科学通报 2010 年 第 55 卷 第 13 期：1255 ~ 1267
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

干的基性大陆下地壳部分熔融：对C型埃达克岩成因的制约

黄方[①], 何永胜[②]

① Institute of Geochemistry and Petrology, ETH Zurich, 8092 Zurich, Switzerland;
② 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026
E-mail: huangfang426@hotmail.com

2009-12-04 收稿, 2010-02-22 接受
国家自然科学基金(批准号: 40773013)资助项目

摘要 C 型埃达克岩通常被认为是基性下地壳高压下石榴子石残留时的部分熔融产物, 其依据主要来自含水玄武质岩石在高压下部分熔融的实验结果. 但是因为大陆基性下地壳一般不含大量的水, 这些含水实验的结果不能用来说明干的下地壳的熔融过程. 由于目前尚缺乏关于干的基性岩石部分熔融的系统的实验数据, 本文用 MELTs 程序来模拟干的基性下地壳在 1~2 GPa 下的部分熔融. 模拟和实验资料均表明, 无论压力如何变化(1~3 GPa), 熔融比例超过 20%时, 干的基性下地壳大比例部分熔融不能产生 C 型埃达克岩的高硅含量(~70%). 虽然 1~2 GPa 时, 文献中有限的几个干的基性岩石熔融实验结果显示, 低比例熔融(<10%)不能产生高硅的岩浆, 但是 MELTs 程序模拟显示压力高于 1.8 GPa 时, 如果熔体的 SiO_2 含量主要由残留的石榴子石控制, 低比例熔融则可以产生少量高 K_2O/Na_2O 的英安质熔体. 模拟进一步说明, 压力低于 1.8 GPa 时, 大量斜长石在残留相的存在使得熔体的 SiO_2 (<62%)远远低于中国东部出露的高硅 C 型埃达克岩. 考虑到产生高硅熔体需要的高温和深度以及极端亏损重稀土的性质, 我们推测这种熔体很容易受到其他壳源岩浆的混染, 这可能导致在地表出露的真正的由榴辉岩熔融形成的 C 型埃达克岩非常有限. 高 Sr/Y 和 La/Yb 可以由包括石榴子石作用的多种因素(产生例如继承源区和单斜辉石分异), 因此用这两个指标判别是否为埃达克岩是有问题的. 我们提出强烈的中重稀土分异(例如高的 Gd/Yb)以及高度右倾的稀土元素分配模式可能是判别石榴子石的作用以及埃达克岩的更好的指标. 另外, 由于熔体的 Eu 异常取决于源区性质, 岩浆体系的氧逸度, 以及斜长石和基性矿物之间的比例, Eu 异常不能简单地用来指示斜长石在岩浆过程中的作用.

关键词
C 型埃达克岩
MELTs 程序
基性大陆下地壳
榴辉岩熔融
Eu 异常

Defant 和 Drummond[1]最早把一类具有高 Sr/Y 和 La/Yb, 高 Sr 和低 Y 和 Yb 的现代岛弧岩浆岩命名为埃达克岩(adakite). 在此之前, Kay[2]发现 Aluetian 的 Adak 岛发育了具有富集大离子亲石元素和高 Sr/Y 特征的高镁安山岩, 并解释为年轻的俯冲洋壳在高压下低比例部分熔融产生的熔体和地幔橄榄岩相互作用的结果[2]: 因为俯冲洋壳年轻, 其温度足够高能够部分熔融; 因为熔融时的压力高(>3 GPa), 所以石榴子石残留源区, 这导致重稀土元素(HREE)和 Y 亏损和高 La/Yb 和 Sr/Y. 除了以上特定的微量元素特征, 这些最早被研究的埃达克岩和典型的岛弧钙碱性岩浆岩比较, 一般还具有高 Na_2O 和低 K_2O 因此低 K_2O/Na_2O(~0.5)的特点, 此外它们的 Mg#和 Cr-Ni 含量也相对较高[1,3~6]. 大量的实验岩石学研究证明, 含水的

英文版见: Huang F, He Y S. Partial melting of the dry mafic continental crust: Implications for petrogenesis of C-type adakites. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-0224-1

俯冲洋壳在深度足够的情况下低比例熔融的确可以产生高 Sr/Y 和 La/Yb 的高 SiO_2 熔体[7~9], 这种熔体如果和地幔橄榄岩相互作用, 则产生高 Mg#[10]. 后来更多的研究表明, 埃达克岩可以在不同的构造条件下, 通过多种不同的方式形成, 例如拆沉的下地壳熔融[11], 底垫的玄武岩在地壳深部部分熔融[12], 平俯冲的陆壳熔融[13], 深部岩浆在下地壳分离结晶石榴子石和角闪石[14~16], 以及岩浆混合[17,18]. 除了岩浆混合, 大多数学者认为石榴子石控制岩浆的中重稀土和 Y 含量是形成埃达克岩的关键.

高 Sr/Y 和 La/Yb 的中酸性岩浆岩在中国广泛出露, 并引起中国学者深厚的兴趣. 结合中国复杂的地质背景, 中国学者们利用埃达克岩高 Sr/Y 因此可能反映石榴子石的参与以及较高的熔融深度这一解释, 对中国各个构造体系的演化、岩浆作用以及成矿过程提供重要制约[11,17~49]. 和典型的岛弧发育的埃达克岩比较, 很多中国的埃达克岩具有明显较高的 K_2O 含量和 K_2O/Na_2O(~1)和低镁的特点[20~22,41,50,51], 因此也被定义为 C 型埃达克岩(或者 continental-type adakite)[20]. 很多 C 型埃达克岩的文章讨论增厚的岩石圈减薄问题(例如华北克拉通和大别苏鲁造山带)[19,41,42,52]. Wang 等人[41]和 Xu 等人[52]报道了在大别山发育的早白垩纪低 Mg 埃达克岩, 他们认为这些岩石是在增厚造山带内, 大陆榴辉岩下地壳部分熔融的产物. 根据高 Sr/Y 中酸性火成岩的分布, 类似的论述也曾用来推测华北克拉通在中生代存在一个像青藏一样的东部高原[20~22]. 但是 Jiang 等人[39]最近提出不同的观点, 因为华北克拉通北缘发育的两个埃达克岩质岩体的年龄为 235 Ma, 大大早于华北燕山期大规模岩浆作用和岩石圈减薄的时代(~130 Ma), 他们认为华北的低镁埃达克岩可能是古老下地壳在不太深的压力下部分熔融产生的, 而源区残留的单斜辉石分进一步异 Sr 和 Y 造成高 Sr/Y. Moyen[53]最近针对 C 型埃达克岩特别提出, C 型埃达克岩可以由很多原因形成, 因此其解释具有高度的不确定性. 归根结底, 高 Sr/Y 和 La/Yb 是高压下榴辉岩熔融石榴子石控制岩浆作用, 还是低压下多种因素(例如源区以及其他矿物)分异 Sr-Y 和 La-Yb 而产生的? C 型埃达克岩是否具有指示增厚陆壳的构造意义?

理解源区性质和岩浆作用过程对 C 型埃达克岩的地球化学特征的影响是解决这些争议的关键所在. 因此, 本文在综合目前可以获得的基性大陆下地壳的主要元素成分的基础上, 模拟干的基性下地壳和中地壳在不同深度和温度下的部分熔融, 研究熔体和残留矿物的地球化学特征, 并结合目前仅有的实验岩石学资料, 为正确理解埃达克岩的地球化学特征及其构造意义提供重要的制约.

1 大陆基性下地壳的化学组成: 干的还是湿的?

大部分中国学者认为在中国广泛发育的 C 型埃达克岩来自于榴辉岩质的基性下地壳. 这个基性的下地壳可以是增厚的[20~22,27,28,32,33,41,42,52], 拆沉的[11,19,42]或者深俯冲的[13]. 最重要的实验依据主要是含水的榴辉岩在高压下熔融产生的高 SiO_2 熔体的主微量元素非常类似于埃达克岩[7~9,51,54]. 但是, 我们需要特地强调的是, 这些实验的初始物质包括角闪岩, 含水榴辉岩和玄武岩, 毫无例外的含有大量的水, 其含量可以达到 6% (质量分数, 下同). 毫无疑问, 这些实验结果完全可以应用到俯冲带中蚀变洋壳的脱水部分熔融, 但是是否可以用来模拟增厚的大陆下地壳, 特别是基性榴辉岩下地壳熔融还值得商榷. 原因很简单, 经过早期麻粒岩相变质的基性的大陆下地壳是干的. 这个被广泛接受的结论的证据来自早期下地壳的包体的地球化学研究[55]、麻粒岩相变质过程中脱水的理论模拟[56]、以及对下地壳的电导率和地震波的研究[57]. 最近的研究表明, 来自下地壳麻粒岩包体的名义上不含水矿物的水含量虽然最多可以到 2000 ppm(1 ppm=1 μg/g), 但是大多数仍然在 1000 ppm 以下[58,59], 比以上这些实验中使用的初始物质的水含量低了一个数量级. 虽然中国东部的下地壳包体中也有一些含水矿物, 例如黑云母和角闪石, 但是就比例而言并不高[60~63].

在深俯冲陆壳折返过程中, 富水流体(特别是退变质流体)广泛存在于超高压变质岩中[64,65]. 但是, 超高压变质岩不均一的氧同位素组成说明俯冲陆壳中的流体只是在小尺度内作用[66], 并且所引起的脱水熔融作用也主要集中较小的范围内[67,68]. 这说明, 相对于洋壳俯冲, 陆壳俯冲带流体活动的尺度和作用的范围都是有限的[65], 这也支持下地壳是干的结论. 虽然大别-苏鲁地表出露的变质岩中有很多含水矿物(例如文献[64~69]), 如多硅白云母和退变质形成的角闪石等, 但是这些含水矿物的体积有限, 使得大别山的榴辉岩质下地壳的水含量远远低于俯冲的

蚀变洋壳. 相比于干榴辉岩部分熔融, 加入水从根本上改变了榴辉岩的熔融过程. 水可以使得榴辉岩的熔点降低, 熔融可以发生的温压条件变宽, 同时因为残留矿物相中出现大量角闪石(SiO_2在43%左右), 这使得产生的熔体的SiO_2可以高达70%左右[8~10]. 所以, 含水基性岩石在高压下部分熔融的实验结果不能用来直接和干的基性下地壳部分产生的熔体的化学成分进行对比. 很多学者引用Drummond和Defant[1]提出的从现代岛弧环境得出的判别模式图[11,13,19~22,27,28,32,33,41,42,52], 通过含水玄武质岩石(例如角闪榴辉岩和石榴角闪岩)产生的熔体具有高La/Yb和Sr/Y和低Yb和HREE特征来说明C型埃达克岩是来自干的基性下地壳的熔体, 这显然是有待商榷的.

要搞清楚C型埃达克岩是否可以来自基性的榴辉岩下地壳部分熔融, 我们首先需要了解基性下地壳的成分. 由于下地壳样品出露地表太少, 目前我们对大陆下地壳的地球化学成分的了解远远不及上地壳. 下地壳的化学成分主要来自地震波速度和下地壳麻粒岩包体的的制约[60,70~79]. Rudnick和Gao[78]中报道的下地壳主要元素数据来自7%的英云闪长岩包体和93%的基性包体的平均值, 但是目前文献中尚没有比较综合的基性下地壳的成分发表[78]. 我们利用Rudnick和Gao[78]一文中使用的文献数据, 剔除掉和金伯利岩共生的麻粒岩包体以避免金伯利岩对钾的污染, 同时剔除掉SiO_2高于53%的样品. 我们得到一共167个基性包体的平均值列在表1中. 大别山已发现的来自下地壳的榴辉岩包体非常少[80], 这样大别山榴辉岩质下地壳的成分也不得而知. 所以我们把文献中177个大别-苏鲁出露的基性超高压变质岩的数据进行综合平均, 其中绝大多数样品是自地表露头和东海的超深钻(CCSD)项目的榴辉岩. 表1中也列出了中地壳和MORB的成分进行比较.

大别-苏鲁基性变质岩的平均值和基性下地壳的主要元素成分大致类似. 大别-苏鲁基性变质岩SiO_2为46.65%, 略低于平均的基性下地壳包体成分(48.06%). 前者的Na_2O和K_2O含量分别为2.40%和0.33%, 非常接近全球下地壳的2.40%和0.38%(图1), 和迄今为止在大别山发现的两个原岩为下地壳麻粒岩的榴辉岩包体的成分类似(刘贻灿, 个人通讯). 榴辉岩中石榴子石和单斜辉石不含钾, 这些少量的钾可能赋存于榴辉岩的一些次要矿物, 例如多硅白云母和角闪石中(例如文献[64~69]). 这些富水的矿物特别是白云母也富钾, 因此干的基性超高压变质岩必然也低钾, 类似于基性下地壳(表1). 因此我们可以初步结论, 基性下地壳的K_2O/Na_2O比较低(0.16), 类似于富钾的MORB[81], 远远低于C型埃达克岩(~1)[41,51]和平均的中地壳(0.68)[78]. 这为C型埃达克岩的成因提供了非常重要的源区制约.

2 用MELTs程序模拟基性下地壳熔融

含水基性岩高压部分熔融实验的结果被很多中国学者引用来对比说明C型埃达克岩的成因[11,13,19~22,27,28,32,33,41,42,52], 但是如前所述, 这些实验的初始物质含水量大大高于大陆的基性下地壳. 因为目前非常缺乏干的基性玄武质岩石在增厚地壳的构造

表1 基性下地壳、中地壳、大别-苏鲁基性变质岩, N-MORB和富钾MORB的主要元素含量(%)

	基性下地壳 a)	中地壳 b)	大别-苏鲁基性变质岩 c)	N-MORB d)	富钾MORB e)
SiO_2	48.06	63.50	46.65	49.51	50.35
TiO_2	1.11	0.69	2.06	0.90	1.49
Al_2O_3	16.03	15.00	14.28	16.75	16.53
FeO_{Total}	9.60	6.02	12.91	8.05	9.83
MnO	0.17	0.10	0.23	0.14	0.17
MgO	9.15	3.59	8.41	9.74	7.94
CaO	11.07	5.25	10.02	12.50	9.60
Na_2O	2.40	3.39	2.40	2.18	3.49
K_2O	0.37	2.30	0.33	0.065	0.44
P_2O_5	0.23	0.15	0.39	0.095	0.16
TOTAL	98.19	99.99	97.67	99.93	100.00
K_2O/Na_2O	0.16	0.68	0.14	0.03	0.13

a) 根据Rudnick和Gao[78]中使用的下地壳包体的文献数据, 剔除掉和金伯利岩共生和SiO_2 > 53%后的167个基性包体样品的平均值; b) 来自Rudnick和Gao[78]; c) 177个大别-苏鲁造山带出露的基性变质岩样品的平均值. 数据来源: 文献[69,104~114]. d) 来自文献[115]; e) 来自文献[81]

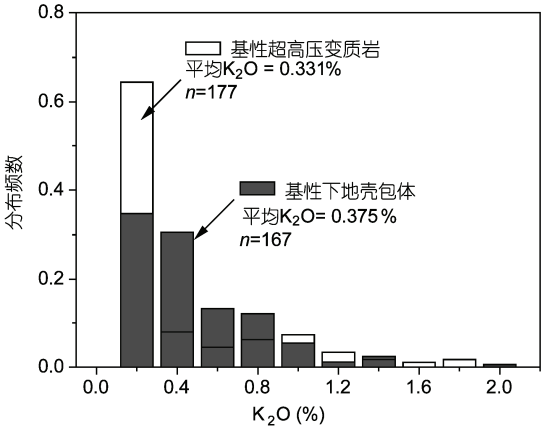

图 1 基性下地壳包体和大别-苏鲁基性基性超高压变质岩的 K_2O 分布概率图

数据来源: 基性下地壳包体来自 Rudnick 和 Gao[78]中的数据, 通过链接 http://earthref.org/cgi-bin/erda.cgi?n=1,2,3,8 可以得到. 大别-苏鲁基性超高压变质岩来自表 1

背景下部分熔融的实验资料, 所以我们利用 MELTs 程序来计算模拟基性岩石部分熔融. MELTs 程序基于热力学模型计算, 求得在 Gibbs 和 Helmholtz 自由能最小和熵最大时(即相平衡时)的熔体和矿物成分, 同时用独立的岩石学实验数据来校正模拟结果[82,83]. 因为这个软件包对基性岩浆岩体系的校准相对较好, 它尤其适用于 MORB 或者碱性玄武岩岩浆体系, 这正好满足本文的要求. 由于缺乏热力学和实验数据制约, MELTs 不能计算含水基性矿物(例如黑云母和角闪石)的相平衡, 但是这对我们模拟干的榴辉岩在增厚下地壳部分熔融的目的没有任何影响. 所以, 本文通过 MELTs 软件, 模拟基性的下地壳在 1~2 GPa 时的熔融过程, 观察残留固相的矿物组成比例和熔体成分随温度压力的变化趋势, 并在此基础上建立微量元素在熔体中随温度和压力变化的地球化学模型, 和 C 型埃达克岩进行比较并对其成因提供制约.

3 实验模拟的结果

模拟采用平均的基性下地壳做为初始物质(表 1). 为简化计算, P_2O_5 含量假定为零, 这个不影响模拟的主要结果. 为了测试少量水对基性榴辉岩部分熔融的影响, 我们在初始物质中加入微量的水(0.1%或者 1000 ppm), 对比干的熔融过程, 我们发现在 2 GPa 时少量的水只降低熔点 10℃左右. 由于熔融过程中没有出现角闪石结晶, 微量的水对相图以及矿物和熔体的成分没有太大影响. 因此主要的模拟过程使用的是干的基性下地壳. 另外, 在熔融程度低于 5%的时候, MELTs 模拟的结果可能会有一定误差, 原因包括低比例熔融的实验数据有限, 固相线的测定有较大误差且极易受到挥发性物质以及初始物质成分的影响, 这导致 MELTs 对温度略高于固相线的熔融模拟不是非常理想. 因此我们的实验模拟在熔融程度 5%左右就停止了.

MELTs 模拟的结果清楚表明矿物的成分和比例随着温度和压力的变化发生显著变化, 熔体的化学成分也随之发生变化. 基性下地壳的液相线随压力的升高而升高(图 2). 单斜辉石是最重要的残留矿物, 它在温度略低于液相线时首先出现, 然后始终存在于残留固相中, 即使在体系接近固相线的时候, 其在整个体系中占的质量比也超过 50%. 但是因为它的 SiO_2 含量(~49%)和初始物质(48%)比较接近, 残留的单斜辉石反而对熔体的 SiO_2 含量没有太大的影响. 在压力高于 1.3 GPa 时, 随着温度的降低, 石榴子石先于斜长石出现, 但是压力低于 1.3 GPa 时, 斜长石先于石榴子石出现. 当压力低于大约 1.15 GPa 时, 石榴子石不再在体系中出现, 尖晶石取代石榴子石成为另一种重要的富铝矿物. 需要强调的是, 斜长石和石榴子石在很大的温压范围内能共存, 和干的辉石岩部分熔融结果是一致的[84], 这对熔体的微量元素特别是重稀土和 Sr 的含量有非常重要的影响.

熔体的 SiO_2 含量明显随温度和压力变化. 在压力高于 1.8 GPa(~63 km 的深度)时, 熔体的 SiO_2 随着温度的降低明显升高, 最终在低程度熔融的时候, 熔体的 SiO_2 可以高达 63%~68%, 和大别山低镁埃达克岩接近(图 3(a)). 一个非常重要的结果是, 压力低于

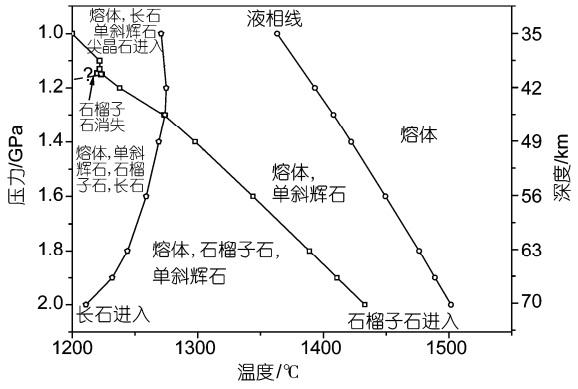

图 2 干的基性下地壳熔融时的相图

1.6 GPa (~56 km 深)时, 无论温度如何变化或者熔融程度如何, 产生的熔体的 SiO_2 含量始终低于 58%(图 3). 这一结果和MORB 成分的榴辉岩在 2~3 GPa 下高比例熔融[84]和最近发表的干的辉石岩在 1 和 1.5 GPa 下部分熔融的实验结果非常一致[85]. 但是在低比例熔融的时候, MELTs 的模拟与 Pertermann 和 Hirschmann[84]中的结果不完全一致. 具体表现在, 压力为 2 GPa 时, 无论熔融程度如何, 干 MORB 的实验产生的熔体的 SiO_2 都低于 53%[84], 而 MELTs 模拟则可产生英安质的熔体. 其原因可能是 MELTs 的模拟只考虑熔体和矿物的最终平衡的热力学结果, 而实际的实验过程可能处于一个中间过程. MORB 低比例熔融在高压下(2.5 和 3.0 GPa)的实验结果和 MELTs 在稍低压力下(2.0 GPa)的模拟结果一致. 尽管有这个差别, 本质上二者都说明, 只有石榴子石在残留相中占优势, 产生的熔体才能富硅. MELTs 模拟要求 2 GPa 则可, 但是高温高压实验则要求更高的压力(2.5~3.0 GPa)[84], 这个压力已经远远超出了增厚下地壳的范围. 显然, 为了更好地理解下地壳的部分熔融过程, 有必要对干的基性岩石在地壳深度下的熔融过程进行系统的实验研究.

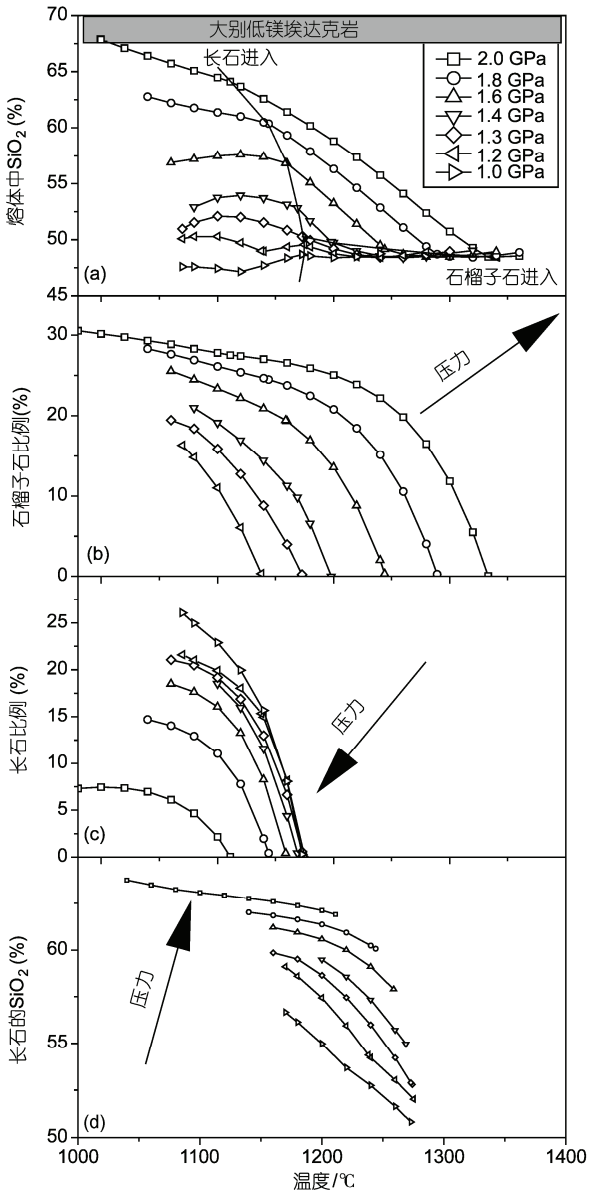

图 3　熔体 SiO_2(a),石榴子石(b)和斜长石的比例(c)以及斜长石的 SiO_2 含量(d)随温度和压力变化图

此外, 图 3(a)也显示, SiO_2 随温度变化的速率也明显受到贫硅的石榴子石(SiO_2大约 40%)和富硅的斜长石(SiO_2 高于 50%)的控制. 当石榴子石是主要的残留相, 熔体的 SiO_2 随温度降低而升高; 一旦斜长石出现, 熔体的 SiO_2 随温度的增速明显放缓. 这说明 SiO_2 成分主要由残留矿物中的石榴子石和斜长石的相对比例决定, 而其比例则取决于熔融时的温度压力条件. 石榴子石和斜长石的比例都随温度的降低而升高, 所不同的是, 石榴子石的比例随着压力的升高而升高, 而斜长石的比例随压力升高而降低(图 3(b), (c)). 因此, 在高压下, 即使斜长石中钠长石和 SiO_2 含量比较高(图 3(d)), 但是因为其在残留矿物中所占的比例低, 贫 SiO_2 的石榴子石占优势从而控制熔体成分, 因此熔体的 SiO_2 成分在低温高压下大大升高; 但是在低压下, 斜长石控制熔体的 SiO_2 成分, 导致熔体的 SiO_2 不可能达到 60%以上, 远远低于大别山的低镁埃达克岩. 为考察初始物质的 SiO_2 的轻微变化对熔体成分的影响, 我们做一个简单的测试. 在 1.6 GPa 和 1300℃时, 初始物质的 SiO_2 含量为 48%, 50%和 52%, 而产生的熔体的 SiO_2 分别为 53.3%, 54.5%和 55.5%. 这说明在中等压力下, 适当增加初始物质的 SiO_2 含量不会产生异常高硅的熔体.

熔体的 K_2O/Na_2O 随温度降低和压力升高而明显升高(图 4(a)). 在高压下, 熔体的 K_2O/Na_2O 甚至可以高于 1, 和大别山低镁埃达克岩相当. 但是在压力低于 1.4 GPa 时, 无论熔融比例和温度如何, 熔体的 K_2O/Na_2O 始终低于 C 型埃达克岩. 需要指出的是, 在模拟干榴辉岩熔融时, 唯一能够容纳 K_2O 的矿物是斜长石, 而 Na_2O 则进入单斜辉石和斜长石. 斜长石的 K_2O/Na_2O 随温度的降低而升高, 在低温下甚至高于初始

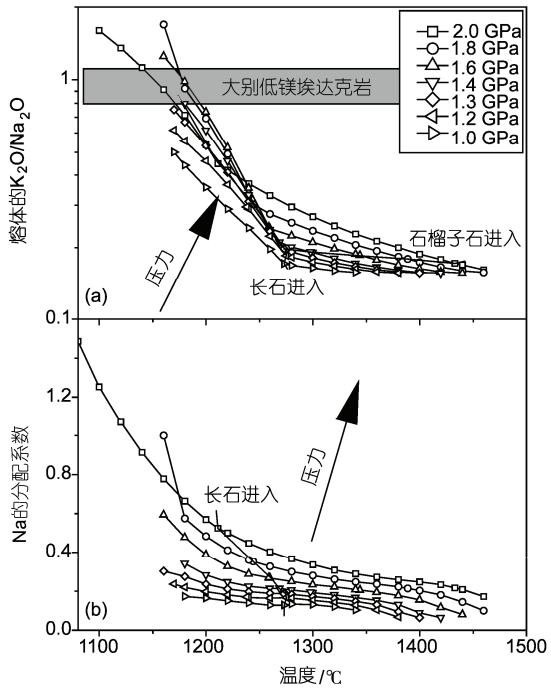

图 4 熔体的 K_2O/Na_2O(a)和 Na 在单斜辉石和熔体之间的分配系数(b)随温度和压力的变化

大别山低镁埃达克岩的范围来自文献[41, 52]

物质的比值, 因此熔体的 K_2O/Na_2O 的升高不能用斜长石的残留来控制. 如前所述, 单斜辉石的比例一般超过 50%. $D_{Na}^{单斜辉石/熔体}$ 随着压力的增加和温度的降低升高(图 4(b)), 这个结果和实验观测非常一致[84]. 在 2 GPa 的时候, Na 在单斜辉石中甚至成为相容元素. 这样, 由于高压时 Na 在单斜辉石的分配系数增高, 低 K_2O/Na_2O 的干榴辉岩的高压低温低比例熔融就产生了和 C 型埃达克岩类似的高 K_2O/Na_2O 的特征.

4 讨论

根据 MELTs 模拟的结果, 本文把干榴辉岩的熔体的主微量元素和 C 型埃达克岩进行比较, 以期制约增厚下地壳中基性榴辉岩和 C 型埃达克岩的成因联系.

4.1 干的基性下地壳如何产生 C 型埃达克岩?

如前所述, C 型埃达克岩的 SiO_2 和 K_2O/Na_2O 较高. 因为很多该类型的岩石出产于曾经有过增厚陆壳的华北克拉通和大别-苏鲁造山带, 它通常被解释为基性的榴辉岩下地壳部分熔融的产物[41,52]. 因此, 接下来我们来探讨基性榴辉质岩下地壳如何产生 C 型埃达克岩的. MELTs 模拟和实验结果表明, 残留矿物成分控制产生的熔体的成分, 要使得熔体非常富集 SiO_2, 要求石榴子石在残留相中富集, 因此榴辉岩的熔融的压力需要超过 1.8 GPa[84,85]. 考虑到陆陆碰撞形成的造山带. 例如喜马拉雅造山带, 地壳的厚度最多可以达到 78 km, 而下地壳底部的榴辉岩的厚度大约为 15 km[86]. 基性下地壳在超过 1.8 GPa 下低程度部分熔融产生的熔体的成分类似于华北、扬子和大别的低镁高硅和高 K_2O/Na_2O 的 C 型埃达克岩(图 5), 而富钾 MORB 型榴辉岩熔融实验的结果则要求压力更高[84]. 但是, 如果深度浅于 60 km, 无论熔融程度如何, 基性下地壳不能产生同时具有高 SiO_2 和高 K_2O/Na_2O 的熔体. 所以如果 C 型埃达克岩来自基性榴辉岩部分熔融, 那么其产生的温压范围是有限的. 因为干的榴辉岩的熔点[84]远远高于下地壳的正常温度[86], 下地壳的部分熔融则要求地幔上涌来提供足够的热, 也就意味着构造环境可能已经转换为拉张环境了. 地幔的热源不仅仅会熔融基性下地壳, 其他熔点相对较低的壳源物质也可能同时熔融, 因此来自榴辉岩高压熔融的极端亏损重稀土的熔体非常容易受到其他壳源岩浆的混染而改变其稀土元素分配模式. 所以我们推测, 即使有真正来自 70 km 深度的下地壳榴辉岩熔体出露于地表, 其体积也可能远远小于来自中下地壳重熔的普通花岗岩. 因此我

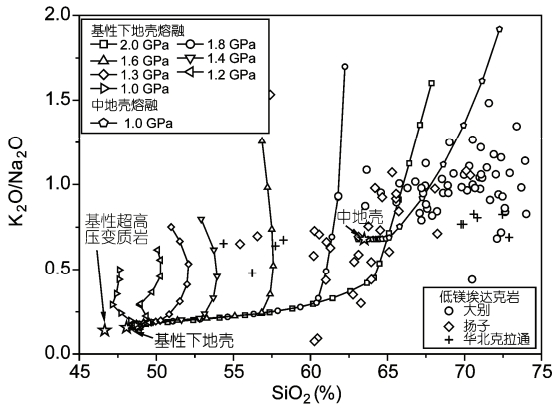

图 5 MELTs 程序模拟基性下地壳和中地壳熔融产生的熔体的 SiO_2 和 K_2O 含量

来自大别[41,52]、扬子[27,28,34,35,87]和华北克拉通的低镁埃达克岩[39]也列出来做为比较. 中地壳, 基性下地壳和大别-苏鲁基性超高压变质岩的值来自表 1. 基性下地壳只有在压力高于 1.8 GPa 时低比例熔融产生的熔体才具有高 SiO_2 和高 K_2O/Na_2O 的特征, 而中地壳在 1.0 GPa 产生的熔体和低镁埃达克岩比较吻合

们需要更详细的研究来证明很多文献中报道的 C 型高硅埃达克岩与基性下地壳的成因联系.

4.2 高 Sr/Y 和$(La/Yb)_N$和石榴子石的关系

高 Sr/Y 和$(La/Yb)_N$(N 代表 C1 球粒陨石均一后的比值)是鉴别埃达克岩的最重要的两个判据[1], 但是多种途径可以产生这两个高的比值, 例如 Moyen[53]最近总结的, 熔融或者混染具有高 Sr/Y 和$(La/Yb)_N$的源区, 石榴子石作为残留相的深部熔融, 岩浆演化过程中基性矿物结晶分异, 以及中酸性熔体和地幔相互作用. 因为 C 型埃达克岩高SiO_2低 Mg#的性质, 熔体与地幔的相互作用可以不用考虑. 因此前 3 种解释对理解 C 型埃达克岩的构造意义至关重要.

中国东部下地壳包体以及古老的壳源岩石(例如崆岭片麻岩)的 Sr/Y 和$(La/Yb)_N$变化范围很大(图 6). 华北的基性下地壳包体的$(La/Yb)_N$一般低于 5, 但是含斜长石的基性包体的$(La/Yb)_N$可以超过 60[60], 和高硅 C 型埃达克岩相当. 中性的下地壳包体$(La/Yb)_N$的范围大约为 5~25, 而 Sr/Y 则可以高达 300 以上. 有些崆岭片麻岩的 Sr/Y 和$(La/Yb)_N$甚至达到埃达克岩的标准. 此外, 扬子北缘还存在新元古代的埃达克岩, 其 Sr/Y 和$(La/Yb)_N$分别达到 160 和 60 左右[44,87,88]. 因此, C 型埃达克岩由本来就具有高 Sr/Y 和$(La/Yb)_N$的中酸性岩石部分熔融产生的可能性必须要考虑. 例如, Kamei 等人[89]中报道了一类由岛弧型英云岩和埃达克质的花岗闪长岩在中下地壳重熔产生的高 Sr/Y 中酸性岩石, 并把这类岩石称为假埃达克岩. Zhang 等人[49]最近也将扬子陆块内部一些新元古代花岗岩的高 Sr/Y 的特点解释为继承自 TTG 原岩. 此外, MELTs 模拟和岩石学实验结果[90]表明, 长英质和流纹质的岩浆温度降低时, 单斜辉石早于斜长石结晶. 由于很多 C 型埃达克岩富集硅铝和碱性金属而贫铁镁钙[41], 这种成分的熔体的聚合度很高, 这使得中重稀土元素和 Y 在单斜辉石的分配系数增高, 甚至变得高度相容, 例如 D_{Yb} 达到 2.69[90], 但是 La 和 Sr 仍然是不相容元素($^{单斜辉石/熔体}D_{La\text{-}Sr}$~0.3). 这样, 高度聚合的硅酸盐熔体分离结晶单斜辉石可以进一步提高 La/Yb 和 Sr/Y. 而且, 熔体的 SiO_2 和 K_2O/Na_2O 也和 C 型埃达克岩的特征吻合(图 5). 所以, 由于继承源区特征加上单斜辉石在高聚合的硅酸盐熔体中分离结晶而形成的高 Sr/Y 和$(La/Yb)_N$和石榴子石没有关系, 即 C 型埃达克岩可能没有任何压力的指示意义.

如果多种因素可以造成高 Sr/Y 和$(La/Yb)_N$, 那么什么地球化学指标能够独特地反映石榴子石在埃达克岩形成时的作用呢? 众所周知, 稀土元素在石榴子石中的分配系数随质量数增大而快速升高, 因此石榴子石可以造成轻重稀土和中重稀土强烈的分异. 除了石榴子石, 角闪石和单斜辉石是另外两个最重要的控制稀土元素分配的主要矿物. 在角闪石中, 中稀土一般比重稀土相容[91,92]; 在单斜辉石中, 除了富铝的单斜辉石中$^{单斜辉石/熔体}D_{Yb}/^{单斜辉石/熔体}D_{Gd}>1$[93,94], 中稀土也比重稀土相容(例如[95,100~104]). 因此, 这 3 个主要矿物中, 只有石榴子石能够强烈的分异中重稀土. 以基性下地壳在 1.2 GPa 下的批式熔融模型为例(图 6), 温度低于液相线时, 富铝的单斜辉石首

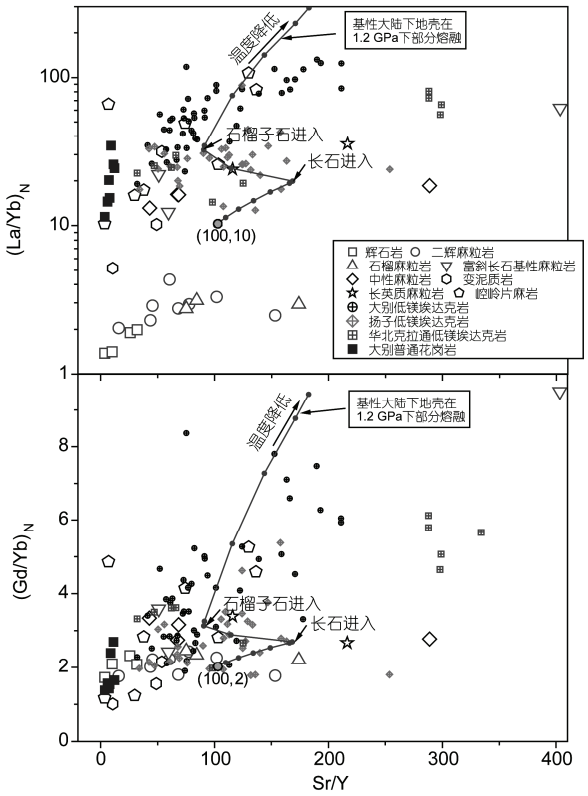

图 6 低镁埃达克岩的$(La/Yb)_N$, Sr/Y 与$(Gd/Yb)_N$和下地壳包体以及崆岭片麻岩进行比较

数据来源: 下地壳包体来自文献[60]; 崆岭片麻岩来自文献[95]; 低镁埃达克岩来源: 大别, 文献[41,52]; 华北克拉通, 文献[39]; 扬子, 文献[27,28,34,35,87]. 批示部分熔融模型采用基性下地壳在 1.2 GPa 时的残留矿物和熔体比例求得熔融程度(F)和微量元素的总分配系数(D_{Bulk}). $^{斜长石/熔体}D_{REE}$来自文献[96]; $^{石榴子石/熔体}D_{REE\text{-}Sr}$和$^{单斜辉石/熔体}D_{REE\text{-}Sr}$来自文献[94]中的实验 MP240. $^{斜长石/熔体}D_{Sr}$根据文献[97]中 Sr 分配系数和斜长石以及温度之间的关系计算得到, 斜长石的成分来自 MELTs 程序模拟

先结晶, 因此熔体的 Gd/Yb, La/Yb 和 Sr/Y 一起升高; 温度继续降低, 斜长石结晶后, Gd/Yb 继续升高, 但是 Sr/Y 开始降低, 这两个过程中 Gd/Yb 大约升高 50%. 等到石榴子石出现时, Sr/Y 重新升高, 而 Gd/Yb 快速升高 3 倍以上. 因此, 异常高的 Gd/Yb 可以说明石榴子石在某种程度上参与了岩浆过程. 除此之外, 我们还注意到, 有些洋壳俯冲形成的埃达克岩的 Lu 比 Yb 相对亏损, 例如南美 Andean Austral volcanic zone 的 Cook Island 中出露的埃达克岩[6]. 因此, 我们认为, 高 Gd/Yb 和强烈右倾的稀土配分模式是支持石榴子石参与岩浆作用最有力的证据. 如果源区的$(Gd/Yb)_N$ 类似于平均的大陆下地壳(1.71)[78], 批式熔融程度为 9%时,石榴子石控制的熔体的$(Gd/Yb)_N$则可达到 5.8. 例如, 大别山 Fuziling 岩体的$(Gd/Yb)_N$ 可以高达 9.5, 可以被解释为高压下石榴子石控制基性榴辉岩下地壳部分熔融[41]. 但是本文要特别指出, Fuziling 岩体的$(Lu/Yb)_N$ 高于 1, 而其他重稀土元素(例如 Ho, Er, Tb, Yb)平坦分布, 和石榴子石作用的结果不一致. 考虑到 Fuziling 岩体的 Lu 和 Yb 含量极低, 分别为 5~17 ppb 和 33~88 ppb(1 ppb= 1 ng/g), 因此有必要精确测量 C 型埃达克岩的重稀土含量以厘清这类岩石的稀土元素配分模式.

4.3 Eu 异常和斜长石的关系

在研究中国高硅 C 型埃达克岩时, 很多学者喜欢用斜长石的作用来解释 Eu 的正异常或者负异常[11,13,19~22,27,28,32,33,41,42,52]. 由于 Eu 在岩浆过程中同时以+2 和+3 价出现, 它在斜长石中的分配系数高于相邻的 Sm 和 Gd(例如文献[96,98~100]). 因此, Eu 的正异常可能说明斜长石堆晶, 而负异常则说明斜长石分离结晶. 但是, 实际的岩浆过程远比这个简单的模型复杂. 基性下地壳的 MELTs 模拟以及大量的实验岩石学结果都表明, 斜长石常常和其他基性矿物(单斜辉石, 角闪石和石榴子石)同时出现在部分熔融过程中[7~9,84,85]. 和斜长石相反, Eu 在基性矿物中的分配系数一般低于相邻的 Sm 和 Gd[90,94,101], 体系越还原, 熔体中 Eu^{2+}/Eu 越高, 因此$^{斜长石/熔体}D_{Eu}$越高, 而$^{基性矿物/熔体}D_{Eu}$ 越低[98~100]. 这样, 基性矿物对斜长石控制熔体中的 Eu 含量有一定的补偿作用. 例如, 如果斜长石结晶造成熔体 Eu 负异常, 那么基性矿物的结晶则可造成 Eu 的正异常. 因此, 我们需要深入思考 Eu 异常是如何产生的. 鉴于斜长石和石榴子石分别在低压和高压下占主导作用, 我们尤其要注意 Eu 异常对岩浆演化和源区矿物和深度的指示意义.

根据 MELTs 模拟基性下地壳的残留矿物相的比例, 我们通过一个简单的批式熔融模型来考察源区矿物的比例, 源区的特征, 以及氧逸度对熔体 Eu 异常的影响. 以基性下地壳 1.2 GPa 下的熔融为例(图 7). 为简化模型, 我们先假设初始物质没有 Eu 的异常. 此外, 我们还需要考虑氧逸度对 Eu 的分配系数的影响. 但是目前尚缺乏在不同的氧逸度下对同一体系中 Eu 同时在斜长石和基性矿物的分配系数的系统的实验数据. 因此, 我们只能先根据 Lattice Strain 模型利用 Sm 和 Gd 的分配系数计算 Eu^{3+}的分配系数[93,102,103]. 再设定一个还原系数: 该系数越大, Eu^{2+}/Eu 越高[98]. 我们假设$^{斜长石/熔体}D_{Eu}$为 Eu^{3+}的分配系数乘以还原系数, $^{基性矿物/熔体}D_{Eu}$ 为 Eu^{3+}的分配系数除以还原系数, 然后根据矿物的比例来计算 Eu 以及 Sm 和 Gd 的总分配系数, 最后计算批式熔融产生的熔体中的 Eu, Sm, Gd 含量和 Eu 异常. 单斜辉石在温度低于液相线时首先出现, 斜长石和石榴子石分别在 1275℃和 1238℃出现. 如图 7 所示, 温度从 1380~1300℃, 唯一的固相矿物是单斜辉石, 因此熔体具有 Eu 正异常, 随着单斜辉石比例增高, 熔体的 Eu 正异常增大. 在 1260℃时, 斜长石和单斜辉石共存, 因为单斜辉石的比例远高于斜长石, Eu 正异常降低了但是仍然存在. 在温度更低的时候, 斜长石、石榴子石和单斜

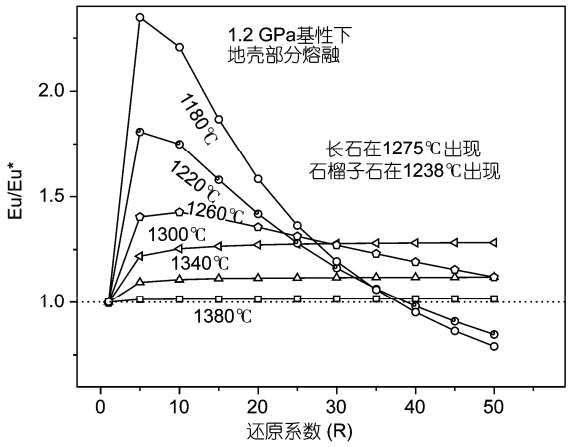

图 7 基性下地壳在 1.2 GPa 下产生的熔体的 Eu 异常与还原系数(*R*)的关系

Bulk $D_{Eu} = X_{石榴子石} \times {}^{石榴子石/熔体}D_{Eu^{3+}}/R + X_{单斜辉石} \times {}^{单斜辉石/熔体}D_{Eu^{3+}}/R + X_{斜长石} \times {}^{斜长石/熔体}D_{Eu^{3+}} \times R$. 这里 X 是矿物在残留相中的百分比. $D_{Eu^{3+}}$根据其他三价稀土元素在矿物中的分配系数和 Lattice Strain 模型[93,102]计算得到. 源区的 Eu 异常假设为 1

辉石共存, 即使斜长石的比例相对增加, 如果岩浆体系的氧逸度高, 还原系数不够大, 残留矿物的 Eu 的总分配系数仍然不够高, 熔体还是有 Eu 的正异常. 只有 Eu 在斜长石中非常相容(例如$^{斜长石/熔体}D_{Eu}$ > 2)[96,98], 而且斜长石的比例相对于基性矿物达到一定程度的时候, 显著的 Eu 负异常才会在熔体中出现. 因此我们提出, 熔体中的 Eu 异常取决于源区的成分, 熔融过程的氧逸度以及斜长石和基性矿物之间的比例. 这样, 在用 Eu 异常来指示斜长石的作用, 进而来推测岩浆作用的深度和过程的时候, 我们必须要小心. 只有在确定知道源区性质, 而且在基性矿物的作用不重要的情况下(例如酸性岩浆岩体系), Eu 的异常才能用斜长石的参与来解释.

5 结论

(1) 由于大陆基性下地壳不含大量的水, 用含水玄武质物质为初始物质的熔融实验结果不能用来说明基性下地壳的部分熔融过程. MELTs 程序模拟表明,在增厚的陆壳背景下, 只有在压力高于 1.8 GPa (~60 km)的时候, 由于石榴子石控制熔体的 SiO_2 成分, 干的基性榴辉岩低比例部分才能产生 K_2O/Na_2O 接近于 1 的英安质熔体; 压力低于 1.8 GPa 时, 大量斜长石的出现使得熔体的 SiO_2 含量远远低于 C 型埃达克岩. 这样, 真正基性下地壳高压熔融产生 C 型埃达克岩可能是有限的, 而且容易受到其他壳源岩浆的混染.

(2) 高 Sr/Y 和 La/Yb 可以由多种途径形成, 并不完全是石榴子石控制的结果. 高度分异的中重稀土和强烈右倾的稀土配分模式(高 Gd/Yb)是鉴别埃达克岩的更好的判据.

(3) 熔体的 Eu 异常决定于岩浆体系的氧逸度, 源区性质, 和斜长石对基性矿物的比例, 并不能简单地用来指示斜长石是否参与了岩浆作用.

致谢 李曙光教授、杨蔚和刘盛赦阅读了本文早期的文稿并给出有益的建议, 在此表示感谢.

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 Kay R W. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted pacific ocean crust. J Volcanol Geotherm Res, 1978, 4: 117—132

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

4 Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, et al. Adakites: Some variations on a theme. Acta Petrol Sin, 2002, 18: 129—142

5 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? Geology, 2001, 29: 531—534

6 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

7 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

8 Rapp R P. Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt, its control over liquid fraction and composition, and source permeability. J Geophys Res, 1995, 100: 15601—15610

9 Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8—32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. J Petrol, 1995, 36: 891—931

10 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

11 Xu J F, Shinjo 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, 30: 1111—1114

12 Atherton M P, Petford N. Generation of sodium rich magmas from newly underplated basaltic crust. Nature, 1993, 362: 144—146

13 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Eocene melting of subducting continental crust and early uplifting of central Tibet: Evidence from central-western Qiangtang high-K calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites. Earth Planet Sci Lett, 2008, 272: 158—171

14 Castillo P R, Janney P E, Solidum R U. Petrology and geochemistry of Camiguia Island, Southern Philliphines: Insight to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. Contrib Mineral Petrol, 1999, 134: 33—51

15 Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. Earth Planet Sci Lett, 2006, 243: 581—593
16 Chiaradia M, Muntener O, Beate B, et al. Adakite-like volcanism of Ecuador: Lower crust magmatic evolution and recycling. Contrib Mineral Petrol, 2009, 158: 563—588
17 Guo F, Nakamuru E, Fan W M, et al. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing, Yanji Area, NE China. J Petrol, 2007, 48: 661—692
18 Chen B, Tian W, Jahn B M, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang, North China craton: Evidence for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components. Lithos, 2008, 102: 118—137
19 Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 2004, 432: 892—897
20 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
21 张旗, 王焰, 钱青, 等. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约. 岩石学报, 2001, 17: 505—513
22 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
23 Li W X, Li X H. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China: Geochemical and Nd isotopic evidence. Precambrian Res, 2003, 122: 29—44
24 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, 2003, 37: 233—252
25 张旗, 简平, 刘敦一, 等. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 309—314
26 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
27 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
28 Wang Q, Zhao Z H, Bao Z W, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper-molybdenum mineralization in southeast Hubei, east China. Resour Geol, 2004, 54: 137—152
29 王元龙, 王焰, 张旗, 等. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿-地球动力学意义. 岩石学报, 2004, 20: 325—338
30 钱存超, 路玉林, 刘丽利. 大别山超高压变质带燕山期花岗岩地球化学特征及成因探讨. 中国地质, 2004, 31: 147—154
31 Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. Earth Sci Rev, 2005, 68: 173—196
32 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
33 Guo F, Fan W M, Li C W. Geochemistry of late Mesozoic adakites from the Sulu belt, eastern China: Magma genesis and implications for crustal recycling beneath continental collisional orogens. Geol Mag, 2006, 143: 1—13
34 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. Lithos, 2006, 89: 424—446
35 Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. J Petrol, 2006, 47: 119—144
36 Wang X C, Liu Y S, Liu X M. Mesozoic adakites in the Lingqiu Basin of the central North China Craton: Partial melting of underplated basaltic lower crust. Geochem J, 2006, 40: 447—461
37 Gao Y F, Hou Z Q, Kamber B S, et al. Adakite-like porphyries from the southern Tibetan continental collision zones: Evidence for slab melt metasomatism. Contrib Mineral Petrol, 2007, 153: 105—120
38 Guo Z F, Wilson M, Liu J Q. Post-collisional adakites in south Tibet: Products of partial melting of subduction-modified lower crust. Lithos, 2007, 96: 205—224
39 Jiang N, Liu Y S, Zhou W G, et al. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China craton. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2591—2608
40 Qin J F, Lai S C, Wang J, et al. High-Mg# adakitic tonalite from the xichahe area, South Qinling orogenic belt (Central China): Petrogenesis and geological implications. Intern Geol Rev, 2007, 49: 1145—1158
41 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2609—2636
42 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization. J Geology, 2007, 115: 149—161
43 Zhang H F, Parrish R, Zhang L, et al. A-type granite and adakitic magmatism association in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Implication for lithospheric delamination. Lithos, 2007, 97: 323—335

44 Zhao J H, Zhou M F. Neoproterozoic adakitic plutons and arc magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. J Geol, 2007, 115: 675—689

45 Huang F, Li S G, Dong F, et al. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust. Chem Geol, 2008, 255: 1—13

46 Liu S, Hu R Z, Feng C X, et al. Cenozoic high Sr/Y volcanic rocks in the Qiangtang terrane, northern Tibet: Geochemical and isotopic evidence for the origin of delaminated lower continental melts. Geol Mag, 2008, 145: 463—474

47 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): Evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge. Contrib Mineral Petrol, 2008, 155: 473—490

48 Xu W L, Hergt J A, Gao S, et al. Interaction of adakitic melt-peridotite: Implications for the high-Mg# signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2008, 265: 123—137

49 Zhang S B, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. Origin of TTG-like rocks from anatexis of ancient lower crust: Geochemical evidence from neoproterozoic granitoids in South China. Lithos, 2009, 113: 347—368

50 葛小月, 李献华, 陈志刚, 等. 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. 科学通报, 2002, 47: 474—480

51 Xiao L, Clemens J D. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. Lithos, 2007, 95: 399—414

52 Xu H J, Ma C Q, Ye K. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry. Chem Geol, 2007, 240: 238—259

53 Moyen J F. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the'adakitic signature'. Lithos, 2009, 112: 556—574

54 Xiong X L, Xia B, Xu J F, et al. Na depletion in modern adakites via melt / rock reaction within the sub-arc mantle. Chem Geol, 2006, 229: 273—292

55 Kay R W, Kay S M. The nature of the lower continental crust: Inferences from geophysics, surface geology, and crustal xenoliths. Rev Geophys Space Phys, 1981, 19: 271—297

56 Yardley B W D. Effect of cooling on the water content and mechanical behavior of metamorphosed rocks. Geology, 1981, 9: 405—408

57 Gough D L. Seismic reflectors, conductivity, water and stress in the continental crust. Nature, 1986, 323: 143—144

58 Xia Q K, Yang X Z, Deloule E, et al. Water in the lower crustal granulite xenoliths from Nushan, SE China. J Geophys Res, 2006, 111: B11202, doi:10.1029/2006JB 004296

59 Yang X Z, Deloule E, Xia Q K, et al. Water contrast between Precambrian and Phanerozoic continental lower crust in eastern China. J Geophys Res, 2008, 113: B08207, doi:10.1029/2007JB005541

60 Liu Y S, Gao S, Jin S Y, et al. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba basalt, North China craton: Implications for petrogenesis and lower crustal composition. Geochim Cosmochim Acta, 2001, 65: 2589—2604

61 Huang X L, Xu Y G, Liu D Y. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, east China: Implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean Craton. Geochim Cosmochim Acta, 2004, 68: 127—149

62 Liu Y S, Gao S, Yuan H L, et al. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: Insights on evolution of lower continental crust. Chem Geol, 2004, 211: 87—109

63 Liu Y S, Gao S, Lee C A, et al. Melt-peridotite interactions: Links between garnet pyroxenite and high-Mg# signature of continental crust. Earth Planet Sci Lett, 2005, 234: 39—57

64 Chen R X, Zheng Y F, Gong B, et al. Origin of retrograde fluid in ultrahigh-pressure metamorphic rocks: Constraints from mineral hydrogen isotope and water content changes in eclogite-gneiss transitions in the Sulu orogen. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2299—2325

65 Zheng Y F. Fluid regime in continental subduction zones: Petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks. J Geol Soc, 2009, 166: 763—782

66 Chen R X, Zheng Y F, Gong B, et al. Oxygen isotope geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from 200—4000 m core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling. Chem Geol, 2007, 242: 51—75

67 Zhao Z F, Zheng Y F, Chen R X, et al. Element mobility in mafic and felsic ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 5244—5266

68 Xia Q X, Zheng Y F, Zhou L G. Dehydration and melting during continental collision: Constraints from element and isotope geochemistry of low-T/UHP granitic gneiss in the Dabie orogen. Chem Geol, 2008, 247: 36—65

69 Li S G, Jagoutz E, Chen Y Z, et al. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China. Geochim Cosmochim Acta, 2000, 64: 1077—1093

70 Taylor S R, McLennan S M. The composition and evolution of the continental crust: Rare Earth element evidence from sedimentary rocks. Phil Trans Roy Soc London, 1981, A301: 381—399

71 Taylor S R, McLennan S M, McCulloch M T. Geochemistry of loess, continental crustal composition and crustal model ages. Geochim Cosmochim Acta, 1983, 47: 1897—1905
72 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1985
73 Holbrook W S, Mooney W D, Christensen N I. The seismic velocity structure of the deep continental crust. In: Fountain D M, Arculus R, Kay R W, eds. Continental Lower Crust. Amsterdam: Elsevier, 1992. 1—44
74 Rudnick R L. Xenoliths—Samples of composition of the lower continental crust. In: Fountain D M, Arculus R, Kay R W, eds. Continental Lower Crust. Amsterdam: Elsevier, 1992. 269—316
75 Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust. Rev Geophys, 1995, 33: 241—265
76 Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. Geochim Cosmochim Acta, 1998, 62: 1959—1975
77 Gao S, Zhang B R, Jin Z M, et al. How mafic is the lower continental crust? Earth Planet Sci Lett, 1998, 161: 101—117
78 Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust. Treatise Geochem, 2003, 3: 1—64
79 Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. Rev Geophys, 1992, 33: 267—309
80 Liu Y C, Li S G, Gu X F, et al. Ultrahigh-pressure eclogite transformed from mafic granulite in the Dabie orogen, east-central China. J Metamorph Geol, 2007, 25: 975—989
81 Yaxley G M, Green T H. Reaction between eclogite and peridotite: Mantle refertilization by subducted oceanic crust. Schweiz Mineral Petrogr Mitteil, 1998, 78: 243—255
82 Ghiorso M S, Sack R O. Chemical mass transfer in magmatic processes. IV——A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. Contrib Mineral Petrol, 1995, 119: 197—212
83 Asimow P D, Ghiorso M S. Algorithmic modifications extending MELTs to calculate subsolidus phase relations. Amer Mineral, 1998, 83: 1127—1131
84 Pertermann M, Hirschmann M M. Anhydrous partial melting experiments on MORB-like eclogite: phase relations, phase compositions and mineral-melt partitioning of major elements at 2-3 GPa. J Petrol, 2003, 44: 2173—2201
85 Lambart S, Laporte D, Schiano P, et al. An experimental study of pyroxenite partial melts at 1 and 1.5 GPa: Implications for the major-element composition of Mid-Ocean Ridge Basalts. Earth Planet Sci Lett, 2009, 288: 335—347
86 John N, Gyeorgy H, Jerome V, et al. Underplating in the Himalaya-Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB experiment. Science, 2009, 325: 1371—1374
87 Huang X L, Xu Y G, Lan J B, et al. Neoproterozoic adakitic rocks from Mopanshan in the western Yangtze Craton: Partial melts of a thickened lower crust. Lithos, 2009, 112: 367—381
88 Zhou M F, Yan D P, Wang C L, et al. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China. Earth Planet Sci Lett, 2006, 248: 286—300
89 Kamei A, Miyake Y, Owada M, et al. A pseudo adakite derived from partial melting of tonalitic to granodioritic crust, Kyushu, southwest Japan arc. Lithos, 2009, 112: 615—625
90 Huang F, Lundstrom C C, McDonough W F. Effect of melt structure on trace-element partitioning between clinopyroxene and silicic, alkaline, aluminous melts. Amer Mineral, 2006, 91: 1385—1400
91 Brenan J M, Shaw H F, Ryerson F J, et al. Experimental-determination of trace element partitioning between Pargasite and a synthetic hydrous andesitic melt. Earth Planet Sci Lett, 1995, 135: 1—11
92 Latourrentte T, Hervig R L, Holloway J R. Trace-element partitioning between Amphibole, Phlogopite, and Basanite melt. Earth Planet Sci Lett, 1995, 135: 13—30
93 Blundy J D, Robinson J A C, Wood B J. Heavy REE are compatible in clinopyroxene on the spinel lherzolite solidus. Earth Planet Sci Lett, 1998, 160: 493—504
94 Pertermann M, Hirschmann M M, Hametner K, et al. Experimental determination of trace element partitioning between garnet and silica-rich liquid during anhydrous partial melting of MORB-like eclogite. Geochem Geophys Geosyst, 2004, 5: Q05A01, doi: 10.1029/2003GC000638
95 Gao S, Ling W L, Qiu Y M, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. Geochim Cosmochim Acta, 1999, 63: 2071—2088
96 Zajacz Z, Halter W. LA-ICPMS analyses of silicate melt inclusions in co-precipitated minerals: Quantification, data analysis and min-

eral/melt partitioning. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 1021—1040
97 Blundy J D, Wood B J. Crystal-chemical controls on the partitioning of Sr and Ba between plagioclase feldspar, silicate melts, and hydrothermal solutions. Geochim Cosmochim Acta, 1991, 55: 193—209
98 Drake M J, Weill D F. Partition of Sr, Ba, Ca, Y, Eu^{2+}, Eu^{3+}, and other REE between plagioclase feldspar and magmatic liquid-experimental study. Geochim Cosmochim Acta, 1975, 39: 689—712
99 Drake M J. Plagioclase——melt equilibria. Geochim Cosmochim Acta, 1976, 40: 457—465
100 Terakado Y, Fujitani T. Significance of iron and cobalt partitioning between plagioclase and biotite for problems concerning the Eu^{2+}/Eu^{3+} ratio, europium anomaly, and magnetite-/ilmenite-series designation for granitic rocks from the Inner Zone of southwestern Japan. Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59: 2689—2699
101 Hill E, Wood B J, Blundy J D. The effect of Ca-Tschermaks component on trace-element partitioning between clinopyroxene and silicate melt. Lithos, 2000, 53: 203—215
102 Blundy J D, Wood B J. Prediction of crystal-melt partition coefficients from elastic moduli. Nature, 1994, 372: 452—453
103 Wood B J, Blundy J D. A predictive model for rare earth element partitioning between clinopyroxene and anhydrous silicate melt. Contrib Mineral Petrol, 1997, 129: 166—181
104 Li S G, Xiao Y L, Liou D L, et al. Collision of the North China and Yangtse blocks and formation of coesite-bearing Eclogites: Timing and processes. Chem Geol, 1993, 109: 89—111
105 Chavagnac V, Jahn B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. Chem Geol, 1996, 133: 29—51
106 Jahn B M. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen: Implications for continental subduction and collisional tectonics. In: Hacker B R, Liou J G, eds. When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 1998. 203—239
107 Jahn B M, Fan Q C, Yang J J, et al. Petrogenesis of the Maowu pyroxenite-eclogite body from the UHP metamorphic terrane of Dabieshan: Chemical and isotopic constraints. Lithos, 2003, 70: 243—267
108 Jahn B M, Liu X C, Yui T F, et al. High-pressure/ultrahigh-pressure eclogites from the Hong'an Block, East-Central China: Geochemical characterization, isotope disequilibrium and geochronological controversy. Contrib Mineral Petrol, 2005, 149: 499—526
109 Liu Y C, Li S G, Xu S T, et al. Geochemistry and geochronology of eclogites from the northern Dabie Mountains, central China. J Asian Earth Sci, 2005, 25: 431—443
110 Zhang H F, Zhang L, Harris N, et al. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement. Contrib Mineral Petrol, 2006, 152: 75—88
111 Zhang Z M. Petrogenesis of Maobei rutile eclogites from the southern Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, eastern China. J Metamorph Geol, 2006, 24: 727—741
112 Liu Y H, Yang H J, Shau Y H, et al. Compositions of high Fe-Ti eclogites from the Sulu UHP metamorphic terrane, China: HFSE decoupling and protolith characteristics. Chem Geol, 2007, 239: 64—82
113 Tang H F, Liu C Q, Nakai S, et al. Geochemistry of eclogites from the Dabie-Sulu terrane, eastern China: New insights into protoliths and trace element behaviour during UHP metamorphism. Lithos, 2007, 95: 441—457
114 Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, et al. Geochemistry and magmatic history of eclogues and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates. Chem Geol, 2008, 247: 133—153
115 Workman R K, Hart S R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). Earth Planet Sci Lett, 2005, 231: 53—72