

doi:10.3799/dqkx.2017.041

内蒙古集宁橄榄岩包体微区微量元素与 Sr 同位素特征及其岩石圈地幔演化的指示意义

王瑞雪¹, 刘勇胜^{2,3*}, 宗克清^{2,3}, 胡兆初^{2,3}

1. 中国地质大学李四光学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 为完整了解华北克拉通的破坏程度和机制, 加深对其西部陆块岩石圈地幔的研究十分重要, 而位于华北克拉通西部集宁新生代碱性玄武岩中的地幔橄榄岩包体, 为研究人员认识该地区的岩石圈地幔的性质和演化起到指示作用。运用 LA-ICP-MS 和 LA-MC-ICP-MS 对集宁地区橄榄岩矿物进行原位微区测试, 获得其主量、微量元素和 Sr 同位素成分的数据。根据矿物组成, 可以将集宁地区的橄榄岩分为两类: 第一类为贫单斜辉石橄榄岩(单斜辉石体积分数小于 8%), 它们经历了高程度的部分熔融, 可能是古老难熔岩石圈地幔的残留; 第二类为二辉橄榄岩(单斜辉石体积分数大于 13%), 其熔融程度低, 代表了新生饱满的岩石圈地幔。第一类橄榄岩中单斜辉石 REE 含量整体偏低且轻微富集 LREE, 第二类橄榄岩中单斜辉石具有 LREE 富集和轻微亏损两种配分模式, 大部分样品的核边有一定的强不相容元素及 Sr 同位素组成变化。这些微量元素和同位素特征都表明集宁橄榄岩包体经历过交代作用。(La/Yb)_N 和 Ti/Eu 比值特征表明它们经历过多个阶段的交代作用, 交代介质有硅酸盐、碳酸盐熔/流体, 这些交代介质可能为来源于古亚洲洋板块俯冲时释放的熔/流体。

关键词: 华北克拉通西部; 集宁; 橄榄岩包体; 原位分析; Sr 同位素; 古亚洲洋板块; 地球化学。

中图分类号: P632

文章编号: 1000-2383(2017)04-0511-16

收稿日期: 2016-11-25

In-Situ Trace Elements and Sr Isotopes in Peridotite Xenoliths from Jining: Implications for Lithospheric Mantle Evolution

Wang Ruixue¹, Liu Yongsheng^{2,3*}, Zong Keqing^{2,3}, Hu Zhaochu^{2,3}

1. School of Lisiguang, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

Abstract: Further research on the lithospheric mantle beneath western North China craton is significant in order to understand the degree and evolution of its thinning and transformation thoroughly. Mantle peridotite xenoliths in the Cenozoic alkaline basalts from Jining of western North China craton provide important constraints on the nature and evolution of the lithospheric mantle beneath this area. The samples were analyzed by using LA-ICP-MS and LA-MC-ICP-MS to obtain major element, trace element and Sr isotopic compositions. According to the mineral composition, the peridotites were classified into two groups: (1) Clinopyroxene (Cpx)-poor peridotites (Cpx < 8%), which might have experienced high-degree partial melting, suggest relict of old and refractory lithospheric mantle under this area. (2) Iherzolites (Cpx > 13%). They might have experienced low-degree partial melting, representing the fertilized lithospheric mantle. Cpx grains in Type 1 peridotite have relatively low REE contents and show slightly LREE-enriched patterns, while Cpx grains in Type 2 peridotite show both LREE-enriched and

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No. 2013CB429806); 国家自然科学基金项目(Nos. 41125013, 41530211); 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室基金项目(No. MSFGPMR2016)。

作者简介: 王瑞雪(1996-), 女, 学士, 主要从事地球化学专业研究。ORCID:0000-0003-3662-845X。E-mail: rxwangvinciel@hotmail.com

* **通讯作者:** 刘勇胜, E-mail: yshliu@cug.edu.cn

引用格式: 王瑞雪, 刘勇胜, 宗克清, 等, 2017. 内蒙古集宁橄榄岩包体微区微量元素与 Sr 同位素特征及其岩石圈地幔演化的指示意义. 地球科学, 42(4): 511-526.

slightly LREE-depleted REE patterns. Most Cpx grains show core-rim variations in strong incompatible elements and Sr isotopic compositions. These features indicate that the peridotites could have experienced metamorphism. Variations of $(La/Yb)_N$ and Ti/Eu ratios imply multistage metasomatism, which could have been caused by silicate and carbonatite melts/fluids associated with the Paleo-Asian oceanic plate subduction.

Key words: western North China craton; Jining; peridotite xenoliths; in situ; Sr isotope; Paleo-Asian oceanic plate; geochemistry.

0 引言

自中生代以来,华北地区岩石圈厚度发生了不同程度的减薄,其稳定的冷、厚克拉通型岩石圈地幔被热、薄的大洋型岩石圈地幔所取代(Fan and Menzies, 1992; Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Rudnick *et al.*, 2004),仅在部分地区有古老岩石圈地幔的残留(Zheng *et al.*, 2001).华北克拉通东部带由于岩浆作用广泛,多地出露有橄榄岩包体,对该区的研究也相对较为成熟(Zheng *et al.*, 1998; Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2013a, 2013b).相反,华北克拉通西部带出露的橄榄岩包体较少,仅在四子王旗和三义堂等地有所报道(杜蔚等, 2006; 周媛婷等, 2010; 王亚妹等, 2011; Zhang *et al.*, 2012; 曹正琦等, 2016),因而限制了对西部陆块岩石圈地幔的性质和改造程度的认识.因此,为了完整了解华北克拉通的破坏程度和机制,加深对西部陆块岩石圈地幔的性质和作用的研究十分重要.

目前,对于华北克拉通破坏机制的认识主要有岩石圈(包括地壳和上地幔)拆沉作用(邓晋福等, 2006; Gao *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2008)、热化学侵蚀作用(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 1998; Xu, 2001)和橄榄岩-熔/流体反应(Liu *et al.*, 2005; 张宏福, 2006; Zhang *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2013)等模型.这些克拉通破坏机制模型可能相互共存,也可能发生于整个岩石圈破坏作用的不同阶段或者不同区域.了解与岩石圈破坏有关的熔/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,对全面认识华北克拉通破坏具有重要意义(徐荣等, 2013).前人普遍认为,古太平洋板块的俯冲作用与扬子陆块的碰撞作用可能为华北克拉通的破坏提供了驱动力(Gao *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2007; Windley *et al.*, 2010; Menzies and Xu, 2013; Xu *et al.*, 2013a).然而,古亚洲洋板块俯冲的贡献也应受到重视.事实上,古亚洲洋

板块南向俯冲至华北克拉通之下,在华北克拉通北缘引发了广泛的熔体-橄榄岩相互作用(Liu, 2010).前人在集宁(Zhang *et al.*, 2012)、大同(Wang *et al.*, 2016)和汉诺坝(Xu, 2002; Zhang *et al.*, 2009; He *et al.*, 2013)等地先后发现了高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的橄榄岩和辉石岩样品,并解释为古亚洲洋板块南向俯冲对岩石圈地幔改造的贡献.

板块俯冲对于岩石圈地幔的贡献除高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值外,还体现在微量元素的特征上.起源于再循环洋壳或陆壳的熔/流体引起的交代作用会造成LREE和LILE的富集(Grégoire *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 2013b),受交代矿物核边的元素含量可能会有相应变化,记录了熔/流体与岩石圈地幔的反应.本文运用LA-ICP-MS与LA-MC-ICP-MS,对华北克拉通西部北缘集宁地区橄榄岩包体的组成矿物进行微区原位主、微量元素分析以及单斜辉石Sr同位素分析,观察矿物元素含量及同位素比值的核边变化.结合前人对该地区的研究成果,与华北克拉通其他地区地幔包体进行对比,从而进一步探讨华北克拉通西部北缘岩石圈地幔的性质及其演化历史,并为古亚洲洋南向俯冲对华北克拉通北缘岩石圈地幔进行改造提供相关证据.

1 地质背景

华北克拉通是目前世界上已知的最古老太古宙克拉通之一,保存了约3.80 Ga的地壳残留(Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996).华北克拉通北临中亚造山带东部,南界秦岭-大别-苏鲁造山带(Li *et al.*, 1993),东部紧靠太平洋板块.基于岩性、地球化学、地球年代学、构造和变质P-T轨迹的数据,Zhao *et al.* (2001)将华北克拉通分为3个构造单元,即东部陆块、西部陆块和中部造山带.东部和西部两个独立的陆块被认为在大约1.85 Ga左右发生了一次碰撞造山事件,形成了中部造山带,标志着华北克拉通的最终形成(Zhao *et al.*, 2001; Santosh, 2010).此后,华北克拉通先后经历了大洋板块和周围陆块的俯冲与碰撞(Ye, 1987; Windley, 2003;

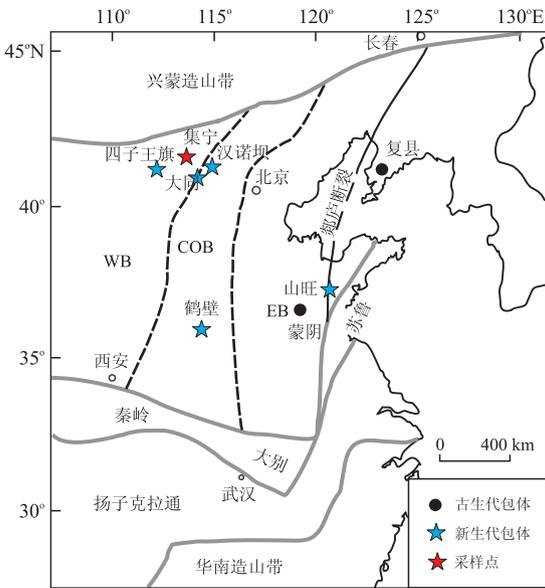


图 1 华北克拉通主要构造单元和采样点位置

Fig. 1 Major tectonic units in the North China craton and sampling locations

EB, 东部陆块; WB, 西部陆块; COB, 中部造山带; 据 Zhao *et al.* (2001)

Wu *et al.*, 2003; Xu and Shi, 2004; Zheng *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2008; Windley *et al.*, 2010), 并在中生代期间发生了显著的活化现象(吴福元等, 2008; Menzies and Xu, 2013). 华北克拉通东部在中、新生代期间经历了大范围的地质热事件, 其岩石圈地幔受到强烈的不均一性交代、改造、置换和减薄, 地壳也发生了大规模的重熔和减薄作用(翟明国, 2008; Zhu *et al.*, 2012). 而华北克拉通西部和中部造山带受中生代克拉通活化的影响程度较低, 这些地区的下地壳和岩石圈地幔结构大致保持了破坏前的状态(翟明国, 2008).

集宁地区位于华北克拉通西部陆块的北缘, 临近兴蒙造山带(图 1). 新生代以来, 由于拉张作用, 中国大陆东部的岩石圈产生一系列的拉伸构造, 大量含有包体的幔源玄武质岩浆喷出地表(Menzies and Xu, 2013), 形成分布广泛的多个玄武岩区, 集宁玄武岩区即是其中之一. 集宁新生代玄武岩分布面积达 8 000 km²(杜蔚等, 2006). 与汉诺坝和内蒙古广泛分布的新生代玄武岩相似, 集宁玄武岩也具有与洋岛玄武岩(OIB)类似的 Sr-Nd 同位素组成和轻稀土元素富集的 REE 配分模式图(Zhang *et al.*, 2012).

2 样品

本文采集的橄榄岩包体样品来自集宁三义堂梅

力盖图乡, 选取 8 个样品进行研究, 其中部分样品粒间可见褐红色物质, 指示其可能经历了轻微的伊丁石化作用(表 1).

橄榄岩包体大小集中在 2~5 cm 范围内, 矿物颗粒主要为细一中粒, 具不等粒变晶结构. 包体主要由橄榄石(Ol)、斜方辉石(Opx)、单斜辉石(Cpx)和尖晶石(Sp)组成, 根据颗粒大小可以明显分为两组, 较大一组中的矿物颗粒大小一般为 2.0 mm×3.0 mm, 较小的一组大小主要为 0.5 mm×1.0 mm. 矿物含量分别为橄榄石 40%~70%、斜方辉石 12%~43%、单斜辉石 0%~24%、尖晶石<5%(表 1). 其中部分单斜辉石的边界具明显的海绵边结构(图 2a, 表 1). 个别尖晶石也具反应边(图 2c), 反应边内矿物颗粒成分不同. 利用斜方辉石 Ca 温度计(Brey and Köhler, 1990)算出的平衡温度为 836~1 026 °C(表 1).

根据矿物组成可以将样品分为两类(表 1), 第一类为贫单斜辉石橄榄岩, 其单斜辉石体积分数小于 8%; 第二类为二辉橄榄岩, 其单斜辉石体积分数大于 13%(表 1).

3 分析方法

3.1 单矿物微区原位主、微量元素分析

单矿物的主量元素和微量元素含量分析都是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 LA-ICP-MS(GeoLas 2005 + Agilent 7500a)完成的. 激光剥蚀过程中采用氦气作载气, 氩气作为补偿气, 二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型的三通接头混合. 分析采用的激光剥蚀孔径为 60 μm, 激光脉冲为 8 Hz. 每个时间分辨分析数据大约包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号. 以国际标准玻璃 BCR-2G、ATHO-G、KL-G、ML3B-G 和 BHVO-2G 为外标, 采用无内标法进行校正(Liu *et al.*, 2008). 计算中假设橄榄岩单矿物中 Fe²⁺/ΣFe=0.75. 对样品和空白信号的离线选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量计算等利用 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008)完成.

3.2 单斜辉石微区原位 Sr 同位素分析

单斜辉石 Sr 同位素组成是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-MC-ICP-MS(GeoLas 2005 + Neptune Plus)微区原位分析获得. 同位素数据是在低分辨静态模式下用 8 个法拉第接收杯从质量⁸³Kr 到⁸⁸Sr 来获取的. 为了增加灵敏度, 采用了 Jet 样品锥和 X 截取锥组合.

表 1 集宁橄榄岩包体岩性、矿物组成及平衡温度
Table 1 Lithology, modal mineralogy and equilibrium temperatures of the Jining peridotite xenoliths

样品号	岩性	体积分数(%)				单斜辉石 海绵边	伊丁石化 程度	温度(°C) (Brey and Köhler, 1990)
		橄榄石	斜方辉石	单斜辉石	尖晶石			
第一类橄榄岩								
MLGT07-1	尖晶石二辉橄榄岩	62	29	8	1	无	无	836
MLGT13	方辉橄榄岩	65	32	/	3	无	轻微	1 013
第二类橄榄岩								
MLGT01	尖晶石二辉橄榄岩	68	14	16	2	有	无	992
MLGT02	尖晶石二辉橄榄岩	57	18	24	1	部分有	无	1 026
MLGT11	尖晶石二辉橄榄岩	43	32	23	2	部分有	轻微	989
MLGT17	尖晶石二辉橄榄岩	41	43	15	1	部分有	无	947
MLGT18	尖晶石二辉橄榄岩	40	31	24	5	有	无	951
MLGT21	尖晶石二辉橄榄岩	70	12	13	5	部分有	无	886

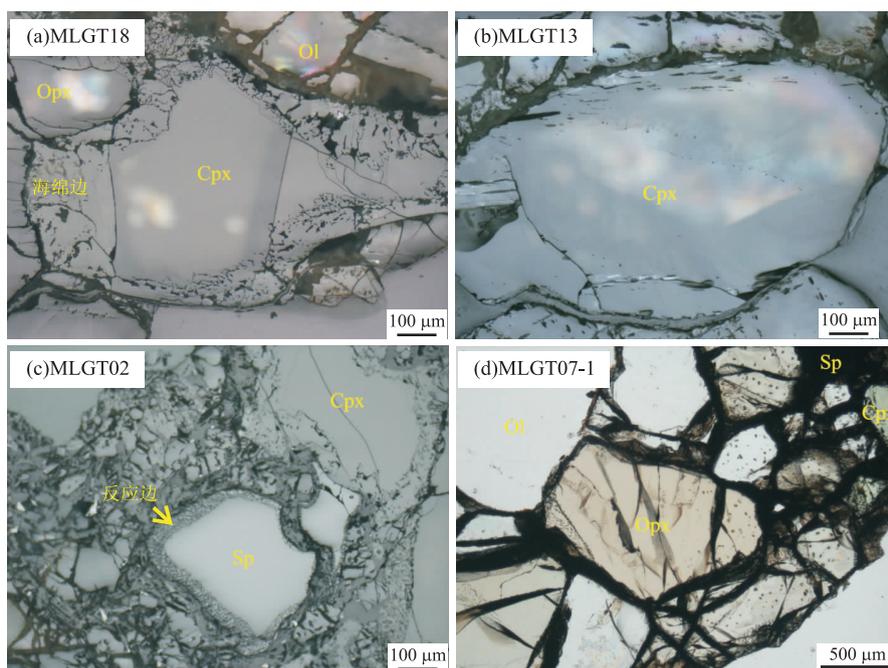


图 2 镜下矿物照片

Fig. 2 Pictures under microscope

a. 橄榄岩样品 MLGT18 的 Cpx 反射光矿物照片, 边部具明显海绵边; b. 橄榄岩样品 MLGT13 的 Cpx 反射光矿物照片, 无明显海绵边; c. 橄榄岩样品 MLGT02 的 Sp 反射光矿物照片, 边部具明显反应边; d. 橄榄岩样品 MLGT07-1 的透射光矿物照片, 图中 Ol、Opx、Cpx 和 Sp 分别表示橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石

调节矩管位置、载气和样品气流到最佳使得 H_3 杯中的 ^{88}Sr 获得最大信号强度, 同时保持较低的氧化物产率(通过监控 NIST610 中的 ThO/Th 来实现). 每个时间分辨分析数据包括大约 30 s 的空白背景信号(主要为了消除氙气和氦气流中 Kr 的背景干扰, 以及消除来自矩管和锥的少量但持续的 Rb 和 Sr 背景的影响)和随后约 50 s 的样品信号. 分析采用的激光剥蚀孔径为 $120\ \mu\text{m}$, 激光能量为 60 mJ, 剥蚀频率为 8 Hz, Sr 的检测下限为 30×10^{-6} . 采用 Tong *et al.* (2016) 报导的方法进行 ^{87}Rb 对 ^{87}Sr 的干扰校正, 指定 $^{87}\text{Rb}/^{85}\text{Rb}$ 的标准值为

0.385 710, 计算 ^{87}Rb 对 ^{87}Sr 的干扰. 然后运用指数分馏定律(Russell *et al.*, 1978), 假定 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的比值为 8.375 209(Jochum *et al.*, 2009), 作为内标校正 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的分馏. 数据处理采用 ICPMSData-Cal(Liu *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2016)完成.

4 结果

4.1 矿物原位主、微量元素特征

4.1.1 橄榄石 集宁橄榄岩包体中橄榄石成分较

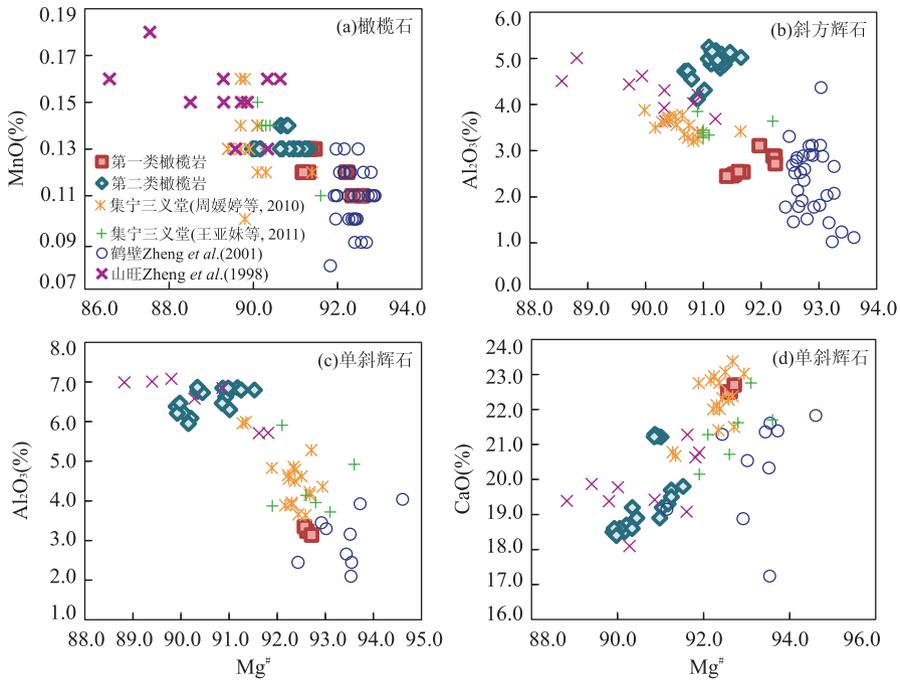


图 3 单矿物中主要元素含量与 $Mg^{\#}$ 关系

Fig. 3 Relationship between major elements and $Mg^{\#}$ in monominerals

a. 橄榄石 MnO 含量- $Mg^{\#}$ 图解; b. 斜方辉石 Al_2O_3 含量- $Mg^{\#}$ 图解; c. 单斜辉石 Al_2O_3 含量- $Mg^{\#}$ 图解; d. 单斜辉石 CaO 含量- $Mg^{\#}$ 图解; 山旺地区数据来自 Zheng *et al.* (1998), 鹤壁地区数据来自 Zheng *et al.* (2001), 集宁三义堂地区前人数据来自周媛婷等(2010)和王亚妹等(2011)

均一, 无明显核边变化见附表 2 ([www. earth-science. net/index. aspx](http://www.earth-science.net/index.aspx)). SiO_2 含量为 38. 7% ~ 41. 2%, $Mg^{\#}$ ($100 \times Mg / (Mg + Fe)$, 原子数之比) 变化范围为 89. 9~92. 5. 第一类橄榄岩中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 较高, 变化范围为 91. 1~92. 5, 而第二类橄榄岩中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 较低, 变化范围为 89. 9~91. 2. 第一类橄榄岩中橄榄石的 FeO 含量 (7. 31% ~ 9. 00%) 低于第二类橄榄岩中橄榄石的 FeO 含量 (8. 83% ~ 9. 83%), 而其 MgO 含量 (51. 05% ~ 52. 4%) 高于第二类橄榄岩中橄榄石的 MgO 含量 (48. 59% ~ 51. 54%) 见附表 2 (www. earth-science. net/index. aspx). 橄榄石中 $Mg^{\#}$ 与 MnO 成一定的负相关性(图 3a). 微量元素中 Ni 含量为 $2.602 \times 10^{-6} \sim 3.165 \times 10^{-6}$, Co 含量为 $119 \times 10^{-6} \sim 136 \times 10^{-6}$.

4. 1. 2 斜方辉石 集宁橄榄岩包体中斜方辉石的成分也无明显的核边变化见附表 3 (www. earth-science. net/index. aspx). $Mg^{\#}$ 变化范围为 90. 7 ~ 92. 5, 其中第一类橄榄岩中斜方辉石 $Mg^{\#}$ 较高 (91. 4~92. 5), 第二类橄榄岩中斜方辉石 $Mg^{\#}$ 较低 (90. 7~91. 6). 第二类橄榄岩中斜方辉石的 MgO 含量 (32. 70% ~ 34. 85%) 低于第一类橄榄岩中斜方辉石的 MgO 含量 (34. 05% ~ 35. 24%), 而 FeO 含

量 (5. 71% ~ 6. 32%)、 Al_2O_3 含量 (4. 31% ~ 5. 15%)、 TiO_2 含量 (0. 09% ~ 0. 13%) 明显高于第一类橄榄岩中斜方辉石的 FeO 含量 (4. 97% ~ 5. 92%)、 Al_2O_3 含量 (2. 45% ~ 3. 11%)、 TiO_2 含量 (0. 03% ~ 0. 12%). 斜方辉石中的 $Mg^{\#}$ 与 Al_2O_3 成一定的负相关性(图 3b).

4. 1. 3 单斜辉石 集宁橄榄岩包体中单斜辉石的主、微量数据见附表 4 (www. earth-science. net/index. aspx). $Mg^{\#}$ 变化范围为 89. 4~92. 7. 其中第一类橄榄岩中单斜辉石 $Mg^{\#}$ 较高 (92. 3~92. 7), 第二类橄榄岩中单斜辉石 $Mg^{\#}$ 较低 (89. 4~92. 0). 第一类橄榄岩中单斜辉石的 TiO_2 含量 (0. 09% ~ 0. 18%)、 Al_2O_3 含量 (3. 08% ~ 3. 71%)、MnO 含量 (0. 073% ~ 0. 091%) 和 FeO 含量 (2. 43% ~ 2. 78%) 低于第二类橄榄岩中单斜辉石的 TiO_2 含量 (0. 27% ~ 0. 64%)、 Al_2O_3 含量 (4. 86% ~ 6. 86%)、MnO 含量 (0. 081% ~ 0. 100%) 和 FeO 含量 (2. 74% ~ 3. 62%), 而 $Cr^{\#}$ (14. 9~21. 1) 高于第二类橄榄岩包体中单斜辉石的 $Cr^{\#}$ (5. 1~12. 4). 单斜辉石中 $Mg^{\#}$ 与 Al_2O_3 含量大致呈负相关, 与 CaO 含量大致呈正相关(图 3c, 3d).

第一类橄榄岩中单斜辉石 REE 含量整体较低, 轻微富集 LREE(图 4a), $(La/Yb)_N$ 范围为 1. 70~

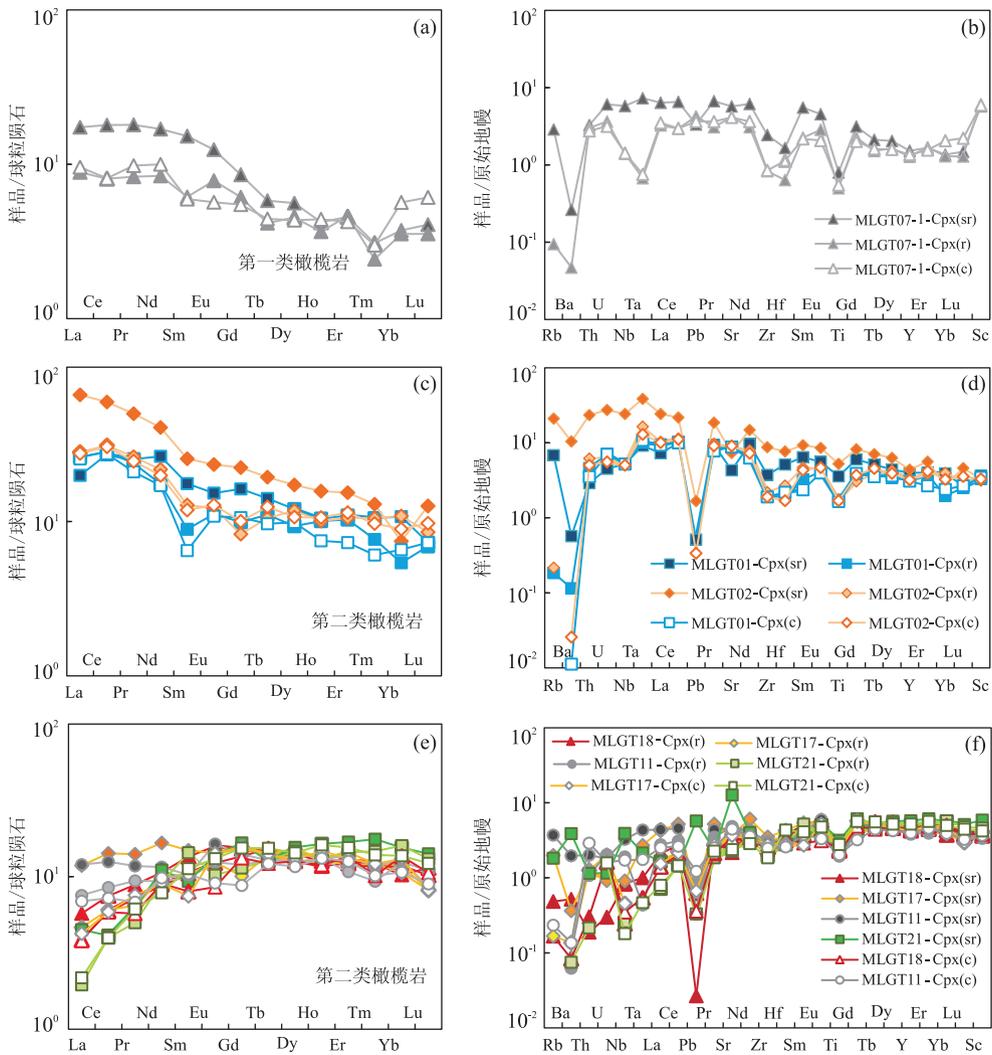


图 4 单斜辉石稀土元素配分模式图和微量元素分布模式

Fig. 4 CI-normalized REE patterns and PM-normalized trace element patterns of clinopyroxenes

a, b. 第一类橄榄岩; c, d, e, f. 第二类橄榄岩; 球粒陨石值据 Taylor and McLennan (1985), 原始地幔值据 Mcdonough and Sun (1995); 图例中 c, r 和 sr 分别表示核部、边部和海绵边

4.66, 反映其 LREE、HREE 具有一定的分异, 矿物颗粒中元素含量具明显的核边变化, 由核部向海绵边 LREE 及强不相容元素含量明显升高 (图 4a, 4b). 第二类橄榄岩中单斜辉石 LREE 的富集、亏损状况明显分为两极, 可据此再细分为两种交代程度不同的橄榄岩, 第一种以单斜辉石富集 LREE 为特征 (图 4c), $(La/Yb)_N$ 较高 (1.85~8.89), 且元素含量具明显的核边变化, 由核部向边部 REE 及强不相容元素含量明显升高 (图 4c, 4d); 第二种以单斜辉石轻微亏损 LREE 为特征 (图 4e), $(La/Yb)_N$ 较低 (0.12~1.12), 反映其 LREE、HREE 分异程度较低, 元素含量具一定的核边变化, 由核部向边部 REE 及强不相容元素含量略微升高 (图 4e, 4f). 另外, 第二类橄榄岩具明显海绵边的单斜辉石中, 海绵

边中的 REE 及强不相容元素含量值都明显高于矿物内部的含量值 (图 4c~4f). 单斜辉石海绵边的 Sr 含量明显不同于矿物内部, 但矿物颗粒内部由边到核 Sr 含量变化不大, 不同包体中单斜辉石矿物内部的 Sr 含量值见附表 6 (www.earth-science.net/index.aspx) 及其 REE 配分模式图 (图 4) 显示, 富集 LREE 的样品 Sr 含量较高 ($Sr = 80 \times 10^{-6} \sim 181 \times 10^{-6}$), 而轻微亏损 LREE 的样品 Sr 含量则相对较低 ($Sr = 44.5 \times 10^{-6} \sim 96.0 \times 10^{-6}$).

4.1.4 尖晶石 集宁橄榄岩包体中尖晶石的主、微量数据见表 5. $Mg^\#$ 变化范围为 67.4~78.9, 其中第一类橄榄岩中尖晶石 $Mg^\#$ 较低 (67.4~67.7), 第二类橄榄岩中尖晶石 $Mg^\#$ 较高 (74.3~78.9). $Cr^\#$ 的变化范围为 8.6~51.9, 其中第一类橄榄岩中尖

表 5 尖晶石主量元素(%)和微量元素(10^{-6})组成

Table 5 Major oxides (%) and trace element (10^{-6}) compositions of spinels from the Jining peridotite xenoliths

样品	MLGT01	MLGT02	MLGT07-1	MLGT11	MLGT13	MLGT17	MLGT18	MLGT21
SiO ₂	0.27	0.23	0.13	0.230	0.25	0.230	0.21	0.160
TiO ₂	0.23	0.22	0.09	0.200	0.47	0.190	0.19	0.100
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.000	0.01	0.000	0.00	0.000
MgO	21.10	20.80	17.10	21.900	16.20	21.800	22.60	23.200
Al ₂ O ₃	47.50	46.70	36.60	49.400	26.10	51.600	53.60	55.500
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.000	0.01	0.000	0.00	0.000
CaO	0.00	0.02	0.02	0.000	0.01	0.000	0.00	0.000
MnO	0.10	0.10	0.13	0.100	0.13	0.100	0.10	0.100
FeO	12.30	12.80	14.80	11.800	13.70	11.500	10.80	12.400
Mg [#]	75.40	74.30	67.40	76.800	67.70	77.200	78.90	77.000
Cr [#]	19.90	20.70	35.40	17.500	51.90	15.200	12.70	8.600
Li	0.85	0.65	1.53	0.047	0.99	0.090	0.13	0.090
Sc	1.24	1.20	1.59	1.750	3.92	0.830	0.74	0.000
V	487.00	514.00	884.00	438.000	791.00	438.000	418.00	385.000
Co	188.00	190.00	259.00	203.000	189.00	205.000	203.00	271.000
Ni	2 694.00	2 741.00	1 836.00	2 941.000	1 382.00	2 922.000	2 941.00	3 812.000
Cu	3.69	3.75	3.97	3.820	1.60	4.710	1.44	4.330
Zn	561.00	515.00	1 308.00	666.000	650.00	687.000	656.00	1 052.000

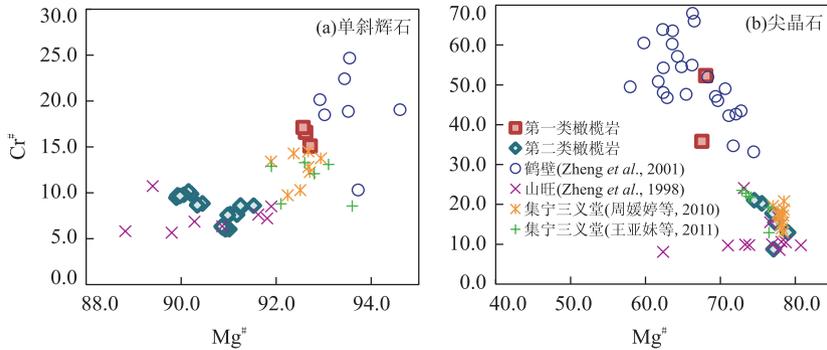


图 5 单矿物中 Cr[#] 与 Mg[#] 关系

Fig. 5 Relationship between Cr[#] and Mg[#] in monominerals

a. 单斜辉石 Cr[#]-Mg[#] 图解; b. 尖晶石 Cr[#]-Mg[#] 图解; 山旺地区数据来自 Zheng *et al.* (1998), 鹤壁地区数据来自 Zheng *et al.* (2001), 集宁三义堂地区前人数据来自周媛婷等(2010)和王亚妹等(2011)

晶石 Cr[#] 较高(35.4~51.9), 第二类橄榄岩中尖晶石 Cr[#] 较低(8.6~20.7). Mg[#] 与 Cr[#] 具一定的负相关性(图 5), Mg[#] 较低的样品 Cr[#] 较高, Mg[#] 较高的样品则 Cr[#] 较低.

4.2 单斜辉石原位 Sr 同位素组成

4 个样品中单斜辉石的 Sr 同位素组成见附表 6 (www.earth-science.net/index.aspx). ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的变化范围为 0.7024~0.7046, Rb/Sr 比值的变化范围为 0~0.0300. 第一类橄榄岩样品(MLGT07-1)和第二类橄榄岩的 LREE 富集型样品(MLGT01)中单斜辉石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值无明显核边变化,但整体比值较高,均值可达 0.7042;而第二类橄榄岩的 LREE 轻微亏损型样品(MLGT11 与

MLGT18)中单斜辉石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值整体较低,但具一定的核边变化,由核部至海绵边⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值升高(图 6).

5 讨论

5.1 集宁地区橄榄岩包体的成因

岩石圈地幔通常被认为是原始地幔经过不同程度部分熔融抽取之后的残留物,并以橄榄岩为主体. 集宁橄榄岩包体中的橄榄石 Mg[#] 与 MnO 含量呈负相关,斜方辉石 Mg[#] 与 Al₂O₃ 含量呈负相关以及单斜辉石 Mg[#] 与 Al₂O₃ 含量呈负相关(图 3),这些特征说明了这些包体经历了不同程度的部分熔融作

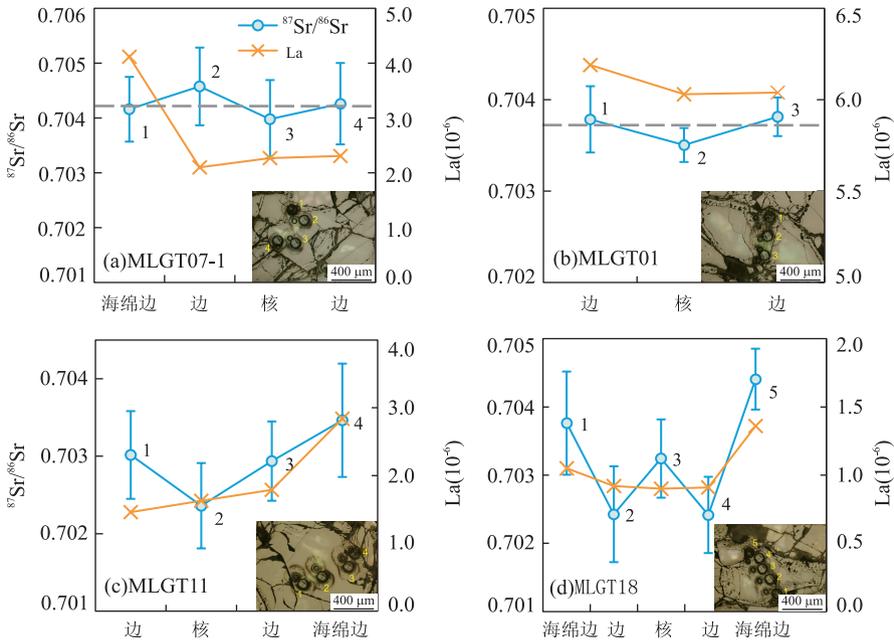


图 6 单斜辉石核-边⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值及 La 元素含量变化

Fig. 6 Core-rim variations of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios and La content across the clinopyroxene grains

a 和 b 中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的平均值分别为 0.704 2 和 0.703 7

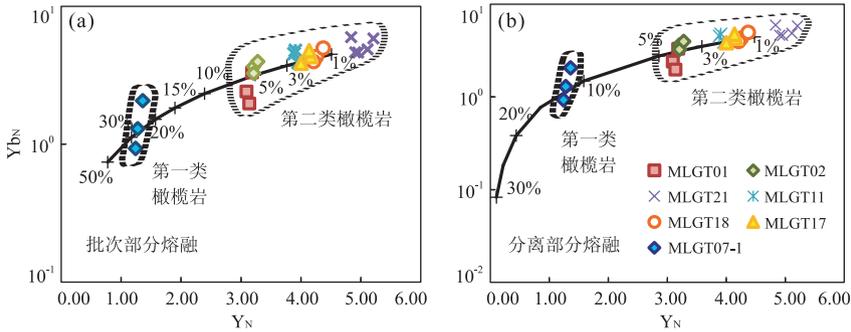


图 7 单斜辉石原始地幔归一化的部分熔融模拟

Fig. 7 Modeling of partial melting using primitive mantle normalized compositions of clinopyroxenes

原始地幔值据 Mcdonough and Sun(1995)

用. 根据 Norman(1998)计算部分熔融程度的方法, 选择单斜辉石中的中等不相容元素 Y 和 Yb 来模拟计算部分熔融程度(图 7). 通常在尖晶石相无水橄榄岩中, 微量元素的主要载体是单斜辉石, 因此它的微量元素组成可以用来反映部分熔融程度和地幔交代过程, 而 Y 和 Yb 属于重稀土元素, 一般很少受到后期地幔交代作用的影响. 结果显示集宁地区第二类橄榄岩的部分熔融程度低(批次熔融程度 < 6%, 分离部分熔融程度 < 5%), 而第一类橄榄岩经历了较高级度的部分熔融(批次部分熔融程度约 20%~30%, 分离部分熔融程度约 10%~15%). 对于橄榄岩部分熔融而言, 一般分离部分熔融相比于批次部分熔融更接近于实际情况(Norman, 1998), 因此在

部分熔融的模式选择上, 笔者更倾向于使用分离部分熔融. 此外, 本文还利用 Hellebrand *et al.* (2001) 提出的尖晶石 Cr[#] 计算橄榄岩部分熔融程度的方法加以佐证, 其结果与单斜辉石微量元素模拟计算得到的分离部分熔融结果相近(图 8), 据此笔者认为集宁地区第一类橄榄岩的部分熔融程度高(13%~18%), 而第二类橄榄岩的部分熔融程度低(小于 8%).

前人的研究结果表明(Zheng *et al.*, 1998, 2001), 河南鹤壁地区高 Mg[#] 橄榄岩包体代表了古老克拉通地幔岩石, 而山东山旺地区低 Mg[#] 橄榄岩包体则具有新生岩石圈地幔的特征. 将集宁地区橄榄岩与前两者进行对比(图 3, 图 5), 集宁地区的样

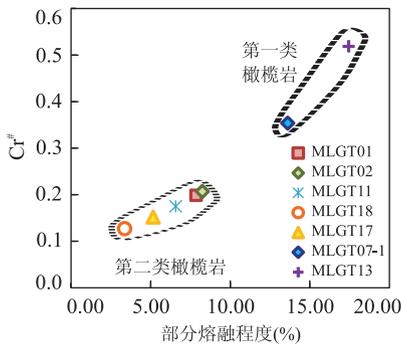


图 8 尖晶石 Cr# 的部分熔融模拟

Fig. 8 Modeling of partial melting using Cr# of spinels

品分别落在两者各自的区域内,并有向过渡区分布的趋势.经历了高程度熔融的太古宙克拉通岩石圈地幔相对难熔,有较高比例的方辉橄榄岩,即使是二辉橄榄岩也具有单斜辉石含量低、橄榄石和单斜辉石的 Mg# 高、尖晶石 Cr# 高的特点,而显生宙地幔特征恰好相反(郑建平等, 2006).集宁地区第一类橄榄岩包体为方辉橄榄岩和贫单斜辉石的二辉橄榄岩,其中橄榄石的 Mg# 大于 92.0,最高可达 92.5,与传统克拉通地幔橄榄岩的 Mg# 一致,其尖晶石中的 Cr# 也都较高,落在鹤壁橄榄岩的区域内(图 5),这些特征指示该地区第一类橄榄岩可能为太古宙古老岩石圈地幔的残留.相反,第二类二辉橄榄岩中橄榄石的 Mg# 则较低(Mg# = 88.8~90.7),与新生岩石圈地幔橄榄岩 Mg# 值类似,其尖晶石中的 Cr# 较低,落在山旺橄榄岩的区域内(图 5),这些特征指示该地区第二类橄榄岩可能为新生饱满的岩石圈地幔.周媛婷等(2010)和王亚妹等(2011)的研究表明,集宁地区岩石圈地幔存在饱满型和过渡型,这与本文第二类橄榄岩相类似(图 3,图 5).上述现象说明集宁地区的岩石圈地幔性质不均一,新生饱满和古老难熔型地幔并存.

Zhang *et al.* (2012)和 Liu *et al.* (2011)分别研究了集宁橄榄岩的 Re-Os 同位素特征,发现这些包体有从现今到元古代的 Re 亏损模式年龄,变化范围极广,最老为 1.4 Ga,表明集宁地区在新生代时存在年龄至少为元古代的岩石圈地幔.同时,Zhang *et al.* (2012)认为¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 的富集抹去了相对早期的熔体从古老难熔橄榄岩中抽取的记录,因此这些岩石的 Re-Os 数据不适宜用于年龄计算,该地区的岩石圈地幔应该由较老的岩石圈的残留组成,并受到了后期熔/流体的交代作用.另一方面,Kubo (2002)报导在 IWANADAIKE 岛的 HD-2 剖面中发现了高 Mg# (平均为 92.5)的岛弧橄榄岩,认为岛弧地区由于受洋壳脱水作用,能造成地幔楔地区

高程度地熔融,从而产生分布广泛的高 Mg# 橄榄岩.但是集宁地区大部分样品的 Mg# 都相对较低(89.4~91.7)(杜蔚等, 2006; 周媛婷等, 2010; 王亚妹等, 2011; Zhang *et al.*, 2012),仅本文的一个样品(MLGT13)中橄榄石的 Mg# 大于 92.因此笔者更倾向于第一种解释,认为方辉橄榄岩和贫单斜辉石的二辉橄榄岩中橄榄石的高 Mg# 是古老岩石圈地幔高程度熔融的结果,样品可能属于太古代古老岩石圈地幔的残留.此外,吴福元等(2008)认为显生宙以来的克拉通破坏主要集中在东部板块,而西部板块只有局部地区被破坏,板块内部仍可能留有太古代岩石圈的残留.本文中方辉橄榄岩样品的发现,可能支持了这种看法.

5.2 地幔交代作用

交代作用有显性交代(即有典型的交代矿物生成)和隐性交代(无明显交代标志出现)两种.显性交代会有特征矿物产出,如含水矿物金云母、角闪石等,河北汉诺坝、内蒙古集宁、河南鹤壁 3 地出露的新生代玄武岩中曾报导存在含金云母的地幔包体(赵新苗等, 2007),在山东蒙阴、辽宁复县等东部地区古生代金伯利岩中也都发现过金云母地幔包体(路凤香等, 1991; 郑建平和路凤香, 1999).对于隐性交代作用,全岩或组成矿物的成分可在一定程度上反映出地幔性质与深部作用过程(郑建平等, 2007),无水橄榄岩中单斜辉石由于熔点低而通常记录着丰富的部分熔融作用和地幔交代作用信息(Blundy and Dalton, 2000),其微量元素丰度及特征是判断交代作用发生与否、交代介质性质的有效指标.虽然本文的样品中未发现明显的交代矿物,但橄榄岩样品中单斜辉石 Mg# 和 CaO 含量呈正相关(图 3d),部分样品单斜辉石具有 LREE 富集型配分模式图, Y 和 Yb 相关图中部分样品明显偏离部分熔融趋势线(图 7),且大部分样品的矿物组成落在原始地幔部分熔融残余体的标准矿物组成区域之外(图 9).加之赵新苗等(2007)和 Zhang *et al.* (2012)在集宁地区曾发现有含金云母的二辉橄榄岩,这些特征都表明集宁地区的橄榄岩经历了不同程度的地幔交代作用.此外,部分样品的单斜辉石边部具明显的海绵边,其微量元素的特征明显与矿物内部不同,由地幔捕虏体减压或加“水”熔融形成的单斜辉石海绵边通常比其内部相对富集 Ca、Ti 和绝大部分微量元素, Cr# 较高,而相对亏损 Na、Al 和 Fe(Su *et al.*, 2011),而文中橄榄岩包体的单斜辉石海绵边相对其内部 Ca、Ti、Cr#、Na、Al 和 Fe 的含量有高

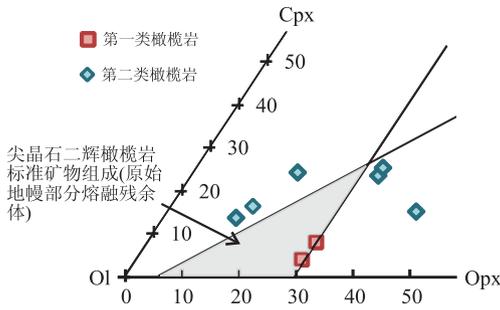


图 9 集宁橄榄岩包体矿物组成三角图解

Fig. 9 Triangular plot of modal composition of the Jining peridotite xenoliths

尖晶石二辉橄榄岩标准矿物组成据 Kelemen *et al.* (1992)

有低,无明显规律,因此认为其形成原因不是地幔捕虏体减压或加“水”熔融,而是由橄榄岩与不同类型熔体在不同阶段发生交代作用造成的。

通常情况下,地幔交代介质主要有碳酸盐熔体 (Rudnick *et al.*, 1993)、富碱含挥发分的硅酸盐熔体 (Wulff *et al.*, 1996) 或富水流体 (Ionov *et al.*, 1993), 其中碳酸盐岩熔体和硅酸盐熔体是较为常见的交代介质。从岩石矿物学角度分析,本文中部分样品的斜方辉石含量明显高于原始地幔部分熔融残余体中的含量 (图 9), 即斜方辉石相对过剩, 说明其 SiO_2 含量相对富集, 这部分橄榄岩中的斜方辉石可能为单斜辉石与富硅熔/流体反应的产物 (Kelemen *et al.*, 1992, 1998)。从微量元素角度分析, 一般根据单斜辉石 Ti/Eu 比值可以区分碳酸盐熔体交代作用和硅酸盐熔体交代作用。单斜辉石 $\text{Ti}/\text{Eu} < 1500$ 一般被认为是碳酸盐熔/流体交代作用的结果 (Rudnick *et al.*, 1993; Coltorti *et al.*, 1999), 并且碳酸盐熔体交代一般具有亏损高场强元素、富集大离子亲石元素和轻稀土元素 (Coltorti *et al.*, 1999)、高 Th 和 U 含量、高 La/Yb 、 Nb/La 、 Ca/Al 和 Zr/Hf 比值的特征 (Ionov *et al.*, 1993; Rudnick *et al.*, 1993)。将本文及前人的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 Ti/Eu 值数据投图, 结果显示本文中第二类橄榄岩大部分都具有低 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值和高 Ti/Eu 值的特征, 落在硅酸盐交代区域 (图 10), 与前人的研究结果相同, 且各样品中单斜辉石 Ti/Eu 值存在一定核边变化; 而第一类橄榄岩具有较高 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值和低 Ti/Eu 值的特征, 落在碳酸盐交代区域 (图 10), 单斜辉石 Ti/Eu 比值由核部向海绵边明显降低, 其高场强元素的亏损 (图 4) 和高 Ca/Al 见附表 4 (www.earth-science.net/index.aspx) 的特征也十

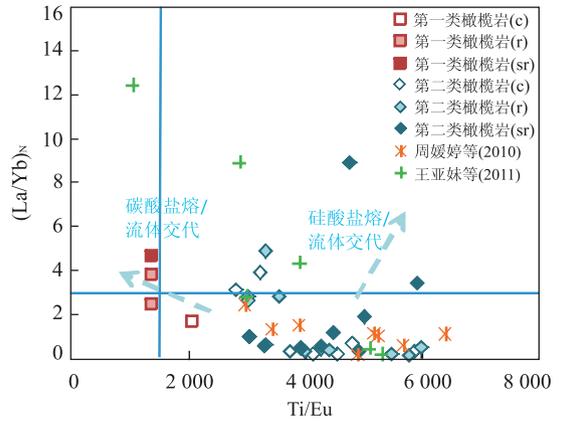
图 10 单斜辉石的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - Ti/Eu 值

Fig. 10 Plots of $(\text{La}/\text{Yb})_N$ versus Ti/Eu in clinopyroxenes 数据来自周媛婷等 (2010) 和王亚妹等 (2011); 图例中 c、r 和 sr 分别表示核部、边部和海绵边

分明。同时, 图 4 显示集宁橄榄岩的单斜辉石中有 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等高场强元素的负异常, 而根据张文慧等 (2005) 报导的集宁地区玄武岩的地球化学特征, 不具有亏损 HFSE 的特征, 且有轻微的 Th、U 正异常, 因此其微量元素的变化不太可能是后期寄主岩石影响, 更可能是地幔交代作用导致的。以上特征都说明集宁岩石圈地幔经历了复杂的、多阶段的交代过程, 既有硅酸盐熔体的交代又有碳酸盐熔体的改造。此外, 第二类橄榄岩不同样品中单斜辉石的 Ti/Eu 比值有高有低 (图 10), 且部分矿物颗粒由核部向海绵边 Ti/Eu 值升高, 其余则相反见附表 4 (www.earth-science.net/index.aspx)。这可能由于橄榄岩在与熔体反应过程中先消耗熔体中的 SiO_2 , 使得 CO_2 相对富集, 再与其反应而成; 也有可能是由于样品先后经历了不同阶段的硅酸盐熔体和碳酸盐熔体交代作用造成的。

此外, 地幔原生的碳酸盐熔体通常被认为是稳定克拉通的产物 (徐荣等, 2013), 具有高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值 (通常大于 $3 \sim 4$; Coltorti *et al.*, 1999) 且低 Ti/Eu 值的特征, 第一类橄榄岩样品落在该区域内 (图 10), 说明其可能代表了古老的岩石圈地幔物质, 这也为前文的观点再一次提供了证据。

5.3 与古亚洲洋俯冲有关的熔体—橄榄岩反应

本文对样品 MLGT07-1、MLGT01、MLGT11 和 MLGT18 中的单斜辉石进行了原位 Sr 同位素分析, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变化范围为 $0.7024 \sim 0.7046$ 。因为矿物的 Rb 含量很低见附表 4 (www.earth-science.net/index.aspx; 图 4), Rb/Sr 比值仅 $0 \sim 0.030$, 所以较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值不太可能为放射成

因,而可能为受到高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比物质交代造成.图6显示这4个样品中单斜辉石的 Sr 同位素比值的核边变化.样品 MLGT07-1 与 MLGT01 中单斜辉石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值无明显核边变化,但整体比值较高,同时其 REE 配分模式图显示为富集 LREE 的类型(图4),LREE 和 Th、U 等元素由核部至海绵边明显升高.根据 Sneeringer *et al.* (1981)、Orman *et al.* (1998)和 Orman *et al.* (2001)的研究,单斜辉石中 Sr 同位素的扩散速率大于 LREE、Th 和 U 的扩散速率,则当 Sr 同位素比值在单斜辉石颗粒内部达到均一时,LREE、Th 和 U 元素的含量可能还未达到均一而存在核边变化.这说明样品 MLGT07-1 与 MLGT01 可能经历了较高程度的交代作用,导致其单斜辉石内部 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值整体较高且均一,同时 LREE 和 Th、U 等元素存在明显核边变化(图4).而样品 MLGT11 与 MLGT18 中单斜辉石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值整体较低,具较明显的核边变化,由核部至海绵边 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显升高,同时其 REE 配分模式图显示为轻微亏损 LREE 的类型(图4),LREE 和 Th、U 等元素含量低且核边变化不明显,说明这两个样品可能经历了较为轻微的交代作用,使其单斜辉石内部 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值出现一定程度上的不均一现象.

对于集宁地区橄榄岩交代物质的来源,Zhang *et al.* (2012)和周媛婷等(2010)认为该区域岩石圈地幔可能发生了新生地幔物质对古老地幔的不均匀混合和置换作用,同时也存在洋壳物质的再循环过程.幔源火成碳酸盐熔体一般富集强不相容元素(Ba、Sr、Nb、Th、U 和 LREE)且具 LREE 强烈富集的配分模式(Jones *et al.*, 2013)、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值高,因此起源于软流圈的熔体引起的交代作用仅能造成强不相容元素的富集,而对地幔橄榄岩 Sr-Nd 同位素体系的影响不大(张宏福, 2006).而再循环沉积碳酸盐岩来源的熔体具明显 Sr 正异常、低 REE 含量、高 LILE 和 HFSE 含量以及低 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值的特征(Liu *et al.*, 2015).因此起源于再循环洋壳或陆壳的熔/流体引起的交代作用不仅会造成 LREE 和 LILE 的富集,还会改变 Li-Sr-Nd 同位素的组成(Griffin *et al.*, 2003; Rudnick and Ionov, 2007; Tang *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013a; Xu *et al.*, 2013b; Wang *et al.*, 2016).本文中部分样品显示为碳酸盐熔体交代造成且 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值较低(图10),单斜辉石中 LREE 与 LILE 同时富集,且由核部向海绵边含量明显升高(图4),加之 Zhang

et al. (2012)报导了集宁地区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高达 0.7069 的橄榄岩样品,这些特征说明碳酸盐熔体来源于再循环洋壳或陆壳而非软流圈,即该地区的岩石圈地幔经历过俯冲洋壳或循环陆壳的改造.这与前人提出的汉诺坝(Liu *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2009; Liu, 2010; He *et al.*, 2013)、大同(Wang *et al.*, 2016)地区之下的岩石圈地幔被俯冲进入地幔的洋壳物质改造的猜想一致.此外,与 Zhang *et al.* (2012)报道的集宁地区高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值橄榄岩相比,本文样品中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值不是很高,可能是由于橄榄岩不同部位的交代程度不同而造成的.

Davis *et al.* (2002)和 Cope *et al.* (2010)基于对大地构造演化的研究,提出古亚洲洋板块(PAOP)南向俯冲对华北克拉通造成了较大影响的观点.关于周边其他板块俯冲对华北克拉通北缘的贡献,根据地球物理方法的观察(Huang and Zhao, 2006),笔者认为华北克拉通东部太平洋板块的俯冲未到达此区域,由此排除了太平洋板块俯冲的贡献;而根据阎国翰等(2007)的研究,由周边板块向华北克拉通俯冲形成的火成碳酸岩主要分布在华北克拉通的北缘和南缘,因此集宁、大同和汉诺坝等地再循环地壳物质对岩石圈地幔的改造作用受古亚洲洋板块南向俯冲的影响更显著.集宁、大同和汉诺坝玄武岩区均位于华北克拉通北缘(图1),临近古亚洲洋板块的俯冲带,Chen *et al.* (2016)对汉诺坝碳酸岩侵入体的研究为古亚洲洋南向俯冲至华北克拉通北缘之下提供了直接的证据.因此,古亚洲洋板块南向俯冲释放出的熔/流体可能为集宁地区岩石圈地幔的改造提供了丰富的物质来源.除再循环地壳物质的贡献外,洋壳俯冲过程中还可能引起热化学侵蚀作用(Zheng *et al.*, 1998; Xu, 2001).同时,俯冲作用还可以扰动下部的软流圈,使得软流圈物质沿岩石圈薄弱带上涌,侵蚀并置换上覆岩石圈地幔,从而引起岩石圈的大幅减薄(郑建平等, 2006, 2007).

6 结论

内蒙古集宁橄榄岩包体主要是尖晶石橄榄岩,有代表新生饱满岩石圈地幔的尖晶石二辉橄榄岩,也有代表古老难熔岩石圈地幔的方辉橄榄岩和贫单斜辉石的尖晶石二辉橄榄岩,即此地区的岩石圈地幔性质不均一,新生饱满和古老难熔型并存.部分样品的单斜辉石具明显的海绵边,其微量元素、Sr 同位素组成也与矿物内部存在分异.单斜辉石微量元

素和 Sr 同位素的核边变化特征表明集宁地区的橄榄岩曾经经历过幔源碳酸盐和硅酸盐熔体的交代改造。这些交代介质可能为来源于古亚洲洋板块南向俯冲时释放的熔/流体。

References

- 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. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 139(3): 356–371. doi: 10.1007/s004100000139
- Brey, G. P., Köhler, T., 1990. Geothermobarometry in Four-Phase Lherzolites II. New Thermobarometers, and Practical Assessment of Existing Thermobarometers. *Journal of Petrology*, 31(6): 1353–1378. doi: 10.1093/peetrology/31.6.1353
- Cao, Z. Q., Zhai, W. J., Jiang, X. F., et al., 2016. About 2.5 Ga Tectono-Metamorphic Event in Southern Margin of North China Craton and Its Significance. *Earth Science*, 41(4): 570–585 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C. F., Liu, Y. S., Stephen, F., 2016. Paleo-Asian Oceanic Slab Under the North China Craton Revealed by Carbonatites Derived from Subducted Limestones. *Geology*, 44(12): 1039–1042. doi: 10.1130/G38365.1
- Coltorti, M., Bonadiman, C., Hinton, R. W., et al., 1999. Carbonatite Metasomatism of the Oceanic Upper Mantle; Evidence from Clinopyroxenes and Glasses in Ultramafic Xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean. *Journal of Petrology*, 40(1): 133–165. doi: 10.1093/peetroj/40.1.133
- Cope, T., Ritts, B. D., Darby, B. J., et al., 2010. Late Paleozoic Sedimentation on the Northern Margin of the North China Block: Implications for Regional Tectonics and Climate Change. *International Geology Review*, 47(3): 270–296. doi: 10.2747/0020-6814.47.3.270
- Davis, G. A., Yadong, Z., Cong, W., 2002. Mesozoic Tectonic Evolution of the Yanshan Fold and Thrust Belt with Emphasis On Hebei and Liaoning Provinces, Northern China. *Beijing Geology*, 10(2): 171–197
- Deng, J. F., Su, S. G., Liu, C., et al., 2006. Discussion on the Lithospheric Thinning of the North China Craton: Delamination? or Thermal Erosion and Chemical Metasomatism? *Earth Science Frontiers*, 13(2): 105–119 (in Chinese with English abstract).
- Du, W., Han, B. F., Zhang, W. H., et al., 2006. The Discovery of Peridotite Xenoliths and Megacrysts in Jining, Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (01): 13–24 (in Chinese with English abstract).
- Fan, W., Menzies, M., 1992. Destruction of Aged Lower Lithosphere and Accretion of Asthenosphere Mantle Beneath Eastern China. *Geotectonica et Metallogenia*, 16: 171–180.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Carlson, R. W., et al., 2002. Re-Os Evidence for Replacement of Ancient Mantle Lithosphere Beneath the North China Craton. *Earth & Planetary Science Letters*, 198(3–4): 307–322. doi: 10.1016/S0012-821X(02)00489-2
- Gao, S., Rudnick, R. L., Xu, W., et al., 2008. Recycling Deep Cratonic Lithosphere and Generation of Intraplate Magmatism in the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 270(1–2): 41–53. doi: 10.1016/j.epsl.2008.03.008
- Grégoire, M., McInnes, B. I. A., O'Reilly, S. Y., 2001. Hydrous Metasomatism of Oceanic Sub-Arc Mantle, Lihir, Papua New Guinea; Part 2. Trace Element Characteristics of Slab-Derived Fluids. *Lithos*, 59(3): 91–108. doi: 10.1016/S0024-4937(01)00058-5
- Griffin, W. L., Andi, Z., O'Reilly, S. Y., et al., 1998. Phanerozoic Evolution of the Lithosphere Beneath the Sino-Korean Craton. *Geodynamics Series*, 27: 107–126. doi: 10.1029/GD027p0107
- Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., Abe, N., et al., 2003. The Origin and Evolution of Archean Lithospheric Mantle. *Precambrian Research*, 127(1–3): 19–41. doi: 10.1016/S0301-9268(03)00180-3
- He, D. T., Liu, Y. S., Tong, X. R., et al., 2013. Multiple Exolutions in a Rare Clinopyroxene Megacryst from the Hannuoba Basalt, North China; Implications for Subducted Slab-Related Crustal Thickening and Recycling. *Lithos*, 177(3): 136–147. doi: 10.1016/j.lithos.2013.06.018
- Hellebrand, E., Snow, J. E., Dick, H. J., et al., 2001. Coupled Major and Trace Elements as Indicators of the Extent of Melting in Mid-Ocean-Ridge Peridotites. *Nature*, 410(6829): 677–81. doi: 10.1038/35070546
- Huang, J., Zhao, D., 2006. High-Resolution Mantle Tomography of China and Surrounding Regions. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 111(B9): 4813–4825. doi: 10.1029/2005JB004066
- Ionov, D. A., O'Reilly, S. Y., Dupuy, C., et al., 1993. Carbonated Peridotite Xenoliths From Spitsbergen; Implications for Trace Element Signature of Mantle Carbonate Metasomatism. *Earth & Planetary Science Letters*, 119(3): 283–297. doi: 10.1016/0012-821X(93)90139-Z

- Jochum, K. P., Stoll, B., Weis, U., et al., 2009. In Situ Sr Isotopic Analysis of Low Sr Silicates Using LA-ICP-MS. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(13): A598. doi:10.1039/B905045K
- Jones, A. P., Genge, M., Carmody, L., 2013. Carbonate Melts and Carbonatites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75(1): 289–322. doi:10.2138/rmg.2013.75.10
- Kelemen, P. B., Dick, H. J. B., Quick, J. E., 1992. Formation of Harzburgite by Pervasive Melt/Rock Reaction in the Upper Mantle. *Nature*, 358(6388): 635–641. doi:10.1038/358635a0
- Kelemen, P. B., Hart, S. R., Bernstein, S., 1998. Silica Enrichment in the Continental Upper Mantle via Melt/Rock Reaction. *Earth & Planetary Science Letters*, 164(1): 387–406. doi:10.1016/S0012-821X(98)00233-7
- Kubo, K., 2002. Dunite Formation Processes in Highly Depleted Peridotite: Case Study of the Iwanaidake Peridotite, Hokkaido, Japan. *Journal of Petrology*, 43(3): 423–448. doi:10.1093/petrology/43.3.423
- Li, S. G., Xiao, Y. L., Liu, D. L., et al., 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and Formation of Coesite-Bearing Eclogites: Timing and Processes. *Chemical Geology*, 109(1–4): 89–111. doi:10.1016/0009-2541(93)90063-O
- Lin, J., Liu, Y. S., Yang, Y. H., et al., 2016. Calibration and Correction of LA-ICP-MS and LA-MC-ICP-MS Analyses for Element Contents and Isotopic Ratios. *Solid Earth Sciences*, 1(1): 5–27. doi:10.1016/j.sesci.2016.04.002
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3 800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339. doi:10.1130/0091-7613(1992)020<0339:ROMCIT>2.3.CO;2
- Liu, J. G., Rudnick, R. L., Walker, R. J., et al., 2011. Mapping Lithospheric Boundaries Using Os Isotopes of Mantle Xenoliths: An Example from the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13): 3881–3902. doi:10.1016/j.gca.2011.04.018
- Liu, Y. S., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: UPb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 392–9. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Gao, S., Lee, C. T. A., et al., 2005. Melt-Peridotite Interactions: Links between Garnet Pyroxenite and High-Mg[#] Signature of Continental Crust, Earth Planet. *Earth & Planetary Science Letters*, 234(1–2): 39–57. doi:10.1016/j.epsl.2005.02.034
- Liu, Y. S., He, D. T., Gao, C. G., et al., 2015. First Direct Evidence of Sedimentary Carbonate Recycling in Subduction-Related Xenoliths. *Scientific Reports*, 5: 11547. doi:10.1038/srep11547
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Lu, F. X., Han, Z. G., Zheng, J. P., et al., 1991. Characteristic of Paleozoic Mantle-Lithosphere in Fuxian, Liaoning Province. *Geological Science and Technology Information*, (S1): 2–20, 141 (in Chinese with English abstract).
- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253. doi:10.1016/0009-2541(94)00140-4
- 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. *Journal of the Geological Society*, 76(1): 71–81
- Menzies, M. A., Xu, Y., 2013. Geodynamics of the North China Craton. *Mantle Dynamics & Plate Interactions in East Asia*, 27(1): 155–165. doi:10.1144/GSL.SP.1993.076.01.04
- Norman, M. D., 1998. Melting and Metasomatism in the Continental Lithosphere: Laser Ablation ICPMS Analysis of Minerals in Spinel Lherzolites From Eastern Australia. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 130(3–4): 240–255. doi:10.1007/s004100050363
- Orman, J. A. V., Grove, T. L., Shimizu, N., 1998. Uranium and Thorium Diffusion in Diopside. *Earth & Planetary Science Letters*, 160(160): 505–519. doi:10.1016/S0012-821X(98)00107-1
- Orman, J. A. V., Grove, T. L., Shimizu, N., 2001. Rare Earth Element Diffusion in Diopside: Influence of Temperature, Pressure, and Ionic Radius, and an Elastic Model for Diffusion in Silicates. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 141(6): 687–703. doi:10.1007/s004100100269
- Rudnick, R. L., Gao, S., Ling, W., et al., 2004. Petrology and Geochemistry of Spinel Peridotite Xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton. *Lithos*, 77(1–4): 609–637. doi:10.1016/j.lithos.2004.03.033
- Rudnick, R. L., Ionov, D. A., 2007. Lithium Elemental and

- Isotopic Disequilibrium in Minerals From Peridotite Xenoliths from Far-East Russia; Product of Recent Melt/Fluid—Rock Reaction. *Earth & Planetary Science Letters*, 256(1–2): 278–293. doi:10.1016/j.epsl.2007.01.035
- Rudnick, R. L., McDonough, W. F., Chappell, B. W., 1993. Carbonatite Metasomatism in the Northern Tanzanian Mantle; Petrographic and Geochemical Characteristics. *Earth & Planetary Science Letters*, 114(4): 463–475. doi:10.1016/0012-821X(93)90076-L
- Russell, W. A., Papanastassiou, D. A., Tombrello, T. A., 1978. Ca Isotope Fractionation On the Earth and Other Solar System Materials. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(8): 1075–1090. doi:10.1016/0016-7037(78)90105-9
- Santosh, M., 2010. Assembling North China Craton within the Columbia Supercontinent; The Role of Double-Sided Subduction. *Precambrian Research*, 178(1–4): 149–167. doi:10.1016/j.precamres.2010.02.003
- Sneeringer, M., Hart, S. R., Shimizu, N., 1981. Strontium and Samarium Diffusion in Diopside. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(8): 1589–1608. doi:10.1016/0016-7037(84)90329-6
- Song, B., Nutman, A. P., Liu, D. Y., et al., 1996. 3800 to 2500 Ma Crustal Evolution in the Anshan Area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1–3): 79–94. doi:10.1016/0301-9268(95)00070-4
- Su, B. X., Zhang, H. F., Sakyi, P. A., et al., 2011. The Origin of Spongy Texture in Minerals of Mantle Xenoliths From the Western Qinling, Central China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(3): 465–482. doi:10.1007/s00410-010-0543-x
- Tang, Y. J., Zhang, H. F., Ying, J. F., 2013. Secular Evolution of Lithospheric Mantle Beneath the Central North China Craton: Implication from Basaltic Rocks and Their Xenoliths. *Petrology—New Perspectives and Applications*, doi:10.5772/230
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust; Its Composition and Evolution, an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Blackwell Scientific Publication, Blackwell, 328.
- Tong, X. R., Liu, Y. S., Hu, Z. C., et al., 2016. Accurate Determination of Sr Isotopic Compositions in Clinopyroxene and Silicate Glasses by LA-MC-ICP-MS. *Geostandards & Geoanalytical Research*, 40(1): 85–99. doi:10.1111/j.1751-908X.2015.00315.x
- Wang, C. Y., Liu, Y. S., Min, N., et al., 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. doi:10.1016/j.lithos.2015.12.011
- Wang, Y. M., Griffin, W. L., Han, B. F., 2011. A Preliminary Study on the Cenozoic Lithospheric Mantle Beneath the Northern Part of the Western North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2912–2926 (in Chinese with English abstract).
- Windley, B. F., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China; Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 8–1. doi:10.1029/2002TC001484
- 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. *American Journal of Science*, 310(10): 1250–1293. doi:10.2475/10.2010.03
- Wu, F. Y., Walker, R. J., Ren, X. W., et al., 2003. Osmium Isotopic Constraints On the Age of Lithospheric Mantle Beneath Northeastern China. *Chemical Geology*, 196(1–4): 107–129. doi:10.1016/S0009-2541(02)00409-6
- Wu, F. Y., Xu, Y. G., Gao, S., et al., 2008. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145–1174 (in Chinese with English abstract).
- Wulff, P. E., Neumann, E. R., Jensen, B. B., 1996. The Upper Mantle Under La Palma, Canary Islands; Formation of Si-K-Na-rich Melt and its Importance as a Metasomatic Agent. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 125(2–3): 113–139. doi:10.1007/s004100050210
- Xu, R., Liu, Y. S., Tong, X. R., et al., 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. *Chemical Geology*, 354: 107–123. doi:10.1016/j.chemgeo.2013.06.022
- Xu, R., Liu, Y. S., Zong, K. Q., et al., 2013a. Microgeochemistry of Peridotite Xenoliths from Kuandian; Implications for Evolution of Lithospheric Mantle. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (5): 613–636 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Hergt, J. M., Gao, S., et al., 2008. Interaction of Adakitic Melt-Peridotite: Implications for the High-Mg[#] Signature of Mesozoic Adakitic Rocks in the Eastern North China Craton. *Earth & Planetary Science Letters*, 265(1): 123–137. doi:10.1016/j.epsl.2007.09.041

- Xu, W. L., Zhou, Q. J., Pei, F. P., et al., 2013b. Destruction of the North China Craton: Delamination or Thermal/Chemical Erosion? Mineral Chemistry and Oxygen Isotope Insights from Websterite Xenoliths. *Gondwana Research*, 23 (1): 119–129. doi:10.1016/j.gr.2012.02.008
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-Tectonic Destruction of the Archaean Lithospheric Keel Beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, Timing and Mechanism. *Physics & Chemistry of the Earth Part A Solid Earth & Geodesy*, 26 (9): 747–757. doi:10.1016/S1464-1895(01)00124-7
- Xu, Y. G., 2002. Evidence for Crustal Components in the Mantle and Constraints On Crustal Recycling Mechanisms: Pyroxenite Xenoliths from Hannuoba, North China. *Chemical Geology*, 182 (2): 301–322. doi:10.1016/S0009-2541(01)00300-X
- Xu, Y. G., Blusztajn, J., Ma, J., et al., 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 (1–2): 25–42. doi:10.1016/j.lithos.2007.04.005
- Xu, Y. G., Shi, L., 2004. Contrasting Cenozoic Lithospheric Evolution and Architecture in the Western and Eastern Sino-Korean Craton: Constraints from Geochemistry of Basalts and Mantle Xenoliths. *Journal of Geology*, 112 (5): 593–605. doi:10.1086/422668
- Yan, G. H., Mou, B. L., Zeng, Y. S., et al., 2007. Igneous Carbonatites in North China Craton: The Temporal and Spatial Distribution, Sr and Nd Isotopic Characteristics and Their Geological Significance. *Geological Journal of China Universities*, (3): 463–473 (in Chinese with English abstract).
- Ye, H., 1987. The Cenozoic Tectonic Evolution of the Great North China: Two Types of Rifting and Crustal Necking in the Great North China and Their Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 133 (3): 217–227. doi:10.1016/0040-1951(87)90265-4
- Zhai, M. G., 2008. Lower Crust and Lithospheric Mantle Beneath the North China Craton before the Mesozoic Lithospheric Disruption. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (10): 2185–2204 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., 2006. Peridotite-Melt Interaction: an Important Mechanism for the Compositional Transformation of Lithospheric Mantle. *Earth Science Frontiers*, 13 (2): 065–075 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Goldstein, S. L., Zhou, X. H., et al., 2009. Comprehensive Refertilization of Lithospheric Mantle Beneath the North China Craton: Further Os-Sr-Nd Isotopic Constraints. *Journal of the Geological Society*, 166 (2): 249–259. doi:10.1144/0016-76492007-152
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2003. Secular Evolution of the Lithosphere Beneath the Eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic Basalts and High-Mg Andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 (22): 4373–4387. doi:10.1016/S0016-7037(03)00377-6
- Zhang, H. F., Sun, Y. L., Tang, Y. J., et al., 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. doi:10.1016/j.lithos.2012.01.027
- Zhang, W. H., Han, B. F., Du, W., et al., 2005. Characteristic of Mantle Source for Jining Cenozoic Basalts from Southern Inner Mongolia: Evidence from Element and Sr-Nd-Pb Isotopic Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (06): 1569–1582 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean Blocks and their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and P-T Path Constraints and Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 107 (1–2): 45–73. doi:10.1016/S0301-9268(00)00154-6
- Zhao, X. M., Zhang, H. F., Zhu, X. K., et al., 2007. Metasomatism of Mesozoic and Cenozoic Lithospheric Mantle Beneath the North China Craton: Evidence from Phlogopite-Bearing Mantle Xenoliths. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (06): 1281–1293 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71 (21): 5203–5225. doi:10.1016/j.gca.2007.07.028
- Zheng, J. P., Lu, F. X., 1999. Mantle Xenoliths from Kimberlites, Shandong and Liaoning: Paleozoic Mantle Character and Its Heterogeneity. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (1): 65–74 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Lu, F. X., Yu, C. M., et al., 2006. Peridotite Petrochemistry of the Eastern North China: Significance for Lithospheric Mantle Evolution. *Earth Science*, 31 (1): 49–56 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 1998. Nature and Evolution of Cenozoic Lithospheric Mantle Beneath

- Shandong Peninsula, Sino-Korean Craton, Eastern China. *International Geology Review*, 40(6): 471–499.
- Zheng, J. P., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2001. Relict Refractory Mantle Beneath the Eastern North China Block: Significance for Lithosphere Evolution. *Lithos*, 57(1): 43–66. doi: 10.1016/S0024-4937(00)00073-6
- Zheng, J. P., Yu, C. M., Lu, F. X., et al., 2007. Age and Composition of Continental Mantle Peridotites and Implications for the Lithospheric Thinning, Eastern North China. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 087–097 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. T., Zheng, J. P., Yu, C. M., et al., 2010. Peridotite Xenoliths in Jining Cenozoic Basalts: Mineral-Chemistry and Significance for Lithospheric Mantle Evolution Beneath the North China Craton. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (3): 243–257 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Xu, Y. G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565–1587.
- 附中文参考文献**
- 曹正琦, 翟文建, 蒋幸福, 等, 2016. 华北克拉通南缘约 2.5 Ga 构造变质事件及意义. *地球科学*, 41(4): 570–585.
- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 等, 2006. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代? *地学前缘*, 13(2): 105–119.
- 杜蔚, 韩宝福, 张文慧, 等, 2006. 内蒙古集宁新生代玄武岩中橄榄岩包体和巨晶的发现及意义. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 13–24.
- 路凤香, 韩柱国, 郑建平, 等, 1991. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔特征. *地质科技情报*, (S1): 2–20, 141.
- 王亚妹, William, L. G., 韩宝福, 2011. 华北克拉通西部陆块北缘新生代岩石圈地幔特征的初步研究. *岩石学报*, 27(10): 2912–2926.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等, 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*, 24(6): 1145–1174.
- 徐荣, 刘勇胜, 宗克清, 等, 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(5): 613–636.
- 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善, 等, 2007. 华北克拉通火成碳酸岩时空分布和锶钕同位素特征及其地质意义. *高校地质学报*, 13(3): 463–473.
- 翟明国, 2008. 华北克拉通中生代破坏前的岩石圈地幔与下地壳. *岩石学报*, 24(10): 2185–2204.
- 张宏福, 2006. 橄榄岩—熔体的相互作用: 岩石圈地幔组成转变的重要方式. *地学前缘*, 13(2): 65–75.
- 张文慧, 韩宝福, 杜蔚, 等, 2005. 内蒙古集宁新生代玄武岩的地幔源区特征: 元素及 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学证据. *岩石学报*, 21(6): 1569–1582.
- 赵新苗, 张宏福, 朱祥坤, 等, 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(6): 1281–1293.
- 郑建平, 路凤香, 1999. 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性. *岩石学报*, (1): 66–75.
- 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 等, 2006. 华北东部橄榄岩岩石学特征及其岩石圈地幔演化意义. *地球科学*, 31(1): 49–56.
- 郑建平, 余淳梅, 路凤香, 等, 2007. 华北东部大陆地幔橄榄岩组成、年龄与岩石圈减薄. *地学前缘*, 14(2): 87–97.
- 周媛婷, 郑建平, 余淳梅, 等, 2010. 内蒙古集宁新生代玄武岩中橄榄岩包体矿物化学特征及其地幔演化意义. *岩石矿物学杂志*, 29(3): 243–257.