

# 华北东部橄榄岩岩石化学特征及其 岩石圈地幔演化意义

郑建平, 路凤香, 余淳梅, 袁晓萍, 张瑞生

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 华北东部古生代以来火山岩中捕虏体橄榄岩和苏鲁早中生代构造侵位橄榄岩的岩石化学结果表明: 古生代金伯利岩侵位时仍然存在的难熔、漂浮克拉通地幔在中、新生代时其大部被新生饱满的岩石圈地幔物质取代置换。在 100 Ma 前(但不早于 178 Ma), 新生软流圈物质就已开始沿古老岩石圈内的地幔薄弱带和岩石圈深断裂带对克拉通地幔进行侵蚀、交代和混合作用, 引起岩石圈大幅减薄。这一减薄存在时间、空间的不均匀性, 但在老第三纪达最大。新第三纪以来, 上涌的软流圈物质由于温度下降回落(岩石圈小幅增厚)并转化为新生岩石圈地幔, 实现地幔置换过程。分析的苏鲁造山带橄榄岩是早中生代构造侵位改造过的古老岩石圈地幔物质。

**关键词:** 橄榄岩; 岩石化学; 地幔置换; 华北东部。

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2006)01-0049-08

收稿日期: 2005-09-22

## Peridotitic Petrochemistry of the Eastern North China: Significance for Lithospheric Mantle Evolution

ZHENG Jian-ping, LU Feng-xiang, YU Chun-mei, YUAN Xiao-ping, ZHANG Rui-sheng

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** A petrochemical analysis was undertaken of peridotitic xenoliths in volcanic rocks that erupted from the Paleozoic to the Cenozoic within the eastern part of the North China craton, and the peridotites as tectonic intrusive in the Early Mesozoic from the Sulu orogen. The results show that the cratonic mantle, which was refractory and existed when the kimberlites intruded in the Paleozoic, had almost been replaced by the newly accreted fertile lithospheric mantle during the Mesozoic-Cenozoic. The erosion, metasomatism and intermingling caused by the accreted asthenospheric material acting on the craton mantle along the weak zone and deep fault (such as the Tanlu fault) in the existing lithosphere resulted in the lithosphere thinning at a larger scale 100 Ma ago (but later than 178 Ma). The largest thinning would be in the Eogene. The upwelling asthenospheric material transformed into accreted lithospheric mantle due to the asthenospheric temperature falling in the Neogene (leading to relatively slight lithospheric incrustation), and finally accomplished mantle replacement. The peridotitic body in the Sulu orogen represents the products spread from the modified cratonic lithospheric mantle.

**Key words:** peridotite; petrochemistry; mantle replacement; eastern North China.

### 0 引言

太古代克拉通型地幔因所经历的高程度部分熔融作用而低玄武质组分(如低 CaO、FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 高 Mg<sup>#</sup>、Mg/Si)(Boyd, 1996; Griffin *et al.*, 1999),

并表现出漂浮的性质可以长期稳定存在(Griffin *et al.*, 1998), 但是软流圈与岩石圈的相互作用可以改造它们直至完全置换(Zheng *et al.*, 1998)。华北东部早古生代时有含金刚石的金伯利岩侵位, 表示当时存在冷、厚的克拉通岩石圈根(路凤香和郑建

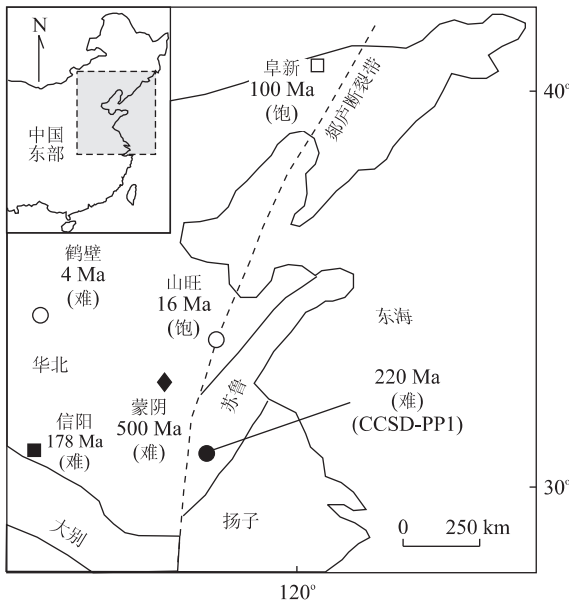


图 1 主要构造单元及样品位置

Fig. 1 Major tectonic units and sampling position

除苏鲁带中的东海(220 Ma)代表超高压变质年龄外,其他数据代表岩浆喷发年龄;括号内的“饱”或“难”代表岩石圈地幔性质,饱指新生、饱满地幔,难指古老、难熔地幔;CCSD-PP1. 中国大陆科学深钻工程先导孔

平,1996). 然而,广泛的新生代玄武岩浆喷发及其所含橄榄岩的性质则显示此时的岩石圈具热、薄的特点(Menzies *et al.*, 1993; Zhou *et al.*, 2002). 有岩石圈或下地壳拆沉(邓晋福等,1996; Gao *et al.*, 2004)、软流圈物质热化学侵蚀(Zheng *et al.*, 1998; 徐义刚,1999; Xu, 2001; Fan *et al.*, 2001)等作用来解释岩石圈的这一减薄过程. 古生代与新生代,以及新生代时郟庐断裂带内与带外捕虏体橄榄岩的矿物化学(包括主元素和微量元素)差异表明:发生于华北东部的中、新生代岩石圈减薄与古老岩石圈被新生地幔物质置换作用过程有关(郑建平,1999; Zheng *et al.*, 2005a). 本文就发育于华北东部山东蒙阴古生代金伯利岩、河南信阳早中生代玄武安山岩、辽宁阜新晚中生代玄武岩、山东山旺和河南鹤壁新生代玄武岩捕虏体橄榄岩及江苏东海早中生代构造就位的苏鲁超高压地质体橄榄岩(图 1)的岩石化学特征对比来进一步探讨中国东部岩石圈的演化过程.

## 1 地质背景和样品

山东蒙阴金伯利岩的侵位时代为 500 Ma(王瑛等,1997). 其中的捕虏体橄榄岩捕虏体多遭受蚀变,

除石榴石、铬尖晶石类矿物有新鲜残余外,橄榄石和辉石多被蛇纹石(为主)、滑石、绿泥石及碳酸盐矿物等取代. 但根据蚀变物集合体的特点,包括颗粒的外形、残存解理的痕迹以及蛇纹石与碳酸盐矿物的分布和量比,可以区分橄榄石和辉石,表明蒙阴古生代岩石圈地幔主要由石榴石方辉橄榄岩、石榴石/铬铁矿二辉橄榄岩等组成.

河南信阳位处华北地块的南缘,其玄武安山岩的全岩 K-Ar 年龄为 178~205 Ma(路凤香等,2003),属早中生代喷发产物. 目前所发现的橄榄岩属滑石化尖晶石方辉/二辉橄榄岩. 除尖晶石和透辉石新鲜外,橄榄石和斜方辉石多被滑石(为主)和蛇纹石取代. 岩石碎裂、剪切结构比较明显,说明它们遭受过强烈的变形改造作用.

辽宁阜新位处华北北缘,其玄武岩的 K-Ar 年龄为 97~100 Ma(许文良等,1999; Zhang and Zheng, 2003; Zheng *et al.*, 2004a),属晚中生代火山作用产物. 捕虏体橄榄岩个体小,主要为尖晶石二辉橄榄岩,有少量的尖晶石方辉橄榄岩. 捕虏体的岩石结构以斑状结构为主,少量为粗粒结构(如方辉橄榄岩).

山东山旺位处郟庐断裂带内,含橄榄岩捕虏体的玄武岩喷发时代为 16 Ma(金隆裕,1985). 捕虏体多为尖晶石相,均为二辉橄榄岩,没有方辉橄榄岩;在这些二辉橄榄岩中含有较高的单斜辉石(最高达 12%). 岩石的结构以剪切结构和细粒结构为主,没有粗粒结构.

位于南北重力梯度带东侧(远离郟庐断裂带约 400 km)的河南鹤壁玄武岩喷发时代是 4 Ma(刘若新,1990),其中的橄榄岩捕虏体均为尖晶石相,且多为方辉橄榄岩. 即使是二辉橄榄岩,所含单斜辉石含量低,且多为粗粒结构,没有细粒结构.

苏鲁造山带橄榄岩取自江苏东海的中国大陆超深钻探工程的先导孔(CCSD-PP1). 这些橄榄岩以断片形式与副片麻岩接触(李天福等,2003),并同片麻岩一起共同经历了三叠纪的碰撞超高压变质作用(Li *et al.*, 1993). 这一橄榄岩体由石榴石二辉橄榄岩(主要)和方辉橄榄岩构成. 橄榄岩具斑状变晶结构或剪切结构,由橄榄石、斜方辉石、单斜辉石(0%~8%)、石榴石和金云母组成. 多数石榴石具次变边. 变斑晶石榴石(2~3 mm)常有橄榄石+斜方辉石+尖晶石包裹体.



## 2 岩石化学特征

考虑到不同时、空背景下橄榄岩的特殊性,如古生代、早中生代火山岩中捕虏体和东海地质体橄榄岩存在不同程度蚀变的特点,以及晚中生代捕虏体橄榄岩个体小的原因,我们在进行岩石化学分析中尽量挑选蚀变弱或个体大受寄主岩影响小的样品。对于样品确实太小不足以进行全岩分析者(如阜新橄榄岩)则采用矿物组成及矿物含量进行混合计算获得。代表性的橄榄岩岩石化学组成见表 1。

蒙阴橄榄岩具低  $\text{SiO}_2$  含量(平均 39.8%)的特点。 $\text{CaO}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  分别在 0.22%~1.85% 和 0.65%~1.16%,明显低于原始地幔,而与南非 Kaapvaal 典型太古代克拉通的低温橄榄岩成分区相似(图 2)。多数样品投点分布在大洋趋势线的上方,显示  $\text{CaO}$  富集,这可能与样品存在弱的碳酸盐化作用有关。

信阳橄榄岩具有与 Kaapvaal 低温橄榄岩相似的低  $\text{CaO}$ (0.12%~0.30%)和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (0.40%~0.84%)组成。与蒙阴橄榄岩不同,所有信阳投点均在大洋趋势线的下侧;此外,这些橄榄岩还有很高的  $\text{SiO}_2$  含量(平均 56.4%)。如此高的  $\text{SiO}_2$  记录着橄榄岩中 Si 组分的明显加入。橄榄岩最容易蚀变的产物是蛇纹石,而信阳以滑石为主,这可能与其在华北南缘紧邻大陆深俯冲高压—超高压变质带的独特位置有关(见下文讨论)。

根据橄榄石的  $\text{Mg}^\#$ ,可以将阜新橄榄岩分为高  $\text{Mg}^\#$ (~0.92)和低  $\text{Mg}^\#$ (平均 0.90)2 种类型(王冬艳等,2002)。它们中主要是低  $\text{Mg}^\#$  类型的橄榄岩,与中国东部新生代玄武岩中橄榄岩的主体(池际尚,1989)相似,其投点基本沿大洋趋势线分布(图 2);高  $\text{Mg}^\#$  样品很少,这些橄榄岩的  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量与 Kaapvaal 低温橄榄岩相似。

在新生代橄榄岩捕虏体中,山旺橄榄岩除极个别样品落在 Kaapvaal 低温橄榄岩成分区外,多数样品有高的  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成,个别接近甚至高于原始地幔,与中国东部新生代玄武岩中橄榄岩的主体(池际尚,1989)相似。鹤壁橄榄岩则相反,除个别样品有较高的  $\text{CaO}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  外,绝大多数样品的  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  与 Kaapvaal 低温橄榄岩相当甚至更低。

与捕虏体橄榄岩不同,造山带(东海)橄榄岩的  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成变化宽,多数与 Kaapvaal 低温橄榄岩相似,但也有不少样品  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量高甚至

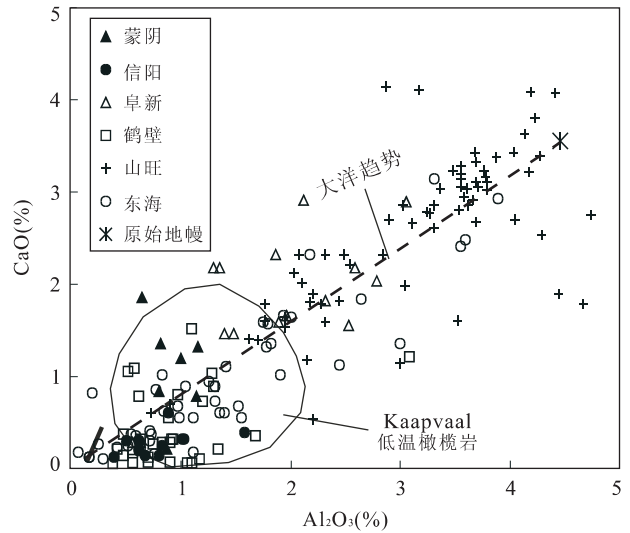


图 2 橄榄岩  $\text{CaO}$ — $\text{Al}_2\text{O}_3$  相关图

Fig. 2 Plots of  $\text{CaO}$  vs.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  of peridotites

Kaapvaal 低温橄榄岩, Boyd and Metzger (1987), Cox *et al.* (1987), Nixon (1987); 大洋趋势, Boyd *et al.* (1997)。其他数据来源:蒙阴, 郑建平 (1999); 信阳, 路凤香等 (2003), Zheng *et al.* (2005b); 阜新, 许文良等 (1999) 及作者未发表资料; 鹤壁, Zheng *et al.* (2001); 山旺, Zheng *et al.* (1998); 东海, 李天福等 (2003)

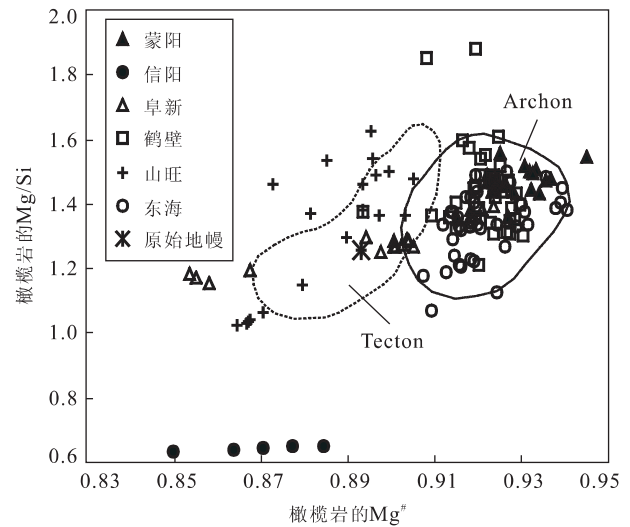


图 3 橄榄岩  $\text{Mg/Si}$ — $\text{Mg}^\#$  相关图

Fig. 3 Plots of  $\text{Mg/Si}$  vs.  $\text{Mg}^\#$  of peridotites

图中分区: Archon > 2.5 Ga; Tecton < 1.0 Ga (Griffin *et al.*, 1999)。其他数据来源同图 2

接近原始地幔(图 2)。

## 3 岩石圈地幔演化意义

低钙的方辉橄榄岩通常仅出现于太古代岩石圈

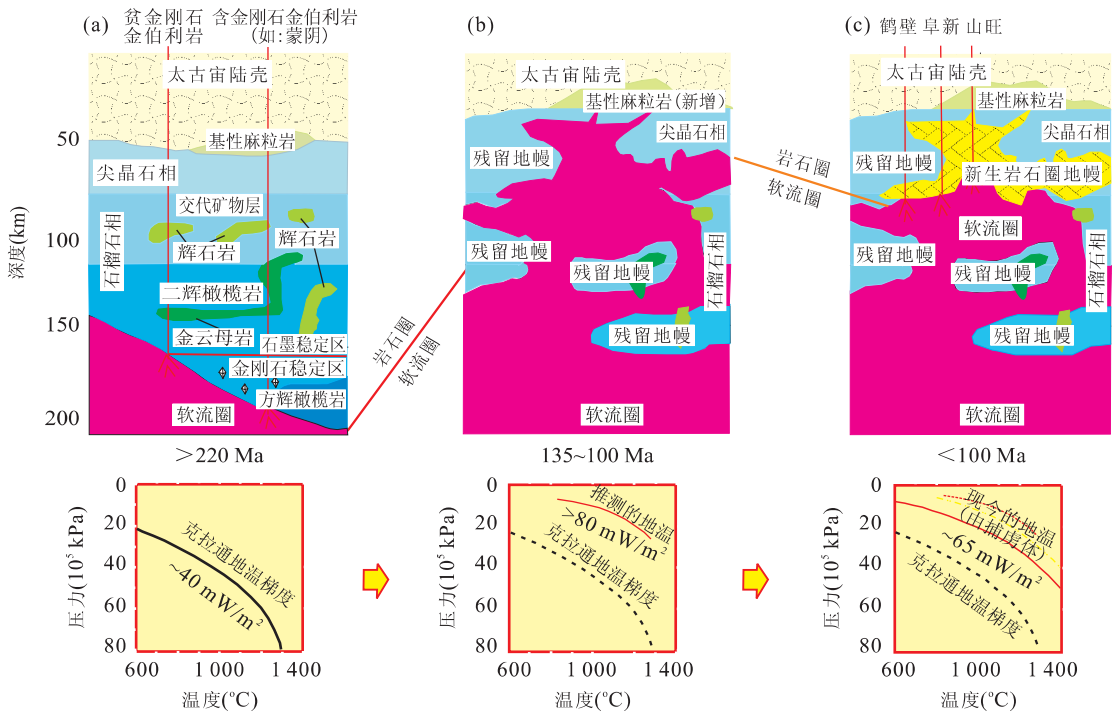


图 4 华北东部岩石圈减薄作用与地幔置换过程卡通图

Fig. 4 Cartoon for the mantle replacement and lithospheric thinning in the eastern North China

古生代—早中生代: 岩石圈厚度大, 地温低, 地幔组成复杂并有地幔交代富集带、剪切带和伟晶岩带等幔内薄弱带; 早中生代的扬子块体俯冲—碰撞作用, 特别是对其南部边缘进行了强烈的作用打破了华北原有的平衡, 部分地幔物质伴随扬子地壳物质的俯冲过程进入了俯冲并折返。晚中生代 (早于 100 Ma 但不早于 178 Ma)—老第三纪, 软流圈物质强烈上涌侵蚀古老岩石圈, 特别是中生代开始活动 (Xu *et al.*, 1987) 的郯庐断裂带深切作用, 把古老岩石圈内业已经存在的薄弱带连通起来, 提供了新生软流圈物质不均匀上涌的通道, 由于不规则薄弱带通道导引着新生地幔物质运移并影响着上覆圈层的隆陷和资源的不均匀分布, 新第三纪以来, 上涌的软流圈 (体) 物质由于温度下降软流圈 (体) 回落并转化为新生岩石圈地幔

地幔中, 并且与之共生的二辉橄榄岩也明显表现出难熔的特点: 低 Ca/Al、高 Mg<sup>#</sup> 比值 (Boyd, 1996; Griffin *et al.*, 1999). 华北是世界上为数不多具有太古代陆壳岩石的地块, 于早太古代时就完成聚结的这一地块 (Zheng *et al.*, 2004b), 至少经历了晚太古代垂向增生 (Zheng *et al.*, 2004c) 和早元古代东、西块体拼合过程 (Zhao *et al.*, 2000). 蒙阴古生代含金金刚石金伯利岩中的石榴石橄榄岩均具高 Mg<sup>#</sup> (图 3)、低 CaO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (图 2) 的特征, 性质上与太古代世界上的典型克拉通地幔相似, 橄榄岩的 Re-Os 同位素体系 (Gao *et al.*, 2002) 也说明其古老克拉通地幔性质。表明华北所具有的冷 (~40 mW/m<sup>2</sup>)、厚 (~200 km) 岩石圈根 (路凤香和郑建平, 1996; Griffin *et al.*, 1998) 直到早古生代金伯利岩浆侵位时还是存在的 (图 4a)。

东海早中生代构造侵位的橄榄岩尽管个别样品含较高的玄武质组分, 但绝大多数样品具有与太古代克拉通相似的性质, 可以解释为它们来自改造了

的古老岩石圈地幔。不过, 目前的资料还不足以说明这些物质是来自于华北还是来自于华南, 这主要是由于人们对华南古老岩石圈地幔的认识还非常有限。如果有资料说明这些橄榄岩与华北有亲源性 (图 2, 3), 则表示克拉通地幔性质至少保留到了早中生代扬子板块俯冲—碰撞之前。

信阳早中生代玄武安山岩中捕虏体橄榄岩, 尽管橄榄石和斜方辉石已经被滑石和蛇纹石取代, 但新鲜的单斜辉石主、微量元素均表现出具有与太古代克拉通地幔相似的亏损难熔特征, 橄榄岩中的玄武质组分如 CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (图 2) 及铂族元素 (PGE) 也充分体现这一亏损性质 (Zheng *et al.*, 2005b)。有意思的是该橄榄岩经历了明显的 Si、Fe 加入 (图 3)。这一加入意味着发生于早中生代的扬子块体向北俯冲及碰撞作用过程强烈地影响着华北地块的南缘 (Zheng *et al.*, 2005b)。

阜新晚中生代 (~100 Ma) 碱性玄武岩中橄榄岩主体反映饱满的地幔特征, 但也存在少量成分上

与克拉通地幔类似的难熔样品。在华北东部(如燕辽地区),比较广泛的基性岩浆活动相当于义县组之后(路凤香等,2006),在此之前的岩浆活动主要体现钙碱性特点,说明强烈的壳—幔相互作用过程在此时才转向明显的软流圈—岩石圈相互作用阶段。郯庐断裂带内的山旺新生代玄武岩中橄榄岩均表现出饱满的地幔性质;相反,被捕获时间更晚(4 Ma)、远离郯庐断裂带的鹤壁捕虏体橄榄岩除极少部分为饱满的橄榄岩外,主体为难熔地幔特征,成分(图 3)及硫化物  $\text{Re-Os}$  原位年龄(作者待发表资料)均表明其太古代地幔性质。

华北东部岩石圈减薄事实已被广泛认识(Griffin *et al.*, 1992, 1998; Menzies *et al.*, 1993; 路凤香和郑建平, 1996)。减薄的机制可以概括为拆沉作用(邓晋福等, 1996; 吴福元等, 2003; Gao *et al.*, 2004)和侵蚀作用(徐义刚, 1999; 郑建平, 1999; Zhang *et al.*, 2002)2 种类型。由于克拉通地幔所具有的高难熔和漂浮性质,在克拉通内部一般情况下不太可能发生大面积的拆沉作用(Griffin *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 1998)。华北东部已有的捕虏体橄榄岩所表现的新、老地幔性质的时、空分布特征(图 1),说明软流圈物质对古老岩石圈的侵蚀作用能较好地解释东部岩石圈的减薄过程。通过对古生代、新生代地幔橄榄岩的直接对比研究后发现:发生于华北东部的中、新生代岩石圈减薄过程伴随着古老岩石圈被新生地幔物质置换作用的结果(郑建平, 1999)。从山旺的橄榄岩所代表的新生饱满地幔性质而鹤壁的橄榄岩捕虏体主体是古老地幔的浅部残留(图 2, 3)看,地幔置换作用主要沿岩石圈幔内薄弱带(如郯庐断裂带)进行;中、新生代的地幔置换过程存在早期的软流体物质强烈上涌引起岩石圈大幅减薄和后期出现上涌的软流圈回落显示岩石圈的小幅增厚 2 个过程(Zheng *et al.*, 2005a)。

从地幔置换的时间上看,尽管信阳橄榄岩受到俯冲地壳物质的影响(如 Si 加入),但其亏损地幔特征说明在其寄主岩浆喷发时(如 178 Ma)华北的南缘还总体保持古老地幔性质;然而,主体饱满的阜新橄榄岩则反映在 100 Ma 时华北的北缘已被新生岩石圈地幔置换了,说明在此期间软流圈物质曾有明显的上涌过程(图 4b)。但就整个华北东部而言,最广泛的基性岩浆活动发育于老第三纪,说明当时的软流圈抬升位置可能最高。16 Ma 喷发的山旺及华北东部其他地区(池际尚, 1989)新生代玄武岩所

带橄榄岩所具新生饱满地幔特征,显示在晚中生代—老第三纪曾上涌的软流圈(体)物质在新第三纪以来因温度下降出现明显的软流圈(体)回落并转化为新生的岩石圈地幔,从而实现了广泛的新生地幔物质对古老岩石圈的地幔置换过程(图 4c)。

## 4 主要认识

古生代金伯利岩侵位时仍然存在的难熔、漂浮克拉通地幔在中、新生代时其大部被新生饱满的岩石圈地幔物质取代置换。在 100 Ma 前(但不早于 178 Ma),新生软流圈物质就已开始沿古老岩石圈内的地幔薄弱带和岩石圈深断裂带对克拉通地幔进行侵蚀、交代和混合作用,引起岩石圈大幅减薄。这一减薄存在时间、空间的不均匀性,但在老第三纪达最大。新第三纪以来,上涌的软流圈物质由于温度下降回落(岩石圈小幅增厚)并转化为新生岩石圈地幔,实现地幔置换过程。苏鲁造山带橄榄岩代表着早中生代构造侵位的经改造过的古老岩石圈地幔物质。

## References

- Boyd, F. R., 1996. Origin of peridotite xenoliths: Major element consideration. In: Ranalli, G., Ricci, L. F., Ricci, C. A., et al., eds., High pressure and high temperature research on lithosphere and mantle materials, University of Siena, 89—106.
- Boyd, F. R., Mertman, S. A., 1987. Composition and structure of the Kaapvaal lithosphere, southern Africa. In: Mysen, B. O., ed., Magmatic processes: Physicochemical principles. *The Geochemical Society, Spe. Pub.*, 1: 13—24.
- Boyd, F. R., Pokhilenko, N. P., Pearson, D. G., et al., 1997. Composition of the Siberian cratonic mantle: Evidence from Udachnaya peridotite xenoliths. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 128: 228—246.
- Chi, J. S., 1989. The study of Cenozoic basalts and upper mantle beneath China (attachment: kimberlites). China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Cox, K. G., Smith, M. R., Beswetherick, S., 1987. Textural studies of garnet lherzolites: Evidence of exsolution origin from high-temperature harzburgites. In: Nixon, P. H., ed., *Mantle xenoliths*. Wiley, New York, 537—550.
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Mo, X. X., et al., 1996. Continental roots-plume tectonics of China: The key of continental kinetic. Geological Publishing House, Beijing (in Chi-

- nese).
- Fan, W. M., Zhang, H. F., Baker, J., et al., 2001. On and off the North China craton; Where is the Archean keel? *J. Petrol.*, 41: 933–950.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Carlson, R. W., et al., 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198: 307–322.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897.
- Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., Ryan, C. G., 1992. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa, Siberia and China; Proton microprobe studies. Internat. Sympos. Cenozoic volcanic rocks and deep-seated xenoliths of China and its environs. Beijing, 20.
- Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., Ryan, C. G., 1999. The composition and origin of sub-continental lithospheric mantle. In: Fei, Y., Berka, C. M., Mysen, B. O., eds., *Mantle petrology: Field observations and high-pressure experimentation; A tribute to Francis R. (Joe) Boyd*. *The Geochemical Society Special Publication*, 6: 13–45.
- Griffin, W. L., Zhang, A., O'Reilly, S. Y., et al., 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower, M., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*. *Amer. Geodynamics Series*, 27: 107–126. American Geophysical Union, Washington, D. C.
- Jin, L. Y., 1985. Xenoliths in Cenozoic basalts from Tanlu fault. *The Journal of Changchun College of Geology*, 3: 21–32 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Xiao, T. L., Liou, D. L., et al., 1993. Collision of the North China and Yangtz blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 89–111.
- Li, T. F., Yang, J. S., Zhang, R. Y., 2003. Peridotite from the pro-pilot hole (PP1) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project and its bearing on depleted and metasomatic upper mantle. *Acta Geol. Sin.*, 77: 492–509 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R. X., 1990. The age and geochemistry of Cenozoic volcanic rock in China. Seismological Publishing House, Beijing, 1–43 (in Chinese).
- Lu, F. X., Wang, C. Y., Zheng, J. P., et al., 2003. Lithospheric composition and structure of north boundary of Qinling. Study on deep-seated xenoliths from Minggang area of Henan Province. *Science in China (Ser. D)*, 33: 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. X., Zheng, J. P., 1996. Palaeozoic nature and deep processes of lithospheric mantle beneath North China. In: Chi, J. S., Lu, F. X., eds., *Kimberlites and Palaeozoic mantle beneath North China platform*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Lu, F. X., Zheng, J. P., Zhang, R. S., 2006. Interaction between crust and weakening lithospheric mantle: Take the Yanshan orogenic belt as an example. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31 (1): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Menzies, M. A., Fan, W., Ming, Z., 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of >120 km of Archean 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.*, 76: 71–81.
- Nixon, P. H., 1987. Kimberlitic xenoliths and their cratonic setting. In: Nixon, P. H., ed., *Mantle xenoliths*. John Wiley and Sons, Chichester, 215–239.
- Wang, D. Y., Xu, W. L., Feng, H., et al., 2002. Nature of Late Mesozoic lithospheric mantle in western Liaoning Province: Evidences from basalt and the mantle-derived xenoliths. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 32: 319–324 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Ling, W. L., Lu, F. X., 1997. New emplacement age of Shandong Mengyin kimberlite. *Geological Science and Technology Information*, 9(3): 8–12 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51–60 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. W., Zhu, G., Tong, W. X., et al., 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system; A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 134: 273–310.
- Xu, W. L., Zheng, C. Q., Wang, D. Y., 1999. Discovery and significance of mantle and lower-crust xenoliths in Mesozoic trachytic basalts from the western of Liaoning Province. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 444–449 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., 1999. Roles of Thermo-mechanic and chemical erosion in continental lithospheric thinning. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 18(1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean

- lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9–10): 747–757.
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2002. 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.*, 144: 241–253.
- Zhang, H. F., Zheng, J. P., 2003. Geochemical characteristics and petrogenesis of Mesozoic basalts from the North China craton: A case study in Fuxin, Liaoning Province. *Chinese Science Bulletin*, 48(9): 924–930.
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103: 55–88.
- Zheng, J. P., 1999. Mesozoic-Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning, East China. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2004b. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China craton. *Geology*, 32: 229–232.
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2004c. U-Pb and Hf-isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: Evolution of the lower crust beneath the North China craton. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 79–103.
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2005a. Late Mesozoic-Eocene mantle replacement beneath the eastern North China craton: Evidences from the Paleozoic and Cenozoic peridotite xenoliths. *Intern. Geol. Rev.*, 47: 457–472.
- Zheng, J. P., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean craton. *Int. Geol. Rev.*, 40: 471–499.
- Zheng, J. P., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2001. Relics of the Archean mantle beneath eastern part of the North China block and its significance in lithospheric evolution. *Lithos*, 57: 43–66.
- Zheng, J. P., Sun, M., Zhou, M. F., et al., 2005b. Trace elemental and PGE geochemical constraints of Mesozoic and Cenozoic peridotitic xenoliths on lithospheric evolution of the North China craton. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69: 3401–3418.
- Zheng, J. P., Zhang, R. S., Yu, C. M., et al., 2004a. An in situ zircon Hf isotopic, U-Pb age and trace element study of monzonite xenoliths from Pingquan and Fuxin basalts: Tracking the thermal events of 169 Ma and 107 Ma in Yanliao area. *Science in China (Ser. D)*, 47(Suppl. II): 39–52.
- Zhou, X. H., Sun, M., Zhang, G. H., et al., 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton. *Lithos*, 62: 111–124.

### 附中文参考文献

- 池际尚, 1989. 新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩). 武汉: 中国地质大学出版社.
- 邓晋福, 赵海岭, 莫宣学, 等, 1996. 中国大陆根—柱构造: 大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社.
- 金隆裕, 1985. 郟庐断裂带新生代玄武岩中的捕虏体. 长春地质学院院报, 3: 21–32.
- 李天福, 杨经绥, 张儒媛, 2003. 中国大陆科学深钻工程先导孔的橄榄岩及其上地幔亏损和交代作用意义. 地质学报, 77: 492–509.
- 刘若新, 1990. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社.
- 路凤香, 王春阳, 郑建平, 等, 2003. 秦岭北界岩石圈组成及结构: 河南明港地区深源捕虏体研究. 中国科学(D辑), 33(1): 1–9.
- 路凤香, 郑建平, 1996. 华北地台古生代岩石圈地幔特征及深部过程. 见: 池际尚, 路凤香编, 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社.
- 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 等, 2006. 地壳与弱化岩石圈地幔的相互作用——以燕山造山带为例. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 1–7.
- 王冬艳, 许文良, 冯宏, 等, 2002. 辽西中生代晚期岩石圈地幔的性质: 来自玄武岩和地幔捕虏体的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 32: 319–324.
- 王瑛, 凌文黎, 路凤香, 1997. 山东蒙阴金伯利岩侵位年代研究新成果. 地球科技情报, 9(3): 8–12.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等, 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10(3): 51–60.
- 徐义刚, 1999. 岩石圈的热—机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄. 矿物岩石地球化学通报, 18(1): 1–5.
- 许文良, 郑常青, 王东艳, 1999. 辽西中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及意义. 地质论评, 45(增刊): 444–449.
- 郑建平, 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社.