中国科学: 地球科学 2011 年 第 41 卷 第 5 期: 654 ~ 667
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

华北埃达克质岩与克拉通破坏: 实验岩石学和地球化学依据

熊小林*, 刘星成, 朱志敏, 李元, 肖万生, 宋茂双, 张生, 吴金花

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640
* E-mail: xiongxl@gig.ac.cn

收稿日期: 2010-04-28; 接受日期: 2010-09-30
国家自然科学基金重大研究计划(批准号: 90714011)和国家自然科学杰出青年基金项目(批准号: 40825010)资助

摘要 华北埃达克质花岗岩和火山岩与岩石圈减薄时空一致性使得它们成为窥视克拉通破坏过程和机制的一个重要窗口. 本文通过实验岩石学资料限定华北埃达克质岩石的主要源区岩石为中钾和高钾基性变质岩, 并通过基性变质岩体系相平衡、长英质熔体 TiO_2 溶解度、埃达克质岩石 Nb/La 随 La/Yb 变化规律等研究论证大别、胶东和克拉通北缘许多埃达克质岩石的源区存在残留金红石, 岩浆形成深度超过 50 km, 从而揭示华北克拉通破坏涉及超过 15 km 的地壳厚度减薄或下地壳拆沉.

关键词
埃达克质岩
华北克拉通
地壳减薄
金红石
实验岩石学

自从华北克拉通破坏和岩石圈减薄提出以来[1~5], 科研工作者开展了大量的岩石学和地球化学研究,探讨了岩石圈破坏和减薄的方式、时间以及动力学控制因素, 提出了拆沉作用[6~19]、热-化学/机械/俯冲侵蚀[20~33]、橄榄岩-熔体相互作用[34~39]以及岩石圈地幔加水软化[40]等见解. 最近开展的地球物理研究, 综合了岩石地球化学研究的成果, 进一步论证克拉通破坏的主要动力学过程, 提出中生代太平洋板块俯冲使东亚大陆之下地幔流动呈现快速和不稳定特点, 促进了克拉通上地幔熔流体含量的增加和岩石圈软化,导致了不同地区岩石圈分别以拆沉和热侵蚀为主的方式被破坏[41].

华北克拉通破坏导致了大约 120 km 的岩石圈减薄[2~5], 其中是否涉及拆沉作用和地壳减薄是有争论的, 而且破坏之前地壳有多厚以及地壳被减薄了多少并不清楚. 厚地壳的下部普遍为榴辉岩, 当榴辉岩+岩石圈地幔密度超过软流圈地幔密度时, 就可能引起下地壳+岩石圈地幔拆沉, 因此厚地壳的存在是触发拆沉作用的前提, 论证和限定是否存在厚的古地壳成为拆沉作用研究的关键所在. 确定克拉通破坏之前的古地壳厚度主要有两种方法: 一是麻粒岩地体或火山岩中的麻粒岩捕虏体矿物组合平衡压力估算[42,43], 但华北麻粒岩地体和麻粒岩捕虏体数量和分布有限, 这种方法难以获得中生代地壳厚度的总体概貌; 二是确定下地壳岩浆产生的压力, 华北广泛分布的下地壳起源埃达克质岩石为限定中生代地壳厚度提供了一条重要的途径.

埃达克岩具有 HREE 亏损(高 La/Yb)和负 Nb-Ta 异常(低 Nb/La)等地球化学特征, 这些独特地球化学特征的岩石成因涵义及其地球动力学意义已成为国内外关注的重要科学问题. 由 MORB 熔融产生的埃达克岩 HREE 亏损和负 Nb-Ta 异常的岩石学意义比

英文引用格式: Xiong X L, Liu X C, Zhu Z M, et al. Adakitic rocks and destruction of the North China Craton: Evidence from experimental petrology and geochemistry. Sci China Earth Sci, 2011, 54: 858–870, doi: 10.1007/s11430-010-4167-9

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

较明确, 分别由残留石榴子石和金红石引起. Xiong 等[44~46]通过实验限定石榴子石和金红石同时稳定的最小压力大约为 1.5 GPa, 并由此推断俯冲洋壳熔融产生的 TTG/埃达克岩浆形成深度大于 50 km, 这一深度已被 Nair 和 Chacko[47]的实验与模拟计算所证实. 华北埃达克质岩石地球化学特征与俯冲带埃达克岩十分相似, 但由于华北下地壳源区岩石广泛存在负 Nb-Ta 异常, 使得这些埃达克质岩石的负 Nb-Ta 异常对残留金红石的指示意义变得模糊不清, 为限定其产生条件带来了困难. 本文将通过实验岩石学资料来限定华北埃达克岩的源区岩石组成, 并通过基性变质岩体系相平衡、长英质熔体 TiO_2 溶解度、埃达克岩 Nb/La 随 La/Yb 变化等研究来探讨华北埃达克岩浆产生的温压条件、源区残留金红石存在与否以及克拉通破坏是否涉及到地壳减薄.

1　华北克拉通中生代埃达克质岩石

据 Zhai 等[48]总结, 华北克拉通中生代火山-岩浆作用总体可以划分为四期: (1) 210~180 Ma: 小规模火山作用和花岗岩-闪长岩侵入; (2) 160~150 Ma: 碱性火山活动和大规模的地壳熔融; (3) 140~110 Ma: 双峰式火山活动和大规模壳幔特征中酸性岩侵入; (4) 95~75 Ma: 碱性玄武岩浆活动. 第 2~3 阶段直接与克拉通破坏和岩石圈减薄相关, 而第 4 阶段标志着岩石圈减薄过程的结束. 华北克拉通破坏研究近年来一个重要发现, 是从中生代的岩浆活动中识别出大量的埃达克质岩石, 它们在空间上主要分布于克拉通东部的北缘、胶东、苏鲁、大别和长江中下游等地(图 1), 与华北克拉通岩石圈减薄范围基本一致, 时间上主要形成于第 2~3 阶段大规模地壳熔融事件过程中, 即岩石圈减薄时间峰值(130~110 Ma)时期和岩石圈减薄过程中[16,50], 因此这些岩石可能是认识克拉通破坏和岩石圈减薄过程和机制的重要窗口.

众多的研究者对华北埃达克质岩石进行了岩石成因以及构造背景和成矿意义研究[51~94], 这些岩石具有与俯冲洋壳熔融产生的埃达克岩十分相似的岩石地球化学特征, 也即高 Sr、低 Y 和 HREE 以及负 Nb-Ta 异常等, 但也存在一些小的差别, 如 K_2O 含量相对较高, 而且大多数具有弱 Eu 负异常, 而典型埃达克岩 Eu 为无异常或正异常. 为了叙述的方便和简洁, 以下称华北埃达克质岩石为埃达克岩. 按 Mg#高

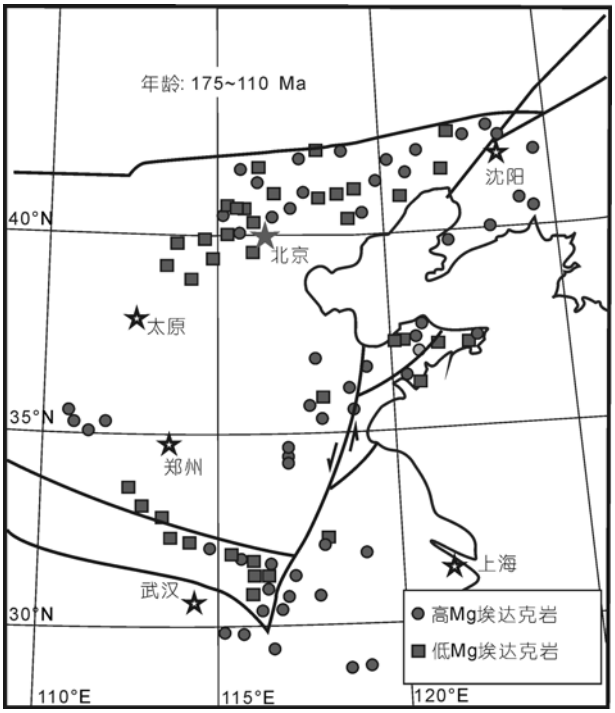


图 1　华北克拉通东部中生代埃达克岩分布

据张旗等[49]修改

低, 华北埃达克岩可分为两类: 高 Mg#(>40~45)埃达克岩和低 Mg#(<40~45)埃达克岩. 高 Mg#埃达克岩含有重要的地幔组分加入, 成因多解, 拆沉下地壳的熔体与地幔反应[11,18,19,54~57]、壳幔岩浆混合[63,64,88,92]、或者俯冲洋壳熔体与地幔反应[93]均可形成高 Mg#埃达克岩浆, 鉴定这类埃达克岩确切属于哪种成因, 实验岩石学方法非常困难, 主要依赖构造背景以及详细的岩石学和地球化学的工作[11]. 低 Mg#埃达克岩由下地壳熔融产生, 成因相对单一, 可以提供下地壳源区岩石组成、岩浆产生温度和压力等信息.

2　华北埃达克岩浆源区岩石组成

部分熔融过程中, K 和 Si 是不相容元素, 熔体的 K_2O 和 SiO_2 含量主要由源岩组成和部分熔融程度控制. 华北中生代埃达克岩 SiO_2 范围 56%~75%, K_2O 范围 2.0%~5.0%(图 2), 绝大部分研究者相信它们是下地壳部分熔融的产物, 可能的源区岩石应当包括下地壳变质中酸性岩或变质基性岩, 但具体的岩石组成并不清楚. 以下我们通过华北埃达克岩的 K_2O 和 SiO_2 含量与部分熔融实验资料的对比来限定它们的

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

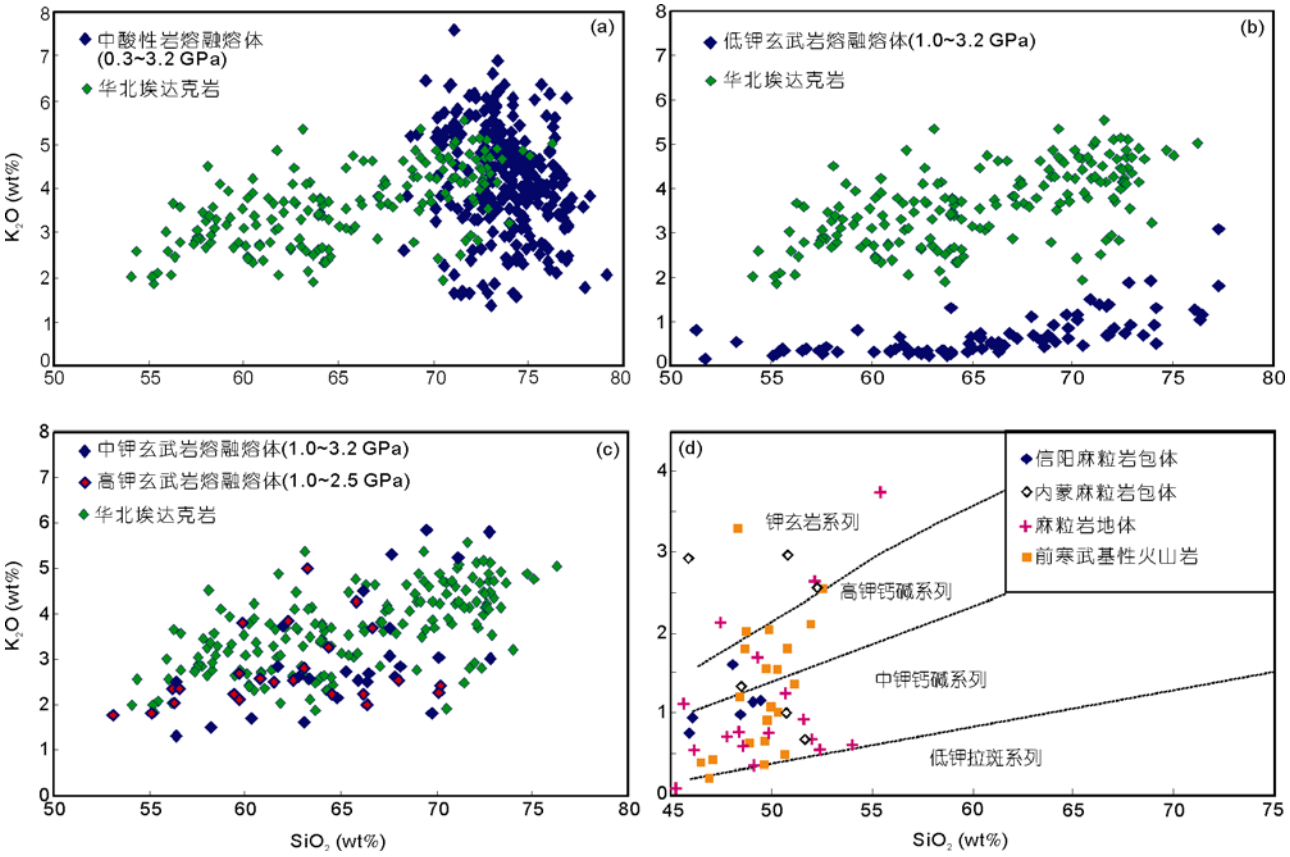


图 2　华北埃达克岩与部分熔融实验产生的熔体 SiO_2-K_2O 比较

(a) 与变质中酸性岩部分熔融实验结果[95~109]比较(华北埃达克岩资料来自文献[54~92, 95~109], 实验的熔体组成资料是电子探针结果, 已标准化到无水的基础); (b) 与低钾变质基性岩部分熔融实验结果[110~119]比较; (c) 与中钾和高钾变质基性岩部分熔融实验结果[44,87,116,120,121]比较; (d) 华北中生代下地壳麻粒岩包体、麻粒岩地体和前寒武基性火山岩 SiO_2-K_2O(信阳麻粒岩包体来自文献[122], 内蒙喀喇沁麻粒岩包体来自文献[123]), 麻粒岩地体来自文献[124~127], 前寒武基性火山岩来自文献[128]

源区岩石组成.

2.1　与变质中酸性岩部分熔融实验结果比较

许多实验工作者以天然的英云闪长质片麻岩[95~100]、黑云母片岩[101~103]以及变质杂砂岩和变质泥质岩[104~109]等中酸性变质岩作为实验初始物, 在涵盖下地壳压力(0.3~3.2 GPa)和温度(700~1150℃)条件下开展相平衡和部分熔融实验, 大部分实验没有加入自由 H_2O, 实验初始物中的 H_2O 主要为角闪石、黑云母和白云母等含水矿物中的结构水. 实验的结果表明, 熔融由含水相分解脱水引起, 固相线温度主要取决于含水相稳定性, 但也与总体组成有关, 不同实验获得的固相线温度变化于 700~900℃之间; 残留相组合与基性岩体系的实验结果相似, 在压力小于 1.0~1.5 GPa 时, 残留固相为麻粒岩矿物组合(斜方辉石+单斜辉石+斜长石+石英为主), 在压力大于 2.0 GPa 时, 残留固相为榴辉岩矿物组合(石榴子石+单斜辉石为主); 熔体具有典型的花岗质岩浆组成, SiO_2 总体大于 70%, K_2O 变化于 1.5%~6.0%之间. 图 2(a)比较华北埃达克岩与变质中酸性岩部分熔融熔体的 SiO_2-K_2O, 该图显示 SiO_2 大于 70%的华北埃达克岩有可能由变质中酸性岩部分熔融产生, 但其主体(SiO_2 小于 70%的埃达克岩)与实验的资料基本没有重叠, 不可能是变质中酸性岩部分熔融的产物.

2.2　与变质基性岩部分熔融实验结果比较

基性岩或玄武岩体系的相平衡和部分熔融实验较多, 按水含量的多少可分为干体系熔融, 脱水熔融(初始物中的水在含水矿物如角闪石中)和湿体系熔融(初始物中的水除了含水矿物外还加入了自由水).

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

近年来干体系开展的相平衡和部分熔融实验[129~131]用来论证洋岛玄武岩(OIB)和洋中脊玄武岩(MORB)中含有榴辉岩组分, 在无水条件下干体系的固相线温度很高, 大约 2.0 GPa 压力条件下超过 1250℃, 产生的熔体具有低 SiO_2(52%~60%)和高 TiO_2 (2.5%~6.0%)的特点, 这种熔体组成与华北埃达克岩相差较大, 因此不能应用到华北克拉通下地壳熔融和埃达克岩成因, 但拆沉的下地壳熔融是否涉及干体系熔融是一个值得关注和讨论的问题[132]. 含有大量或较多自由水(>5%H_2O)湿体系的熔融通常应用于俯冲洋壳熔融, 有兴趣的读者可参阅文献[110,133~141]. 下地壳情况有所不同, 通常没有独立的流体相或者只有非常少量的流体相存在, 因此下地壳熔融总体来说是由于下地壳被增温加热导致含水矿物相脱水引起, 属典型的脱水熔融.

基性岩或玄武岩按 K_2O 含量可分为低钾、中钾、高钾和钾玄岩系列(图 2(d)). 使用玄武质角闪岩(H_2O 含量由角闪石中 2%结构水估算)以及干的玄武岩或麻粒岩+少量 H_2O 作为实验初始物开展相平衡和部分熔融实验, 低钾(<0.3%K_2O)体系的主要工作包括: Winther 和 Newton[111,112](玄武岩 + 0.78%H_2O), Rushmer[113,114](角闪岩, 54%角闪石, 1.08%H_2O), Wolf 和 Wyllie[115](角闪岩, 67%角闪石, 1.34%H_2O), Rapp 和 Watson[116](角闪岩, 烧失量 0.70%~1.65%), Liu 等[110](玄武岩 + 4.0%H_2O), Springer 和 Seck[117](基性麻粒岩 + 1.0% H_2O), Lopez 等[118](角闪岩, 49%角闪石, 1.0% H_2O), Skjerlie[119](含黝帘石榴辉岩). 中钾和高钾体系的实验有: Sen 和 Dunn[120](角闪岩, 76%角闪石, 1.52% H_2O), Rapp 和 Watson[116](角闪岩, 烧失量 1.53%), Xiao 和 Clemens[84](角闪岩, 烧失量 1.18%), 周文戈等[121](角闪岩, 烧失量 0.76%), Xiong 等[44]及其未发表资料(玄武岩+2.0%~5.0% H_2O).

由玄武质角闪岩以及干的玄武岩或麻粒岩 + 少量 H_2O 部分熔融, 残留相在低压下是角闪石麻粒岩, 在高压下是角闪榴辉岩和榴辉岩; 产生的熔体是中酸性的, K_2O 含量主要取决于源岩 K_2O 含量. 图 2(b)比较了华北埃达克岩与低钾变质玄武岩部分熔融产生的熔体 SiO_2-K_2O, 二者基本没有重叠, 表明华北埃达克岩不可能是下地壳低钾拉斑质基性变质岩部分熔融的产物. 图 2(c)比较了华北埃达克岩与中钾和高钾变质玄武岩部分熔融产生的熔体 SiO_2-K_2O, 二者重叠性非常好, 表明中钾和高钾基性变质岩可能是华北下地壳埃达克岩的主要源区岩石. 华北埃达克质岩 Sr 和 Nd 同位素综合研究[142]建议下地壳主要为古老基底岩石; 华北出露在地表的下地壳剖面研究[48]表明, 中性的麻粒岩总体位于下地壳较高的位置, 在地壳的最底部是铁镁质的麻粒岩和榴辉岩; 华北麻粒岩和榴辉岩包体[122~124,143~145]、麻粒岩地体[124~127]和前寒武基性火山岩[144]研究表明下地壳基性岩以中钾和高钾为主, 低钾和钾玄岩系列岩石较少(图 2(d)), 这与由高温高压部分熔融实验资料限定的结果非常一致. 应当指出, 实验岩石学开展的是单一岩石组成的部分熔融实验, 但自然界可能涉及不同岩性混合在一起的熔融, 因此基性下地壳与中酸性下地壳的不同比例混合熔融也能产生一些酸性(SiO_2 > 70%)的埃达克质岩石.

3 华北埃达克岩浆产生温度

3.1 长英质熔体 TiO_2 溶解度模型

花岗质岩浆的温度通常通过锆石饱和或 Ti 在锆石中含量来计算[146~148]; 然而, 大部分花岗岩浆并不是一开始就达到 Zr 饱和, 因此这种方法获得的温度并不是花岗岩浆的产生温度, 而是岩浆冷却结晶残余熔体 Zr 达饱和时的温度. 事实上, 温度超过 800℃的变质玄武岩部分熔融实验几乎都没有观察到残留相中存在锆石, 表明大部分埃达克岩浆最初是 Zr 不饱和的. 硅酸盐熔体 TiO_2 溶解度对温度和熔体组成十分敏感[46,149,150], 而且铁镁质岩石部分熔融时富 Ti 副矿物如金红石、钛铁矿等是常见的残留相, 指示大部分长英质岩浆易于达到 TiO_2 饱和, 因此, 建立长英质熔体组成和温度等参数与 TiO_2 溶解度关系是限定其岩浆产生温度的一条重要途径.

为此, 我们在 P=1.5~3.5 GPa, T=750~1250℃和 H_2O=5 wt%~30 wt%条件下开展了系统的组成、温度、压力和 H_2O 对长英质熔体 TiO_2 溶解度影响的实验研究[46]. 结果表明, 温度和组成对熔体 TiO_2 溶解度有显著影响, TiO_2 溶解度随温度和熔体基性程度增加而显著增加; 压力和 H_2O 的作用相对较小, 熔体 TiO_2 溶解度随压力增加而减小, 但随 H_2O 含量的增加而有所增加. 通过近 40 个实验, 建立了熔体 TiO_2 溶解度与温度、压力、组成和 H_2O 关系模型:

$$\ln(TiO_2)_{melt}=\ln(TiO_2)_{rutile}+1.701-9041/T-0.173P+0.348FM+0.016H_2O,$$

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

公式中 TiO_2 和 H_2O 含量的单位是 wt%, 温度 T 的单位是 K, 压力 P 的单位是 GPa, FM(FM=(1/Si)[Na+K+2(Ca+Fe+Mg)]/Al)是熔体组成参数[150], 原子符号代表各阳离子在熔体中的摩尔分数; FM 越大, 熔体基性程度越高或熔体聚合程度越低.

3.2 对华北埃达克岩浆产生温度的应用

为了将上述模型应用于华北埃达克岩, 首先必须判断哪些埃达克岩是 TiO_2 饱和的. 图 3(a)和(b)阴影域代表变质基性岩部分熔融在富 Ti 相饱和条件下熔体的 SiO_2-TiO_2 变化相关性范围, 由 Sen 和 Dunn[120]、Rapp 和 Watson[116]、Ernst 等[135]和 Xiong 等[44]及其未发表实验资料获得. 华北高 Mg#(>40~45)埃达克岩(如辽西和河北、徐淮和苏鲁、大别和长江中下游)总体落在实验获得的 TiO_2 饱和域下方(图 3(a)), 表明这些埃达克岩是 TiO_2 不饱和的; 这是由于熔体/地幔反应或者岩浆混合等过程使地幔组分加入导致熔体基性程度增加的结果. 华北低 Mg#(<40~45)埃达克岩既有 TiO_2 饱和的, 也有不饱和的. 总体来说, SiO_2>63%~65%时绝大部分是 TiO_2 饱和的(但也有些是不饱和的), 而 SiO_2<63%~65%时几乎都是不饱和的. 大别地区除殷祖等岩体外, 几乎都是 TiO_2 饱和的; 胶东的玲珑、上庄和三佛山以及克拉通北缘的红花梁、都山和八达岭等岩体也显示明显的 TiO_2 饱和. 考虑天然花岗质岩浆通常含 3%~6% H_2O[151], 我们使用上述 TiO_2 溶解度模型计算了 1.0, 1.5 和 2.0 GPa 压力条件下含 5%H_2O 的长英质熔体 TiO_2 溶解度随熔体组成 FM 变化的温度曲线(图 3(c)). 将 TiO_2 饱和的低 Mg#埃达克岩资料投入该图, 限定这些埃达克浆产生在 750~950℃之间.

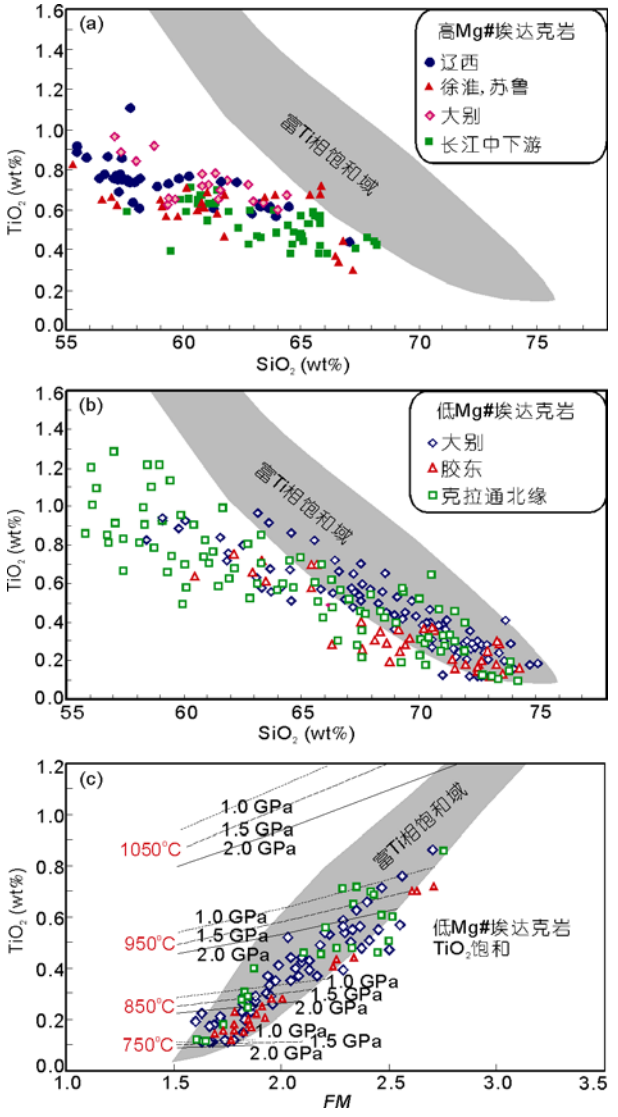


图 3 华北埃达克岩 SiO_2-TiO_2

(a) 高 Mg#(>40~45)埃达克岩 SiO_2-TiO_2(资料来自文献[18, 54~57, 60~74]); (b) 低 Mg#(<40~45)埃达克岩 SiO_2-TiO_2(资料来自文献[58, 59, 76~86]; (c) TiO_2 溶解度模型对 TiO_2 饱和埃达克岩浆产生温度的限定(图例同(b)), 资料来源: 大别[59,83,85], 胶东[69,80], 克拉通北缘[71,62,78]). 阴影为富 Ti 相饱和条件下变质基性岩部分熔融熔体域, 详见文中描述

4 华北埃达克岩浆产生压力和深度

4.1 基性变质岩部分熔融域相平衡关系

基性变质岩或含水玄武岩部分熔融实验的相平衡资料总结在图 4. 除了压力较高(>2.0 GPa)条件下多硅白云母和黝帘石在固相线附近脱水可能引起低程度部分熔融外, 基性变质岩部分熔融主要由角闪石脱水引起. 在部分熔融域, 随着压力的增加, 角闪石和斜长石稳定性减小而逐渐分解, 石榴子石稳定性和含量不断增加, 随着压力不断增加, 角闪石分解释放出越来越多的 TiO_2, 可能导致金红石和其他富 Ti 副矿物(如榍石、钛铁矿和钛磁铁矿)形成, 在此过程中, 金红石含量增加, 其他富 Ti 副矿物含量减少; 残留体由斜长角闪岩逐渐转变为含金红石的角闪榴辉岩或石榴子石麻粒岩, 最终为含金红石的榴辉岩. 固相线温度(初熔温度)取决于体系 H_2O 含量, 在 1.0~2.5 GPa 压力范围, 湿固相线最低达到 680℃, 而

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

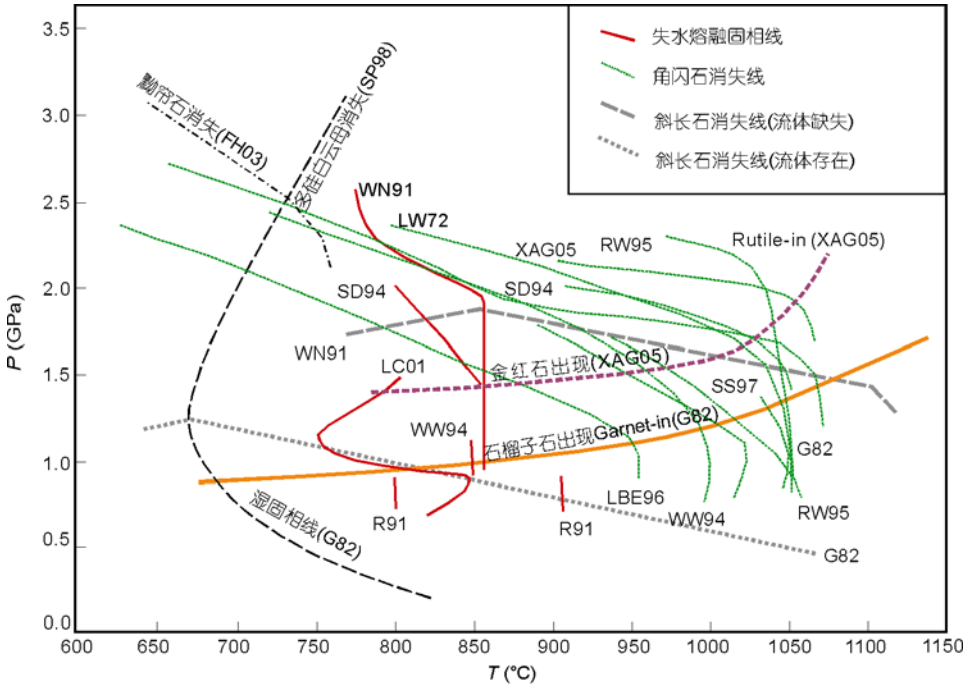


图 4　下地壳压力条件下含水基性岩部分熔融域相平衡关系

资料来源: FH03, Forneris 和 Holloway[138]; G82, Green[134]; LC01, Lopez 和 Castro[118]; LBE96, Liu 等[110]; LW72, Lambert 和 Wyllie[133]; R91, Rushmer[113]; RW95, Rapp 和 Watson[116]; SD94, Sen 和 Dunn[120]; SS97, Springer 和 Seck[117]; WN91; Winther 和 Newton[111]; WW94, Wolf 和 Wyllie[115]; XAG05, Xiong 等[44]; SP98, Schmidt 和 Poli[141]

脱水熔融固相线变化于 750~900℃之间(取决于 H_2O 含量和总体组成); 角闪石分解从脱水固相线开始直至其稳定性边界温压条件结束, 总体不超过 2.2~2.5 GPa 和 1050℃; 斜长石稳定性对 H_2O 非常敏感, 其稳定压力边界随水含量减小而增加, 在流体存在条件下低于 1.0 GPa, 在脱水熔融的条件下可达 1.8 GPa 甚至更高; 石榴子石稳定于大约 1.0 GPa 以上, 金红石稳定于大约 1.5 GPa 以上.

4.2　石榴子石和金红石对埃达克岩浆产生压力的限制

Defant 和 Drummond[152]曾提出俯冲洋壳熔融产生的埃达克/TTG 岩浆形成深度为 70~90 km, 这是根据角闪岩向榴辉岩过渡过程中角闪石脱水熔融的压力上限 2.2~2.5 GPa 确定的. 由于角闪石分解并不是突然发生在其稳定性边界, 而是一个从低压到高压逐渐脱水的过程[45], 因此部分熔融可以在低于这一压力深度下发生. 变质玄武岩部分熔融过程中, 熔体的微量元素丰度和特征是部分熔融过程中微量元素在残留矿物与熔体之间分配的结果, 埃达克岩独特的微量元素特征提供了其源区矿物学和形成条件的最好限制. 俯冲洋壳熔融产生的埃达克/TTG 岩石与 MORB 相比具有高 Sr, 低 HREE 以及负 Nb-Ta 异常, 普遍公认具有高 HREE 分配系数的石榴子石是其岩浆产生时一个必要的残留相, 而具有高 Sr 和 Eu 分配系数的斜长石在残留体中是微量或不存在的; 俯冲洋壳 MORB 没有负 Nb-Ta 异常, 实验[44]表明金红石是残留相之一才能解释 TTG/埃达克岩的负 Nb-Ta 异常. 因此, 基于角闪石分解消失的压力上限(2.5 GPa)以及残留石榴子石和金红石同时稳定的压力下限(1.5 GPa)限定俯冲带埃达克/TTG 岩浆产生压力为 1.5~2.5 GPa(50~80 km)[44,45]. 最近 Nair 和 Chacko[47]的实验和 HREE 模拟计算表明, 残留石榴子石含量能指示埃达克/TTG 岩浆产生深度, 熔融深度大于 48 km 才能产生足够的残留石榴子石(>20%)导致 TTG 岩浆的 HREE 亏损程度或高 La/Yb 比值, 这一通过石榴子石残留量限定的埃达克/TTG 岩浆产生深度与 Xiong 等[44]由金红石稳定的压力限定的最小深度(50 km)基本一致.

华北埃达克岩大多数具有弱负 Eu 异常, 而典型

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

俯冲带埃达克岩 Eu 表现为无异常或正异常, 指示华北埃达克岩的源区含有残留斜长石, 这与下地壳 H_2O 含量低或脱水熔融条件下斜长石可以稳定在较高的压力是一致的. 华北埃达克岩的HREE亏损和负 Nb-Ta 异常特征与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩十分相似, 普遍认为HREE亏损指示其源区存在石榴子石. 然而, 仅仅通过负 Nb-Ta 异常不能判断它们的源区是否存在金红石, 原因是华北下地壳岩石如麻粒岩包体和麻粒岩地体也普遍具有负Nb-Ta异常. 如前所述, 不少低 Mg#埃达克岩的确是 TiO_2 不饱和的, 它们的源区不可能存在任何富 Ti 副矿物. 然而, 华北也有许多低Mg#埃达克岩是 TiO_2 饱和的, 如大别大部分埃达克岩、胶东玲珑、上庄和三佛山以及克拉通北缘红花梁、都山和八达岭等岩体, 他们的源区存在富 Ti 副矿物, 但是否是金红石仍然需要进一步判断.

4.3 TiO_2 饱和的低 Mg#埃达克岩源区存在残留金红石

富 Ti 副矿物包括金红石、榍石、钛铁矿和钛磁铁矿, 其中金红石对 Nb, Ta 的接纳能力最大, 榍石次之, 钛铁矿和钛磁铁矿能力有限[44,153,154]. 稀土元素在金红石、钛铁矿和钛磁铁矿中是不相容元素, 而在榍石中是相容元素, 稀土元素与 Nb, Ta 在榍石/熔体之间的分配系数大体相等, 界于 1.0~10 之间[153]. 因此, 富 Ti 副矿物中只有残留金红石能够导致熔体显著的 Nb/La 比值减小. 石榴子石富 HREE 或 Yb, 亏损 LREE 或 La, 它对 La/Yb 的分异能力大大超过单斜辉石和角闪石. 因此部分熔融过程中残留石榴子石含量的增加将导致熔体 La/Yb 比值增大, 而残留金红石的出现和含量增加将导致熔体 Nb/La 比值减小和负 Nb-Ta 异常的加著. 基于这一原理, 我们来讨论 TiO_2 饱和埃达克岩的源区是否存在金红石. 图 5 比较华北 TiO_2 饱和埃达克岩与下地壳麻粒岩包体、麻粒岩地体和前寒武基性火山岩的 La/Yb-Nb/La, 该图显示: (1) 埃达克岩的 Nb/La 比值总体比下地壳岩石低, 下地壳岩石 Nb/La 界于 0.2~1.0 之间, 平均 0.60, 而埃达克岩界于 0.1~0.5 之间, 平均 0.20, 表明埃达克岩的负 Nb 异常总体比下地壳岩石要显著; (2) 埃达克岩的 Nb/La 随 La/Yb 的增大而减小, 这种相关性在 La/Yb<120 表现较明显. 如果 La/Yb 增加是由于熔融深度增大, 残留石榴子石含量增加所致, 那么 Nb/La 随 La/Yb 的增大而减小很可能是由于残留金红石的存在和含量增加的结果. 因此, 我们相信大别地区、胶东的玲珑、上庄和三佛山以及克拉通北缘的红花梁和都山等 TiO_2 饱和低 Mg#埃达克岩的源区存在金红石, 这些地区在中生代地壳厚度应当超过 50 km, 特别是大别地区大部分埃达克岩 La/Yb>50, Nb/La< 0.2, 指示该区地壳厚度最大, 可能大大超过 50 km.

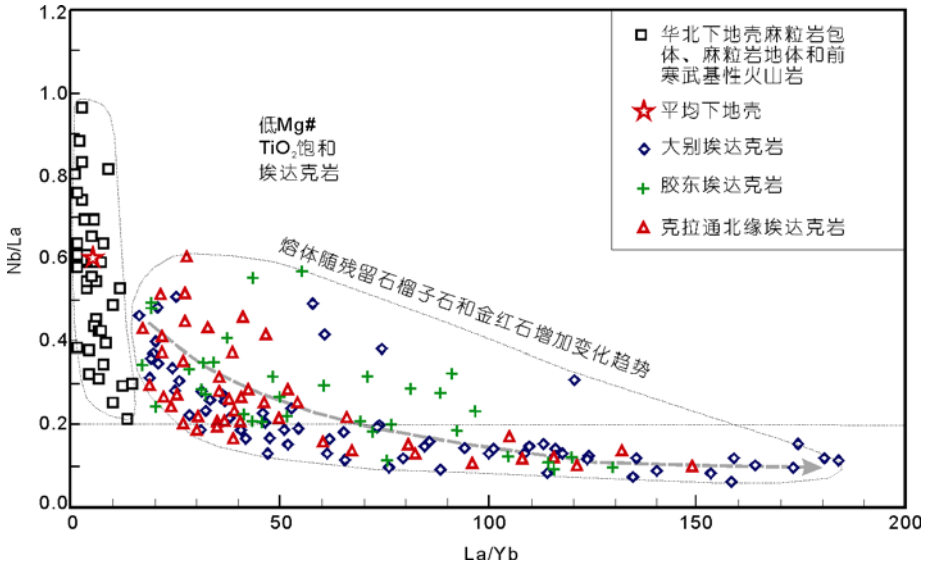


图 5　华北 TiO_2 饱和低 Mg#埃达克岩与下地壳岩石 La/Yb-Nb/La 比较

下地壳麻粒岩包体、麻粒岩地体和前寒武基性火山岩资料来源同图 2(d); 埃达克岩资料来源同图 3(c)

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

信阳、徐淮和内蒙喀喇沁下地壳麻粒岩和榴辉岩包体含有金红石, 直接指示中生代厚地壳的存在.

5　高Mg#埃达克岩的地壳端员起源于厚地壳?

高 Mg#埃达克岩含有重要的地幔组分加入, 成因多解; 对于华北中生代出现的大量高 Mg#埃达克岩, 主流的岩石成因观点包括: (1) 拆沉下地壳熔融以及熔体与地幔反应, (2) 下地壳熔融及其与地幔岩浆的混合. 无论哪种成因解释, 均涉及下地壳和地幔两个物质端员, Mg#的增加指示地幔端员物质的加入. 通常地幔岩浆比地壳长英质岩石的 Nb/La 高, 而 La/Yb 低, 因此, 混合岩浆的 Nb/La 将随地幔岩浆的加入而增加, 而 La/Yb 将减少. 图 6 显示华北高 Mg#埃达克岩 Nb/La 随 Mg#增加而增加(图 6(a)), 而 La/Yb 随 Mg#增加而减少(图 6(b)), 与壳幔相互作用规律相符, 同时指示地壳端员相对于地幔端员具有较低的 Nb/La, 但较高的 La/Yb, 这一结果表明地壳端员岩浆可能起源于高压, 特别是大别赤涂岭[70]、月山-洪泽[54]、苏鲁[68]和胶东[74]等地的高 Mg#埃达克岩尽管发生了地幔组分的加入, 他们的 Nb/La 仍然小于 0.2, 低于华北下地壳岩石(麻粒岩和榴辉岩包体、麻粒岩地体和前寒武基性火山岩)Nb/La 的下限 0.2(图 6), 指示地壳端员岩浆形成可能发生在残留金红石稳定的条件. 因此, 无论是岩浆混合还是拆沉作用解释, 均指示华北高 Mg#埃达克岩的地壳端员岩浆起源于增厚地壳.

6　结论

(1) 实验岩石学的资料表明中钾和高钾基性变质岩是华北下地壳埃达克岩的主要源区岩石. 利用变质基性岩部分熔融在富 Ti 相饱和条件下熔体的 SiO_2-TiO_2 变化相关性和 TiO_2 溶解度模型, 判断出许多低 Mg#埃达克岩岩浆产生时达到 TiO_2 饱和、表明它们的源区存在富 Ti 副矿物.

(2) 根据 TiO_2 饱和的低 Mg#埃达克岩 Nb/La 比值总体比下地壳岩石低, 并且 Nb/La 随 La/Yb 的增大而减小, 解释残留石榴子石和金红石的存在以及含量的增加导致了这些变化, 限定这些埃达克岩浆产生深度超过 50 km. 高 Mg#埃达克岩形成过程中由于熔体/地幔反应或者地幔岩浆的混合导致了熔体基性程度增加及 TiO_2 不饱和, 这个过程也导致 Nb/La 增加, 但华北一些高 Mg#埃达克岩的 Nb/La 仍然低于该区下地壳岩石的 Nb/La 下限, 表明地壳熔融可能也发生在残留金红石稳定的条件. 因此, 无论是岩浆混合还是拆沉作用成因解释, 均指示具有低 Nb/La 特征的高 Mg#埃达克岩地壳端员岩浆起源于 50 km 以上的厚地壳.

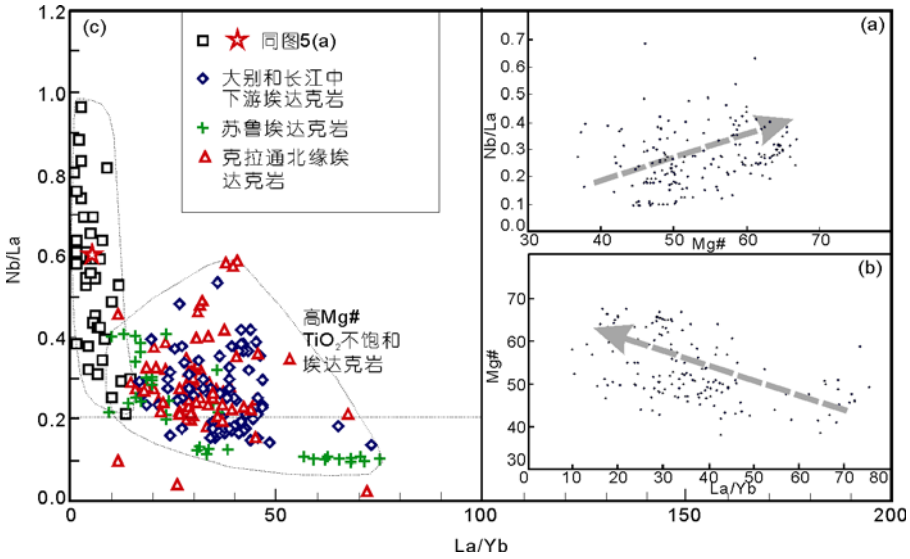


图 6　华北高 Mg#埃达克岩与下地壳岩石 La/Yb-Nb/La 比较

埃达克岩资料来源同图 3(a)

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

(3) 现今华北克拉通东部地壳厚度总体不超过35 km, 本文埃达克岩浆起源深度研究揭示大别、胶东和克拉通北缘均存在超过50 km的厚地壳, 中生代和现今地壳厚度对照表明华北克拉通破坏和岩石圈减薄可能涉及至少 15 km 的地壳厚度减薄或下地壳拆沉.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

1 陈国达. 中国地台"活化区"的实例并着重讨论华夏古陆问题. 地质学报, 1956, 36: 239–272
2 Fan W M, Menzies M A. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. Geotect Metall, 1992, 16: 171–180
3 Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. On and off the North China Craton: Where is the Archean keel? J Petrol, 2000, 41: 933–950
4 Griffin W L, O'Reilly S Y, Ryan C G. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa, Siberia and China: Proton microprobe studies. In: Abstract of International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and Its Environs, Beijing, 1992. 65–66
5 Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, et al, eds. Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geol Soc Spec Pub, 1993, 76: 71–78
6 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆"活化"——东亚型大陆动力学模式研究计划. 现代地质, 1994, 8: 349–356
7 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1996. 110
8 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
9 Gao S, Zhang B R, Jin Z M, et al. How mafic is the lower continental crust? Earth Planet Sci Lett, 1998, 16: 101–117
10 Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2002, 198: 307–322
11 Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China Craton. Nature, 2004, 432: 892–897
12 Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2008, 270: 41–53
13 高山, 章军锋, 许文良, 等. 拆沉作用与华北克拉通破坏. 科学通报, 2009, 54: 1962–1973
14 Wu F Y, Walker R J, Ren X W, et al. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. Chem Geol, 2003, 196: 107–129
15 Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 2006, 70: 5013–5034
16 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 2008, 24: 1145–1174
17 Liu Y S, Gao S, Kelemen P B, et al. Recycled crust controls contrasting source compositions of Mesozoic and Cenozoic basalts in the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 2008, 72: 2349–2376
18 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
19 Xu W L, Gao S, Wang Q H, et al. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China Craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. Geology, 2006, 34: 721–724
20 Xu Y G, Menzies M A, Vroon P, et al. Texture-temperature-geochemistry relationships in the upper mantle as revealed from spinel peridotite xenoliths from Wangqing, NE China. J Petrol, 1998, 39: 469–493
21 Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. Phys Chem Earth, 2001, 26: 741–757
22 Xu Y G, Menzies M A, Thirlwall M F, et al. "Reactive" harzburgites from Huinan, NE China: Products of lithosphere-asthenosphere interaction during lithospheric thinning? Geochim Cosmochim Acta, 2003, 67: 487–505
23 徐义刚, 李洪颜, 庞崇进, 等. 论华北克拉通破坏的时限. 科学通报, 2009, 54: 1974–1989

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

24 郑建平. 中国东部地幔置换作用与中新生带岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 126
25 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Relict refractory mantle beneath the eastern North China Block: Significance for lithosphere evolution. Lithos, 2001, 57: 43–66
26 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: "蘑菇云"模型. 地学前缘, 2000, 7: 97–107
27 郑建平, 余淳梅, 路凤香, 等. 华北东部大陆地幔橄榄岩组成、年龄与岩石圈减薄. 地学前缘, 2007, 14: 87–97
28 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 5203–5225
29 郑建平. 不同时空背景幔源物质对比与华北深部岩石圈破坏和增生置换过程. 科学通报, 2009, 54: 1990–2007
30 周新华. 中国东部中新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘, 2006, 13: 50–64
31 Xu X S, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Re-Os isotopes of sulfides in mantle xenoliths from eastern China: Progressive modification of lithospheric mantle. Lithos, 2008, 102: 43–64
32 Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. Lithos, 2009, 110: 305–326
33 郑永飞, 吴福元. 克拉通岩石圈的生长和再造. 科学通报, 2009, 54: 1945–1949
34 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 等. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理. 岩石学报, 2005, 21: 443–454
35 张宏福. 橄榄岩-熔体的相互作用: 岩石圈地幔组成转变的重要方式. 地学前缘, 2006, 13: 65–74
36 张宏福. 橄榄岩-熔体相互作用: 克拉通型岩石圈地幔能够被破坏之关键. 科学通报, 2009, 54: 2008–2026
37 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major, trace element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. Contrib Mineral Petrol, 2002, 144: 241–253
38 Zhang H F. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean Craton. Earth Planet Sci Lett, 2005, 237: 768–780
39 Zhang H F, Goldstein S, Zhou X H, et al. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts. Contrib Mineral Petrol, 2008, 155: 271–293
40 牛耀龄. 玄武岩浆起源和演化的一些基本概念以及对中国东部中-新生代基性火山岩成因的新思路. 高校地质学报, 2005, 11: 9–46
41 朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. 科学通报, 2009, 54: 1950–1961
42 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
43 Zheng J P, Sun M, Lu F X, et al. Mesozoic lower crustal xenoliths and their significance in lithospheric evolution beneath the Sino-Korea. Tectonophysics, 2003, 361: 37–60
44 Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. Chem Geol, 2005, 218: 339–359
45 Xiong X L. Trace element evidence for the growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite. Geology, 2006, 34: 945–948
46 Xiong X L, Keppler H, Audétat A, et al. Experimental constraints on rutile saturation during partial melting of metabasalt at the amphibolite to eclogite transition, with applications to TTG genesis. Amer Mineral, 2009, 94: 1175–1186
47 Nair R, Chacko T. Role of oceanic plateaus in the initiation of subduction and origin of continental crust. Geology, 2008, 36: 583–586
48 Zhai M G, Fan Q C, Zhang H F, et al. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithospheric thinning beneath eastern North China: Underplating, replacement and delamination. Lithos, 2007, 96: 36–54
49 张旗, 王焰. 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
50 Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. Chem Geol, 2005, 221: 127–156
51 张旗, 王焰, 王元龙. 埃达克岩与构造环境. 大地构造与成矿学, 2003, 27: 101–108
52 张旗, 李承东, 王焰, 等. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义. 岩石学报, 2005, 21: 1527–1537
53 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 北京: 中国大地出版社, 2008. 1–344
54 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
55 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. Resourc Geol, 2004, 54: 137–152

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

56 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

57 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

58 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 Geol, 2007, 115: 149–161

59 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

60 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学, 2001, 30: 353–362

61 李伍平, 李献华, 路凤香. 辽西中侏罗世高 Sr 低 Y 型火山岩的成因及其地质意义. 岩石学报, 2001, 17: 523–532

62 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 等. 华北克拉通北部边缘中生代高锶花岗岩类: 地球化学与源区性质. 岩石学报, 2002, 18: 257–274

63 陈斌, 翟明国, 邵济安. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 896–907

64 Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. Contrib Mineral Petrol, 2004, 148: 489–501

65 李承东, 张旗, 苗来成, 等. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系. 岩石学报, 2004, 20: 269–284

66 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 等. 北京房山岩体锆石 U-Pb 年龄和 Sr、Nd、Pb 同位素与微量元素特征及成因探讨. 岩石学报, 2005, 21: 776–788

67 Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, et al. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. J Asian Earth Sci, 2006, 27: 230–240

68 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

69 Hou M L, Jiang Y H, Jiang S Y, et al. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: Implications for crustal thickening to delamination. Geol Mag, 2007, 144: 619–631

70 黄华, 高山, 胡兆初, 等. 辽西彰武地区中生代高镁安山岩地球化学及其对新生代下地壳拆沉作用的指示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 1287–1300

71 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

72 Yang W, Li S G. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. Lithos, 2008, 102: 88–117

73 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

74 Liu S, Hu R Z, Gao S, et al. Zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of adakitic volcanic rocks from Jiaodong, Shandong Province, Eastern China: Constraints on petrogenesis and implications. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 445–458

75 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

76 李伍平, 李献华. 燕山造山带中段中晚侏罗世中酸性火山岩的成因及其意义. 岩石学报, 2004, 20: 501–510

77 李晓勇, 郭锋, 范蔚茗, 等. 北京西山东岭台组粗面质火山岩地球化学: 下地壳熔融成因. 大地构造与成矿学, 2004, 28: 155–164

78 王焰, 张旗. 八达岭花岗杂岩的组成,地球化学特征及其意义. 岩石学报, 2001, 17: 533–540

79 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 等. 胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因. 岩石学报, 2003, 19: 692–700

80 张华锋, 翟明国, 童英, 等. 胶东半岛三佛山高 Ba-Sr 花岗岩成因. 地质论评, 2006, 52: 43–53

81 张华锋, 翟明国, 何中甫, 等. 胶东昆箭山杂岩中高银花岗岩地球化学成因及其意义. 岩石学报, 2004, 20: 369–380

82 袁洪林, 柳小明, 刘勇胜, 等. 北京西山晚中生代火山岩 U-Pb 锆石年代学及地球化学研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 821–836

83 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Post-collisional granitoids from the Dabie Orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust. Lithos, 2007, 93: 248–272

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

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

85 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
86 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 817–827
87 肖龙, Rapp R P, 许继峰, 等. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约. 岩石学报, 2004, 20: 219–228
88 张宏福、邵济安. 辽西义县组火山岩: 拆沉作用还是岩浆混合作用的产物? 岩石学报, 2008, 24: 37–48
89 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
90 Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: Implications for enrichment processes beneath continental collisional belt. Lithos, 2004, 78: 291–305
91 Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis. Chin Sci Bull, 2006, 51: 257–268
92 Yang J H, Wu F Y, Wilde A S, et al. Mesozoic decratonization of the North China Block. Geology, 2008, 36: 467–470
93 Ling M X, Wang F Y, Ding X, et al. Cretaceous ridge subduction along the lower Yangtze river belt, eastern China. Econ Geol, 2009, 104: 303–321
94 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
95 Douce A E P. Vapor-absent melting of tonalite at 15–32 kbar. J Petrol, 2005, 46: 275–290
96 Singh J, Johannes W. Dehydration melting of tonalites. Part II. Composition of melts and solids. Contrib Mineral Petrol, 1996, 125: 26–44
97 Singh J, Johannes W. Dehydration melting of tonalites. Part I. Beginning of melting. Contrib Mineral Petrol, 1996, 125: 16–25
98 Skjerlie K P, Johnston A D. Fluid-absent melting behavior of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: Implications for the generation of anorogenic granites. J Petrol, 1993, 34: 785–815
99 Skjerlie K P, Johnston A D. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites. Geology, 1992, 20: 263–266
100 Watkins J, Clemens J, Treloar P. Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas: Melting of sodic metatonalites at 0.6–1.2 GPa. Contrib Mineral Petrol, 2007, 154: 91–110
101 Gardien V, Thompson A B, Ulmer P. Melting of biotite + plagioclase+ quartz gneisses: The role of H_2O in the stability of amphibole. J Petrol, 2000, 41: 651–666
102 Douce A E P, Beard J S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. J Petrol, 1995, 36: 707–738
103 Castro A, Corretge L G, El-Biad M, et al. Experimental constraints on hercynian anatexis in the Iberian Massif, Spain. J Petrol, 2000, 41: 1471–1488
104 Vielzeuf D, Montel J M. Partial melting of metagreywackes. Part I. Fluid-absent experiments and phase relationships. Contrib Mineral Petrol, 1994, 117: 375–393
105 Montel J M, Vielzeuf D. Partial melting of metagreywackes, Part II. Compositions of minerals and melts. Contrib Mineral Petrol, 1997, 128: 176–196
106 Douce A E P, Beard J S. Effects of P, $f(O_2)$ and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes. J Petrol, 1996, 37: 999–1024
107 Casco A G, Haissen F, Castro A, et al. Synthesis of staurolite in melting experiments of a natural metapelite: Consequences for the phase relations in low-temperature pelitic migmatites. J Petrol, 2003, 44: 1727–1757
108 Hermann J, Spandler C J. Sediment melts at sub-arc depths: An experimental study. J Petrol, 2008, 49: 717–740
109 Skjerlie K P, Johnston A D. Vapour-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases: Implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins. J Petrol, 1996, 37: 661–691
110 Liu J, Bohlen S R, Ernst W G. Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust. Earth Planet Sci Lett, 1996, 143: 161–171
111 Winther K T, Newton R C. Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: Evidence on the origin of Archaean cratons. Bull Geol Soc Denmark, 1991, 39: 213–228
112 Winther K T. An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts. Chem Geol, 1996, 127: 43–59
113 Rushmer T. Partial melting of two amphibolites: Contrasting experimental results under fluid-absent conditions. Contrib Mineral Petrol, 1991, 107: 41–59
114 Rushmer T. Experimental high-pressure granulites: Some applications to natural mafic xenolith suites and Archean granulite terranes. Geology, 1993, 21: 411–414

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

115 Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: The effects of temperature and time. Contrib Mineral Petrol, 1994, 115: 369–383
116 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
117 Springer W, Seck H A. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: Implications for the origin of TTG magmas. Contrib Mineral Petrol, 1997, 127: 30–45
118 Lopez S, Castro A. Determination of the fluid-absent solidus and supersolidus phase relationships of MORB-derived amphibolites in the range 4–14 kbar. Am Miner, 2001, 86: 1396–1403
119 Skjerlie K P. The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 10 to 32 Gpa: Implications for melting in thickened continental crust and for subduction-zone processes. J Petrol, 2002, 43: 291–314
120 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
121 周文戈, 谢鸿森, 刘永刚, 等. 2.0 GPa 块状斜长角闪岩部分熔融——时间和温度的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 320–332
122 郑建平, 孙敏, 路凤香, 等. 信阳基性麻粒捕虏体及其华北南缘早中生代下地壳性质. 岩石学报, 2005, 21: 91–98
123 邵济安, 韩庆军, 李惠民. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2000, 30: 148–153
124 黄小龙, 徐义刚, 储雪蕾, 等. 华北地台部分麻粒岩地体及包体的地球化学特征对比. 岩石矿物学杂志, 2001, 20: 318–328
125 刘勇胜, 高山, 骆庭川. 华北克拉通麻粒岩的地球化学特征及其对太古宙下地壳组成的指示意义. 地质地球化学, 1999, 27: 40–46
126 沈其韩, 耿元生. 冀西北太古宙条带状麻粒岩的岩石学和地球化学特征. 岩石学报, 1996, 12: 247–260
127 张宗清, 沈其韩, 耿元生, 等. 赤城伙房村和崇礼上新营变质岩的地球化学特征、年龄及其区域地壳形成时间. 岩石学报, 1996, 12: 315–328
128 刘勇胜, 高山, 王选策, 等. 太古宙-元古宙界限基性火山岩 Nb/Ta 比值变化及其对地球 Nb/Ta 平衡的指示意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 1002–1014
129 Kogiso T, Hirschmann M M. Partial melting experiments of bimineralic eclogite and the role of recycled mafic oceanic crust in the genesis of ocean island basalts. Earth Planet Sci Lett, 2006, 249: 188–199
130 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
131 Spandler C, Yaxley G, Green D H, et al. Phase relations and melting of anhydrous K-bearing eclogite from 1200 to 1600℃ and 3 to 5 GPa. J Petrol, 2008, 49: 771–795
132 王超, 金振民, 高山, 等. 华北克拉通岩石圈破坏的熔体-橄榄岩反应机制: 实验约束. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2010, 40: 541–555
133 Lambert I B, Wyllie P J. Melting of gabbro (quartz eclogite) with excess water to 35 kilobars, with geological applications. J Geol, 1972, 80: 693–708
134 Green T H. Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite. In: Thorpe R S, ed. Andesites. New York: John Wiley, 1982. 465–487
135 Ernst W G, Liu J. Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB-A semiquantitative thermobarometer. Am Miner, 1998, 83: 952–969
136 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
137 Schmidt M W, Vielzeuf D, Auzanneau E. Melting and dissolution of subducting crust at high pressures: The key role of white mica. Earth Planet Sci Lett, 2004, 228: 65–84
138 Forneris J F, Holloway J R. Phase equilibria in subducting basaltic crust: Implications for H_2O release from the slab. Earth Planet Sci Lett, 2003, 214: 187–201
139 Kessel R, Ulmer P, Pettke T, et al. The water-basalt system at 4 to 6 GPa: Phase relations and second critical endpoint in a K-free eclogite at 700 to 1400℃. Earth Planet Sci Lett, 2005, 237: 873–892
140 Klimm K, Blundy J D, Green T H. Trace element partitioning and accessory phase saturation during H_2O-saturated melting of basalt with implications for subduction zone chemical fluxes. J Petrol, 2008, 49: 523–553
141 Schmidt M W, Poli S. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. Earth Planet Sci Lett, 1998, 163: 361–379
142 张旗, 王焰, 王元龙. 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: 236–344

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

143 樊祺诚, 刘若新. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕掳体. 科学通报, 1996, 41: 235–238
144 王清海, 许文良, 王冬艳, 等. 徐淮地区中生代深部地壳的物质组成及热状态——深源捕虏体证据. 大地构造与成矿学, 2003, 27: 362–371
145 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
146 Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth Planet Sci Lett, 1983, 64: 295–304
147 Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 2003, 31: 529–532
148 Watson E B, Harrison T M. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest earth. Science, 2005, 308: 841–844
149 Green T H, Pearson N J. Ti-rich accessory phase saturation in hydrous mafic-felsic compositions at high *P*, *T*. Chem Geol, 1986, 54: 185–201
150 Ryerson F J, Watson E B. Rutile saturation in magmas: Implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts. Earth Planet Sci Lett, 1987, 86: 225–239
151 Clemens J D. Water contents of intermediate to silicic magmas. Lithos, 1984, 17: 273–287
152 Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 1990, 347: 662–665
153 Prowatke S, Klemme S. Effect of melt composition on the partitioning of trace elements between titanite and silicate melt. Geochim Cosmochim Acta, 2005, 69: 695–709
154 Klemme S, Günther D, Hametner K, et al. The partitioning of trace elements between ilmenite, ulvospinel, armalcolite and silicate melts with implications for the early differentiation of the moon. Chem Geol, 2006, 234: 251–263

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