

# 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

葛小月 李献华\* 陈志刚 李伍平

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640. \*联系人, E-mail: lixh@gig.ac.cn)

**摘要** 中国东部燕山期出露的中酸性高钾钙碱性火成岩具有高的 Sr/Y(27~166), La/Yb(14~66)比值和低的 Y(6~21  $\mu\text{g/g}$ )及 Yb(0.5~2.0  $\mu\text{g/g}$ )含量, 与 Defant 等人定义的 adakite 相关元素特征类似, 因此被一些学者称为“埃达克质岩石”; 但与环太平洋地区典型 adakite 相比, 其  $\text{K}_2\text{O}$  明显偏高而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mg}^\#$ 和  $\delta\text{Sr}_\text{N}$  值偏低(平均值分别为 3.5%, 16.0%, 38 和 1.23), 并表现出较平坦的球粒陨石标准化后的重稀土配分模式, Y/Yb 比值接近于球粒陨石值 10. 由此, 可以推测其熔融残留相应含角闪石、石榴石和斜长石, 不同于典型的 adakite, 而可能类似于太古代高铝 TTG, 形成的压力范围约 0.9~1.3 GPa, 相当于 30~45 km, 因此不支持中国东部燕山期有明显的大范围地壳加厚和“中国东部高原”的推论.

**关键词** 中国东部 燕山期 adakite 高 Sr 低 Y TTG

Defant 等人<sup>[1]</sup>所厘定出的一种新的富 Na 贫 K 的岛弧火山岩——adakite(埃达克)岩, 是由钙碱性安山岩、英安岩和钠质流纹岩及相应侵入岩组成. 与绝大多数源自地幔楔(经历过消减洋壳流体交代)的安山质火山岩<sup>[2]</sup>不同, 典型 adakite 是由俯冲洋壳本身发生部分熔融形成的. 在部分熔融过程中, 斜长石进入熔体, 石榴石和角闪石则残留在源区, 从而导致 adakite 具有富 Al 和 Sr, 贫 Y 和 HREE(重稀土), 且 La/Yb 和 Sr/Y 比值较高的特征<sup>[1,3]</sup>; 此外, adakitic 岩浆在上升过程中与地幔楔二辉橄辉岩的相互作用会导致其  $\text{Mg}^\#$  值明显增高<sup>[4,5]</sup>. 如 Aleutian 群岛 Adak 岛的 adakites 在  $\text{SiO}_2 \approx 59.7\%$  时, Sr 含量为 2366  $\mu\text{g/g}$ , La/Yb 和  $\text{Mg}^\#$  值分别为 48.9 和 72<sup>[6]</sup>. 典型 Adakite 主要分布于环太平洋的新生代岛弧中<sup>[3,7,8]</sup>. 一般只有年轻的(<25 Ma)、热流值较高的俯冲洋壳才能在完全脱水前达到含水拉斑玄武岩的固相线, 发生部分熔融产生 adakitic 岩浆<sup>[1,3]</sup>, 如 Cook 岛<sup>[9]</sup>和北美的 Mount St. Helens<sup>[3]</sup>等; 但一些厚的洋壳(如洋底高原)也可能因为发生低角度俯冲, 有较长的时间漂留在上地幔浅处被充分加热而部分熔融, 如秘鲁和厄瓜多尔等, 实际上, 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>[10]</sup>; 此外, 某些老洋壳(> 40 Ma)由于斜向俯冲或处于俯冲的开始阶段也可能因充分加热而发生部分熔融, 如 Aleutian 的 Adak 和 Komandorsky 岛<sup>[6,7,11]</sup>以及菲律宾 Mindanao<sup>[12]</sup>等.

Defant 等人<sup>[1,3]</sup>所定义的 Adakite 并不是一种具体的岩石, 而是具有独特地球化学特征和成因意义的一组岩石, 高的 Sr/Y(> 20~40), La/Yb(> 20)比值和低的 Y( $\leq 18 \mu\text{g/g}$ )及 HREE(Yb $\leq 1.9 \mu\text{g/g}$ )含量是其最重要的鉴别特征, 但目前的研究表明, 具有这些地球化学特征的岩石并不一定都是消减洋壳部分熔融成因的<sup>[5,13~15]</sup>. 例如, 太古代高铝英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)富 Sr 贫 Y 且轻重稀土明显分异, 类似于典型 adakite, 但前者既可源自消减洋壳的部分熔融<sup>[4,16]</sup>, 也可源自下地壳底部基性岩的部分熔融<sup>[5]</sup>, 只是一些太古代高铝 TTG 在熔融过程中有斜长石残留, 且岩浆演化过程中没有(或较少)受到地幔物质的影响, 因此, 相对于典型 adakite 具有较低的  $\delta\text{Sr}_\text{N}$  和  $\text{Mg}^\#$  值<sup>[4,5]</sup>. 此外, 一些显生宙的中酸性岩石也具有高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 类似于典型 adakite, 但有地质证据表明它们可能源于下地壳或底侵玄武质物质的部分熔融, 如秘鲁 Cordillera Blanca 岩基<sup>[13]</sup>和新西兰 Separation Point 岩基<sup>[14]</sup>等. Castillo 等人<sup>[15]</sup>通过对菲律宾岛弧区的研究, 提出结晶分异-同化混染(AFC)作用也会导致某些地幔来源岩浆具有高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值. 实际上, 如果我们仅仅通过高的 Sr/Y, La/Yb 比值和低的 Y 及 Yb 含量等地球化学参数来定义一种广义的 adakite, 那么某些地幔来源的钾玄岩、高 Ba-Sr 花岗岩<sup>[17,18]</sup>和一些其他类型的岩石都有可能被称为 adakite. 如果 adakite

被这样广泛地使用, 则除了指示石榴石和角闪石残留在源区外, 不再具有其他明确的成因意义。

中国东部燕山期出露的部分中酸性高钾钙碱性火成岩具有较明显的轻重稀土分异, 较高的 Sr/Y, (La/Yb)<sub>N</sub> 比值和较低的 Y 及 HREE 含量, 类似于 Defant 等人<sup>[1]</sup>所定义的 adakite 的地球化学特征, 因而被一些学者称为“埃达克质岩石”<sup>[19~22]</sup>, 并依据典型 adakite 的源区残留相为榴辉岩或角闪榴辉岩, 形成压力较高, 推测当时的中国东部地壳发生了明显增厚, 甚至可能存在一个“东部高原”<sup>[19,20]</sup>。本文将对比中国东部这类高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩和环太平洋地区典型 adakite 的地球化学特征及其成因机制, 并在此基础上, 对燕山期中国东部的地壳厚度和“东部高原”等问题进行初步探讨。

### 1 中国东部高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩和典型 adakite 的地球化学特征对比

本文搜集了中国东部燕山期已报道的高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩, 包括辽宁北票、彰武和阜新火山岩<sup>[23,24]</sup>, 北京髻髻山组<sup>[25]</sup>, 燕辽地区部分花岗岩类<sup>[20,26]</sup>, 南大别花岗岩<sup>[27]</sup>和长江中下游地区中酸性侵入岩(如安徽沙溪、铜陵等)<sup>[21,28]</sup>等, 并将其和环太平洋地区典型 adakite 进行对比, 发现两者的地球化学特征存在以下差异。

(i) K<sub>2</sub>O 含量。典型 adakite 为 Na 质火成岩, 富 Na<sub>2</sub>O(3.5%~7.5%) 贫 K<sub>2</sub>O(0.57%~3.2%), K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 平均比值仅为 0.42<sup>[4]</sup>, 而中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩的 Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 含量分别在 3.1%~5.2% 和 1.4%~4.5% 之间, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 平均比值约为 0.76, 少数甚至大于 1。在 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解上(图 1(a)), 典型 adakite 落入拉斑-钙碱性系列岩石区, 而中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩则主要落于高钾钙碱性系列岩石区, 少数落入钾玄岩及钙碱性系列岩石区。所以, 相对于环太平洋地区典型 adakite, 中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩明显富 K, 属于高钾钙碱性系列。

(ii) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量。中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩和典型 adakite 都表现出 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 随 SiO<sub>2</sub> 增加而降低的趋势(图 1(b)), 表明岩浆演化过程中有长石的分异结晶。总体上, 中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

平均含量为 16.0%, 明显低于典型 adakite(17.1%) 而类似于太古代高铝 TTG(平均含量为 15.7%<sup>[30]</sup>), 当

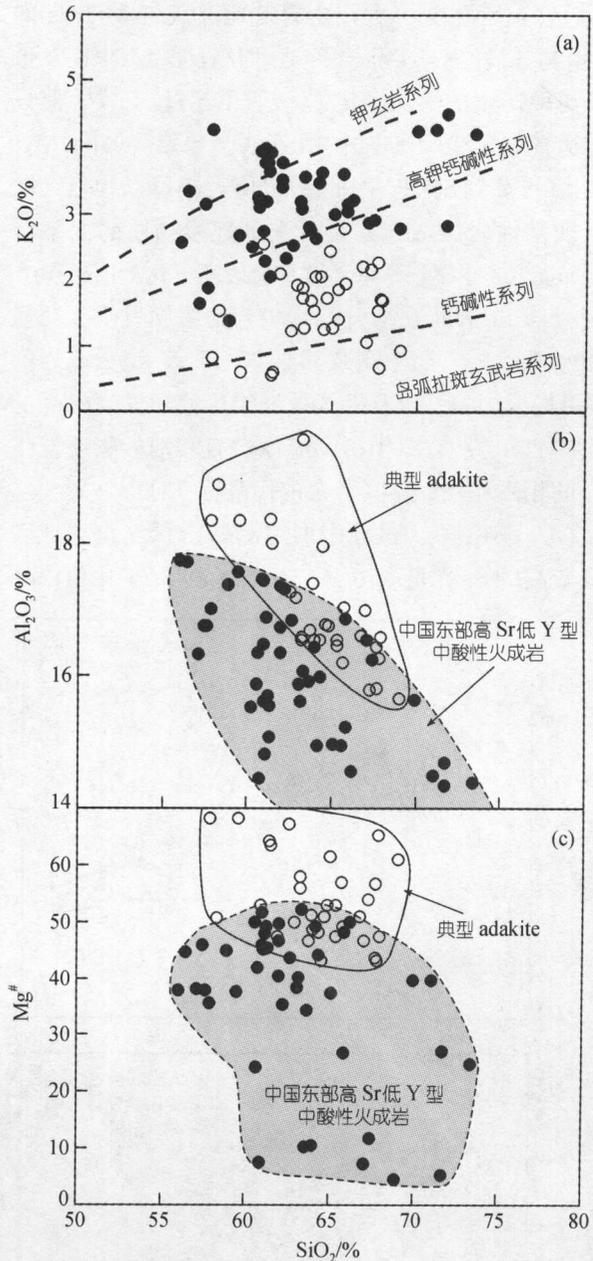


图 1 中国东部高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩和典型 adakite 的主要元素对比图解

(a) K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 图解; (c) Mg<sup>#</sup>-SiO<sub>2</sub> 图解。○: 典型 adakite, 包括 adakite 平均值<sup>[4,29,30]</sup>, 墨西哥 Vizcaino 半岛<sup>[31]</sup>, 菲律宾<sup>[32]</sup>, 日本西南部<sup>[8]</sup>, Cook 岛<sup>[9]</sup>, Cerro Pampa<sup>[33]</sup>, Austral Volcanic Zone<sup>[9]</sup>; ●: 中国东部高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩, 包括辽宁北票, 彰武<sup>[24]</sup>和阜新<sup>[23]</sup>, 北京西山<sup>[25]</sup>, 南大别<sup>[27]</sup>, 长江中下游<sup>[21,28]</sup>, 冀北大海沱<sup>[26]</sup>, 北京八达岭<sup>[20]</sup>, 江西德兴和鄂东南<sup>a)</sup>。Mg<sup>#</sup> = 100 × Mg<sup>2+</sup> / (Mg<sup>2+</sup> + Fe<sup>2+</sup>)

1) 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 扬子地块东部燕山期埃达克质岩石地球化学特征及形成动力学机制与成矿

SiO<sub>2</sub> 较低时, 中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩与典型 adakite 两者之间的差别更为显著(图 1(b)).

(iii) Mg<sup>#</sup>指数. 大洋中脊拉斑玄武岩(MORB)的 Mg<sup>#</sup>值为 60 左右, 实验岩石学研究表明, MORB 发生部分熔融产生的熔体 Mg<sup>#</sup>值一般不超过 45<sup>[34]</sup>, 但只要与橄榄岩发生 10% 的混染就会导致熔体的 Mg<sup>#</sup>值从 44 提高到 55<sup>[35]</sup>, 因此, Mg<sup>#</sup>值大小可以相当灵敏地反映基性岩熔融产物是否受到地幔物质的混染<sup>[5]</sup>. 典型 adakite 的 Mg<sup>#</sup>平均值为 51, 最高可达 68(图 1(c)), 表明 adakitic 岩浆在上升过程中与地幔楔发生了明显的相互作用<sup>[4,5]</sup>; 而中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩的 Mg<sup>#</sup>平均值为 38, 只有极少数辽宁彰武粗安岩样品的 Mg<sup>#</sup>值在 50 左右(图 1(c)), 应该没有和地幔物质发生明显的相互作用, 类似于太古代高铝 TTG<sup>[5]</sup>.

(iv) δSr<sub>N</sub>值. 虽然中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩具有较高的 Sr 含量(376~1535 μg/g)和 Sr/Y 比值(27~

166), 类似于典型 adakite(分别为 348~2003 μg/g 和 32~443), 但由于其轻稀土(LREE)也较富集, 因此在微量元素蛛网图上(图 2)表现出较弱的 Sr 正异常, 少数甚至出现 Sr 负异常, 类似于太古代高铝 TTG<sup>[4]</sup>, 而典型 adakite 则表现出明显的 Sr 正异常. δSr<sub>N</sub>-Sr 和 δSr<sub>N</sub>-SiO<sub>2</sub>图解(图 3)清楚表明, 虽然中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩的 δSr<sub>N</sub>值随着 Sr 含量降低(或 SiO<sub>2</sub> 含量增高)呈现平缓的降低趋势, 反映了岩浆演化过程中斜长石的结晶分异作用, 但显然该作用不是导致其 δSr<sub>N</sub>值(<2.0)小于典型 adakite(>2.0)的主要原因.

(v) HREE 含量. 相对于典型 adakite, 大部分中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩具有较平坦的 HREE 配分模式(图 4), Y/Yb 比值接近于球粒陨石值 10(Y 在岩

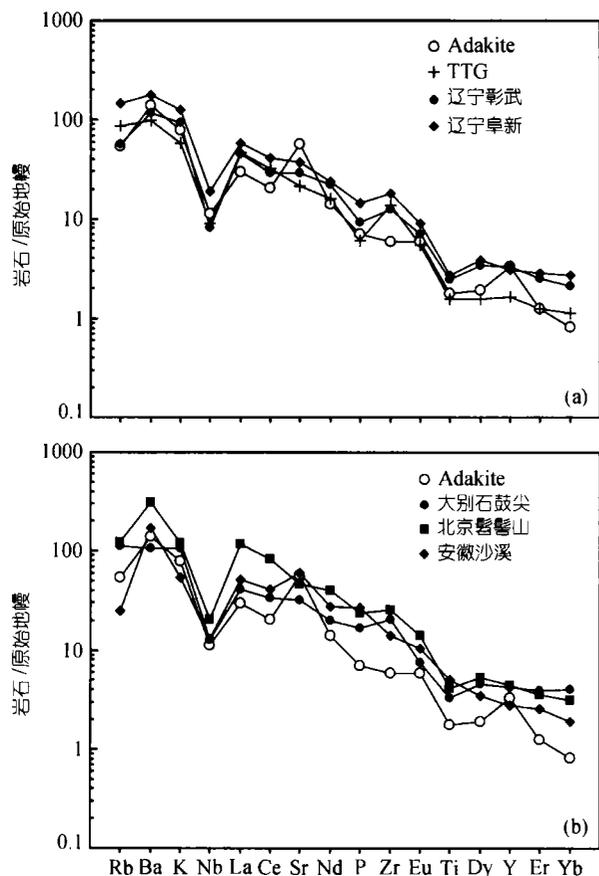


图 2 微量元素蛛网图

adakite 和太古代高铝 TTG 分别引自文献[36, 37], 中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩引自文献[21, 23~25, 27], 原始地幔标准值引自文献[38]

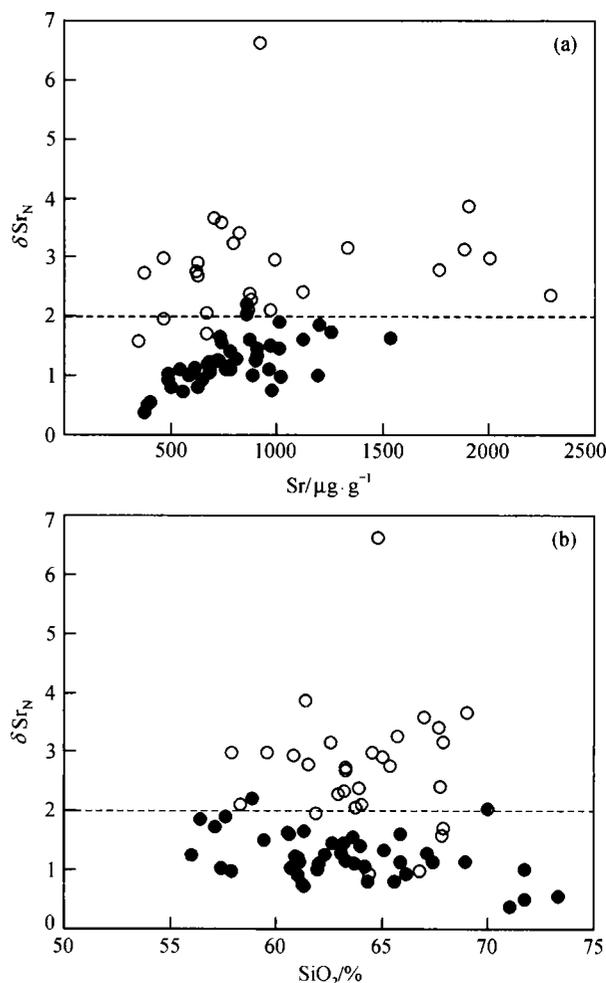


图 3 δSr<sub>N</sub>-Sr 和 δSr<sub>N</sub>-SiO<sub>2</sub> 图解

$\delta Sr_N = 2Sr_N / (Ce_N + Nd_N)$ , N 表示原始地幔归一化值<sup>[38]</sup>, 资料来源和图例同图 1

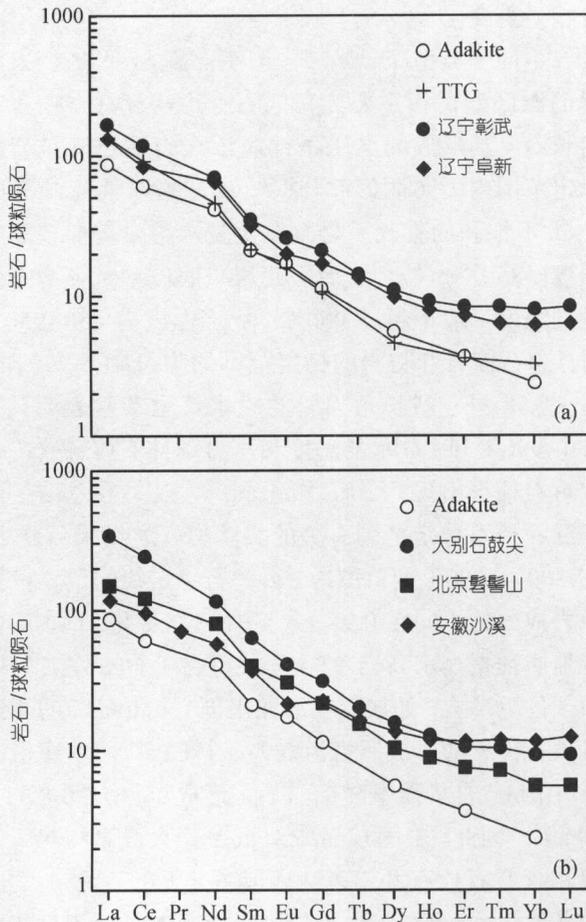


图 4 稀土元素球粒陨石标准化图解  
资料来源同图 2, 球粒陨石标准值引自文献[38]

浆结晶化学中的行为类似于 HREE 中的 Ho); 另外, 它们的 HREE 亏损程度也较弱, 在  $(La/Yb)_N - Yb_N$  图解上(图 5)<sup>[16]</sup>主要落于 adakite 或太古代高铝 TTG 和低铝 TTG 的过渡区, 位于残留组分为斜长角闪岩和 10%石榴石角闪岩的熔融曲线之间, 而典型 adakite 则落于残留组分为 10%石榴石角闪岩和榴辉岩的熔融曲线之间. 但也有少数例外, 如一些北大别燕山期花岗岩具有强烈的重稀土亏损, Y/Yb 比值可达 14~18<sup>[39]</sup>.

## 2 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的成因探讨

依据中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩的地质产状、共生组合和地球化学特征, 以及目前对燕山期中国东部构造格局的认识, 大多数学者<sup>[20~23, 25]</sup>都认为这类高 Sr 低 Y 型火成岩的形成与古太平洋板块的俯冲没有直接联系, 一般而言也很难通过玄武质岩浆分离结晶作用或岩浆混合作用形成, 而很可能源自下地壳玄武质物质的部分熔融. 这与其  $SiO_2$  含量均大于 56%,  $Mg^\#$  值一般小于 50, 不与基性岩共生或呈演化关系, 同一地区往往具有较为均一的、且与下地壳类似的 Sr 和 Nd 同位素组成(如北京髻髻山组 6 个火山岩样品的  $\epsilon_{Nd}(t)$  和  $I_{Sr}$  的范围分别为 -15.7~-15.0 及 0.70575~0.70607<sup>[40]</sup>)等特征是一致的. 当然, 目前并没有足够的证据可以否认某些地区的高 Sr 低 Y 型火成岩的源岩也可能由下地壳

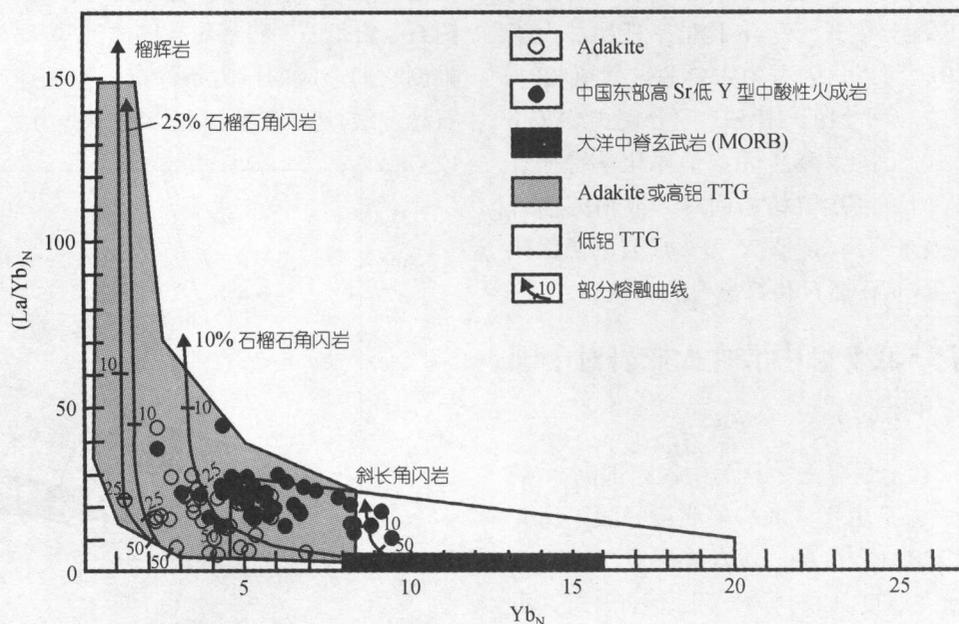


图 5 球粒陨石标准化的  $(La/Yb)_N - Yb_N$  图解<sup>[16]</sup>  
资料来源同图 1

基性岩和一些其他类型的岩石(如中酸性岩石或变质沉积岩等)混合组成,甚至对于个别 $\epsilon_{Nd}(t)$ 明显偏高风险地区,也不否认可能有地幔物质的加入。

实验岩石学研究表明,源岩的K含量明显影响派生熔体的K含量,低钾拉斑玄武岩的部分熔融不可能产生高钾钙碱性岩浆<sup>[41]</sup>。中国东部燕山期高Sr低Y型火成岩具有较高的 $K_2O$ 含量(平均值为3.15%),最偏基性组分的 $SiO_2$ 含量为56.02%,结合它们富Sr和LREE的特征以及Sr-Nd同位素示踪分析,可以推测其源岩很可能来自于富集的岩石圈地幔的熔融,但也不排除其他可能性,如亏损地幔与古老地壳的混合等。

中国东部高Sr低Y型火成岩和典型adakite之间的化学特征差异,还反映了两源区残留相矿物组合的差异。斜长石是硅酸岩中主要的富Al矿物, Sr在其中的分配系数远高于其他矿物,对于源岩成分类似且未经过明显分异作用的岩浆可以通过这些元素的富集和亏损来判断斜长石是否进入熔体。中国东部高Sr低Y型火成岩的 $Al_2O_3$ 和 $\delta Sr_N$ 均明显低于典型adakite,而斜长石的结晶分异作用并不是导致这种差异的主要原因,所以在岩浆形成过程中很可能有斜长石滞留于残留相中,类似于太古代TTG<sup>[4]</sup>。另外,由于HREE中Yb和Lu在石榴石中的分配系数最大,而Dy和Ho在角闪石中的分配系数最大<sup>[42]</sup>,所以当石榴石为主要源区残留相时,形成的熔体具有倾斜的HREE配分模式,Y/Yb比值一般明显大于10(有的接近20);而当角闪石为主要源区残留相时,形成的熔体具有较为平坦的HREE配分模式,Y/Yb比值也接近于10。因此,稀土元素地球化学特征表明典型adakite的源区残留相为榴辉岩或角闪榴辉岩<sup>[1,3-4,16]</sup>,而中国东部高Sr低Y型火成岩的源区残留相则为含角闪石、石榴石和斜长石的麻粒岩。

### 3 燕山期高Sr低Y型中酸性火成岩对中国东部地壳厚度的制约

张旗等人<sup>[20]</sup>和王强等人<sup>[21]</sup>认为中国东部高Sr/低Y型中酸性火成岩是由玄武质岩浆底侵导致下地壳基性岩发生部分熔融产生的,其岩浆形成深度对燕山期中国东部地壳厚度具有制约作用。因此,对这类高Sr低Y型火成岩形成的可能压力范围的讨论就

得相当重要了。

不同于典型adakite,中国东部高Sr低Y型火成岩的源区残留相主要为角闪石,并且含有石榴石和斜长石,其形成的温压条件应该在石榴石麻粒岩的稳定范围内(图6阴影部分)<sup>[30]</sup>。实验岩石学资料表明, $H_2O$ 不饱和的玄武质岩石发生脱水熔融需要较高的温度( $>850^\circ C$ )<sup>[30,43,44]</sup>,而玄武岩浆底侵导致下地壳熔融的温度一般不超过 $950^\circ C$ <sup>[45]</sup>。当温度为 $850\sim 950^\circ C$ 时,含石榴石麻粒岩的稳定范围约为 $1\sim 1.5$  GPa(图6)<sup>[30]</sup>;另外,斜长角闪岩的脱水熔融实验表明,在 $850\sim 990^\circ C$ 和1 GPa的温度和压力条件下熔融残留相中有石榴石出现<sup>[46]</sup>,而Vielzeuf等人<sup>[47]</sup>在总结了許多和石榴石稳定范围有关的实验岩石学结果后认为,在 $800\sim 1000^\circ C$ 的范围内,石榴石稳定线的位置依据源岩成分的不同在 $0.9\sim 1.4$  GPa之间变化。同时,也有地质证据显示高铝TTG岩浆可在1 GPa左右的压力条件下形成,如加利福尼亚南部Catalina岛的高铝奥长花岗岩的形成压力为 $0.9\sim 1.1$  GPa<sup>[48]</sup>,埃塞俄比亚Birbir岩浆弧中高铝TTG形成压力为 $0.8\sim 1.2$  GPa<sup>[49]</sup>。因此,中国东部高Sr低Y型火成岩的源区残留相含有石榴石并不意味着其一定形成于较高的压力条件( $>1.2\sim 1.5$  GPa)<sup>[19-21,23]</sup>。实际上,由于这些岩石的源区残留相中角闪石、斜长石和石榴石三者共存,依据 $H_2O$ 不饱和时基性系列变质岩相转变关系:角闪石+斜长石=石榴石+熔体( $\pm$ 单斜辉石)<sup>[45]</sup>,可以推测它们形成的压力条件接近于上述反应线(即石榴石稳定线)是导致残留相以角闪石为主而石榴石较少

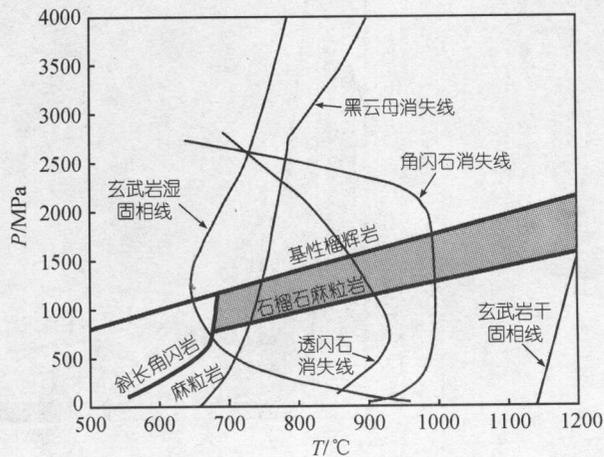


图6 基性系列变质岩相转变的P-T条件<sup>[30]</sup>

的重要原因, 并可以认为中国东部高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的形成压力范围应更接近石榴石麻粒岩的下限, 大约为 0.9~1.3 GPa(温度为 800~1000℃), 相当于 30~45 km, 而不能依据它们的出现推论燕山期中国东部普遍地存在明显的地壳增厚, 甚至因而推论“中国东部高原”的形成。

#### 4 小结

虽然中国东部高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的 Sr/Y 和 (La/Yb)<sub>N</sub> 比值以及 Y, HREE 含量基本符合 Defant 等人<sup>[1]</sup>所定义的 adakite 的相关元素比值和元素含量范围, 但与环太平洋地区典型 adakite 相比, 后者具有更为显著的高  $\delta Sr_N$  和低 Y 及 HREE 特征。此外, 两者主量元素也具有明显差异, 中国东部高 Sr 低 Y 型火成岩具有较高的 K<sub>2</sub>O 含量和较低的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量和 Mg<sup>#</sup> 值。因此, 将中国东部燕山期这类与俯冲作用没有直接联系的中酸性高钾钙碱性岩石命名为“埃达克质岩石”有待进一步的斟酌。实际上, 世界上其他国家也有一些产出于板内或造山带环境的中酸性岩石具有和 adakite 类似的地球化学特征, 如北美白垩纪 Idaho 岩基<sup>[50]</sup>和澳大利亚中部 Arunta Inlier 花岗岩<sup>[51,52]</sup>等, 富 Sr 和贫 Y 且轻重稀土明显分异, 但并不被称为埃达克岩或埃达克质岩石。

**致谢** 孙贤铄先生、钟孙霖教授、吴福元教授、陈斌教授、葛文春副教授、许继峰副研究员、王强副研究员、钱青博士、李武显博士和邓希光博士对本文初稿提出了许多宝贵的修改意见, 谨此致谢。本工作受中国科学院知识创新项目(KZCX2-102)和国家自然科学基金杰出青年基金(批准号: 49725309)资助。

#### 参 考 文 献

- Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, 347: 662~665
- Gill J B. *Orogenic Andesite and Plate Tectonics*. New York: Springer-Verlag, 1981. 1~390
- Defant M J, Drummond M S. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 1993, 21: 547~550
- Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, 46: 411~429
- Smithies R H. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 182: 115~125
- Kay R W. Aleutian magnesium andesites: Melts from subducted Pacific oceanic crust. *J Volcanol Geotherm Res*, 1978, 4: 117~132
- Mayers J D, Frost C D. A petrologic investigation of the Adak volcanic center, central Aleutian arc, Alaska. *J Volcanol Geotherm Res*, 1994, 60: 109~146
- Morris P A. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwest Japan. *Geology*, 1995, 23: 395~398
- 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. *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 123: 263~281
- Gutscher M A, Maury R, Eissen J P, et al. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 2000, 28: 535~538
- 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. *Geol Soc Am Bull*, 1995, 107: 505~519
- 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). *Tectonophysics*, 1994, 237: 47~72
- Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca batholith, Peru. *J Petrol*, 1996, 56: 1491~1521
- 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 Geol Soc (London)*, 1995, 152: 689~701
- Castillo P R, Janney P E, Solidum R U. 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*, 1999, 134: 33~51
- 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
- Tarney J, Jones C E. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models. *J Geol Soc (London)*, 1994, 151: 855~868
- Fowler M B, Henney P J, Darbyshire D P F, et al. Petrogenesis of high Ba-Sr granites: The Rogart pluton, Sutherland. *J Geol Soc (London)*, 2001, 158: 521~534
- 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的“中国东部高原”: 埃达克岩的启示. *地质科学*, 2001, 36(2): 248~255
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236~244
- 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安

- 22 王强, 许继峰, 赵振华. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 201~208
- 23 李伍平, 李献华, 路凤香. 辽西中侏罗世高 Sr/低 Y 型火山岩的成因及其地质意义. *岩石学报*, 2001, 17(4): 523~532
- 24 陈义贤, 陈文寄, 等. 辽西及邻区中生代火山岩——年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1997. 1~279
- 25 李伍平, 路凤香, 李献华. 北京西山髻髻山组粗安岩的成因及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3): 247~254
- 26 许保良, 阎国翰, 徐振邦. 冀北燕山期三个系列花岗质岩石的地球化学特征及其成因学意义. *岩石学报*, 1999, 15(2): 208~216
- 27 马昌前, 杨坤光, 许长海. 大别山中生代钾质岩浆作用与超高压变质地体的剥露机理. *岩石学报*, 1999, 15(3): 379~395
- 28 唐永成, 邢凤鸣, 吴言昌, 等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1998. 1~349
- 29 Defant M J, Richerson M, De Boer J Z, et al. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: Petrogenesis of La Yeguada volcanic complex, Panama. *J Petrol*, 1991, 32: 1101~1142
- 30 Drummond M S, Defant M J, Kepezhinskas P K. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Trans R Soc Edinb Earth Sci*, 1996, 87: 205~215
- 31 Aguillon-Robles A, Caimus T, Benoit M, et al. Late Miocene adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California? *Geological Society of America*, 2001, 29: 531~534
- 32 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. *Geology*, 1993, 21: 1007~1010
- 33 Kay S M, Ramos V A, Marques M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *J Geol*, 1993, 101: 703~714
- 34 Rapp P R. Heterogeneous source regions for Archean granitoids. In: de Wit M J, Ashwal L D, eds. *Greenstone Belts*. Oxford: Oxford University Press, 1997
- 35 Rapp P R, Shimizu N, Norman M D. Applegate, reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chem Geol*, 1999, 160: 335~356
- 36 Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, et al. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: An overview. *J Geol Soc London*, 1992, 149: 569~579
- 37 Martin H. The Archean grey gneisses and the genesis of the continental crust. In: Condie K C, ed. *The Archean Crustal Evolution*. Amsterdam: Elsevier, 1995. 205~259
- 38 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol Soc Spec Pub*, 1989, 42: 313~345
- 39 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 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. *岩石学报*, 2001, 17(4): 551~564
- 40 李伍平, 路凤香, 李献华, 等. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(2): 123~133
- 41 Roberts M P, Clemene J D. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 1993, 21: 825~828
- 42 Sisson T W. Hornblende-melt trace-element partitioning measured by ion microprobe. *Chem Geol*, 1994, 117: 331~344
- 43 Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: Implications for the origin of adakites. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 117: 394~409
- 44 Beard J S, Lofgren G E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6, 9 kb. *J Petrol*, 1991, 32: 365~401
- 45 Huppert H E, Sparks R S. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *J Petrol*, 1988, 29: 599~624
- 46 Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: Effects of temperature and time. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 115: 369~383
- 47 Vielzeuf D, Schmidt M W. Melting relations in hydrous systems revisited: Application to metapelites, metagreywackes and metabasalts. *Contrib Mineral Petrol*, 2001, 141: 251~267
- 48 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 Metamorph Geol*, 1988, 6: 405~435
- 49 Wolde B. Tonalite-trondhjemite-granite genesis by partial melting of newly underplated basaltic crust: An example from the Neoproterozoic Birbir magmatic arc, western Ethiopia. *Precambrian Res*, 1996, 76: 3~14
- 50 Norman M D, Leeman W P, Mertzman S A. Granites and rhyolites from the northwestern U. S. A.: Temporal variation in magmatic processes and relations to tectonic setting. *Trans R Soc Edinb Earth Sci*, 1992, 83: 71~81
- 51 Sun S S, Warren R G, Shaw R D. Nd isotope study of granites from the Arunta Inlier, central Australia: Constraints on geological models and limitation of the method. *Precambrian Res*, 1995, 71: 301~314
- 52 Zhao J X, McCulloch M T. Geochemical and Nd isotopic systematics of granites from the Arunta Inlier, central Australia: Implications for Proterozoic crustal evolution. In: Collins W J, Shaw R D, eds. *Time Limits on Tectonic Events and Crustal Evolution Using Geochronology: Some Australian Examples*. *Precambrian Res*, 1995, 71: 265~299

(2001-09-28 收稿, 2001-12-27 收修改稿)