

埃达克岩的多样性

张 旗¹, 许继峰², 王 焰³, 肖 龙⁴, 刘红涛¹, 王元龙¹

(1.中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029; 2.中国科学院广州地球化学研究所,广东 广州 510640; 3.香港大学地球科学系,香港; 4.中国地质大学,湖北 武汉 430074)

摘要 埃达克岩具有多样性,大体可分为下列几种:①典型的埃达克岩(adakite),源于贫K的拉斑玄武岩,大多是由俯冲板片熔融形成的;②高镁埃达克岩(high Mg adakite, HMA),以富Mg[#]和Cr、Ni为特征;③TTG岩套,不同于典型的adakite,太古宙的TTG更富Si和贫Mg;④高钾钙碱性埃达克岩(high-K calc-alkaline adakite, HKCAA),以富K和贫Mg、Cr、Ni为特征;⑤高钾和镁的埃达克岩(high K and Mg adakite, HKMA);⑥钾质埃达克岩(Super K adakite, SKA)。研究表明,只要达到形成埃达克岩所需要的高压条件,有足够的热源使源区物质发生部分熔融,所形成的熔体即具有埃达克岩的特征。而埃达克岩的多样性则是由于构造环境的差异(消减带或下地壳)、源岩性质的差异(基性岩或酸性岩)、压力的差异(地壳厚度的大小)以及围岩的差异(与地幔或地壳发生混合作用)造成的。

关键词 埃达克岩;多样性;高镁埃达克岩;TTG;高钾钙碱性埃达克岩;高镁和钾的埃达克岩;钾质埃达克岩

中图分类号 P588.14 **文献标识码** A **文章编号** :1671-255X(2004)09~10-0959-07

自埃达克岩的术语^[1]问世以来,在全球已经发现了许多具有埃达克岩特征的不同时代岩石,最新的如1990年喷发的菲律宾皮纳图博火山,最老的为太古代的TTG。研究表明,许多埃达克岩具有不同的特征,来自不同的源岩,产于不同的环境,具有不同的成因,显示出多样性。探讨埃达克岩的多样性,了解其形成的构造背景及成因,是人们感兴趣的问题。

1 埃达克岩的多样性

据作者的初步认识,埃达克岩大体可分为下列几种。

(1)典型的埃达克岩(adakite)

例如阿留申群岛的埃达克岩,是由俯冲的板片熔融形成的。与岛弧正常的钙碱性岩相比,这类埃达克岩具高铝($Al_2O_3 > 15\%$)、高钠($> 3.5\%$, $K_2O/Na_2O < 0.5$)、高锶($Sr > 400 \times 10^{-6}$)、贫重稀土元素和Y($Yb < 1.9 \times 10^{-6}$, $Y < 18 \times 10^{-6}$)、无明显的负铈异常^[1-3]的特点(表1)。上述地球化学特征表明它们可能来源于消减板片MORB的部分熔融^[1-3]。通常解释为年轻的(< 25 Ma)热洋壳消减至70~90 km的深度时发生部分熔融形成的,留下的残留物为含石榴子石角闪岩或榴辉岩^[1-6]。然而,在环太平洋地区目前已发现的埃达克岩中,除了Cook岛、Cerra Pampa、美国的St. Helens山和巴拿马的El Valle等少数

实例外,绝大多数埃达克岩处于老(冷)的(10~50 Ma)消减带之上^[5-8]。于是相继提出了“冷板片缓消减地幔加热熔融”模型^[9]、“撕裂板块边缘熔融”模型^[10,11]等。

实际上,典型的埃达克岩并非仅限于板块俯冲带环境,野外考察和实验研究表明,只要原岩是贫K的拉斑玄武岩,在足够大的压力条件下,即可产生具有上述地球化学特征的岩石,详见后述。

(2)高镁埃达克岩(HMA)

与正常的岛弧安山岩和埃达克岩相比,高镁埃达克岩以富Mg[#]($Mg/(Mg+Fe) > 0.5$)和Cr、Ni为特征^[12,13]。高镁埃达克岩有2种成因:①高温富水条件下亏损地幔岩的部分熔融^[14-17];②板片熔融的(埃达克质)熔体与上覆地幔楔发生交换作用^[18-21]。前者类似玻安岩(boninite)或赞岐岩(sanukite)的特征,MgO含量较高(赞岐岩MgO含量为5%~12%^[22]);玻安岩MgO含量更高,达9%~25%^[14],而后者更接近埃达克岩的地球化学特征。虽然前者在总的地球化学特征上也类似埃达克岩,如富集LILE(Sr、Ba、Th、P等),亏损HREE(La/Yb、Sr/Rb和Sr/Y比值较高,但不同的是,埃达克岩通常是低Mg的($MgO < 3\%$,通常不大于6%),而高镁安山岩富MgO,通常具有原始岩浆的性质。

收稿日期 2004-05-25;修订日期 2004-06-22

基金项目:国家“973”项目(2002CB412601)(1999CB403206-05)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-122)中国科学院知识创新工程基金(KZCX 1-07)资助。

作者简介:张旗(1937-),男,研究员,从事岩石学和地球化学研究。E-mail: zhangqi1218@vip.sina.com

表1 不同埃达克岩的对比

Table 1 Comparison between different types of adakite

类	名称	简称	主要地球化学特征	原岩	成因	产出环境
1	典型的埃达克岩	Adakite	SiO ₂ >56%、Al ₂ O ₃ >15%、MgO<3%、K ₂ O/Na ₂ O<0.5、Sr>400×10 ⁻⁶ 、Yb<1.9×10 ⁻⁶ 、Y<18×10 ⁻⁶ 、无明显负锶异常	低K拉斑玄武岩, MORB	高温高压条件下玄武质岩石部分熔融形成的, 残留相为榴辉岩	主要产于板块消减带, 也见于大陆内部
2	高镁埃达克岩	HMA	MgO<6%、Mg [#] >0.5、富Cr和Ni	低K拉斑玄武岩, MORB	埃达克质岩浆与地幔楔混合的产物	板块消减带环境
3	TTG岩套	TTG	富Si贫Mg, Mg [#] <0.5	低K拉斑玄武岩	高温高压条件下玄武质岩石部分熔融形成的, 残留相为榴辉岩	大陆内部, 部分富MgTTG可能与板块消减作用有关
4	高钾碱性埃达克岩	HKCAA	K ₂ O/Na ₂ O<1或=1、Mg [#] <0.5	富K碱性或中酸性岩	高温高压条件下碱性或中酸性岩部分熔融形成的, 残留相为榴辉岩或角闪榴辉岩	大陆内部, 来自加厚下地壳的底部
5	高钾和镁的埃达克岩	HKMA	K ₂ O/Na ₂ O<1或=1、Mg [#] >0.5	富K碱性岩	富K埃达克质岩浆与地幔混合形成的, 残留相为榴辉岩	大陆内部, 可能来自拆沉的下地壳
6	钾质埃达克岩	SKA	K ₂ O/Na ₂ O=1或>1、Mg [#] <0.5	富K碱性岩	高温高压和富水条件下玄武质岩石部分熔融形成的, 残留相为榴辉岩	大陆内部, 来自加厚下地壳的底部

典型MORB的Mg[#]约为60, 它所产生的岩浆的Mg[#]应远低于60。实验岩石学证明, 玄武岩部分熔融产生的熔体的Mg[#]小于45^[23]。因此, 一些新生代与俯冲有关的具有低SiO₂ (<65%) 和高Mg[#] (>47~70) 的埃达克岩(高镁安山岩)即被解释为板片熔体被地幔橄榄岩混染的结果^[3, 10, 19, 24]。Yogodzinski等^[10]在阿留申群岛的中新世—晚更新世岛弧火山岩中鉴别出2种类型的高镁安山岩, 分别称为埃达克型高镁安山岩(Adak-type HMA)和皮普型高镁安山岩(Piip-type HMA)。与正常的埃达克岩相比, 上述2类高镁安山岩(埃达克岩)的共同特点是富MgO、Cr和Ni, 因而其Mg[#]值也高。埃达克型高镁安山岩含单斜辉石斑晶(无橄榄石斑晶), 岩石具高La/Yb比值及异常高的Sr含量, 但HFSE丰度很低, 其Sr-Nd同位素组成与MORB相似。Yogodzinski等^[10]认为, 埃达克型高镁安山岩可能是初始板片熔体受地幔橄榄岩混染或同化作用形成的。与埃达克型高镁安山岩相比, 皮普型高镁安山岩含橄榄石斑晶, MgO、Cr、Ni、Co含量和Mg[#]值更高, 而K和LILE含量较低, 尤其是La/Yb比值和Sr含量比埃达克型低得多。推测有可能是板片熔体交代地幔橄榄岩形成的, 也可能是与地幔楔混染的埃达克质熔体与正常岛弧玄武岩混合的产物^[20]。Xu等^[24]解释出露在勉略蛇绿岩带中的三岔子高镁埃达克岩是板片熔融的熔体与上覆地幔楔交换作用的产物。Rapp等^[25]的高压实验也证实, 埃达克质熔体与地幔橄榄岩反应可以使埃达克质岩浆中的Mg、Ni和Cr含量明显增加, Mg[#]增大。Stern等^[21]的研究表明, Cook岛高镁埃达克岩(Mg[#]=68)仅需要10%~20%地幔

橄榄岩的加入。Rapp等^[25]的实验岩石学研究认为, 添加10%的橄榄岩即可使Mg[#]从44升高到55。因此, 板片熔融的埃达克岩与地幔混合产生高镁埃达克岩已经成为众多研究者的共识。

产于板块消减带的埃达克质熔体由于在其上升过程中不可避免地要与上覆地幔楔发生物质交换作用, 因此, 上述2类埃达克岩往往密切伴生, 如Adak岛、Cook岛和Cerra Pampa等的实例。

(3) TTG岩套

TTG是一套由奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩组成的岩石组合, 根据Al₂O₃含量可分为低铝TTG和高铝TTG两类(以SiO₂=70%时, Al₂O₃<15%或>15%为标志)。高铝TTG的主要地球化学特征为SiO₂≈70%, Al₂O₃>15%, Yb<1×10⁻⁶, La_N/Yb_N多数大于30, Na₂O/K₂O>1, Sr和Ba>500×10⁻⁶。因此, 高铝TTG的地球化学特征与埃达克岩大体类似。实验研究表明, 只有在高压(>1.6 GPa)下玄武岩的部分熔融可以形成类似高铝TTG的岩石^[26]。因此, 许多人认为, 高铝TTG是太古宙拉斑玄武岩向含石榴子石角闪岩或榴辉岩转变时部分熔融形成的^[2, 6, 23, 26-29]。Martin^[6]强调太古宙高铝TTG与新生代板片熔融形成埃达克岩的相似性, 认为太古宙TTG产于与现代埃达克岩相似的板块俯冲环境。他将TTG中普遍低Mg和Ni、Cr的现象解释为地幔物质贡献小的原因(板片熔融的深度小)。与之相反, Smithies^[29]认为太古宙高铝TTG可能是古老的厚的下地壳部分熔融形成的。与典型的adakite相比, TTG更富Si和贫Mg(表1)。因此, 太古宙TTG与现代埃达克岩的形成环境

明显不同,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形成的^[29]。在2002年北京彭罗斯会议上,K. Condie认为,绝大多数太古宙TTG不是埃达克岩,大多数TTG和绿岩形成于大洋高原环境而非传统上认为的岛弧环境^[30]。

新的研究表明,古中太古代(3.0~3.8 Ga)花岗岩的 $Mg^{\#}$ 较低($Mg^{\#}<0.50$),而新太古代花岗岩(2.5~3.0 Ga),包括TTG,具有较高的 $Mg^{\#}$ 以及更加初始的化学成分特征,如较高的Ni和Cr含量,更接近典型埃达克岩的特征,通常称为sanukitoid(赞岐岩类)^[29]。对于新太古代sanukite的成因有不同的认识,但多数人认为与板块消减带的活动有关,贫Mg的sanukite可能是板片熔融的岩浆与上覆地幔楔混合产生的,与高Mg埃达克岩的成因类似;富Mg的sanukite则可能是富水的地幔楔在高温条件下部分熔融形成的(张旗等,未刊)。

(4) 高钾钙碱性埃达克岩(HKCAA)

该类埃达克岩最早是Atherton等^[4]报道的富Na质的秘鲁安第斯带Cordillera Blanca岩基(平均的 $Na_2O/K_2O=1.3$),他们认为该岩基并非板片熔融的产物,而是在地壳加厚及伸展的背景下由新近底侵至下地壳底部的玄武岩在高压下(>1.5~2.0 GPa)部分熔融形成的^[4,31]。类似的解释包括北美Cascade地区的St. Helens山、新西兰南岛、南极半岛和Klamath山^[32-33]。

中国东部晚侏罗世—早白垩世的许多火山岩和侵入岩具有埃达克岩的地球化学属性^[34-46],如高 SiO_2 和 Al_2O_3 含量,高La/Yb和Sr/Y比值,富集LREE,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富钾,其 Na_2O/K_2O 比值接近1,属于高钾钙碱性系列。此外,与典型的埃达克岩相比,中国东部埃达克岩的相容元素Mg、Cr和Ni含量较低,HREE部分(Ho—Lu)通常显示较为平坦的分布,通常有弱的负Eu异常,表明残留物中可能有角闪石(±斜长石)存在,或有斜长石分离结晶作用的影响。推测是加厚的下地壳部分熔融形成的,但是,其厚度可能不太大。这些“埃达克质”花岗岩被称为“大陆型”或“C型”埃达克岩^[34,35],不同于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来自含石榴子石、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,或者是岩浆结晶分异和同化混染过程(AFC)的不同^[34,35,43,47]。

对于高钾钙碱性埃达克岩的形成有下列3种模型:①底侵至下地壳底部的玄武质岩浆的部分熔融^[4];②加厚的下地壳底部基性岩的部分熔融^[34,35];③拆沉的下地壳沉入地幔,受到下部软流圈地幔的加热,导致部分熔融形成埃达克质岩浆^[48]。增厚下地壳的熔融已获得许多实验岩石学资料的证实,许多研究者^[5,25,26,49]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(>1GPa)条件下当石榴子石为残留相时,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^[50]。

中国东部类似岩石的高 K_2O 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^[43]。续海今等^[51]认为,中国东部高钾埃达克岩可能形成于1.0~1.6 GPa和800~1125°C条件下,源岩为偏碱性的玄武岩。肖龙^[50]指出,中国东部大范围高钾钙碱性埃达克岩的形成可能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。

(5) 高钾和镁的埃达克岩(HKMA)

该类埃达克岩由于富 MgO 、Ni、Cr和 $Mg^{\#}$ (表1),可与前述的高镁安山岩(HMA)对比,但由于其明显富K而区别于前述高镁安山岩。其富Mg是与第(4)类比较而言的,带有明显的地幔印记。有人解释为拆沉的下地壳被地幔加热后的再熔融形成的,本文认为可能为玄武质成分的下地壳在高温和高度富水的条件下部分熔融形成的。Kay等^[48]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,榴辉岩即可能与岩石圈地幔一道因重力差异脱离地壳而沉入软流圈地幔中(拆沉作用)。拆沉的榴辉岩相下地壳在热的地幔物质作用下可能发生部分熔融,产生埃达克岩,熔出的埃达克质岩浆上升时与地幔橄辉岩发生交代混染,从而产生与俯冲板片熔融更为接近的岩浆,即高K、Mg和低Si的安山岩。Xu等^[47]、许继峰等^[52]、Gao等^[53]和王强等^[54]也尝试用拆沉的模式解释江苏安基山($Mg^{\#}=0.37\sim 0.58$)、西藏羌塘新生代火山岩($Mg^{\#}=64\sim 68$)、辽西火山岩($Mg^{\#}=53\sim 65$)和湖北铜山口($Mg^{\#}=0.48\sim 0.50$)的高钾和镁的埃达克岩。Xu等^[47]和许继峰等^[52]强调是下地壳单独拆沉到下伏地幔中。赖绍聪^[55]认为,青藏高原埃达克质岩的高镁特征可能与高原地区广泛发育的新生代幔源钾质和超钾质岩浆活动及其在加厚陆壳底部的底侵作用有关。

作者认为,关于高钾镁埃达克岩的成因,可以借鉴玻安岩形成的机制加以解释。玻安岩是在高温低压富水和高程度部分熔融条件下产生的,其 MgO 含量可达9%~25%, $Mg^{\#}$ 可达0.8^[14,56]。推测高钾和镁的埃达克岩是否也可能在高温、高氧逸度和富水的条件下由基性的下地壳经较高程度部分熔融而形成。这个假设能否成立尚需要实验岩石学资料的证实。氧逸度的高低能改变变价元素以何种状态存在,例如铁。岩石中 Fe^{+3} 与 Fe^{+2} 的相对比例取决于结晶后形成的矿物相,因此,也会在一定程度上影响 $Mg^{\#}$ 。对于喷出岩,通常有钛铁氧化物出现,其成分随氧逸度升高分别形成 FeO (Fe_3O_4 、 Fe_2TiO_4 、 $Fe-TiO_3$ 、 $FeTi_2O_5$ 、 Fe_2TiO_5)、 Fe_2O_3 或 TiO_2 等,通常以固体形式存在。对于侵入岩,上述矿物将出现在副矿物相中,而含铁的主要矿物相中,黑云母的成分较角闪石更能反映氧逸度的变化。因此,氧逸度的升高肯定会影响 $Mg^{\#}$,至于是何种因素导致氧逸度升高,目前了解还不够。洋壳玄武岩在蚀变过程中发生氧化会提高岩石的氧逸度,而下地壳底侵玄武岩的熔融是如何产生高氧逸度岩浆的,其机制尚不清楚,在非常还原的源岩组合(H_2-H_2O 氧化缓冲线以下)中,也许富水和高温

是导致氧逸度升高的主要因素(肖龙等,未刊)。

(6) 钾质埃达克岩(SKA)

例如新生代可可西里埃达克岩的 $K/Na > 1$ (表1),部分K含量高的埃达克岩甚至落入shoshonite的范围,其成因是最不清楚的。可可西里新生代火山岩的 K_2O 含量平均为3.75%, $Na_2O/K_2O = 1.0$ (SiO_2 平均为61.5%^[57]),而滇西北的富碱斑岩,据谢应雯等^[58]和邓万明等^[59]的报道,其 K_2O 含量高达5%~6%(Si_2O_6 为60%左右)。据高建国等^[60]的统计,滇西北199件新生代富碱斑岩样品的 $SiO_2 = 66.22%$, $K_2O = 5.85%$ 。而据薛步高^[61]的资料,云南宾川小龙潭13件石英二长斑岩样品的 $SiO_2 = 64.05%$, K_2O 含量高达6.28%。当然,含矿斑岩的蚀变作用普遍,通常有比较强烈的硅化和钾化,使 SiO_2 和 K_2O 含量不同程度地增加,并非原始岩浆之所为。

实验研究表明,在非常高的压力和非常低程度的部分熔融时,源区强烈富水和富LILE(包括K),可以形成高度富钾的埃达克岩^[43]。

2 讨论

(1) O型和C型埃达克岩

张旗等^[34,35]曾经按照埃达克岩的 Na_2O/K_2O 比值、Sr-Nd同位素特征和产出位置把埃达克岩分为O型($Na_2O/K_2O > 2$,产于洋内,取了ocean一词的词头)和C型($Na_2O/K_2O \approx 1$ 或 > 1 ,产于陆内,取了continent一词的词头)2类,似乎O型代表典型的与板片俯冲有关的埃达克岩,而C型为大陆下地壳熔融形成的。按照本文的划分,上述(1)-(3)类属于O型埃达克岩,(4)-(6)类为C型埃达克岩。C型埃达克岩产于加厚陆壳的底部,而O型埃达克岩并非统统产于板块消减带环境,典型的埃达克岩(第1类)和高镁埃达克岩(第2类)与板块俯冲有关,但TTG(第3类)则不然,TTG是O型的,它很可能是加厚下地壳部分熔融形成的^[29]。同样,显生宙产于陆壳底部的埃达克岩也可以具有O型埃达克岩的地球化学特征,如西天山阿吾拉勒、辽西以及安徽沙溪的埃达克岩^[62]。看来,O型和C型埃达克岩并没有固定的构造含义,而主要受源区物质组成的制约,只要源岩为低钾拉斑玄武岩,所熔出的岩浆即具有明显低钾富钠的特征。

(2) 埃达克岩的成因

埃达克岩的成因主要考虑基性源岩(大洋岩石圈或基性下地壳)、较高的压力(1.2~4 GPa)、热源以及区域地球动力学背景^[63]等因素。其中,热源和区域地球动力学背景是诱发源区熔融的动因,但不同地区其作用的方式可能会有很大差别。只有源岩和源区压力才是决定埃达克岩地球化学特殊性的基本控制因素,不论是热洋壳还是冷洋壳的熔融,或是加厚陆壳的基性下地壳熔融,只要源区压力足够大,使得源岩中大部分斜长石和一定量角闪石发生分解,石榴子石在残余固相中占有较大的比例(含角闪石的榴辉岩和/或无斜长石的石榴子石角闪岩、麻粒岩或榴辉岩),通过脱水熔融即可形成具有埃达克岩地球化学特征的岩石^[5,26,43,63-66]。

(3) 埃达克岩形成的构造背景

不同的埃达克岩形成于不同的构造背景,同样的埃达克岩也可以形成于不同的背景,关键在于原岩性质。

①典型的埃达克岩(adakite)主要产于板块消减带环境,也可以产于大陆内部,如果板块内部加厚下地壳底部的原岩明显贫K,其部分熔融形成的岩浆也可以具有典型埃达克岩的特征。

②高镁埃达克岩(HMA)通常解释为俯冲板片熔融的产物,当其上升与地幔发生混合时,即产生富Mg、Cr、Ni和贫Si的高Mg埃达克岩。

③太古宙(主要指古中太古代)的TTG比典型的埃达克岩更加富Si和贫Mg,可能来自加厚的下地壳底部,并非板块消减作用的产物,而部分新太古代(< 3.0 Ga)的TTG较富Mg和贫Si,相当于sanukite,则可能产于板块消减带环境。

④高钾钙碱性埃达克岩(HKCAA)产于大陆内部,为加厚下地壳底部部分熔融的产物,表明源区基性岩和/或中酸性岩的 K_2O 含量较高或部分熔融程度较低或压力较大。

⑤高钾和镁的埃达克岩(HKMA)指的是富Mg、Cr、Ni和贫Si的高钾钙碱性埃达克岩,也形成于板块内部环境,暗示可能与地幔发生过物质交换作用。

⑥钾质埃达克岩(SKA)也产于大陆内部,可能是富K质的原岩在更高的压力和更低的部分熔融程度下形成的,主要出露在青藏高原。

3 结论

(1)埃达克岩具有多样性,大体可分为下列几种:①典型的埃达克岩(adakite),源于贫K的拉斑玄武岩,大多是由俯冲的板片熔融形成的;②高镁埃达克岩(high Mg adakite),与正常的埃达克岩相比,以富Mg($Mg/(Mg+Fe) > 0.5$)和Cr、Ni为特征,是板片熔融的埃达克岩熔体与上覆地幔楔混合的产物;③TTG岩套,不同于典型的adakite,太古宙的TTG更富Si和贫Mg,可能是加厚地壳底部含水玄武质岩石部分熔融形成的;④高钾钙碱性埃达克岩(high-K calc-alkaline adakite),以富钾(Na_2O/K_2O 比值接近1)和贫Mg、Cr、Ni为特征,推测由加厚下地壳底部的中酸性-基性岩部分熔融形成,岩浆上升时还可能受陆壳的混染;⑤高钾和镁的埃达克岩(high K and Mg adakite),通常解释为拆沉的下地壳被地幔加热后再熔融形成的;⑥钾质埃达克岩(Super K adakite), $K/Na > 1$,部分K含量高的埃达克岩落入shoshonite范围,可能是在很高的压力和很低的部分熔融程度条件下形成的。

(2)上述埃达克岩中的第(1)-(3)类属于O型埃达克岩,第(4)-(6)类为C型埃达克岩。研究表明,只要达到形成埃达克岩所需要的高压条件,有足够的热源使源区物质发生部分熔融,所形成的熔体即具有埃达克岩的特征。而埃达克岩的多样性则是由于构造环境的差异(消减带或下地壳)、源岩性质的差异(基性岩或酸性岩以及不同成分的基性岩)、压力的差异(地壳厚度的大小)以及围岩的差异(与地幔或地壳发生

混合)造成的。

(3)产于板块消减带环境的埃达克岩往往带有地幔的印记,例如第(1)类和第(2)类埃达克岩,并且二者常常相伴产出;而产于板块内部的埃达克岩由于原岩性质、熔融程度、压力以及其他条件的不同,可以是高钾钙碱性的(第4类)、钾质的(第6类)甚至钠质的(第1类或第3类),如果有地幔物质参与,也可以是富镁质的(第5类)。

参考文献:

- [1]Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 662~665.
- [2]Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemitic-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95: 21503~21521.
- [3]Kay R W. Aleutian magnesium andesites: melts from subducted Pacific oceanic crust [J]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1978, 4: 117~132.
- [4]Atherton M P, Petford. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Geology*, 1993, 4: 596~600.
- [5]Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, 121: 227~244.
- [6]Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids [J]. *Lithos*, 1999, 46: 411~429.
- [7]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 [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1999, 134: 33~51.
- [8]Beate B, Monzier M, Spikings R, et al. Mio-Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: the Quimsacocha volcanic center [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, 192: 561~570.
- [9]Gutscher M A, Maury R, Eissen J P, et al. Can slab melting be caused by flat subduction? [J]. *Geology*, 1999, 28: 535~538.
- [10]Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets O N, et al. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implication for slab melting and processes in the mantle wedge [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1995, 107: 505~519.
- [11]Yogodzinski 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.
- [12]Kushiro I. Partial melting of mantle wedge and evolution of island arc crust [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95: 15929~15939.
- [13]Arculus R J. Aspects of magma genesis in arcs [J]. *Lithos*, 1994, 33: 189~208.
- [14]Hickey R L, Frey F A. Geochemical characteristics of boninite series volcanics: implications for their source [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46: 2099~2115.
- [15]Tatsumi Y, Ishizaka K. Origin of high magnesian andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan: I. Petrographical and chemical characteristics [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1982, 60: 293~304.
- [16]Tatsumi Y, Maruyama S. Boninites and high-Mg andesites: tectonics and petrogenesis [A]. In: Crawford A J (ed). *Boninites and Related Rocks* [C]. Unwin Hyman, London, 1989: 50~71.
- [17]Crawford A J, Falloon T J, Green D H. Classification, petrogenesis and tectonic settings of boninites [A]. In: Crawford A J (ed). *Boninite* [C]. London: Unwin Hyman, 1989: 1~49.
- [18]Kelemen P B. Genesis of high Mg[#] andesites and the continental crust [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1995, 120: 1~19.
- [19]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.
- [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 and Planetary Science Letters*, 1998, 158: 53~65.
- [21]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.*, 1993, 123: 263~281.
- [22]Shimoda G, Tatsumi Y, Nohda S, et al. Setouchi high-Mg andesites revisited: geochemical evidence for melting of subducting sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 160: 479~492.
- [23]Rapp P R. Heterogeneous source regions for Archean granitoids [A]. In: de Wit M J, Ashwal L D, (eds). *Greenstone belts* [C]. Oxford: Oxford University Press, 1997: 35~37.
- [24]Xu J F, Wang Q, Yu X Y. Geochemistry of high-Mg andesite and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mi-an-Lue ophiolitic melange in the Qinling Mountains central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleotethyan crust and its implication [J]. *Geochemical Journal*, 2000, 34: 359~377.
- [25]Rapp P R, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chem. Geol.*, 1999, 160: 335~356.
- [26]Rapp P R, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemitic and tonalities [J]. *Precambrian Research*, 1991, 51: 1~25.
- [27]Arth J G, Hanson G N. Geochemistry and origin of the early Precambrian crust of northern Minnesota [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1975, 39: 325~362.
- [28]Barker F, Arth J G. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemitic-basalt suites [J]. *Geology*, 1976, 4: 596~600.

- [29]Smithies R H. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 182: 115~125.
- [30]赵国春, 郭敬辉. 2002年北京彭罗斯会议: 前寒武纪高温-高压麻粒岩相变质作用[J]. 科学通报, 2002, 47: 1680, 1623.
- [31]Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera blanca Batholith, Peru[J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 491~521.
- [32]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]. Journal of Geological Society, London, 1995, 152: 689~701.
- [33]Barnes C G, Petersen S W, Kistler, et al. Source and tectonic implications of tonalite-trondhjemite magmatism in the Klamath Mountains[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1996, 123: 40~60.
- [34]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[J]. 地质科学, 2001a, 36(2): 248~255.
- [35]张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 2001b, 17(2): 236~244.
- [36]张旗, 赵太平, 王焰, 等. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题[J]. 岩石矿物学杂志, 2001c, 20: 273~280.
- [37]王强, 许继峰, 王建新. 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: 1017~1024.
- [38]王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自沙溪 adakite质富钠石英闪长玢岩的证据[J]. 地球化学, 2001, 30: 353~362.
- [39]许继峰, 王强, 徐义刚, 等. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 576~584.
- [40]王焰, 张旗. 八达岭花岗岩杂岩的组成、地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 533~540.
- [41]刘红涛, 孙世华, 刘建明, 等. 华北北缘地区中生代高锆花岗岩类: 地球化学与源区性质[J]. 岩石学报, 2002a, 18: 257~274.
- [42]刘红涛, 翟明国, 刘建明, 等. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山[J]. 岩石学报, 2002b, 18: 433~448.
- [43]Rapp R P, Xiao L, Shimizu N. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in Eastern China [J]. Acta Petrological Sinica, 2002, 18(3): 293~302.
- [44]蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 等. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石学报, 2003, 19: 81~92.
- [45]杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 等. 胶东地区郭家岭花岗岩闪长岩的地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 2003, 19: 692~700.
- [46]Davis G A. The Yanshan belt of North China: tectonics, adakitic magmatism and crustal evolution[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10: 373~384.
- [47]许继峰, 王强. Adakitic火成岩对大陆地壳增厚过程的指示: 以青藏高原北部火山岩为例[J]. 地质前缘, 2003, 10: 401~406.
- [48]Kay S M, Ramos V A, Marques M. Evidence in Cerro Pam-pa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South American[J]. J. Geol., 1993, 101: 703~714.
- [49]Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: effects of temperature and time[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1994, 115: 369~383.
- [50]肖龙, Rapp P R, 许继峰. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约[J]. 岩石学报, 2004, 20: 219~228.
- [51]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]. 地质前缘, 2003, 10: 417~427.
- [52]Xu J F, Shinjo R, Defent M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental mantle crust? [J]. Geology, 2002, 30(12): 1111~1114.
- [53]Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust: Evidence from high Mg andesites in the North China craton[C]. Eos. Trans. AGU, 84(46), Fall Meet. Suppl., Abstract, V32H.2003.
- [54]王强, 赵振华, 许继峰, 等. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比(拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因[J]. 岩石学报, 2004, 20: 351~360.
- [55]赖绍聪. 青藏高原新生代埃达克质岩的厘定及其意义[J]. 地质前缘, 2003, 10: 407~415.
- [56]Cameron W E. Petrology and origin of primitive lavas from the Troodos ophiolite[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1985, 89: 239~255.
- [57]邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 179.
- [58]谢应雯, 张玉泉. 云南洱海东部新生代岩浆岩岩石学[J]. 岩石学报, 1995, 11: 423~433.
- [59]邓万明, 黄萱, 钟大赉. 滇西新生代富碱斑岩的岩石特征与成因[J]. 地质科学, 1998, 33: 412~425.
- [60]高建国, 夏既胜, 陈昌勇. 滇西富碱斑岩地球化学特征与金(多金属)矿成矿分析[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(增刊): 44~50.
- [61]薛步高. 宾川小龙潭斑岩铜矿地质特征及找矿远景探讨[J]. 矿产与地质, 2002, 16(2): 82~86.
- [62]张旗, 王元龙, 张福勤, 等. 埃达克岩与构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27: 101~108.
- [63]刘红涛, 张旗, 刘建明, 等. 埃达克岩与斑岩铜矿—浅成热液金矿: 有待深入研究的岩浆成矿关系[J]. 岩石学报, 2004, 20: 205~218.
- [64]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.
- [65]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.
- [66]Sen C, Dunn T. Experimental modal metasomatism of a spinel lherzolite and the production of amphibole-bearing peridotite [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1995, 119: 394~409.

Diversity of adakite

ZHANG Qi¹, XU Jifeng², WANG Yan³, XIAO Long⁴,

LIU Hongtao¹, WANG Yuanlong

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

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

3. Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong, China;

4. Chinese University of Geoscience, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Adakite can be formed diversely. It may be classified into the following six types: ① typical adakite, which is derived from potassium-poor tholeiite or MORB and usually formed by subducted slab melting; ② high-magnesium andesite, which is characterized by high $Mg^{\#}$ values and Cr and Ni contents; ③ TTG suite, which is different from typical adakite in that the Archean TTG suite is relatively enriched in Si and poor in Mg; ④ high-K calc-alkaline adakite (HKCAA), which is characterized by high K (Na_2O/K_2O close to 1) and low Mg, Cr and Ni content; ⑤ high-potassium and -magnesium adakite (HKMA); and ⑥ super-K adakite (SKA) with $K/Na > 1$. It is suggested that adakitic melt can be formed in diverse settings as long as enough high pressure and heat are provided to bring about partial melting of source materials. The diversity is caused by the differences in geodynamic environment (subduction zone or lower crust), source materials (basic rocks or immediately-acid rocks and basic rocks of various compositions), pressure (thickness of the crust) and country rocks (mixed with the mantle or crust).

Key words: adakite; diversity; high-magnesium adakite; TTG; high-K calc-alkaline adakite; high-potassium and -magnesium adakite; super-K adakite

《中国大地构造学纲要》简介

由中国地质大学(北京)万天丰教授撰写的《中国大地构造学纲要》一书近期已由地质出版社正式出版发行。该书是在王鸿祯院士的指导下完成的。全书收集和综合了作者近20年来所积累的原始资料、全国区域地质调查资料和国内外学者的研究成果。此书以地质构造演化历史为主要线索,系统地研究了一系列构造事件,把稳定时期和活跃时期的构造演化结合起来进行分析,从总体上讨论了中国大地构造在各个时期的主要特征;以地壳和岩石圈的变形、变位为主要研究内容,结合沉积古地理、岩浆作用和变质作用的资料进行综合的、定量化的探讨。该书大幅度地加强了中生代—新生代大地构造部分,因为中生代—新生代是中国最主要的内、外生矿床(包括油气资源)形成并定型的时期,而且也是对于近代地理环境和灾害影响最大的时期。该书还讨论了当前中国大地构造学研究中的一些重大理论问题,如碰撞带和各类板内变形的特征与形成机制,地壳与岩石圈厚度变化及其原因,地温梯度的变化与地幔羽的存在问题,构造作用对于中国内、外生矿床的影响和主要成矿机制,最后讨论了全球板块构造动力学机制假说并提出了一些个人的见解。

该书共计387页,插图136幅,附光盘1张(内含各时期构造事件图、古构造复原图和沉积古地理图等主要图件46幅),附录中包含了各时期各地区的地层厚度、构造变形和主应力方向、古应力值、板内变形速度,以及古地磁学、岩石形成温度压力和地温梯度等大量数据。全书引用了千余篇参考文献,以利读者进一步查考。

本刊编辑部 供稿