

地幔橄榄岩中橄榄石的指示意义

汤艳杰, 张宏福, 英基丰, 杨蔚, 赵新苗, 苏本勋, 肖燕

(中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 橄榄石是地幔橄榄岩和辉石岩的主要组成矿物,但也经常以斑晶和捕虏晶的形式出现在玄武质岩石中。结合近年来在地幔橄榄岩的主要元素(如 Mg 和 Fe)组成特征以及 Li、Mg 和 Fe 稳定同位素地球化学方面的研究成果,重点对橄榄石的地球化学特征与华北克拉通岩石圈地幔演化过程之间的联系进行了讨论,旨在加深对华北克拉通岩石圈地幔演化过程的理解。现有研究表明:地幔橄榄岩中橄榄石的矿物学特征、元素和同位素地球化学组成能够很好地指示岩石圈地幔的特征及其演化过程,因而具有重要的意义。对于克拉通地区的地幔橄榄岩来说,橄榄石的 $Mg^\#$ 通常可以指示岩石圈地幔的属性,古老、难熔的地幔橄榄岩中的橄榄石一般具有较高的 $Mg^\#(>92)$,而新生的岩石圈地幔橄榄岩中的橄榄石则具有较低的 $Mg^\#(<91)$ 。因此,地幔橄榄岩中橄榄石的 $Mg^\#$ 在一定程度上具有年龄意义。橄榄岩中橄榄石的 Li、Mg 和 Fe 同位素组成也可以明确指示岩石圈地幔的属性及其所经历的演化过程,正常地幔的 $\delta^{6}Li$ 、 $\delta^{6}Mg$ 和 $\delta^{7}Fe$ 组成相对均一,如果上述同位素组成偏离正常地幔值,则说明岩石圈地幔经历了熔体/流体的交代作用。华北克拉通地区地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石的 Li、Mg 和 Fe 同位素组成研究表明:该区的岩石圈地幔经历了多个阶段、不同来源的熔体/流体的改造过程。

关键词: 地幔橄榄岩捕虏体; 橄榄石; 地球化学; 岩石圈演化; 华北克拉通

中图分类号: P588.12⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)01-0024-10

Indicative Significance of Olivine in Mantle Peridotites

TANG Yan-jie, ZHANG Hong-fu, Ying Ji-feng, YANG Wei,

ZHAO Xin-miao, SU Ben-xun, XIAO Yan

(State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract Since normal mantle has relatively homogeneous $\delta^{6}Li$, $\delta^{6}Mg$ and $\delta^{7}Fe$ values, the anomalies of these isotopic ratios indicate that the lithospheric mantle must have experienced metasomatism of melts/ fluids. The Li, Mg and Fe isotopic characteristics of olivines in peridotite xenoliths from the North China Craton imply that the lithospheric mantle beneath the craton has experienced multistage modification by melts/ fluids derived from different sources. Olivine is major mineral in mantle peridotites and pyroxenites. Moreover, olivines usually occur in basaltic rocks as phenocrysts and xenocrysts. Based on the summary of the latest developments of the signatures of major element (such as Mg and Fe) compositions and Li-Mg-Fe isotopic geochemistry of olivines in the mantle peridotites from the North China Craton, the relationship between olivine geochemistry and the evolution of lithospheric mantle beneath the craton is discussed in detailed. The aim is to deepen the understanding of the evolution history of the lithospheric mantle beneath the North China Craton. The current investigations have shown that the characteristics of mineralogy, elemental and isotopic geochemistry of olivines in mantle-derived peridotites can well indicate the signature of lithospheric mantle and its evolution history, displaying important significance. Olivine $Mg^\#$ in mantle peridotites can usually reflect the property of lithospheric mantle beneath cratonic areas. The olivines in peridotites from ancient and refractory lithospheric mantle are usually high in $Mg^\#(>92)$, while those from newly-accreted lithospheric mantle are relatively low in $Mg^\#(<91)$. As a result, olivine $Mg^\#$ of mantle peridotites has certain age significance. The Li, Mg and Fe isotopic compositions of olivines in mantle peridotites can efficiently imply the

收稿日期: 2010-08-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90714008); 国家自然科学基金项目(40773026); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-103)

作者简介: 汤艳杰(1973-),男,河南南阳人,副研究员,理学博士,从事岩石地球化学研究。E-mail: tangyanjie@mail.igcas.ac.cn

signature of lithospheric mantle and its evolutionary processes.

Key words: mantle peridotite xenolith; olivine; geochemistry; lithospheric evolution; North China Craton

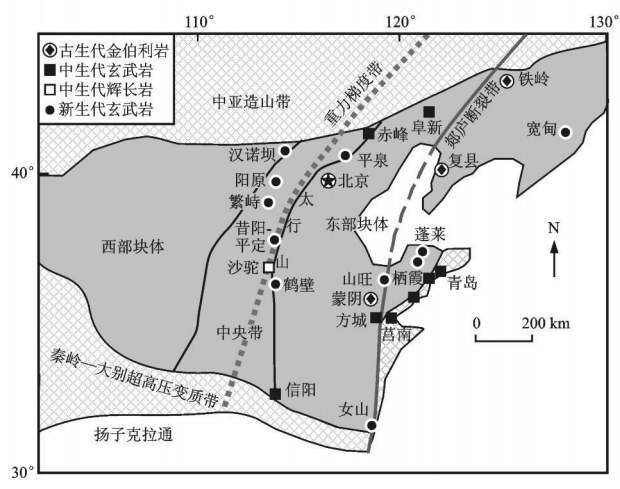
0 引言

地球深部过程研究尤其是岩石圈地幔演化过程的研究, 有助于促进人类对大陆的形成和演化过程的理解。更为重要的是, 地球深部物质组成特征和深部圈层之间相互作用研究对于金属矿床成因认识和矿产勘探具有实际的指导意义^[1-4]。地幔橄榄岩捕虏体和橄榄石捕虏晶是起源于地幔的岩浆(如金伯利岩岩浆和玄武质岩浆)在向上迁移过程中所携带的岩石圈地幔碎块或其解体矿物, 它们是地幔岩石学和地球化学研究的主要对象之一, 具有地球深部的“探针”之称, 为研究地球深部物质组成特征和演化过程提供了直接的样品。因此, 它们在反演上地幔属性和物质组成特征以及岩石圈地幔演化研究中具有重要意义^[5-14]。作为地幔橄榄岩的主要组成矿物, 橄榄石通常占地幔橄榄岩中矿物体积分数的 60% 以上, 其元素和同位素组成特征在反演岩石圈地幔的物质组成、性质以及长期演化过程等方面发挥了重要作用^[15]。基于笔者所在的研究小组近年来在中国华北克拉通地区地幔橄榄岩捕虏体岩石学和地球化学研究方面的工作, 这里着重对地幔橄榄岩中橄榄石的主要元素组成特征^[16] 和非传统稳定同位素(如 $\text{Li}^{[17-18]}$ 、 $\text{Fe}^{[19]}$ 和 $\text{Mg}^{[20]}$) 地球化学特征以及它们所反映的岩石圈地幔性质和地幔演化过程进行总结, 目的在于展示橄榄石的组成特征对岩石圈地幔演化过程的指示意义。

1 橄榄石主要元素特征及其指示意义

在中国华北克拉通地区, 广泛发育着不同时代的起源于上地幔的岩浆岩。例如, 古生代含金刚石的金伯利岩、中生代和新生代的玄武质岩石, 包括玄武岩、辉长岩和基性脉岩等^[21-22]。在这些幔源岩石中, 不少研究者相继发现了地幔橄榄岩捕虏体和橄榄石捕虏晶(图 1), 这为中国华北地区岩石圈地幔特征及其演化过程研究提供了宝贵的样品。

根据地球分异理论, 大陆地壳是原始地幔经过部分熔融形成的。因此, 典型的古老岩石圈地幔亏损玄武质组分, 具有难熔的化学组成, 其主要特征是存在高度难熔的方辉橄榄岩和难熔的二辉橄榄岩^[23-24]。一般情况下, 太古代岩石圈地幔、元古代到显生宙岩石圈地幔, 其橄榄岩的主量元素

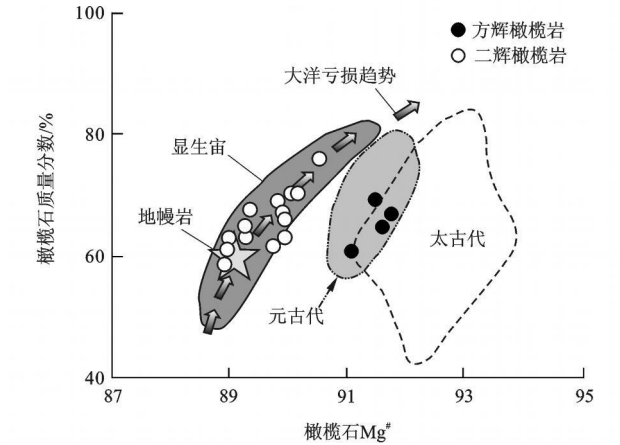


注: 据文献[15, 25] 修改。
图 1 华北克拉通地区橄榄岩捕虏体和橄榄石捕虏晶分布

Fig. 1 Sketch Map Showing Peridotite Xenolith and Olivine Xenocryst Localities on the North China Craton

组成由高度难熔过渡为不太难熔甚至饱满, 而且岩石圈地幔由以方辉橄榄岩为主过渡为以二辉橄榄岩为主的岩石圈地幔; 据推测, 太古代大陆岩石圈地幔是在大于 150 km 深度下的原始地幔经过高程度部分熔融的残余^[9, 24, 26]。因此, 太古代和显生宙的岩石圈地幔橄榄岩在矿物组成上存在着明显的差异, 最突出的表现就是其橄榄石的模式含量及其化学组成的不同(图 2)。

笔者在山西省繁峙地区新生代玄武岩所携带的



注: 大洋型橄榄岩的熔体亏损趋势来自文献[23]; 太古代、元古代和显生宙分别表示全球典型地区不同时代地幔橄榄岩中橄榄石 $\text{Mg}^\#$ 的范围^[26]; 方辉橄榄岩和二辉橄榄岩均为山西繁峙地区的新生代玄武岩中的橄榄岩捕虏体; 据文献[25] 修改。

图 2 橄榄石 $\text{Mg}^\#$ 与橄榄岩中橄榄石模式含量的关系

Fig. 2 Olivine $\text{Mg}^\#$ Versus Modal Contents in Peridotites

地幔橄榄岩捕虏体样品中也发现了与上述差异相类似的现象:该区的方辉橄榄岩样品中橄榄石因为具有高 $Mg^{\#}$ 的特征(图 2),而落在或者非常接近全球典型太古代克拉通型地幔橄榄岩的范围内,显示了古老、难熔的地幔橄榄岩的组成特征,表明这些方辉橄榄岩样品很可能代表该区古老岩石圈地幔的残余^[23, 26]。相比之下,繁峙地区的二辉橄榄岩全部落在了显生宙二辉橄榄岩范围内。它们具有饱满的矿物组成(低 $Mg^{\#}$),并显示出大洋型橄榄岩的演化趋势,这些特征与华北克拉通东部地区新增生的岩石圈地幔具有相似性^[27]。然而,繁峙橄榄岩的 $Re-Os$ 同位素数据却给出了古元古代甚至太古代的熔体抽取年龄,即岩石圈地幔橄榄岩形成年龄的最小估计,这说明繁峙地区的二辉橄榄岩并不是来自新增生的岩石圈地幔,而是来自“古老”的岩石圈地幔^[28-30]。然而,典型的古老岩石圈地幔橄榄岩在矿物组成上是亏损的。那么,什么过程造成繁峙地区古老的岩石圈地幔橄榄岩具有饱满的主要元素组成?经过详细的岩石学和地球化学研究,笔者认为近期的软流圈熔体-橄榄岩反应可能是一个合理解释,由于熔体的加入,造成该区难熔的(主要元素亏损)方辉橄榄岩变成主要元素相对饱满的二辉橄榄岩^[25, 31-33]。此外,由于软流圈熔体与岩石圈地幔的相互作用,造成了本区的玄武质岩石具有古老岩石圈地幔的一些地球化学特征^[34-35]。所以,繁峙地区的二辉橄榄岩样品代表了遭受近期软流圈来源的熔体-橄榄岩反应改造的古老岩石圈地幔,而具有高 $Mg^{\#}$ 特征的方辉橄榄岩则代表本区残留的古老岩石圈地幔。这说明地幔橄榄岩中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 具有一定的年龄指示意义,能够在一定程度上指示岩石圈地幔的属性。

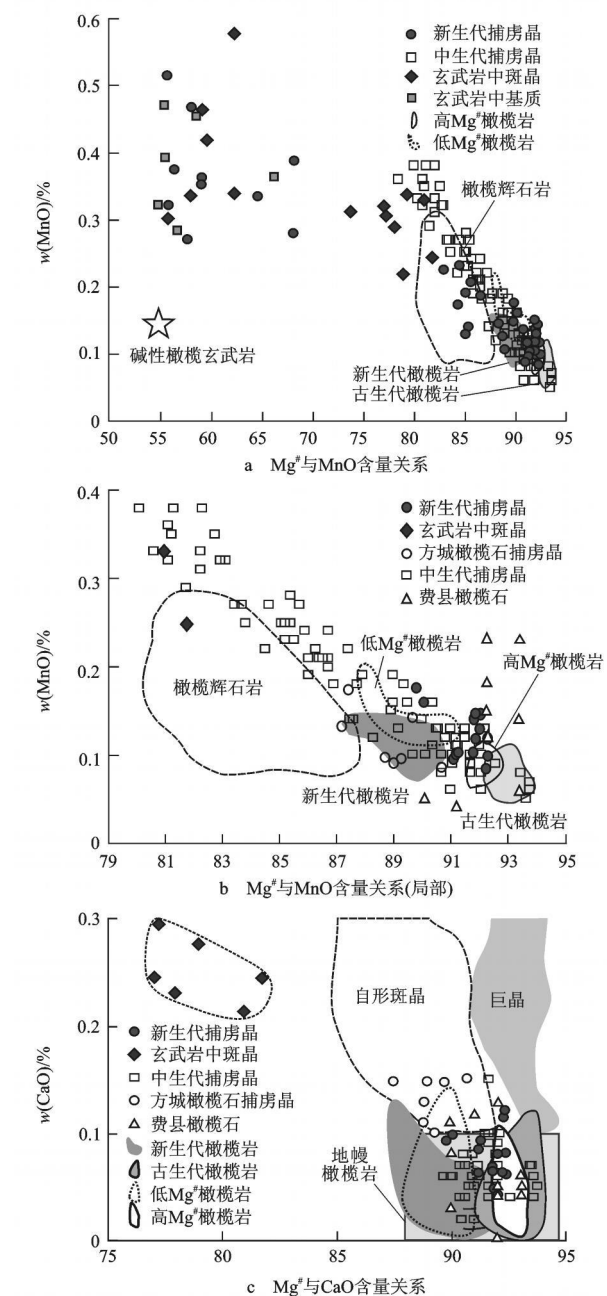
在野外工作中,地幔橄榄岩捕虏体并不常见,因为许多幔源岩浆岩根本没有携带或者迄今尚未发现橄榄岩捕虏体。随着研究工作的逐步深入,许多研究者在一些玄武质岩石中发现了大颗粒的橄榄石晶体^[36-39],其中,颗粒较大者粒径可达 1 cm ^[40]。经过详细的镜下观察和电子探针成分分析研究,结果发现许多大颗粒的橄榄石晶体并非玄武质岩石的斑晶,而是地幔橄榄岩的解体矿物,即橄榄石捕虏晶^[15, 38, 40-41]。通过对捕虏晶的研究同样可以得到反映岩石圈地幔物质组成的信息,所以,捕虏晶的发现很大程度上弥补了一些地区的研究工作因缺乏地幔橄榄岩捕虏体所造成的不足。

橄榄石捕虏晶大小不一,多呈浑圆状、次棱角状且具熔蚀港湾^[40]。它们具有明显的成分环带,在背

散射电子像图上表现为中心部分颜色深(灰黑色—灰色,富 Mg),边缘颜色浅(灰白色—白色,富 Fe),中心和边缘部分的宽度因颗粒而异^[15, 38, 40]。相比之下,玄武岩中橄榄石斑晶多为半自形,少数为自形。橄榄石捕虏晶中心部分的 $Mg^{\#}$ 类似于河南省鹤壁地区新生代玄武岩所携带的高 $Mg^{\#}$ 橄榄岩捕虏体中橄榄石的 $Mg^{\#}$ (图 3),后者被认为是代表了该区古老岩石圈地幔的残留^[42]。橄榄石捕虏晶从中心到边缘 MgO 含量降低,而 CaO 和 MnO 含量升高。橄榄石捕虏晶的边缘部分一般具有很低的 $Mg^{\#}$,接近于玄武岩中橄榄石斑晶的 $Mg^{\#}$ 。

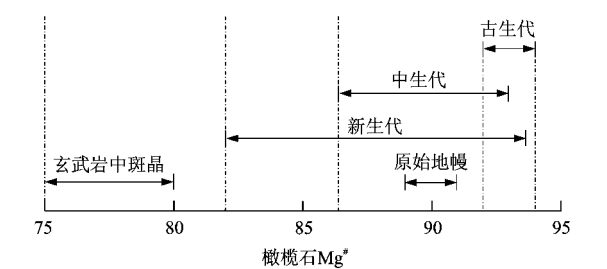
CaO 含量是判别岩浆成因的橄榄石还是地幔橄榄岩解体后残留橄榄石的一个十分有效的标志,地幔橄榄岩中 $w(CaO) < 0.1\%$ ^[43],而岩浆成因的橄榄石一般具有高的 CaO 含量^[39]。橄榄石捕虏晶的 CaO 几乎都落在了地幔橄榄岩的范围内(图 2),这些事实说明这些橄榄石捕虏晶来自地幔橄榄岩的解体矿物。因此,大颗粒捕虏晶的中心部分具有与地幔橄榄岩相似的化学组成,因而可以看作是古老岩石圈地幔的直接样品,对它们的详细研究能够获得岩石圈地幔性质及其演化过程的一些重要信息。橄榄石捕虏晶的成分环带(边缘富 Fe 、中心富 Mg)可能是橄榄石与寄主岩浆反应没有达到平衡的产物。关于橄榄石捕虏晶环带的这种形成过程,张宏福等已经做了较为详尽的论述^[38]。张宏福等在中生代玄武岩中发现了具环带结构的橄榄石捕虏晶,得出橄榄石与玄武质岩浆的相互反应可能在华北中生代岩石圈地幔中普遍存在的结论,并认为这种相互作用是岩石圈地幔组成转变的重要方式之一,从而为岩石圈地幔演化研究提供了新的思路^[38]。这一推论得到了随后越来越多的实验观察和研究结果的支持^[18, 25, 32, 44-46]。

华北克拉通地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石 $Mg^{\#}$ 统计结果显示不同时代的地幔橄榄岩具有较大差异(图 4)。总的来说,古生代金伯利岩中橄榄岩捕虏体的橄榄石 $Mg^{\#}$ 较高,这与它们古老的形成年龄相一致^[32, 47-48],表明古老的岩石圈地幔经历了高程度的部分熔融;新生代玄武岩所携带的橄榄岩中橄榄石 $Mg^{\#}$ 较低,而赋存于中生代玄武质岩石的地幔橄榄岩中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 范围介于古生代和新生代地幔橄榄岩之间,说明中生代岩石圈地幔比新生代岩石圈地幔难熔($Mg^{\#}$ 偏高),这与橄榄岩的同位素地球化学研究结果相一致。在同位素组成上,中生代岩石圈地幔具有同位素富集的特征^[49-51],而新生代



注: 新生代捕虏晶代表山西昔阳一平定和河北井陉地区新生代玄武岩中的橄榄石捕虏晶^[40]; 高 $Mg^\#$ 橄榄岩和低 $Mg^\#$ 橄榄岩分别代表河南鹤壁地区新生代玄武岩所携带的高 $Mg^\#$ 和低 $Mg^\#$ 橄榄岩捕虏体中橄榄石组成^[42]; 新生代橄榄岩代表山东山旺和栖霞地区新生代玄武岩所携带的橄榄岩捕虏体中橄榄石组成^[52]; 古生代橄榄岩代表山东蒙阴地区古生代金伯利岩携带的橄榄石捕虏晶的组成^[1, 42, 53]; 碱性橄榄玄武岩代表太行山地区新生代寄主玄武岩的平均化学组成^[34]; 辉岩中捕虏晶代表山西壶关县沙驼辉长岩中的橄榄石捕虏晶^[15]; 方城橄榄石捕虏晶和橄榄辉石岩分别代表山东方城中生代玄武岩中橄榄石捕虏晶的中心部分和橄榄单斜辉石岩捕虏体中橄榄石的组成^[38]; 巨晶和自形斑晶分别表示云南超钾质火山岩中橄榄石巨晶和自形橄榄石斑晶的组成^[36]; 费县橄榄石代表山东费县中生代玄武岩中橄榄石捕虏晶和斑晶的组成^[37]。

图3 橄榄石的 $Mg^\#$ 与 MnO 和 CaO 含量的关系
Fig 3 $Mg^\#$ Versus Contents of MnO and CaO in Olivines



注: 古生代、中生代和新生代分别表示华北地区古生代金伯利岩、中生代和新生代玄武质岩石所携带的地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石的 $Mg^\#$ 变化范围; 玄武岩中橄榄石斑晶以及原始地幔分别代表华北地区玄武岩中橄榄石斑晶和原始地幔的 $Mg^\#$; 据文献^[12, 16, 25] 修改。

图4 华北克拉通地区地幔橄榄岩中橄榄石 $Mg^\#$ 的变化
Fig. 4 Variable Range of Olivine $Mg^\#$ in Mantle Peridotites from the North China Craton

岩石圈地幔的同位素组成接近于亏损地幔^[27, 54-56]。结合进一步的岩石学和地球化学研究, 上述现象说明新生代岩石圈相对低 $Mg^\#$ 的橄榄岩很可能是古老橄榄岩与软流圈来源的熔体相互作用的结果^[12, 16, 25, 46], 这种改造过程不仅造成橄榄岩具有饱满的主要元素组成特征, 而且使其原来富集的同位素特征变得相对亏损^[18, 31, 57]。新生代地幔橄榄岩中橄榄石 $Mg^\#$ 显示了较大的变化范围, 部分样品的 $Mg^\#$ 与古生代金伯利岩中的橄榄岩相重叠, 说明华北克拉通在新生代时期仍然在部分地区(如河南鹤壁地区^[42] 和华北西部地区^[29]) 残存古老的岩石圈地幔; 部分新生代地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石分布在原始地幔组成范围内, 而且很多样品具有极低的 $Mg^\#$, 这说明华北一些地区的岩石圈地幔为新增生的岩石圈地幔(如华北东部郅庐断裂带及其附近地区^[46, 52, 55, 58-60]), 部分样品 $Mg^\#$ 极低很可能指示部分新增生的地幔也受到了熔体改造^[12]。因此, 橄榄岩捕虏体中橄榄石的 $Mg^\#$ 很好地指示了华北不同时代地幔橄榄岩的组成特征及其可能经历的演化过程。

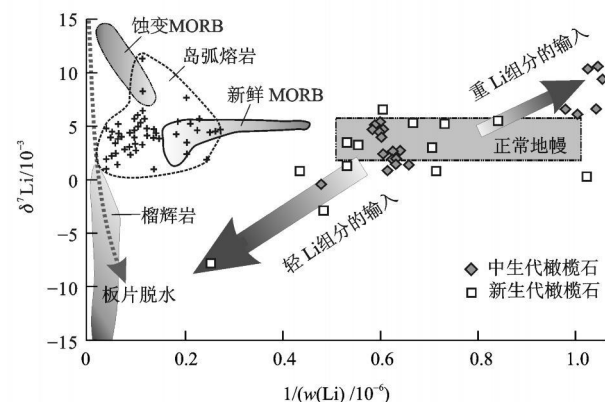
需要说明的是, 橄榄石 $Mg^\#$ 的指示意义同样适用于世界上其他古老克拉通地区的地幔橄榄岩, 而对于造山带的地幔橄榄岩来说, 上述指示作用则不适用, 因为造山带地幔橄榄岩可能经历了更为复杂的演化过程。由于篇幅所限, 世界上其他地区的地幔橄榄岩中橄榄石的地球化学特征及其所指示的地幔演化过程将另文发表。

2 橄榄石 Li 同位素特征及其指示意义

相对于传统的稳定同位素(如 C、H 和 O)而言, Li、Mg 和 Fe 同位素是新兴的稳定同位素, 即非传

统同位素,它们在岩石圈演化研究中发挥了日益重要的作用^[61]。以 Li 同位素体系为例, Li 有两种稳定同位素:⁶Li(大约 7.5%)和⁷Li(大约 92.5%),由于 Li 同位素系统自身的优越性,它能够提供与传统的放射性同位素互为补充、不可或缺的信息^[61-63]。关于地球上不同储源的 Li 同位素组成以及 Li 同位素在近地表、俯冲带以及地幔橄榄岩中的行为已经进行了概括的总结^[17, 62-65],在此不再赘述。

图 5 简单概括了 Li 同位素在岩石圈地幔橄榄岩和俯冲带的地球化学行为:初始俯冲的低温蚀变洋中脊玄武岩(MORB)的 $\delta^{7}\text{Li}$ 为 $(4.5 \sim 14) \times 10^{-3}$ ^[66-67],它们要高于新鲜 MORB 的 $\delta^{7}\text{Li}$ $((1.5 \sim 6.5) \times 10^{-3})$ ^[68-69]。俯冲板片的 $\delta^{7}\text{Li}$ 将随着俯冲、脱水过程而降低^[70-71],而俯冲板片所释放的流体具有高 $\delta^{7}\text{Li}$ 特征,它们交代上覆的地幔楔。因此,源于地幔楔的岛弧熔体具有相对高的 $\delta^{7}\text{Li}$ ^[72-73],而俯冲进入深部地幔的低 $\delta^{7}\text{Li}$ 板片残余则形成一个低 $\delta^{7}\text{Li}$ 地幔源区^[47, 71]。一旦发生熔融,它们产生的低 $\delta^{7}\text{Li}$ 熔体交代上覆地幔从而使其 $\delta^{7}\text{Li}$ 变低。因此,华北克拉通地区中生代地幔橄榄岩捕虏体较高的 $\delta^{7}\text{Li}$ (图 5)可能指示了来源于俯冲地壳所释放的重 Li 组分对中生代岩石圈地幔的改造作用^[63];而新生代岩石圈地幔橄榄岩中较低 $\delta^{7}\text{Li}$ 特征则要求再循环的俯冲洋壳熔融所释放的低 $\delta^{7}\text{Li}$ 熔体的输入^[74],该区新生代玄武岩中携带的辉石岩捕虏体的元素和



注:中生代和新生代样品分别表示华北克拉通地区中、新生代玄武岩所携带的地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石的组成;虚线箭头指示蚀变洋壳在俯冲过程中由于脱水所造成的 Li 元素和同位素组成的变化趋势;两个大的箭头分别指示正常地幔受到轻 Li 组分或重 Li 组分改造的变化趋势;据文献^[17-18, 62-63, 65]修改。

图 5 地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石的 Li 含量与 Li 同位素组成 $\delta^{7}\text{Li}$ 关系

Fig 5 Diagram Showing Olivine Li Content Versus $\delta^{7}\text{Li}$ in Mantle Peridotite Xenoliths

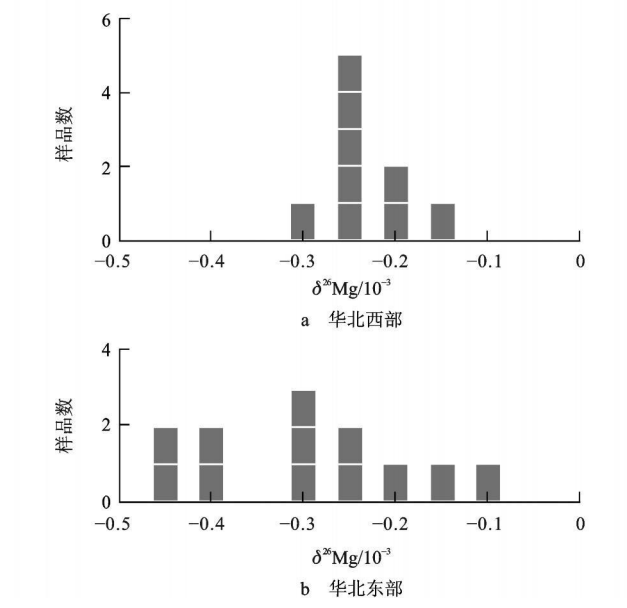
同位素地球化学特征也表明了再循环的洋壳物质的存在^[75-79]。根据最新研究,新生代地幔橄榄岩中较低的 $\delta^{7}\text{Li}$ 也有可能指示岩石圈地幔受到近期软流圈来源熔体的改造作用,这一可能性得到了橄榄岩捕虏体 Sr 和 Nd 同位素组成的支持^[65]。至于上述两种可能性究竟哪一种更为合理、亦或是二者都可能存在,目前尚未定论,需要更多详细、深入的研究来回答。总之,地幔橄榄岩中橄榄石的低 $\delta^{7}\text{Li}$ 特征指示了岩石圈地幔中低 Li 组分的存在^[63],无论上述哪一种可能性正确,都能够说明华北地区岩石圈地幔经历了熔体的改造过程,两种可能性的区别在于熔体性质和来源不同,因而所反映的地幔过程亦有所差异。因此,橄榄岩中橄榄石的 Li 同位素组成为传统的放射性同位素研究提供了重要的补充信息,进而为华北克拉通岩石圈地幔经历了多期橄榄岩-熔体相互作用改造提供了确切证据^[63, 65]。地幔橄榄岩中橄榄石的 Li 同位素地球化学特征的指示意义不仅在中国华北克拉通地区地幔橄榄岩研究中得到证实,而且在世界上其他地区(如南非、北美以及西伯利亚等地区)的地幔橄榄岩研究中也得到广泛认可^[18, 63, 65, 68]。

3 橄榄石 Mg 同位素特征及其指示意义

Mg 有²⁴Mg、²⁵Mg 和²⁶Mg 3 个稳定同位素,其相对丰度依次为 78.99%、10.00%和 11.01%。国际上关于地幔橄榄岩中橄榄石的 Mg 同位素地球化学研究尚处于起步阶段,所以,目前积累的数据非常有限。Pearson 等利用激光烧蚀多接收感应耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)对世界上几个典型的古老克拉通地区(如西伯利亚、南非 Kaapvaal 和北美洲 Slave)和澳大利亚东南部显生宙断裂带中地幔橄榄岩捕虏体的橄榄石进行了 Mg 同位素组成的系统研究^[77]。结果表明:从主量元素强烈亏损的太古宙岩石圈地幔到略亏损的显生宙地幔样品, Mg 同位素组成逐渐变重;经历了明显地幔交代作用影响样品的 Mg 同位素组成变化范围较大;受强烈交代的样品,随着“软流圈特征”熔体的引入而具有重 Mg 同位素组成,而受地幔交代作用影响较弱的样品则具有较轻的 Mg 同位素组成;这些现象表明地幔交代过程所造成的 Mg 同位素分馏现象可以保存在地幔橄榄岩的橄榄石矿物颗粒中。

Yang 等首次报道了中国华北克拉通地区地幔橄榄岩样品的 Mg 同位素研究结果^[20]。研究样品包括 12 个尖晶石二辉橄榄岩和 4 个易剥橄榄岩(橄榄岩中斜方辉石的质量分数小于 5%),它们分别是

华北克拉通西部的三义堂(位于内蒙古集宁)和东部的北岩(位于山东昌乐)地区的新生代玄武岩所携带的地幔橄榄岩捕虏体, 这些样品普遍经历过不同程度的交代作用。结果表明: 地幔橄榄岩 Mg 同位素组成的变化范围与球粒陨石和玄武岩相似, 地幔的平均 Mg 同位素组成与球粒陨石一样; 与华北西部相比, 华北东部新生代地幔橄榄岩中的橄榄石具有明显较大的 Mg 同位素组成变化范围(图 6), 指示了华北东部岩石圈地幔经历了更为复杂的演化过程, 该结论与 Sr-Nd 同位素和 Li 同位素研究结果能够很好地吻合^[12, 63, 78]。



注: 华北西部和华北东部分别表示内蒙古集宁和山东昌乐地区新生代玄武岩所携带的地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石的组成; 据文献[20]修改。

图 6 地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石的镁同位素组成 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围
Fig. 6 Variation of $\delta^{26}\text{Mg}$ of Olivine in Mantle Peridotite Xenoliths

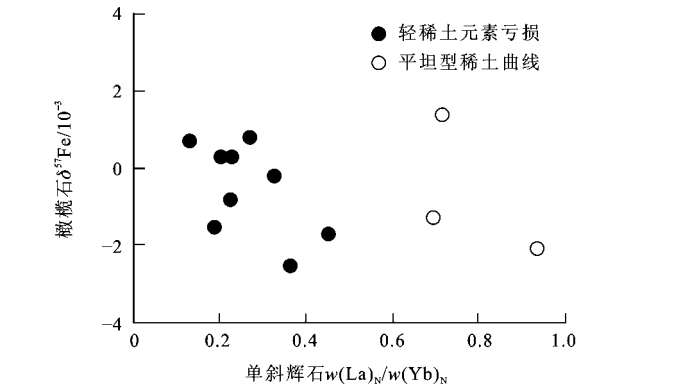
4 橄榄石 Fe 同位素特征及其指示意义

由于受到分析技术的限制, 前人对稳定同位素的测定仅限于质量数小于 40 的元素。近年来, 随着测试仪器的更新换代和同位素分析技术的革命性进展, 特别是 MC-ICP-MS 的应用使得高精度测试 Fe 同位素成为可能, Fe 同位素地球化学因而成为国际地学领域的一个前沿研究方向。

Fe 有 4 个稳定同位素: ^{54}Fe (5.85%)、 ^{56}Fe (91.75%)、 ^{57}Fe (2.12%) 和 ^{58}Fe (0.28%)。由于 Fe 同位素地球化学研究处于刚起步阶段, 所以现有研究成果较少, Zhu 等发现坦桑尼亚和加拿大一些

地区的地幔橄榄岩捕虏体中共生的矿物组合橄榄石-斜方辉石-单斜辉石-角闪石之间存在着明显的 Fe 同位素分馏; 同时在石铁陨石中发现相互平衡的橄榄石和金属之间也存在着明显的 Fe 同位素分馏现象^[79]。Williams 等通过对不同构造环境下产出的地幔橄榄岩和辉石岩的研究也发现不同矿物之间存在类似的 Fe 同位素分馏的特点^[80]。上述研究均发现: 在地幔橄榄岩捕虏体的主要组成矿物中, 交代作用的指示矿物(如角闪石)具有较重 Fe 同位素组成, 这表明地幔交代作用可能是 Fe 同位素分馏的重要机制之一。

为了进一步考察华北克拉通岩石圈地幔的演化过程, Zhao 等选择了 Fe 同位素地球化学示踪手段对华北克拉通中部太行山地区新生代玄武岩(包括汉诺坝、繁峙和鹤壁地区)所携带的地幔橄榄岩捕虏体中矿物首次进行了系统研究^[19]。结果表明, Fe 同位素在岩石圈地幔橄榄岩捕虏体的矿物之间的确存在分馏, 而且矿物的 Fe 同位素组成与共存矿物的元素组成之间也存在一定的相关性, 如橄榄石的 Fe 同位素组成($\delta^{57}\text{Fe}$)与共存的单斜辉石的微量元素(如 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$)之间存在一定的反相关关系, 即 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 越小、Fe 同位素组成越重(图 7)。这些现象表明, 岩石圈地幔中 Fe 同位素的分馏与地幔交代作用有着密切联系。初步研究认为, 华北地区橄榄岩中矿物的 Fe 同位素组成变化主要与地幔交代作用有关; 例如, 来自于软流圈的熔体/流体具有较低的氧化还原性质, 经过这种交代介



注: 轻稀土元素亏损和平坦型稀土曲线分别代表地幔橄榄岩捕虏体中单斜辉石稀土元素配分曲线特征, 样品来自华北克拉通汉诺坝和鹤壁地区新生代玄武岩所携带的橄榄岩捕虏体; 据文献[19]修改。

图 7 地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石的 Fe 同位素组成 $\delta^{57}\text{Fe}$ 与单斜辉石 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 变化图解
Fig. 7 Diagram Showing Olivine $\delta^{57}\text{Fe}$ Versus Clinopyroxene $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ in Mantle Peridotite Xenoliths

质改造的岩石圈地幔具有重的 Fe 同位素组成^[19]。因此,地幔橄榄岩中橄榄石的 Fe 同位素组成特征变化也能够有效地指示岩石圈地幔所经历的一些重要地质过程。

5 结语

随着分析技术的进步和新兴研究手段的开发,对地幔橄榄岩中橄榄石的元素和同位素地球化学的研究将更加深入。基于上述讨论,地幔橄榄岩中橄榄石的指示意义主要表现在如下两个方面。

(1) 橄榄石 $Mg^{\#}$ 能够有效指示岩石圈地幔主要组成元素的饱满与亏损程度,进而能够指示岩石圈地幔的属性(古老的或者新生的)及其经历的演化过程。

(2) 地幔橄榄岩中橄榄石的 Li、Mg 和 Fe 稳定同位素地球化学特征能够明确指示岩石圈地幔所经历的熔体-橄榄岩相互作用的改造过程,进而为岩石圈地幔演化过程研究提供了新的思路和证据。

本文是笔者所在的研究小组过去几年在地幔橄榄岩研究方面的一个总结,上述工作得益于国内外多位合作者、国家自然科学基金委员会、中国科学院和岩石圈演化国家重点实验室的大力支持;评审人对本文的初稿提出了建设性的修改意见,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 翟明国,朱日祥,刘建明,等.华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J].中国科学: D 辑, 2003, 33(10): 913-920.
- [2] 张维萍,赫英,岳可芬.地幔岩包体中金富集规律——以中国东部地幔岩包体为例[J].地球科学与环境学报, 2007, 29(2): 117-119.
- [3] 王新利,杨树生,庞艳春,等.云南金顶铅锌矿床成矿物质来源及有机成矿作用[J].地球科学与环境学报, 2009, 31(4): 376-382.
- [4] 毛景文,张建东,郭春丽.斑岩铜矿-浅成低温热液银铅锌-远接触带热液金矿床模型: 一个新的矿床模型——以德兴地区为例[J].地球科学与环境学报, 2010, 32(1): 1-14.
- [5] 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[C] // Committee of International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and Its Environs. International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and Its Environs. Beijing: Committee of International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and Its Environs, 1992: 65-66.
- [6] Pearson D G, Caril D, Shirey S B. Mantle Sample Included in Volcanic Rocks, Xenoliths and Diamonds[C] // Carlson R W, The Mantle and Core. Oxford: Elsevier, 2003: 171-275.
- [7] Carlson R W, Irving A J, Schulze D J, et al. Timing of Precambrian Melt Depletion and Phanerozoic Refertilization Events in the Lithospheric Mantle of the Wyoming Craton and Adjacent Central Plains Orogen[J]. Lithos, 2004, 77(1/4): 453-472.
- [8] Foley S F. Rejuvenation and Erosion of the Cratonic Lithosphere[J]. Nature Geoscience, 2008, 1: 503-510.
- [9] Griffin W L, O'Reilly S Y, Afonso J C, et al. The Composition and Evolution of Lithospheric Mantle: a Re-evaluation and Its Tectonic Implications[J]. Journal of Petrology, 2009, 50(7): 1185-1204.
- [10] Zheng J P. Comparison of Mantle-derived Materials from Different Spatiotemporal Settings: Implications for Destructive and Accretional Processes of the North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(19): 3397-3416.
- [11] Xia Q K, Hao Y T, Li P, et al. Low Water Content of the Cenozoic Lithospheric Mantle Beneath the Eastern Part of the North China Craton[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(B07207). DOI: 10.1029/2009JB006694.
- [12] Xiao Y, Zhang H F, Fan W M, et al. Evolution of Lithospheric Mantle Beneath the Tan-Lu Fault Zone, Eastern North China Craton: Evidence from Petrology and Geochemistry of Peridotite Xenoliths[J]. Lithos, 2010, 117(1/4): 229-246.
- [13] Xu W L, Yang D B, Gao S, et al. Geochemistry of Peridotite Xenoliths in Early Cretaceous High-Mg[#] Diorites from the Central Orogenic Block of the North China Craton: the Nature of Mesozoic Lithospheric Mantle and Constraints on Lithospheric Thinning[J]. Chemical Geology, 2010, 270(1/4): 257-273.
- [14] Lee C T, Yin Q Z, Rudnick R L, et al. Preservation of Ancient and Fertile Lithospheric Mantle Beneath the Southwestern United States[J]. Nature, 2001, 411: 69-73.
- [15] Ying J F, Zhang H F, Tang Y J. Zoned Olivine Xenocrysts in a Late Mesozoic Gabbro from the Southern Taihang Mountains: Implications for Old Lithospheric Mantle Beneath the Central North China Craton[J]. Geological Magazine, 2010, 147(2): 161-170.
- [16] 张宏福,英基丰,汤艳杰,等.华北东部中、新生代岩石圈地幔的不均一性: 来自橄榄石的组成填图结果[J].岩石学报, 2006, 22(9): 2279-2288.
- [17] 汤艳杰,张宏福,英基丰.锂同位素分馏机制讨论[J].地球科学——中国地质大学学报, 2009, 34(1): 43-55.
- [18] Tang Y J, Zhang H F, Nakamura E, et al. Multistage Melt/fluid-peridotite Interactions in the Refertilized Lithospheric Mantle Beneath the North China Craton: Constraints from the Li-Sr-Nd Isotopic Disequilibrium Between Minerals of Peridotite Xenoliths[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010. DOI: 10.1007/s00410-010-0568-1.
- [19] Zhao X M, Zhang H F, Zhu X K, et al. Iron Isotope Variations in Spinel Peridotite Xenoliths from North China Craton: Implications for Mantle Metasomatism[J]. Contributions to

- Mineralogy and Petrology, 2010, 160: 1-14.
- [20] Yang W, Teng F Z, Zhang H F. Chondritic Magnesium Isotopic Composition of the Terrestrial Mantle: a Case Study of Peridotite Xenoliths from the North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 288(3/4): 475-482.
- [21] 池际尚, 路凤香. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [22] 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [23] Boyd F R. Compositional Distinction Between Oceanic and Cratonic Lithosphere[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 96(1/2): 15-26.
- [24] Griffin W L, O'Reilly S Y, Ryan C G, et al. Secular Variation in the Composition of Subcontinental Lithospheric Mantle: Geophysical and Geodynamic Implications[J] // Braun J, Dooley J C, Goleby B R, et al. Structure and Evolution of the Australian Continent. Washington DC: American Geophysical Union, 1998: 1-26.
- [25] Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, et al. Refertilization of Ancient Lithospheric Mantle Beneath the Central North China Craton: Evidence from Petrology and Geochemistry of Peridotite Xenoliths[J]. Lithos, 2008, 101(3/4): 435-452.
- [26] Griffin W L, O'Reilly S Y, Ryan C G. The Composition and Origin of Sub-continental Lithospheric Mantle[J] // Fei Y, Bertka C M, Mysen B O. Mantle Petrology: Field Observations and High-pressure Experimentation(a Tribute to Francis R. (Joe) Boyd). Houston: The Geochemical Society, 1999: 13-45.
- [27] Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. On and off the North China Craton: Where Is the Archaean Keel? [J]. Journal of Petrology, 2000, 41(7): 933-950.
- [28] Rudnick R L, Gao S, Yuan H L, et al. Persistence of Paleoproterozoic Lithospheric Mantle in the Central Zone of the North China Craton[J] // IAVCEI International Conference on Continental Volcanism. Guangzhou: IAVCEI, 2006: 26.
- [29] Xu Y G, Blusztajn J S, Ma J L, et al. Late Archean to Early Proterozoic Lithospheric Mantle Beneath the Western North China Craton: Sr-Nd-Os Isotopes of Peridotite Xenoliths from Yangyuan and Fansi[J]. Lithos, 2008, 102(1/2): 25-42.
- [30] Walker R J, Carlson R W, Shirey S B, et al. Os, Sr, Nd, and Pb Isotope Systematics of Southern African Peridotite Xenoliths: Implications for the Chemical Evolution of Subcontinental Mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(7): 1583-1595.
- [31] 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[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 65-75.
- [32] Zhang H F, Goldstein S L, 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[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2008, 155(3): 271-293.
- [33] Zhang H F. Peridotite-melt interaction: a Key Point for the Destruction of Cratonic Lithospheric Mantle[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(19): 3417-3437.
- [34] Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. Asthenosphere-lithospheric Mantle Interaction in an Extensional Regime: Implication from the Geochemistry of Cenozoic Basalts from Taihang Mountains, North China Craton[J]. Chemical Geology, 2006, 233(3/4): 309-327.
- [35] 汤艳杰, 张宏福, 英基丰, 等. 太行山地区中、新生代玄武岩浆的源区特征与时空演化[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1657-1664.
- [36] Xu Y G, Huang X L, Menzies M A, et al. Highly Magnesian Olivines and Green-core Clinopyroxenes in Ultrapotassic Lavas from Western Yunnan, China: Evidence for a Complex Hybrid Origin[J]. European Journal of Mineralogy, 2003, 15(6): 965-975.
- [37] 裴福萍, 许文良, 王清海, 等. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约[J]. 高校地质学报, 2004, 10(1): 88-97.
- [38] 张宏福, 英基丰, 徐平, 等. 华北中生代玄武岩中地幔橄榄石捕虏晶: 对岩石圈地幔置换过程的启示[J]. 科学通报, 2004, 49(8): 784-789.
- [39] 张瑾, 张宏福, 英基丰, 等. 华北晚中生代中基性侵入岩中橄榄岩捕虏体是岩石圈地幔直接样品? [J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1559-1568.
- [40] 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 太行山中段新生代玄武岩中高镁橄榄石捕虏晶: 残留古老岩石圈地幔样品[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 1243-1252.
- [41] Qian Q, Hermann J. Formation of High-Mg Diorites Through Assimilation of Peridotite by Monzodiorite Magma at Crustal Depths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(7): 1381-1416.
- [42] 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[J]. Lithos, 2001, 57(1): 43-66.
- [43] Gurenko A A, Hansteen T H, Schmincke H U. Evolution of Parental Magmas of Miocene Shield Basalts of Gran Canaria (Canary Islands): Constraints from Crystal Melt and Fluid Inclusions in Minerals[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1996, 124(3/4): 422-435.
- [44] Zhang H F. Transformation of Lithospheric Mantle Through Peridotite-melt Reaction: a Case of Sino-Korean Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 237(3/4): 768-780.
- [45] Zhang H F, Nakamura E, Sun M, et al. Transformation of Subcontinental Lithospheric Mantle Through Deformation-enhanced Peridotite-melt Reaction: Evidence from a Highly Fertile Mantle Xenolith from the North China Craton[J]. International Geology Review, 2007, 49(7): 658-679.
- [46] Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, et al. Comprehensive Refertilization of Lithospheric Mantle Beneath the North China Craton: Further Os-Sr-Nd Isotopic Constraints[J]. Journal of the Geological Society, 2009, 166(2): 249-259.
- [47] Wunder B, Meixner A, Romer R L, et al. Temperature-de-

- pendent Isotopic Fractionation of Lithium Between Clinopyroxene and High-pressure Hydrous Fluids[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 151(1): 112-120.
- [48] Chu Z Y, Wu F Y, Walker R J, et al. Temporal Evolution of the Lithospheric Mantle Beneath the Eastern North China Craton[J]. Journal of Petrology, 2009, 50(10): 1857-1898.
- [49] Zhang H F, Sun M. Geochemistry of Mesozoic Basalts and Mafic Dikes, Southeastern North China Craton, and Tectonic Implications[J]. International Geology Review, 2002, 44(4): 370-382.
- [50] 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[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 144(2): 241-254.
- [51] Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Secular Evolution of the Lithosphere Beneath the Eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic Basalts and High-Mg Andesites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(22): 4373-4387.
- [52] Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Nature and Evolution of Cenozoic Lithospheric Mantle Beneath Shandong Peninsula, Sino-Korean Craton, Eastern China[J]. International Geology Review, 1998, 40(6): 471-499.
- [53] 郑建平. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- [54] Song Y, Frey F A. Geochemistry of Peridotite Xenoliths in Basalt from Hannuoba, Eastern China: Implications for Subcontinental Mantle Heterogeneity[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(1): 97-113.
- [55] Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. The Nature of the Cenozoic Lithosphere of Nushan, Eastern China[C] // Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Washington DC: American Geophysical Union, 1998: 167-196.
- [56] Xu Y G. Thermo-tectonic Destruction of the Archean Lithospheric Keel Beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, Timing and Mechanism.[J]. Physics and Chemistry of the Earth A: Solid Earth Geodesy, 2001, 26(9/10): 747-757.
- [57] 汤艳杰, 张宏福, 英基丰, 等. 橄榄岩-熔体反应过程中微量元素和同位素组成的转变[J]. 自然科学进展, 2007, 17(6): 748-754.
- [58] Zheng J P, Sun M, Zhou M F, et al. Trace Elemental and PGE Geochemical Constraints of Mesozoic and Cenozoic Peridotitic Xenoliths on Lithospheric Evolution of the North China Craton[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(13): 3401-3418.
- [59] Ying J F, Zhang H F, Kita N, et al. Nature and Evolution of Late Cretaceous Lithospheric Mantle Beneath the Eastern North China Craton: Constraints from Petrology and Geochemistry of Peridotitic Xenoliths from Junan, Shandong Province, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 244(3/4): 622-638.
- [60] Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic Evolution of the Lithosphere Beneath the Sino-Korean Craton[C] // Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Washington DC: American Geophysical Union, 1998: 107-126.
- [61] 张宏福, 汤艳杰, 赵新苗, 等. 非传统同位素体系在地幔地球化学研究中的重要性及其前景[J]. 地学前缘, 2007, 14(2): 37-57.
- [62] Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. Review of the Lithium Isotope System as a Geochemical Tracer[J]. International Geology Review, 2007, 49(4): 374-388.
- [63] Zhang H F, Deloule E, Tang Y J, et al. Melt/rock Interaction in Remains of Refertilized Archean Lithospheric Mantle in Jiaodong Peninsula North China Craton: Li Isotopic Evidence[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160(2): 261-277.
- [64] Tomascak P B. Developments in the Understanding and Application of Lithium Isotopes in the Earth and Planetary Sciences[C] // Johnson C M, Beard B I, Albarede F. Geochemistry of Non-traditional Stable Isotopes: Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Washington DC: Mineral Society of America, 2004: 153-195.
- [65] Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. A Brief Review of Isotopically Light Li: a Feature of the Enriched Mantle? [J]. International Geology Review, 2010, 52(9): 964-976.
- [66] Tomascak P B, Langmuir C H. Lithium Isotope Variability in MORB[J]. Eos Trans AGU, 1999, 80: F1086-F1087.
- [67] Chan L H, Alt J C, Teagle D A H. Lithium and Lithium Isotope Profiles Through the Upper Oceanic Crust: a Study of Seawater-basalt Exchange at ODP Sites 504B and 896A[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201(1): 187-201.
- [68] Nishio Y, Nakai S, Ishii T, et al. Isotope Systematics of Li, Sr, Nd, and Volatiles in Indian Ocean MORBs of the Rodrigues Triple Junction: Constraints on the Origin of the DUPAL Anomaly[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(3): 745-759.
- [69] Tomascak P B, Langmuir C H, Roux P J, et al. Lithium Isotopes in Global Mid-ocean Ridge Basalts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(6): 1626-1637.
- [70] Zack T, Tomascak P B, Rudnick R L, et al. Extremely Light Li in Orogenic Eclogites: the Role of Isotope Fractionation During Dehydration in Subducted Oceanic Crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 208(3/4): 279-290.
- [71] Wunder B, Meixner A, Romer R L, et al. Lithium Isotope Fractionation Between Li-bearing Staurolite, Li-mica and Aqueous Fluids: an Experimental Study[J]. Chemical Geology, 2007, 238(3/4): 277-290.
- [72] Chan L H, Leeman W P, You C F. Lithium Isotopic Composition of Central American Volcanic Arc Lavas: Implications for Modification of Subarc Mantle by Slab-derived Fluids[J]. Chemical Geology, 1999, 160(4): 255-280.
- [73] Tomascak P B, Widom E, Benton L D, et al. The Control of Lithium Budgets in Island Arcs[J]. Earth and Planetary

- Science Letters, 2002, 196(3/4): 227-238.
- [74] Tang Y J, Zhang H F, Nakamura E, et al. Lithium Isotopic Systematics of Peridotite Xenoliths from Hannuoba, North China Craton: Implications for Melt-rock Interaction in the Considerably Thinned Lithospheric Mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(17): 4327-4341.
- [75] Xu Y G. Evidence for Crustal Components in the Mantle and Constraints on Crustal Recycling Mechanisms: Pyroxenite Xenoliths from Hannuoba, North China[J]. *Chemical Geology*, 2002, 182(2/4): 301-322.
- [76] Liu Y S, Gao S, Lee C T A, et al. Melt-peridotite Interactions: Links Between Garnet Pyroxenite and High-Mg[#] Signature of Continental Crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 234(1/2): 39-57.
- [77] Pearson N J, Griffin W L, Alard O, et al. The Isotopic Composition of Magnesium in Mantle Olivine: Records of Depletion and Metasomatism[J]. *Chemical Geology*, 2006, 226(3/4): 115-133.
- [78] Zhang J, Zhang H F, Kita N, et al. Secular Evolution of the Lithospheric Mantle Beneath the Eastern North China Craton: Evidence from Peridotitic Xenoliths from Late Cretaceous Mafic Rocks in the Jiaodong Region, East-central China[J]. *International Geology Review*, 2010, 53(2): 182-211.
- [79] Zhu X K, Guo Y, Williams R J P, et al. Mass Fractionation Processes of Transition Metal Isotopes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 200(1/2): 47-62.
- [80] Williams H M, Peslier A H, McCammon C, et al. Systematic Iron Isotope Variations in Mantle Rocks and Minerals: the Effects of Partial Melting and Oxygen Fugacity[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235(1/2): 435-452.
- (上接第 23 页)
- [21] Juhasz B K, Macaulay C I, Ramseyer K, et al. Poikilitic Quartz Cementation During Basin Inversion, Rotliegend Leman Gas Reservoir, Southern North Sea[R]. Washington DC: American Association of Petroleum Geologists, 2001.
- [22] Guilhaumou N, Ellouz N, Jaswal T M, et al. Genesis and Evolution of Hydrocarbons Entrapped in the Fluorite Deposit of Koh-I-Maran (North Kirthar Range, Pakistan)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(10): 1151-1164.
- [23] Rossi C, Goldstein R H, Ceriani A, et al. Fluid Inclusions Record Thermal and Fluid Evolution in Reservoir Sandstones, Khatatba Formation, Western Desert, Egypt: a Case for Fluid Injection[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(10): 1773-1799.
- [24] Wilkinson J J, Jenkin G R T, Fallick A E, et al. Oxygen and Hydrogen Isotopic Evolution of Variscan Crustal Fluids, South Cornwall, UK[J]. *Chemical Geology*, 1995, 123(1/4): 239-254.
- [25] 宋文海, 庞家黎. 四川盆地西南部上二叠统玄武岩含气性研究[J]. *天然气工业*, 1994, 14(5): 11-15.
- [26] Kamali C. ⁴⁰Ar-³⁹Ar Dating of Barite and Characterization of Ore Fluids at the Lone Tree Gold Deposit, Humboldt County, Nevada[R]. Socorro: New Mexico Institute of Mining and Technology, 1996.
- [27] VanBuskirk M C. A Petrographic, Fluid Inclusion and Stable Isotope Study of the Modoc Fossil Hot Spring Gold Deposit, Imperial Valley, California, USA[D]. Riverside: University of California, Riverside, 1993.
- [28] Muchez P, Slobodnik M, Viaene W A, et al. Geochemical Constraints on the Origin and Migration of Palaeofluids at the Northern Margin of the Variscan Foreland, Southern Belgium[J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 96(3/4): 191-200.
- [29] White T, Al-Aasm I S. Hydrothermal Dolomitization of the Mississippian Upper Debolt Formation, Sikanni Gas Field, Northeastern British Columbia, Canada[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1997, 45(3): 297-316.
- [30] 张文淮, 张德会, 刘敏. 江西银山铜铅锌金银矿床成矿流体及成矿机制研究[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 242-250.
- [31] 侯增谦, 李荫清, 张绮玲, 等. 海底热水成矿系统中的流体端员与混合过程: 来自白银厂和呷村 VMS 矿床的流体包裹体证据[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 221-234.
- [32] 卢焕章. 现代海底烟囱中流体包裹体的研究[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 235-241.
- [33] 林舸, Zhao C B, 王岳军, 等. 含矿流体混合反应与成矿作用的动力平衡模拟研究[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 275-282.
- [34] 王可勇, 姚书振, 吕新彪. 川西北马脑壳金矿床成矿流体地球化学特征与性质[J]. *地球化学*, 2001, 30(3): 273-281.
- [35] 叶霖, 刘铁庚, 邵树勋. 陕南勉宁路地区铜厂铜矿包裹体地球化学特征研究[J]. *矿物学报*, 1997, 17(2): 194-199.
- [36] Abdel A Y M. Geochemical Studies of El Hudi Barite Deposits, Eastern Desert, Egypt[J]. *Bulletin of the Faculty of Science F: Geology*, 2002, 31(1): 79-88.
- [37] Adams J J, Rostron B J, Mendoza C A. Evidence for Two-fluid Mixing at Pine Point, NWT[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69: 103-108.
- [38] Adams J J, Muehlenbachs K, Qing H R. Stable Isotopic Compositions of MVT Carbonates Constrain Age of Mineralization and Ore Precipitation Mechanism at Pine Point, NWT[J]. *Abstracts with Programs Geological Society of America*, 2000, 32(7): 393.
- [39] Everett C E, Wilkinson J J, Boyce A J, et al. The Role of Bittern Brines and Fluid Mixing in the Genesis of the Navan Zn-Pb Deposit, Ireland[J]. *Abstracts with Programs Geological Society of America* 2001, 33(6): 338.
- [40] Grandia F, Cardellach E, Canals A, et al. Geochemistry of the Fluids Related to Epigenetic Carbonate-hosted Zn-Pb Deposits in the Maestrat Basin, Eastern Spain: Fluid Inclusion and Isotope (C, O, S, Sr) Evidence[J]. *Economic Geology*, 2003, 98(5): 933-954.