下埃达克质熔体与地幔橄榄岩的反应后熔体的行为进行制约(数值模拟除外); 4) 现有实验结果尚难以解释中国东部埃达克质岩石高钾和部分岩石高镁的原因, 以及它们的成因机制。

4.2 目前对钾质埃达克岩成因的实验制约

考虑到含水玄武岩熔融产生埃达克岩的压力范围为 1 ~ 5GPa (Rapp *et al.*, 1991; Sun and Dunn, 1994; Winther and Newton, 1991; Rapp and Watson, 1995; Rapp *et al.*, 1999; Kamber *et al.*, 2002), 此时石榴石存在于残留相矿物组合中。这些实验都是在无流体相条件下进行的, 熔融过程是通过含水矿物相(角闪石和黝帘石)的脱水反应进行。由于钾和 LILE 在部分熔融过程中是高度不相容的, 故很低程度的部分熔融(<10%)将产生高钾(和更高硅)、低 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值(0.9 ~ 1.2)的熔体。而在稍高温度和熔融程度(10% ~ 30%)时将产生富钠埃达克岩(钠质埃达克岩, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1.5 \sim 2.0$)。然而中国东部的埃达克岩呈现高钾含量、低 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值, 而 SiO_2 含量变化很大(58% ~ 74%)。因此变玄武岩原岩经低程度部分熔融产生中国东部富钾埃达克岩的可能性不大。

埃达克岩的微量元素标志性特征是总体富集 LILE(包括 Ba, Th, U, K, LREE, Sr), 和强亏损 HFSE(如 Nb, Ti)、HREE 和 Y (Defant and Drummond, 1990; Kay *et al.*, 1993)。这些特征是埃达克岩熔体和含金红石榴辉岩质残留相间的平衡的表现。典型埃达克岩熔体与榴辉岩质残留相平衡的压力范围为 1.2 ~ 3.8GPa, 并已得到了 3 ~ 4GPa 下熔融实验的证明。中国东部 C 型埃达克岩的微量元素配分型式(图 2)与实验熔体非常相似, 它们均总体富集 LILE, 明显的 Nb 负异常, 强亏损 HREE 和 Y, 相对亏损 Ti。但是, C 型埃达克岩明显较 3.8GPa 压力条件下最富钾玄武岩的熔体高 LREE 和 LILE, 同时 Ba, Th 和 K 含量十分高。总体来看, C 型钾质埃达克岩较 Cordillera Blanca 下地壳熔体产生的英云闪长岩等富含 LREE(La 和 Ce)、MREE(Nd 和 Sm)、Th、Ba, 低 U。

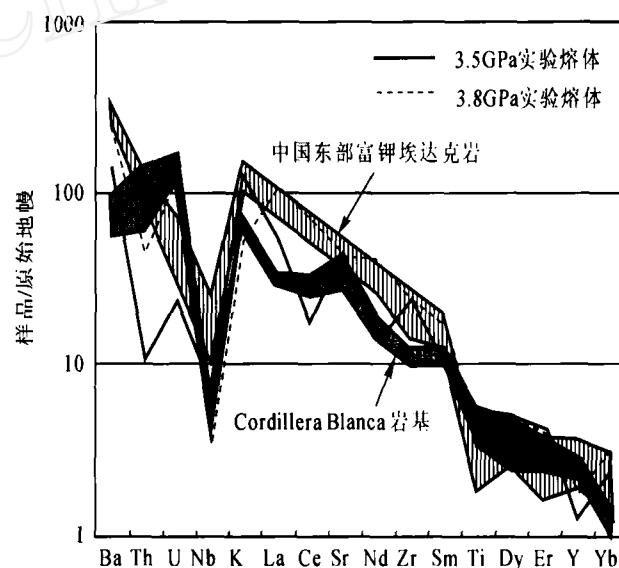


图2 代表性中国东部埃达克质岩石、实验熔体及 Cordillera Blanca 岩基的微量元素原始地幔标准化图解

Fig. 2 Representative trace-element abundance patterns for potassic adakites from eastern China, normalized to primitive-mantle abundances of Sun and McDonough (1989), compared to "pristine" melts of two different basalts (Rapp and Watson, 1995) at 3.5 ~ 3.8 GPa (~10% ~ 15% melting), and tonalite and quartz diorite from the Cordillera Blanca Batholith (Petford and Atherton, 1996)

5 对中国东部和青藏高原富钾埃达克岩成因的思考

中国东部富钾埃达克岩与被解释为下地壳熔体产生的埃达克质花岗岩具有不尽一致的成分特点, 而与实验熔体在主量和微量元素特征方面的相似性清楚地表明其因为含

石榴石的变玄武岩经脱水熔融形成的。更加可能的是,钾质埃达克岩在成分上的差异是不同成分的玄武质源区熔融形成的,或是下-中地壳中性岩石同化的结果。同位素研究表明 C 型埃达克岩有一定的地壳物质参与(张旗等,2001b)。但是安第斯奥地利火山岩带的埃达克岩也有相当明显的与弧下地壳相互作用同位的证据(Burney and Reclus 火山)(Stern and Kilianl,1996),而它们仍然具有“正常”埃达克岩的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值(3~5),明显较中国东部埃达克岩低 LILE 丰度。早白垩世喷发于中国东部富 LILE 和高钾的橄榄玄粗岩证明有地幔(EMI)活动,并指示了可能存在一个对形成 C 型埃达克岩有利的“富集”源区和随后的岩浆底侵和地壳异常加厚。

另一方面,由底侵基性物质熔融产生的“正常”(钠质)

埃达克岩岩浆与中到下地壳中性麻粒岩相岩石的同化可以用来解释其优先富集钾和其它 LILE。

上述两种情况下,钾质埃达克岩都是考虑为被岩浆加厚的下地壳底部部分熔融的产物。随着埃达克岩岩浆作用之后的是地壳拉伸和减薄,可能对应于高密度榴辉岩质残留相的下沉、下地壳拆沉和热的软流圈地幔的回注(王焰,张旗,2001)。

扬子与华北陆块间发生的大陆俯冲使得总体成分为安山质的大陆地壳俯冲到地幔深部也必然发生部分熔融,但是时间上没有见到早于印支期的埃达克岩。此外,埃达克质岩石同时出现在大陆俯冲带的两侧陆块,因此大陆俯冲导致的增厚地壳部分熔融或下插到地幔中的地壳熔融产生埃达克岩的可能性不大。

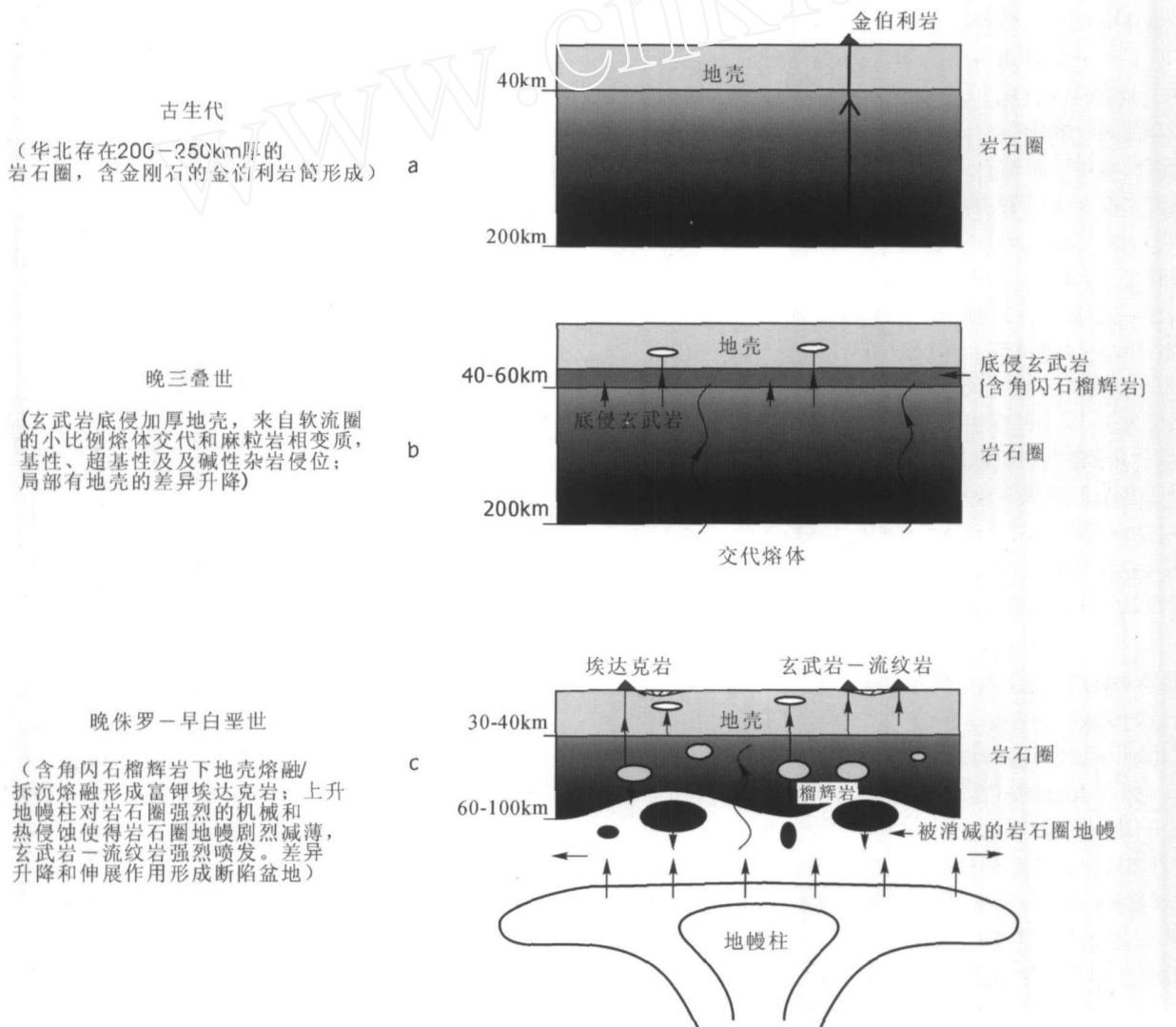


图3 中国东部岩石圈演化与岩浆活动模型

Fig. 3 A genetic model showing the evolution of lithosphere and magmatism in East China

最近侯增谦等(2003)根据对青藏高原冈底斯地块埃达克质岩石的 Pb-Nd-Sr 同位素和地球化学的研究,提出了另外一种有关钾质埃达克岩石的成因模式,即由 MORB(大洋中脊玄武岩)变质形成的榴辉岩部分熔融形成的埃达克质熔体与 EMII 型富集地幔熔融形成的富钾熔体的混合形成了富钾的埃达克质岩石。富钾地幔对富钾埃达克质岩石的形成有较大的贡献。

6 一种可能的模型

综合考虑以下地质事实:

(1)中国东部古生代非常厚的岩石圈(>160 km, Xu *et al.*, 2001; Menzies, 1998; 200~250km, 邓晋福等, 2000);

(2)燕山期强烈的岩浆活动和成矿作用(陶奎元等, 2002)和面积中生代富钾埃达克岩的形成和所要求的较厚的地壳(张旗等, 2001a; Xu *et al.*, 2002);

(3)新生代很薄的大陆地壳和具大洋性质的岩石圈地幔。对上述问题的解释前人已经提出了多种模式(Xu *et al.*, 2001; Menzies, 1998; 邓晋福等, 2000; 邵济安等, 2000; Zhou and Li, 2000; Xu *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2003),极大地推进了对这些问题的理解和认识,然而这些模式都没有能够将上述主要地质事实及其在时间上的演化规律联系起来。

作者在综合分析这些地质事件和总结前人的研究成果基础上认为,印支期以来中国东部的构造体制主要受深部过程的控制,其演化过程可以大体分为四个阶段(图3):

(1)古生代存在的厚岩石圈是导致含金刚石金伯利岩形成的必要条件,但此时地壳只有约40km厚(图3a);

(2)晚三叠世开始岩石圈地幔熔融产生的玄武岩底侵加厚到地壳之下,同时软流圈小比例熔体的加入使得这一被加厚的下地壳(40~60km)更加富集钾和大离子亲石元素(McKenzie, 1989),同时该加厚层发生麻粒岩相变质、镁铁质堆晶岩形成、基性、超基性及碱性杂岩侵位(邵济安等, 2000)(图3b);

(3)随着加厚下地壳的变质和熔融产生富钾的埃达克岩(高硅低镁者)或随着拆沉-熔融的发生熔体受到地幔橄榄岩的混染使得部分埃达克岩富镁;与之同时发生作用的是来自深部的地幔柱对岩石圈地幔强烈的机械和热侵蚀作用、岩石圈伸展作用等,使得岩石圈在很短的时间内剧烈减薄、玄武岩-流纹岩大量形成喷发和中酸性侵入岩的就位(即燕山期岩浆大爆发)。与之对应的浅表地质响应是断陷盆地的形成(如松辽盆地)和形成一系列磨拉石建造等(图3c);

(4)随着软流圈物质对岩石圈组分的强烈交代置换,新生代时中国东部的岩石圈地幔转变为大洋型地幔。持续的地壳伸展导致地幔减压熔融形成洋岛型玄武岩和在地表形成了一系列断陷-凹陷盆地。这一后续过程可能是地幔柱持续作用的结果。

由此可见,在上述地质过程中富钾埃达克岩的形成主要受源区成分的控制。小比例软流圈熔体与底侵玄武岩的交代所形成的异常富集的下地壳是形成富钾埃达克岩的决定性因素。当然实验岩石学工作对这样一种原岩进行熔融实验是十分必要的。

7 结论

在岩石地球化学特征方面,太古宙 TTG、埃达克岩和中国东部及青藏高原部分地区的中新生代火山-侵入岩有许多相似之处,但它们可能是不同大地构造背景和深部过程的产物。其中原生岩浆是否遭受过地幔橄榄岩的混染/反应是识别板片熔融、增厚地壳拆沉-熔融与下地壳熔融产物的主要依据之一。前两者由于地幔橄榄岩的交代混染导致岩石的高 Mg[#] 和低 Si,后者应主要表现为低 Mg[#] 和高 SiO₂,中国东部类似岩石的高 K₂O 特点可能是源区成分的差异、富钾幔源熔体的大量参与和壳源物质混染造成的。中国东部大范围埃达克岩的形成起源于被小比例软流圈熔体交代富集的底侵增厚的下地壳层,其岩浆事件与地幔柱上涌导致的区域岩石圈减薄、燕山期岩浆大爆发和深部构造体制的转换密切相关。

References

- Arth J G and Hanson G N. 1975. Geochemistry and origin of the early Precambrian crust of northern Minnesota. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39: 325-362
- Atherton M P and Petford. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Geology*, 4: 596-600
- Barker F and Arth J G. 1976. Generation of trondhemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhemitic-basalt suites. *Geology*, 4: 596-600
- Barker F. 1979. Trondhjemites, Dacites. *Andesite Related Rocks*. Elsevier. Amsterdam, 1-321
- Barnes C G, Barnes M A and Kistler R W. 1992. Petrology of the Caribou Mountain pluton, Klamath Mountains, California. *Journl of Petrol.*, 33: 95-124
- Barnes C G, Petersen S. W., Kistler *et al.*, 1996. Source and tectonic implications of tonalite-trondhemitic magmatism in the Klamath Mountains. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 40-60
- Beard J S, Bergantz G W, Defant M J and Drummond M S. 1993. Origin and emplacement of low-K silicic magmas in subduction setting. *Penrose Conference Report, Geol. Soc. Am. Today*, 3: 38
- Beate B, Monzier M, Spikings R, Cotton J, Silva J, Bourdon E and Eissen J P. 2001. Mio-Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: the Quimsacocha volcanic center. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 192: 561-570
- Bebout G E and Barton M D. 1993. Metasomatism during subduction:

- products and possible paths in the Catalina schist, California. *Chem. Geol.*, 108: 61–92
- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134: 33–51
- Condie K C. 1981. *Archaean Greenstone Belts*, Elsevier. Amsterdam, 1–434
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 662–665
- Defant M J, Xu J F, Wang Q, Xiao L. 2002. Adakite: Some variation on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129–142
- Deng J F, Zhao G C and Zhao H L. 2000. Yanshanian igneous petrotectonic assemblage and orogenic-deep process in east China. *Geological Review*, 46: 41–48 (in Chinese with English abstract)
- Dong S W, Wu X H, Wu Z H, *et al.* 2000. On tectonic seesawing of the east Asia continent-global implication of the Yanshanian movement, *Geological Review*, 46(1): 8–13 (in Chinese with English abstract)
- Drummond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.*, 95: 21503–21521
- Gao S and Jin Z M. 1997. Delamination and its dynamic implications for crust-mantle evolution. *Geological Science and Technology Information*, 16(1): 1–8 (in Chinese with English abstract)
- Gao S, Liu Y S, Yuan H L. 2001. Geochemistry of Jurassic-Cretaceous High-Mg adakite from North China Craton Suggests Delamination of Eclogitic Lower Crust. Beijing, China, Symposium on adakite-like rocks and their geodynamic significance (abstract), 82–82
- Ge X Y, Li X H, Chen Z G, *et al.* 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Yanshanian high-Sr / low-Y intermediate-felsic igneous rocks from eastern China: constraints on crustal thickness of eastern China, *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474–480 (in Chinese with English abstract)
- Gill J B. 1981. *Orogenic Andesite and Plate Tectonics*. New York: Springer-Verlag, 1–390
- Gornet L P and Silver L T. 1987. REE variations across the peninsular ranges batholith: Implications for batholithic petrogenesis and crustal growth in magmatic arcs. *J. Petrology*, 28: 75–125
- Gonzalez-Partida E, Levresse G, Carrillo-Chavez A, Cheilletz A, Gasquet D and Jones D. 2003. Paleocene adakite Au-Fe bearing rocks, Mezcala, Mexico: evidence from geochemical characteristics. *Journal of Geochemical Exploration*, 4105: 1–16
- Gutscher M A, Maury R, Eissen J P and Bourdon E. 1999. Can slab melting be caused by flat subduction?. *Geology*, 28: 535–538
- Gutscher M A, Olivet J L, Aswlanian D, Eissen J P and R Maury. 1999. The "lost Inca Plateau": cause of flat subduction beneath Peru? *Earth Planet. Sci. Lett.* 171: 335–341
- Hou Z Q, Mo X X, Gao Y F, Qu X M, Meng X J. 2003. Adakite, a possible host rock for porphyry copper deposits: case studies of porphyry copper belts in Tibetan Plateau and in northern Chile. *Mineral Deposits*, 22(1): 1–12. (in Chinese with English abstract)
- Kamber B S, Ewart A, Collerson K D, Bruce M C. and McDonald G D. 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archean crustal growth models. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144: 38–56
- Kay R W and Kay S M. 1991. Creation and destruction of lower continental crust. *Geologische Rundschau*, 80: 259–278
- Kay R W. 1978. Aleutian magnesium andesites: melts from subducted Pacific oceanic crust. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 4: 117–132
- Kay S M, Ramos V A and Marques M. 1993. Evidence in Cerro Pampa Volcanic Rocks for Slab-Melting Prior to Ridge-Trench Collision in Southern South America. *J. Geology*, 101: 703–714
- Kimura G, Takahashi M and M. Kono. 1990. Mesozoic collision-extension tectonics in eastern Asia. *Tectonophysics*, 181: 15–23
- Mao J R, Su Y X, Chen S Y. 1990. Felsic intrusions and mineralization in the middle and lower part of Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House, 1–191 (in Chinese with English abstract)
- Martin H. 1986. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14: 753–756
- Martin H. 1987. Petrogenesis of Archean trondhjemites, tonalities, and granodiorites from eastern Finland: major and trace element geochemistry. *J. Petrol.*, 18(5): 921–953
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429
- McKenzie D. 1989. Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 95: 53–72
- Menzies M. A. and Xu Y. G. 1998. Geodynamics of the North China Craton. In *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia* (eds. M. F. J. Flower, S. L. Chung, C. H. Lo, and T. Y. Lee), 155–165. American Geophysical Union, Geodynamics Series 27
- Muir R J, Weaver S D, Bradshaw J D, Eby G N and Evans J A. 1995. The Cretaceous separation point batholith, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere. *Journal of Geological Society, London*, 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: 915–918
- Nelson K D. 1992. Are crustal thickness variation in old mountain belts like the Appalachians a consequence of lithospheric delamination?. *Geology*, 20: 498–502
- Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 121: 227–244
- Petford N and Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37: 491–521
- Petford N and Kerry G. 2001. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 193(3–4): 483–499
- Rapp P R, Shimizu N, Norman M D, Applegate. 1999. Reaction

- between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chem. Geol.*, 160: 335–356
- Rapp R P. 1997. Heterogeneous source regions for Archean granitoids. In: (ed.) Wit M J, Ashwal L D, ed. *Greenstone Belts*. Oxford: Oxford University Press, 35–37
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.*, 36: 891–931
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite / eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities. *Precambrian Research*, 51: 1–25
- Rapp R P, Xiao L, Shimizu N. 2002. Experimental Constraints on the Origin of Potassium-rich Adakites in Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 293–302
- Sajona F G and Maury R C. 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines; Paris, *Academie des Sciences Comptes Rendus, Sciences de la Terre et des Planetes*, 326: 27–34
- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117: 394–409
- Shao J A, Mu B L, Zhang L Q. 2000. Deep geological process and its shallow response during Mesozoic transfer of tectonic frameworks in eastern China. *Geological Review*, 46(1): 32–39 (in Chinese with English abstract)
- Smithies R H. 2000. The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182(1): 115–125
- Sorensen S S and Barton M D. 1987. Metasomatism and partial melting in a subduction complex: Catalina schist, southern California. *Geology*, 15: 115–118
- Sorensen S S. 1988. Petrology of amphibolite-facies mafic and ultramafic rocks from Catalina schist, southern California metamorphism and magmatization in a subduction zone metamorphic setting. *J. Metamorph. Geol.*, 6: 405–435
- 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. *Contrib Mineral Petrol*, 123: 263–281
- Tao K Y, Gao T J, Lu Z G. 1988. The basement structure of volcanic rocks, volcano-intrusion and their metallogenesis, Beijing: Geological Publishing House, 1–43 (in Chinese with English abstract)
- Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. 1997. Gisements epithermaux et porphyriques; la connexion adakite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 325: 103–109
- Wang Q Xu J, Zhao Z. 2001a. The summary and comment on research on a new kind of igneous rock-adakite, *Advance in Earth Science*, 16(2): 201–208 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao Z H, Xu J F, Li X H, Bao Z W, Xiong X L, Liu Y M. 2002. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block. *Science in China (D)*, 46 (Supplement): 164–176
- Wang Q, Zhao Z, Xiong X, Xu J. 2001b. The melting of mafic lower crust: evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrites in Anhui Province, China. *Geochimica*, 30(4): 353–362 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y and Zhang Q. 2001. A granitoid complex from Badaling area, North China: composition, geochemical characteristics and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 17, 533–540. (in Chinese with English abstract)
- Winther K T and Newton R C. 1991. Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: evidence on the origin of Archean cratons. *Bull. Geol. Soc. Denmark*, 39: 213–228
- Wolf M B and Wyllie P J. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: effects of temperature and time. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 115: 369–383
- 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 mantle crust? *Geology*, 30(12): 1111–1114
- Xu J F, Wang Q and Yu X Y. 2000. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchasi block of the Mian-Lue ophiolitic mélange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust. *Geochemical Jour.*, 34, 359–377
- Xu J F, Wang Q, Xu Y G, Zhao Z H, 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 (in Chinese with English abstract)
- Xu Y. G. (2001) Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth (A)* 26, 747–757
- Yogodzinski G M, Kay R W, Bolynets O N. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107: 505–519
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al., 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4373–4387
- Zhang Q, Qin K Z, Wang Y L, Zhang F Q, Liu H T, Wang Y. 2004. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 195–204
- Zhang Q, Wang Y, Wang E C, Wang Y, Zhao T P, Hao J, Guo G J. 2001a. Existence of east China Plateau in mid-late Yanshan period: implication from adakite, *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 248–255 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang J H, Wang Y L, Zhao T P, Guo G J. 2001b. The characteristics and tectono-metallogenic significance of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica*

Sinica, 17, 236–244 (in Chinese with English abstract)

Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269–287.

附中文参考文献

- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山-深部过程. *地质论评*, 46: 41–48
- 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉. 2000. 论东亚大陆的构造翘变-燕山运动的全球意义. *地质论评*, 46: 8–13
- 高山, 金振民. 1997. 拆沉作用(delimitation)及其壳-幔演化动力学意义. *地质科技情报*, 16(1): 1–8
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 李武平. 2002. 中国东部燕山期高Sr/低Y型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约. *科学通报*, 47(6): 474–480
- 侯增谦, 莫宜学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 2003. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例. *矿床地质*, 22: 1–12
- 毛建仁, 苏郁香, 陈三元. 1990. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿. 北京: 地质出版社, 1–191
- 邵济安, 牟保磊, 张履桥. 2000. 华北东部中生代构造格局转换过程中的深部作用与浅部响应. *地质论评*, 46(1): 32–39
- 陶奎元, 高天钧, 陆志刚. 1988. 东南沿海火山岩基底构造及火山侵入作用与成矿关系. 北京: 地质出版社, 1–43
- 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, 增刊)*, 127–136
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2001a. 一种新的火成岩: 埃达克岩(adakite)的研究综述. *地球科学进展*, 16(2): 201–208
- 王强, 赵振华, 熊小林等. 2001b. 底侵玄武质地壳的熔融: 来自沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. *地球化学*, 30(4): 353–362
- 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
- 许继峰, 王强, 徐义刚, 赵振华, 熊小林. 2001. 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. *岩石学报*, 17(4): 575–584
- 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001a. 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, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部中生代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, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004. 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