

# 地幔富硅交代与大陆岩石圈的演化

陈立辉,周新华

(中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈构造演化开放实验室,北京 100029)

**摘要:** 富硅交代是弧下地幔中熔体-岩石相互作用的主要表现形式,是造成古老克拉通陆下岩石圈地幔富硅的主要机制。在弧下地幔捕掳体中,橄榄岩被来自俯冲洋壳物质部分熔融生成的含水富硅熔体交代后,斜方辉石含量的增加使全岩富集  $\text{SiO}_2$ ,斜方辉石显示异常低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,微量元素上表现为强烈富集 LILE,强烈亏损 Nb, Ta 和 Ti。在古老克拉通地幔岩样品中,方辉橄榄岩具过剩的斜方辉石,橄榄石的 Ni 含量与斜方辉石的组成含量成正比,而和橄榄石的  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$  值没有正比关系,被解释为亏损的地幔橄榄岩和来自俯冲板片的富硅熔体相互作用的结果。熔体-岩石相互作用最终导致了陆下岩石圈地幔富集  $\text{SiO}_2$ ,这种被含水富硅熔体改造后的地幔岩石的部分熔融可能是造成陆壳富硅富镁的主要原因。含水富硅熔体对岩石圈地幔的影响程度也可能是大陆岩石圈增生或裂解、增厚或减薄的关键因素之一。

**关键词:** 上地幔;富硅交代;熔体-岩石相互作用;大陆岩石圈

中图分类号: P58 文献标识码: A 文章编号: 1005-2321(2001)03-0141-06

纯橄岩和方辉橄榄岩过去往往被简单地认为是地幔高度部分熔融的直接残留物,熔体交代概念的提出改变了这种传统看法<sup>[1-3]</sup>。在造山带橄榄岩体中,与岩体不整合的纯橄岩中的橄榄石一般  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$  值不高,被解释为玄武质岩浆与通道围岩(二辉橄榄岩)交代反应的结果,纯橄岩被认为是熔体在上地幔中运移的通道<sup>[1]</sup>。古老克拉通地幔橄榄岩样品太富集  $\text{SiO}_2$ (斜方辉石“过剩”)以及过高的 LREE/HREE,与简单的原始地幔部分熔融残留成因难以吻合<sup>[2,4]</sup>。熔体-岩石相互作用的思想使所谓的“方辉橄榄岩谜”得到比较合理的解释。岩石圈地幔中熔体-岩石相互作用的两种主要反应系列为<sup>[2]</sup>



当富硅熔体与橄榄岩反应时,橄榄石被斜方辉石交代,橄榄岩向富集  $\text{SiO}_2$  的方向演化,并表现出与简单部分熔融模型明显不同的地球化学特征。当玄武质熔体与橄榄岩反应时,辉石被溶解而沉淀出

橄榄石,并使熔体富集  $\text{SiO}_2$ 。熔体-岩石相互作用已经成为约束上地幔演化、化学不均一性以及壳幔相互作用的重要思路之一。本文首先回顾了地幔富硅交代概念的提出过程,在总结了富硅熔体的来源、富硅熔体交代陆下岩石圈地幔的地质特征的基础上,试图探讨地幔富硅交代与大陆岩石圈演化之间可能存在的内在联系。

## 1 古老岩石圈地幔的成分特征及地幔富硅交代概念的提出

Kesson 和 Ringwood (1989) 最早提出陆下岩石圈地幔中存在富硅交代现象。他们注意到金刚石的形成与大洋岩石圈的俯冲存在密切的联系,并认为富硅熔体交代橄榄石生成斜方辉石的反应是造成克拉通地幔的  $\text{Ol}/\text{Opx}$  的比值过分分散的原因<sup>[5]</sup>。后来 Kelemen 等(1998)在总结克拉通地幔岩的成分特征的基础上,认为富硅熔体-岩石反应导致了地幔中硅的富集<sup>[2]</sup>。

Boyd (1989) 计算的平均深海橄榄岩的斜方辉石质量分数为 12.5%,  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$  为 90.8%<sup>[4]</sup>; Niu 等(1997)发表的平均深海橄榄岩的斜方辉石质量分数为 21%,  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$

收稿日期: 2001-03-19; 修订日期: 2001-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49733110); 科技部基础研究重大资助项目(G1999075504)

作者简介: 陈立辉(1972-) 男, 博士, 岩石学及地球化学专业。

为  $90.2\%^{[6]}$ 。与平均深海橄榄岩相比, 大陆古老地幔的橄榄岩具有高得多的斜方辉石质量分数(一般  $>25\%$ )<sup>[2, 4]</sup>。来自太古宙克拉通(如南非的 Kapaal 和俄罗斯的 Siberia 克拉通)的地幔捕虏体常具有高  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$  和高的 Opx 含量特征<sup>[2, 4]</sup>。如果以 Mg/Si 代表斜方辉石/橄榄石, 以 Al/Si 代表地幔的富集程度, 太古宙克拉通地幔岩大部分落在 Jagoutz 等(1979)所定义的地幔化学分异线<sup>[7]</sup>的下方, 显示了较高的 Opx/Ol 比值<sup>[4]</sup>。

简单的高程度部分熔融无法解释克拉通岩石圈地幔的矿物含量和成分特征, 已有的解释包括: (1) 高压下的高程度部分熔融产生具高  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 、高 Opx 的残留体, 这种残留体经变质分异同时生成高 Opx 和低 Opx 的地幔岩<sup>[4]</sup>; (2) 残留橄榄岩和超镁铁质岩浆的高压堆晶岩的等比例混合<sup>[8]</sup>; (3) 通过熔体-岩石反应在低斜方辉石的地幔橄榄岩中加入过剩的  $\text{SiO}_2$ <sup>[1, 2]</sup>。在地幔岩的部分熔融过程中, Ni 作为相容元素趋向于在橄榄石中富集, 因此只经历部分熔融的地幔橄榄岩中的  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$  和 Ni 含量应该呈正相关。克拉通岩石圈地幔岩中橄榄石的 Ni 含量和橄榄岩中 Opx 的实际矿物含量呈正相关关系, 而和橄榄石的  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$  不存在正相关关系, 证明地幔橄榄岩在部分熔融之后还经历了其它过程<sup>[2]</sup>。由于 Ni 在熔体和橄榄岩的平衡中趋于在橄榄岩中富集, 所以消耗橄榄石而生成辉石的反应(1)不会减少橄榄岩中 Ni 的含量。而在固相线下的 Ol/Opx 矿物对平衡中, Ni 趋于在橄榄石中富集<sup>[9]</sup>。这样, 总量减少的橄榄石其 Ni 含量必然增大。而在反应(2)中, 橄榄石中的 Ni 含量将随着反应的进行逐渐减小。因此, 这两种反应都可以产生橄榄石中的 Ni 与 Opx 的实际矿物含量呈正相关的现象<sup>[2, 10]</sup>。如果没有发生熔体交代作用, 那么橄榄石的  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$  值和 Ni 含量之间会存在正比关系<sup>[2]</sup>。对于太古宙岩石圈地幔的成因, Kelemen 等提出了两阶段模式: (1) 高程度的非等压部分熔融(终止于  $\leq 3 \text{ GPa}$ ) 产生高  $x(\text{Mg})/x(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$  和低 Opx 含量的橄榄岩; (2) 亏损的残留体被富  $\text{SiO}_2$  的熔体富集, 而这种熔体主要是俯冲到地幔深部的洋壳物质部分熔融而成<sup>[2]</sup>。该模式与大部分大陆岩石圈地幔样品亏损玄武质成分而富集 LREE 的地球化学特征相吻合<sup>[11]</sup>。

由于(1)直接来自板块会聚部位的地幔样品稀

缺, (2) 陆下岩石圈地幔样品高质量的 HFSE 数据太少, 以及(3)缺少相关高温高压实验的支持等因素的制约, 使利用熔体交代的观点来解释大陆岩石圈地幔的演化比较困难。近年来对地幔橄榄岩中各种玻璃包裹体和流体包裹体的精细地球化学研究, 尤其是对来自地幔楔的地幔岩样品的地球化学研究, 加上高温高压实验的进展, 使熔体交代改造陆下岩石圈地幔的思想得到发展。对直接来自岛弧下的地幔样品的研究发现, 橄榄岩经熔体改造后, 不仅增加了  $\text{SiO}_2$ , 而且还伴随着水的加入(韭闪石和金云母的存在)<sup>[12]</sup>, 因此, 这种流体是一种含水的中酸性熔体——简称含水富硅熔体。弧下地幔岩样品中的玻璃包裹体含水富硅的成分特征支持这种含水富硅熔体在地幔楔中广泛存在。最近 Prouteau 等(2001)的实验证明, 水的加入可以使玄武岩在较低温度下部分熔融, 生成特别富硅富碱的含水熔体<sup>[13]</sup>。这种熔体和橄榄石的反应可以生成斜方辉石并使熔体朝着更加基性的方向发展<sup>[13]</sup>。

## 2 地幔富硅熔体的来源

在上地幔橄榄岩中, 发现富硅玻璃以包裹体或粒间囊体的形式广泛存在。这些富硅玻璃的  $\text{SiO}_2$  质量分数可达  $70\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数为  $12\% \sim 26\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  质量分数可达  $16\%$ 。目前报道的寄主橄榄岩包括来自于大陆、岛弧、大洋和洋岛等不同构造环境的不同种类的样品, 包括无水的和含水的尖晶石方辉橄榄岩、二辉橄榄岩和纯橄岩, 证明上地幔中广泛存在富硅熔体<sup>[14~31]</sup>。目前对富硅熔体的来源有很多观点, 主要包括: (1) 俯冲到深部地幔的洋壳物质的低程度部分熔融<sup>[16~18]</sup>; (2) 来自深部的玄武质熔体(可能是地幔柱源)和橄榄岩反应, 即溶解斜方辉石而生成橄榄石的过程, 使熔体向富集  $\text{SiO}_2$  的方向演化<sup>[19~21]</sup>; (3) 橄榄岩很低程度的部分熔融<sup>[22~24]</sup>; (4) 角闪石、金云母的原地熔融<sup>[25~27]</sup>; (5) 降压导致的硅酸盐熔体和碳酸岩熔体的不混溶分离<sup>[28]</sup>; (6) 下地壳物质拆沉进入地幔后的部分熔融<sup>[29]</sup>; (7) 流体交代引起的不一致部分熔融<sup>[30]</sup>; (8) 被碳酸岩熔体交代过的橄榄岩的部分熔融<sup>[31]</sup>等。由于构造环境、交代历史以及热历史的差异, 因此对于不同产出背景的富硅玻璃包裹体的成因研究要特别小心, 其中部分样品可能是多成因的。

来自于弧下地幔环境的地幔岩样品中, 橄榄石

和斜方辉石碎斑中的熔体包裹体一般沿矿物的微裂隙分布, 呈圆形的次生特征; 而在交代成因矿物(高铁橄榄石、斜方辉石和含水矿物)中的熔体包裹体一般分布零散, 有时沿矿物的生长纹分布, 具寄主矿物的负晶形<sup>[6]</sup>。这种奥长花岗岩质的熔体包裹体具特别高的 LREE, 亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素, 比 MORB 高得多的  $\delta^{8}\text{O}$  值等地球化学特征, 暗示了这种富硅含水熔体与俯冲洋壳物质的亲缘关系<sup>[16~18]</sup>。一般幔源岩浆和超镁铁质岩的  $\delta^{8}\text{O}$  值的范围很小 ( $5.7\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$ ), 而来自巴布亚新几内亚的 Simberi 岛的橄榄岩捕掳体和橄榄石巨晶中的熔体包裹体具有高得多的  $\delta^{8}\text{O}$  值 ( $5.7\text{‰} \sim 11.3\text{‰}$ ), 暗示洋壳物质对地幔楔的改造(洋壳的  $\delta^{8}\text{O}$  值范围为  $0\text{‰} \sim +12\text{‰}$ )<sup>[18]</sup>。

Prouteau 等(2001)的实验证明, 玄武岩在加入水的情况下, 可以在低温下部分熔融产生高度富碱的硅质熔体, 这种熔体极度亏损 Ti 和 Nb, Ta, 与弧下地幔岩中富硅玻璃具相同的地球化学特征<sup>[13]</sup>。因此, 水的存在使俯冲板片更容易发生部分熔融, 从而更大程度地影响上覆的地幔楔。这种含水富硅熔体在地表的直接代表就是所谓的埃达克岩(adakite)——一种由年轻的( $< 25\text{ Ma}$ )俯冲板片(热的洋壳)部分熔融形成的酸性岩浆<sup>[32]</sup>。由于新生成的洋壳具有足够高的温度, 俯冲的洋壳可以直接发生部分熔融, 从而生成一类地球化学比较特殊的岛弧安山岩、英安岩、流纹岩或英云闪长岩和奥长花岗岩<sup>[32, 33]</sup>。

### 3 地幔富硅交代的地质特征

被含水富硅熔体交代的橄榄岩在结构、矿物含量、矿物化学、全岩组成、微量元素以及同位素地球化学方面都有其特征的表现。中新世岛弧玄武岩中的地幔捕掳体<sup>[34~39]</sup>和构造侵位的代表古地幔楔的地幔橄榄岩<sup>[40]</sup>都是我们研究地幔中橄榄岩和含水富硅熔体相互作用的直接样品。

在北美大陆科罗拉多高原的东南角(Grand Canyon)和西北角(Bandera)的新生代玄武岩中的地幔捕掳体记录了含水富硅熔体和地幔岩相互作用的历史<sup>[32]</sup>。方辉橄榄岩或斜方辉石岩中的斜方辉石残斑含有溶蚀的橄榄石包裹体, 并且这种斜方辉石具特征的成分环带, 由边缘往核部  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的含量都明显降低, 其中核部的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数可低

达  $< 0.2\%$ <sup>[34]</sup>。在排除了矿物出溶对斜方辉石成分的影响后, Smith 等认为, 这些具特殊的成分结构特征的方辉橄榄岩或斜方辉石岩是来自俯冲板片的富硅流体交代地幔橄榄岩的产物<sup>[34]</sup>。来自巴布亚新几内亚的弧下地幔捕掳体, 发育主要由纤维状、放射状斜方辉石组成的斜方辉石岩脉, 这种固相线下的流体-岩石反应生成的斜方辉石  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数也特别低 ( $0.3\%$ )<sup>[35]</sup>。在华盛顿州南部 Cascade 前缘火山带中的斜方辉石岩捕掳体中, 橄榄石发育斜方辉石的反应边, 斜方辉石中除了大量的橄榄石包裹体外, 还含有金云母包裹体以及富硅富钾的玻璃包裹体<sup>[17]</sup>。Ertan 和 Leeman(1996)认为, 该捕掳体反映了富硅富钾的含水熔体对橄榄岩的交代作用<sup>[17]</sup>。

岛弧玄武岩普遍被认为是被流体改造的地幔楔的部分熔融产物<sup>[41, 42]</sup>。相对于大离子亲石元素和轻稀土元素, 岛弧玄武岩比大洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩亏损 Nb, Ta 和 Ti 等高场强元素, 此外,  $w(\text{Ta})/w(\text{Nb})$  比达  $33\%$ <sup>[41, 42]</sup>。来自菲律宾的地幔楔样品——方辉橄榄岩捕掳体显示了与岛弧玄武岩相一致的微量元素特征, 富集 LILE(Ba, Rb, Pb, K, U), 亏损 HFSE(Ti, Zr, Hf, Nb, Ta),  $N(^8\text{Sr})/N(^8\text{Sr}), N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})$  以及  $\delta^{8}\text{O}$  值与寄主岩——钙碱性玄武质安山岩相同, 暗示了它们在成因上的亲缘性<sup>[36]</sup>。

Prouteau 等(2001)利用奥长花岗岩质的含水熔体与橄榄石在  $1.5\text{ GPa}$ ,  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  和  $900\text{ }^\circ\text{C}$  下进行的反应再现了上述地幔楔中发生的熔体-岩石相互作用。产物中不仅有斜方辉石, 还有金云母、角闪石等含水富碱矿物<sup>[13]</sup>。生成的熔体也显示出与弧下地幔来源的橄榄岩捕掳体中的熔体包裹体一致的地球化学特征: 特别高的总碱量, 亏损 Nb, Ta 和 Ti<sup>[13, 16, 38]</sup>。

### 4 地幔富硅交代与大陆岩石圈演化

陆下岩石圈地幔是一个夹在软流圈和大陆地壳之间的界限层(化学的和物理的), 它是刚性的大陆岩石圈的主要组成部分, 同时它又被大洋岩石圈所围限和持续地改造, 因此它的演化(如增厚、减薄)将直接影响上覆陆壳的性质以及质量能量平衡, 并导致一系列的构造-岩浆事件。由于陆下岩石圈地幔一般存在了至少 10 亿年以上, 在这样漫长的地质时间里, 不断吸收来自软流圈的上升熔体和来自俯冲

带的熔体, 从而使它与地幔其它部分相比具有特征的物理性质和化学组成<sup>[11]</sup>, 因此陆下岩石圈地幔的演化是整个大陆岩石圈演化的关键。许多研究者发现陆下岩石圈地幔的成分是和构造背景以及岩石圈年龄相关<sup>[4, 10, 43]</sup>, 一个合理的岩石圈演化的机制必需能解释这样的相关性。

在北美大陆科罗拉多高原的东南角(Grand Canyon)和西北角(Bandera)都发现了被含水富硅熔体交代的地幔捕虏体, 证明这种富硅作用可以广泛存在于冷的大陆地幔中<sup>[34]</sup>。虽然俯冲板片的部分熔融曾经被认为只在太古宙经常发生, 在现今只有年轻的(热的)板片俯冲才可能发生<sup>[33]</sup>, 但是现在全球范围越来越多的具俯冲板片来源熔体特征的岩浆(埃达克岩)被鉴别出来, 暗示了俯冲板片熔体可能要比以前想象的要多得多<sup>[44]</sup>。岩石圈地幔中的熔体-岩石相互作用的广泛存在鼓励作者尝试用这种思路来探讨大陆岩石圈的演化。

目前现存的大陆在显生宙已经经历了岩石圈减薄事件的有欧亚大陆、北美大陆、南极大陆、格陵兰等, 其中岩石圈减薄最显著的是欧亚大陆和北美大陆<sup>[10]</sup>。很多学者注意到大陆岩石圈的减薄事件和大陆的规模之间似乎存在一定的联系。他们认为大陆增生到一定规模时, 俯冲的洋壳将不足以保持刚性的大陆岩石圈赖以保持稳定的较低的温度<sup>[45]</sup>。本文认为, 大陆岩石圈地幔范围内的熔体-岩石反应是控制大陆岩石圈演化的重要机制之一。在不同的地质历史时期, 来自软流圈(或地幔柱)的玄武质熔体和来自俯冲板片的含水富硅熔体都对岩石圈地幔进行持续的改造, 它们之间的此消彼涨决定了大陆岩石圈演化的节律性。

岩石圈和软流圈的界面是个半渗透过渡层, 在这个过渡层, 来自软流圈的熔体(或地幔柱)对上覆岩石圈地幔的改造以橄榄石生成反应为特征。持续的反应使橄榄石含量增加伴随孔隙度增大, 这一过渡带的渗透性会显著增大<sup>[46]</sup>。玄武质熔体在过渡层主要以孔隙流的形式在橄榄岩中快速扩散, 从而在更大程度上破坏了岩石圈地幔, 岩石圈地幔因这种持续的化学侵蚀(伴随热-机械侵蚀)而逐渐减薄<sup>[47]</sup>。俯冲洋壳来源的含水富硅熔体使大陆岩石圈地幔朝着斜方辉石增加的方向演化, 这种被交代的地幔岩的部分熔融决定了大陆地壳富硅富镁的成分特征<sup>[2]</sup>。由于具相同  $w(\text{Mg})/w(\text{Fe})$  比值的斜方辉石的密度比橄榄石的偏低, 而且斜方辉石的增

加还降低了橄榄岩的渗透性, 从而使大陆板块保持较大的浮力和较低的温度, 并使岩石圈地幔朝着增厚的方向发展。模拟计算表明, 地质历史中板块运动速度的变化或地幔柱活动均有可能是形成超大陆的重要原因<sup>[48]</sup>。全球范围绿岩带中的科马提岩的广泛发育支持太古宙的地幔柱活动比显生宙的地幔柱活动的规模要大得多。当大洋下的地幔柱活动时, 洋壳增生的速度显著增大, 此时板块运动速度增大, 俯冲规模也显著增大, 通过含水富硅熔体对大陆岩石圈地幔的改造作用这一有效机制, 大陆岩石圈表现为陆壳在横向上的扩张以及陆下岩石圈地幔纵向上的增厚。太古宙高的地热梯度使俯冲洋壳更易发生部分熔融。太古宙高铝奥长花岗岩-英云闪长岩-英安岩(高-Al TTD)的地球化学特征与埃达克岩类似<sup>[33]</sup>。它们的广泛发育说明当时的大洋板片在俯冲带中部分熔融的规模很大, 生成的含水富硅熔体将对上覆大陆岩石圈地幔产生更广泛的影响。总之, 板块俯冲是太古宙大陆岩石圈增生的主要原因, 它通过大洋板片部分熔融产生的含水富硅熔体对上覆岩石圈地幔的改造实现, 并决定了陆壳富硅富镁的成分特征。在大陆的面积足够大时, 板块边缘的俯冲带将很难影响远离板块边缘的岩石圈地幔, 或者由于陆下上升地幔柱的活动使来自深部的玄武质熔体显著增加, 此时岩石圈地幔的熔体-岩石反应主要表现为以源于软流圈的玄武质熔体对岩石圈地幔的改造。玄武质熔体对岩石圈地幔的持续渗透并伴随橄榄石含量的增加, 导致大陆岩石圈的减薄, 并最终导致超大陆的解体。

#### 参考文献:

- [1] KELEMEN P D, DICK H J B, QUICK J E. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle [J]. *Nature*, 1992, 358: 635-641.
- [2] KELEMEN P D, HART S R, BERSTEIN S. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 164: 387-406.
- [3] 徐义刚. 上地幔熔体-岩石相互作用与大陆地幔演化 [J]. *地学前缘*, 1998, 5(增刊): 76-85.
- [4] BOYD F R. Composition and distinction between oceanic and cratonic lithosphere [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1989, 96: 15-26.
- [5] KESSON S E, RINGWOOD A E. Slab-mantle interactions: 2. The formation of diamonds [J]. *Chemical Geology*, 1989, 78: 97-118.

- [ 6 ] NIU Y. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges; evidence from abyssal peridotites[ J ] . *J Petrol*, 1997, 38: 1047-1074.
- [ 7 ] JAGOUTZ E, PALME H, BADDENHAUSEN H, et al. The abundances of major, minor and trace elements in the earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules[ A ] . *Proc Lunar Planet Sci Conf 10th*[ C ] . 1979. 2031-2050.
- [ 8 ] HERZBERG C. Lithosphere peridotites of the Kaapvaal craton [ J ] . *EPSL*, 1993, 120: 13-29.
- [ 9 ] BODINIER J L, DUPUY C, DOSTAL J, et al. Distribution of trace transition elements in olivine and pyroxenes from ultramafic xenoliths; application of microprobe analysis[ J ] . *American Mineralogist*, 1987, 72: 902-913.
- [ 10 ] GRIFFIN W L, O' REILLY S Y, RYAN C G. The composition and origin of sub-continental lithospheric mantle[ A ] . FEI Ying-wei. *Mantle Petrology; Field Observation and High Pressure Experimentation; A Tribute to Francis R* [ M ] . The Geochemical Society, Special Publication, 1999(6): 13-45.
- [ 11 ] McDONOUGH W F. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle[ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 101: 1-18.
- [ 12 ] MYSEN B O, ULMER P, KONZETT J, et al. The upper mantle near convergent plate boundaries[ A ] . *Ultrahigh-Pressure Mineralogy; Physics and Chemistry of the Earth's Deep Interior* [ C ] . *Reviews in Mineralogy*, 1998. 37.
- [ 13 ] PROUTEAU G, SCAILLET B, PICHAVANT M, et al. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust[ J ] . *Nature*, 2001, 410: 197-200.
- [ 14 ] SCHIANO P, CLOCCHIATTI R. Worldwide occurrence of silica-rich melts in sub-continental and sub-oceanic mantle minerals [ J ] . *Nature* 1994, 368: 621-624.
- [ 15 ] 樊祺诚, 刘若新, 徐平, 等. 中国东部大陆地幔存在中酸性硅酸盐熔体[ J ] . *科学通报*, 1996, 41: 1535-1536.
- [ 16 ] SCHIANO P, CLOCCHIATTI R, SHIMIZU N, et al. Hydrous silica rich melts in the sub-arc mantle and their relationship with erupted arc lavas[ J ] . *Nature*, 1995, 377: 595-600.
- [ 17 ] ERTAN I E, LEEMAN W P. Metasomatism of Cascades subarc mantle; evidence from a rare phlogopite orthopyroxenite xenolith [ J ] . *Geology*, 1996, 24: 451-454.
- [ 18 ] EILER J M, MCINNES B, VALLEY J W, et al. Oxygen isotope evidence for slab-derived fluids in the sub-arc mantle[ J ] . *Nature*, 1998, 393: 777-781.
- [ 19 ] ZINNGREBE E, FOLEY S F. Metasomatism in mantle xenoliths from Fees, West Eifel, Germany; evidence for the genesis of calcalkaline glasses and metasomatic Ca-enrichment [ J ] . *Contrib Mineral Petrol*, 1995, 122: 79-96.
- [ 20 ] WULFF-PEDERSEN E, NEUMANN E R, JEMSEN P B. The upper mantle under LA Palma, Canary Islands; formation of Si-K-Na-rich melt and its importance as a metasomatic agent [ J ] . *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 125: 113-139.
- [ 21 ] NEUMANN E R, WULFF P E. The origin of highly silicic glass in mantle xenoliths from the Canary Islands[ J ] . *J Petrol*, 1997, 38: 1513-1539.
- [ 22 ] BAKER M B, HIRSCHMANN M M, GHIORSO M S, et al. Compositions of near-solidus peridotite melts from experiments and thermodynamic calculations[ J ] . *Nature*, 1995, 375: 308-311.
- [ 23 ] DRURY M R, FITZGERALD J D. Grain boundary melt films in an experimentally deformed olivine-orthopyroxene rock; implications for melt distribution in upper mantle rocks[ J ] . *Geophysical Research Letters*, 1996, 23: 701-704.
- [ 24 ] DRAPER D S, GREEN T H. Anhydrous and C-H-O fluid-saturated *p-T* phase relations of silicic alkaline aluminous mantle xenolith glasses[ J ] . *J Petrol*, 1997, 38: 1187-1224.
- [ 25 ] YAXLEY G M, KAMENETSKY V, GREEN D H, et al. Glasses in mantle xenoliths from western Victoria, Australia and their relevance to mantle processes[ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 433-446.
- [ 26 ] EGGINS S M, RUDNICK R L, McDONOUGH W F. The composition of peridotites and their minerals; a laser-ablation ICP-MS study[ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 154: 53-71.
- [ 27 ] VARELA M E, CLOCCHIATTI R, KURAT G, et al. Silicic glasses in hydrous and anhydrous mantle xenoliths from western Victoria, Australia; at least two different sources[ J ] . *Chemical Geology*, 1999, 153: 151-169.
- [ 28 ] SCHIANO P, CLOCCHIATTI R, SHIMIZU N, et al. Co-genetic silica-rich and carbonate-rich melts trapped in mantle minerals in Kerguelen ultramafic xenoliths; implications for metasomatism in the oceanic upper mantle[ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 23: 167-178.
- [ 29 ] DUCEA M, SALEEBY J. Crustal recycling beneath continental arcs; silica-rich glass inclusions in ultramafic xenoliths from the Sierra Nevada, California[ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 156: 101-116.
- [ 30 ] IONOV D A, HOFMANN A W, SHIMIZU N. Metasomatism-induced melting in mantle xenoliths from Mongolia[ J ] . *J Petrology*, 1994, 35: 753-785.
- [ 31 ] HAURI E H, SHIMIZU N, DIEU J J, et al. Evidence for hotspot-related carbonatite metasomatism in the oceanic upper mantle[ J ] . *Nature*, 1993, 365: 221-227.
- [ 32 ] DEFANT M J, DRUMMOND M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[ J ] . *Nature*, 1990, 347: 662-665.
- [ 33 ] DRUMMOND M S, DEFANT M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting; Archean to modern comparison[ J ] . *J Geophys Res*, 1990, 95: 21503-21521.
- [ 34 ] SMITH D, RITER J C A, MERTZMAN S A. Water-rock interactions, orthopyroxene growth, and Si-richment in the mantle; evidence in xenoliths from the Colorado Plateau, Southwestern United States[ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 165: 45-54.

- [35] McINNES B. Fluid-peridotite interactions in mantle wedge xenoliths[ J ]. *EOS*, 1996, 77: S282.
- [36] MAURY R C, DEFANT M, JORON J L. Metasomatism of the sub-arc mantle inferred from trace element in Philippine xenoliths[ J ]. *Nature*, 1992, 360: 661-663.
- [37] IONOV D A, HOFMANN A W. Nb-Ta-rich mantle amphiboles and micas: Implications for subductions-related metasomatic trace element fractionations[ J ]. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 131: 341-354.
- [38] 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 ]. *J Petrol*, 1995, 36: 1505-1527.
- [39] LAURORA A, MAZZUCHELLI M, RIVALENTI G, et al. Metasomatism and melting in carbonated peridotite xenoliths from the mantle wedge, the Gobernador Gregores Case (Southern Patagonia)[ J ]. *J Petrol*, 2001, 42: 69-87.
- [40] ZANETTI A, MAZZUCHELLI M, RIVALENTI G, et al. The Finero phlogopite-peridotite massif: an example of subduction-related metasomatism[ J ]. *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 134: 107-122.
- [41] HOFMANN A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationships between mantle, continental crust, and oceanic crust[ J ]. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90: 297-314.
- [42] STOLZ A Z, JOCHUM K P, SPETTEL B, et al. Fluid- and melt-related enrichment in the subarc mantle: evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts[ J ]. *Geology*, 1996, 24: 587-590.
- [43] Menzies M A. Archean, Proterozoic and Phanerozoic lithospheric mantle[ A ]. MENZIES M A. *Continental Mantle*[ M ]. Oxford: Oxford Univ Press, 1990.
- [44] DRUMMOND M S, DEFANT M J, KEPEZHINSKAS P K. Petrogenesis of slab derived-tonalite-dacite-adakite magmas[ J ]. *Trans R Soc Edinburgh*, 1996, 87: 205-215.
- [45] 李江海. 前寒武纪的超大陆旋回及其板块构造演化意义[ J ]. *地学前缘*, 1998, 5(增刊): 141-151.
- [46] TORAMARU A, FUJII N. Connectivity of melt phase in a partially molten peridotite[ J ]. *J Geophys Res*, 1986, 91: 9239-9252.
- [47] 徐义刚. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄[ J ]. *矿物岩石地球化学通报*, 1999, 18: 1-5.
- [48] DUNCAN C C, TURCOTTE D L. On the breakup and coalescence of continents[ J ]. *Geology*, 1994, 22: 103-106.

## SILICA ENRICHMENT OF MANTLE AND THE EVOLUTION OF CONTINENTAL LITHOSPHERE

CHEN Li-hui, ZHOU Xin-hua

(Laboratory of Lithosphere Tectonic Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Silica enrichment, one of the main melt-rock interaction processes, is popular at mantle wedge. Mantle xenoliths erupted from sub-arc mantle show the same chemical characteristics with island arc basalts, which are extremely enriched LILE and depleted HFSE. Mantle samples from craton have too much Opx and show a positive correlation between Ni contents of Ol and modal proportions of Opx, which are not the results of partial melting but of metasomatism by slab-derived silicic fluids. The reaction is olivine+SiO<sub>2</sub>-rich melt=Opx (+SiO<sub>2</sub>-depleted melt). This kind of melt-rock interaction makes the uppermost mantle enriched in Si, which might be the key to know the compositional characteristics of continental crust. Detailed research on melt-rock interaction will help us to know better about the breakup and growth of supercontinent which were related with global significant tectono-thermal events.

**Key words:** upper mantle; silica enrichment; melt-rock interaction; continental lithosphere