

# 埃达克质岩的实验研究进展

邢印锁<sup>1,2</sup>, 周文戈<sup>1</sup>, 姜 能<sup>3</sup>, 谢鸿森<sup>1</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;  
3. 中国科学院 地质与地球物理所, 北京 100029

**摘 要:** 高温高压实验岩石学可有效地验证埃达克质岩浆的成因, 是研究埃达克质岩成因的一项重要手段。实验研究表明, 在水不饱和条件下, 微量元素含量合适的中基性岩石在高温高压下的脱水部分熔融都有可能得到类似于埃达克质成分的熔体, 其残留相为含有石榴子石、缺失斜长石的岩石组合。侧重于实验产物微量元素的研究将是今后实验岩石学的一个发展方向。

**关 键 词:** 埃达克质岩; 地球化学特征; 实验岩石学; 残留相

**中图分类号:** P589.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2010)03-0317-04

## The Extension of Adakitic Rocks and The Progress of Petrogenesis Experiments

XING Yin-suo<sup>1,2</sup>, ZHOU Wen-ge<sup>1</sup>, JIANG Neng<sup>3</sup>, XIE Hong-sen<sup>1</sup>

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** High temperature and high pressure experimental petrology, which can effectively verify the genesis of adakitic magma, is also an important tool to study the genesis of adakitic rock. Experiment results showed that dehydration partial melting of intermediate-basic rock with appropriate content of trace elements under high temperature, high pressure and water un-saturation conditions may get adakitic melt, the residual phase may be a set of rock which contains garnet and no feldspar. Research of the trace elements in the experimental products will be a development trend of experimental petrology in future.

**Key words:** adakitic rocks; geochemical characteristics; experimental petrology; residual phase

早在 19 世纪末,就在日本发现了产于近代岛弧带的岩石——玻基斜方辉石安山岩和玻基古铜辉石安山岩。当时被命名为 Sanukite 和 Boninite(玻安岩)<sup>[1,2]</sup>。20 世纪 70 年代末又发现了和这种类似的中酸性钙碱性的特殊岩石<sup>[3~5]</sup>,并以埃达克岩的名称被 Defant 和 Drummond<sup>[4]</sup>首次提出。埃达克岩(adakite)的名称源自美国阿拉斯加州阿留申群岛中的 Adak 岛,被认为是由年轻的(少于 25 Ma)并由热的消减洋壳在 75~85 km 深处发生部分熔融而成的一套中酸性火山岩或侵入岩,指示为板片的

熔融事件产物<sup>[4,5]</sup>。很多学者认为凡是地球化学特征和埃达克岩相似的岩石都可以称其为埃达克质岩石<sup>[6~8]</sup>。

埃达克岩以其独特的矿床学意义和重要的地球动力学意义受到了学者们的关注。

源于下地壳部分熔融产物的埃达克质岩保存了很多下地壳的印记,包括含石榴子石的下地壳残留包体。因此,可以根据埃达克质岩的特征,反演下地壳的组成及其形成时的地球动力学特征<sup>[6,7]</sup>。俯冲成因的埃达克质岩的动力学可指示大洋板片俯冲消

收稿日期:2009-04-03 收到,06-05 改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40873052);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJXC2-SW-N20);西部之光项目  
第一作者简介:邢印锁(1980—),男,硕士研究生,专业方向:高温高压实验岩石学. E-mail: dayuruozhi521@163.com.

减作用的存在以及大洋板块的俯冲方向,是延伸到地幔和岩浆房的重要的岩石“探针”<sup>[9,10]</sup>。

有关埃达克质岩浆的实验研究多侧重于中性和基性岩石的部分熔融(包括玄武质洋壳、斜长角闪岩和麻粒岩,以及若干区域变质作用形成的太古宙斜长角闪岩和麻粒岩为源岩的重熔)<sup>[11~17]</sup>。有人认为角闪岩只有在缺乏流体的高温高压下的脱水熔融才适合埃达克质熔体的形成<sup>[18]</sup>。

Rapp 等<sup>[12]</sup>以低钾拉班玄武岩为样品,在 1100℃, 1.6~2.2 GPa, 水不饱和的条件下,发生了脱水熔融,产生了 10%~20% 的属于埃达克质岩范围的高铝 TTG 熔体, 1.6 GPa 的残余矿物为斜长石+单斜辉石+角闪石; 2.2 GPa 的残余矿物为石榴子石+单斜辉石。变质玄武岩和变质安山岩样品在 0.1~0.9 GPa, 800~1000℃ 的脱水熔融实验,得到了埃达克质熔体,残余组分为斜长石+辉石+磁铁矿+钛铁矿<sup>[14]</sup>,而且 Bread 和 Lofgren 还认为在  $\geq 900^\circ\text{C}$  的时候,无水部分熔融实验经过 96 小时就足够接近平衡,这也被一些学者<sup>[19~21]</sup>的实验所证实。低钾富钙的角闪岩样品在活塞圆筒高压装置上 1.0 GPa, 750~975℃ 条件下,产生了高铝的英云闪长岩岩浆,残留相为 Hb+Gt±Pl+Px<sup>[15]</sup>。Sen 和 Dunn 玄武质角闪岩样品在 1.5 GPa 和 2.0 GPa, 850~1150℃ 的脱水熔融实验,产生了与埃达克质岩浆相似的中酸性熔体(但明显亏损镁和钙),残余矿物为角闪石+斜长石+石榴子石+单斜辉石;并确认了天然角闪岩脱水熔融过程中的相变,以及温度和压力条件对残留相与熔体的影响<sup>[16]</sup>。天然角闪岩在 0.8~3.2 GPa, 1000~1100℃ 时的部分熔融实验表明,在压力  $\geq 1.6$  GPa 和 1000~1100℃ 时,含水变基性岩的部分熔融都有可能产生埃达克质的熔体,镁铁质地壳的部分熔融可以形成埃达克质熔体<sup>[13,22,23]</sup>,并以此讨论了早期大陆地壳生长时,通过榴辉岩的部分熔融,板块溶液和橄榄岩的杂化可生成高镁埃达克质熔体,而且埃达克质岩浆的原岩可能是具相同微量元素型式的弧下地幔。200 MPa, 900~1060℃ 时,辉长岩粉末的部分熔融实验获得了主量元素类似于埃达克质的熔体<sup>[17]</sup>。Foley 等<sup>[24]</sup>通过部分熔融的模拟计算,指出残留相以角闪石为主。Rapp<sup>[25]</sup>则强调残留相中的石榴子石对埃达克质熔体特殊地球化学特征的制约作用,认为埃达克质岩浆是变玄武岩在角闪石消失边界附近榴辉岩相条件下部分熔融的产物。他们还认为橄榄岩低程度的熔融产生埃达克质熔体时(1.6 GPa, 1100℃),地幔边缘的交代变质作用不是很明显;当埃达克质熔

体的比率达到 25%~30% 时,地幔边缘发生的交代变质反应则很明显:橄榄岩中的橄榄石消失并生成角闪石;来自交代变质地幔(类似于富镁安山岩的原始岩浆就来自这个混合的源区)过程的“信号弧”可以被有效地保存和转移。富钠的变质英云闪长岩实验在 0.6~1.2 GPa, 680~1000℃ 时,获得了属于埃达克质岩范围的类似于太古宙 TTG 的花岗质熔体,主要为黑云母和角闪石的分解和部分熔融,且黑云母比角闪石分解熔融的温度要低<sup>[26]</sup>;表明富钾的岩浆不是来自 TTG 地壳的再循环,很可能来自地壳岩石和/或高度富集地幔的演化。

国内开展埃达克质岩的实验研究比较晚。王强等<sup>[11]</sup>曾指出,中国某些高钾的埃达克质岩可能源自压力 1.5~4.0 GPa 的部分熔融,或者高钾的变玄武岩或榴辉岩的部分熔融。续海金<sup>[18]</sup>则认为源岩、水含量和地壳热结构是控制埃达克质岩成因的关键。熊小林等<sup>[27,28]</sup>以含 5% H<sub>2</sub>O 的含水玄武岩为初始样品,在 1.0~2.5 GPa, 900~1100℃ 时,获得埃达克质的熔体,其残留相为角闪岩或榴辉岩的矿物组合,并指出只有当结晶组合中同时含金红石和石榴子石时,熔体才具埃达克质熔体的微量元素地球化学特征,并由此认为埃达克质熔体产生于 50 km 深度以上。韩江伟等<sup>[29]</sup>通过实验产生的埃达克质熔体与天然埃达克岩的对比,发现后者明显亏损钠,并得出了埃达克质熔体在热的地幔楔中与地幔橄榄岩反应导致这一现象的结论。熊小林等<sup>[30]</sup>通过对实验结果<sup>[27,28]</sup>的讨论,指出埃达克质熔体必须在有金红石时才能产生。肖龙等<sup>[31]</sup>以大别山地区的角闪岩和粗玄岩为初始材料,在 1.5~2.5 GPa 和 950~1075℃ 时进行了富钾埃达克的近液相线实验和无流体的部分熔融实验;指出大别地区的 C 型高钾埃达克质岩浆很可能来自古代的火成岩地壳,其高温的部分熔融是在极端加厚地壳导致的后造山相期间进行的,而岩浆的侵位极有可能是在 10 km 的中地壳中进行。华北汉诺坝地区斜长角闪岩的部分熔融实验得到了近似于埃达克质的熔体<sup>[32]</sup>,而出现埃达克质熔体的实验压力最低应为 1.0 GPa,这与文献中<sup>[33]</sup>关于正常下地壳部分熔融可产生埃达克质岩的推断一致。

上述实验都得到了水不饱和条件下,中基性岩石在高温高压下的脱水部分熔融可以得到类似于埃达克质成分实验产物的结果,其残留相为石榴子石+单斜辉石+斜方辉石+角闪石(很少含斜长石)。这一结果证实了前人的推断<sup>[2,4,5,34~36]</sup>。

实验表明,是否形成埃达克质岩,取决于源岩的

地球化学特征和熔融时的温压条件。只要源岩具有类似埃达克质岩的特征地球特征,并达到了熔融的温压条件,且残留相是含石榴子石的矿物组合,那么所形成的熔体就具有埃达克质岩的特征。构造环境(消减带或下地壳)、源岩性质(基性岩或酸性岩)、压力和温度(地壳厚度),以及围岩(与地幔或地壳发生混合作用)等的差异,造成了埃达克质岩的多样性<sup>[37]</sup>。

埃达克质岩实验岩石学研究有三个趋势:1)从最初的侧重于主量元素的研究到后来侧重于微量元素的研究;2)从原来的通过主量元素研究矿物的部分熔融规律到目前研究微量元素在矿物—熔体及矿物—矿物之间的分配特征;3)从早期通过主量元素研究中酸性岩浆的形成条件到目前的通过微量元素特征研究可能的岩浆形成过程及制约因素。

实验岩石学中实验产物的检测分析对分析仪器的精度和性能要求愈来愈高。

综上所述,凡是地球化学特征与埃达克岩相似的岩石,都可以称其为埃达克质岩石;在水不饱和条件下,基性岩石的脱水部分熔融可以得到类似于埃达克质成分的熔体,残留有石榴子石+单斜辉石+斜方辉石+角闪石(很少含有斜长石)的矿物组合。

#### 参考文献 (References):

- [1] Tomkeieff S I. Dictionary of Petrology[M]. Indianapolis: John Wiley & Sons Ltd., 1983.
- [2] 董申保, 田伟. 埃达克岩的原义、特征与成因[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 585—594.  
Dong shenbao, Tian Wei. The nomenclature, characteristics and petrogenesis of adakite [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 585—594. (in Chinese with English abstract)
- [3] Kay R W. A leutian magnesian andesites; Melts from subducted Pacific ocean crust[J]. Volcan. Geotherm. Res., 1978, 4: 17—132.
- [4] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347 (18): 662—665.
- [5] Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. Geophys. Res., 1990, 95: 21503—21521.
- [6] Kovalenko D V, Bayanova T B. Sources and evolution of the cenozoic suprasubduction magmatism of the olyutorsky tectonic block, southern Koryak Highland[J]. Petrology, 2007, 15 (6): 645—670.
- [7] Paterno R Castillo. 埃达克岩成因回顾[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 617—625.  
Paterno R C. The retrospect of adakite[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 617—625. (in Chinese with English abstract)
- [8] Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, et al. Adakites, Some variations on a theme[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(2): 129—142
- [9] Rabbia O M, Reich M, Hernandez L B, King R W, Lopez-Escobar L. High-Al TTG-like suite at the El Teniente porphyry copper deposit[C]. 9th Congreso Geologico Chileno Puerto Varas, 2000, 1: 326—330.
- [10] 陆彦. 埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 西藏地质, 2002, 20(1): 101—103.  
Lu Yan. The characteristics of the structure forming the meaning of Adakite[J]. Tibet Geology, 2002, 20(1): 101—103. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王强, 许继锋, 赵振华, 紫锋, 唐建功, 贾小辉, 姜子琦. 中国埃达克岩或埃达克质岩及相关金属成矿作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(4): 336—349.  
Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, Zi Feng, Tang Gongjian, Jia Xiaohui, Jiang Ziqi. Adakites or adakitic rocks and associated metal metallogenesis in China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(4): 336—349. (in Chinese with English abstract)
- [12] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partialmelting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalite[J]. Precambrian Res., 1991, 51: 1—25.
- [13] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. J. Petrol., 1995, 36: 891—931.
- [14] Beard J M, Lofgen G F. Dehydration melting and saturated melting of basaltic and andesitic greenstone and amphibolites [J]. J. Petrology, 1991, 32: 365—401.
- [15] Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: The effects of temperature and time[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1994, 115: 369—383.
- [16] Sen c, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5GPa and 2.0GPa: Implication for the origin of adalites[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1994, 117: 394—409.
- [17] Koepke J, Sandrin T F. Petrogenesis of oceanic plagiogranites by partial melting of gabbros: An experimental study[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2004, 146: 414—432.
- [18] 续海金, 马昌前. 实验岩石学对埃达克岩成因的限定-兼论中国东部富钾高 Sr/Y 比值花岗岩类[J]. 地学前缘, 2003, 10 (4): 417—427.  
Xu Haijin, Ma Changqian. Constraints of experimental petrology on the origin of adakites, and petrogenesis of Mesozoic K-rich and high Sr/Y ratio granitoids in eastern China[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10: 417—427. (in Chinese with English abstract)
- [19] Patiño Douce AE. Experimental generation of hybrid silicic melts by reaction of high-Al basalt with metamorphic rocks [J]. J. Geophys. Res. (Solid Earth), 1995, 100(B8): 15623—15639.

- [20] Patiño Douce AE, Beard J S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar[J]. *J. Petrol.*, 1995, 36: 707—738
- [21] Patiño Douce AE, Harris N. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. *J. Petrol.*, 1998, 39: 689—710
- [22] Rapp R P, Xiao L, Shimizu N. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakite in east China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18: 293—311.
- [23] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite[J]. *Nature*, 2003, 425, 605—609.
- [24] Foley S F, Tiepolo M, Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones[J]. *Nature*, 2002, 417: 837—840.
- [25] Rapp R P, Laporte D, Martin H, Shimizu N. Experimental insights into slab-mantle interactions in subduction zones: Melting of adakite-metasomatized peridotite and the origin of the “arc signature” [A]. *Goldschmidt Conference Abstracts*, 2006: A517[A].
- [26] Watkins J M, Clemens J D, Treloar P J. Archean TTGs as sources of younger granitic magmas: Melting of sodic metatonalites at 0.6—1.2 GPa [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2007, 154: 91—110.
- [27] Xiong X L, Adam J, Green T H. Trace element characteristics of partial melts produced by melting of metabasalts at high pressures: Constraints on the formation condition of adakitic melts [J]. *Science in China (series D)*, 2006, 49: 915—925.
- [28] Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rufle/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis [J]. *Chem. Geol.*, 2005, 210: 339—359.
- [29] 韩江伟, 熊小林, 吴金花. 埃达克岩的 Na 亏损及其对地幔 Na 交代的指示意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2006, 30(3): 391—391.  
Han Jiangwei, Xiong Xiaolin, Wu Jinhua. Na depletion in modern adakites and implication for melt-mantle metasomatism [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2006, 30(3): 391—391. (in Chinese with English abstract)
- [30] 熊小林, J Adam, T H Green, 牛贺才, 吴金花, 蔡志勇. 变质玄武岩部分熔体微量元素特征及埃达克熔体产生条件 [J]. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(9): 837—846.  
Xiong Xiaolin, Adam J, Green T H, Niu Hecai, Wu Jinhua, Cai Zhiyong. Phase equilibrium and trace element partitioning between minerals and melt in the metabasalt system [J]. *Science China (Series D)*, 2005, 35(9): 837—846. (in Chinese)
- [31] Xiao L, Clemens J D. Origin of potassic (C-type) adakite in east China: experimental and field constraints [J]. *Lithos*, 2007, 95: 399—414.
- [32] 万方, 周文戈, 姜能, 范大伟, 陈海红, 谢鸿森. 1.5 GPa、950℃下斜长角闪岩部分熔融微量元素的分配特征 [J]. *地学前缘*, 2009, 16(1): 126—133.  
Wan Fang, Zhou Wenge, Jiang Neng, Fan Dawei, Chen Haihong, Xie Hongsen. The partition characteristic of partial melting massive amphibolite at 1.5 GPa and 950℃ [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 126—133. (in Chinese with English abstract)
- [33] Jiang N, Liu Y S, Zhou W G, Yang J H, Zhang S Q. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China craton [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, 71: 2591—2608.
- [34] Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, Xiong X L, Bao Z W. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province, China and their constraint on geodynamic process [J]. *Science in China (series D)*, 2001, 46(8): 801—815.
- [35] 许继峰, 王强. Adakitic 火成岩对大陆地壳增厚过程的指示: 以青藏北部火山岩为例 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(4): 401—406.  
Xu Jifeng, Wang Qiang. Tracing the thickening process of continental crust through studying adakitic rocks: Evidence from volcanic rocks in the North Tibet [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 401—406. (in Chinese with English abstract)
- [36] Davis G A. 华北燕山带: 构造、埃达克岩浆活动与地壳演化 [J]. *地学前缘*, 2003, (4): 373—384.  
Davis G A. The Yanshan belt of north China: Tectonics, adakitic magmatism, and crustal evolution [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 373—384. (in Chinese with English abstract)
- [37] 张旗, 许继峰, 王焰, 肖龙, 刘红涛, 王元龙. 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, Xiao Long, Liu hongtao, Wang Yuanlong. Diversity of Adakite [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9—10): 959—965. (in Chinese with English abstract)