大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔改造的时间、方式与过程: 鲁西橄榄岩类与辉石岩类捕虏体证据

许文良^{①*}, 周群君^①, 杨德彬^①, 杨进辉^②

① 吉林大学地球科学学院, 长春 130061;

② 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* 联系人, E-mail: xuwl@jlu.edu.cn

2013-05-13 收稿, 2013-06-14 接受, 2013-08-07 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2009CB825005)和国家自然科学基金(90814003)资助

摘要 鲁西早白垩世镁铁质岩石中有橄榄岩类和辉石岩类捕虏体, 前者包括含尖晶石方辉橄榄岩(约占 3%)、含铬铁矿纯橄岩(约占 95%)和含铬铁矿异剥橄榄岩(约占 2%)。它们的岩相学、全岩地球化学与矿物地球化学为深俯冲陆壳对相邻岩石圈地幔的改造过程提供了直接证据。含尖晶石方辉橄榄岩主要由橄榄石(82%~89%)、斜方辉石(8%~13%)以及次要的尖晶石(1%~2%)、单斜辉石(~1.5%)和角闪石(~1%)组成, 橄榄石的 Mg# 值介于 92.1~93.8 之间, 其平均值为 92.5, 橄榄石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 5.5‰~5.6‰ 之间, 全岩的 Re 亏损模式年龄(T_{RD})为 2.6~2.68 Ga; 部分纯橄岩和异剥橄榄岩中的橄榄石具有相对较低的 Mg# 值(85~90)和较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(6.1‰~7.7‰)以及明显偏高的全岩 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值(0.1269~0.5780)。前者代表了鲁西早白垩世期间古老岩石圈地幔的少量残留, 后者意味着鲁西早白垩世期间岩石圈地幔的绝大多数已经被改造。费县早白垩世玄武岩中含橄榄石的二辉石岩中可观察到橄榄石被斜方辉石所交代和相继出现的斜方辉石被单斜辉石所交代的改造过程, 这与斜方辉石(1097~1491 $\mu\text{g/g}$)和单斜辉石(581~809 $\mu\text{g/g}$)明显富集 Ni 的地球化学属性相吻合。辉石岩中橄榄石的氧同位素组成($\delta^{18}\text{O} = 7.28\text{‰} \sim 8.21\text{‰}$)和单斜辉石的锆同位素组成(介于 0.70862~0.70979 之间)表明, 改造岩石圈地幔的熔体起源于深俯冲扬子板片的部分熔融。

关键词

大陆深俯冲
岩石圈地幔
改造的时间与过程
橄榄岩
辉石岩

大陆深俯冲作用是大陆动力学的重要研究内容之一, 深俯冲陆壳物质可以进入到地幔深度发生断离或折返这已被出露于地表的高压-超高压岩石中柯石英和微粒金刚石的发现所证实^[1]。那么, 大陆地壳俯冲到地幔深度时壳幔相互作用的时间、方式、程度与结果如何? 这是目前大陆深俯冲研究领域尚未得到很好解决的科学问题之一^[2]。然而, 深俯冲陆壳上盘起源于深部陆壳和/或岩石圈地幔的岩浆作用性质及其所携带的深源岩石包体, 为解决上述科学问题

提供了可能^[3,4]。作为扬子深俯冲板片上盘的鲁西地区, 其中早白垩世火成岩中不同类型幔源橄榄岩类和辉石岩类捕虏体的发现为了解深俯冲陆壳物质与相邻岩石圈地幔的相互作用方式与过程提供了直接证据^[5~7]。

1 深俯冲扬子板片对华北克拉通东南缘岩石圈地幔的改造: 橄榄岩类捕虏体证据

判别改造岩石圈地幔物质是扬子陆壳物质, 还

引用格式: 许文良, 周群君, 杨德彬, 等. 大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔改造的时间、方式与过程: 鲁西橄榄岩类与辉石岩类捕虏体证据. 科学通报, 2013, 58: 2300~2305

Xu W L, Zhou Q J, Yang D B, et al. Timing, style and process of modifying adjacent lithospheric mantle by melts derived from deeply subducted continental crust: Evidence from peridotite and pyroxenite xenoliths in western Shandong. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2300~2305, doi: 10.1360/972013-568

是华北陆壳物质,其关键性证据是: 扬子陆壳物质以新元古代(尤其是新元古代中期)岩浆事件、低的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为特征,具有相对偏高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值,全岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值表现出古元古代中期和中元古代晚期的双峰式新生地壳生长^[8-10]. 与此相反,华北陆壳物质以古元古代和晚太古代岩浆热事件、相对高的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为特征,具有偏低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值,全岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值主要表现出太古代晚期新生地壳生长^[9,11,12].

鲁西早白垩世镁铁质岩石在痕量元素组成上显示弧型火成岩的地球化学属性——富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损重稀土元素和高场强元素^[3,4,13,14]. 自靠近郯庐断裂带(如方城和费县、青坨)

向北西方向(如中部的角峪和铁铜沟以及西北部的济南、邹平和金岭),早白垩世镁铁质岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的初始比值逐渐降低、全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和锆石 Hf 同位素比值逐渐升高^[3,4], 靠近郯庐断裂带鲁西地区(包括费县-方城、青坨)的岩石圈地幔主要受到断离的扬子深俯冲板片物质的改造,而远离郯庐断裂带鲁西地区(如济南、邹平和金岭)岩石圈地幔主要受到拆沉的华北陆壳物质的改造,位于中部的铁铜沟和角峪岩体分布区的岩石圈地幔主体显示扬子深俯冲板片物质改造的特征^[3,4,15-17].

铁铜沟高镁闪长岩中的幔源橄榄岩类捕虏体包括含尖晶石方辉橄榄岩、纯橄岩和异剥橄榄岩(图 1). 含尖晶石方辉橄榄岩在所发现的橄榄岩类捕虏体中

图 1 鲁西橄榄岩类捕虏体的岩相学

部分引自文献[5]. (a) 尖晶石方辉橄榄岩中的尖晶石; (b) 尖晶石方辉橄榄岩中的角闪石交代单斜辉石; (c) 含有斜方辉石岩脉的纯橄岩, 其中的斜方辉石显示环带结构; (d) 含铬铁矿纯橄岩: 在铬铁矿和橄榄石之间存在斜方辉石和金云母; (e) 含铬铁矿纯橄岩: 橄榄石颗粒内部出溶铬铁矿, 并见有角闪石交代单斜辉石; (f) 含铬铁矿的异剥橄榄岩: 橄榄石呈残留孤岛状存在于单斜辉石中, 单斜辉石出溶有斜方辉石. Chr, 铬铁矿; Am, 角闪石; Cpx, 单斜辉石; Ol, 橄榄石; Opx, 斜方辉石; Phl, 金云母; Sp, 尖晶石

约占 3%, 主要由橄榄石(82%~89%)、斜方辉石(8%~13%)以及次要的尖晶石(1%~2%)、单斜辉石(~1.5%)和角闪石(~1%)组成, 在该类捕虏体中可以观察到角闪石交代原生单斜辉石的现象(图 1(b)). 该类捕虏体的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.7058~0.7127, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值介于 0.1099~0.1104 之间, Re 亏损模式年龄(T_{RD})为 2.60~2.68 Ga, 结合其中橄榄石高的 Mg#(平均值为 92.5), 可以判定这些方辉橄榄岩捕虏体代表了古老克拉通型岩石圈地幔的残留. 然而, 纯橄岩和异剥橄榄岩捕虏体约占所发现捕虏体总数的 97%, 尤其是纯橄岩(约占 95%)构成了其绝大多数, 纯橄岩中斜方辉石岩脉体的发现(图 1(c))、橄榄石中铬铁矿的出溶和角闪石交代单斜辉石的现象(图 1(e))以及异剥橄榄岩中橄榄石呈残留孤岛状存在于单斜辉石中(图 1(f))的岩相学特征都表明该类捕虏体受到了晚期熔体的改造. 该类捕虏体与尖晶石方辉橄榄岩类捕虏体以及原始地幔相比, 它们具有相对偏高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7113~0.7136)和明显偏高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值(0.1269~0.5780)以及轻稀土元素(LREE)和 Pb 的富集, 均表明该类包体经历了起源于陆壳物质熔体的改造^[5,7]. 综合鲁西早白垩世镁铁质岩石和其中橄榄岩类捕虏体的地球化学特征, 可以判定靠近郯庐断裂带一侧鲁西地区(包括方城-费县-青坨-莱芜)的岩石圈地幔经历了深俯冲扬子板片物质以及上覆沉积物的改造. 方城玄武岩中辉石岩包体中的锆石具有低 $\delta^{18}\text{O}$ 值(介于 $1.12\%\pm 0.24\%$ ~ $4.76\%\pm 0.21\%$ 之间, 未发表数据), 证实深俯冲扬子板片对华北克拉通东南缘岩石圈地幔的改造.

2 深俯冲扬子板片对华北克拉通东南缘岩石圈地幔改造的时间: 锆石 U-Pb 年龄证据

幔源橄榄岩作为 SiO_2 强烈不饱和体系不会存在锆石的结晶与形成. 然而, 岩相学研究表明, 鲁西早白垩世高镁闪长岩中的纯橄岩里具有斜方辉石岩脉体, 在部分铬铁矿与橄榄石的接触周边形成了斜方辉石岩环状体. 这些岩相学现象表明, 纯橄岩遭受了富硅质熔体的改造, 在这种改造过程中可能有锆石的形成. 基于这一思路, 我们对鲁西早白垩世高镁闪长岩中的 3 个纯橄岩捕虏体进行了锆石的分选和 SHRIMP U-Pb 定年^[18]. 为了防止分选过程中污染的

发生, 首先对纯橄岩样品进行了详细的岩相学研究, 排除纯橄岩捕虏体内部有寄主岩脉体的出现, 同时对样品进行清洗, 并切除纯橄岩捕虏体周边的寄主岩, 直至达到新鲜纯橄岩捕虏体的出现. 然后, 对所选样品进行手工粉碎, 并研磨至 100~120 目左右, 再用酒精淘洗, 经过磁选和重液分选, 最终在双目显微镜下手动挑纯. 整个样品粉碎与锆石挑选过程, 除磁选仪外, 其他均采用新工具, 并保证无污染发生. 从 3 个纯橄岩样品选出了 18 颗锆石, 其中 15 颗呈条痕状吸收, 3 颗具岩浆环带特点或核边结构, 结合它们的 Th/U 比值(0.15~2.04), 暗示其岩浆成因. 岩浆锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分成 5 组: 131~145, 151~164, 261~280, 434~452 和 500~516 Ma. 131~145 Ma 年龄(加权平均年龄为 143 ± 2 Ma)与寄主岩浆(铁铜沟岩体)的形成时代相近, 这个年龄既可能代表了岩石圈地幔被深俯冲陆壳物质改造的主体时间, 也可能代表受到交代的岩石圈地幔发生部分熔融的时间. 其他年龄与本区存在的岩浆事件相吻合, 可能反映了岩石圈地幔被多期改造或者经受多次部分熔融的时间.

上述锆石 U-Pb 定年结果表明, 深俯冲陆壳物质对岩石圈地幔的改造可能主要发生在寄主岩浆发生前的较短时间内. 如果是这样的话, 这一改造时间比扬子板片深俯冲的时间 225~240 Ma^[9]晚了将近 ~100 Ma. 大别-苏鲁造山带超高压变质岩在折返过程发生了部分熔融^[19], 深熔产物中锆石 U-Pb 年龄集中的晚三叠世 220~210 Ma^[20,21], 这些熔体是交代华北克拉通岩石圈地幔的潜在物质. 出现这一时间差异的主要原因可能是由于深俯冲扬子板片衍生的地壳熔体交代上覆华北克拉通岩石圈地幔后, 在晚三叠世-晚侏罗世期间因缺乏来自深部的热扰动, 并没有造成交代岩石圈地幔的部分熔融. 而到了早白垩世期间, 由于古太平洋板块的西向俯冲作用, 华北克拉通东部受到来自深部软流圈热流的扰动, 引起了早期交代富集的岩石圈地幔发生部分熔融, 结果不仅形成了早白垩世碰撞后镁铁质岩浆作用, 而且其中部分熔体对岩石圈地幔自身进行了改造. 大别-苏鲁造山带也广泛发育这些早白垩世碰撞后镁铁质岩浆作用, 它们的地幔源区也是俯冲扬子板片衍生熔体交代华北克拉通岩石圈地幔所形成的^[22~24].

图2 含橄辉石岩捕虏体中矿物间的交代过程

引自文献[6], 图例同图1

3 深俯冲扬子板片对华北克拉通东南缘岩石圈地幔改造的方式与过程

通过对鲁西早白垩世火成岩中幔源异剥橄榄岩和辉石岩类包体的岩相学研究, 在含橄榄石二辉石岩捕虏体中可以观察到橄榄石被斜方辉石所交代和斜方辉石被单斜辉石所交代的连续改造过程(图2)。这一过程也得到了矿物微量元素 Ni 丰度变化的支持(图3)。

结合不同类型橄榄岩类包体的研究结果, 我们认为: (1) 异剥橄榄岩和辉石岩包体中的橄榄石是岩石圈地幔成因, 代表了古老岩石圈地幔的残留, 但经历了陆壳衍生熔体的改造。相对于方辉橄榄岩中的橄榄石, 辉石岩中的橄榄石具有相对低的 Mg# 值(0.85~0.86)和低的 Ni 含量(2187~2468 $\mu\text{g/g}$)以及明显偏高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(7.3‰~8.2‰); (2) 与早白垩世具有太古代 Re 亏损模式年龄方辉橄榄岩捕虏体中的斜方辉石(Ni=791~863 $\mu\text{g/g}$)以及晚白垩世碱性玄武岩中的斜方辉石斑晶(Ni=730~798 $\mu\text{g/g}$)相比, 来自辉石岩中斜方辉石的 Ni 含量明显偏高(1097~1491 $\mu\text{g/g}$), 表明该斜方辉石为交代橄榄石所成, 并继承了橄榄石的成分特征, 揭示了富硅质熔体交代作用的存在以

图3 含橄辉石岩捕虏体中矿物 Mg#-Ni 变异图

数据引自文献[6]

及对岩石圈地幔的改造; (3) 与早白垩世具有太古代 Re 亏损模式年龄方辉橄榄岩捕虏体中的单斜辉石 ($\text{Ni}=341\sim394\ \mu\text{g/g}$) 以及晚白垩世碱性玄武岩中的单斜辉石斑晶 ($\text{Ni}=117\sim277\ \mu\text{g/g}$) 相比, 辉石岩中单斜辉石的 Ni 含量明显偏高 ($581\sim809\ \mu\text{g/g}$), 表明该单斜辉石为交代斜方辉石所成, 并继承了原始橄榄石的成分特征, 揭示高钙富硅质交代熔体的存在; (4) 单斜辉石原位 Sr 同位素比值为 $0.7086\sim0.7098$, 结合橄榄石明显偏高的氧同位素比值, 指示改造岩石圈地幔的熔体起源于再循环陆壳物质的部分熔融. 这种再循环陆壳物质具有上部陆壳物质的属性, 结合寄主岩的地球化学属性^[3,25,26]和方城玄武岩中辉石岩包体中低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石 ($1.12\%\pm0.24\%\sim4.76\%\pm0.21\%$, 未发表数据) 的存在, 可以判定改造岩石圈地幔的陆壳物质属于深俯冲的扬子板片.

综上所述, 大陆深俯冲作用对岩石圈地幔组成改造的方式和过程为: 起源于深俯冲陆壳物质部分熔融的长英质熔体与地幔橄榄岩反应, 将橄榄岩地幔转变成辉石岩质地幔. 改造过程为: 首先消耗橄榄石形成斜方辉石, 然后进一步富钙的熔体交代斜方辉石形成单斜辉石, 上述反应过程可用下列反应式来表示:

上述反应关系也得到了方城早白垩世玄武岩中异剥橄榄岩捕虏体的岩相学的支持——即在捕虏体内部可以观察到单斜辉石交代斜方辉石和晚期碳酸盐脉的出现(图 4).

图4 方城玄武岩中的异剥橄榄岩捕虏体
Cc, 方解石; 其他同图1

参考文献

- 1 Chopin C. Ultrahigh-pressure metamorphism: Tracing continental crust into the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 212: 1–14
- 2 Zheng Y F, Zhang L, McClelland W C, et al. Processes in continental collision zones: Preface. *Lithos*, 2012, 136–139: 1–9
- 3 Yang D B, Xu W L, Pei F P, et al. Spatial extent of the influence of the deeply subducted Yangtze slab on the eastern North China Craton lithosphere: Constraints from Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Mesozoic mafic igneous rocks in western Shandong, China. *Lithos*, 2012, 136–139: 246–260
- 4 Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. Modification of subcontinental lithospheric mantle above continental subduction zone: Constraints from geochemistry of Mesozoic gabbroic rocks in southeastern North China. *Lithos*, 2012, 146–147: 164–182
- 5 Xu W L, Hergt J M, Gao S, et al. Interaction of adakitic melt-peridotite: Implications for the high-Mg# signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 265: 123–137
- 6 Xu W L, Zhou Q J, Pei F P, et al. Destruction of the North China Craton: Delamination or thermal/chemical erosion? Mineral chemistry and oxygen isotope insights from websterite xenoliths. *Gondwana Res*, 2013, 23: 119–129
- 7 周群君, 许文良, 杨德彬, 等. 再循环陆壳物质对岩石圈地幔的改造: 鲁西早白垩世高镁闪长岩中易剥橄榄岩捕虏体证据. *中国科学: 地球科学*, 2012, 55: 1972–1986
- 8 Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the tectonic affinity of the Jiaodong terrane in the Sulu orogen, China. *Precambrian Res*, 2008, 161: 389–418

- 9 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 2012, 328: 5–48
- 10 Zhang S B, Zheng Y F. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China. *Gondwana Res*, 2013, 23: 1241–1260
- 11 Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen. *Precambrian Res*, 2007, 152: 48–82
- 12 Jiang N, Chen J Z, Guo J H, et al. *In situ* zircon U-Pb, oxygen and hafnium isotopic compositions of Jurassic granites from the North China Craton: Evidence for Triassic subduction of continental crust and subsequent metamorphism-related ^{18}O depletion. *Lithos*, 2012, 142–143: 84–94
- 13 Yang D B, Xu W L, Wang Q H, et al. Chronology and geochemistry of Mesozoic granitoids in the Bengbu area, central China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern North China Craton. *Lithos*, 2010, 114: 200–216
- 14 Pei F P, Xu W L, Yang D B, et al. Geochronology and geochemistry of Mesozoic mafic-ultramafic complexes in the southern Liaoning and southern Jilin provinces, NE China: Constraints on the spatial extent of destruction of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2011, 40: 636–650
- 15 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 isotopic studies of Fangcheng basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 144: 241–253
- 16 Xu Y G, Ma J L, Huang X L, et al. Early Cretaceous gabbrioc complex from Yinan, Shandong Province: Petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton. *Int J Earth Sci*, 2004, 93: 1025–1041
- 17 Xu Y G, Huang X L, Ma J L. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 147: 750–767
- 18 杨德彬, 许文良, 高山, 等. 华北克拉通东部岩石圈地幔的多期改造: 鲁西纯橄岩捕虏体中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学证据. *科学通报*, 2012, 57: 438–447
- 19 Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, et al. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. *Earth Sci Rev*, 2011, 107: 342–374
- 20 Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J, et al. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Evidence from alkaline intrusives of Triassic age in the Sulu orogen. *Chem Geol*, 2012, 328: 70–88
- 21 Chen Y X, Zheng Y F, Hu Z. Synexhumation anatexis of ultrahigh-pressure metamorphic rocks: Petrological evidence from granitic gneiss in the Sulu orogen. *Lithos*, 2013, 156–159: 69–96
- 22 Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. Zircon Hf-O isotope evidence for crust-mantle interaction during continental deep subduction. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 308: 224–244
- 23 Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. The nature of orogenic lithospheric mantle: Geochemical constraints from postcollisional mafic-ultramafic rocks in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2012, 334: 99–121
- 24 Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. Zircon Hf-O isotope and wholerock geochemical constraints on origin of postcollisional mafic to felsic dykes in the Sulu orogen. *Lithos*, 2012, 136–139: 225–245
- 25 Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 270: 41–53
- 26 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