华北克拉通东部岩石圈地幔碳酸盐熔体交代作用与克拉通破坏

宗克清*, 刘勇胜

中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

* E-mail: kqzong@hotmail.com

收稿日期: 2017-06-30; 收修改稿日期: 2018-02-24; 接受日期: 2018-03-07; 网络版发表日期: 2018-04-11

国家重点研发计划重点专项项目(编号: 2016YFC0600103)、国家自然科学基金项目(批准号: 41530211、41473031)、国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2015CB856101)和地质过程与矿产资源国家重点实验室自主研究课题专项经费项目(编号: MSFGPMR01)资助

摘要 华北克拉通东部在早白垩世经历了显著的破坏作用, 不同性质熔/流体活动对岩石圈地幔的改造在克拉通破坏过程中起到了至关重要的作用. 碳酸盐熔体作为一种非常重要的地幔交代介质, 可以对岩石圈地幔的物理化学性质产生显著影响, 并在地幔橄榄岩的单斜辉石中留下独特的地球化学指纹(例如, 高Ca/Al、低Ti/Eu比值等), 为示踪地幔碳酸盐熔体交代作用提供了依据. 文章系统总结了华北克拉通破坏最为显著的东部地区岩石圈地幔经历碳酸盐熔体交代作用的时空变化规律, 揭示出三种不同类型的地幔碳酸盐熔体交代作用. 第一类碳酸盐熔体交代作用形成的单斜辉石具有异常高的Ca/Al比值(15~70)和富集的Sr同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.706\sim0.713$); 第二类碳酸盐熔体交代作用形成的单斜辉石具有相对较高的Ca/Al比值(5~18)和Sr同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.703\sim0.706$); 第三类碳酸盐熔体交代作用形成的单斜辉石具有略微偏高的Ca/Al比值(5~9)和低Sr同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.702\sim0.704$). 时间上, 华北克拉通东部苏鲁造山带及其邻区晚三叠世之前深部石榴石相和浅部尖晶石相岩石圈地幔均经历了第一类碳酸盐熔体交代作用的强烈改造, 这可能与携带碳酸盐岩的华南陆块向华北克拉通深俯冲过程中碳酸盐熔体-橄榄岩反应作用有关. 第一类碳酸盐熔体交代作用可以显著弱化岩石圈地幔的强度, 可能为华北克拉通东部岩石圈地幔的最终破坏提供了关键前提条件. 华北克拉通破坏峰期之后(晚白垩世-新生代)火山岩捕获的古老岩石圈地幔残余(全部为尖晶石相方辉橄榄岩)只记录了第二类碳酸盐熔体交代作用的改造, 表明那些经历了第一类碳酸盐熔体交代作用强烈改造的古老岩石圈地幔在克拉通破坏过程中并未保留下来, 已经被完全改造. 相比之下, 火山岩中的二辉橄榄岩地幔包体代表了克拉通破坏之后新生、饱满的岩石圈地幔, 其中只有部分样品记录了第二类或者第三类碳酸盐熔体交代作用的改造, 反映了克拉通破坏之后含有不同比例再循环地壳物质的软流圈来源碳酸盐熔体的改造作用. 空间上, 胶东及其邻区岩石圈地幔经历碳酸盐熔体交代作用的特征最明显, 这与该地区岩石圈地幔减薄和克拉通破坏最显著以及巨量金成矿的特征具有空间一致性. 所有这些特征表明碳酸盐熔体交代作用在华北克拉通岩石圈地幔改造、破坏和大规模金成矿过程中可能起到了至关重要的作用.

关键词 华北克拉通破坏, 碳酸盐熔体交代作用, 单斜辉石Ca/Al, 岩石圈地幔

中文引用格式: 宗克清, 刘勇胜. 2018. 华北克拉通东部岩石圈地幔碳酸盐熔体交代作用与克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 732–752, doi: [10.1360/N072017-00220](https://doi.org/10.1360/N072017-00220)

英文引用格式: Zong K Q, Liu Y S. 2018. Carbonate metasomatism in the lithospheric mantle: Implications for cratonic destruction in North China. Science China Earth Sciences, 61: 711–729, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9185-2>

1 引言

太古宙克拉通是大陆中密度最轻、最冷、具有 >200km 巨厚岩石圈根的区域, 也是地球上最稳定的地区, 大多数自太古宙以后无明显构造-岩浆-成矿活动, 现今也无明显地震活动(Sleep, 2003; Carlson等, 2005; Lee等, 2011). 然而, 华北克拉通却表现出与世界其他克拉通十分不同的特征. 一方面, 它保存有>38亿年的陆壳记录(Liu等, 1992)、自19~18亿年前形成统一的克拉通后至古生代长期保持相对稳定(Zhao等, 2001; Zhao和Zhai, 2013)、曾存在巨厚的岩石圈根(Gao等, 2002; Zhang H F等, 2008)等与其他克拉通共性的特征; 另一方面, 华北克拉通自中生代以来遭受了强烈的活化改造(陈国达, 1956; Zhang等, 2003; Gao等, 2004; Wu等, 2005), 发生了大规模的构造变形和岩浆活动, 形成了多种类型的陆内断陷盆地(Meng, 2003; Zhu G等, 2012), 伴随产生了大量金属矿产资源(Li等, 2012; 朱日祥等, 2015; Deng和Wang, 2016), 致使原有的克拉通结构和性质遭到明显破坏. 克拉通的破坏并非华北克拉通独有, 北美Wyoming克拉通自中元古代以来也发生了岩石圈减薄和破坏(Carlson等, 2005; Sleep, 2005; Lee等, 2011). 但是, 华北是全球古老克拉通遭受破坏最明显和最典型的地区, 是具有全球意义的大陆动力学现象, 已成为国际地球动力学界广泛关注的又一重大科学问题(朱日祥等, 2012).

通过多年来的研究, 前人对中国东部中、新生代岩石圈减薄-构造转折-大规模成矿作用的研究已经取得了大量成果, 深化了对克拉通破坏作用的时空分布、机制和驱动力等认识(朱日祥等, 2012). 目前, 华北克拉通破坏的峰期时间被认为是早白垩世(~125Ma)(Zhu R X等, 2012); 华北克拉通东部经历了显著的破坏作用, 中西部地区并没有被破坏, 还保留着克拉通整体稳定的属性; 西太平洋板块俯冲被认为是华北克拉通破坏的主要动力因素(朱日祥等, 2011, 2012). 华北克拉通破坏可能的化学动力学机制包括热-机械和化学侵蚀作用(Menzies等, 1993; Xu, 2001; Zheng等, 2001)、拆沉作用(Gao等, 2002, 2004, 2008; Deng等, 2004; Wu等, 2005; 高山等, 2009; Xu W L等, 2013)、橄榄岩-熔体相互作用(Liu等, 2005, 2008, 2010; Zhang, 2005; 张宏福, 2009)以及水化作用(Niu, 2005). 所有这些克拉通破坏机制模型可能并不相互排

斥, 或许它们只是发生在整个岩石圈破坏作用的不同阶段或者不同区域. 它们的共同之处是都涉及熔/流体-橄榄岩作用, 但熔/流体-橄榄岩作用所扮演的角色和熔/流体来源不同. 了解与岩石圈地幔改造和破坏有关的熔/流体的性质、来源及其空间分布特征, 可能是正确认识岩石圈破坏作用机制的有效手段.

Xia等(2013)通过对华北克拉通中生代费县玄武岩(125Ma)中单斜辉石斑晶含水量反演出地幔源区具有强烈水化的特征, 地幔中的水会导致岩石圈地幔强度显著降低. 数值模拟认为长期俯冲作用积累形成的富水地幔转换带和平卧板片的扰动, 可能是岩石圈减薄和克拉通破坏的前提(Wang Z S等, 2016). 张宏福(2009)强调橄榄岩-熔体相互作用是克拉通型岩石圈地幔能够被破坏之关键. 但是, 在静态干体系条件下硅酸盐熔体-橄榄岩反应边界容易形成斜方辉石富集带(Rapp等, 1999; 王超等, 2010; Zhang J F等, 2012; Wang等, 2013), 而含水体系下容易形成角闪石富集带(Gervasoni等, 2017), 因而硅酸盐熔体-橄榄岩反应是非常缓慢的自我抑制过程, 需要变形来驱动才有可能产生相对较大范围的熔体-橄榄岩反应(Zhang J F等, 2012).

相比硅酸盐熔体, 碳酸盐熔体具有低密度、低粘度和高反应活性, 被认为是地幔最有效的交代介质(Green和Wallace, 1988; Ionov等, 1993b; Yaxley等, 1998; Blundy和Dalton, 2000; Hammouda和Laporte, 2000; Grassi和Schmidt, 2011; Sokol等, 2016; Gervasoni等, 2017). Wang C等(2016)的实验研究结果表明俯冲碳酸盐岩产生的碳酸盐熔体可以对岩石圈地幔产生显著的破坏和改造作用. 通过板片俯冲作用可以将大量沉积碳酸盐岩带入地幔深部, 浅部板片脱碳反应只能带走一小部分碳酸盐岩(Yaxley和Green, 1994; Molina和Poli, 2000; Kerrick和Connolly, 2001; Dasgupta等, 2005; Liu Y S等, 2015; Chen C F等, 2016), 大量残余的碳酸盐岩将储存在地幔中或通过部分熔融作用形成碳酸盐熔体(Wallace和Green, 1988; Dasgupta等, 2005). 古生代以来, 古亚洲洋板片南向俯冲、古特提斯洋板片北向俯冲以及古太平洋板片西向俯冲对华北克拉通周缘进行了长时间、多期次的改造作用(Windley等, 2010). 俯冲板片可以携带大量沉积碳酸盐岩进入地幔深处(Liu Y S等, 2015; Chen C F等, 2016; Zhang等, 2017), 会诱发岩石圈地幔碳酸盐熔体交代改造作用, 这为华北克拉通破坏提供了可能的前提条件. 本文对

华北克拉通东部地区岩石圈地幔经历的碳酸盐熔体交代作用进行了系统总结, 探讨了地幔碳酸盐熔体交代作用与克拉通破坏的可能联系.

2 华北克拉通东部岩石圈地幔橄榄岩样品分布

华北克拉通东部早古生代(~470Ma)金伯利岩和侏罗纪-第四纪火山岩/侵入岩携带有不同类型的地幔橄榄岩包体, 苏鲁造山带出露有三叠纪侵位的造山带地幔橄榄岩地体(图1), 这为研究华北克拉通岩石圈地幔破坏前后的地幔属性和交代作用类型提供了丰富的样品(郑建平, 2009). 蒙阴、复县和铁岭金伯利岩中早古生代地幔橄榄岩包体(Gao等, 2002; Wu等, 2006; Zheng

等, 2006, 2007)以及苏鲁三叠纪地幔橄榄岩地体(Zheng等, 2005b, 2006; Yuan等, 2007; Zhang Z M等, 2011; Su等, 2016)均经历了蛇纹石化改造, 不容易恢复原岩类型, 但是整体具有古老、难熔的特征, Os同位素 T_{RD} 模式年龄为3.2~1.5Ga(图2), 代表了华北克拉通破坏前东部岩石圈地幔的组成. 4Ma鹤壁地幔橄榄岩包体主要由方辉橄榄岩组成, Os同位素 T_{RD} 模式年龄为3.0~1.8Ga, 具有古老、难熔的地幔属性(Zheng等, 2001, 2007; Sun等, 2012). 侏罗纪信阳和早白垩世铁铜沟地幔橄榄岩包体由难熔的方辉橄榄岩和/或纯橄岩组成(Zheng等, 2005a; Xu等, 2008), 代表了华北克拉通早白垩世峰期破坏之前的岩石圈地幔.

华北克拉通峰期破坏之后火山岩捕获的晚白垩世阜新(~100Ma)、青岛劈石口(86~78Ma)、莒南(67Ma),

图1 华北克拉通东部岩石圈地幔包体和地体分布图

新第三纪山旺(18Ma)、昌乐(19Ma)、栖霞(18~4Ma)、蓬莱(6~4Ma)以及第四纪辉南(<0.6Ma)、宽甸(<0.6Ma)和女山(<0.7Ma)地幔橄榄岩包体(图1)主要为二辉橄榄岩, 另有少量方辉橄榄岩. 由于这些二辉橄榄岩和方辉橄榄岩分别具有相对年轻和古老的Os同位素 T_{RD} 模式年龄(图2), 因此有理由认为火山岩中二辉橄榄岩地幔包体代表了华北克拉通东部新生、饱满的岩石圈地幔, 而方辉橄榄岩最有可能代表古老岩石圈地幔的残余. 朝鲜三叠纪(223Ma)金伯利岩和新第三纪(6.6Ma)玄武岩中的橄榄岩包体虽然没有详细的岩石学分类, 但是它们都具有新生、饱满岩石圈地幔的特征(Yang等, 2010).

3 岩石圈地幔隐性碳酸盐熔体交代作用的地球化学指标

火山岩携带的地幔橄榄岩包体以及造山带出露的地幔橄榄岩地体是对岩石圈地幔的直接取样, 是了解地幔交代作用的最佳研究对象(Bodinier等, 2003; Pearson等, 2003). 然而, 大部分岩石圈地幔交代作用属于隐性交代, 如果在橄榄岩中不能发现特征交代矿物, 只能通过单矿物地球化学特征予以识别. Rudnick等(1993)通过碳酸盐熔体与硅酸盐矿物分配系数的系统分析, 结合碳酸岩微量元素特征提出高La/Yb、Nb/La、Ca/Al、Zr/Hf和低Ti/Eu的特征是示踪地幔碳酸盐熔体交代作用有效的地球化学指标. Klemme等(1995)对微量元素在碳酸盐熔体和单斜辉石之间分配行为的高温高压实验研究表明Ti/Eu对地幔碳酸盐熔体交代作用最敏感. Coltorti等(1999)利用单斜辉石的(La/Yb)_N和Ti/Eu变化趋势较好区分出地幔碳酸盐熔体交代和硅酸盐熔体交代作用的差异, 这一微量元素判别图解得到了后续研究者的广泛引用(图3a). Coltorti等(1999)根据当时发表数据的统计认为记录碳酸盐熔体交代作用的单斜辉石一般具有(La/Yb)_N大于3~4和Ti/Eu小于1500的变化趋势. 但是需要明确这并不是一个绝对标准, 图3a显示部分典型碳酸盐熔体交代地幔橄榄岩中单斜辉石的Ti/Eu接近2000, (La/Yb)_N小于3. 因此不能用单斜辉石Ti/Eu和(La/Yb)_N的绝对值来判别碳酸盐熔体交代作用, 利用其变化趋势更合理(图3a). 虽然近些年随着微区原位分析测试技术的迅速发展, 可以利用该微量元素地球化学指标的变化趋势深入研究华北克

图2 华北克拉通东部古生代-新生代岩石圈地幔橄榄岩包体和地体的Os同位素 T_{RD} 模式年龄分布图

数据引自Gao等(2002)、Wu等(2006)、Yuan等(2007)、Zheng等(2007)、Chu等(2009)、Yang等(2010)、Sun等(2012)和Su等(2016)

拉通地幔碳酸盐熔体交代作用过程(Zheng等, 2007; Sun等, 2012; Deng等, 2017). 但是, 目前很多文献报道中缺少单矿物微量元素分析结果, 阻碍了利用微量元素地球化学指标系统评价华北克拉通东部岩石圈地幔碳酸盐熔体交代作用过程.

考虑到碳酸岩一般具有异常高的Ca/Al比值(Rudnick等, 1993), Ca和Al同时也是单斜辉石的化学计量元素, 单斜辉石的Ca/Al可能是示踪地幔碳酸盐熔体交代作用有效的主量元素地球化学指标. 本文系统收集了不同类型地幔橄榄岩高温高压实验和天然样品中的单斜辉石数据(图3b). 不含碳酸盐的地幔橄榄岩熔融实验中, 残余相(主要是二辉橄榄岩或者方辉橄榄岩)中单斜辉石的Ca/Al普遍小于5, Mg#小于92(图3b)(Baker和Stolper, 1994; Gaetani和Grove, 1998; Walter, 1998; Falloon等, 1999; Pickering-Witter和Johnston, 2000; Schwab和Johnston, 2001; Wasylenski等, 2003). 榴辉岩来源的高硅熔体与橄榄岩反应的实验中, 新生单斜辉石的Ca/Al和Mg#也在这个范围之内变化(王超等, 2010; Yaxley和Green, 1998)(图3b). 可是, 碳酸盐熔体-橄榄岩反应实验中(Dalton和Wood, 1993; Klemme等, 1995; Brey等, 2008; Sokol等, 2016; Gervasoni等, 2017), 单斜辉石具有Ca/Al>5的特征, 少数几个Ca/Al小于5的数据具有异常高的Mg#(>94)(图3b). 与之相对应, 经历碳酸盐熔体交代作用的天然地幔橄榄岩均具有单斜辉石Ca/Al>5的特征(图3b). 所以, 地幔橄榄岩

图3 地幔橄榄岩天然样品和高温高压实验样品中单斜辉石 $(La/Yb)_N$ 和 Ti/Eu (a)、以及 Ca/Al 和 $Mg\#$ (b)的变化关系

(a) 修改自Coltorti等(1999); 不含碳酸盐的橄榄岩熔融实验数据引自Walter(1998)、Gaetani和Grove(1998)、Pickering-Witter和Johnston(2000)、Falloon等(1999)、Baker和Stolper(1994)、Wasylenko等(2003)、Schwab和Johnston(2001), 只选择了熔融残余为二辉/方辉橄榄岩或者二辉橄榄岩的实验结果。硅质熔体与橄榄岩反应的实验数据来自王超等(2010)、Yaxley和Green(1998)。碳酸盐熔体-橄榄岩反应实验数据引自Dalton和Wood(1993)、Brey等(2008)、Klemme等(1995)、Sokol等(2016)、Gervasoni等(2017)。典型碳酸盐熔体交代的地幔橄榄岩数据引自Coltorti等(1999)、Yaxley等(1998)、Neumann等(2002)

中单斜辉石高 Ca/Al 比值(>5)是示踪碳酸盐熔体交代作用非常有效的微量元素地球化学指标。华北克拉通已经发表的地幔橄榄岩包体/地体文献普遍报道了单斜辉石微量元素成分。另外, 单斜辉石是地幔橄榄岩微量元素的主要载体, 具有高 Sr 、极低 Rb 含量的特征, 是 Sr 同位素整体和原位分析非常理想的矿物(Malarkey等, 2011; Tong等, 2016)。由于单斜辉石中 Rb/Sr 比值极低, 后期放射成因 Sr 积累导致的 Sr 同位素比值变化很小, 因此单斜辉石中的 Sr 同位素组成可以有效地反映其形成或者受交代改造介质的 Sr 同位素组成。本研究在系统数据收集的基础上, 综合考虑单斜辉石微量元素(Ca/Al 和 $Mg\#$)和微量元素(Ti/Eu 和 $(La/Yb)_N$)的地球化学指标, 以及 Sr 同位素组成特征(图4~6), 系统评价了华北克拉通破坏最为显著的东部地区岩石圈地幔所经历的碳酸盐熔体交代作用。

4 华北克拉通岩石圈地幔经历的广泛碳酸盐熔体交代作用

深部地幔存在碳酸盐熔体是岩石圈地幔经历碳酸盐熔体交代作用的必要条件, 它可以通过火成碳酸岩的形式喷发到地表, 或者在与橄榄岩反应的过程中被完全消耗掉, 并留下特征的岩石学和地球化学指纹。华北克拉通出露有十余处元古代和中生代的火成碳酸

岩, 其中元古代碳酸岩(包括内蒙古白云鄂博(1.3Ga)和丰镇(1.8~1.7Ga)、河北怀安(1.8Ga)以及河南方城(0.79Ga))的 $Sr-Nd$ 同位素组成相对亏损($^{87}Sr/^{86}Sr_{(t)}=0.7028\sim0.7031$; $\epsilon_{Nd(t)}=-1.2\sim-6.1$), 而中生代碳酸岩(包括河北涿鹿(239Ma)、河南嵩县(209Ma)、山西怀仁(229Ma)和临县(132Ma)、陕西华阴(205Ma)和洛南(221Ma)以及山东莱芜(124Ma))则具有富集的 $Sr-Nd$ 同位素组成($^{87}Sr/^{86}Sr_{(t)}=0.7043\sim0.7106$; $\epsilon_{Nd(t)}=-2.1\sim-18.2$) (阎国翰等, 2007), 这暗示中生代火成碳酸岩可能来自于富集地幔源区或者是再循环地壳物质。韩国洪川(Hongcheon)中生代(~230Ma)火成碳酸岩也具有富集特征($^{87}Sr/^{86}Sr_{(t)}=0.703\sim0.706$; $\epsilon_{Nd(t)}=-26$), Kim等(2016)认为这些中生代碳酸岩的富集特征反映了古老岩石圈地幔经历的富集事件。

Ying等(2004)认为山东莱芜-淄博中生代(124Ma)火成碳酸岩的富集特征可能与三叠纪华南陆块携带大陆地壳物质向华北克拉通的俯冲碰撞作用有关。最近, Chen C F等(2016)的研究工作揭示华北克拉通北缘晚第三纪汉诺坝玄武岩中侵位的碳酸岩具有沉积碳酸盐岩的地球化学特征, 是古亚洲洋板片携带沉积碳酸盐岩俯冲进入地幔深处的产物。Zhang等(2017)在华北北缘四子王旗东八号中新世玄武岩中发现了具有类似特征的碳酸盐熔体。华北克拉通北缘出露的地幔橄榄岩包体记录了与古亚洲洋板片携带沉积碳酸盐岩再循环

图 4 华北克拉通东部方辉橄辉岩包体和地体的岩石学分类(a)、单斜辉石 Ca/Al 与 Mg#(b), (e) 和 (La/Yb)_N 与 Ti/Eu(c), (f) 的变化关系, 以及单斜辉石 Ca/Al 随时间的演化关系(d)

除了蒙阴金伯利岩和信阳火山岩中的橄辉岩包体以及苏鲁橄辉岩包体, 由于蛇纹石化强烈没有矿物统计之外, 其他包体数据都有详细的矿物统计工作. 宽甸数据引自徐荣等(2013); 辉南数据引自Xu等(2003); 鹤壁数据引自Zheng等(2001); 蓬莱数据引自Chu等(2009); 栖霞数据引自Zheng等(1998); 青岛劈石口数据引自Zhang等(2009); 信阳数据引自Zheng等(2005a); 铁铜沟数据引自Xu等(2008), 周群等(2013); 李家屯数据引自Su等(2016); 东海的芝麻房、许沟和蒋庄数据引自Yang和Jahn(2000)、Zheng等(2005b, 2006)、Yuan等(2007)、Zhang Z M等(2011). South Africa克拉通数据引自Boyd等(2004)、Franz等(1996)、Gregoire(2003)、Gregoire等(2005)、Saltzer(2001)、Simon等(2003)、Stiefenhofer等(1997)、Whitehead等(2002); Greenland克拉通数据引自Bernstein等(1998)、Bizzarro和Stevenson(2003)、Hellebrand和Snow(2003)、Holm和Prägel(2006); Slave克拉通数据引自Aulbach等(2004)、Kopylova和Caro(2004)、McCammon和Kopylova(2004)、Menzies等(2004)、van Achterbergh等(2004)、Kopylova等(1999)、MacKenzie和Canil(1999)、Schmidberger和Francis(1999)、Shi等(1998)、Schmidberger等(2003)、Schmidberger和Francis(2001)、Peslier(2002)、Griffin等(1999); Siberian克拉通数据引自Ionov等(1993a, 2005a, 2005b, 2005c, 2006)、Ionov和Hofmann(1995)、Griffin等(1996)、Boyd等(1997)、Litasov等(2000)、Ionov(2004)、Griffin等(2005)、Sharygin等(2007); Australia克拉通数据引自Ghorbani和Middlemost(2000)、Bruce等(2000)、Powell等(2004)、Roach(2004)、Woodland等(2004)、Yaxley等(1997, 1998)、Eggins等(1998)、Varola等(1999)、Yaxley和Kamenetsky(1999); Wyoming克拉通数据引自Downes(2004)、Carter Hearn(2004)、Tanzania克拉通数据引自Dawson(2002)、Lee等(2000)

图 5 华北克拉通东部晚白垩世-第四纪地幔二辉/易剥橄榄岩包体的岩石学分类((a), (d))、单斜辉石 Ca/Al 与 $\text{Mg}\#$ ((b), (e))和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 与 Ti/Eu ((c), (f))的变化关系

阜新数据引自Zheng等(2007); 栖霞数据引自Zheng等(1998)、Xia等(2010); 昌乐数据引自Xiao等(2010)、Deng等(2017); 劈石口数据引自Zhang等(2009); 莒南数据引自Ying等(2006)、Zhang等(2009); 蓬莱数据引自Chu等(2009)、Xia等(2010); 宽甸数据引自Xu R等(2013)、徐荣等(2013); 辉南数据引自Xu等(2003); 女山数据引自Xu等(1998, 2000); 山旺数据引自Zheng等(1998)、Zheng等(2006)、Chu等(2009); 朝鲜金伯利岩中橄榄岩包体数据引自Yang等(2010)

有关的两阶段碳酸盐熔体交代作用(Chen等, 2017; Wu等, 2017). 中亚造山带中达里湖火成碳酸岩包体同样

具有沉积碳酸盐岩的元素和氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=20.7\sim 21.5$)地球化学特征, 并且含有超高压矿物金刚

图 6 华北克拉通东部岩石圈地幔包体和地幔中单斜辉石 Ca/Al 与 Sr 同位素(包括部分全岩)的变化关系(a)和(b)、宽甸二辉橄榄岩包体中单斜辉石 Sr 同位素与 Ti/Eu 和 Ca/Al 的变化关系((c)和(d))、山旺二辉橄榄岩包体中单斜辉石 Sr 同位素与 Ca/Al 的变化关系(e)和昌乐二辉橄榄岩(Type 2)中单斜辉石的 Sr 同位素剖面变化(f)

东海橄榄岩地体数据引自 Yang 和 Jahn(2000); 铁铜沟数据引自 Xu 等(2008)、周群君等(2013); 鹤壁数据引自 Sun 等(2012); 蓬莱数据引自 Chu 等(2009); 辉南数据引自 Xu 等(2003); 青岛劈石口数据引自 Zhang 等(2009); 昌乐数据引自 Xiao 等(2010)、Deng 等(2017); 昌南数据引自 Zhang 等(2009); 宽甸数据引自 Xu 等(2013); 女山数据引自 Xu 等(2000); 山旺数据引自 Chu 等(2009); 朝鲜数据引自 Yang 等(2010)

石, 这为古亚洲洋板俯冲过程中沉积碳酸盐岩被携带进入地幔深部提供了最直接的证据(Liu Y S 等,

2015)。不同时空条件下华北克拉通周缘与俯冲作用有关的碳酸盐熔体活动为碳酸盐熔体交代作用的广泛存

在提供了可能条件.

幔源玄武岩的元素和同位素地球化学特征也可以间接示踪地幔源区性质(Hofmann, 1997). 华北克拉通广泛分布有中-新生代玄武岩(Liu等, 2008; 郑永飞等, 2018). Zeng等(2010)通过详细的元素地球化学研究揭示山东新生代碱性玄武岩地幔源区可能主要为碳酸盐化橄榄岩. 山东杨庄新生代碱性玄武岩中橄榄石斑晶内的熔体包裹体含有高含量的 CH_4 等烃类、石墨和碳酸盐等矿物, 指示这些玄武岩地幔源区经历过显著碳酸盐化作用(刘芳等, 2015). 中国东部晚白垩世-新生代玄武岩具有轻的Mg同位素和重的Zn同位素组成特征, 这可能与西太平洋板片沉积碳酸盐岩俯冲再循环和地幔碳酸盐化作用有关(Yang W等, 2012; Liu等, 2016; Li等, 2017).

华北北缘三叠纪发育大规模碱性岩, 在成分上低硅富碱, 被认为是受交代的富集地幔低程度部分熔融形成(阎国翰等, 2001; Niu等, 2012; Yang J H等, 2012; Zhang S H等, 2012). 由于这些碱性岩具有壳源的微量元素和Sr-Nd同位素特征, 不同于软流圈地幔, 交代熔/流体可能来自于再循环的壳源物质(阎国翰等, 2002; Zhu等, 2017). 矾山碱性杂岩体中的碳酸岩脉和矿物粒间的原生方解石说明原始岩浆富 CO_2 (阎国翰等, 2007; Niu等, 2012). 碱性岩中早期结晶的单斜辉石具有极高的钙含量, 表明原始岩浆富集钙, 具有碳酸盐熔体交代地幔来源特征(Niu等, 2012; Hou等, 2015). 这些证据表明碱性岩的源区可能是受碳酸盐熔体交代的富集地幔, 与古亚洲洋俯冲对华北克拉通北缘的改造作用有关(Niu等, 2017).

地幔碳酸盐熔体显性交代过程中可以形成碳酸盐矿物(如方解石、白云石、菱镁矿等), 它们是鉴别地幔碳酸盐熔体交代作用的直接指示矿物(Yaxley等, 1991; Ionov等, 1993b, 1996; Rudnick等, 1993). 华北克拉通东部山东昌乐新生代玄武岩中的地幔橄榄岩包体(Xiao等, 2010; Deng等, 2017)以及中部造山带大同地区的橄榄岩包体(Wang C Y等, 2016)的粒间出现方解石脉体, 橄榄石和单斜辉石等矿物中可见碳酸盐矿物包裹体(Deng等, 2017). 由于碳酸盐熔体与斜方辉石反应容易形成单斜辉石(Dalton和Wood, 1993), 地幔碳酸盐熔体交代过程经常出现次生单斜辉石(Ionov等, 1993b; Coltorti等, 1999; Sun等, 2012). 因此, 地幔易剥橄榄岩(主要由橄榄石和单斜辉石组成)通常被认为是

碳酸盐熔体交代作用的极端产物(Yaxley等, 1991, 1998; Rudnick等, 1993; Neumann等, 2002). 这种交代成因易剥橄榄岩在华北克拉通东部山东昌乐新生代地幔包体(Xiao等, 2010)以及鲁西早白垩世高镁闪长岩携带的捕虏体中(周群君等, 2013)均有报道.

苏鲁三叠纪造山带地幔橄榄岩一般被认为是华南陆块向华北克拉通深俯冲-碰撞-折返过程中携带的华北克拉通古老岩石圈地幔碎片(Zheng等, 2006; Zhang R Y等, 2008, 2011; Su等, 2016). 菱镁矿和白云石是苏鲁造山带南部东海石榴石相地幔橄榄岩地体(芝麻房、许沟和蒋庄)中常见的副矿物, Zhang Z M等(2011)在蒋庄地幔橄榄岩中~225Ma变质锆石内发现了菱镁矿和二氧化碳流体包裹体. 苏鲁造山带北侧李家屯尖晶石相地幔橄榄岩地体中可见粒间白云石, Su等(2016)认为这些橄榄岩中细粒橄榄石和单斜辉石组成的脉体(类似于易剥橄榄岩的矿物组合)切穿粗粒斜方辉石斑晶的特征是地幔碳酸盐熔体交代作用的直接岩石学证据. 地幔碳酸盐熔体隐性交代作用会留下独特的地球化学指纹. Zheng等(2007)利用单斜辉石 $(\text{La/Yb})_N$ 和Ti/Eu地球化学指标揭示华北克拉通岩石圈地幔古生代和早中生代地幔橄榄岩普遍经历了碳酸盐熔体交代作用, 而晚中生代和新生代地幔橄榄岩包体记录了明显的硅酸盐熔体交代特征. 而本次工作综合单斜辉石主量元素(Ca/Al和Mg#)、微量元素 $((\text{La/Yb})_N$ 和Ti/Eu)和Sr同位素等地球化学指标(图4~6), 揭示出古生代-新生代华北克拉通东部岩石圈地幔经历了三种不同类型碳酸盐熔体交代作用改造, 并且具有一定的时空变化规律(详见下文).

5 华北克拉通东部岩石圈地幔碳酸盐熔体交代作用的时间变化

华北克拉通东部火山岩/侵入岩中方辉橄榄岩包体、三叠纪苏鲁造山带橄榄岩地体以及早古生代金伯利岩地幔包体和捕虏晶为代表的古老岩石圈地幔, 普遍具有碳酸盐熔体交代作用的记录, 其中单斜辉石具有高Ca/Al、Mg#、 $(\text{La/Yb})_N$ 和低Ti/Eu的特征(除了辉南)(图4). 辉南方辉橄榄岩中的单斜辉石具有显著高Ti/Eu比值的硅酸盐熔体交代特征(图4f), 这与玄武质熔体-橄榄岩反应成因模型一致(Xu等, 2003; 徐义刚等, 2003). 但是单斜辉石略高Ca/Al(4~8)的特征与辉

南地幔橄榄岩还经历了碳酸盐或富挥发份小体积熔体交代的结论吻合(徐义刚等, 2003). 这更进一步证明, 综合考虑单斜辉石主量元素Ca/Al和微量元素Ti/Eu等地球化学指标, 是示踪地幔碳酸盐熔体交代作用的有效手段.

值得注意的是三叠纪造山带地幔橄榄岩中的单斜辉石具有异常高的Ca/Al比值(中值=29)(第一类碳酸盐熔体交代作用), 明显高于古生代蒙阴以及全球典型克拉通岩石圈地幔橄榄岩中的单斜辉石Ca/Al比(中值分别为17和10)(图4b). 但侏罗纪-新生代火成岩中的古老岩石圈地幔包体除了早白垩世铁铜沟方辉橄榄岩和易剥橄榄岩具有第一类碳酸盐熔体交代作用的特征之外, 其他方辉橄榄岩包体中单斜辉石的Ca/Al比值显著降低(5~18), 但仍然落在典型碳酸盐熔体交代范围之内(第二类碳酸盐熔体交代作用)(图4e). 另外, 根据天然地幔碳酸盐熔体的地球化学特征(Rudnick等, 1993)以及地幔碳酸盐熔体元素分配的实验研究(Klemme等, 1995), 幔源岩浆可以继承其源区的地幔碳酸盐熔体交代特征, 比如高Ca/Al、 $(La/Yb)_N$ 和低Ti/Eu比值等(Zeng等, 2010). 胶东晚三叠世岩石圈地幔来源基性岩具有显著高Ca/Al、 $(La/Yb)_N$ 和低Ti/Eu比值的碳酸盐熔体交代特征, 而三叠纪以后基性岩的这一特征明显减弱(图7). 因此, 华北克拉通东部岩石圈地幔碳酸盐熔体交代作用的类型和介质在三叠纪发生了明显转变(图4d), 这与第一类碳酸盐熔体交代作用($^{87}Sr/^{86}Sr=0.706\sim0.713$)相对于第二类碳酸盐熔体交代作用($^{87}Sr/^{86}Sr=0.703\sim0.706$)具有更高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值的特征一致(图6a).

华北克拉通破坏峰期(~125Ma)之后, 阜新玄武岩(100Ma)中橄榄岩包体中的单斜辉石普遍具有高Ca/Al比值(>5)和低Mg#特征, 指示了一种不同类型的碳酸盐熔体交代作用(第三类碳酸盐熔体交代作用)(图5b); 第三纪昌乐玄武岩中的部分二辉橄榄岩同样记录了这种类型的碳酸盐熔体交代作用(Deng等, 2017)(图5b). 它们共同具有中等的Ti/Eu(~1000~3000)和略微高 $(La/Yb)_N$ 的特征, 位于典型碳酸盐熔体和硅酸盐熔体交代作用的过渡区域(图5c).

6 华北克拉通东部岩石圈地幔碳酸盐熔体交代作用的空间变化

一般来说如果岩石圈地幔减薄, 上涌的软流圈主要生成硅酸盐熔体, 因此在岩石圈地幔减薄过程中最有可能出现硅酸盐熔体交代(Xu等, 2003). 但是华北克拉通东部新生岩石圈地幔不仅叠加了碳酸盐熔体交代作用, 同时具有明显的空间变化. 二辉橄榄岩记录的第二类和第三类碳酸盐熔体交代作用主要集中在胶东地区, 向南北两侧减弱或者转变为硅酸盐熔体交代作用. 华北克拉通东部胶东及邻区栖霞、蓬莱、青岛、昌乐(Type1)和莒南部分二辉橄榄岩中的单斜辉石具有比较明显的第二类碳酸盐熔体交代作用的元素组成特征(即高Ca/Al和Mg#和低Ti/Eu比值)(图5b和c), 其Sr

图7 华北克拉通东部中-新生代基性岩的Ca/Al与Ti/Eu(a)以及 $(La/Yb)_N$ 与Ti/Eu(b)的变化关系

数据引自Dai等(2016)、Liu等(2008)和Zeng等(2010). 洋中脊玄武岩(MORB)数据引自Gale等(2013); 洋岛玄武岩(OIB)数据引自数据库网站<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>. 我们只选择高MgO(>7.5%)的数据进行对比分析

同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.703\sim0.705$)与方辉橄榄岩记录的第二类碳酸盐熔体交代作用特征($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.703\sim0.706$)一致(图6b)。山旺少部分二辉橄榄岩包体具有第三类碳酸盐熔体交代作用的特征(即高Ca/Al、低Mg#)(图5e和f), 大部分样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值与Ca/Al明显负相关(图6e), 暗示碳酸盐熔体交代介质可能来自非常亏损的软流圈地幔($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7023$)。Deng等(2017)在邻区昌乐二辉橄榄岩中也报道了类似的具有低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成(< 0.7024)特征的第三类碳酸盐熔体交代作用(图5b、6b和f)。而胶东青岛劈石口被第三类碳酸盐熔体交代作用改造的方辉橄榄岩和二辉橄榄岩中的单斜辉石(Ca/Al=4.1~6.0)均具有相对较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7033~0.7040)(图6b)(未发表资料)。远离胶东以北的宽甸新生代玄武岩中的二辉橄榄岩包体主要记录了硅酸盐熔体交代作用, 碳酸盐熔体交代作用的记录非常微弱, 而南部的女山新生代玄武岩中的二辉橄榄岩包体则没有发现碳酸盐熔体交代作用(图5e和f)。宽甸二辉橄榄岩中的单斜辉石低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值(0.7028~0.7042)的数据与Ti/Eu存在明显的正相关(图6c), 这与前人揭示硅酸盐熔体交代的结论一致(Xu R等, 2013)。一小部分宽甸二辉橄榄岩中的单斜辉石尽管具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7041~0.7055)和略微高的Ca/Al比值(图6d), 但同时具有相当高的Ti/Eu比值(> 4000), 而且Ti/Eu比值与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 没有相关性(图6c)。因此, 这些二辉橄榄岩所代表的岩石圈地幔可能只经历了低程度富 CO_2 硅酸盐熔体交代作用(图6d)。总之, 胶东及邻区以二辉橄榄岩为代表的新生岩石圈地幔经历了比较强烈的碳酸盐熔体交代作用改造, 这与该地区岩石圈地幔减薄最显著、软流圈来源熔体的规模较大以及巨量金成矿的特征具有空间一致性。

7 碳酸盐熔体交代作用与克拉通破坏和大规模金成矿的可能联系

华北克拉通东部在早白垩世短时间内发育有巨量岩浆活动(135~110Ma)(Wu等, 2005; Zhu R X等, 2012; Zhang等, 2014)、伸展构造(135~115Ma)(林伟等, 2013; Zhu等, 2015)和巨量金成矿(130~120Ma)(Yang等, 2003; Li等, 2012; 朱日祥等, 2015; 范宏瑞等, 2016)。Dai等(2016)通过对华北克拉通破坏最为显著的胶东地区幔源基性岩的研究, 认为华北克拉通在~121Ma完

成了从古老富集岩石圈地幔向新生亏损大洋型岩石圈地幔转变, 指示克拉通峰期破坏已经结束。由于华北克拉通破坏的时间和范围与西太平洋板块俯冲具有非常一致的时空关系, 因此古太平洋板块西向俯冲被认为是华北克拉通早白垩世破坏和巨量金成矿的主要动力因素(Sun等, 2007; 朱日祥等, 2011, 2012, 2015)。

古太平洋板块西向俯冲不只是对华北克拉通, 同时对东亚全区构造格局均产生了显著影响(Sun等, 2007; Yin, 2010; Dong等, 2015)。中国华南克拉通广泛分布有早白垩世与西太平洋板块俯冲有关的岩浆活动(Wang Y J等, 2013)和伸展构造(林伟等, 2013), 但依然保留克拉通整体稳定的特征, 也不发育胶东型/克拉通破坏型金矿(Deng和Wang, 2016)。这可能说明华北克拉通东部岩石圈地幔在早白垩世峰期破坏之前应该具有自己的独特性。华北克拉通北缘在晚古生代受到古亚洲洋板块俯冲作用改造, 发育有石炭纪-早二叠世(324~270Ma)岩浆活动和晚二叠世-三叠纪(262~236Ma)碱性岩(Zhu R X等, 2012); 三叠纪华南陆块向华北陆块的深俯冲作用对华北克拉通东南缘进行了改造, 产出晚三叠世(225~210Ma)后碰撞岩浆岩(Zhu R等, 2012)。朝鲜晚三叠世(223Ma)金伯利岩携带的橄榄岩包体具有新生岩石圈地幔的岩石地球化学特征, 说明华北克拉通东部岩石圈地幔在三叠纪可能已经经历了局部破坏(Yang等, 2010)。

华北克拉通周缘长时间、多期次板块俯冲作用(Windley等, 2010)势必会对岩石圈地幔的物理化学性质产生显著影响, 为克拉通最终破坏提供必要条件, 晚中生代古太平洋板块西向俯冲为华北克拉通在早白垩世破坏提供了最后的驱动力。一方面板片俯冲带来的水可以弱化克拉通岩石圈地幔强度(Niu, 2005; Windley等, 2010; Xia等, 2013), 同时与板块俯冲有关的壳-幔物质循环和熔体-橄榄岩反应可以显著改变岩石圈地幔的岩石学和物理化学性质(Liu等, 2005, 2010)。低粘度和低密度的碳酸盐熔体容易与地幔橄榄岩反应消耗斜方辉石(Russell等, 2012; Kamenetsky和Yaxley, 2015), 从而改变岩石圈地幔的物质组成和结构。Wang C等(2016)的高温高压实验研究结果表明碳酸盐熔体可以在方辉橄榄岩颗粒边界快速渗透和反应, 形成筛状反应结构, 弱化岩石圈地幔强度, 易于减薄和破坏。

华北克拉通东部苏鲁造山带及邻区晚三叠世之前

的岩石圈地幔中单斜辉石具有异常高的Ca/Al比值(高达70), 显著高于全球克拉通地幔橄榄岩中单斜辉石的Ca/Al比值(图4b), 指示了非常强烈的碳酸盐熔体-橄榄岩反应改造作用, 这是华北克拉通破坏之前岩石圈地幔所具有的独特性. ~240Ma胶东李家屯地幔橄榄岩中斜方辉石斑晶被碳酸盐熔体渗透切穿, 并反应形成了细粒橄榄石和单斜辉石脉体(单斜辉石Ca/Al=47~63)(Su等, 2016), 这是华北克拉通东部岩石圈地幔被早期碳酸盐熔体交代作用强烈改造最直接的岩石学证据. 一般认为碳酸盐熔体在上地幔只有在较深部位(比如厚的岩石圈地幔之下的软流圈地幔)稳定存在. 但是值得注意的是第一类碳酸盐熔体交代作用在东海石榴石相和李家屯尖晶石相橄榄岩中都有记录, 说明晚三叠世之前华北克拉通东部苏鲁造山带及邻区深部和浅部岩石圈地幔均受到以异常高Ca/Al比值为特征的强烈第一类碳酸盐熔体交代作用改造. 该期碳酸盐熔体交代作用在华北克拉通峰期破坏(~125Ma)之前的铁铜沟地幔橄榄岩包体(~130Ma)中还可以观察到(图4b和d), 但是在克拉通峰期破坏之后的大量地幔包体中没有任何记录, 只保留有第二类和第三类碳酸盐熔体交代作用改造的信息(图4d、e和图5b、e). 这种变化以及和全球其他克拉通地幔橄榄岩的差异指示第一类碳酸盐熔体交代作用可能是华北克拉通东部岩石圈地幔在早白垩世全球地幔增温(Machetel和Humler, 2003)和西太平洋板块后撤诱发不稳定地幔对流(朱日祥等, 2011)背景下能够发生显著破坏的关键前提条件.

华北胶东地区是中国非常重要的金矿集区, 胶东金矿集区在不到1%的国土面积里蕴藏着全国超过1/4的金储量, 该矿集区在空间上与地幔具有强碳酸盐熔体交代的区域一致(图1). 胶东金矿床集中形成于早白垩世(130~120Ma), 具有爆发性成矿的特点, 成矿时代与克拉通破坏峰期一致, 成矿流体主要源于岩浆或地幔脱挥发分, 这与世界其他克拉通内造山型金矿床显著不同(Yang等, 2003; Li等, 2012; 朱日祥等, 2015; Deng和Wang, 2016; 范宏瑞等, 2016). D-O-C-S稳定同位素组成研究表明胶东金矿集区成矿热液主要来自于富集的岩石圈地幔(Mao等, 2008). 另外, 胶东金矿集区还发育大量同期煌斑岩脉, 碳酸盐是其中的常见矿物(孙景贵等, 2001; Guo等, 2004; Yang等, 2004; Ma等, 2016), 具有上地幔C-O同位素特征(孙景贵等, 2001). 对金矿床中流体包裹体的研究表明金成矿流体具有早

期富含CO₂、主期含少量CO₂、晚期基本不含CO₂的特征(Fan等, 2003). 金在地幔中主要受硫化物控制(Li和Audétat, 2012; Lorand和Luguet, 2016; Jenner, 2017), 再循环地壳来源的碳酸盐熔体可以产生相对较氧化的环境而破坏硫化物在地幔中的稳定性, 从而释放金、硫等元素(活化作用). 另外, CO₂富集的环境可以产生相对偏酸性的体系而利于金的迁移(Phillips和Evans, 2004). 所以, 这些特征暗示碳酸盐熔体交代作用在华北克拉通东部岩石圈地幔金活化、迁移富集和成矿过程中可能扮演了非常重要的角色.

8 碳酸盐熔体交代作用中熔体的可能来源

第一类碳酸盐熔体交代作用具有高Sr同位素组成的特征(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.706~0.713)(图6a), 其交代介质具有高Ca/Al比值和CO₂含量、显著低SiO₂和Al₂O₃含量的特征, 与碳酸盐石榴辉岩部分熔融产生的碳酸盐熔体成分类似(图8). 三叠纪华南陆块向华北克拉通深俯冲过程中携带的含碳酸盐地壳物质熔融可能是山东莱芜-淄博中生代(124Ma)碳酸岩(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.7095~0.7106)的可能来源(Ying等, 2004). 华南陆块向华北克拉通深俯冲可达200km(Ye等, 2000), 大陆深俯冲过程中的壳-幔相互作用产生的交代富集地幔是后碰撞基性岩的主要源区(Zhao等, 2013). 华北克拉通东部胶东地区晚三叠世(210~201Ma)和早白垩世(133~111Ma)具有再循环大陆地壳物质的后碰撞基性岩的Sr同位素组成(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.706~0.714)(Dai等, 2016)与第一类碳酸盐熔体交代作用改造的橄榄岩Sr同位素(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.706~0.713)(图6a)组成一致. 其中晚三叠世富集岩石圈地幔来源的基性岩具有显著高Ca/Al、(La/Yb)_N和低Ti/Eu比值的碳酸盐熔体交代特征(图7). 华南陆块北缘从新元古代至古生代发育有巨厚碳酸盐岩沉积(郑和荣和胡宗全, 2010), 在大别-苏鲁造山带中出露有大理岩和碳酸盐石榴辉岩(Proyer等, 2013; Liu P L等, 2015; Chen Y X等, 2016). 这些碳酸盐岩在华南陆块向华北克拉通深俯冲过程中完全有可能被大量带入深部地幔, 而引起地幔碳酸盐熔体交代作用. 因此, 对华北克拉通东部岩石圈地幔早期产生显著改造的第一类碳酸盐熔体交代作用很可能主要是三叠纪华南陆块向华北克拉通大陆深俯冲作用的结果, 为华北克拉通东部岩石圈地幔的最终破坏提供了关键前提条件.

图8 碳酸盐化榴辉岩和橄榄岩部分熔融产生的碳酸盐熔体中CO₂含量与SiO₂含量(a)和Ca/Al比值(b), 以及Ca/Al比值与SiO₂含量和Al₂O₃含量的变化关系(c), (d)

碳酸盐化榴辉岩部分熔融数据来自Dasgupta等(2005)、Hammouda(2003)、Yaxley和Brey(2004); 碳酸盐化橄榄岩部分熔融数据来自Dasgupta等(2013)、Sokol等(2016)、Brey等(2008)、Klemme等(1995)、Gervasoni等(2017)、Dasgupta等(2007)、Kruk等(2016)、Dalton和Wood(1993); 洋中脊玄武岩(MORB)数据引自Gale等(2013); 洋岛玄武岩(OIB)数据引自数据库网站<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>

与晚期第二类 and 第三类碳酸盐熔体交代作用有关的单斜辉石Ca/Al比值显著降低(图4d、e和图5b、e), 而碳酸盐熔体的Ca/Al比值与CO₂含量正相关、与SiO₂含量负相关(图8b和c), 暗示引起这两类晚期碳酸盐交代作用的交代介质可能具有相对高SiO₂、低CO₂含量的特征。第三类碳酸盐熔体交代作用同时具有相对高Ti/Eu的硅酸盐熔体交代特征(图5c和f)。整体具有相对较低、变化范围较大的Sr同位素组成特征(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.7022~0.7056)一方面可能指示了克拉通破坏之后软流圈来源物质的加入, 同时也反映了不同比例再循环地壳物质的贡献。这在昌乐二辉橄榄岩地幔包体的研究中得到了验证, 其中高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值(>0.7035)的单斜辉石反映了深俯冲再循环洋壳来源碳酸盐熔体交代作用; 而低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值(<0.7024)的单斜辉石则记录了软流圈来源碳酸盐熔体的改造(Deng等, 2017)。另外, 华北克拉通东部软流圈地幔起源的新生代玄武岩具有

明显再循环地壳来源碳酸盐熔体组分贡献的元素和Mg-Zn同位素地球化学特征(Zeng等, 2010; Yang W等, 2012; Liu等, 2016; Li等, 2017)。因此, 第二类和第三类碳酸盐熔体交代作用可能反映了克拉通破坏之后含有不同比例再循环地壳物质的软流圈来源碳酸盐熔体对华北克拉通东部岩石圈地幔的改造作用。

9 结论

(1) 综合考虑单斜辉石主量元素(Ca/Al和Mg#)、微量元素((La/Yb)_N和Ti/Eu)以及Sr同位素等地球化学指标是示踪地幔碳酸盐熔体交代作用的有效手段。

(2) 华北克拉通东部岩石圈地幔经历了三类碳酸盐熔体交代作用。晚三叠世之前以再循环大陆地壳物质来源富CO₂、低Si和Al含量、高Ca/Al比值为特征的碳酸盐熔体-橄榄岩反应(第一类碳酸盐熔体交代作用)

是华北克拉通东部岩石圈地幔能够被破坏的重要前提条件。而第二类和第三类碳酸盐熔体交代作用反映了克拉通破坏之后含有不同比例再循环地壳物质的软流圈来源碳酸盐熔体对华北克拉通东部岩石圈地幔的改造。

(3) 华北克拉通东部岩石圈地幔经历碳酸盐熔体交代作用最强烈的地区与胶东巨量金成矿在空间上一致, 暗示碳酸盐熔体交代作用在华北克拉通大规模金成矿过程中可能扮演了重要角色。

致谢 感谢三位匿名审稿人给予的意见和建议, 感谢论文撰写过程中与章军锋博士、王超博士、邓晓东博士、汪在聪博士、徐荣博士、陈唯博士、郭京梁博士、李占柯博士和续海金博士的讨论, 感谢刘洋、程怀和张鲁也同学在数据收集过程中给予的帮助。

参考文献

- 陈国达. 1956. 中国地台“活化区”的实例并着重讨论华夏古陆问题. 地质学报, 36: 239–272
- 范宏瑞, 冯凯, 李兴辉, 胡芳芳, 杨奎峰. 2016. 胶东-朝鲜半岛中生代金成矿作用. 岩石学报, 32: 3225–3238
- 高山, 章军锋, 许文良, 刘勇胜. 2009. 拆沉作用与华北克拉通破坏. 科学通报, 54: 1962–1973
- 林伟, 王军, 刘飞, 冀文斌, 王清晨. 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论. 岩石学报, 29: 1791–1810
- 刘芳, 宗克清, 刘勇胜, 胡兆初, 朱律运, 徐荣. 2015. 中国东部新生代碱性玄武岩橄榄石斑晶中含 CH_4 熔体包裹体的发现及其地质意义. 科学通报, 60: 1310–1319
- 孙景贵, 胡受奚, 沈昆, 姚凤良. 2001. 胶东金矿区矿田体系中基性-中酸性脉岩的碳、氧同位素地球化学研究. 岩石矿物学杂志, 20: 47–56
- 王超, 金振民, 高山, 章军锋, 郑曙. 2010. 华北克拉通岩石圈破坏的榴辉岩熔体-橄榄岩反应机制: 实验约束. 中国科学: 地球科学, 40: 541–555
- 徐荣, 刘勇胜, 宗克清, 邹东雅, 邓黎旭, 童喜润, 胡兆初, 高山. 2013. 宽甸橄榄岩包体微区地球化学特征及其岩石圈地幔演化. 岩石矿物学杂志, 32: 613–636
- 徐义刚, 黄小龙, Thirlwall M F, 陈小明. 2003. 吉林辉南“反应”成因方辉橄榄岩包体及其深部动力学意义. 岩石学报, 19: 19–26
- 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善, 蔡剑辉, 任康绪, 李凤棠. 2007. 华北克拉通火成碳酸岩时空分布和锆钨同位素特征及其地质意义. 高校地质学报, 13: 463–473
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 何国琦, 韩宝福, 王式洸, 童英, 任康绪, 杨斌, 洪大卫, 乔广生, 许荣华, 张任祐, 储著银. 2002. 中国北方显生宙富碱侵入岩年代学和Nd、Sr、Pb同位素特征及其意义. 地质评论, 48: 69–76
- 阎国翰, 谭林坤, 许保良, 牟保磊, 邵宏翔, 陈廷礼, 童英, 任康绪, 杨斌. 2001. 阴山地区印支期碱性侵入岩岩石地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 20: 281–292
- 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
- 郑和荣, 胡宗全. 2010. 中国前中生代构造-岩相古地理图集. 北京: 地质出版社
- 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: 1–36, doi: 10.1360/N072017-00235
- 周群君, 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 王微, 袁洪林, 高山. 2013. 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异剥橄榄岩捕虏体证据. 中国科学: 地球科学, 43: 1179–1194
- 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. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学: 地球科学, 45: 1153–1168
- 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
- Aulbach S, Griffin W L, O'Reilly S Y, McCandless T E. 2004. Genesis and evolution of the lithospheric mantle beneath the Buffalo Head Terrane, Alberta (Canada). *Lithos*, 77: 413–451
- Baker M B, Stolper E M. 1994. Determining the composition of high-pressure mantle melts using diamond aggregates. *Geochim Cosmochim Acta*, 58: 2811–2827
- Bernstein S, Kelemen P B, Brooks C K. 1998. Depleted spinel harzburgite xenoliths in Tertiary dykes from East Greenland: Restites from high degree melting. *Earth Planet Sci Lett*, 154: 221–235
- Bizzarro M, Stevenson R K. 2003. Major element composition of the lithospheric mantle under the North Atlantic craton: Evidence from peridotite xenoliths of the Sarfartoq area, southwestern Greenland. *Contrib Mineral Petrol*, 146: 223–240
- Blundy J, Dalton J. 2000. Experimental comparison of trace element partitioning between clinopyroxene and melt in carbonate and silicate systems, and implications for mantle metasomatism. *Contrib Mineral Petrol*, 139: 356–371
- Bodinier J L, Godard M, Heinrich D H, Karl K T. 2003. Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites. *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier-Pergamon. 103–170
- Boyd F R, Pearson D G, Hoal K O, Hoal B G, Nixon P H, Kingston M

- J, Mertzman S A. 2004. Garnet lherzolites from Louwrensia, Namibia: Bulk composition and *P/T* relations. *Lithos*, 77: 573–592
- Boyd F R, Pokhilenko N P, Pearson D G, Mertzman S A, Sobolev N V, Finger L W. 1997. Composition of the Siberian cratonic mantle: Evidence from Udachnaya peridotite xenoliths. *Contrib Mineral Petrol*, 128: 228–246
- Brey G P, Bulatov V K, Gurnis A V, Lahaye Y. 2008. Experimental melting of carbonated peridotite at 6–10 GPa. *J Petrol*, 49: 797–821
- Bruce M C, Niu Y, Harbort T A, Holcombe R J. 2000. Petrological, geochemical and geochronological evidence for a Neoproterozoic ocean basin recorded in the Marlborough terrane of the northern New England Fold Belt. *Aust J Earth Sci*, 47: 1053–1064
- Carlson R W, Pearson D G, James D E. 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Rev Geophys*, 43: RG1001
- Carter Hearn Jr B. 2004. The Homestead kimberlite, central Montana, USA: Mineralogy, xenocrysts, and upper-mantle xenoliths. *Lithos*, 77: 473–491
- Chen C F, Liu Y S, Foley S F, Ducea M N, He D T, Hu Z C, Chen W, Zong K Q. 2016. Paleo-Asian oceanic slab under the North China craton revealed by carbonatites derived from subducted limestones. *Geology*, 44: 1039–1042
- Chen C F, Liu Y S, Foley S F, Ducea M N, Geng X L, Zhang W, Xu R, Hu Z C, Zhou L, Wang Z C. 2017. Carbonated sediment recycling and its contribution to lithospheric refertilization under the northern North China Craton. *Chem Geol*, 466: 641–653
- Chen Y X, Tang J, Zheng Y F, Wu Y B. 2016. Geochemical constraints on petrogenesis of marble-hosted eclogites from the Sulu orogen in China. *Chem Geol*, 436: 35–53
- 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
- Coltorti M, Bonadiman C, Hinton R W, Siena F, Upton B G J. 1999. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: Evidence from clinopyroxenes and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean. *J Petrol*, 40: 133–165
- Dai L Q, Zheng Y F, Zhao Z F. 2016. Termination time of peak decratonization in North China: Geochemical evidence from mafic igneous rocks. *Lithos*, 240–243: 327–336
- Dalton J A, Wood B J. 1993. The compositions of primary carbonate melts and their evolution through wallrock reaction in the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 119: 511–525
- Dasgupta R, Hirschmann M M, Dellas N. 2005. The effect of bulk composition on the solidus of carbonated eclogite from partial melting experiments at 3 GPa. *Contrib Mineral Petrol*, 149: 288–305
- Dasgupta R, Hirschmann M M, Smith N D. 2007. Partial melting experiments of peridotite+CO₂ at 3 GPa and genesis of alkalic ocean island basalts. *J Petrol*, 48: 2093–2124
- Dasgupta R, Mallik A, Tsuno K, Withers A C, Hirth G, Hirschmann M M. 2013. Carbon-dioxide-rich silicate melt in the Earth's upper mantle. *Nature*, 493: 211–215
- Dawson J B. 2002. Metasomatism and partial melting in upper-mantle peridotite xenoliths from the Lashaine volcano, northern Tanzania. *J Petrol*, 43: 1749–1777
- Deng J, Wang Q. 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Res*, 36: 219–274
- Deng J F, Mo X X, Zhao H L, Wu Z X, Luo Z H, Su S G. 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'Continental roots-plume tectonics'. *Earth-Sci Rev*, 65: 223–275
- Deng L, Liu Y, Zong K, Zhu L, Xu R, Hu Z, Gao S. 2017. Trace element and Sr isotope records of multi-episode carbonatite metasomatism on the eastern margin of the North China Craton. *Geochem Geophys Geosyst*, 18: 220–237
- Dong S, Zhang Y, Zhang F, Cui J, Chen X, Zhang S, Miao L, Li J, Shi W, Li Z, Huang S, Li H. 2015. Late Jurassic-Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution. *J Asian Earth Sci*, 114: 750–770
- Downes H. 2004. Ultramafic xenoliths from the Bearpaw Mountains, Montana, USA: Evidence for multiple metasomatic events in the lithospheric mantle beneath the Wyoming craton. *J Petrol*, 45: 1631–1662
- Eggins S M, Rudnick R L, McDonough W F. 1998. The composition of peridotites and their minerals: A laser-ablation ICP-MS study. *Earth Planet Sci Lett*, 154: 53–71
- Falloon T J, Green D H, Danyushevsky L V, Faul U H. 1999. Peridotite Melting at 1.0 and 1.5 GPa: An experimental evaluation of techniques using diamond aggregates and mineral mixes for determination of near-solidus melts. *J Petrol*, 40: 1343–1375
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, Yang J H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. *Mineralium Deposita*, 38: 739–750
- Franz L, Brey G P, Okrusch M. 1996. Steady state geotherm, thermal disturbances, and tectonic development of the lower lithosphere underneath the Gibeon Kimberlite Province, Namibia. *Contrib Mineral Petrol*, 126: 181–198
- Gaetani G A, Grove T L. 1998. The influence of water on melting of mantle peridotite. *Contrib Mineral Petrol*, 131: 323–346
- Gale A, Dalton C A, Langmuir C H, Su Y, Schilling J G. 2013. The

- mean composition of ocean ridge basalts. *Geochem Geophys Geosyst*, 14: 489–518
- 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, Xu W L, Yuan H L, Liu Y S, Walker R J, Puchtel I S, Liu X, Huang H, Wang X R, Yang J. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 270: 41–53
- 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
- Gervasoni F, Klemme S, Rohrbach A, Grützner T, Berndt J. 2017. Experimental constraints on mantle metasomatism caused by silicate and carbonate melts. *Lithos*, 282–283: 173–186
- Ghorbani M R, Middlemost E A K. 2000. Geochemistry of pyroxene inclusions from the Warrumbungle Volcano, New South Wales, Australia. *Am Miner*, 85: 1349–1367
- Grassi D, Schmidt M W. 2011. The Melting of Carbonated Pelites from 70 to 700 km Depth. *J Petrol*, 52: 765–789
- Green D H, Wallace M E. 1988. Mantle metasomatism by ephemeral carbonatite melts. *Nature*, 336: 459–462
- Gregoire M. 2003. Garnet lherzolites from the Kaapvaal Craton (South Africa): Trace element evidence for a metasomatic history. *J Petrol*, 44: 629–657
- Gregoire M, Tinguely C, Bell D, Leroex A. 2005. Spinel lherzolite xenoliths from the Premier kimberlite (Kaapvaal craton, South Africa): Nature and evolution of the shallow upper mantle beneath the Bushveld complex. *Lithos*, 84: 185–205
- Griffin W L, Doyle B J, Ryan C G, Pearson N J, Suzanne Y O, Davies R, Kivi K, Van Acherbergh E, Natapov L M. 1999. Layered mantle lithosphere in the Lac de Gras area, Slave craton: Composition, structure and origin. *J Petrol*, 40: 705–727
- Griffin W L, Kaminsky F V, Ryan C G, O'Reilly S Y, Win T T, Ilupin I P. 1996. Thermal state and composition of the lithospheric mantle beneath the Daldyn kimberlite field, Yakutia. *Tectonophysics*, 262: 19–33
- Griffin W L, Natapov L M, O'Reilly S Y, van Acherbergh E, Cherenkova A F, Cherenkov V G. 2005. The Kharamai kimberlite field, Siberia: Modification of the lithospheric mantle by the Siberian Trap event. *Lithos*, 81: 167–187
- Guo F, Fan W, Wang Y, Zhang M. 2004. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: Implications for enrichment processes beneath continental collisional belt. *Lithos*, 78: 291–305
- Hammouda T. 2003. High-pressure melting of carbonated eclogite and experimental constraints on carbon recycling and storage in the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 214: 357–368
- Hammouda T, Laporte D. 2000. Ultrafast mantle impregnation by carbonatite melts. *Geology*, 28: 283–285
- Hellebrand E, Snow J E. 2003. Deep melting and sodic metasomatism underneath the highly oblique-spreading Lena Trough (Arctic Ocean). *Earth Planet Sci Lett*, 216: 283–299
- Hofmann A W. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385: 219–229
- Holm P M, Prægel N O. 2006. Cumulates from primitive rift-related East Greenland Paleogene magmas: Petrological and isotopic evidence from the ultramafic complexes at Kælvægletscher and near Kærven. *Lithos*, 92: 251–275
- Hou T, Zhang Z, Keiding J K, Veksler I V. 2015. Petrogenesis of the ultrapotassic Fanshan intrusion in the North China Craton: Implications for lithospheric mantle metasomatism and the origin of apatite ores. *J Petrol*, 56: 893–918
- Ionov D A, O'Reilly S Y, Genshaft Y S, Kopylova M G. 1996. Carbonate-bearing mantle peridotite xenoliths from Spitsbergen: Phase relationships, mineral compositions and trace-element residence. *Contrib Mineral Petrol*, 125: 375–392
- Ionov D. 2004. Chemical variations in peridotite xenoliths from Vitim, Siberia: Inferences for REE and Hf behaviour in the garnet-facies upper mantle. *J Petrol*, 45: 343–367
- Ionov D A, Ashchepkov I, Jagoutz E. 2005a. The provenance of fertile off-craton lithospheric mantle: Sr-Nd isotope and chemical composition of garnet and spinel peridotite xenoliths from Vitim, Siberia. *Chem Geol*, 217: 41–75
- Ionov D A, Ashchepkov I V, Stosch H G, Witt-Eickschen G, Seck H A. 1993a. Garnet peridotite xenoliths from the Vitim volcanic field, Baikal region: The nature of the garnet—Spinel peridotite transition zone in the continental mantle. *J Petrol*, 34: 1141–1175
- Ionov D A, Chanefo I, Bodinier J L. 2005b. Origin of Fe-rich lherzolites and wehrlites from Tok, SE Siberia by reactive melt percolation in refractory mantle peridotites. *Contrib Mineral Petrol*, 150: 335–353
- Ionov D A, Chazot G, Chauvel C, Merlet C, Bodinier J L. 2006. Trace element distribution in peridotite xenoliths from Tok, SE Siberian craton: A record of pervasive, multi-stage metasomatism in shallow refractory mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 70: 1231–1260
- Ionov D A, DuPuy C, O'Reilly S Y, Kopylova M G, Genshaft Y S. 1993b. Carbonated peridotite xenoliths from Spitsbergen: Implications for trace element signature of mantle carbonate metasomatism. *Earth Planet Sci Lett*, 119: 283–297
- Ionov D A, Hofmann A W. 1995. Nb-Ta-rich mantle amphiboles and micas: Implications for subduction-related metasomatic trace element fractionations. *Earth Planet Sci Lett*, 131: 341–356

- Ionov D A, Prikhodko V S, Bodinier J L, Sobolev A V, Weis D. 2005c. Lithospheric mantle beneath the south-eastern Siberian craton: Petrology of peridotite xenoliths in basalts from the Tokinsky Stanovik. *Contrib Mineral Petrol*, 149: 647–665
- Jenner F E. 2017. Cumulate causes for the low contents of sulfide-loving elements in the continental crust. *Nat Geosci*, 10: 524–529
- Kamenetsky V S, Yaxley G M. 2015. Carbonate-silicate liquid immiscibility in the mantle propels kimberlite magma ascent. *Geochim Cosmochim Acta*, 158: 48–56
- Kerrick D M, Connolly J A D. 2001. Metamorphic devolatilization of subducted marine sediments and the transport of volatiles into the Earth's mantle. *Nature*, 411: 293–296
- Kim N, Cheong A C, Yi K, Jeong Y J, Koh S M. 2016. Post-collisional carbonatite-hosted rare earth element mineralization in the Hongcheon area, central Gyeonggi massif, Korea: Ion microprobe monazite U-Th-Pb geochronology and Nd-Sr isotope geochemistry. *Ore Geol Rev*, 79: 78–87
- Klemme S, van der Laan S R, Foley S F, Günther D. 1995. Experimentally determined trace and minor element partitioning between clinopyroxene and carbonatite melt under upper mantle conditions. *Earth Planet Sci Lett*, 133: 439–448
- Kopylova M G, Caro G. 2004. Mantle xenoliths from the southeastern Slave craton: Evidence for chemical zonation in a thick, cold lithosphere. *J Petrol*, 45: 1045–1067
- Kopylova M G, Russell J K, Cookenboo H. 1999. Petrology of peridotite and pyroxenite xenoliths from the Jericho Kimberlite: Implications for the thermal state of the mantle beneath the Slave craton, northern Canada. *J Petrol*, 40: 79–104
- Kruk A N, Sokol A G, Chebotarev D A, Palyanov Y A, Sobolev N V. 2016. Composition of a carbonatitic melt in equilibrium with ilmenite at 5.5–6.3 GPa and 1350°C. *Dokl Earth Sci*, 467: 303–307
- Lee C T, Rudnick R L, McDonough W F, Horn I. 2000. Petrologic and geochemical investigation of carbonates in peridotite xenoliths from northeastern Tanzania. *Contrib Mineral Petrol*, 139: 470–484
- Lee C T A, Luffi P, Chin E J. 2011. Building and destroying continental mantle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 39: 59–90
- Li J W, Bi S J, Selby D, Chen L, Vasconcelos P, Thiede D, Zhou M F, Zhao X F, Li Z K, Qiu H N. 2012. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China craton. *Earth Planet Sci Lett*, 349–350: 26–37
- Li S G, Yang W, Ke S, Meng X, Tian H C, Xu L J, He Y S, Huang J, Wang X C, Xia Q K, Sun W D, Yang X Y, Ren Z Y, Wei H Q, Liu Y S, Meng F C, Yan J. 2017. Deep carbon cycles constrained by a large-scale mantle Mg isotope anomaly in eastern China. *Natl Sci Rev*, 4: 111–120
- Li Y, Audétat A. 2012. Partitioning of V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Sb, W, Au, Pb, and Bi between sulfide phases and hydrous basaltic melt at upper mantle conditions. *Earth Planet Sci Lett*, 355–356: 327–340
- Litasov K D, Foley S F, Litasov Y D. 2000. Magmatic modification and metasomatism of the subcontinental mantle beneath the Vitim volcanic field (East Siberia): Evidence from trace element data on pyroxenite and peridotite xenoliths from Miocene picobasalt. *Lithos*, 54: 83–114
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20: 339–342
- Liu P L, Wu Y, Chen Y, Zhang J F, Jin Z M. 2015. UHP impure marbles from the Dabie Mountains: Metamorphic evolution and carbon cycling in continental subduction zones. *Lithos*, 212–215: 280–297
- Liu S A, Wang Z Z, Li S G, Huang J, Yang W. 2016. Zinc isotope evidence for a large-scale carbonated mantle beneath eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 444: 169–178
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *J Petrol*, 51: 537–571
- Liu Y S, Gao S, Kelemen P B, Xu W L. 2008. Recycled crust controls contrasting source compositions of Mesozoic and Cenozoic basalts in the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 72: 2349–2376
- Liu Y S, Gao S, Lee C T A, Hu S H, Liu X M, Yuan H L. 2005. Melt-peridotite interactions: Links between garnet pyroxenite and high-Mg# signature of continental crust. *Earth Planet Sci Lett*, 234: 39–57
- Liu Y S, He D T, Gao C G, Foley S, Gao S, Hu Z C, Zong K Q, Chen H H. 2015. First direct evidence of sedimentary carbonate recycling in subduction-related xenoliths. *Sci Rep*, 5: 11547
- Lorand J P, Luguet A. 2016. Chalcophile and siderophile elements in mantle rocks: Trace elements controlled by trace minerals. *Rev Mineral Geochem*, 81: 441–488
- Ma L, Jiang S Y, Hofmann A W, Xu Y G, Dai B Z, Hou M L. 2016. Rapid lithospheric thinning of the North China Craton: New evidence from Cretaceous mafic dikes in the Jiaodong Peninsula. *Chem Geol*, 432: 1–15
- Machetel P, Humler E. 2003. High mantle temperature during Cretaceous avalanche. *Earth Planet Sci Lett*, 208: 125–133
- MacKenzie J M, Canil D. 1999. Composition and thermal evolution of cratonic mantle beneath the central Archean Slave Province, NWT, Canada. *Contrib Mineral Petrol*, 134: 313–324

- Malarkey J, Wittig N, Graham Pearson D, Davidson J P. 2011. Characterising modal metasomatic processes in young continental lithospheric mantle: A microsampling isotopic and trace element study on xenoliths from the Middle Atlas Mountains, Morocco. *Contrib Mineral Petrol*, 162: 289–302
- Mao J, Wang Y, Li H, Pirajno F, Zhang C, Wang R. 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D–O–C–S isotope systematics. *Ore Geol Rev*, 33: 361–381
- McCammon C, Kopylova M G. 2004. A redox profile of the Slave mantle and oxygen fugacity control in the cratonic mantle. *Contrib Mineral Petrol*, 148: 55–68
- Meng Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China–Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369: 155–174
- Menzies A, Westerlund K, Grütter H, Gurney J, Carlson J, Fung A, Nowicki T. 2004. Peridotitic mantle xenoliths from kimberlites on the Ekati Diamond Mine property, N.W.T., Canada: Major element compositions and implications for the lithosphere beneath the central Slave craton. *Lithos*, 77: 395–412
- Menzies M A, Fan W, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. *Geological Soc London Special Publications*, 76: 71–81
- Molina J F, Poli S. 2000. Carbonate stability and fluid composition in subducted oceanic crust: An experimental study on H₂O–CO₂-bearing basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 176: 295–310
- Neumann E R, Wulff-Pedersen E, Pearson N J, Spencer E A. 2002. Mantle xenoliths from Tenerife (Canary Islands): Evidence for reactions between mantle peridotites and silicic carbonatite melts inducing Ca metasomatism. *J Petrol*, 43: 825–857
- Niu X, Chen B, Liu A, Suzuki K, Ma X. 2012. Petrological and Sr–Nd–Os isotopic constraints on the origin of the Fanshan ultrapotassic complex from the North China Craton. *Lithos*, 149: 146–158
- Niu X L, Chen B, Feng G Y, Liu F, Yang J S. 2017. Origin of lamprophyres from the northern margin of the North China Craton: Implications for mantle metasomatism. *J Geol Soc*, 174: 353–364
- Niu Y L. 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 China Uni*, 11: 9–46
- Pearson D G, Canil D, Shirey S B, Heinrich D H, Karl K T. 2003. Mantle samples included in volcanic rocks: Xenoliths and diamonds. *Treatise on Geochemistry*, 2: 171–275
- Peslier A H. 2002. The lithospheric mantle beneath continental margins: Melting and melt-rock reaction in Canadian Cordillera xenoliths. *J Petrol*, 43: 2013–2047
- Phillips G N, Evans K A. 2004. Role of CO₂ in the formation of gold deposits. *Nature*, 429: 860–863
- Pickering-Witter J, Johnston A D. 2000. The effects of variable bulk composition on the melting systematics of fertile peridotitic assemblages. *Contrib Mineral Petrol*, 140: 190–211
- Powell W, Zhang M, O'Reilly S Y, Tiepolo M. 2004. Mantle amphibole trace-element and isotopic signatures trace multiple metasomatic episodes in lithospheric mantle, western Victoria, Australia. *Lithos*, 75: 141–171
- Proyer A, Rolfo F, Zhu Y F, Castelli D, Compagnoni R. 2013. Ultrahigh-pressure metamorphism in the magnesite+aragonite stability field: Evidence from two impure marbles from the Dabie-Sulu UHPM belt. *J Metamorph Geol*, 31: 35–48
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chem Geol*, 160: 335–356
- Roach I C. 2004. Mineralogy, textures and *P–T* relationships of a suite of xenoliths from the Monaro Volcanic Province, New South Wales, Australia. *J Petrol*, 45: 739–758
- Rudnick R L, McDonough W F, Chappell B W. 1993. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: Petrographic and geochemical characteristics. *Earth Planet Sci Lett*, 114: 463–475
- Russell J K, Porritt L A, Lavallée Y, Dingwell D B. 2012. Kimberlite ascent by assimilation-fuelled buoyancy. *Nature*, 481: 352–356
- Saltzer R L. 2001. The spatial distribution of garnets and pyroxenes in mantle peridotites: Pressure-temperature history of peridotites from the Kaapvaal Craton. *J Petrol*, 42: 2215–2229
- Schmidberger S S, Francis D. 1999. Nature of the mantle roots beneath the North American craton: Mantle xenolith evidence from Somerset Island kimberlites. *Lithos*, 48: 195–216
- Schmidberger S S, Francis D. 2001. Constraints on the trace element composition of the Archean mantle root beneath Somerset Island, Arctic Canada. *J Petrol*, 42: 1095–1117
- Schmidberger S S, Simonetti A, Francis D. 2003. Small-scale Sr isotope investigation of clinopyroxenes from peridotite xenoliths by laser ablation MC-ICP-MS—Implications for mantle metasomatism. *Chem Geol*, 199: 317–329
- Schwab B E, Johnston A D. 2001. Melting systematics of modally variable, compositionally intermediate peridotites and the effects of mineral fertility. *J Petrol*, 42: 1789–1811
- Sharygin V V, Golovin A V, Pokhilenko N P, Kamenetsky V S. 2007. Djerfisherite in the Udachnaya-East pipe kimberlites (Sakha-Yakutia, Russia): Paragenesis, composition and origin. *Eur J Mineral*, 19: 51–63
- Shi L, Francis D, Ludden J, Frederiksen A, Bostock M. 1998. Xenolith evidence for lithospheric melting above anomalously hot mantle under the northern Canadian Cordillera. *Contrib Mineral Petrol*,

- 131: 39–53
- Simon N S C, 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
- Sleep N H. 2003. Survival of Archean cratonic lithosphere. *J Geophys Res*, 108: 2302
- Sleep N H. 2005. Evolution of the continental lithosphere. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 33: 369–393
- Sokol A G, Kruk A N, Chebotarev D A, Palyanov Y N. 2016. Carbonatite melt-peridotite interaction at 5.5–7.0 GPa: Implications for metasomatism in lithospheric mantle. *Lithos*, 248–251: 66–79
- Stiefenhofer J, Viljoen K S, Marsh J S. 1997. Petrology and geochemistry of peridotite xenoliths from the Letlhakane kimberlites, Botswana. *Contrib Mineral Petrol*, 127: 147–158
- Su B, Chen Y, Guo S, Chu Z Y, Liu J B, Gao Y J. 2016. Carbonatitic metasomatism in orogenic dunites from Lijiatun in the Sulu UHP terrane, eastern China. *Lithos*, 262: 266–284
- Sun J, Liu C Z, Wu F Y, Yang Y H, Chu Z Y. 2012. Metasomatic origin of clinopyroxene in Archean mantle xenoliths from Hebi, North China Craton: Trace-element and Sr-isotope constraints. *Chem Geol*, 328: 123–136
- Sun W D, Ding X, Hu Y H, Li X H. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 262: 533–542
- Tong X R, Liu Y S, Hu Z C, Chen H H, Zhou L, Hu Q H, Xu R, Deng L X, Chen C F, Yang L, Gao S. 2016. Accurate determination of Sr isotopic compositions in clinopyroxene and silicate glasses by LA-MC-ICP-MS. *Geostand Geoanal Res*, 40: 85–99
- van Achterbergh E, Griffin W L, Ryan C G, O'Reilly S Y, Pearson N J, Kivi K, Doyle B J. 2004. Melt inclusions from the deep Slave lithosphere: Implications for the origin and evolution of mantle-derived carbonatite and kimberlite. *Lithos*, 76: 461–474
- Varela M E, Clocchiatti R, Kurat G, Schiano P. 1999. Silicic glasses in hydrous and anhydrous mantle xenoliths from Western Victoria, Australia: At least two different sources. *Chem Geol*, 153: 151–169
- Wallace M E, Green D H. 1988. An experimental determination of primary carbonatite magma composition. *Nature*, 335: 343–346
- Walter M J. 1998. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere. *J Petrol*, 39: 29–60
- Wang C G, Liang Y, Xu W L, Dygert N. 2013. Effect of melt composition on basalt and peridotite interaction: Laboratory dissolution experiments with applications to mineral compositional variations in mantle xenoliths from the North China Craton. *Contrib Mineral Petrol*, 166: 1469–1488
- Wang C Y, Liu Y S, Min N, Zong K Q, Hu Z C, Gao S. 2016. Paleo-Asian oceanic subduction-related modification of the lithospheric mantle under the North China Craton: Evidence from peridotite xenoliths in the Datong basalts. *Lithos*, 261: 109–127
- Wang C, Liu Y, Zhang J, Jin Z. 2016. Carbonate melt from subduction zone: The key for craton destruction. *Goldschmidt Abstracts*, 3307
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, Zhang Y H. 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies. *Gondwana Res*, 23: 1273–1305
- Wang Z S, Kusky T M, Capitanio F A. 2016. Lithosphere thinning induced by slab penetration into a hydrous mantle transition zone. *Geophys Res Lett*, 43: 11567–11577
- Wasylenki L E, Baker M B, Kent A J R, Stolper E M. 2003. Near-solidus melting of the shallow upper mantle: Partial melting experiments on depleted peridotite. *J Petrol*, 44: 1163–1191
- Whitehead K, Le Roex A, Class C, Bell D. 2002. Composition and Cretaceous thermal structure of the upper mantle beneath the Damara Mobile Belt: Evidence from nephelinite-hosted peridotite xenoliths, Swakopmund, Namibia. *J Geol Soc*, 159: 307–321
- 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
- Woodland A B, Seitz H M, Yaxley G M. 2004. Varying behaviour of Li in metasomatised spinel peridotite xenoliths from western Victoria, Australia. *Lithos*, 75: 55–66
- Wu D, Liu Y S, Chen C F, Xu R, Ducea M N, Hu Z C, Zong K Q. 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, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103–119
- 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
- Xia Q K, Hao Y, Li P, Deloule E, Coltorti M, Dallai L, Yang X, Feng M. 2010. Low water content of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern part of the North China Craton. *J Geophys Res*, 115: B07207
- Xia Q K, Liu J, Liu S C, Kovács I, Feng M, Dang L. 2013. High water content in Mesozoic primitive basalts of the North China Craton and implications on the destruction of cratonic mantle lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 361: 85–97
- 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 S, Tong X R, Hu Z C, Zong K Q, 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 L, Hergt J M, Gao S, Pei F P, Wang W, Yang D B. 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 W L, Zhou Q J, Pei F P, Yang D B, Gao S, Li Q L, Yang Y H. 2013. Destruction of the North China Craton: Delamination or thermal/chemical erosion? Mineral chemistry and oxygen isotope insights from websterite xenoliths. *Gondwana Res*, 23: 119–129
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhou X M, Huang X L. 1998. The nature of the Cenozoic lithosphere at Nushan, eastern China: Mantle Dynamics and Plate Interactions in Eastern Asia, *Geodynamics* 27, American Geophysical Union. 167–195
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhou X M. 2000. Genesis of young lithospheric mantle in southeastern China: An LAM-ICPMS trace element study. *J Petrol*, 41: 111–148
- 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. 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
- Yang J H, Chung S L, Zhai M G, Zhou X H. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73: 145–160
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning. *Ore Geol Rev*, 23: 125–152
- Yang J H, Sun J F, Zhang M, Wu F Y, Wilde S A. 2012. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension. *Chem Geol*, 328: 149–167
- Yang J H, O'Reilly S, Walker R J, Griffin W, Wu F Y, Zhang M, Pearson N. 2010. Diachronous decratonization of the Sino-Korean craton: Geochemistry of mantle xenoliths from North Korea. *Geology*, 38: 799–802
- Yang J J, Jahn B M. 2000. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP metamorphic terrane in China. *J Metamorph Geol*, 18: 167–180.
- Yang W, Teng F Z, Zhang H F, Li S G. 2012. Magnesium isotopic systematics of continental basalts from the North China craton: Implications for tracing subducted carbonate in the mantle. *Chem Geol*, 328: 185–194
- Yaxley G M, Kamenetsky V, Green D H, Falloon T J. 1997. Glasses in mantle xenoliths from western Victoria, Australia, and their relevance to mantle processes. *Earth Planet Sci Lett*, 148: 433–446
- Yaxley G M, Brey G P. 2004. Phase relations of carbonate-bearing eclogite assemblages from 2.5 to 5.5 GPa: Implications for petrogenesis of carbonatites. *Contrib Mineral Petrol*, 146: 606–619
- Yaxley G M, Crawford A J, Green D H. 1991. Evidence for carbonatite metasomatism in spinel peridotite xenoliths from western Victoria, Australia. *Earth Planet Sci Lett*, 107: 305–317
- Yaxley G M, Green D H. 1994. Experimental demonstration of refractory carbonate-bearing eclogite and siliceous melt in the subduction regime. *Earth Planet Sci Lett*, 128: 313–325
- Yaxley G M, Green D H. 1998. Reactions between eclogite and peridotite: Mantle refertilisation by subduction of oceanic crust. *Schweiz Mineral Petrogr Mitt*, 78: 243–255
- Yaxley G M, Green D H, Kamenetsky V. 1998. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere. *J Petrol*, 39: 1917–1930
- Yaxley G M, Kamenetsky V. 1999. *In situ* origin for glass in mantle xenoliths from southeastern Australia: Insights from trace element compositions of glasses and metasomatic phases. *Earth Planet Sci Lett*, 172: 97–109
- Ye K, Cong B L, Ye D N. 2000. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. *Nature*, 407: 734–736
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488: 293–325
- Ying J, Zhou X, Zhang H. 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
- Ying J F, Zhang H F, 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
- Yuan H L, Gao S, Rudnick R L, Jin Z M, Liu Y S, Puchtel I S, Walker R J, Yu R D. 2007. Re-Os evidence for the age and origin of peridotites from the Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt, China. *Chem Geol*, 236: 323–338
- Zeng G, Chen L H, Xu X S, Jiang S Y, Hofmann A W. 2010. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China. *Chem Geol*, 273: 35–45
- 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, Liu Y, Hu Z, Zong K, Chen H, Chen C. 2017. Low- $\delta^{13}\text{C}$ carbonates in the Miocene basalt of the northern margin of the North China Craton: Implications for deep carbon recycling. *J Asian Earth Sci*, 144: 110–125
- 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, 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 J F, Wang C, Wang Y F. 2012. Experimental constraints on the destruction mechanism of the North China Craton. *Lithos*, 149: 91–99
- Zhang J, Zhang H F, Kita N, Shimoda G, Morishita Y C, 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 R Y, Pan Y M, Yang Y H, Li T F, Liou J G, Yang J S. 2008. Chemical composition and ultrahigh-P metamorphism of garnet peridotites from the Sulu UHP terrane, China: Investigation of major, trace elements and Hf isotopes of minerals. *Chem Geol*, 255: 250–264
- Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, Ye H, Wu F. 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization. *Earth-Sci Rev*, 131: 49–87
- Zhang S H, Zhao Y, Ye H, Hou K J, Li C F. 2012. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton: Implications for cratonic lithospheric destruction. *Lithos*, 155: 1–18
- Zhang Z M, Dong X, Liou J G, Liu F, Wang W, Yui F. 2011. Metasomatism of garnet peridotite from Jiangzhuang, southern Sulu UHP belt: Constraints on the interactions between crust and mantle rocks during subduction of continental lithosphere. *J Metamorph Geol*, 29: 917–937
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 107: 45–73
- Zhao G C, Zhai M G. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications. *Gondwana Res*, 23: 1207–1240
- Zhao Z F, Dai L Q, Zheng Y F. 2013. Postcollisional mafic igneous rocks record crust-mantle interaction during continental deep subduction. *Sci Rep*, 3: 3413DOI
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yang J, 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. 2005a. 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 Y, Griffin W L, Liou J G, O'Reilly S Y. 2005b. Heterogeneous and metasomatized mantle recorded by trace elements in minerals of the Donghai garnet peridotites, Sulu UHP terrane, China. *Chem Geol*, 221: 243–259
- Zhu G, Chen Y, Jiang D, Lin S. 2015. Rapid change from compression to extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunmengshan metamorphic core complex. *Tectonophysics*, 656: 91–110
- Zhu G, Jiang D, Zhang B, Chen Y. 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. *Gondwana Res*, 22: 86–103
- Zhu R X, Yang J H, Wu F Y. 2012. Timing of destruction of the North China Craton. *Lithos*, 149: 51–60
- Zhu Y S, Yang J H, Sun J F, Wang H. 2017. Zircon Hf-O isotope evidence for recycled oceanic and continental crust in the sources of alkaline rocks. *Geology*, 45: 407–410

(责任编辑: 郑永飞)