华北克拉通岩石圈地幔特征与演化过程

汤艳杰^{1,2*}, 英基丰^{1,2}, 赵月鹏^{1,2}, 许欣然^{1,2}

1. 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;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: tangyanjie@mail.igcas.ac.cn

收稿日期: 2020-10-29; 收修改稿日期: 2021-01-25; 接受日期: 2021-02-04; 网络版发表日期: 2021-03-25

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600109)和国家自然科学基金项目(批准号: 41725014、41688103)资助

摘要 克拉通能否长期稳定存在, 主要取决于岩石圈地幔的特征和属性. 中生代以来, 华北岩石圈地幔的组成和性质发生了根本性转变, 导致了克拉通破坏. 尽管目前取得了上述共识, 但是对岩石圈地幔转变形式与机制的认识仍然存在分歧. 本文以华北克拉通破坏前后岩石圈地幔的特征为视角, 对华北不同时代幔源岩石及地幔捕虏体的研究结果进行综述, 旨在为上述问题的讨论提供新的思路. 华北古生代岩石圈厚达200km, 具有高度难熔、Sr-Nd同位素富集的克拉通型岩石圈地幔特征; 中生代岩石圈地幔具有易熔、同位素高度富集的特征, 在空间上具有明显的不均一性和分布规律; 在新生代, 华北东部岩石圈厚约60~80km, 具有易熔、同位素亏损的大洋型岩石圈地幔特征; 中部带岩石圈厚度大于100km, 岩石圈地幔具有上老下新的双层结构; 西部岩石圈厚达200km, 仍然保存有克拉通型古老地幔. 岩石圈地幔组成的转变主要是通过橄榄岩-熔体反应的方式实现的. 古生代周边板块的多次俯冲作用使华北克拉通边缘地区岩石圈地幔的组成发生了明显改变. 中生代古太平洋板块俯冲作用的叠加, 促成华北东部岩石圈地幔组成和性质的根本转变, 导致克拉通破坏区域的面积占华北总面积的1/2以上. 从克拉通破坏的峰期时间和破坏区域空间展布来看, 古太平洋板块俯冲及其驱动的深部动力学过程是华北克拉通破坏的一级控制因素. 造成东部岩石圈巨厚减薄的主导因素是俯冲板块回转、海沟后撤引起的大陆岩石圈伸展. 俯冲板块机械侵蚀、熔流体交代作用造成的岩石圈弱化、非稳态地幔流动伴随的热-化学侵蚀和岩石圈局部拆沉共同加剧了岩石圈减薄和克拉通破坏的进程.

关键词 华北克拉通破坏, 岩石圈地幔, 捕虏体, 板块俯冲, 橄榄岩-熔体反应

1 引言

克拉通的演化是国内外地质学家多年来一直关注的重要科学问题. 克拉通是地球上古老且稳定的大陆构造单元, 它通常具有3大特征: 岩石圈厚达200km, 形成于前寒武纪, 构造稳定、没有大规模的岩浆和地

震活动. 然而越来越多的研究发现, 克拉通因遭受改造和破坏而失去稳定性, 即克拉通并非一成不变. 例如, 华北克拉通和北美怀俄明克拉通自中生代以来都受到了改造和破坏(Carlson等, 2005). 相比之下, 华北克拉通的破坏现象更为明显, 破坏程度更高. 因此, 华北克拉通业已成为固体地球科学研究的一大热点. 相

中文引用格式: 汤艳杰, 英基丰, 赵月鹏, 许欣然. 2021. 华北克拉通岩石圈地幔特征与演化过程. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1489–1503, doi: 10.1360/SSTe-2020-0303

英文引用格式: Tang Y, Ying J, Zhao Y, Xu X. 2021. Nature and secular evolution of the lithospheric mantle beneath the North China Craton. Science China Earth Sciences, 64(9): 1492–1503, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9737-4>

应的研究取得了突破性进展, 不仅认识到地表大规模的构造-岩浆活动、频繁发生的强烈地震和岩石圈巨厚减薄现象是华北克拉通破坏的表现形式, 而且将有关克拉通破坏规律的认识提升为大陆形成与演化理论: 克拉通破坏是全球大陆演化的重要环节, 其本质是岩石圈地幔属性的转变导致克拉通固有的稳定性遭到破坏, 洋-陆相互作用是克拉通破坏的动力学机制(朱日祥等, 2020).

克拉通能否长期稳定存在, 主要依赖于岩石圈地幔的特征和属性(Carlson等, 2005). 深部过程决定了克拉通的浅表地质特征, 因此克拉通演化的核心是深部岩石圈地幔的演化. 虽然华北克拉通破坏的研究取得了广泛共识, 但对于一些基本科学问题的认识, 目前仍然存在分歧. 例如, 华北岩石圈减薄、岩石圈地幔的转变形式、转变机制和过程究竟是什么? 前人基于不同的观测事实提出了诸多模型, 如热-机械侵蚀(Xu, 2001)、岩石圈拆沉(吴福元等, 2003; Gao等, 2004; Xu W L等, 2008)、岩石圈水化(Niu, 2005)、置换作用(Zheng等, 2001, 2007), 以及橄榄岩-熔体反应(Zhang, 2005)等. 虽然这些学术观点的分歧已存在多年(吴福元等, 2008), 但至今尚未达成共识. 如何客观地认识华北岩石圈地幔的特征与成因是摆在我们面前不容回避的科学问题. 本文将从古生代、中生代和新生代华北岩石圈地幔的组成特征出发, 通过综合对比现有的研究成果, 归纳岩石圈地幔的时空演化规律, 进一步探讨华北岩石圈地幔的演化过程, 以期对上述问题的解决提供借鉴与思考.

2 华北克拉通古生代岩石圈地幔特征

幔源岩浆所携带的地幔捕虏体是岩石圈地幔的直接样品, 被称为研究岩石圈地幔的探针, 能够提供岩石圈地幔特征和演化过程的直接信息. 华北广泛分布着不同时代的捕虏体(图1). 例如, 山东蒙阴和辽宁复县古生代含金刚石的金伯利岩中有丰富的地幔捕虏体, 为研究华北古生代岩石圈地幔组成特征提供了宝贵的样品.

华北古生代岩石圈地幔的形成年龄和组成信息可通过古生代金伯利岩中的橄榄岩和辉石岩捕虏体, 以及钙钛矿、金云母、斜锆石和铬铁矿等矿物获得. 山东蒙阴金伯利岩中金云母巨晶的Ar-Ar年龄为(465±2)Ma

(张宏福和杨岳衡, 2007), 钙钛矿的U-Th-Pb年龄为(470±4)Ma(Yang等, 2009), 蒙阴和复县金伯利岩中斜锆石的Pb-Pb年龄分别为(480.4±3.9)和(479.6±3.9)Ma(Li等, 2011), 说明蒙阴和复县金伯利岩形成于早奥陶世. 金伯利岩中地幔橄榄岩捕虏体的橄榄石 Fo 值为91~94(郑建平, 1999, 2009), 与全球其他典型克拉通(如南非、北美和西伯利亚克拉通)地幔橄榄岩具有较高的 Fo 值相一致(多数大于92, 图2)(Tang等, 2013b). 根据含金刚石的金伯利岩中地幔橄榄岩捕虏体的化学组成估算, 华北古生代具有厚达200km的岩石圈, 岩石圈地幔密度小, 主要由难熔的方辉橄榄岩(富Mg、贫Fe)构成, 具有较富集的Sr-Nd同位素组成(张宏福和杨岳衡, 2007); 金伯利岩中橄榄岩捕虏体(Gao等, 2002; Zhang H F等, 2008; Chu等, 2009)和铬铁矿重砂矿物(Wu等, 2006)的Re-Os同位素研究表明, 华北岩石圈地幔具有太古代的Re亏损年龄($T_{RD}>2.5$ Ga), 这与全球其他克拉通的特征相一致(图2). 因此, 华北在古生代仍然是一个典型的克拉通, 具有克拉通型岩石圈地幔.

3 华北克拉通晚中生代岩石圈地幔特征

华北中生代含橄榄岩捕虏体的寄主岩多为白垩纪玄武质火山岩和基性脉岩, 以及少量高镁闪长岩, 主要分布在华北南缘的信阳(Zheng等, 2007), 华北东部的胶州(Zhang等, 2011)、莒南(Ying等, 2006)、费县(张宏福, 2006)和莱芜(Chen和Zhou, 2005), 华北北缘的赤峰(张宏福, 2006)、阜新(许文良等, 1999; Zheng等, 2007)、狼山(Dai等, 2018), 以及中部太行山地区的符山(Xu等, 2010). 橄榄岩捕虏体中橄榄石的 Fo 值在87~93变化(许文良等, 1999; Chen和Zhou, 2005; Ying等, 2006; 张宏福, 2006; Zheng等, 2007; Xu等, 2010; Zhang等, 2011; Dai等, 2018), 大多数集中在90~92. 与古生代相比, 华北中生代地幔橄榄岩的 Fo 值明显降低, 说明中生代岩石圈地幔组成发生了变化: 由难熔(以高镁橄榄岩为主)转变为易熔(以低镁橄榄岩为主).

幔源岩石Sr-Nd同位素研究表明, 华北晚中生代岩石圈地幔总体具有富集的特征(图3), Sr-Nd同位素变化范围大, 在空间上表现为不均一, 并呈现出明显的分布规律(Zhang等, 2004; 朱日祥等, 2020). 最为明显的特征是东南缘晚中生代岩石圈地幔具有高度富集的类似于EM2型富集地幔的特征, 完全不同于古生代岩

图1 华北克拉通地幔捕虏体分布图

资料来源: 金伯利岩分布(路凤香等, 1995), 蒙阴、复县古生代金伯利岩的年龄(Li等, 2011). 中生代幔源岩石: 信阳(Zheng等, 2007)、方城(Zhang等, 2002)、莒南(Ying等, 2006)、胶州(Zhang等, 2011)、莱芜(陈立辉和周新华, 2003; Xu W L等, 2008)、赤峰(张宏福, 2006)、阜新(许文良等, 1999; Zheng等, 2007)、符山(Xu等, 2010)、狼山(Dai等, 2018). 新生代玄武岩: 华北东部地区女山(Xu等, 1998)、山旺(Zheng等, 1998)、昌乐(Xiao等, 2010)、栖霞(Fan和Hooper, 1989; Zheng等, 1998)、蓬莱(Fan等, 2000)、平泉(鄂莫岚和赵大升, 1987)、宽甸(Wu等, 2006)、龙岗、辉南(Xu等, 2003)、伊通(Xu等, 1996), 华北中西部地区鹤壁(Zheng等, 2001)、繁峙(Tang等, 2008)、大同、阳原(Xu等, 2004b)、汉诺坝(刘若新等, 1992)、围场(Zou等, 2016)、集宁(张文慧和韩宝福, 2006; 赵新苗等, 2007)、四子王旗(Wu等, 2017)

石圈地幔的组成. 华北古生代岩石圈地幔的 ϵ_{Nd} 为-1左右, 如果没有与外界发生物质交换, 其直接演化到早白垩世(~125Ma)方城玄武岩喷发时 ϵ_{Nd} 为-5左右, 远高于方城玄武岩地幔源区的 ϵ_{Nd} 值(-15左右, 图3). 这表明华北克拉通东南缘岩石圈地幔发生了明显的富集作用, 其成因与来自俯冲陆壳所产生的富Si熔体的交代作用有关(Zhang等, 2002).

华北中部太行山地区中生代辉长岩(Zhang等, 2004)、洪山碱性杂岩(Zhang等, 2005)、符山高镁闪长岩中的地幔橄榄岩捕虏体(Xu等, 2010), 以及鹤壁

(Tang等, 2013c)、繁峙(Tang等, 2008)和阳原(马金龙和徐义刚, 2004; Xu Y G等, 2008)新生代玄武岩中的地幔橄榄岩捕虏体具有类似于EM1型富集的Sr-Nd同位素组成(图3). 而且, 这些橄榄岩具有太古代的Re亏损年龄(Xu Y G等, 2008; Liu等, 2011), 表明华北中部晚中生代岩石圈地幔具有EM1型富集地幔的特征, 其成因可能是古老岩石圈地幔在早期(可能与古元古代华北克拉通东、西陆块拼合事件有关)受到了富Si熔体的交代作用, 富Si熔体可能来自再循环的古老地壳物质(Xu等, 2010; Tang等, 2014).

图2 华北克拉通古生代岩石圈地幔特征与其他典型克拉通的对比

(a) 地幔橄榄岩Re亏损年龄柱状图。(b) 橄榄岩捕虏体的 Fo 和 T_{RD} 图解。数据来源: 华北金伯利岩中的地幔橄榄岩捕虏体和铬铁矿巨晶(Gao等, 2002; Wu等, 2006; Zhang H F等, 2008; Chu等, 2009); 南非克拉通(Meisel等, 2001; Simon等, 2003, 2007; Griffin等, 2004); 北美克拉通(Carlson和Irvine, 1994; Irvine等, 2003; Carlson等, 2004); 西伯利亚克拉通(Pearson等, 1995)

华北北缘晚中生代岩石圈地幔同位素变化范围非常大, 显示混合型地幔特征(图3)。乌兰哈达地区出露的中生代高Mg安山岩具有EM1型同位素特征, 来源于古亚洲洋俯冲洋壳产生的熔体改造过的古老岩石圈地幔(Zhang等, 2003; Yang和Li, 2008)。辽西兴隆沟组高Mg安山岩具有岛弧型岩浆岩的同位素特征, 其 ϵ_{Nd} 值在0附近, 其成因与俯冲大洋地壳的熔融有关; 义县组

玄武岩的地球化学特征可能反映了富集的岩石圈地幔与拆沉的大陆下地壳来源的熔体混合作用的结果(Yang和Li, 2008)。新近的岩石学和地球化学研究表明, 来自地幔过渡带富含挥发分的物质交代改造了华北克拉通岩石圈地幔, 华北早白垩世高镁安山岩的形成与被改造的岩石圈地幔熔融有关, 地幔过渡带挥发分物质上涌改造岩石圈地幔的触发机制为古太平洋板块的

图3 华北中生代幔源岩石Sr-Nd同位素组成

数据来源: 沂南辉长岩(Xu等, 2004a), 铜石二长岩、沂南闪长岩、莱芜闪长岩(Xu等, 2004c), 邹平、济南基性岩(Guo等, 2001, 2003; Zhang等, 2004), 龙宝山、洪山碱性杂岩、铜石正长岩(Zhang等, 2005), 莱芜、淄博碳酸岩(Ying等, 2004; Zhang, 2009), 方城玄武岩(Zhang等, 2002), 碱锅玄武岩(Zhang等, 2003), 蒙阴钾玄岩(邱栓生等, 2001), 符山高镁闪长岩中地幔橄榄岩捕虏体(Xu等, 2010), 莱芜铁铜沟高镁闪长岩中地幔橄榄岩捕虏体(陈立辉和周新华, 2003; Xu W L等, 2008), 华北北缘狼山玄武岩(Dai等, 2019), 其他数据来源(Zhang等, 2004; Zhang, 2009; 朱日祥等, 2020及其参考文献)。图中灰色星号代表华北中部新生代玄武岩中的地幔橄榄岩捕虏体, 鹤壁(Tang等, 2013c)、繁峙和阳原(马金龙和徐义刚, 2004; Tang等, 2008, 2011; Xu Y G等, 2008)地区部分样品具有EM1型的同位素组成特征, 与中生代岩石圈地幔相似。

俯冲作用(Geng等, 2019)。

与古生代相比, 中生代华北克拉通东部集中出现了大规模的岩浆活动和强烈的构造变形。不同地区的岩石圈地幔不同程度地遭受了再循环的陆壳和洋壳释放的熔/流体的改造作用, 主体由古生代高度难熔的、以方辉橄榄岩为主的克拉通型转变为中生代易熔的、以二辉橄榄岩为主的富集型岩石圈地幔, 尤其是华北克拉通东南缘岩石圈地幔在晚中生代具有强烈富集的同位素组成(图3)。

4 华北克拉通新生代岩石圈地幔特征

华北新生代地幔橄榄岩捕虏体出露点主要沿着郯庐断裂带、太行山重力梯度带和华北北缘分布(图1)。

捕虏体中橄榄石Fo大多数位于88~93(图4), 最高Fo值(~93)出现在克拉通中部的河南鹤壁(Zheng等, 2001; Tang等, 2013c), 最低Fo值(~83)出现在东部郯庐断裂带内的昌乐(Xiao等, 2010, 2015)。华北东部地幔橄榄岩的Fo值明显低于古生代地幔橄榄岩的Fo值(多数>92, 图2), 表明华北东部新生代岩石圈地幔已由原来的克拉通型(以难熔的方辉橄榄岩为主, Fo>92)转变为大洋型(以饱满的二辉橄榄岩为主, Fo<91)。在郯庐断裂带地区熔体改造作用更加强烈, 因此断裂带内地幔橄榄岩的Fo值最低(Xiao等, 2010)。

华北新生代玄武岩所携带的地幔橄榄岩捕虏体Re亏损年龄 T_{RD} 的跨度非常大, 涵盖了从太古宙、元古宙一直到现今的年龄变化范围, 但绝大多数年龄集中分布在显生宙和元古宙(图4)。相比之下, 华北东部

图4 华北新生代玄武岩中地幔橄榄岩捕虏体的Re亏损年龄柱状图(a)和Fo值与 T_{Rd} 图解(b)

数据来源: 东部橄榄岩捕虏体(Gao等, 2002; Wu等, 2003, 2006; 支霞臣和秦协, 2004; Chu等, 2009; Xiao等, 2010; Liu等, 2015); 中西部橄榄岩捕虏体(Gao等, 2002; 夏琼霞等, 2004; Xu Y G等, 2008; Zhang H F等, 2009, 2012; Liu等, 2011); 中部橄榄岩中硫化物原位分析数据(Yu等, 2007; Zheng等, 2007; Xu X S等, 2008)

地幔橄榄岩比较年轻, 没有太古宙的年龄, 而华北中西部的橄榄岩具有太古宙的Re亏损年龄。中部带汉诺坝和鹤壁地区的橄榄岩中硫化物的原位同位素研究也得到了太古宙的Re亏损年龄(Yu等, 2007; Zheng等, 2007; Xu X S等, 2008)。因此, 橄榄岩的Re-Os同位素数据印证了由橄榄石Fo得出的结论, 即华北克拉通东部岩石圈地幔的组成发生了巨大转变, 而华北中西部仍在主

体上保存有古老岩石圈地幔的特征, 仅在克拉通的北缘(如四子王旗地区)的岩石圈地幔遭受到了与古亚洲洋俯冲有关的硅酸盐熔体的改造作用(Wu等, 2017)。

橄榄岩捕虏体的Nd同位素组成特征进一步佐证了上述认识。华北东部新生代玄武岩中的地幔橄榄岩具有亏损的Nd同位素组成($\epsilon_{Nd} > 0$, 绝大多数样品 $\epsilon_{Nd} > 5$; 图5), 而中西部地幔橄榄岩的Nd同位素组成既有亏损,

图5 华北克拉通新生代玄武岩中地幔橄榄岩 Al_2O_3 与Nd同位素组成的变化

数据来源: 华北东部橄榄岩捕虏体(Xu等, 1998; Fan等, 2000; Wu等, 2006; Chu等, 2009; Xiao等, 2010); 中西部橄榄岩捕虏体(Song和Frey, 1989; Tatsumoto等, 1992; Fan等, 2000; Rudnick等, 2004; 马金龙和徐义刚, 2006; Tang等, 2008, 2011; Xu Y G等, 2008; Zhang H F等, 2009, 2012); 古生代金伯利岩中的橄榄岩捕虏体(Zhang H F等, 2008; Chu等, 2009); 全球深海橄榄岩(Warren等, 2009; Khedr等, 2014; Warren, 2016)

也有富集, 其中最富集的样品 ϵ_{Nd} 约为 $-5 \sim -10$, 接近于古生代金伯利岩中橄榄岩捕虏体的Nd同位素组成。橄榄岩Nd同位素组成与 Al_2O_3 含量之间呈现一定的正相关性, 低 ϵ_{Nd} 的橄榄岩普遍含有较低的 Al_2O_3 , 高 ϵ_{Nd} 的样品普遍含有较高的 Al_2O_3 (图5)。这种现象可以用橄榄岩-熔体反应合理地解释(张宏福, 2009)。华北古老的地幔橄榄岩具有富集的Nd同位素组成, 在主量元素上具有难熔的特征(低 Al_2O_3)。古老的橄榄岩与来自软流圈的熔体反应, 一方面可以增加橄榄岩中 Al_2O_3 的含量, 使其由难熔向饱满转变, 另一方面, 软流圈的熔体具有高 ϵ_{Nd} 值, 熔岩作用的结果必然使古老地幔橄榄岩的 ϵ_{Nd} 升高, 从而接近正常地幔, 具有与绝大多数深海橄榄岩相似的同位素组成特征(图5)。华北东部地幔橄榄岩较高的 Al_2O_3 含量和 ϵ_{Nd} 表明它们经历了高程度的熔体改造, 因而具有大洋型地幔的某些特征(Tang等, 2013a)。而华北中西部岩石圈地幔遭受的改造作用较弱, 部分橄榄岩仍然具有古老的Re亏损年龄(图4)、低的 Al_2O_3 含量和富集的Nd同位素组成(图5)。

5 华北克拉通岩石圈地幔时空演化规律与机制

现有研究表明, 华北克拉通现今岩石圈厚度自西向东逐渐变薄, 岩石圈地幔性质由古老克拉通型逐渐过渡为改造型和年轻的大洋型。西部陆块仍有巨厚的岩石圈($\sim 200\text{km}$)(朱日祥等, 2012)和克拉通型地幔(图6)。西部陆块之所以能够保持稳定, 是因为巨厚、刚性的克拉通型岩石圈地幔的存在。东部陆块岩石圈厚度小于 80km , 几乎没有古老地幔的残留, 岩石圈地幔主要由饱满的二辉橄榄岩构成(Xu, 2001; Zheng等, 2001, 2005, 2006, 2007; Xu等, 2004b; Ying等, 2006; 郑建平, 2009), 相对年轻且具有亏损的Sr-Nd同位素组成(Xiao等, 2010), 因而具有大洋型地幔的特征。中部带太行山地区岩石圈厚度大于 100km , 有大量古老岩石圈地幔的残留, 同时也存在一些组成特征类似于大洋型岩石圈地幔的橄榄岩, 由于它们在年龄上主体较老, 考虑到华北中部岩石圈-软流圈的相互作用(Tang等,

2006, 2007), 推测它们是古老的地幔橄榄岩被软流圈熔体改造的产物, 并非新生的岩石圈地幔(Tang等, 2008, 2013b)。因此, 华北中部新生代岩石圈地幔具有双层特征, 上部为残留的古老地幔, 下部为改造型地幔(图6)。郑建平等(2020)通过地震学、重力学及地热学综合研究, 并结合深源岩石包体的研究成果, 进一步证实了华北岩石圈地幔的高度不均一性。

大量橄榄岩捕虏体Re亏损年龄数据显示, 华北东部新生代地幔橄榄岩绝大部分具有较为年轻的年龄, 仅有少量仍有较老的年龄(图4)。因此, 华北东部新生代岩石圈地幔主体为大洋型地幔。郅庐断裂带地区由

于熔体活动强烈, 新生的岩石圈地幔受到了熔体的进一步改造。自西向东, 地幔改造作用逐渐增强(图6)。华北东部地幔橄榄岩的Re亏损年龄跨度很大, 表明岩石圈地幔经历了不同程度的熔体改造作用。

自古生代以来, 华北克拉通经历了周边板块的多次俯冲(图7a)。早古生代古特提斯洋和扬子板块向北俯冲, 三叠纪扬子与华北克拉通之间俯冲碰撞形成了举世闻名的秦岭-大别超高压变质带(图7b), 俯冲的扬子陆壳物质造成了华北东南缘中生代岩石圈地幔高度富集的特征(Zhang等, 2002); 晚古生代古亚洲洋向南俯冲, 早中生代古亚洲洋闭合形成了巨型的中亚造山

图6 华北克拉通现今岩石圈结构特征剖面示意图

据朱日祥等(2020)修改, 底图为文登-阿拉善宽角反射/折射深地震测深剖面P波速度结构图(王帅军等, 2014)。岩石圈地幔组成参考文献: Xu, 2001; Zheng等, 2001, 2005, 2006, 2007; Xu等, 2004b; Ying等, 2006; Tang等, 2008, 2011, 2012, 2013a, 2013c; Zhang H F等, 2008, 2009, 2010; 张宏福, 2009; 郑建平, 2009; Xiao等, 2010, 2015; 郑建平等, 2020

图 7 华北克拉通岩石圈地幔演化与周边板块俯冲作用示意图

(a) 华北克拉通早古生代周边板块相对位置, 据郑永飞等(2018)修改; (b) 晚古生代-早中生代华北克拉通南缘和北缘受到相邻板块的俯冲作用 (Zhang等, 2003; Tang等, 2016; 唐杰等, 2018); (c) 早白垩世晚期华北岩石圈地幔改造与古太平洋板块俯冲作用示意图(Tang等, 2013a; 朱日祥等, 2015; 朱日祥和徐义刚, 2019); (d) 地幔过渡带速度结构(Huang和Zhao, 2006)

带, 并造成华北克拉通北缘中生代岩石圈地幔不同程度的富集(Zhang等, 2003).

中生代以来古太平洋板块的俯冲作用对华北克拉通乃至亚欧大陆东部都产生了深远的影响(图7c). 周边板块的俯冲/碰撞改变了华北克拉通边缘地区岩石圈地幔的组成和性质(Windley等, 2010). 高分辨率地震层析成像揭示, 滞留在地幔过渡带的古太平洋俯冲

板块从日本向西延伸大约1000km(图7d). 在早白垩世晚期, 随着俯冲板块回转和海沟后撤, 在华北克拉通东部形成一个大地幔楔, 俯冲板片所释放的熔流体随着软流圈的熔体一起上涌, 使上覆岩石圈地幔的物质组成、热状态和黏滞度等物理化学性质发生了根本性转变(图7c)(朱日祥等, 2012). 太平洋俯冲板片的物质记录已在华北东部中、新生代岩浆岩及其地幔捕虏体

中被广泛发现(Zhang J等, 2008; Zhang J J等, 2009; Tang等, 2012; Xu等, 2013; Xu, 2014; 朱日祥等, 2015; 郑永飞等, 2018; 朱日祥和徐义刚, 2019; 冯亚洲等, 2020).

综上所述, 古生代多期俯冲/碰撞事件改变了华北克拉通、北缘岩石圈地幔的物质组成, 为克拉通的破坏创造了有利条件. 中生代以来, 古太平洋板块俯冲作用的叠加, 加剧了地幔非稳态流动和地幔改造进程, 促成了华北东部岩石圈地幔组成和性质的根本转变; 俯冲板块回转和海沟后撤引起华北岩石圈的侧向伸展减薄(朱日祥等, 2012; 郑建平和戴宏坤, 2018; 郑永飞等, 2018; 朱日祥和徐义刚, 2019). 从克拉通破坏的峰期时间和破坏范围空间展布来看, 古太平洋板块的俯冲作用及其伴随的深部过程导致克拉通破坏的面积占华北总面积的1/2以上, 因此是华北克拉通破坏的一级控制因素. 造成岩石圈大规模减薄的主导因素是俯冲板块回转和海沟后撤引起的大陆岩石圈强烈伸展. 板块俯冲造成的机械侵蚀、大量熔流体与橄榄岩反应造成的岩石圈弱化、非稳态地幔流动伴随的热-化学侵蚀和局部拆沉作用共同加剧了华北东部岩石圈减薄和克拉通破坏的进程.

6 总结与展望

克拉通之所以能够长期稳定存在, 是因为它们具有巨厚、刚性的岩石圈地幔. 华北克拉通自古元古代形成以来长期保持稳定, 直到中生代华北岩石圈地幔的属性发生了重大转变, 东部原有的克拉通型岩石圈地幔转变为大洋型岩石圈. 华北克拉通失去了赖以稳定的刚性岩石圈地幔, 因而发生了破坏.

华北克拉通破坏的峰期为125Ma左右(朱日祥等, 2020). 如果华北岩石圈大规模减薄、地幔组成的转变主要是由于拆沉作用(岩石圈地幔连同下地壳一起拆沉)或置换作用(新生地幔置换古老地幔)所致, 那么现今华北东部岩石圈地幔主体应该具有125Ma以来的年龄. 然而, 华北新生代地幔橄榄岩的Re亏损年龄普遍大于250Ma(图4). 如果岩石圈减薄主要是由于热-机械侵蚀或水化作用所致, 那么新形成的地幔应该是年轻的, 残余地幔是老的, 这两种地幔在年龄上应该有明显的区别. 从目前积累的数据来看, 华北地幔橄榄岩Re亏损年龄具有连续性(图4). 因此, 上述模型预测的

结果与观测结果有较大的出入.

橄榄岩-熔体反应可以解释华北地幔橄榄岩Re亏损年龄的连续性. 由于改造华北岩石圈地幔的熔体具有多来源性(陆壳、洋壳、软流圈地幔), 而且改造过程有多个期次, 再加上熔体的规模和改造作用程度的不同, 造成了地幔橄榄岩元素和同位素组成的差异. 因此, 不同的熔体与橄榄岩反应分别造成了华北中生代高度不均一的地幔特征和新生代大洋型地幔特征. 关于熔体的性质和规模、不同来源的熔体与橄榄岩反应的期次与过程等科学问题亟待进一步研究.

华北岩石圈地幔的转变过程和橄榄岩Re亏损年龄的连续性表明橄榄岩-熔体反应贯穿板块俯冲作用的始终, 在岩石圈地幔转变过程中占据主导作用. 热-机械侵蚀、拆沉、置换和水化等作用形式均是前人基于观测证据的基础上提出来的, 而且都不能否认彼此的存在. 因此, 有理由相信上述5种方式都存在, 它们分别在板块俯冲的不同阶段发挥了重要的作用. 拆沉作用可能局限于克拉通的边缘和造山带等局部地区, 拆沉作用的触发机制目前还不清楚.

与全球古老克拉通相比, 华北克拉通遭受了最为明显的破坏, 这与华北所处的构造位置和周边板块的多期俯冲密不可分. 晚中生代古太平洋俯冲板块的回转、海沟后撤引起的大陆岩石圈强烈伸展是华北岩石圈巨厚减薄的主导因素, 这可能是华北区别于其他克拉通的独特之处.

致谢 感谢郑永飞院士、编委和两位审稿专家对本文提出的建设性意见.

参考文献

- 陈立辉, 周新华. 2003. 鲁西中生代闪长岩中的深源超镁铁质岩捕虏体及其富硅交代特征. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 734-744
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社. 1-490
- 冯亚洲, 杨进辉, 孙金凤, 张吉衡. 2020. 中生代古太平洋板块俯冲诱发华北克拉通破坏的物质记录. 中国科学: 地球科学, 50: 651-662
- 刘若新, 陈文奇, 孙建中, 李大明. 1992. 中国新生代火山岩的K-Ar年代与构造环境. 见: 刘若新, 编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社. 1-43
- 路凤香, 赵磊, 邓晋福, 郑建平. 1995. 华北地台金伯利岩岩浆活动时

- 代讨论. 岩石学报, 11: 365–374
- 马金龙, 徐义刚. 2004. 河北阳原和山西大同新生代玄武岩的岩石地球化学特征: 华北克拉通西部深部地质过程初探. 地球化学, 33: 75–88
- 马金龙, 徐义刚. 2006. 河北阳原幔源包体的Sr-Nd同位素特征指示华北克拉通中部存在EMI型古老富集地幔. 科学通报, 51: 1190–1196
- 邱检生, 徐夕生, 罗清华. 2001. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及源区示踪. 科学通报, 46: 1500–1508
- 唐杰, 许文良, 王枫, 葛文春. 2018. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录. 中国科学: 地球科学, 48: 549–583
- 王帅军, 王夫运, 张建狮, 嘉世旭, 张成科, 赵金仁, 刘宝峰. 2014. 华北克拉通岩石圈二维P波速度结构特征——文登-阿拉善左旗深地震测深剖面结果. 中国科学: 地球科学, 44: 2697–2708
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10: 51–60
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 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, 6: 1145–1174
- 夏琼霞, 支霞臣, 孟庆, 郑磊, 彭子成. 2004. 汉诺坝幔源橄榄岩包体的微量元素和Re-Os同位素地球化学: SCLM的性质和形成时代. 岩石学报, 20: 1215–1224
- 许文良, 郑常青, 王冬艳. 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其地质意义. 地质论评, 45: 444–449
- 张宏福. 2006. 复杂橄榄岩捕虏体: 反演岩石圈演化过程的罕见而重要的样品. 地球科学, 31: 31–37
- 张宏福. 2009. 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, 54: 2008–2026
- 张宏福, 杨岳衡. 2007. 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和Sr-Nd-Hf同位素地球化学特征. 岩石学报, 23: 285–294
- 张文慧, 韩宝福. 2006. 内蒙古集宁新生代玄武岩的K-Ar年代学和地球化学及其深部动力学意义. 岩石学报, 22: 1597–1607
- 赵新苗, 张宏福, 朱祥坤, 张文慧, 杨岳衡, 汤艳杰. 2007. 华北中、新生代岩石圈地幔的交代作用: 含金云母地幔岩提供的证据. 岩石学报, 23: 1281–1293
- 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. 126
- 郑建平. 2009. 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, 54: 1990–2007
- 郑建平, 戴宏坤. 2018. 西太平洋板块俯冲与后撤引起华北东部地幔置换并导致陆内盆-山耦合. 中国科学: 地球科学, 48: 436–456
- 郑建平, 夏冰, 戴宏坤, 马强. 2021. 地球物理观察和岩石包体约束华北岩石圈地幔结构、性质及过程. 中国科学: 地球科学, 51: 201–217
- 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 379–414
- 支霞臣, 秦协. 2004. 中国东部地幔橄榄岩捕虏体的Re-Os同位素地球化学: 岩石圈地幔的形成年龄和减薄作用的制约. 岩石学报, 20: 989–998
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 41: 583–592
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿. 中国科学: 地球科学, 45: 1153–1168
- 朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 49: 1346–1356
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42: 1135–1159
- 朱日祥, 朱光, 李建威, 等. 2020. 华北克拉通破坏. 北京: 科学出版社. 417
- Carlson R W, Irving A J. 1994. Depletion and enrichment history of subcontinental lithospheric mantle: An Os, Sr, Nd and Pb isotopic study of ultramafic xenoliths from the northwestern Wyoming Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 126: 457–472
- Carlson R W, Irving A J, Schulze D J, Hearn Jr. B C. 2004. Timing of Precambrian melt depletion and Phanerozoic refertilization events in the lithospheric mantle of the Wyoming Craton and adjacent Central Plains Orogen. *Lithos*, 77: 453–472
- Carlson R W, Pearson D G, James D E. 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Rev Geophys*, 43: RG1001
- Chen L H, Zhou X H. 2005. Subduction-related metasomatism in the thinning lithosphere: Evidence from a composite dunite-orthopyroxene xenolith entrained in Mesozoic Laiwu high-Mg diorite, North China Craton. *Geochem Geophys Geosyst*, 6: Q06008
- Chu Z Y, Wu F Y, Walker R J, Rudnick R L, Pitcher L, Puchtel I S, Yang Y H, Wilde S A. 2009. Temporal evolution of the lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton. *J Petrol*, 50: 1857–1898
- Dai H K, Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Xiong Q, Xu R, Su Y P, Ping X Q, Chen F K. 2019. Langshan basalts record recycled Paleo-Asian oceanic materials beneath the northwest North China Craton. *Chem Geol*, 524: 88–103
- Dai H K, Zheng J P, Xiong Q, Su Y P, Pan S K, Ping X Q, Zhou X. 2018. Fertile lithospheric mantle underlying ancient continental crust beneath the northwestern North China craton: Significant effect from the southward subduction of the Paleo-Asian Ocean. *GSA Bull*, 131: 3–20
- Fan Q C, Hooper P R. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherms. *J Petrol*, 30: 1117–1158
- Fan W M, Zhang H F, Baker J, Jarvis K E, Mason P R D, Menzies M A. 2000. On and off the north China craton: Where is the Archaean

- keel? *J Petrol*, 41: 933–950
- Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, McDonough W F, Liu Y S. 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, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897
- Geng X, Liu Y, Wang X C, Hu Z, Zhou L, Gao S. 2019. The role of Earth's deep volatile cycling in the generation of intracontinental high-Mg andesites: Implication for lithospheric thinning beneath the North China Craton. *J Geophys Res Solid Earth*, 124: 1305–1323
- Griffin W L, Graham S, O'Reilly S Y, Pearson N J. 2004. Lithosphere evolution beneath the Kaapvaal Craton: Re-Os systematics of sulfides in mantle-derived peridotites. *Chem Geol*, 208: 89–118
- Guo F, Fan W M, Wang Y J, Lin G. 2001. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China Block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. *Phys Chem Earth Part A-Solid Earth Geodesy*, 26: 759–771
- Guo F, Fan W M, Wang Y J, Lin G. 2003. Geochemistry of late mesozoic mafic magmatism in west Shandong Province, eastern China: Characterizing the lost lithospheric mantle beneath the North China Block. *Geochem J*, 37: 63–77
- Huang J, Zhao D. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J Geophys Res*, 111: B09305
- Irvine G J, Pearson D G, Kjarsgaard B A, Carlson R W, Kopylova M G, Dreibus G. 2003. A Re-Os isotope and PGE study of kimberlite-derived peridotite xenoliths from Somerset Island and a comparison to the Slave and Kaapvaal cratons. *Lithos*, 71: 461–488
- Khedr M Z, Arai S, Python M, Tamura A. 2014. Chemical variations of abyssal peridotites in the central Oman ophiolite: Evidence of oceanic mantle heterogeneity. *Gondwana Res*, 25: 1242–1262
- Li Q L, Wu F Y, Li X H, Qiu Z L, Liu Y, Yang Y H, Tang G Q. 2011. Precisely dating Paleozoic kimberlites in the North China Craton and Hf isotopic constraints on the evolution of the subcontinental lithospheric mantle. *Lithos*, 126: 127–134
- Liu J, Rudnick R L, Walker R J, Gao S, Wu F, Piccoli P M, Yuan H, Xu W, Xu Y G. 2011. Mapping lithospheric boundaries using Os isotopes of mantle xenoliths: An example from the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 75: 3881–3902
- Liu J, Rudnick R L, Walker R J, Xu W, Gao S, Wu F. 2015. Big insights from tiny peridotites: Evidence for persistence of Precambrian lithosphere beneath the eastern North China Craton. *Tectonophysics*, 650: 104–112
- Meisel T, Walker R J, Irving A J, Lorand J P. 2001. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: A global perspective. *Geochim Cosmochim Acta*, 65: 1311–1323
- Niu Y. 2005. Generation and evolution of basaltic magmas: Some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic-Cenozoic basaltic volcanism in eastern China. *Geol J Chin Univ*, 11: 9–46
- Pearson D G, Shirey S B, Carlson R W, Boyd F R, Pokhilenko N P, Shimizu N. 1995. Re-Os, Sm-Nd, and Rb-Sr isotope evidence for thick Archean lithospheric mantle beneath the Siberian craton modified by multistage metasomatism. *Geochim Cosmochim Acta*, 59: 959–977
- Rudnick R L, Gao S, Ling W L, Liu Y S, McDonough W F. 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton. *Lithos*, 77: 609–637
- Simon N S C, Carlson R W, Pearson D G, Davies G R. 2007. The origin and evolution of the Kaapvaal cratonic lithospheric mantle. *J Petrol*, 48: 589–625
- Simon N, Irvine G J, Davies G R, Pearson D G, Carlson R W. 2003. The origin of garnet and clinopyroxene in “depleted” Kaapvaal peridotites. *Lithos*, 71: 289–322
- Song Y, Frey F A. 1989. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, eastern China: Implications for subcontinental mantle heterogeneity. *Geochim Cosmochim Acta*, 53: 97–113
- Tang J, Xu W, Niu Y, Wang F, Ge W, Sorokin A A, Chekryzhov I Y. 2016. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous–Paleocene granitoids in the Sikhote-Alin Orogenic Belt: Petrogenesis and implications for the oblique subduction of the paleo-Pacific plate. *Lithos*, 266–267: 202–212
- Tang Y J, Zhang H F, Deloule E, Su B X, Ying J F, Santosh M, Xiao Y. 2014. Abnormal lithium isotope composition from the ancient lithospheric mantle beneath the North China Craton. *Sci Rep*, 4: 4274
- Tang Y J, Zhang H F, Deloule E, Su B X, Ying J F, Xiao Y, Hu Y. 2012. Slab-derived lithium isotopic signatures in mantle xenoliths from northeastern North China Craton. *Lithos*, 149: 79–90
- Tang Y J, Zhang H F, Nakamura E, Ying J F. 2011. 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. *Contrib Mineral Petrol*, 161: 845–861
- Tang Y J, Zhang H F, Santosh M, Ying J F. 2013a. Differential destruction of the North China Craton: A tectonic perspective. *J Asian Earth Sci*, 78: 71–82
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Su B X. 2013b. Widespread refertilization of cratonic and circum-cratonic lithospheric mantle. *Earth-Sci Rev*, 118: 45–68
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Su B X, Chu Z Y, Xiao Y, Zhao X M. 2013c. Highly heterogeneous lithospheric mantle beneath the Central Zone of the North China Craton evolved from Archean

- mantle through diverse melt refertilization. *Gondwana Res*, 23: 130–140
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Zhang J, Liu X M. 2008. Refertilization of ancient lithospheric mantle beneath the central North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. *Lithos*, 101: 435–452
- Tang Y J, Zhang H F, Nakamura E, Moriguti T, Kobayashi K, Ying J F. 2007. Lithium isotopic systematics of peridotite xenoliths from Hannuoba, North China Craton: Implications for melt-rock interaction in the considerably thinned lithospheric mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 71: 4327–4341
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. 2006. Asthenosphere-lithospheric mantle interaction in an extensional regime: Implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton. *Chem Geol*, 233: 309–327
- Tatsumoto M, Basu A R, Huang W K, Wang J W, Xie G H. 1992. Sr, Nd, and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of Eastern China: Enriched components EMI and EMII in subcontinental lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 113: 107–128
- Warren J M. 2016. Global variations in abyssal peridotite compositions. *Lithos*, 248–251: 193–219
- Warren J M, Shimizu N, Sakaguchi C, Dick H J B, Nakamura E. 2009. An assessment of upper mantle heterogeneity based on abyssal peridotite isotopic compositions. *J Geophys Res*, 114: B12203
- Windley B F, Maruyama S, Xiao W J. 2010. Delamination/thinning of sub-continental lithospheric mantle under Eastern China: The role of water and multiple subduction. *Am J Sci*, 310: 1250–1293
- Wu D, Liu Y, Chen C, Xu R, Ducea M N, Hu Z, Zong K. 2017. In-situ trace element and Sr isotopic compositions of mantle xenoliths constrain two-stage metasomatism beneath the northern North China Craton. *Lithos*, 288–289: 338–351
- Wu F Y, Walker R J, Ren X W, Sun D Y, Zhou X H. 2003. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. *Chem Geol*, 196: 107–129
- Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, Yuan H L, Yang J H. 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 70: 5013–5034
- Xiao Y, Zhang H F, Deloule E, Su B X, Tang Y J, Sakyi P A, Hu Y, Ying J F. 2015. Large lithium isotopic variations in minerals from peridotite xenoliths from the eastern North China Craton. *J Geol*, 123: 79–94
- Xiao Y, Zhang H F, Fan W M, Ying J F, Zhang J, Zhao X M, Su B X. 2010. Evolution of lithospheric mantle beneath the Tan-Lu fault zone, eastern North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. *Lithos*, 117: 229–246
- Xu R, Liu Y, Tong X, Hu Z, Zong K, Gao S. 2013. In-situ trace elements and Li and Sr isotopes in peridotite xenoliths from Kuandian, North China Craton: Insights into Pacific slab subduction-related mantle modification. *Chem Geol*, 354: 107–123
- Xu W, Yang D, Gao S, Pei F, Yu Y. 2010. 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. *Chem Geol*, 270: 257–273
- Xu W L, Hergt J M, Gao S, Pei F, Wang W, Yang D. 2008. 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*, 265: 123–137
- Xu X S, Griffin W L, O'Reilly S Y, Pearson N J, Geng H Y, Zheng J P. 2008. Re-Os isotopes of sulfides in mantle xenoliths from eastern China: Progressive modification of lithospheric mantle. *Lithos*, 102: 43–64
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhou X M, Huang X L. 1998. The nature of the Cenozoic lithosphere of Nushan, eastern China. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, Lee T Y, eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington: American Geophysical Union. 167–196
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Phys Chem Earth Part A-Solid Earth Geodesy*, 26: 747–757
- Xu Y G. 2014. Recycled oceanic crust in the source of 90–40 Ma basalts in North and Northeast China: Evidence, provenance and significance. *Geochim Cosmochim Acta*, 143: 49–67
- Xu Y G, Ma J L, Huang X L, Iizuka Y, Chung S L, Wang Y B, Wu X Y. 2004a. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province: Petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 93: 1025–1041
- Xu Y G, Blusztajn J, Ma J L, Suzuki K, Liu J F, Hart S R. 2008. Late Archean to Early Proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China craton: Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan and Fansi. *Lithos*, 102: 25–42
- Xu Y G, Chung S L, Ma J, Shi L. 2004b. Contrasting cenozoic lithospheric evolution and architecture in the western and Eastern Sino-Korean Craton: Constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths. *J Geol*, 112: 593–605
- Xu Y G, Huang X L, Ma J L, Wang Y B, Iizuka Y, Xu J F, Wang Q, Wu X Y. 2004c. 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*, 147: 750–767
- Xu Y G, Menzies M A, Thirlwall M F, Huang X L, Liu Y, Chen X M.

2003. "Reactive" harzburgites from Huinan, NE China: Products of the lithosphere-asthenosphere interaction during lithospheric thinning? *Geochim Cosmochim Acta*, 67: 487–505
- Xu Y G, Mercier J C C, Lin C, Shi L, Menzies M A, Ross J V, Harte B. 1996. K-rich glass-bearing wehrlite xenoliths from Yitong, north-eastern China: Petrological and chemical evidence for mantle metasomatism. *Contrib Mineral Petrol*, 125: 406–420
- Yang W, Li S G. 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102: 88–117
- Yang Y H, Wu F Y, Wilde S A, Liu X M, Zhang Y B, Xie L W, Yang J H. 2009. *In situ* perovskite Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Ordovician Mengyin kimberlites in the North China Craton. *Chem Geol*, 264: 24–42
- Ying J, Zhang H, Kita N, Morishita Y, Shimoda G. 2006. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Jūnan, Shandong Province, China. *Earth Planet Sci Lett*, 244: 622–638
- Ying J F, Zhou X H, Zhang H F. 2004. Geochemical and isotopic investigation of the Laiwu-Zibo carbonatites from western Shandong Province, China, and implications for their petrogenesis and enriched mantle source. *Lithos*, 75: 413–426
- Yu C M, Zheng J P, Griffin W L. 2007. *In situ* Re-Os isotope ages of sulfides in Hannuoba peridotitic xenoliths: Significance for the frequently-occurring mantle events beneath the North China Block. *Chin Sci Bull*, 52: 2847–2853
- Zhang H F. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. *Earth Planet Sci Lett*, 237: 768–780
- Zhang H F. 2009. Peridotite-melt interaction: A key point for the destruction of cratonic lithospheric mantle. *Sci Bull*, 54: 3417–3437
- Zhang H F, Deloule E, Tang Y J, Ying J F. 2010. Melt/rock interaction in remains of refertilized Archean lithospheric mantle in Jiaodong Peninsula, North China Craton: Li isotopic evidence. *Contrib Mineral Petrol*, 160: 261–277
- Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, Sun M, Zheng J P, Cai Y. 2008. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 155: 271–293
- Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, Sun M, Cai Y. 2009. Comprehensive refertilization of lithospheric mantle beneath the North China Craton: Further Os-Sr-Nd isotopic constraints. *J Geol Soc*, 166: 249–259
- Zhang H F, Sun M, Zhou M F, Fan W, Zhou X H, Zhai M G. 2004. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geol Mag*, 141: 55–62
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. 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: 241–254
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Ying J F. 2005. Geochemical constraints on the origin of Mesozoic alkaline intrusive complexes from the North China Craton and tectonic implications. *Lithos*, 81: 297–317
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M, Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochim Cosmochim Acta*, 67: 4373–4387
- Zhang H F, Sun Y L, Tang Y J, Xiao Y, Zhang W H, Zhao X M, Santosh M, Menzies M A. 2012. Melt-peridotite interaction in the Pre-Cambrian mantle beneath the western North China Craton: Petrology, geochemistry and Sr, Nd and Re isotopes. *Lithos*, 149: 100–114
- Zhang J, Zhang H F, Ying J F, Tang Y J, Niu L F. 2008. Contribution of subducted Pacific slab to Late Cretaceous mafic magmatism in Qingdao region, China: A petrological record. *Isl Arc*, 17: 231–241
- Zhang J, Zhang H F, Kita N, Shimoda G, Morishita Y, Ying J F, Tang Y J. 2011. 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. *Int Geol Rev*, 53: 182–211
- Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 110: 305–326
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yang J S, Li T F, Zhang M, Zhang R Y, Liou J G. 2006. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath eastern China. *J Petrol*, 47: 2233–2256
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yu C M, Zhang H F, Pearson N, Zhang M. 2007. 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*, 71: 5203–5225
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu F X, Zhang M. 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean craton, eastern China. *Int Geol Rev*, 40: 471–499
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu F X, Zhang M, Pearson N J.

2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 57: 43–66
- Zheng J P, Sun M, Zhou M F, Robinson P. 2005. 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
- Zou D, Zhang H, Hu Z, Santosh M. 2016. Complex metasomatism of lithospheric mantle by asthenosphere-derived melts: Evidence from peridotite xenoliths in Weichang at the northern margin of the North China Craton. *Lithos*, 264: 210–223

(责任编辑: 郑建平)