

文章编号: 1000- 6524 (2001) 03- 0297- 10

# adakite 的地球化学特征及成因

钱 青

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘 要** 本文通过综合近 20 年来国际上有关 adakite(埃达克岩)的主要文献资料,对 adakite 的岩石地球化学特征、分布、形成环境和条件等做了总结。adakite 是一类高铝的中酸性火山岩或侵入岩,主要特点是:高 Sr( $400 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$ ),低 Y 和 Yb( $Y \leq 18 \times 10^{-6}$ ,  $Yb \leq 1.9 \times 10^{-6}$ ),轻重稀土元素强烈分异,不具有明显的 Eu 负异常,  $K_2O/Na_2O$  比值低( $< 0.5$ )。adakite 主要分布于环太平洋地区,少数分布于一些古老造山带中,它的形成主要与年轻的( $< 25$  Ma)俯冲洋壳的部分熔融有关,也可能与老的俯冲洋壳或底侵玄武岩的部分熔融,或者与增厚地壳的底部发生拆沉作用有关。熔融残留相主要是含榴角闪岩或榴辉岩,也可能为麻粒岩。实验岩石学及地质证据表明,具有 adakite 成分特征的岩浆可以在较宽的压力范围内(1.0~ 2.6 GPa)形成。

**关键词:** adakite; 地球化学; 分布; 构造环境; 形成条件

**中图分类号:** P584; P581

**文献标识码:** A

1968 年, Green and Ringwood 提出,大洋玄武岩(MORB)在岛弧俯冲带转变为榴辉岩之后,可以发生部分熔融,形成钙碱性的安山岩<sup>[1]</sup>。然而, Stern 和 Gill 的实验和地球化学研究表明,绝大多数岛弧安山岩不可能由俯冲的 MORB 部分熔融形成<sup>[2,3]</sup>。现今各大洋周边俯冲洋壳的平均年龄为 60 Ma<sup>[4]</sup>,已基本冷却,沿 Benioff 带的地热梯度较低( $\leq 10^\circ\text{C}/\text{km}$ ),洋壳在俯冲过程中不能够直接熔融,而是发生变质并逐步脱水。富含大离子亲石元素(LILE)的水热流体向上运移,交代地幔楔,并使之发生部分熔融,形成岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩。岛弧玄武岩经过分离结晶等演化,形成典型的岛弧玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩岩系<sup>[5-7]</sup>。

1990 年, Defant and Drummond 重新提出,某些岛弧钙碱性安山岩和英安岩为俯冲板片部分熔融形成<sup>[6]</sup>。在一些地区,如果年轻的、热的洋壳发生俯冲,则沿 Benioff 带的地热梯度高( $25 \sim 30^\circ\text{C}/\text{km}$ ),洋壳可能发生脱水熔融,形成高铝的中-酸性岩石。这类岩石最早发现于 Aleutian 群岛的 Adak 岛<sup>[8]</sup>,因此,被命名为 adakite,指的是新生代与年轻洋壳俯冲有关的、具有独特地球化学特征的一类中-酸性火山岩或侵入岩,其地球化学特征与太古代高铝的英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)相似<sup>[6]</sup>。由于其特殊的成因,对研究陆壳的起源和演化、俯冲带的元素地球化学行为以及壳-幔相互作用有重要意义,对探讨一些造山带的古构造演化也很有帮助。此外, adakite 常与 Au、Ag、Cu、Mo 的低温热液矿床及斑岩矿床有关<sup>[9,10]</sup>,有重要的经济价值。近来, adakite 的研究受到国内学者的广泛重视。本文综合了国际上涉及 adakite 的主要文献,主要对 adakite 的分布、岩石地球化学特征、成因模式及实验岩石学资料做一概括介绍。

## 1 adakite 的分布

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<sup>[11]</sup>、菲律宾<sup>[12,13]</sup>、

收稿日期: 2001- 03- 01; 修订日期: 2001- 05- 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(48972027, 40002006)

作者简介: 钱青(1969-), 男, 博士, 助研, 岩石学和地球化学专业。

日本西南<sup>[14]</sup>、堪察加半岛<sup>[15, 16]</sup>、Aleutian 群岛的 Adak<sup>[8, 17]</sup> 和 Komandorsky 岛<sup>[18-20]</sup>、北美 Cascade<sup>[21]</sup>、Mount St. Helens<sup>[21-23]</sup>、墨西哥 Baja California<sup>[23-26]</sup>、巴拿马和哥斯达黎加<sup>[27-29]</sup>、厄瓜多尔<sup>[30]</sup>、阿根廷 Patagonia<sup>[31, 32]</sup>、安第斯的 Austral Volcanic Zone 和 Southern Volcanic Zone<sup>[23-32]</sup>、智利南端的 Cook 岛<sup>[31-33]</sup>。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。

另外, 具 adakite 特征的岩石还见于一些古老的造山带中, 如: 埃塞俄比亚西部 Birbir 新元古代岩浆弧<sup>[34]</sup>、新西兰 Separation Point 白垩纪花岗岩岩基<sup>[35]</sup>、北美 Cordillera 中生代岩基<sup>[36]</sup>等。最近, 国内一些造山带中也有 adakite 的报道, 如内蒙古苏左旗、北大别和秦岭勉略带等<sup>[37-40]</sup>。

## 2 adakite 的岩石地球化学特征

### 2.1 adakite 的岩石地球化学特征

adakite 的主要矿物组合为: 斜长石+角闪石±黑云母, 单斜辉石和斜方辉石极少, 只在 Aleutian 和墨西哥的高镁安山岩中有所发现<sup>[8, 24]</sup>。副矿物包括磷灰石、锆石、榍石及钛磁铁矿等, 其含量一般高于典型的岛弧岩浆岩<sup>[30]</sup>。与经典的岛弧玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩组合不同, adakite 很少有相关的玄武岩或玄武安山岩相伴生, 如果有, 则玄武岩富 Nb ( $\geq 20 \times 10^{-6}$ ), LILE 也非常富集<sup>[13, 41, 94]</sup>。

adakite 的典型地球化学特征如下(表 1):  $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值低( $< 0.5$ ),  $\text{Mg}^\#$  [ $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{\text{total}})$ ] 一般大于 0.47, 甚至高达 0.70<sup>[71]</sup>; Sr 含量高( $400 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$ ), Y 和 HREE 含量低( $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$ ), REE 强烈分异, 因此, La/Yb 和 Sr/Y 比值很高; 高场强元素(HFSE)亏损, 在蛛网图中, Sr 和 Eu 呈正异常或没有异常, 但一般不具负异常(图 1); 同位素组成类似 MORB( $^{144}\text{Nd}/^{143}\text{Nd} > 0.5129$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.705$ )<sup>[6, 30, 41, 42]</sup>。

在  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$  图解中, adakite 落在钙碱性范围; 在 An-Ab-Or 图中, 落在英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩的三连点附近; 在 K-Na-Ca 图中, 显示奥长花岗岩的分异趋势, 与钙碱性的分异趋势不同<sup>[30]</sup>。

Defant and Drummond 将一些具有上述地球化学特征的高镁安山岩( $\text{MgO}$  高达 6%) 也称为 adakite<sup>[41]</sup>。已报道的高镁 adakite 主要分布于下列地区: Aleutian 群岛的 Adak 岛<sup>[8]</sup> 和 Komandorsky 岛<sup>[18, 19]</sup>、智利南端的 Cook 岛<sup>[33]</sup>、墨西哥加里弗尼亚的 Baja 岛<sup>[26]</sup>、阿根廷 Patagonia 的 Cerro Pampa<sup>[31, 32]</sup>、安第斯的 Austral Volcanic Zone 和 Southern Volcanic Zone<sup>[31, 32]</sup>、希腊爱琴海 Evia 火山<sup>[44]</sup>等。高镁 adakite 的地球化学特征表明, 俯冲板片的熔融产物与地幔橄榄岩发生了反应<sup>[8, 13, 30, 31, 45, 46]</sup>。

### 2.2 adakite 与其它中-酸性岩的地球化学特征对比

#### (1) adakite 与岛弧钙碱性英安岩的对比

adakite 的 REE 强烈分异 [ $(\text{La}/\text{Yb})_N > 10$ ] ( $N$  表示球粒陨石标准化), LREE 富集 ( $\text{La}_N$  为  $40 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$ ), HREE 亏损 ( $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ ), 而典型的钙碱性英安岩的 HREE 较富集 ( $\text{HREE}_N \geq 10$ ,  $\text{Yb} \geq 2.5 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Y} \geq 25 \times 10^{-6}$ ), REE 分异程度低 [ $(\text{La}/\text{Yb})_N < 10$ ]; adakite 具有明显的 Sr 正异常, Eu 呈正异常或

表 1 adakite 的典型地球化学特征及实例

Table 1 Typical geochemical characteristics and examples of adakite

	adakite	Cordillera Blanca	Mount St. Helens
La/Yb	> 20	71	10.5
Sr/Y	> 40	67	41.2
Yb/ $10^{-6}$	$\leq 1 \sim 1.5$ ( $\leq 1.9$ )	0.36	1.18
Y/ $10^{-6}$	$\leq 15 \sim 18$	6.9	12.1
Sr/ $10^{-6}$	< 10		9.4
$\text{Al}_2\text{O}_3/10^{-2}$	> 15	15.1	17.7
Zr/Sm	> 50		51.1
Eu 异常	正		正
Sr 异常	正		正

注: 由文献[6, 21, 43]等综合而来。

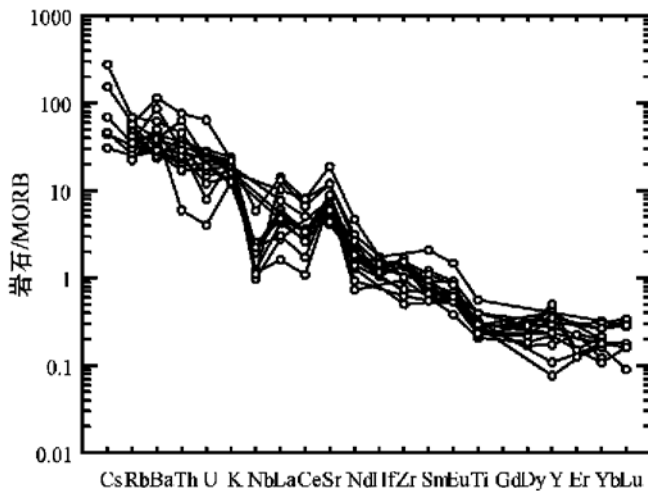


图1 adakite 的微量元素蛛网图

Fig. 1 Spidergrams of trace elements in adakite

数据引自文献[12~14, 27, 28, 31, 32, 35]

没有异常, 负 Eu 异常很少, 表明没有斜长石的分离结晶, Sr/Y 比值高 ( $> 40$ ), 而岛弧钙碱性英安岩具有 Sr 和 Eu 的负异常, Sr/Y 比值低<sup>[30]</sup>; 岛弧钙碱性英安岩具有明显的 HFSE 负异常, adakite 具有负 Nb 异常, 但其 Zr 和 Ti 一般不具异常; adakite 的 Ni 和 Cr 含量 (分别为  $24 \times 10^{-6}$  和  $36 \times 10^{-6}$ ) 高于典型的岛弧钙碱性英安岩 ( $8 \times 10^{-6}$  和  $5 \times 10^{-6}$ )<sup>[30]</sup>, adakite 的  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2$  含量 (平均 7%) 和  $\text{Mg}^\#$  (平均 0.51) 也高于典型的岛弧钙碱性英安岩 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2 = 6\%$ ;  $\text{Mg}^\# = 0.36$ )。

(2) adakite 与玻安岩分离结晶产物的对比

玻安岩是一种富 Si、Mg 和贫 Ti 的火山岩,  $\text{SiO}_2 = 52\% \sim 60\%$ ,  $\text{MgO} =$

9% ~ 25%, 一般形成于弧前环境<sup>[47, 48]</sup>。在特别的情况下 (如在 Lau Basin 北端有高温的地幔柱物质加入) 也可形成于弧后盆地环境<sup>[95]</sup>。玻安岩的 HREE 和 Y 含量很低, 一般为球粒陨石的 2~6 倍, 常具有 Sr 正异常<sup>[48, 49]</sup>。玻安岩岩浆通过分离结晶作用, 可以产生英安岩和流纹岩<sup>[50, 51]</sup>, 它们也可能具有高的 Sr/Y 比值和低的 Y 含量, 但一般为低铝的英安岩和流纹岩。玻安岩的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  一般介于 0.3~5.4 之间<sup>[52]</sup>, 在低压下以橄榄石+斜方辉石+普通辉石为主的分离结晶作用不会明显改变熔浆的稀土元素分配型式。

(3) adakite 与太古代高铝 TTG 的对比

太古代花岗-绿岩地体和高级片麻岩地体中长英质岩石的 90% 为低 K、富 Na 的奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩<sup>[53~55]</sup>, 这些岩石被称为太古代 TTG<sup>[56]</sup>。根据  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量及其它地球化学特征, 太古代 TTG 可分为两类: 低铝 TTG ( $\text{SiO}_2 = 70\%$  时,  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 15\%$ ) 和高铝 TTG ( $\text{SiO}_2 = 70\%$  时,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ )<sup>[57]</sup>。多数学者认为, 高铝 TTG 为含石榴石的角闪岩发生部分熔融形成<sup>[28, 41, 42, 53~55, 57~70]</sup>。太古代高铝 TTG 富集 LREE 和亏损 HREE ( $0.3 \leq \text{Yb}_N \leq 8.5$ ), REE 强烈分异 [ $5 < (\text{La}/\text{Yb})_N \leq 150$ ], Sr 含量高 ( $300 \times 10^{-6}$  到  $2000 \times 10^{-6}$  以上), 没有 Eu 的正或负异常, HFSE 亏损,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  低 ( $< 0.5$ )<sup>[41, 42]</sup>, 与 adakite 极为相似。然而, 二者也在以下方面有所不同: TTG 的 La/Yb 更高, 常达 150, 而 adakite 一般小于 100; 许多 TTG 的  $\text{Mg}^\#$  (一般小于 0.50), Ni 和 Cr 含量低于典型的 adakite<sup>[30, 71]</sup>。Smithies 认为造成上述差别的主要原因是: 太古代高铝 TTG 是加厚的地壳底部含水玄武质岩石部分熔融形成, 与典型的 adakite 的成因不同, 因此熔浆与地幔之间不存在反应<sup>[71]</sup>。Martin 则认为太古代地热梯度高, 俯冲板片的熔融深度更浅, 熔融残留相中存在斜长石, 并且熔浆与地幔楔之间的反应更弱<sup>[30]</sup>。然而, 上升的 adakite 熔浆极有可能与地幔楔之上的岩石圈地幔发生反应, 这一点并不能从 Martin 的模式得到很好的解释 (孙贤斌, 私人交流)。

### 3 adakite 的成因

#### 3.1 adakite 地球化学特征的成因

(1) Eu 和 Sr 正异常。Sr 和 Eu 在斜长石中的分配系数远远高于其它矿物, adakite 源区残留相中缺少斜长石, 是产生 Sr 和 Eu 正异常的主要原因。此外, 角闪石、单斜辉石和石榴石常具有 Eu 负异常, 它们的分离结晶也可以使熔浆产生 Eu 正异常。但是, adakite 的 Eu 含量还可能受到斜长石的分离结晶、MORB 源

区 Eu 的亏损以及蚀变作用等因素的影响<sup>[6,72]</sup>。

(2) Y 的亏损及高 Sr/Y、La/Yb 比值。adakite 源区部分熔融的残留相为榴辉岩或石榴石角闪岩<sup>[6,21,41]</sup>。在角闪石、石榴石和单斜辉石中, Sr 的分配系数很小(分别为 0.058, 0.015 和 0.2), 而 Y 的分配系数较高(分别为 3.2、12.5 和 2.0), 因此, 熔融残留相中存在上述矿物将导致 adakite 岩浆亏损 Y 和 HREE 并具有高 Sr/Y 和 La/Yb 比值<sup>[6]</sup>。

(3) Nb 的亏损。Pearce and Norry 发现, 角闪石在与含 60%~70% SiO<sub>2</sub> 的熔浆处于平衡状态时, 具有强烈亲 Nb(分配系数为 2~5)的特点<sup>[73]</sup>。adakite 中 Nb 亏损可能与角闪石的分离有关, 也可能与俯冲板片中存在难熔的含 Ti 矿物相有关<sup>[30]</sup>。此外, 典型岛弧火山岩的 Nb、Zr、Ti、P 等高场强元素均亏损, 而 adakite 除了 Nb 明显亏损外, Zr、Ti、P 的亏损并不明显。Tatsumi 等认为, 俯冲洋壳脱水形成的流体富含 LILE, 但不携带 HFSE, 因此, 可形成 HFSE 亏损的岛弧岩浆, 而俯冲洋壳熔融形成的熔体则携带 HFSE<sup>[74]</sup>。

(4) 较低的 K/Rb 比值。K 和 Rb 都为高度不相容元素, 在多数造岩矿物(如橄榄石、辉石、石榴石等)中分配系数差别很小<sup>[75]</sup>, 但 K 在角闪石中的分配系数较 Rb 高, 角闪石的分离可能导致 adakite 具有低-中等的 K/Rb 比值<sup>[26,76]</sup>。

(5) 高 MgO、Ni 和 Cr。很多 adakite 具有高 MgO、Ni 和 Cr 含量的特点, 表明俯冲板片的熔融产物与地幔橄榄岩之间发生了反应<sup>[8,13,30,31]</sup>。以阿根廷 Cerro Pampa 火山的安山岩和英安岩为例, 其 FeO/MgO 比值低(0.9~1.3), Cr 和 Ni 含量高, 分别达到  $85 \times 10^{-6}$  和  $43 \times 10^{-6}$  以上<sup>[31]</sup>。

(6) Y/Yb 比值。N-MORB 和 E-MORB 的 Y/Yb 比值约为 10, 与球粒陨石基本相同<sup>[96]</sup>; 其它类型的玄武岩(无论是在板内环境还是与俯冲有关), 一般 LREE 均相对于 HREE 富集, 因此 Y/Yb 比值大于 10。由于 adakite 岩浆形成过程中, 石榴石起着关键作用, 而 HREE(尤其是 Yb、Lu)在石榴石中的分配系数最大, 因此 adakite 的 Y/Yb 比值一般大于 10(有的接近 20)(孙贤斌, 私人交流); 然而, 如果岩浆形成过程中角闪石也同时作为一个重要的矿物相, 则 Y/Yb 比值将接近 10, 因为在 REE 中, HREE 中部的元素(Dy、Ho)在角闪石中分配系数最高<sup>[97]</sup>。如果报道的 Y/Yb 比值小于 10, 则应该怀疑数据分析的质量, 可以通过 Y/Ho 比值对数据分析质量进行检验。Y 和 Ho 的离子半径和电价(+3)相同, 因此, 除了水热流体的作用之外, Y/Ho 比值在多数地质作用如部分熔融和结晶分离条件下不会发生明显改变, 绝大多数岩石(包括金伯利岩和花岗岩)与球粒陨石有相同的 Y/Ho 比值(平均 28)(孙贤斌, 私人交流)。

实验结果表明, 玄武质角闪岩在 1.5~2.0 GPa, 850~1150 °C 下熔融形成与 adakite 成分相似的熔浆, 但熔浆的 MgO、CaO 偏低<sup>[45]</sup>, 说明 adakite 岩浆与地幔之间存在反应。Sajona 等认为, 与 adakite 伴生的富 Nb 玄武岩, 是受 adakite 熔浆交代的地幔楔再发生部分熔融的产物<sup>[13]</sup>。Schiano 等在菲律宾 Batan 岛钙碱性熔岩的超基性岩包体中, 发现橄榄石晶体含有 adakite 的玻璃质包裹体, 证明 adakite 岩浆与地幔岩之间存在反应<sup>[46]</sup>。

### 3.2 adakite 的形成机制

新生代以来的 adakite 分布在环太平洋周边, 并且主要与年轻洋壳的俯冲有关, 其源区的深度为 70~90 km<sup>[14,30,41]</sup>。adakite 的 Nd、Sr、Pb 同位素地球化学特征与 MORB 相似<sup>[8,32,77]</sup>, 在俯冲带的变质玄武岩中还发现了具 adakite 成分特征的混合岩化脉体<sup>[78]</sup>, 均说明 adakite 可能是年轻的俯冲板片部分熔融形成的<sup>[41]</sup>, 实验也证明角闪岩-榴辉岩的熔融可以产生具有 adakite 成分特征的岩石<sup>[45,69,70,79]</sup>。然而, 最近的研究表明, adakite 可能有多种形成机制:

(1) 年轻的(<25 Ma)、热的俯冲板片的部分熔融<sup>[12,14,21,23,27,28,41,80]</sup>。Defant and Drummond 认为, 如果俯冲板片的年龄 > 30 Ma, 沿 Benioff 带的地热梯度较低, 板片发生脱水作用, 流体上升交代地幔楔并使之发生部分熔融(熔融残余为橄榄石和辉石), 形成正常的岛弧玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩。但如果俯冲洋壳的年龄 < 20~30 Ma, 则沿 Benioff 带的地热梯度高(25~30 °C/km), 俯冲板片在脱水之前温度就可达 650~700 °C, 从而可能发生脱水熔融(熔融残余为石榴石和角闪石), 形成 adakite 岩浆, 类似于太古代高铝 TTG 的形成<sup>[41]</sup>。典型实例如圣海伦斯山、智利南部以及巴拿马的 La Yeguada 和 El Valle 火山<sup>[23]</sup>。

(2) 年老的洋壳发生斜向俯冲。在 Aleutian 的 Adak 和 Komandorsky 岛, 俯冲板片年龄 > 40 Ma, 该地

区 adakite 被认为是板片因斜向俯冲而得到充分的加热,从而发生部分熔融形成的<sup>[19]</sup>。Yogodzinski 等又提出在 Adak 和 Komandorsky 岛,俯冲板片的前缘被撕裂,撕裂部位在进入软流圈地幔时形成热窗,从而使老的洋壳也得以充分加热而熔融<sup>[81]</sup>。

(3) 老的洋壳在俯冲开始阶段发生部分熔融<sup>[13,23,80]</sup>。例如,在菲律宾 Mindanao 的东部,俯冲板片年龄为始新世,但是仍然有 adakite 形成<sup>[13]</sup>。

(4) 已经消亡的俯冲板片(dead slab)的部分熔融。Peacock 等认为 Arid Hills Jaraquay 和 Baja California 的 adakite 是底侵的镁铁质下地壳或消亡板片部分熔融形成的<sup>[23]</sup>。

(5) 俯冲角度平缓(flat subduction)的洋壳部分熔融。Gutscher 等和 Defant and Kepezhinskas 提出,如果俯冲板片的角度较为平缓,近水平移动,则可以被充分加热,发生部分熔融,例如在秘鲁和厄瓜多尔<sup>[82,83]</sup>。在全球已知的 10 个俯冲角度平缓的地区,8 个伴有 adakite 的形成<sup>[82]</sup>。

(6) 底侵玄武岩的部分熔融。Drummond and Defant 提出,底侵玄武岩熔融将产生低铝 TTG,而不是高铝 TTG,因为变质玄武岩(基性麻粒岩)在下地壳熔融的残留相中富含钙质斜长石,会抑制熔浆中的 Sr 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量,并产生 Eu 负异常<sup>[41]</sup>。然而,许多学者认为,增厚陆壳下的底侵玄武岩部分熔融,也可以形成 adakite<sup>[23,36,43,80]</sup>。典型的例子有秘鲁的 Cordillera Blanca 杂岩<sup>[43]</sup>和埃塞俄比亚西部的 Birbir 杂岩<sup>[34]</sup>。Birbir 杂岩的源区为底侵的玄武质岩石,变质程度为石榴角闪岩相,其熔融条件为 0.8~1.2 GPa, 800~1 000 °C。增厚的地壳在伸展过程中,软流圈上涌产生的热足以使玄武质岩石发生部分熔融<sup>[84,85]</sup>。

(7) 拆沉作用(delamination)。拆沉作用指密度大的岩石圈沉没到密度较小的软流圈之中。现今的拆沉作用只限于盆岭、西藏及安第斯等少数地区<sup>[86]</sup>。在挤压增厚的地区(>50 km),下地壳玄武质岩石可以转变为榴辉岩相,发生拆沉作用,一些与拆沉作用有关的岩浆可能与年轻的、热的俯冲板片熔融产生的岩浆有相似的地球化学特征,如具有高的 Sr 含量和 Sr/Y、La/Yb 比值<sup>[77]</sup>。

#### 4 adakite 形成的温压条件——实验岩石学成果

迄今为止,已进行了许多关于玄武岩部分熔融的实验。实验表明 adakite 是玄武质岩石在水不饱条件下发生脱水熔融形成的;在水饱和条件下,则不能形成 adakite<sup>[69,87]</sup>。但是,对于 adakite 形成的温压条件,尚有不同的认识。

Rapp 等在 1 100 °C, 1.6~2.2 GPa 下,使低钾拉斑玄武岩在水不饱条件下发生 10%~20% 的脱水熔融,形成高铝 TTG,熔融残留相分别为斜长石+单斜辉石+角闪石(1.6 GPa)和石榴石+单斜辉石(2.2 GPa)<sup>[70]</sup>。Wolf and Wyllie 在 1.0 GPa, 750~975 °C 下,使角闪岩(成分相当于低 K 拉斑玄武岩)脱水熔融,产生了高铝的英云闪长岩岩浆,残留相中富含角闪石和石榴石<sup>[88,89]</sup>。上述实验表明,高铝 TTG 可以在较宽的压力范围内(1.0~2.2 GPa)通过蚀变 MORB 的脱水熔融形成。Rapp 等使玄武岩在 0.8~3.2 GPa 和水不饱条件下,发生 10%~40% 的熔融,形成英云闪长岩-奥长花岗岩<sup>[70,90]</sup>。0.8 GPa 时,残留相为角闪石+斜长石±单斜辉石±铁钛氧化物;1.6 GPa 和 2.2~3.2 GPa 时,熔融残留相分别为石榴石+角闪石±单斜辉石±斜长石±斜方辉石±铁钛氧化物和石榴石+单斜辉石±金红石。当石榴石出现时,熔浆的 REE 强烈分异[30 ≤(La/Yb)<sub>N</sub> ≤50], HREE 亏损。多数 adakite 的源区残留相中不存在斜长石,而斜长石的稳定性受制于水活度、压力及全岩成分,因而它对 adakite 源区的深度和水活度有重要的约束意义。根据 Green(1982)的实验,拉斑玄武岩在水不饱情况下(含 5% H<sub>2</sub>O),在 P>1.0 GPa, 800~1 000 °C 时,熔融残留相为石榴石+单斜辉石+角闪石<sup>[91]</sup>。但是,如果水活度很低或不含流体,斜长石的稳定范围可达 1.8 GPa 或更高<sup>[92]</sup>。因此,Peacock 等提出,低钾 MORB 熔融形成石榴石+单斜辉石+角闪石(不含斜长石)的残留相和 adakite 熔浆的压力区间很狭窄(1.8~2.2 GPa,相当于 60~70 km)<sup>[24]</sup>。Drummond and Defant 也认为,蚀变 MORB 部分熔融形成 adakite 的压力较高,为 2.3~2.6 GPa,相当于 75~85 km(温度为 700~775 °C)<sup>[41]</sup>。然而,有地质证据表明,具 adakite 地球化学特征的岩浆的确可以在 1.0 GPa 左右的压力下形成,其源区中斜长石未必完全消失。Sorensen 在加利福尼亚南部 Catalina 岛的中生代俯冲杂岩中

发现,拉斑玄武质的俯冲洋壳转变为石榴角闪岩和角闪榴辉岩,并且部分熔融形成高铝奥长花岗质的混合岩脉体,该俯冲洋壳的变质压力仅为 0.85~ 1.1 GPa, 变质温度为 640~ 750 °C<sup>[93]</sup>。Wolde and Team 对埃塞俄比亚新元古代 Birbir 岩浆弧中高铝 TTG 的研究表明,其形成温压为 0.8~ 1.2 GPa, 800~ 1 000 °C, 其原岩为新底侵的玄武质地壳,熔融残留为麻粒岩,残留相中存在斜长石<sup>[34]</sup>。实验也证明深部地壳的角闪岩经部分熔融可以形成含大量石榴石和少量斜长石的麻粒岩<sup>[79]</sup>。

综上所述,实验结果及地质证据表明 adakite 可以在较宽的压力范围内(1.0~ 2.6 Gpa)由低钾拉斑玄武岩脱水熔融形成,但是在大多数情况下形成的压力较高(1.8~ 2.6 Gpa),水活度及原岩的成分对其形成具有重要影响。熔融残留物主要为石榴角闪岩或榴辉岩,但也可能为麻粒岩。在少数情况下,源区斜长石可能并没有完全消失。

**致谢** 钟孙霖教授提供了许多文献资料,孙贤铄先生指出了原稿中一些错误,提出了许多宝贵建议,在此表示衷心感谢。

#### 参考文献:

- [1] Green T H and Ringwood A E. Genesis of the calcalkaline igneous rock suite[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1968, 18: 105~ 162.
- [2] Stern C R. Melting products of olivine tholeiite basalt in subduction zones[J]. *Geology*, 1974, 2: 227~ 230.
- [3] Gill J B. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*[M]. New York: Springer-Verlag, 1981.
- [4] Bickle M J. Heat loss from the Earth: constraint on Archean tectonics from the relationships between geothermal gradients and the rate of plate production[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978, 40: 301~ 315.
- [5] Wilson M. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1989.
- [6] Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95 (B13): 21 503~ 21 521.
- [7] Macdonald R, Hawkesworth C J, Heath E. The Lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism[J]. *Earth Sci. Rev.*, 2000, 49: 1~ 76.
- [8] Kay R W. Alutian magnesian andesites: melts from subduction Pacific ocean crust[J]. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 1978, 4: 117~ 132.
- [9] Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. 1997, Gisements épihermaux et porphyriques: la connection adakite[J]. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 325: 103~ 109.
- [10] Kay S M, Mpodozis C. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust [M]. *GSA Today*, 2001, March, 4~ 9.
- [11] Smith T E M, Taylor S R, Johnson R W. REE-fractionated trachytes and dacites from Papua New Guinea and their relationship to andesite petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, 69: 227~ 233.
- [12] Sajona F G, Maury R C, Bellon H, *et al.* Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines[J]. *Geology*, 1993, 21: 1 007~ 1 010.
- [13] Sajona F G, Bellon H, Maury R C, *et al.* Magmatic response to abrupt changes in geodynamic settings: Pliocene-Quaternary calc-alkaline and Nb-enriched lavas from Mindanao (Philippines)[J]. *Tectonophysics*, 1994, 237: 47~ 72.
- [14] Morris P A. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwest Japan[J]. *Geology*, 1995, 23: 395~ 398.
- [15] Kepezhinskas P K. Origin of the hornblende andesites of northern Kamchatka[J]. *Int. Geol. Rev.*, 1989, 31: 246~ 252.
- [16] Kepezhinskas P K, Defant M J, Drummond M S. Na metasomatism in the island arc mantle by slab melt-peridotite interaction: evidence from mantle xenoliths in the north Kamchatka arc[J]. *J. Petrol.*, 1995, 36: 1 505~ 1 527.
- [17] Mayers J D, Frost C D. A petrologic investigation of the Adak volcanic center, central Aleutian arc, Alaska[J]. *J. Vol.*

- canol. Geotherm. Res., 1994, 60: 109~ 146.
- [ 18 ] Yogodzinski G M, Volynets O N, Koloskov A V, *et al.* Magnesian andesites and the subduction component in a strongly calc\_alkaline series at Piip Volcano, far western Aleutians[J]. J. Petrol., 1994, 35: 163~ 204.
- [ 19 ] Yogodzinski G M, Kay R W, Bolynets O N, *et al.* Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1995, 107: 505~ 519.
- [ 20 ] Yogodzinski G M, Kelemen P B. Slab melting in the Aleutians: implications of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1998, 158: 53~ 65.
- [ 21 ] Defant M J, Drummond M S. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. Geology, 1993, 21: 547~ 550.
- [ 22 ] Halliday A N, Fallick A E, Dickin A P, *et al.* The isotopic and chemical evolution of Mount St. Helens[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1983, 63: 241~ 256.
- [ 23 ] Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1994, 121: 227~ 244.
- [ 24 ] Rogers G, Saunders A D, Terrell D J, *et al.* Geochemistry of Holocene volcanic rocks associated with ridge subduction in Baja California, Mexico[J]. Nature, 1985, 315: 389~ 392.
- [ 25 ] Cameron K L and Cameron M. Rare earth element,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  compositions of Cenozoic orogenic dacites from Baja California, northwestern Mexico, and adjacent west Texas: evidence for the predominance of a subcrustal component[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1985, 91: 1~ 11.
- [ 26 ] Saunders A D, Rogers G, Marriner G F, *et al.* Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Baja California, Mexico: implications for the petrogenesis of post-subduction magmas[J]. J. Vol. Geotherm. Res., 1987, 32: 223~ 245.
- [ 27 ] Defant M J, Clark L F, Stewart R H, *et al.* Andesite and dacite genesis via contrasting processes: the geology and geochemistry of El Valle Volcano, Panama[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1991, 106: 309~ 324.
- [ 28 ] Defant M J, Richerson P M, De Boer J Z, *et al.* Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada volcanic complex, Panama[J]. J. Petrol., 1991, 32: 1101~ 1142.
- [ 29 ] Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, *et al.* The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: and overview[J]. J. Geol. Soc. (London), 1992, 149: 596~ 579.
- [ 30 ] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids[J]. Lithos, 1999, 46: 411~ 429.
- [ 31 ] Kay S M, Ramos V A and Marques M. Evidence in Cerro Pampa Volcanic Rocks for Slab\_Melting Prior to Ridge\_Trench Collision in Southern South American[J]. J. Geol., 1993, 101: 703~ 714.
- [ 32 ] Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1996, 123: 263~ 281.
- [ 33 ] Stern C R, Futa K, Muehlenbachs K. Isotope and trace element data for orogenic andesites from the Austral Andes[A]. Harmon R S, Barreiro B A. Andean magmatism: chemical and isotopic constraints[C]. Cheshire: Shiva Publishing, 1984. 31~ 46.
- [ 34 ] Wolde B, Gore-Gambella Geotraverse Team. Tonalite-trondhjemite-granite genesis by partial melting of newly underplated basaltic crust: an example from the Neoproterozoic Birbir magmatic arc, western Ethiopia[J]. Precambrian Research, 1996, 76: 3~ 14.
- [ 35 ] Muir R J, Weaver S D, Bradshaw J D, *et al.* The Cretaceous Separation Point batholith, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere[J]. J. Geol. Soc. London, 1995, 152: 689~ 701.
- [ 36 ] Gromet L P, Silver L T. REE variations across the Peninsular Ranges Batholith: implications for batholithic petrogenesis and crustal growth in magmatic arcs[J]. J. Petrol., 1987, 28: 75~ 125.
- [ 37 ] 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.
- [ 38 ] 王 强, 许继锋, 王建新, 等. 北大别山 adakite 型灰色片麻岩的确定及其与超高压变质作用的关系[J]. 科学通报, 2000, 45(10): 1017~ 1024.
- [ 39 ] 王 强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪富钠石英闪长玢岩的证据[J]. 地球化

- 学, 2001(待刊).
- [40] Xu J F, Wang Q, Yu X Y. Geochemistry of high\_Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchzi block of the Mian - Lue ophiolitic melange in the Qingling Mountains, Central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust[J]. *Geochemical Journal*, 2000, 34: 359~ 377.
- [41] Defant M J and Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 662~ 665.
- [42] Martin H. The mechanisms of petrogenesis of the Archaean continental crust\_comparison with modern processes[J]. *Lithos*, 1993, 30: 373~ 388.
- [43] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium\_rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362: 144~ 146.
- [44] Pe-Piper G and Piper D J W. Miocene magnesian andesites and dacites, Evia, Greece: adakites associated with subducting slab detachment and extension[J]. *Lithos*, 1994, 31: 125~ 140.
- [45] 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.
- [46] Schiano P, Clocchiatti R, Shimizu N, *et al.* Hydrous, silica\_rich melts in the sub\_arc mantle and their relationship with erupted arc lavas[J]. *Nature*, 1995, 377: 595~ 600.
- [47] Tatsumi Y and Maruyama S. Boninites and high\_Mg andesites: tectonics and petrogenesis[A]. Crawford A J. *Boninites* [C]. 1989. 50~ 71.
- [48] Bedard J H, Lauziere K, Tremblay A, *et al.* Evidence for forearc seafloor\_spreading from the Betts Cove ophiolite, Newfoundland: oceanic crust of boninitic affinity[J]. *Tectonophysics*, 1998, 284: 233~ 245.
- [49] Bedard J H. Petrogenesis of Boninites from the Betts Cove ophiolite, Newfoundland, Canada: Identification of Subducted Source Components[J]. *J. Petrol.*, 1999, 40: 1853~ 1889.
- [50] Meijer A. The origin of low\_K rhyolites from the Mariana Frontal Arc[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1983, 83: 45~ 51.
- [51] Kuroda N, Shiraki K, and Urano H. Ferropigeonite quartz dacites from Chichi-jima, Bonin Islands: Latest differentiates from boninite-forming magma[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1988, 100: 129~ 138.
- [52] Cameron W E, McCulloch M T and Walker D A. Boninite petrogenesis: chemical and Nd- Sr isotopic constraints[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1983, 65: 75~ 89.
- [53] Hunter D R, Barker F, Millard H T. The geochemical nature of the Archean Ancient Gneiss Complex and granodioritic suite, Swaziland: a preliminary study[J]. *Precambrian Res.*, 1978, 7: 105~ 127.
- [54] Martin H, Chauvel C, Jahn B M. Major and trace element geochemistry and crustal evolution of Archean granodioritic rocks from eastern Finland[J]. *Precambrian Res.*, 1983, 21: 159~ 180.
- [55] Martin H. Petrogenesis of Archean trondhjemites, tonalites and granodiorites from eastern Finland: major and trace element geochemistry[J]. *J. Petrol.*, 1987, 28: 921~ 953.
- [56] Jahn B M, Glikson A Y, Peucat J J, *et al.* REE geochemistry and isotopic data of Archean silicic volcanics and granitoids from the Pilbara Block, western Australia: implications for the early crustal evolution[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1981, 45: 1633~ 1652.
- [57] Barker F, Arth J G. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemite-basalt suites[J]. *Geology*, 1976, 4: 596~ 600.
- [58] Barker F. Trondhjemites: definition, environment and hypotheses of origin[A]. Barker F. *Trondhjemite, Dacites and Related Rocks*[C]. Amsterdam: Elsevier, 1979, 1~ 12.
- [59] Tarney J, Weaver B L, Drury S A. Geochemistry of Archean trondhjemitic and tonalitic gneisses from Scotland and E. Greenland[A]. Barker F. *Trondhjemites, Dacites and Related Rocks*[C]. Amsterdam: Elsevier, 1979, 275~ 299.
- [60] Tarney J, Weaver B L, Winley B F. Geological and geochemical evolution of the Archean continental crust[J]. *Rev. Bras. Geoc.*, 1982, 12: 53~ 59.
- [61] Condie K C. *Archaean Greenstone Belts*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1981, 434.



- [62] Condie K C. Origin and early growth rate of continents[J]. *Precambrian Res.*, 1986, 32: 261~ 278.
- [63] 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.
- [64] Martin H. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction zone magmas[J]. *Geology*, 1986, 14: 753~ 756.
- [65] Johnson A D, Wyllie P J. Constraints on the origin of Archean trondjemites based on phase relationships of Nuk gneiss with H<sub>2</sub>O at 15 kbar[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1988, 100: 35~ 46.
- [66] Ellan R M, Hawkesworth C J. Is average continental crust generated at subduction zones[J]? *Geology*, 1988, 16: 314 ~ 317.
- [67] Arculus R J, Ruff L J. Genesis of continental crust: evidence from island arcs, granulites, and exospheric processes[A]. Vielzeuf D, Vidal Ph. *Granulites and Crustal Evolution*[C]. Kluwer Academic Publishers, 1990, 7~ 23.
- [68] Nedelec A, Nsifa E N, Martin H. Major and trace element geochemistry of the Archean Ntem plutonic complex (South Cameroon): petrogenesis and crustal evolution[J]. *Precambrian Res.*, 1990, 47: 35~ 50.
- [69] Winther T K, Newton R C. Experimental melting of an hydrous low\_K tholeiite: evidence on the origin of Archean cratons[J]. *Bull. Geol. Soc. Denmark*, 1991, 39.
- [70] Rapp R P, Watson E B and Miller C F. Partial melting of amphibolite/ eclogite and the origin of Archean trondjemites and tonalities[J]. *Precambrian Research*, 1991, 51: 1~ 25.
- [71] Smithies R H. The Archean tonalite- trondjemite- granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2000, 182: 115~ 125.
- [72] Saunders A D. The rare earth element characteristics of igneous rocks from the ocean basins[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*[C]. 1984. 205~ 236.
- [73] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979, 69: 33~ 47.
- [74] Tatsumi Y, Hamilton D L, Nesbit R W. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc lavas: evidence from high- pressure experiments and natural rocks[J]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1986, 29: 293~ 309.
- [75] Rollinson H R. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*[M]. Longman Singapore Publishers Ltd. 1993.
- [76] Arth J G and Hanson G N. Geochemistry and origin of the early Precambrian crust of northeastern Minnesota[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1975, 39: 325~ 362.
- [77] Kay R W and Kay S M. Delamination and delamination magmatism[J]. *Tectonophysics*, 1993, 219: 177~ 189.
- [78] Sorensen S S, Grossman J N. Enrichment in trace elements in garnet amphibolites from a paleo-subduction zone: Catalina schist, southern California[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, 53: 3 155~ 3 177.
- [79] Wyllie P J, Wolf M B. Amphibolite dehydration\_melting: sorting out the solidus[A]. Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, *et al.* *Magmatic Processes and Plate Tectonics*[C]. Geological Society Special Publication, 1993. 76: 405 ~ 416.
- [80] Peacock S M. Fluid Processes in Subduction Zones[J]. *Science*, 1990, 248: 329~ 337.
- [81] Yagodinski G M, Lees J M, Churikova T G, *et al.* Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges[J]. *Nature*, 2001, 409: 500~ 504.
- [82] Gutscher M A, Maury R, Eissen J P, *et al.* Can slab melting be caused by flat subduction[J]? *Geology*, 2000, 28: 535 ~ 538
- [83] Defent M J and Kepezhinskias P. Evidence suggests slab melting in arc magmas[J]. *EOS*, 2001, 82: 67~ 69.
- [84] England P C, Thompson A B. Some thermal and tectonic models for crustal melting in continental collision zones[A]. Coward M P, Reis A C. *Collision tectonics*[C]. *Geol Soc Spec Pub*, 1986, 19: 83~ 94.
- [85] Rushmer T. Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid\_absent conditions[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1991, 107: 41~ 59.

- [86] Dewey J F. Extensional collapse of orogens[J]. *Tectonics*, 1988, 7: 1 123~ 1 139.
- [87] Beard J S, Lofgren G E. Effect of water on the composition of partial melts of greenstone and amphibolite[J]. *Science*, 1989, 244: 195~ 197.
- [88] Wolf M B, Wyllie P J. The formation of tonalitic liquids during the vapor\_absent partial melting of amphibolite at 10 kbar[J]. *Transactions of the American Geophysical Union (EOS)*, 1989, 70: 506.
- [89] 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]. *Miner. Petrol.*, 1991, 44: 151~ 179.
- [90] 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.
- [91] Green T H. Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite[A]. Thorpe R S. *Andesites*[C]. London: Wiley, 1982, 465~ 487.
- [92] Rushmer T. Experimental high\_pressure granulites: some applications to mafic xenoliths and Archean terranes[J]. *Geology*, 1993, 21: 411~ 414.
- [93] Sorensen S S. Petrology of amphibolite\_facies mafic and ultramafic rocks from Catalina schist, southern California metamorphism and magmatism in a subduction zone metamorphic setting[J]. *J. Metamorph. Geol.*, 1988, 6: 405~ 435.
- [94] Wyman D A, Ayer J A, Devaney J R. Niobium\_enriched basalts from the Wabigoon subprovince, Canada: evidence for adakitic metasomatism above an Archean subduction zone[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2000, 179: 21~ 30.
- [95] Falloon T J. and Crawford A J. The petrogenesis of high\_calcium boninite lavas dredged from the northern Tonga ridge [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, 102: 375~ 394.
- [96] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. *Geol. Soc. Special Publications*, 1989, 313~ 345.
- [97] Sisson T W. Hornblende\_melt trace\_element partitioning measured by ion microprobe[J]. *Chem. Geol.*, 1994, 117: 331~ 344.

## Adakite: Geochemical Characteristics and Genesis

QIAN Qing

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

**Abstract:** Petrological and geochemical characteristics, distribution, tectonic settings and forming conditions of adakites are summarized in this paper on the basis of related papers published in the past 20 years. As high<sub>Al</sub> ( $Al_2O_3 > 15\%$ ) felsic rocks with high Sr content ( $400 \times 10^{-6} \sim 2\,000 \times 10^{-6}$ ) and low Y and Yb content ( $Y \leq 18 \times 10^{-6}$ ,  $Yb \leq 1.9 \times 10^{-6}$ ), high La/Yb, Sr/Y and low  $K_2O / Na_2O$  ( $< 0.5$ ) ratios, adakites are characterized by strongly fractionated REE and absence of Eu negative anomaly, resembling Archean high<sub>Al</sub> TTG. Cenozoic adakites are exclusively distributed in circum\_Pacific regions, while ancient adakites are also found in some orogenic belts. Most adakites were produced by partial melting of young ( $< 25$  Ma) and hot subducting oceanic crust, but some might have been produced by melting of underplated basalts, or delamination of lower continental crust. Generally, the melting residues are considered to be eclogites, garnet\_bearing amphibolites, or occasionally granulites. Petrological experiments and geological evidence indicate that adakitic rocks could be formed in a relatively wide pressure range (1.0~ 2.6 GPa).

**Key words:** adakite; geochemistry; distribution; tectonic setting; forming condition