·编者按·

P. R. Castillo 是美国加州大学 San Diego 分校 Scripps 海洋研究所地质学教授. 他于 1977 年在 University of the Philippines 获得理学学士学位, 于 1983 年在美国 University of Akron 获得理学硕士学位, 并于 1987 在美国 Washington University 获得博士学位. 他曾就职于 Carnegie Institution of Washington 和 University of Miami. 自 1990 年起他在加州大学 Scripps 海洋研究所任职至今. 他在大洋和大陆两大领域的岩石地球化学研究方面均有建树, 曾参加过 15 次远洋科学考察, 包括大洋钻探计划(ODP)的三个航次. 他的研究强调化学动力学, 并侧重于应用岩石学和地球化学去理解大洋中脊和俯冲带的物理过程. 他在一些顶尖期刊(如 Nature, Science, Geology, Earth and Planetary Science Letters, Journal of Geophysical Research, Journal of Petrology 等)上发表过一系列重要文章. 尤其值得提及的是, 在著名的"Dupal 异常"被识别(1980)后不久, 他就指出南半球的的两个最大同位素"Dupal 异常"与两个大规模下地幔的低速带有着紧密的联系, 并有地表热点活动与此相应, 从而提出这些热点是地幔化学结构和地幔对流的表现(Nature, 1988, 336: 667~670). 在这些方面, 他确实站得高, 想得远, 走在时间之前, 也走在我们许多同行之前. 他有关大洋玄武岩的研究揭示了许多意想不到的地幔化学和同位素组成在空间和幅度上的不均一性. 他不仅研究现代洋脊玄武岩的地球化学, 而且也重视大洋盆地的形成以及示踪过去两亿年来洋脊玄武岩地幔的成分演化. 他有关 Nauru 盆地内侏罗纪洋壳和该盆地内白垩纪火山杂岩的研究以及在太平洋西部其他洋盆的类似研究, 引起了国际上对于板内火山作用的进一步研究, 这包括在 Ontong Java Plateau 进行的两次 ODP 钻探. 他对俯冲带岩浆作用的研究贡献具有创新性. 比如他对于一些岛弧熔岩高场强元素(HFSE)(Geology, 2002, 30: 707~710)的认识使人们意识到板块脱水或许并不是引起俯冲带岩浆作用的惟一机制. 更重要的是, 他是最早指出"adakites"并不都是源于俯冲板块熔融(Contrib Mineral Petrol, 1999, 134: 33~51)的研究者之一.

多亏加州理工学院 P. J. Wyllie 的提醒, 我查阅了"Science Citation Index from Web of Knowledge"(SCI-WoK), 发现"adakite(埃达克岩)"这个术语在中国的 SCI 期刊中首先出现于 2000 年, 大约在 Defant 和 Drummond 提出"adakite" 这个术语 10 年之后, 但是在中国有关埃达克岩的 SCI 论文在过去的 5 年中连连不断. 截止 2005 年 12 月 1 日, 在中国的 SCI 期刊上发表的有关埃达克岩的文章已有 53 篇, 占 SCI-WoK 索引所有有关埃达克岩文章的 24%. 如此的快产和高产反映出中国科学家很大的努力和取得的成绩, 但同时也难免产生一些对于埃达克岩、埃达克质岩及其重要性的不甚正确的理解. 由于这个原因, 以及埃达克岩和埃达克质岩对于陆壳的演化以及 Cu-Au 成矿具有潜在的重要性, 对埃达克岩的成因做一个综述是十分及时的. Paterno R. Castillo 作为在埃达克岩研究方面的前沿者, 欣然应邀撰写该文, 我深表谢意. 我和其他审稿人都认为 Paterno R. Castillo 的这篇文章十分优秀, 并且客观和全面. 板块熔融或许确实可以产生埃达克岩, 但是埃达克岩或埃达克质岩并非均由板块熔融产生. 因此, 用具有埃达克质化学特征的火成岩来断定俯冲洋壳熔融甚为危险, 须小心谨慎.

(牛耀龄, 执行副主编, Department of Earth Sciences, Durham University, UK)

埃达克岩成因回顾

Paterno R. Castillo

(Scripps Institution of Oceanography, UCSD, La Jolla, CA 92093-0212, USA. E-mail: pcastillo@ucsd.edu)

摘要 埃达克岩最初是用来定义那些富硅、高 Sr/Y 和 La/Yb 的源于俯冲带玄武质洋壳部分熔融形成的火山岩和侵入岩. 最初, 人们认为埃达克岩仅形成在年青且尚未冷却的大洋板块俯冲会聚带, 但随后的研究表明埃达克岩也可以形成于岛弧的一些特殊环境, 在这里某些异常构造条件可降低古老板片的熔融温度. 目前认为, 埃达克岩涵盖了一系列的岛弧火山岩, 包括原生俯冲洋壳熔体, 埃达克岩-橄榄岩混合熔体以及源于板块熔体交代后地幔楔橄榄岩的熔融产物. 近年来埃达克岩的研究产生了一些让人困惑的地方, 其原因包括: (1) 埃达克岩定义相当宽泛, 并依化学特征与其他岩石相区别; (2) 将含水体系下玄武岩的高压熔融实验结果作为板块熔融存在的确凿证据; 而且(3)存在有与板块熔融无关的埃达克质岩. 近期研究表明, 埃达克质岩和许多曾被认为是埃达克岩的岩石在岛弧和非岛弧环境下均可形成, 主要通过以下几种机制: 镁铁质下地壳的分熔或直接是幔源低侵岩浆; 高压下玄武质岩浆的结晶分异; 低压下玄武岩浆的结晶分异加上相关的岩浆混合过程. 这些机制在岛弧环境或非岛弧环境都有可能. 尽管对埃达克岩和埃达克质岩的成因解释比较混乱, 但对这些岩石的研究丰富了我们对俯冲带环境中物质循环、地壳演化和成矿作用的理解.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

关键词 埃达克岩 板块熔融 交代作用 榴辉岩 角闪岩 太古代 TTG 岩套 镁质安山岩 富 Nb 玄武岩 俯冲带 岛弧岩浆作用

埃达克岩是 Defant 和 Drummond[1]在 15 年前引入地学界的一个岩石学术语, 它是指与年青(≤25 Ma)俯冲大洋岩石圈有关的新生代岛弧环境中的火山岩或侵入岩. 这些岩石具有以下特征: SiO_2≥56%, Al_2O_3≥15%(很少低于这个值), 通常 MgO<3%(很少高于 6%), 同岛弧安山岩-英安岩-流纹岩系列(ADRs)相比, Y(≤18 μg/g)和 HREE(Yb≤1.9 μg/g)含量甚低, 但 Sr 含量甚高(很少低于 400 μg/g), 并且 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 通常小于 0.7040. 与大多数岛弧岩石一样, 埃达克岩也具有高场强元素 (HFSEs)亏损的特征. 在岛弧带中, 俯冲的榴辉岩相或角闪岩相的变质玄武岩的部分熔融可以产生埃达克岩上述的一系列地球化学特征(表 1). 埃达克岩的识别是岛弧岩浆作用研究中的一个明显的进步, 它提高了我们对于大洋板块俯冲进入地幔之后的变化和此后在汇聚板块边缘地壳物质循环过程的理解. 此外, 它也揭示出构成陆壳主要部分的太古代奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩(TTG)岩套的一个可能的形成机制, 因此可以指示地壳演化过程[2,5~9]. 此外, 埃达克岩对于成矿作用有着十分重要的意义, 大部分世界著名的 Cu-Au 矿床都与埃达克岩有联系[10~14]. 因此, 埃达克岩的认识促进了很多地质调查研究. 尽管如此, 因埃达克岩的定义已过于宽泛, 当前有关论述埃达克岩的文献变得令人困惑. 许多与埃达克岩化学特征相似的火成岩(现在把它们一般称作是埃达克质岩)的确与俯冲板块熔融毫无关系. 因此人们开始怀疑埃达克岩这一岩石学术语是否有岩石成因意义.

这篇简要评述主要想通过追溯埃达克岩这个术语的历史来讨论这个概念的使用和是否被滥用, 同时也介绍一下目前对于这个概念理解存在分岐的一些原因. 需要指出的是, 我们的讨论仅限于显生宙的埃达克岩和埃达克质岩. 由于篇幅所限, 观点难免过于简略, 也很难展开详尽的讨论, 无法囊括所有的相关工作, 在此深表歉意. 另外, 板片熔融与 TTG 岩套之间的关系已经有了相当多的文献, 有兴趣的读者可以去查阅 Rollison 和 Martin 最近发表的文章[2].

1 背景

在会聚板块边界俯冲进入地幔的洋壳物质发生熔融然后再循环返回到陆壳这一概念并不新颖. 在板块构造理论得到广泛承认之时, Armstrong[15] 早就认为俯冲进入地幔的陆缘沉积物是岛弧火山和侵入体的物源. 俯冲洋壳的自身熔融在 20 世纪 70 年代早期曾经过了广泛讨论[16]. 在 20 世纪 80 年代早期, 人们认为洋壳熔融是岛弧岩浆的主要成因之一[17]. 例如, Marsh 和他的合作者[18,19]明确提出俯冲板片的熔融可以产生代表原始岛弧岩浆的高铝玄武岩. 但是许多岩石学的调查研究表明, 俯冲板块的脱水作用可以很好地解释岛弧岩浆的地球化学特征, 因此俯冲板块大规模熔融的观念基本上被替代[20~23]. 并且从这些结果中开始孕育着一个新的观念, 也就是俯冲板块对岛弧岩浆生成的物质贡献较小, 仅会使岛弧岩浆主要的源区——地幔楔橄榄岩发生交代作用并降低其分熔温度. 俯冲组分的加入导致了处于板块会

表 1 埃达克岩的主要化学特征

埃达克岩的地球化学特征	与板块熔融的成因联系[1~4]
高 SiO_2(≥56%)	榴辉岩/含石榴石角闪岩在高压下的部分熔融
高 Al_2O_3(≥15%)	SiO_2 在 70%左右时, 为高压下榴辉岩或角闪岩的部分熔融
低 MgO(<3%)	低的 Cr, Ni 含量相联系, 如果是初始融体, 表明岩浆并不是源于地幔橄榄岩
高 Sr(>300 μg/g)	斜长石参与熔融或残留相中无斜长石保留
无负 Eu 异常	源区仅有微量斜长石残留或是源区玄武岩本身 Eu 亏损
低 Y(<15 μg/g)	表明石榴石(在次要程度上, 有角闪石或是单斜辉石)为残留相
高 Sr/Y(>20)	高于正常结晶分异的 Sr/Y 比值, 表明有石榴石和角闪石为残留相
低 Yb(<1.9 μg/g)	意味着低的 HREE 含量, 表明残留相中有石榴石
高 La/Yb(> 20)	轻重稀土元素的强烈分异, 表明石榴子石为源区的残留相
低 HFSE's(如 Nb, Ta)	与大部分的岛弧火山岩一样, 表明源区有富 Ti 相或是角闪石残留相
低 $^{87}Sr/^{86}Sr$(< 0.704)	低 $^{206}Pb/^{204}Pb$, K/La, Rb/La, Ba/La; 高 $^{143}Nd/^{144}Nd$. 为 N-MORB 特征

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

聚处岩浆的主要成分特征. 特别显著的是它们一般富含挥发分和易随流体迁移的不相容元素, 比如大离子亲石元素(LILE; 如 Rb, K, Ba, Sr 等), 但强烈亏损高场强元素(HFSEs; 如 Nb, Ta, Zr, Hf, Ti 等), 这使得它们具有不同于其他构造环境侵位岩浆的独特成分特征[21~25]. 而且这个新观念认为会聚板块边界的大多数原生岩浆是通过交代的地幔楔的部分熔融而产生, 然后经过结晶分异、岩浆混合、地壳混染而产生各种各样的岛弧岩浆. 因此, 有关岛弧岩浆作用岩石学的研究主要集中在俯冲组分的成因和性质——它的源区(是玄武质成分的洋壳, 还是上伏的沉积物, 或二者均存在), 与之相联系的对地幔楔的贡献(%)和板块进入地幔后的转换机制(含水流体是俯冲板块挤压脱水形成, 还是由于俯冲板片的部分熔融而产生, 或二者均存在).

通过对许多岛弧的岩石学研究而让人们普遍接受的一个结果是: 俯冲组分主要源于俯冲板块玄武岩部分的脱水和一些上覆沉积物(<10%)的熔融[26~28]. 虽然如此, 回顾 20 世纪 70 年代晚期, 在阿留申岛弧火山链西部的埃达克岛的一些镁质安山岩具有异常的微量元素特征, 这使得 Kay[3]相信这些火山岩有着与其他典型的会聚边缘火山岩不同的岩石成因历史. 这些安山岩有着相对原始的特点: 高 MgO(5%), Ni(150 μg/g)和低 FeO*/MgO 比值(<1.2). 同典型的会聚边缘岩浆相比仍然具有高 Sr 含量和很高的 Sr/Y, La/Yb 比值. Kay[3]认为这些安山岩应该是俯冲的太平洋玄武质板块部分熔融产生的且与地幔橄榄岩平衡的少量含水熔体. 这些火山岩相对低的 Sr-Pb 同位素, 但高的 Nd 同位素组成也支持了与地幔橄榄岩平衡的板块熔融模式. 这种板块熔融的观念在早期曾经被用来解释那些有着相似异常组分特征的火山岩, 如 Cascades 火山岩[29], 安第斯山脉南部的火山岩[30]和 Baja California[31]. Defant 和 Drummond[1]用板块熔融的埃达克岩这个术语来描述 Kay[3]所研究的阿留申地区埃达克岛的镁质安山岩.

2 板块熔融的埃达克岩

有关埃达克岩的成因可分为两派意见: 极力主张板块熔融派[6,32~37]和多成因派, 亦即板块熔融并非产生埃达克岩组成特征的惟一机制[38~43]. 通过俯冲玄武质洋壳的熔融可产生埃达克岩熔体已被实验和地质观察得到证实. 实验研究表明, 水饱和熔融或角闪石脱水熔融可产生埃达克岩熔体[44~50]. 埃达克质玻璃包裹体在岛弧火山岩中、与俯冲有关的火山岩捕虏体矿物内[37,51]以及蛇绿岩内中酸性混合岩脉中[52~55]均已发现. 再就是阿留申地区的镁质安山岩中单斜辉石离子探针分析的结果显示出 Mg#和 Sr, Nd/Yb 之间具有典型的相关性, 这意味着与地幔橄榄岩处于平衡状态的板块熔体对于产生典型的埃达克岩是必须的[56].

Defant 和 Drummond[1]最初认为, 埃达克岩只有在年轻(<25 Ma)并尚未冷却的玄武质洋壳俯冲时才能产生, 这与俯冲的玄武质洋壳部分熔融模式和俯冲区域的二维热模拟的结果一致[4]. 在后来的研究中, 许多研究地区都识别出埃达克岩的存在, 或者至少有板块熔体成分参与, 尽管在先前的研究中这些岩石被认为有着其他的成因模式. 例如, 日本西南部的“Setouchi”镁质安山岩是产生于上地幔的原始岩浆[57,58]; 加利福尼亚 Baja 地区的“bajaites”源于上地幔, 是由于角闪石分解而引起热的释放和 P_{H_2O} 降低而产生的[59]; Mt. St. Helen 的英安岩则曾被认为是因下地壳的熔融作用而产生[60]. 随后的研究也发现一些地区的埃达克岩源自相对较老(>25 Ma)的正在俯冲的洋壳, 它们有着特殊的构造环境: 或者是俯冲过程的初期[34]、或者处于俯冲碰撞阶段[35,61]、或者因发生俯冲板块的撕裂而导致对软流圈开放的板块窗[62,63]、或者以低角度俯冲[64~66], 例如, 在安第斯山北部存在着由于平板俯冲(flat-subduction)而形成的埃达克岩[64~66]. 又如, 在构造复杂的菲律宾群岛南部[34,35,61], 埃达克岩源于相对较老的洋壳的熔融作用, 而这种熔融作用发生在岛弧形成的初期和俯冲碰撞阶段. 同时对鉴别埃达克岩的标准也进行了少许的修改. 例如, 用于将埃达克岩从正常的岛弧安山岩-英安岩-流纹岩系列(ADRs)相区别的两个关键的微量元素的 La/Yb 比值(它可以指示 LREE 的富集程度)已经适当地降低从而包括上述地区产生的埃达克岩的成分特征[34,35,67]. 表 2 列出了部分被认为有埃达克岩产出的岛孤地区.

在埃达克岩定义上一个更重要的变化就是从强调板块熔融形成原生的埃达克岩[1]到认识到埃达克岩的形成有地幔橄榄岩直接或是间接的参与. 同 Kay[3]一样, Yogodzinski 等人[68]强调在阿留申西部(典型的埃达克岩的产地)的一些镁质安山岩虽然确实具有高 Sr 含量和高 La/Yb 比值等板块熔融的证据, 但

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 部分被认为有埃达克岩产出的岛弧地区

地区	文献
Aleutians	[3, 68, 69]
Austral Chile	[36, 70~77]
Baja California, Mexico	[31, 63, 78]
Cascade	[1, 29, 79]
Ecuador	[66, 80, 81]
Southwest Japan	[58, 82]
Kamchatka	[37, 83~85]
Los Chocoyos, Guatemala	[1]
Northern Andes	[64, 66]
Northern Philippines	[1, 51]
Panama and Costa Rica	[1, 32, 33]
Papua New Guinea	[1]
Skagway Batholith, Alaska	[1]
Southern Philippines	[34, 35, 61, 86]
Woodlark Basin	[1]
Mian-Lueyang, C. China	[67]
Jungar, N.W. China	[87]
Gangdese, S. Tibet	[88]

它们有中等 MgO 和高 Ni, Cr 含量, 显示出相当原始的成分特征. 这被认为是俯冲板块与地幔橄榄岩相平衡的产物[3,56,68]. 其他埃达克岩的研究也发现了类似的相当原始的成分特征. 此外, 近期的一项研究表明有一种原始镁质安山岩或低硅的埃达克岩变种, 它被认为是经过原生板块熔体交代的地幔橄榄岩熔融作用的产物[89,90]. 这种低硅埃达克岩在化学成分上不同于由原生的板块熔体以及与地幔橄榄岩相平衡的板块熔体形成的高硅埃达克岩. 与高硅埃达克岩相比, 低硅埃达克岩具有 LREE, Sr, Rb 含量低的特征, 在给定的 Y 含量条件下, 具低的 Sr/Y 比值(图 1). 这样, 无论采用那种分类方式, 总是有很多证据表明地幔橄榄岩直接或间接参与大多数埃达克岩的形成, 这一点对于我们全面认识埃达克岩的成因非常重要.

低硅埃达克岩并不会和碱性的、富集 HFSE(即富 Nb)的玄武岩(HNB)岩混淆, 虽然后者也被认为是形成于与板片熔体交代地幔相似的环境中[12,33,35,92]. 埃达克岩通常和富 Nb 玄武岩共生, 这种共生关系反过来又被看作是俯冲板块熔融的证据. 通常认为板块熔体在上升过程中与地幔橄榄岩发生平衡形成相对富 HFSE 的角闪石, 后来这些角闪石分解, 导致地幔楔 HFSE 的富积, 形成了富 Nb 玄武岩的交代地幔源区[12,33,35,78]. 不过目前仍然存在着争论, 因为一些原始的、高钾钙碱性的富 Nb 玄武岩的主、微量元素和 Sr-Nd 同位素数据显示出这些 HFSE 的源区可能不是被埃达克岩熔体交代的地幔橄榄岩, 而是地幔楔中富集组分的熔融导致了富 Nb 玄武岩 HFSE 的富集[93,94].

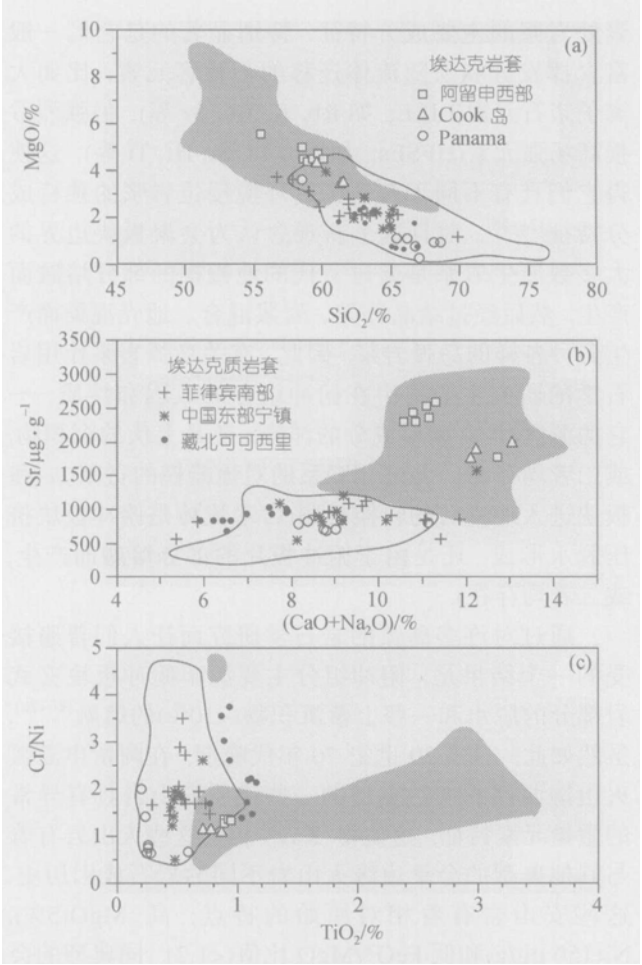


图 1

(a) MgO-SiO_2 图, (b) (CaO + Na_2O)-Sr 图和(c)TiO_2-Cr/Ni 图. 显示了低硅埃达克岩(灰色区域)和高硅埃达克岩(白色区域)之间化学成分的差异(根据文献[90]略有修改. 图中也显示出了代表性的埃达克岩[3,33,56,76]和埃达克质岩[43,67,91])

3 埃达克质岩产生的其他可能成因

前文已经指出, 有许多埃达克质岩, 它们具有与埃达克岩相同的地球化学特征(如表 1), 但并不是板块熔融的产物. 这些岩石的一个可能的成因是增厚的下地壳部分熔融[39~41,95~100]. 与埃达克岩一样, 这种成因的埃达克质岩可能是地壳初始熔体的产物, 也可能是与地幔橄榄岩发生了平衡或是反应的产物(如图 2). 更确切地说, 通常地壳熔体的 MgO 含量不

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高，但是有一些源于下地壳的埃达克质岩表现出高MgO，在给定 MgO 含量的条件下显示出低 FeO/MgO (或高 Mg#)和高相容元素(如 Cr, Ni)含量，这些特征清楚地表现出了熔体与地幔橄榄岩的平衡．特别是高镁的埃达克质岩石，被认为是源于拆沉下地壳熔融的产物[42,91,102~104]．最近一段时间，在中国东部报道了许多壳源埃达克质岩[42,67,91,97~100,104~107]，同时也有一些与板块熔融有关的埃达克岩的报道[67,87,88,106]．

与俯冲洋壳形成埃达克岩一样，镁铁质下地壳在石榴石为稳定相或残留相的条件下熔融形成埃达克质岩也得到了高压下玄武岩熔融实验的支持．不过，中国东部埃达克质岩是源于下地壳而不是大洋板块的主要证据却是来自于放射性同位素，特别是Sr和Nd同位素比值(如图2)，它们可以反映其岩浆源区的成分特征．中国东部埃达克质岩的这些同位素比值虽与大陆地壳不完全等同但非常相似，并与俯冲板块洋壳熔融形成的埃达克岩的同位素组成差异颇大．如图 2 所显示，其他地方报道的埃达克岩，其主要源于俯冲板块洋壳熔融，具有与洋壳类似的 Sr 和 Nd 同位素成分特点．另一个反对大多数中国埃达克质岩石来自俯冲板块的重要证据是埃达克质岩石形成时的大地构造环境以及其他的地球物理证据，亦即，中国埃达克质岩的形成在时空上与岛弧环境无关[42,91,100,104,105]．

埃达克质岩的另一种可能成因是通过玄武质母岩浆的分异．在构造复杂的菲律宾南部，几个地方出露一套早先被认为是源于板块熔融[34,35,61]的埃达克岩．详细的调查表明这些所谓的埃达克岩主要分布在 Camiguin 岛一小群年轻(<2 Ma)火山之中的安山岩和英安岩中，它们呈玄武岩、玄武安山岩的夹层产出，偶尔有流纹岩共生[34,35,38,61]．应该注意到以前将它们确定为埃达克岩的不妥之处是板块熔融的埃达克岩很少与玄武岩和玄武安山岩共生．如前所述，埃达克岩主要是与富 Nb 玄武岩或是与碱性系列的玄武岩共生，因此强烈的富集大离子亲石元素[1,12,33]．菲律宾南部的这些安山岩和英安岩被确定为板块熔体似乎主要是根据它们的化学特征，如符合图 3 和下面讨论的埃达克岩的鉴别标准，但在 Camiguin 岛上不同熔岩流之间有关联的时空分布以及熔岩统一的地球化学和同位素的特点清楚的表明它们是一套有成因联系、并且成分连续的从玄武岩到流纹岩岛弧火山岩演化系列组合[38]．地球化学的模拟表明这套安山岩和英安岩的形成与岩浆的结晶分异以及混合有关，也就是源于交代地幔楔的初始玄武岩浆先经历角闪石以及单斜辉石(±磷灰石)的结晶分异，之后不同分异程度的岩浆与周期性补充进岩浆房的初始岩浆混合，形成这套岩石．

Macpherson 等人[43]在研究了菲律宾南部其他地区(Surigao 半岛)的埃达克岩后，也认为这些先前被 Sajona 等人[34,35,61]报道为埃达克岩的岩石并不是板

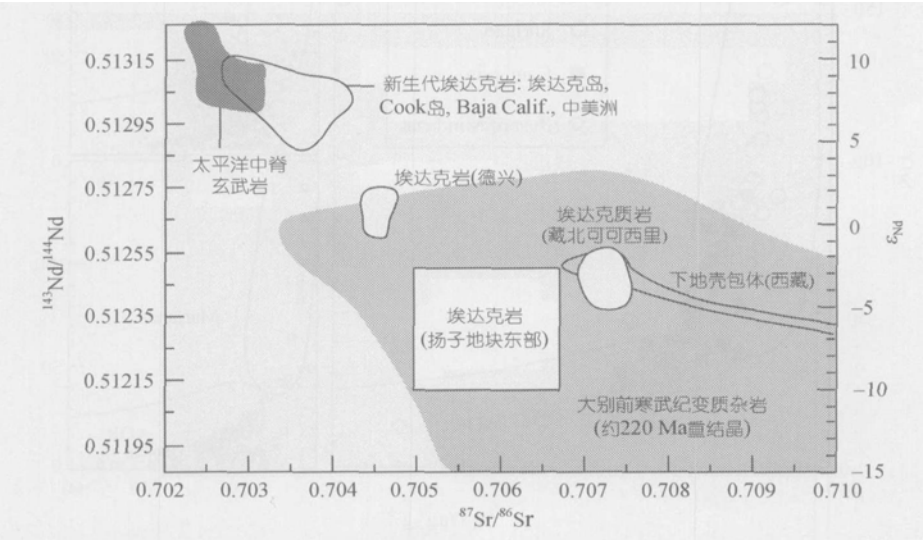


图 2 有关在中国报道的埃达克质岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$-$^{143}Nd/^{144}Nd$ 图[42,91,100]

图中也展示了其他区域的新生代埃达克岩[3,33,73,76,78]和大别变质混杂岩[101]．由图中可以看出埃达克质岩比那些埃达克岩成分更加不均一，并具有更高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和更低的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

块熔融的产物(图 3). 这些埃达克质岩的岩浆演化趋势类似于上地幔顶部条件下初始岛弧岩浆高压结晶分异的产物[109]. 结合大地构造方面的证据, Macpherson 等人[43]认为 Surigao 的埃达克质岩很可能是来自交代地幔楔的原始岛弧玄武岩浆进入下地壳形成了岩浆房, 并在高压下结晶分异的产物. 另外也有可能这些埃达克质岩是幔源岩浆在高压岩浆房内结晶演化的直接结果[43].

与在中国发现的埃达克质岩一样, 菲律宾南部的 Camiguin 和 Surigao 地区的埃达克质岩的非板块熔融成因也有野外地质、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素成分特征的支持[38,43]. 另外, 近期对包括 Surigao 在内的 Mindanao 的不同地区、与矿化有关的所谓“埃达克岩”的 Os 同位素研究也不支持板片熔融模型[110]. 在这个研究中, 几乎所有得到的 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值都与年轻的洋中脊或是正常的岛弧岩石类似, 这表明这些与埃达克质岩有关的亲铁元素源于地幔, 与地壳的关系不大, 而原先认为板块熔融的埃达克岩可能是亲铁元素富集的来源. 这意味着不仅在菲律宾南部而且可能在全球板块熔融的埃达克岩是亲铁元素富集源区的观点是不正确的[10~14]. 因此, 以前报道的在菲律宾南部、也许在全球其他地区的埃达克岩(表 2)是否是板块熔融所致值得怀疑[38,43,110~112].

4 讨论

15 年前, Defant 和 Drummond[1]出于良好的愿望定义了一类岩石——埃达克岩, 明确提出它们是俯冲板洋壳熔融的产物. 这个定义很快引起了研究者的广泛关注, 同时也引发了混乱. 一方面, 只要研究者发现了埃达克岩, 不管它的时代如何, 也不论它有什么样的岩石组合, 都可以把它当成是一种常规的工具, 即它不仅提供了一个现成的岩石成因的历史记录, 而且意味着在它出现的地区存在有年轻俯冲板块的新颖动力学模型. 另外一方面, 对那些具有与埃达克岩相同地球化学特点的火成岩、甚至先前就被认为是埃达克岩(如菲律宾南部和安第斯山北部)的详细研究已揭示出板块熔融模式的不足, 研究者根据研究地区的实际资料也提出了新的成因模型. 无论如何, 对于当前埃达克岩和埃达克质岩成因分歧的讨论是值得欢迎的, 因为这些研究将导致比板块熔

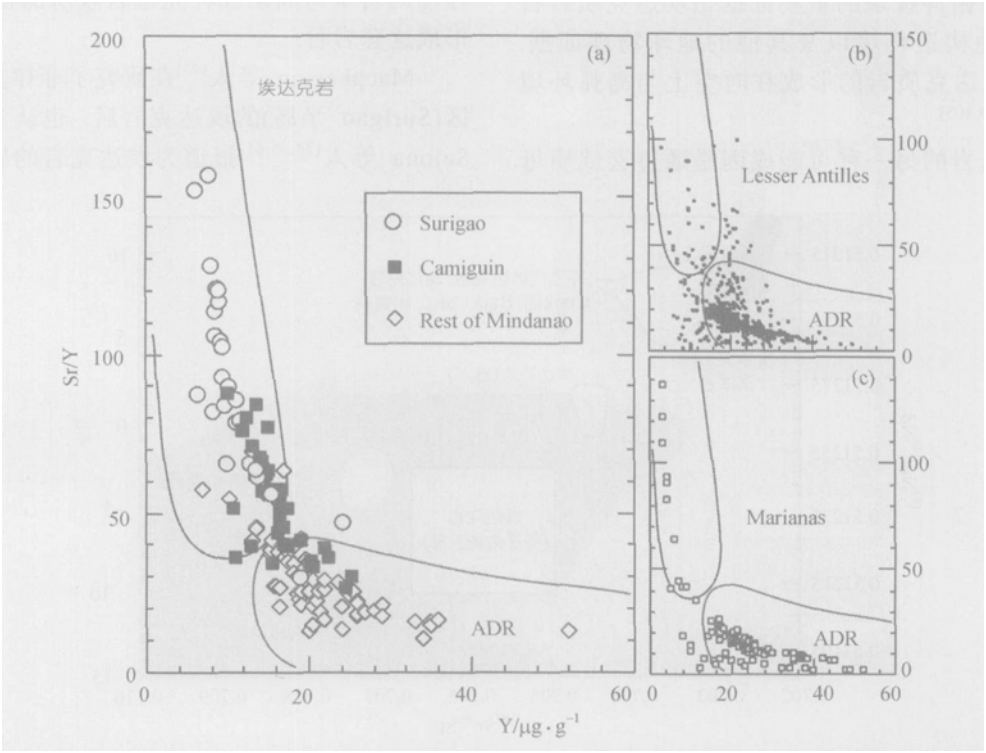


图 3 常用于区别埃达克岩和岛弧安山岩、英安岩和流纹岩(ADR)的 Sr/Y-Y 图(数据源于文献[38, 108])

虽然许多正常的岛弧熔岩位于 ADR 区域而埃达克岩位于埃达克岩的区域, 但仍然有一些岛弧火山岩系列连续穿越过上述两个区域, 例如: (a) 菲律宾群岛南部的岛弧火山岩[38], (b) Lesser Antilles 的岛弧火山岩[108], (c) 马里亚纳群岛的岛弧火山熔岩[108]

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

融模型本身更多的发现. 不过, 这种分歧也向我们提出了一个问题, 埃达克岩或埃达克质岩的正确成因是什么? 本文作者认为表 1 中所列的主要化学特征并不是板片熔融形成的埃达克岩所独有的, 埃达克岩和埃达克质岩在多种构造环境下都能够形成. 而且, 高 Sr/Y 和 La/Yb 比值和火成岩成因之间的联系指示了部分熔融或者岩浆分异过程中石榴石和/或角闪石相的存在. 不过, 谈论这个问题也许为时尚早, 更新更多的观察和数据不断涌现, 这将促进对埃达克岩或埃达克质岩成因的正确认识. 这篇回顾性的文章目前也不在于直接回答这个问题, 而在于指出导致对埃达克岩理解混乱的主要原因, 以利于正确看待这些不同成因模式.

毫无疑问的是在合适的物理化学条件下, 俯冲板块玄武岩可以发生熔融. 自然界中也有很多这样的证据: 在岛弧的橄榄岩中发现有埃达克质的玻璃质包裹体, 仰冲大洋板块中也发现有具埃达克岩成分的混合岩脉, 包体和矿物学的研究也表明存在板片熔体与地幔橄榄岩的平衡. 这些证据都强有力的证明了板片熔融的存在. 因此, 埃达克岩至少也最可能出现在一些岛弧带.

对埃达克岩误解的原因之一应该是其过于宽泛的概念. 尽管埃达克岩被认为源于很特殊的板片熔融, 但它却包括了很宽范围的岩石类型. 如前所述, 埃达克岩并不只是一种岩石, 而是包括了一系列的岛弧火山岩和侵入岩. 从初始熔体形成的富硅贫镁的岩石[1]到板片熔体与地幔楔平衡形成的富镁安山岩[3,68], 再到熔体交代的地幔楔熔融形成的高镁安山岩[89,90], 这些都属于埃达克岩范畴.

另一个让人误解的地方就是埃达克岩的岩石学和矿物学特征. 与一般的岛弧岩浆岩一样, 埃达克岩的矿物学和岩石学均有变化, 且通常只有斜长石是普遍存在的矿物相. 因此, 埃达克岩主要是根据岩石的地球化学特点来定义的, 亦即, 以其高 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 低 Y 和 Yb 含量来定义, 并用 Sr/Y-Y 和 La/Yb-Y 图解来判别. 普通的岛弧火山岩和埃达克岩在这两个图解中可以有效的区分区来, 特别是 Sr/Y-Y 图解. 尽管大多数的岛弧火山岩落入 ADR(安山岩、英安岩和流纹岩)区域, 不过还是有少数岛弧岩石在这两个图解中的投点会落在埃达克区与岛弧 ADR(安山岩、英安岩和流纹岩)区的过渡区. 例如, 在菲律宾南部的 Camiguin 和 Surigao 地区, 除了埃达克岩以外, 同属一套岩石系列的岛弧熔岩的成分点就在低 Sr/Y 的岛弧 ADR 区到高 Sr/Y 的埃达克岩区之间连续分布(图 3).

埃达克岩宽的地球化学和岩石学组成变化范围甚大, 这允许我们反推其初始板块熔体的分熔程度, 以及这些初始板块熔体上升到火山弧过程中未能被地幔橄榄岩混染. 实验研究表明这种富硅的熔体在通过地幔橄榄岩时将会迅速凝固[113]. Rapp 等人[89]的实验显示仅当"有效"的埃达克熔体∶橄榄岩<1∶1 的时候, 也得到相似的结果. 这样看来, 初始板块熔体可能只形成埃达克岩中的一小部分, 近期的研究也倾向于这种认识[114]. 换句话说, 大部分的埃达克岩是板块玄武质熔体与地幔橄榄岩相互平衡或者是被交代的地幔橄榄岩直接熔融的产物. 受到不同程度地幔橄榄岩影响的埃达克岩明显是大多数. 这也带来了另一个问题: 幔源的埃达克岩与以板片熔体为主交代地幔橄榄岩形成的岛弧岩浆有什么差异? 另外一点也很重要, 从一开始人们就认识到埃达克岩只是岛弧岩浆岩很小的一部分[1,3,31], 这在发现埃达岩地区也是如此(表 2). 这一点要归因于在俯冲带形成埃达克岩需要特殊的构造事件, 诸如年轻洋壳的消减、初始俯冲、俯冲碰撞、板片撕裂或是很低角度的俯冲等等.

在很多埃达克岩的研究中, 都把含水玄武岩(变质到含石榴石的岩石, 如含石榴石角闪岩或是榴辉岩)高压熔融实验的结果做为板块熔融的证据. 结合高 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 实验结果很容易给人错觉, 亦即, 以为实验结果支持板块熔融模型. 虽然说实验产生的熔体确实具有埃达克质的特点, 但其地球化学特征并不能反映一个特定的构造环境[111]. 如前所述, 如果没有放射性成因同位素数据、详细野外观察和地球物理的证据, 中国很多埃达克质岩、菲律宾南部以及安第斯山北段[111]的一些原先被认为是埃达克岩的岩石很容易被误认为板块熔融的结果.

最后, 尽管板块熔融机制尚难解释埃达克质岩(它们中的一些曾被确认为是埃达克岩), 但目前还没有一个理想模式来解释所有埃达克质岩石的成因. 不过, 这些多种埃达克质岩的成因模型不能被忽视, 因为它们是对流行板块熔融机制的挑战, 并且这些模型是基于更详细的野外调查、大地构造考虑、全面的地球化学和同位素分析以及严格的地球化学模拟

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而提出来的. 另外, 相对于埃达克岩, 埃达克质岩有着更多的源区. 虽然岩浆结晶分异和岩浆混合产生的埃达克质岩石可能只有在含角闪石, 并有周期性岩浆补充的岩浆房的情况下才能形成, 但下地壳部分熔融形成埃达克质岩可以在多种构造环境下发生, 比如俯冲带、陆陆碰撞、伸展环境等等. 高压下基性岩浆的结晶分异形成埃达克质岩石也可以在更多的构造环境中出现. 这些埃达克质岩可产出在多种构造背景, 这与埃达克岩只出现在现代或古俯冲带, 形成了鲜明的对比. 简而言之, 板块熔融的埃达克岩的量远远小于其他过程/环境下形成的埃达克质岩. 这意味着缺少了太古代的高地温梯度, 板块熔融已经不再是形成大规模 TTG 的有效机制[5, 90].

5 结论

埃达克岩是一个相对新的岩石学概念, 它的本意是指俯冲大洋板块洋壳玄武岩部分直接熔融形成的一组富硅的岛弧火山岩. 它的定义主要依靠岩石的化学特征, 特别是高 Sr/Y 和 La/Yb 比质及低 Y 和 Yb 含量. 埃达克岩曾被认为主要是由年轻洋壳直接熔融的产物. 含水玄武岩体系的高压熔融实验结果以及一些野外和矿物学的资料也支持板块熔融的可能性. 不过, 实验研究也表明初始板块熔体在通过地幔楔时会迅速固结而丧生, 因此现代岛弧的大部分埃达克岩可能主要是岩浆混合物、或者是熔体交代的地幔楔的熔融产物. 无论如何, 板块熔融很可能在俯冲带发生, 因此至少是俯冲带组分的重要来源.

有关埃达克岩成因的混乱起因于埃达克岩定义的扩大化. 就目前而言, 它也包括原先被认为是幔源的岛弧火成岩. 此外, 化学特征是现在判断埃达克岩为板片熔体的惟一证据, 但是诸多在岛弧或是非岛弧环境下形成的火成岩也具有类似的化学特征. 这些特征是因岩浆源区有石榴石或/和角闪为残留相的缘故. 详细的研究表明, 这些埃达克质岩以及一些先前被认为是“埃达克岩”的岩石至少有一些并不是由板块熔融产生. 它们可以通过周期性补给的岩浆房内含角闪石玄武岩浆的低压结晶分异形成, 可以在下地壳条件下玄武岩浆高压结晶分异形成, 可因变质玄武岩分熔形成, 也可因镁铁质下地壳熔融形成. 这些多种成因模型也与实验岩石学研究、野外观察、微量元素模拟的结果相一致, 并且得到放射性同位素资料的支持. 此外, 由于这些埃达克质岩的一部分并不限于俯冲带环境, 它们相对于埃达克岩而言体积更大, 量更多, 分布更广, 所以更为重要. 综上所述, 高 Sr/Y 和 La/ Yb 比值以及低 Y, Yb 含量的火成岩并不一定是板块熔融的产物, 在研究时我们需要格外小心.

致谢 非常感谢牛耀龄先生的邀请. 在写作过程中, C. McPherson 和 G. Pearson 提供了他们关于菲律宾南部尚未发表的研究结果. Y. Tatsumi, T. Elliot, W. Leeman, Y. Niu 及另一审稿人提供了建议性意见, 在此深表谢意. 中文稿由陈建林、董彦辉、许继峰翻译, 牛耀龄校对. 本文部分工作受美国 OCE0203636 项目资助.

参 考 文 献

1 Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 1990, 347: 662~665
2 Rollinson H, Martin H. Geodynamic controls on adakite, TTG and sanukitoid genesis: Implications for models of crust formation, Introduction to the Special Issue. Lithos, 2005, 79: ix~xii
3 Kay R W. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust. J Volcanol Geotherm Res, 1978, 4: 117~132
4 Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust. Earth Planet Sci Lett, 1994, 121: 227~244
5 Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archaean to modern comparisons. J Geophys Res, 1990, 95: 21503~21521
6 Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. Lithos, 1999, 46: 411~429
7 Smithies R H. The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. Earth Planet Sci Lett, 2000, 182: 115~125
8 Kamber B S, Ewart A, Collerson K D, et al. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archean crustal growth models. Cont Mineral Petrol, 2002, 144: 38~56
9 Condie K C. TTGs and adakites: Are they both slab melts? Lithos, 2005, 80: 33~ 44
10 Thiéblemont D, Stein G, Lescuyer J L. Epithermal and porphyry deposits: The adakite connection. Comptes Rendus de l’Académie des Sciences, Paris, 1997, 325: 103~109
11 Sajona F G, Maury R C. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. Comptes Rendus de l’Académie des Sciences, Paris, 1998, 326: 27~34
12 Defant M J, Kepezhinskas P. Evidence suggests slab melting in arc magmas. EOS, 2001, 82: 62~70
13 Oyarzún R, Márquez A, Lillo J, et al. Giant vs small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic vs normal calc-alkaline magmatism. Mineral. Deposita, 2001, 36: 794~798
14 Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. Geology, 2002, 30: 915~918
15 Armstrong R L. A model for the evolution of strontium and lead

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

isotopes in a Dynamic Earth. Rev Geophys, 1968, 6: 175~199
16 Nicholls A, Ringwood A E. Effect of water on olivince stability in tholeiites and the production of silica-saturate magmas in the island arc environment. J Geol, 1973, 81: 285~300
17 Sekine T, Wyllie P J. Phase relationships in the system KAlSiO$_4$-SiO$_2$-H$_2$O as a model for hybridization between hydrous siliceous melts and peridotite. Contrib Mineral Petrol, 1982, 79: 368~374
18 Marsh B D. Some Aleutian andesites: Their nature and source, J Geol, 1976, 84: 27~45
19 Brophy J G, Marsh B D. On the origin of high-alumina arc basalt and the mechanics of melt extraction. J Petrol, 1986, 27: 763~789
20 Davidson J P. Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism. In: Bebout G. E, et al, eds. Subduction: Top to bottom. Am Geophys U Geophys Mono, 1996, 96: 251~262
21 Tatsumi Y, Hamilton D L, Nesbitt R W. Chemical characteristics of fluid phase from the subducted lithosphere: Evidence from high-pressure experiments and natural rocks. J Volcanol Geotherm Res, 1986, 29: 293~309
22 Gill J B. Orogenic Andesites and Plate Tectonics. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 358
23 Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M, et al. Mantle and slab contributions in arc magmas. Ann Rev Earth Planet Sci, 1993, 21: 175~204
24 Perfit M R, Gust D A, Bence A E, et al. Chemical characteristics of island arc basalts: Implications for mantle sources. Chem Geol, 1980, 30: 227~256
25 Woodhead J, Eggins S, Gamble J. High field strength and transition element systematics in island and back-arc basin basalts: Evidence for multi-phase extraction and a depleted mantle wedge. Earth Planet Sci Lett, 1993, 114: 491~504
26 Othman D B, White W M, Patchett J. Geochemistry of marine sediments, island arc magma genesis and crust-mantle recycling. Earth Planet Sci Lett, 1989, 94: 1~21
27 Elliot T, Plank T, Zindler A, et al. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. J Geophys Res, 1997, 102: 14991~15019
28 Plank T, Langmuir C. The chemical composition of subducting sediment and its consequences fro the crust and mantle. Chem Geol, 1998, 145: 325~394
29 Condie K C, Swenson D H. Compositional variations in three Cascade stratovolcanoes: Jefferson, Rainier and Shasta. Bull Volcanol, 1973, 37: 205~320
30 Lopez-Escobar L. Petrology and chemistry of volcanic rocks of the Southern Andes. In: Harmon R S, Barreiro B A, eds. Andean Magmatism, Chemical and Isotopic Constraints. Shiva Geology Series, 1984, 47~71
31 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 Vol Geotherm Res, 1987, 32: 223~245
32 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
33 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, 1992, 149: 569~579
34 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
35 Sajona F G., Bellon H, Maury R C, et al. Magmatic response to abrupt changes in geodynamic settings: Pliocene-Quaternary calc-alkaline lavas and Nb enriched basalts of Leyte and Mindanao (Philippines). Tectonophys., 1994, 237: 47~72
36 Drummond M S, Defant M J, Kepezhinskas P K. The petrogenesis of slab derived trondhjemite-tonalite-dacite adakite magmas. Trans R Soc Edinburgh: Earth Sci, 1996, 87: 205~216
37 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 Petrol, 1995, 36: 1505~1527
38 Castillo P R, Janney P E, Solidum R. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights into the source of adakite and other lavas in a complex arc tectonic setting. Contrib Mineral Petrol, 1999, 134: 33~51
39 Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. Nature, 1993, 362: 144~146
40 Arculus R J, Lapierrre H, Jaillard E. Geochemical window into subduction and accretion processes: Raspas metamorphic complex, Ecuador. Geology, 1999, 27: 547~550
41 Yumul G P Jr, Dimalanta C B, Faustino D V, et al. Silicic arc volcanism and lower crust melting: an example from the central Luzon, Philippines. J Geo., 1999, 154: 13~14
42 Xu J, Shinjio R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? Geology, 2002, 12: 1111~1114
43 Macpherson C G, Dreher S T, Thirwall M F. Adakites without slab melting: high pressure processing of basaltic island arc magma, Mindanao, the Philippines. Earth Planet Sci Lett (in press)
44 Beard J S, Lofgren G E. Effect of water on the composition of partial melts of greenstones and amphibolites. Science, 1989, 144: 195~ 197
45 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: 465~501
46 Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite, eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalities. Precambrian Res, 1991, 51: 1~25
47 Rushmer T. Partial melting of two amphibolites: Contrasting experimental results under fluid-absent conditions. Contrib Mineral Petrol, 1991, 107: 41~59
48 Winther T K, Newton R C. Experimental melting of anhydrous low-K tholeiite: Evidence on the origin of Archaean cratons. Bull Geol Soc Den, 1991: 39
49 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. Contrib Mineral Petrol, 1991, 44: 151~ 179
50 Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

amphibolite at 1.5 and 2.0 Gpa: implications for the origin of adakites. Contrib Mineral Petrol, 1994, 117: 394~409
51 Schiano P, Clochiatti R, Shimizu N, et al. Hydrous, silica-rich melts in the sub-arc mantle and their relationships with erupted arc lavas. Nature, 1995, 377: 595~600
52 Sorensen S S. Petrology of amphibolite–facies mafic and ultramafic rocks from Catalina schist, southern California: Metamorphism and migmatisation in a subduction zone metamorphic setting. J Met Geol, 1988, 6: 405~435
53 Sorensen S S, Barton M D. Metasomatism and partial melting in a subduction complex: Catalina schist, southern California. Geology, 1987, 15: 115~118
54 Sorensen S S, Grossman J N. Enrichment in trace elements in garnet amphibolites from a paleo-subduction zone: Catalina schist, southern California. Geochim Cosmochim Acta, 1989, 53: 3155~3177
55 Bebout G E, Barton M D. Metasomatism during subduction: Products and possible paths in the Catalina schist, California. Chem Geol, 1993, 108: 61~92
56 Yogodzinski G M, Kelemen P B. Slab melting in the Aleutians: Implication of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt. Earth Planet Sci Lett, 1998, 158: 53~65
57 Tatsumi Y, Ishizaka K. Origin of high-magnesian andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan, I. Petrographical and chemical characteristics. Earth Planet Sci Lett, 1982, 60: 293~304
58 Tatsumi Y. Geochemical modeling of partial melting of subducting sediments and subsequent melt-mantle interaction: Generation of high-Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, Southern Japan. Geology, 2001, 29: 323~326
59 Rogers G, Saunders A, Magnesian andesites from Mexico, Chile and the Aleutian Islands: Implications for magmatism associated with ridge-trench collision. In: Crawford A J, ed. Boninites. London: Unwin Hyman, 1989. 416~445
60 Smith D R, Leeman W P. Petrogenesis of Mount St. Helens dacitic magmas. J Geophys Res, 1987, 92: 10313~10334
61 Sajona F G, Maury R C, Pubellier M, et al. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). Lithos, 2000, 54: 173~206
62 Yogodzinski G M, Lees J M, Churikova TG, et al. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plates edges. Nature, 2001, 409: 500~ 504
63 Calmus T, Aguillon-Robles A, Maury R C, et al. Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites (bajaites) from Baja California, Mexico: The role of slab melts. Lithos, 2003, 66: 77~105
64 Gutscher M A, Maury F, Eissen J P, et al. Can slab melting be caused by flat subduction? Geology, 2000, 28: 535~ 538
65 Beate B, Monzier M, Spikings R, et al. Mio-Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: The Quimsacocha volcanic center. Earth Planet Sci Lett, 2001, 192: 561~570
66 Bourdon E, Eissen J P, Monzier M, et al. Adakite-like lavas from Antisana volcano (Ecuador): Evidence from slab melt metasomatism beneath the Andean Northern volcanic zone. J Petrol, 2002, 43: 99~217
67 Xu J, Wang Q, Yu X Y. Geochemistry of high-magnesian andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Plaeo-Tethyan crust. Geochem J, 2000, 34: 359~377
68 Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets 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
69 Myers 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
70 Lopez-Escobar L, Frey F A, Vergara M. Andesites and high-alumina basalts from Central South Chile high Andes: Geochemical evidences bearing to their petrogenesis. Contrib Mineral Petrol, 1977, 63: 199~ 228
71 Martin H. Archaean and modern granitoids as indicators of changes in geodynamic processes. Rev Bras Geocienc, 1987, 17: 360~365
72 Futa K, Stern C R. Sr and Nd isotopic and trace element compositions of quaternary volcanic centres of the southern Andes. Earth Planet Sci Lett, 1988, 88: 253~262
73 Kay S M, Ramos V A, Marquez M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks of slab melting prior to ridge trench collision in southern South America. J Geol, 1993, 101: 703~714
74 Bourgois J, Lagabrielle Y, Le Moigne J, et al. Preliminary results on a field study of the Taitao ophiolite Southern Chile: Implications for the evolution of the Chile Triple Junction. Ophioliti, 1994, 18: 113~129
75 Guivel C, Lagabrielle Y, Bourgois J, et al. Magmatic reponses to active spreading ridge subduction: Multiple magma sources in the Taitao Peninsula region 468–478 S, Chile triple junction, Third International Symposium on Andean geodynamics ISAG 96 Saint-Malo, France. ORSTOM editeur, 1996. 575~578
76 Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Austral Volcanic Zone. Contrib Mineral Petrol, 1996, 123: 263~281
77 Sigmarsson O, Martin H, Knowles J. Melting of a subducting oceanic crust in Austral Andean lavas from U-series disequilibria. Nature, 1998, 394: 566~569
78 Aguillón-Robles A, Caimus T, Bellon H, et al. Late Miocene adakite and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California. Geology, 2001, 29: 531~534
79 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: 541~550
80 Monzier M, Robin C, Samaniego P, et al. Sangay volcano, Ecuador: Structural development, present activity and petrology. J Volc Geotherm Res, 1999, 90: 49~79
81 Samaniego P, Martin H, Robin C, et al. Transition from calc–alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: Insights into slab melts and mantle wedge interactions. Geology, 2002, 30: 967~ 970
82 Morris P A. Slab melting as an explanation of Quaternary volcan-

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ism and aseismcity in Southwest Japan. Geology, 1995, 23: 395~398

83 Kepezhinskas P K. Origin of the hornblende andesites of northern Kamchatka. Int Geol Rev, 1989, 31: 246~252

84 Honthaas C, Bellon H, Kepezhinskas P K, et al. Nouvelles datations 40 Kr/40 Ar du magmatisme cretace quaternaire du Kamchatka du Nord Russie. C R Acad Sci Paris, 1990, 320: 197~204

85 Kepezhinskas P K, Defant M J, Drummond M S. Progressive enhancement of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka adakites. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60: 1217~1229

86 Maury R C, Sajona F G., Pubellier M, et al. Fusion de la croute oceanique dans les zones de subduction r collision recentes: l'exemple de Mindanao, Philippines. Bull Soc Geol France, 1996, 167: 579~595

87 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 等. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物. 科学通报, 2001, 46: 684~688

88 Qu X M., Hou Z Q, Li Y G. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau. Lithos, 2004, 74: 131~148

89 Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. Chem Geol, 1999, 160: 335~356

90 Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. Lithos, 2005, 79: 1~24

91 Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, et al. Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. Geochem J, 2004, 38: 417~434

92 王强, 赵振华, 白正华, 等. 新疆阿拉套山石炭纪埃达克岩、富 Nb 岛弧玄武质岩: 板片熔体与地幔橄榄岩相互作用及地壳增生. 科学通报, 2003, 48: 1342~1349

93 Wallace P J, Carmichael I S E. Quaternary volcanism near the Valley of Mexico: Implications for subduction zone magmatism and the effects of crustal thickness variations on primitive magma compositions. Contrib Mineral Petrol, 1999, 135: 291~314

94 Castillo P R, Solidum R U, Punongbayan R S. Origin of high field strength element enrichment in the Sulu Arc, southern Philippines, revisited. Geology, 2002, 30: 707~710

95 Rudnick R L. Making continental continental crust. Nature, 1995, 378: 571~578

96 Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith. Peru J Petrol, 1996, 37: 1491~1521

97 Xiong X L, Li X H, Xu J F, et al. Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate: The Late Cretaceous Zhantang andesites in the Huichang Basin, SE China. Geochem J, 2001, 37: 233~252

98 Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, et al. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. Geology, 2003, 31: 1021~1024

99 Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 2004, 220: 139~155

100 Wang Q, McDermott F, Xu J F, et al. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting. Geology, 2005, 33: 465~468

101 Ma C, Li Z, Ehlers C, et al. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitiod plutons from the Dabie high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China. Lithos, 1998, 45: 431~457

102 Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism. Tectonophys., 1993, 219: 177~189

103 Kay R W, Kay S M. Andean adakites: Three ways to make them. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18: 303~311

104 Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 2004, 432: 892~897

105 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: 248~255

106 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: 236~244

107 Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, et al. Adakites: Some variations on a theme. 岩石学报, 2002, 18: 129~142

108 GEOROC electronic database. Max Planck Institut fur Chemie, Mainz, Germany. http: //georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/Entry.html

109 Müntener O, Kelemen P B, Grove T L. The role of H_2O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: An experimental study. Contrib Mineral Petrol, 2001, 141: 643~658

110 Dreher S T, Macpherson C G, Pearson D G, et al. Re-Os isotope studies of Mindanao adakites: Implications for sources of metals and melts. Geology, 2005, 33: 957~960

111 Garrison J M, Davidson J P. Dubious case for slab melting in the northern volcanic zone of the Andes. Geology, 2003, 31: 565~ 568

112 Solidum R U, Castillo P R, Hawkins J W. Geochemistry of lavas from Negros Arc, west central Philippines: Insights into the contribution from the subducting slab. Geochem Geophys Geos, 2003, 4: 1~26

113 Yaxley G M, Green D H. Reactions between eclogite and peridotite; mantle refertilisation by subduction of oceanic crust. Bull Suisse Mineral Petrogr, 1998, 78: 243~255

114 Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, et al. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. Nature, 2001, 410: 197~200

(2005-09-23 收稿, 2005-12-04 接受)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net