

宽甸橄榄岩包体微区地球化学特征及其岩石圈地幔演化

徐 荣, 刘勇胜, 宗克清, 邹东雅, 邓黎旭, 童喜润, 胡兆初, 高 山

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

摘 要: 华北克拉通东部宽甸新生代碱性玄武岩中携带的地幔橄榄岩包体为我们认识该地区岩石圈地幔性质和演化过程提供了约束。根据橄榄石的 $Mg^{\#}$ 可将宽甸橄榄岩包体分成两类: 第 1 类为低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩包体(橄榄石 $Mg^{\#}$ 相对较低: 89.8~90.3), 其单斜辉石具有高 TiO_2 (0.38%~0.57%)、 Al_2O_3 (4.41%~6.87%)、 FeO_1 (2.46%~3.73%)、 MnO (0.08%~0.11%) 含量和低 $Cr^{\#}$ (7.42~14.2) 的特征, 它们所经历的部分熔融程度较低, 这些特征类似于中国东部晚白垩世和新生代玄武岩中低 $Mg^{\#}$ 橄榄岩, 代表了新生饱满的岩石圈地幔; 第 2 类为高 $Mg^{\#}$ 方辉橄榄岩包体(橄榄石 $Mg^{\#}$ 相对较高: 91.0~92.3), 其单斜辉石具有低 TiO_2 (0.03%~0.33%)、 Al_2O_3 (2.27%~5.49%)、 FeO_1 (2.04%~2.40%)、 MnO (0.07%~0.08%) 含量和高 $Cr^{\#}$ (15.3~25.8) 的特征, 它们经历了较高级别的部分熔融作用, 其难熔的地球化学特征完全不同于低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩, 却与克拉通内部太古宙和元古宙地幔包体类似, 代表了古老难熔岩石圈地幔的残留。两类橄榄岩包体的平衡温度没有显著差异说明宽甸岩石圈地幔不存在明显的分层现象, 而是新老岩石圈地幔混杂出现。宽甸橄榄岩包体的微量元素特征表明了它们受到过多期复杂的地幔交代作用, 交代介质类型不仅有硅酸盐熔/流体还有碳酸盐熔体, 其来源既有太平洋板块俯冲释放的熔/流体, 又有因受太平洋板块俯冲扰动而上涌的软流圈熔体, 因此太平洋板块俯冲可能对华北克拉通的破坏起到了重要作用。

关键词: 华北克拉通, 宽甸, 岩石圈地幔, 橄榄岩包体, LA-ICP-MS

中图分类号: P588.12⁺5; P594

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)05-0613-24

Micro-geochemistry of peridotite xenoliths from Kuandian: Implications for evolution of lithospheric mantle

XU Rong, LIU Yong-sheng, ZONG Ke-qing, ZOU Dong-ya, DENG Li-xu, TONG Xi-run,
HU Zhao-chu and GAO Shan

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Mantle peridotite xenoliths entrained in the Cenozoic alkaline basalts from Kuandian of eastern North China Craton provide important constraints on the nature and evolution of the lithospheric mantle beneath this area. Two types of xenoliths can be defined based on the $Mg^{\#}$ of their olivines: Type 1 low- $Mg^{\#}$ lherzolites are characterized by low $Mg^{\#}$ in olivines (89.8~90.3), high TiO_2 (0.38%~0.57%), Al_2O_3 (4.41%~6.87%),

收稿日期: 2013-08-07; 修订日期: 2013-08-24

基金项目: 科技部 973 项目(2013CB429806); 国家自然科学基金资助项目(90914007, 41173016); 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(41125013); 教育部高等学校学科创新引智 111 计划(B07039); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费(MS-FGPMR201204); 中央高校基本科研业务费专项资金(CUG090105)

作者简介: 徐 荣(1987-), 男, 汉族, 博士研究生, 地球化学专业, E-mail: xurong24@gmail.com; 通讯作者: 刘勇胜(1971-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, E-mail: yshliu@cug.edu.cn 或 yshliu@hotmail.com.

FeO^{T} (2.46% ~ 3.73%), MnO (0.08% ~ 0.11%) content and low $\text{Cr}^{\#}$ (7.42 ~ 14.2) in the coexisting clinopyroxenes, and have undergone low degrees of partial melting; these characteristics are similar to those of low- $\text{Mg}^{\#}$ peridotites in the Late Cretaceous and Cenozoic basalts, thus probably representing newly accreted lithospheric mantle. Type 2 high- $\text{Mg}^{\#}$ harzburgites are characterized by high $\text{Mg}^{\#}$ in olivines (91.0 ~ 92.3), low TiO_2 (0.03% ~ 0.33%), Al_2O_3 (2.27% ~ 5.49%), FeO^{T} (2.04% ~ 2.40%), MnO (0.07% ~ 0.08%) content and high $\text{Cr}^{\#}$ (15.3 ~ 25.8) in the coexisting clinopyroxenes and have undergone high degrees of partial melting; these refractory geochemical characteristics are completely different from those of low- $\text{Mg}^{\#}$ lherzolites, but similar to those of high- $\text{Mg}^{\#}$ peridotite xenoliths from Archean and Proterozoic lithospheric mantle in the craton, therefore are considered to be relicts of ancient lithospheric mantle. The nonexistence of obvious differences in equilibrium temperatures of low- $\text{Mg}^{\#}$ and high- $\text{Mg}^{\#}$ peridotites suggests that there is no significant stratification within the sub-continental lithospheric mantle beneath Kuandian, but there exists mixture between the newly accreted mantle and the ancient lithospheric mantle. Trace element characteristics of the Kuandian peridotite xenoliths indicate that they have undergone multiple complex mantle metasomatism, and the metasomatic agents include not only silicate melts/fluids but also carbonate melts; both melts/fluids released by Pacific slab subduction and the heat perturbation and upwelling of hot asthenospheric melts caused by subduction were involved in their provenance, and thus Pacific slab subduction might have played an important role in the destruction of the North China Craton.

Key words: North China Craton; Kuandian; lithospheric mantle; peridotite xenoliths; LA-ICP-MS

大陆岩石圈地幔的性质及其演化一直受到地球科学界的广泛关注,壳-幔及软流圈-岩石圈之间的相互作用可以将主量元素饱满的物质加入到古老难熔的大陆岩石圈地幔中,从而将其改造为主量元素相对饱满的岩石圈(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Downes, 2001; O'Reilly *et al.*, 2001; Zhang, 2005; Foley *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2007; Tang *et al.*, 2008)。地幔包体是对岩石圈地幔的直接取样,因此可以提供深部岩石圈地幔过程的直接信息。前人通过对我国华北克拉通东部新生代碱性玄武岩、山东蒙阴和辽宁复县奥陶纪含金刚石金伯利岩及其所携带地幔包体的岩石学、地球化学以及同位素对比研究发现,华北原有的古老的、冷的、厚的克拉通型岩石圈地幔已经被新生的、热的、薄的大洋型岩石圈地幔所取代,并且伴随有大规模的岩石圈减薄(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998)。尽管学术界已经对于华北克拉通破坏这一现象达成了一致,但是破坏机制等关键科学问题仍然悬而未决(吴福元等, 2008)。目前对于华北克拉通破坏机制的解释主要有热-化学侵蚀作用(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 1998, 2001; Xu, 2001;)、岩石圈(包括地壳和上地幔)拆沉(Wu *et al.*, 2003, 2005a, 2006; Gao *et al.*, 2004, 2008)和橄榄岩-熔/流体反应(Zhang,

2005, 2007; Tang *et al.*, 2008, 2013a, 2013b, 2013c)等模型。这三者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不同。热-机械和化学侵蚀强调软流圈熔体自下而上通过熔/流体-橄榄岩作用(起因)对岩石圈的主动改造,拆沉作用则强调岩石圈块体自上而下的物理转移(突出强调榴辉岩地壳物质的主导作用)及由此引起的岩浆活动和熔/流体-橄榄岩作用(结果)。橄榄岩-熔体作用模型和 Niu (2005)提出的水化作用模型,可根据其强调的熔/流体来源归入热-化学侵蚀作用或者拆沉作用模型。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。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。

华北克拉通东北缘宽甸地区(图 1)新生代碱性玄武岩捕获了大量的地幔包体以及石榴石和辉石巨晶(路凤香等, 1981; Xie *et al.*, 1992)。自上世纪 80 年代以来,许多学者对宽甸地幔包体的岩石学和地球化学等特征进行了深入的研究(路凤香等, 1981; Xie *et al.*, 1990, 1992; Tatsumoto *et al.*, 1992; 刘从强和解广轰, 1993; Xu *et al.*, 1998; Xu and Liu, 2002; 吴茂炳等, 2003a, 2003b; Liu *et al.*,

2004; 赖勇等, 2005; Wu *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2013)。这些研究对认识华北克拉通地区岩石圈地幔的结构、热状态、化学组成、演化历史、岩石圈减薄、壳幔物质交换、地幔部分熔融和交代过程等起到了重要作用。但由于受分析技术的限制, 其它已有的研究工作主要是对包体全岩及单矿物整体宏观的岩石学与地球化学研究, 对组成矿物中微量元素的微观空间变化研究还很薄弱, 而包体组成矿物中微量元素微观的空间变化记录了很多重要的岩石圈地幔过程与信息。我们最近对宽甸黄

椅山二辉橄榄岩包体系统的微区原位主、微量元素及 Li-Sr 同位素研究发现, 华北克拉通东部岩石圈地幔经历的改造作用既有与古太平洋板片俯冲有关的熔/流体交代作用, 又存在非常近期的熔/流体活动叠加事件 (Xu *et al.*, 2013)。本文通过对宽甸黄椅山的方辉橄榄岩和二辉橄榄岩包体中组成矿物的 LA-ICP-MS 微区原位主、微量元素分析, 结合我们之前对该地区的研究成果, 与华北其他地区地幔包体进行对比, 从而进一步探讨新生代时期华北克拉通东北缘岩石圈地幔性质及其演化历史。

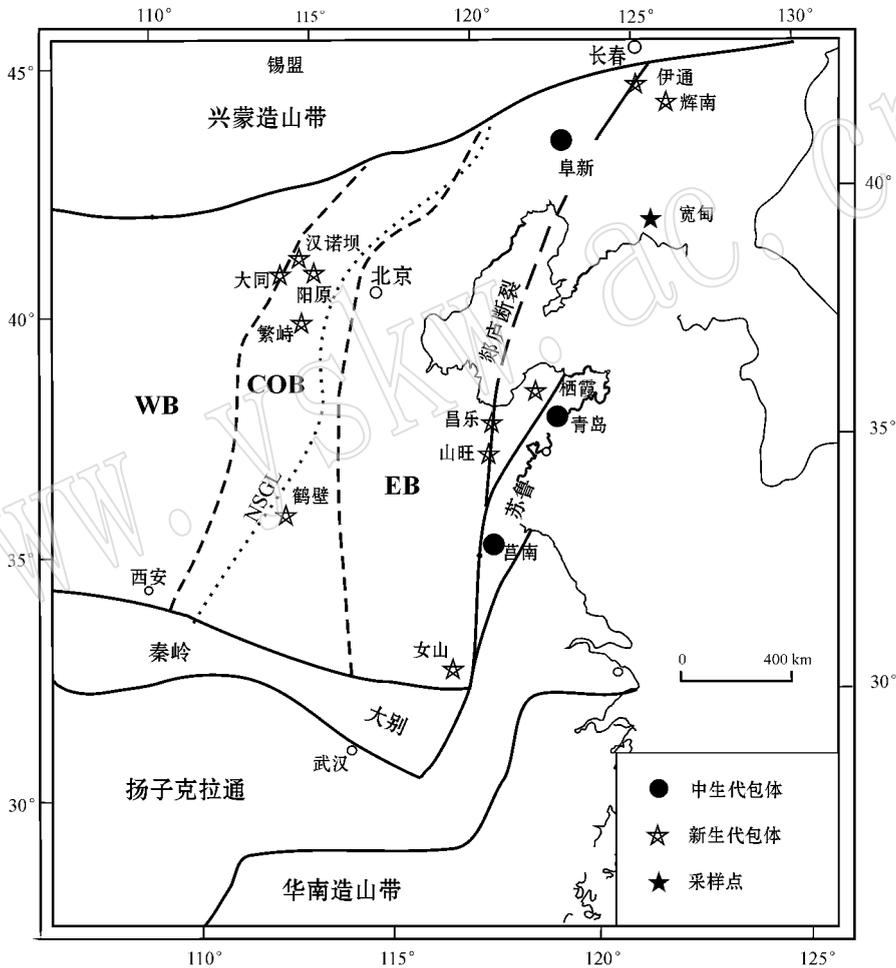


图 1 华北克拉通主要构造单元和采样点位置 [构造单元划分据 Zhao 等(2001)]

Fig. 1 Major tectonic units in the North China Craton and sampling locations (tectonic divisions after Zhao *et al.*, 2001)

1 地质背景及样品

华北克拉通是目前世界上已知的最古老克拉通之一, 它保存有 38 亿年之久的太古宙地壳残留 (Liu *et al.*, 1992)。华北克拉通一般可分为 3 个构造单

元, 即东部陆块 (EB)、西部陆块 (WB) 和中间的中央造山带 (COB) (Zhao *et al.*, 2001) (图 1)。东部和西部两个独立的块体被认为在大约 18.5 亿年左右发生了一次碰撞造山事件, 此后形成了完整的克拉通并一直保持稳定 (Zhao *et al.*, 2001)。到了中生代时期华北克拉通遭受了强烈的活化改造, 发生了大

规模的构造变形和岩浆活动(Wu *et al.*, 2005a, 2005b),致使原有的克拉通结构和性质遭到明显的破坏。

宽甸地区位于华北克拉通东北缘,郯庐断裂带东部(图 1),区内最大火山黄椅山的喷发年龄小于 0.6 Ma(Xie *et al.*, 1992),这些玄武岩携带了大量的幔源二辉橄榄岩和辉石岩包体以及石榴石和单斜辉石巨晶,外加少量的方辉橄榄岩包体(路凤香等, 1981; Xie *et al.*, 1992; Wu *et al.*, 2006)。本文所研究的样品为 8 个采自宽甸黄椅山的新鲜地幔橄榄

岩包体,矿物组成表明其中包括 5 个方辉橄榄岩包体和 3 个二辉橄榄岩包体。手标本上方辉橄榄岩一般较小,镜下主要呈现他形粒状变晶结构,矿物组成为 63%~84% 的橄榄石、13%~34% 的斜方辉石、1%~5% 的单斜辉石以及 <2% 的尖晶石;二辉橄榄岩主要呈等粒碎斑状结构,矿物组成为 61%~67% 的橄榄石、16%~20% 的斜方辉石、15%~18% 的单斜辉石以及 1%~2% 的尖晶石(表 1)。利用斜方辉石 Ca 温度计(Brey and Kohler, 1990)算出的平衡温度为 843~1 011℃(表 1)。

表 1 宽甸橄榄岩包体岩性、矿物组成及平衡温度

Table 1 Lithology, modal mineralogy and equilibrium temperatures of Kuandian peridotite xenoliths

样品	岩性	体积分数/%				温度/℃
		橄榄石	斜方辉石	单斜辉石	尖晶石	
KD11-03	尖晶石方辉橄榄岩	69	25	4	2	908
KD11-11	方辉橄榄岩	63	34	3		997
KD11-26	尖晶石方辉橄榄岩	68	25	5	2	843
KD11-40	方辉橄榄岩	77	22	1		988
KD11-57	尖晶石方辉橄榄岩	84	13	2	1	928
KD03-1	尖晶石二辉橄榄岩	67	16	15	2	884
KD14-1	尖晶石二辉橄榄岩	63	18	17	2	1 011
KD14-2	尖晶石二辉橄榄岩	61	20	18	1	989

2 分析方法

宽甸地幔包体中橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石的主、微量元素是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 完成的。激光剥蚀系统为配备了 193 nm 氟化氩激光发射器的 GeoLas2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气作为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型的三通接头混合。详细的仪器操作条件同 Xu 等(2013)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、尖晶石的数据处理以 USGS 参考玻璃(BCR-2G、BIR-1G 和 BHVO-2G)为校正标准,采用多外标、无内标法将总的金属氧化物含量归一化到 100% 对元素含量进行定量计算(Liu *et al.*, 2008)。这些 USGS 国际标准玻璃中元素含量的推荐值来自于 GeoReM 数据库(<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成(Liu *et al.*,

2008, 2010)。对国际标准样品 MPI-DING 玻璃的分析表明主量元素的分析精度一般优于 5%, 微量元素的分析精度一般优于 5%~10%(Liu *et al.*, 2008)。

3 结果

3.1 橄榄石

宽甸橄榄岩包体中橄榄石 $Mg^{\#}$ 变化范围为到 89.8~92.3, 其中二辉橄榄岩中橄榄石 $Mg^{\#}$ 变化范围为 89.8~90.3, 方辉橄榄岩中橄榄石 $Mg^{\#}$ 变化范围为 91.0~92.3(表 2)。根据橄榄石的 $Mg^{\#}$, 可将宽甸橄榄岩包体分为两类:高 $Mg^{\#}$ 方辉橄榄岩和低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩。高 $Mg^{\#}$ 方辉橄榄岩中橄榄石的 MnO 含量(0.12%~0.14%)和 FeO_T 含量(7.96%~9.12%)低于低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩中橄榄石的 MnO 含量(0.15%~0.16%)和 FeO_T 含量(9.88%~10.2%) (表 2、图 2), MgO 含量(51.1%~53.4%)高于低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩中橄榄石的 MgO 含量(49.4%~51.2%) (表 2)。橄榄石中 Li 含量变化范围 $1.36 \times 10^{-6} \sim 3.47 \times 10^{-6}$, 并且大部分橄榄石边部 Li 含量都高于核部(表 2、图 3)。

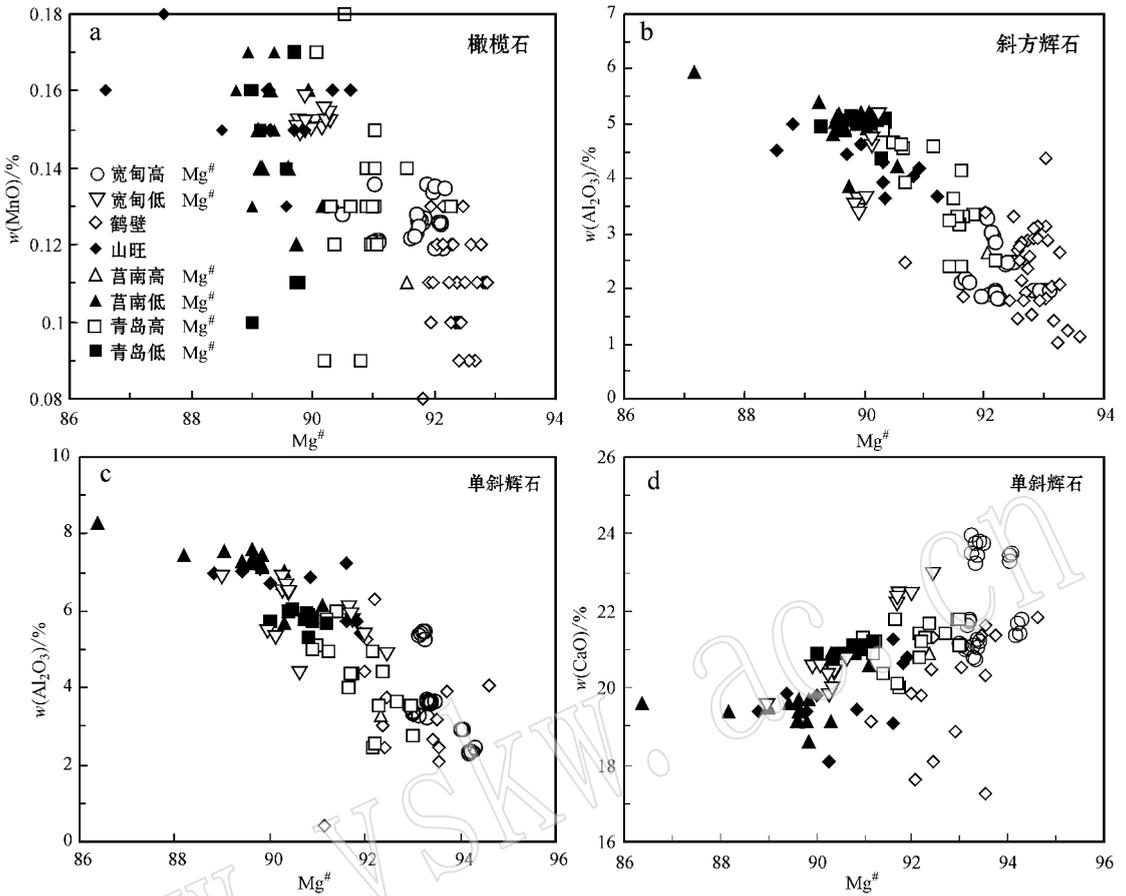


图 2 橄榄石 MnO 含量- Mg[#](a)、斜方辉石 Al₂O₃ 含量- Mg[#](b)、单斜辉石 Al₂O₃ 含量- Mg[#](c)和单斜辉石 CaO 含量- Mg[#](d)图解

Fig. 2 MnO - Mg[#] in olivines (a), Al₂O₃ - Mg[#] in orthopyroxenes (b), Al₂O₃ - Mg[#] in clinopyroxenes (c) and CaO - Mg[#] in clinopyroxenes (d)

鹤壁、山旺、莒南和青岛数据分别来自 Zheng 等 (1998, 2001)、Ying 等 (2006) 和 Zhang 等 (2011)

Data for Hebi, Shanwang, Junan and Qingdao from Zheng *et al.* (1998, 2001), Ying *et al.* (2006) and Zhang *et al.* (2011) respectively

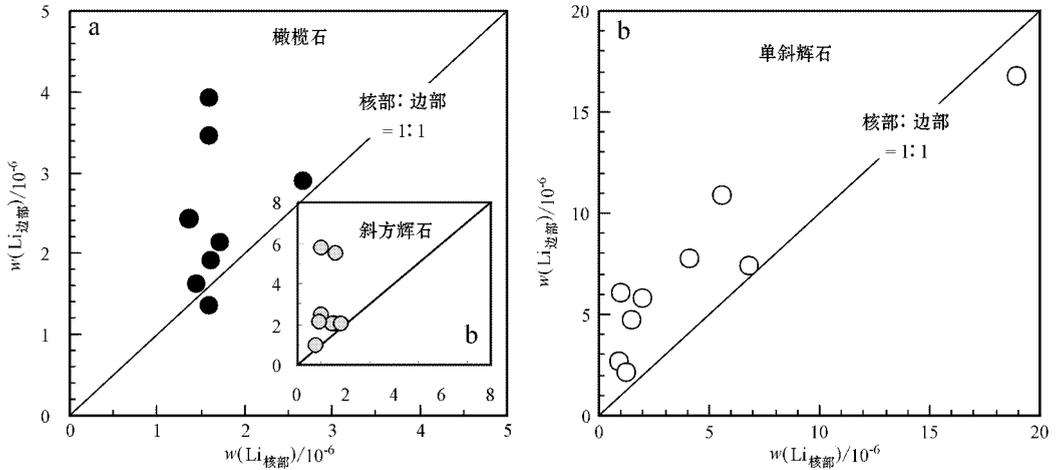


图 3 橄榄石(a)、斜方辉石(b)、单斜辉石(c)中核部和边部 Li 含量比较

Fig. 3 Comparison of Li content between the rims and the cores of olivines (a), orthopyroxenes (b) and clinopyroxenes (c)

3.2 斜方辉石

宽甸橄榄岩包体中斜方辉石 $Mg^{\#}$ 变化范围为到 89.8~93.1, 其中二辉橄榄岩中斜方辉石 $Mg^{\#}$ 变化范围为 89.8~90.3, 方辉橄榄岩中斜方辉石 $Mg^{\#}$ 变化范围为 91.6~93.1(表 3)。高 $Mg^{\#}$ 方辉橄榄岩中斜方辉石的 Al_2O_3 (1.81%~3.37%) TiO_2 (0.01%~0.08%) FeO_1 (4.95%~5.89%) 和 MnO (0.12%~0.15%) 含量低于低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩中斜方辉石的 Al_2O_3 (3.29%~4.74%) TiO_2 (0.08%~0.15%) FeO_1 (6.34%~6.49%) 和 MnO (0.15%~0.16%) 含量(表 3、图 2), MgO 含量(35.6%~37.3%) 高于低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩中斜方辉石的 MgO 含量(31.7%~32.6%) (表 3)。斜方辉石中 Li 含量变化范围 $0.86 \times 10^{-6} \sim 5.80 \times 10^{-6}$, 并且大部分斜方辉石边部 Li 含量都高于核部(表 3、图 3)。

3.3 单斜辉石

宽甸橄榄岩包体中单斜辉石 $Mg^{\#}$ 变化范围为到 89.0~94.3, 其中二辉橄榄岩中单斜辉石 $Mg^{\#}$ 变化范围为 89.0~92.5, 方辉橄榄岩中单斜辉石 $Mg^{\#}$ 变化范围为 93.0~94.3(表 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 2)。高 $Mg^{\#}$ 方辉橄榄岩中单斜辉石的 TiO_2 (0.03%~0.33%) Al_2O_3 (2.27%~5.49%) MnO (0.07%~0.08%) 和 FeO_1 (2.04%~2.40%) 含量低于低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩中单斜辉石的 TiO_2 (0.38%~0.57%) Al_2O_3 (4.41%~6.87%) MnO (0.08%~0.11%) 和 FeO_1 (2.46%~3.73%), 而 $Cr^{\#}$ (15.3~25.8) 高于低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩包体中单斜辉石的 $Cr^{\#}$ (7.42~14.2)(表 4)。单斜辉石中 Li 含量变化范围为 $0.93 \times 10^{-6} \sim 18.92 \times 10^{-6}$, 方辉橄榄岩中单斜辉石 Li 含量($0.95 \times 10^{-6} \sim 18.9 \times 10^{-6}$) 大多都高于二辉橄榄岩中单斜辉石 Li 含量($0.93 \times 10^{-6} \sim 4.75 \times 10^{-6}$) (表 4), 并且大部分单斜辉石边部 Li 含量都高于核部(表 4、图 3)。低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩中单斜辉石具有轻稀土元素亏损、中重稀土元素平坦型的配分模式和轻稀土元素富集的勺子型配分模式(图 4)。轻稀土元素亏损型的样品高度亏损 Nb 和 Ta, 轻稀土元素富集型的样品 Nb 和 Ta 不亏损, 甚至有 Ta 的富集(图 4)。同一单斜辉石的核边轻稀土元素含量变化范围较大(表 4、图 4)。高 $Mg^{\#}$ 方辉橄榄岩中单斜辉石 KD11-57 具有轻稀土元素亏损、中重稀土元素平坦的配分模式(图 4); KD11-03 具有轻

稀土元素富集、中稀土元素亏损的 U 型配分模式, 并且从核到边它的轻稀土元素含量变化范围较大(表 4、图 4)。KD11-11 和 KD11-40 具有不同程度的轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的配分模式(图 4)。KD11-26 具有轻稀土元素高度富集的上凸型配分模式(图 4)。KD11-11、KD11-26 和 KD11-40 这三个样品不同程度亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti, 富集大离子亲石元素 Th、U 和 Sr 及轻稀土元素 La、Ce、Nd、Sm 和 Eu 等(图 4)。

3.4 尖晶石

宽甸橄榄岩包体中尖晶石 $Cr^{\#}$ 变化范围为 11.9~46.9, $Mg^{\#}$ 变化范围为到 65.2~78.0, Li 含量变化范围为 $0.34 \times 10^{-6} \sim 0.79 \times 10^{-6}$ (表 5)。

4 宽甸橄榄岩包体成因及地幔演化过程

宽甸橄榄岩中橄榄石 $Mg^{\#}$ 与 MnO 呈负相关, 斜方辉石 $Mg^{\#}$ 和 Al_2O_3 呈负相关以及单斜辉石 $Mg^{\#}$ 和 Al_2O_3 含量呈负相关(图 3), 这些特征说明了它们经历了不同程度的部分熔融作用。通常单斜辉石是尖晶石相无水橄榄岩中微量元素的主要载体, 因此它的微量元素组成可以用来反映部分熔融和地幔交代过程。根据 Norman (1998) 计算部分熔融程度的方法, 我们选择单斜辉石中的中等不相容元素 Y 和 Yb (因为它们属于重稀土土元素, 一般很少受到后期地幔交代作用的影响) 来模拟计算部分熔融程度。结果表明对于宽甸低 $Mg^{\#}$ 二辉橄榄岩包体, KD03-1、KD14-1 和 KD14-2 经历了低程度 (<3%) 的部分熔融(图 5), 由于部分熔融程度较低, 所以无法区分它们到底是经历了批示部分熔融还是分离部分熔融。而对于宽甸高 $Mg^{\#}$ 方辉橄榄岩包体, KD11-57 经历了较低程度(约 3%~5%) 的批示部分熔融或者分离部分熔融(图 5)。KD11-11 和 KD11-26 经历了约 15%~20% 的批示部分熔融或者 <10% 的分离部分熔融(图 5)。KD11-40 经历了约 50% 的批示部分熔融或者 <20% 的分离部分熔融(图 5), 前者似乎不太切合实际, 一般分离部分熔融更接近于橄榄岩部分熔融的实际情况(Norman, 1998), 因而在部分熔融的模式选择上, 我们更倾向于使用分离部分熔融。KD11-03 明显偏离了部分熔融趋势线(图 5), 说明该样品的重稀土元素受到了较强的地幔交代改造。

虽然本次样品中没有发现有明显的交代矿物

表 3 斜方辉石的主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)组成
Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions of orthopyroxenes

样品	KD11-03			KD11-11			KD11-26			KD11-40								
	边	核	边	边	核	边	边	核	边	核	边	核	边					
SiO ₂	54.1	54.6	54.3	54.5	54.4	54.4	54.4	54.4	54.5	55.2	55.3	55.3	55.4	55.8	54.6	54.8	54.8	54.8
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01
Al ₂ O ₃	1.81	1.91	1.93	1.83	2.47	2.47	2.48	2.46	2.48	2.12	2.19	2.18	2.11	1.85	1.98	1.98	1.97	1.99
FeO	5.62	5.65	5.63	5.60	5.32	5.27	5.27	5.34	5.29	5.89	5.82	5.82	5.78	5.63	5.02	4.99	5.06	5.00
MnO	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.13	0.13	0.13	0.12
MgO	37.3	36.6	36.9	36.9	36.2	36.0	36.1	35.9	35.7	35.8	35.6	35.7	35.7	35.8	36.6	36.8	36.4	36.5
CaO	0.46	0.52	0.52	0.46	0.85	0.82	0.80	0.83	0.98	0.39	0.38	0.38	0.38	0.36	0.78	0.78	0.77	0.75
Na ₂ O	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.07	0.07	0.07	0.07
Mg [#]	92.3	92.1	92.2	92.2	92.4	92.5	92.5	92.4	92.4	91.6	91.7	91.7	91.8	92.0	92.9	93.0	92.8	92.9
Li	1.47	2.01	1.82	1.60	5.80	1.57	0.97	1.23	4.06	1.70	1.42	1.55	1.58	2.07	1.86	1.83	1.95	2.05
Sc	20.2	21.4	21.3	20.4	16.0	16.0	16.0	15.9	16.3	21.1	21.6	20.6	20.6	18.8	15.7	15.7	15.7	15.6
V	69.2	73.3	73.1	68.7	61.9	61.9	62.2	62.1	63.3	77.7	78.9	79.6	76.4	67.9	62.1	61.5	61.8	61.9
Cr	2601	2930	2979	2711	4345	4280	4374	4337	4365	2215	2333	2340	2268	1954	4277	4281	4291	4219
Co	51.5	52.8	51.9	51.9	57.1	57.0	56.7	57.4	55.7	49.1	49.3	49.2	49.2	47.6	56.4	54.8	56.9	56.4
Ni	616	625	609	610	760	765	751	751	756	572	569	563	575	562	801	795	810	814
Cu	0.65	1.00	0.81	1.39	2.90	1.11	1.07	1.18	1.82	0.61	0.29	0.24	0.08	0.69	1.18	0.26	0.85	0.72
Zn	28.9	28.6	27.9	30.0	31.9	30.4	30.8	31.3	31.4	25.8	25.0	28.4	23.9	25.8	30.2	29.0	30.3	29.3
Rb	0.05	0.06					0.08					0.03		0.11	0.08		0.14	
Sr	0.03	0.07	0.01	0.10	0.34	0.20	0.21	0.17	0.84	0.20	0.13	0.17	0.14	0.12	0.29	0.15	0.29	0.35
Y	0.08	0.09	0.09	0.10	0.48	0.46	0.47	0.57	0.52	0.32	0.38	0.32	0.34	0.26	0.25	0.23	0.24	0.25
Zr	0.12	0.18	0.10	0.13	1.23	1.38	1.35	1.03	1.57	0.87	0.80	0.82	0.73	0.55	0.04	0.69	0.30	0.49
Nb			0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.04	0.02	0.01				0.10	0.14	0.10	0.08	0.12

续表 3
Continued Table 3

样品	KD11-57				KD03-1				KD14-1				KD14-2							
	核		边		核		边		核		边		核		边					
	边	核	边	核	边	核	边	核	边	核	边	核	边	核	边	核				
SiO ₂	54.1	53.8	53.6	53.9	54.0	57.3	56.8	56.7	56.9	57.0	54.0	53.8	53.7	53.6	53.5	54.7	54.8	55.0	54.7	54.5
TiO ₂	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.09	0.10	0.10	0.10	0.08	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.11	0.15
Al ₂ O ₃	2.96	3.37	3.28	3.01	2.83	3.47	3.64	3.47	3.47	3.29	5.14	5.05	5.08	5.05	5.08	4.66	4.66	4.64	4.74	3.67
FeO	5.55	5.58	5.60	5.57	5.55	6.42	6.39	6.49	6.49	6.44	6.36	6.37	6.40	6.42	6.45	6.37	6.35	6.34	6.39	6.47
MnO	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
MgO	36.2	35.8	36.0	36.2	36.4	31.7	32.0	31.9	32.3	32.3	32.7	33.0	33.0	33.1	33.1	32.5	32.5	32.3	32.4	32.6
CaO	0.45	0.55	0.59	0.47	0.43	0.34	0.46	0.47	0.45	0.32	0.85	0.86	0.84	0.86	0.87	0.82	0.80	0.76	0.81	1.54
Na ₂ O	0.05	0.06	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.17
Mg#	92.1	92.0	92.1	92.1	92.2	89.9	90.0	89.9	89.8	90.0	90.2	90.3	90.3	90.3	90.2	90.2	90.2	90.2	90.1	90.1
Li	1.76	5.50	2.70	1.56	2.35	1.96	1.24	0.98	1.01	2.49	0.86	0.83	0.76	0.89	0.94	1.00	0.88	1.03	0.86	2.16
Sc	18.0	19.7	19.1	17.7	17.5	15.8	16.1	16.5	15.2	14.9	19.1	19.2	19.4	19.7	19.2	17.6	18.3	17.4	17.6	22.3
V	75.0	82.1	80.7	74.1	72.8	91.2	97.2	96.4	93.4	88.7	104	103	102	103	103	103	102	103	103	113
Cr	2 688	3 552	3 406	3 059	2 644	2 464	2 408	2 429	2 371	2 225	2 967	2 937	2 898	2 913	2 939	2 937	2 920	2 903	2 912	3 412
Co	49.6	50.0	50.6	49.6	49.9	52.9	51.7	52.5	53.1	53.8	61.7	60.5	60.4	60.7	60.9	60.0	59.8	60.8	59.7	64.9
Ni	612	624	624	619	626	625	612	612	615	618	795	788	799	783	794	794	790	787	779	916
Cu	1.16	0.13	0.85	0.09	0.56	0.47	0.27	0.32	0.35	0.50	0.93	1.09	1.15	1.12	4.50	1.15	1.18	1.12	1.20	35.0
Zn	25.1	26.1	25.2	23.8	23.2	28.7	24.5	22.3	22.4	22.9	31.0	30.5	30.7	30.2	29.8	33.9	33.9	35.0	35.1	37.5
Rb	0.10		0.04		0.11	1.20	0.84			0.27	0.02						0.10	0.07	0.10	0.67
Str	0.22	0.05	0.19		0.04	0.02	0.13	0.11	0.01	0.01	0.19	0.17	0.15	0.16	0.15	0.15	0.17	0.12	0.49	0.79
Y	0.47	0.62	0.61	0.50	0.46	0.72	0.61	0.84	0.71	0.62	1.21	1.24	1.26	1.13	1.39	1.19	1.12	1.08	1.19	2.20
Zr	1.03	0.83	0.95	0.99	0.35	0.72	1.04	1.13	0.87	0.74	0.97	1.08	1.13	1.05	1.05	0.89	0.97	0.97	1.23	3.52
Nb	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02		0.01			0.11	0.12	0.12	0.10	0.12	0.13	0.18	0.12	0.10	0.11	0.61

表4 单斜辉石的主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)组成Table 4 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions of clinopyroxenes

样品	KD11-03					KD11-11										
	颗粒1					颗粒1					颗粒2					
	边	核	边	核	边	边	核	边	边	核	边	核	边	核	边	
SiO ₂	51.6	51.1	50.9	50.9	51.6	51.3	51.2	51.1	51.1	51.1	51.5	51.1	51.2	51.2	51.5	
TiO ₂	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.10	0.11	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	
Al ₂ O ₃	2.34	2.27	2.35	2.35	2.45	3.65	3.63	3.66	3.65	3.62	3.63	3.65	3.65	3.68	3.62	
FeO	2.04	2.11	2.10	2.11	2.04	2.39	2.35	2.34	2.38	2.38	2.38	2.38	2.36	2.37	2.40	2.39
MnO	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
MgO	18.7	19.0	19.1	19.0	18.7	18.7	18.5	18.6	18.5	18.5	18.4	18.5	18.5	18.5	18.6	
CaO	23.5	23.8	23.7	23.8	23.3	20.8	21.2	21.1	21.1	21.2	21.0	21.2	21.1	21.0	20.7	
Na ₂ O	0.70	0.61	0.61	0.62	0.73	1.29	1.31	1.30	1.31	1.29	1.26	1.28	1.29	1.27	1.28	
Mg [#]	94.3	94.2	94.2	94.2	94.3	93.4	93.4	93.5	93.3	93.3	93.3	93.4	93.3	93.3	93.4	
Cr [#]	19.1	21.8	22.1	22.2	19.2	22.2	22.4	22.2	22.2	22.4	21.9	22.1	22.1	22.0	22.1	
Li	7.92	10.9	6.85	5.56	6.79	4.72	1.93	2.64	3.80	5.79	5.18	1.08	0.95	1.42	6.05	
Sc	97.8	88.8	86.6	84.3	93.3	74.3	76.5	76.9	76.4	75.7	75.2	76.4	75.6	75.4	72.9	
V	196	196	197	196	192	199	202	200	199	201	197	201	199	197	196	
Cr	5641	6437	6816	6826	5928	10642	10701	10678	10620	10620	10360	10553	10595	10615	10455	
Co	18.9	18.9	19.7	19.2	18.2	21.7	21.9	21.8	22.1	22.1	22.5	22.1	21.8	21.8	22.5	
Ni	317	303	303	303	308	367	355	357	368	358	352	336	362	358	354	
Cu	1.42	2.71	2.31	2.12	2.65	1.56	1.09	0.94	1.36	2.29	2.12	1.26	0.94	1.05	2.58	
Zn	5.54	6.27	6.14	7.37	5.96	8.76	9.25	8.80	8.85	10.3	8.02	9.11	9.40	8.99	9.17	
Rb	2.19	0.04	0.06	0.05	2.94	0.09	0.12	0.03	0.04	0.03	0.03	0.07	0.03			
Sr	40.0	38.7	41.9	42.8	42.1	102	91.3	91.2	91.4	89.1	88.9	93.4	96.2	96.5	91.3	
Y	1.87	1.79	1.78	1.66	1.90	7.69	7.56	7.56	7.85	7.64	7.60	7.85	7.73	7.79	6.97	
Zr	5.38	2.14	2.07	2.21	6.40	27.1	28.2	26.8	27.3	27.2	27.1	27.8	27.3	27.1	25.7	
Nb	0.71	0.02	0.05	0.08	1.12	0.37	0.42	0.47	0.47	0.54	0.42	0.38	0.51	0.48	0.47	
Cs	0.09	0.08	0.09	0.02	0.01							0.07	0.07			
Ba	2.08	0.10	0.13	0.29	4.20	0.10			0.07	0.19	0.02		0.12	0.02	0.05	
La	1.16	0.43	0.50	0.57	1.66	3.70	3.26	3.53	3.46	3.25	3.59	3.50	3.42	3.46	3.33	
Ce	2.56	1.29	1.32	1.29	3.26	7.89	7.28	7.16	7.13	7.42	7.20	7.32	7.70	7.80	7.22	
Pr	0.28	0.15	0.23	0.17	0.36	0.99	0.99	0.88	0.78	0.96	0.94	0.87	0.95	0.99	0.90	
Nd	1.28	0.75	0.91	0.85	1.75	4.19	4.21	4.67	4.13	4.29	4.11	4.43	4.34	4.49	4.23	
Sm	0.26	0.17	0.15	0.18	0.43	1.54	1.32	1.28	1.26	1.03	1.43	1.68	1.76	1.20	1.29	
Eu	0.10	0.03	0.04	0.04	0.09	0.54	0.59	0.50	0.59	0.61	0.54	0.57	0.55	0.52	0.50	
Gd	0.28	0.22	0.13	0.14	0.39	1.38	1.84	1.91	1.52	1.76	1.90	1.28	1.58	1.44	1.17	
Tb	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.27	0.25	0.19	0.22	0.24	0.30	0.23	0.21	0.23	0.24	
Dy	0.32	0.21	0.24	0.31	0.21	1.48	1.49	1.51	1.61	1.43	1.33	1.77	1.34	1.72	1.36	
Ho	0.07	0.07	0.05	0.07	0.09	0.33	0.33	0.31	0.28	0.29	0.30	0.31	0.29	0.28	0.33	
Er	0.33	0.19	0.27	0.26	0.24	0.73	0.69	0.84	0.77	0.89	0.69	0.73	0.67	0.93	0.75	
Tm	0.04	0.03	0.04	0.07	0.04	0.10	0.08	0.11	0.10	0.10	0.09	0.07	0.11	0.08	0.07	
Yb	0.42	0.47	0.39	0.32	0.40	0.61	0.49	0.67	0.50	0.62	0.64	0.67	0.74	0.55	0.63	
Lu	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.08	
Hf	0.18	0.08	0.07	0.07	0.14	0.70	0.75	0.56	0.68	0.69	0.60	0.68	0.59	0.50	0.61	
Ta	0.07		0.01		0.07	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	
Pb	0.05	0.02	0.04	0.03	0.08	0.14	0.14	0.09	0.15	0.10	0.04	0.12	0.09	0.13	0.07	
Th	0.09	0.01	0.01	0.01	0.10	0.42	0.43	0.42	0.46	0.51	0.42	0.44	0.43	0.43	0.45	
U	0.02	0.25			0.02	0.07	0.08	0.06	0.07	0.08	0.09	0.05	0.06	0.08	0.09	

续表 4-1

Continued Table 4-1

样品	KD11-26					KD11-40			KD11-57				
	颗粒 1					颗粒 1			颗粒 1				
	边	核	边	核	边	边	核	边	边	核	边	核	边
SiO ₂	51.1	50.9	51.4	51.3	50.9	51.4	51.4	51.4	50.5	50.4	50.5	50.4	50.3
TiO ₂	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.04	0.04	0.04	0.33	0.30	0.30	0.31	0.30
Al ₂ O ₃	3.29	3.38	3.32	3.30	3.21	2.90	2.90	2.92	5.28	5.46	5.49	5.43	5.39
FeO	2.27	2.32	2.31	2.26	2.21	2.15	2.16	2.18	2.16	2.18	2.18	2.18	2.19
MnO	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08
MgO	17.2	17.2	17.1	17.0	17.1	19.0	19.0	19.1	16.6	16.7	16.6	16.6	16.5
CaO	23.5	23.5	23.3	23.5	24.0	21.7	21.8	21.6	21.8	21.4	21.4	21.7	21.8
Na ₂ O	1.10	1.12	1.09	1.09	1.07	1.10	1.08	1.09	1.80	1.84	1.87	1.84	1.84
Mg [#]	93.1	93.0	93.0	93.1	93.3	94.1	94.0	94.0	93.2	93.3	93.2	93.2	93.1
Cr [#]	19.7	19.8	19.9	19.6	18.9	25.8	25.8	25.8	15.4	15.4	15.4	15.4	15.3
Li	18.0	18.1	18.9	17.6	16.8	5.97	7.75	4.10	6.92	7.09	7.10	7.43	6.78
Sc	103	97.0	98.1	107	111	72.9	74.7	72.9	94.8	81.1	81.8	84.7	84.8
V	259	257	255	257	265	196	197	197	263	248	250	255	252
Cr	8 236	8 480	8 422	8 189	7 625	10 279	10 271	10 319	9 776	10 177	10 192	10 052	9 962
Co	16.2	17.0	15.8	15.9	15.4	21.5	21.8	21.5	16.5	16.7	17.3	16.1	16.2
Ni	258	272	271	267	267	396	392	393	266	265	262	269	266
Cu	0.61	2.80	1.30	1.89	1.25	1.61	3.04	1.65	2.83	2.45	2.45	3.39	2.15
Zn	5.76	5.74	5.20	4.49	4.48	7.75	9.15	10.3	5.44	5.58	5.75	4.99	5.77
Rb					0.06	0.01	0.24	0.44		0.05			
Sr	332	332	337	338	326	137	137	142	46.0	50.0	50.1	48.0	51.4
Y	9.20	9.52	8.82	9.01	9.35	3.71	3.58	3.74	14.4	13.9	13.9	14.4	13.8
Zr	39.3	38.6	37.2	38.6	39.3	8.25	12.9	12.3	26.2	25.3	24.1	24.8	26.1
Nb	0.04	0.04	0.02	0.03		1.85	2.44	3.16	0.14	0.17	0.16	0.17	0.18
Cs			0.07				0.04		0.02		0.01		
Ba		0.18		0.05	0.02	0.17	0.39	1.25	0.08	0.20		0.04	0.08
La	9.86	10.1	9.69	10.1	9.55	8.23	8.42	8.19	0.57	0.53	0.56	0.58	0.77
Ce	30.7	31.0	32.1	31.8	30.1	17.0	17.4	17.0	1.96	2.10	2.19	2.08	2.46
Pr	5.01	4.91	4.94	4.80	4.77	2.08	1.99	1.96	0.43	0.48	0.44	0.43	0.44
Nd	23.6	23.3	24.8	23.7	23.0	8.70	6.93	7.20	2.35	2.48	2.40	2.63	3.02
Sm	4.93	4.18	4.41	4.62	4.42	1.43	1.46	1.22	1.29	1.40	1.20	1.22	1.29
Eu	1.06	1.29	1.23	1.16	1.20	0.35	0.48	0.52	0.41	0.51	0.42	0.51	0.45
Gd	3.12	2.83	2.98	2.99	2.77	1.30	1.08	1.06	1.40	1.83	1.77	1.78	1.80
Tb	0.35	0.31	0.36	0.38	0.32	0.16	0.16	0.16	0.37	0.32	0.29	0.33	0.32
Dy	2.06	2.28	2.02	2.00	1.98	0.85	0.86	0.64	2.42	2.36	2.52	2.18	2.32
Ho	0.27	0.41	0.27	0.38	0.32	0.12	0.13	0.12	0.54	0.46	0.46	0.57	0.45
Er	0.85	0.95	0.71	0.84	0.96	0.35	0.28	0.32	1.63	1.53	1.61	1.41	1.45
Tm	0.12	0.15	0.16	0.11	0.14	0.04	0.05	0.05	0.21	0.17	0.20	0.17	0.21
Yb	0.81	0.85	0.59	0.97	0.92	0.20	0.48	0.32	1.65	1.48	1.45	1.44	1.30
Lu	0.08	0.10	0.11	0.12	0.12	0.07	0.06	0.04	0.16	0.17	0.19	0.21	0.21
Hf	0.78	0.80	1.05	0.84	0.99	0.25	0.11	0.30	0.85	0.55	0.79	0.81	0.63
Ta	0.01			0.01	0.01	0.23	0.23	0.20	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02
Pb	1.06	1.03	1.00	1.09	0.84	0.14	0.08	0.17	0.04	0.05	0.05	0.04	
Th	0.53	0.53	0.54	0.48	0.29	0.69	0.61	0.76	0.03	0.03	0.05	0.02	0.04
U	0.10	0.11	0.11	0.09	0.11	0.07	0.11	0.12	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02

续表 4-2

Continued Table 4-2

样品	KD03-1					KD14-1					KD14-2				
	颗粒 1					颗粒 1					颗粒 2				
	边	核	边	核	边	边	核	边	核	边	边	核	边	核	边
SiO ₂	50.2	49.9	49.9	49.7	50.2	50.5	50.6	50.1	50.3	50.3	50.3	51.0	51.1	50.6	50.0
TiO ₂	0.42	0.47	0.48	0.48	0.46	0.39	0.39	0.41	0.39	0.50	0.57	0.38	0.39	0.40	0.53
Al ₂ O ₃	4.91	5.79	6.02	5.91	5.41	6.59	6.49	6.64	6.50	6.87	5.48	6.85	6.44	4.41	5.29
FeO	2.46	2.62	2.65	2.65	2.58	3.12	3.12	3.19	3.20	3.73	3.55	3.10	3.10	3.44	3.56
MnO	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11
MgO	16.7	16.2	16.1	16.2	16.5	16.3	16.3	16.5	16.5	16.7	17.7	16.0	16.3	18.6	18.1
CaO	23.0	22.4	22.2	22.3	22.4	20.3	20.4	20.4	20.3	19.5	20.6	19.8	20.0	20.7	20.6
Na ₂ O	1.46	1.62	1.65	1.65	1.57	1.66	1.66	1.64	1.66	1.02	0.68	1.69	1.67	0.50	0.63
Mg [#]	92.5	91.7	91.6	91.7	92.0	90.4	90.4	90.3	90.3	89.0	89.9	90.2	90.4	90.7	90.2
Cr [#]	8.22	8.31	8.10	8.17	8.12	7.99	8.07	7.95	8.20	7.69	10.1	7.42	7.87	14.2	10.8
Li	4.75	1.98	1.50	1.64	4.45	1.17	1.15	0.93	1.07	2.66	1.34	1.77	1.20	1.26	2.16
Sc	84.2	70.6	70.6	69.8	75.2	62.4	62.3	62.5	62.8	65.5	67.3	62.1	63.6	73.6	66.3
V	288	278	274	277	282	259	260	258	259	262	270	255	261	291	275
Cr	4 485	5 347	5 411	5 362	4 881	5 835	5 809	5 842	5 916	5 833	6 256	5 595	5 609	7 418	6 547
Co	17.2	17.7	18.1	17.5	17.4	23.6	23.3	23.8	23.6	26.9	27.1	23.8	23.3	29.4	29.5
Ni	273	274	272	275	266	397	384	383	386	401	451	456	386	464	613
Cu	3.46	0.69	0.34	0.65	6.99	6.20	1.22	1.16	1.11	8.37	4.52	7.25	2.07	2.30	23.2
Zn	5.18	5.05	5.14	4.87	5.27	9.53	9.45	9.54	8.98	20.3	13.3	10.3	9.25	14.9	16.4
Rb	0.59	0.34	0.23		1.41		0.11			0.23	0.07	0.10	0.05	0.11	0.08
Sr	54.5	57.2	58.3	58.8	57.2	61.7	62.6	64.8	62.6	44.3	31.0	59.6	61.2	21.5	29.3
Y	18.0	19.3	19.8	19.6	19.3	16.1	17.1	16.4	16.7	19.2	18.3	15.8	15.9	15.0	16.7
Zr	27.6	27.2	27.5	27.2	26.5	14.9	15.3	16.8	15.9	30.7	26.9	15.0	15.4	14.6	21.5
Nb	0.04	0.03	0.03	0.06	0.05	2.63	2.75	3.07	2.84	6.11	1.31	2.90	2.75	0.52	1.04
Cs		0.01					0.02	0.06	0.06		0.03				0.02
Ba	0.07				0.04	0.32	0.15	1.61	0.15	12.45	0.64	1.72	0.16	0.18	5.66
La	0.90	1.05	1.23	1.03	0.95	3.64	3.37	3.46	3.60	4.64	3.49	3.45	3.50	1.90	2.92
Ce	2.73	3.05	2.84	3.06	3.13	6.34	6.50	6.82	6.40	9.88	9.49	6.12	6.56	5.13	7.25
Pr	0.48	0.47	0.56	0.64	0.54	0.70	0.65	0.66	0.70	1.19	1.28	0.81	0.68	0.68	1.18
Nd	3.17	3.54	3.64	4.07	3.84	3.32	3.08	2.93	2.82	5.52	5.06	2.81	3.15	3.64	5.26
Sm	1.72	1.41	1.38	1.57	1.54	1.32	1.32	1.15	0.90	1.88	1.88	1.34	0.94	1.17	1.45
Eu	0.64	0.64	0.66	0.62	0.67	0.65	0.53	0.56	0.46	0.79	0.68	0.59	0.47	0.60	0.71
Gd	2.30	2.10	2.47	2.55	2.24	2.20	2.08	2.40	2.23	2.69	2.42	2.01	1.80	1.99	2.43
Tb	0.45	0.50	0.44	0.48	0.48	0.44	0.35	0.40	0.37	0.53	0.53	0.38	0.35	0.40	0.46
Dy	3.20	2.89	3.79	3.55	3.35	2.65	2.55	2.71	3.01	3.38	3.33	2.73	2.75	2.54	3.44
Ho	0.64	0.67	0.72	0.65	0.51	0.67	0.66	0.63	0.57	0.63	0.66	0.49	0.66	0.67	0.67
Er	1.85	1.99	2.14	1.98	1.99	1.85	2.01	1.61	1.90	1.99	2.06	1.77	1.80	1.66	1.89
Tm	0.37	0.38	0.35	0.32	0.32	0.30	0.29	0.30	0.27	0.35	0.30	0.20	0.24	0.23	0.22
Yb	2.03	2.01	2.21	2.36	2.21	1.67	1.41	1.31	1.50	1.85	1.86	1.59	1.58	1.37	1.70
Lu	0.29	0.27	0.30	0.27	0.26	0.24	0.20	0.20	0.23	0.25	0.26	0.19	0.26	0.24	0.26
Hf	1.00	1.08	0.95	0.87	0.80	0.68	0.60	0.92	0.60	1.04	1.09	0.63	0.73	0.49	0.81
Ta	0.01			0.01		0.33	0.35	0.31	0.26	0.98	0.21	0.29	0.29	0.07	0.14
Pb	0.59	0.22	0.15	0.26	0.64	0.10	0.06	0.08	0.05	0.50	0.56	2.22	0.04	0.08	1.87
Th	0.07	0.09	0.10	0.11	0.05	0.41	0.38	0.41	0.39	0.87	0.17	0.34	0.33	0.10	0.19
U	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.11	0.06	0.11	0.09	0.16	0.04	0.14	0.09	0.01	0.04

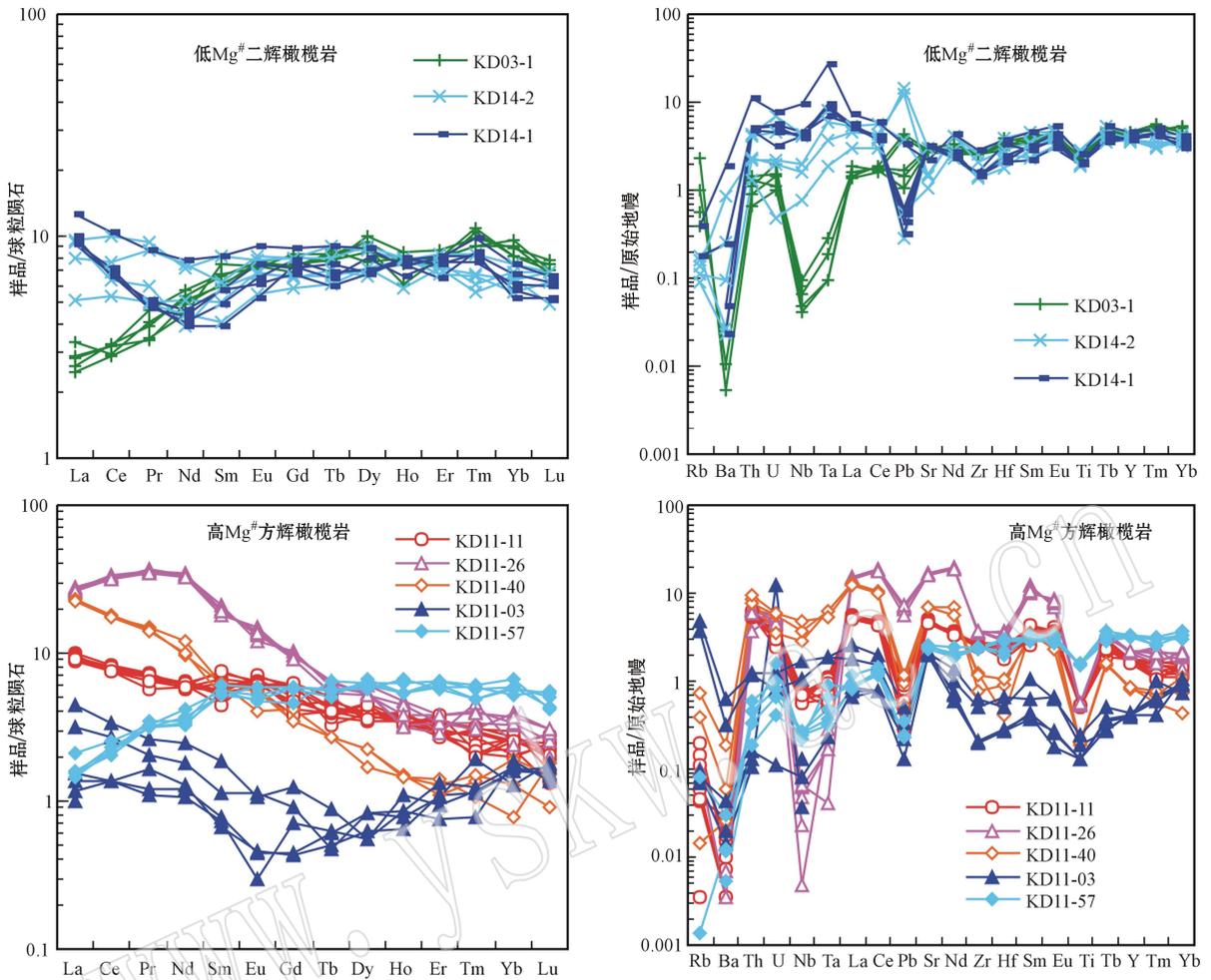


图 4 单斜辉石稀土元素球陨石 (Taylor and McLennan, 1985) 归一化值和微量元素原始地幔 (McDonough and Sun, 1995) 归一化配分模式图

Fig. 4 Chondrite (Taylor and McLennan, 1985) normalized REE patterns and primitive mantle (McDonough and Sun, 1995) normalized trace element patterns of clinopyroxenes

表 5 尖晶石的主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 组成

Table 5 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions of spinels

样品	KD11-03	KD11-26	KD11-57	KD03-1	KD14-1	KD14-2
SiO ₂	0.75	0.17	0.11	0.22	0.32	0.23
TiO ₂	0.04	0.10	0.10	0.05	0.13	0.13
Al ₂ O ₃	29.5	35.1	46.0	53.4	53.0	52.6
Cr ₂ O ₃	38.5	32.2	21.9	10.7	11.0	11.5
FeO	14.4	15.4	11.3	12.3	11.7	12.2
MnO	0.15	0.16	0.12	0.11	0.11	0.11
MgO	15.9	16.1	19.8	22.2	23.0	22.5
CaO			0.01	0.12	0.03	0.04
Mg [#]	66.6	65.2	76.0	76.4	78.0	76.9
Cr [#]	46.9	38.2	24.3	11.9	12.3	12.9
Li	0.56	0.37	0.34	0.79	0.77	0.55
Sc	2.78	1.05	0.94	0.27	0.67	0.46
V	1 109	1 088	581	424	433	440
Co	306	348	283	341	225	226
Ni	1 182	1 339	1 989	3 180	3 255	3 288
Cu	4.71	2.14	1.26	1.87	2.75	1.92
Zn	1 330	1 782	1 303	1 455	759	706

(如角闪石或金云母),但是二辉橄榄岩中单斜辉石 Mg[#] 和 CaO 含量呈正相关(图 2d),单斜辉石不同的微量元素特征(图 4)、部分矿物核边出现微量元素含量环带(图 6)和橄榄石、单斜辉石和斜方辉石中明显的 Li 含量环带(图 3)以及微量元素 Y 和 Yb 的相关图中部分样品明显偏离部分熔融趋势线(图 5),这些特征都表明了宽甸岩石圈地幔经历了地幔交代作用。由于地幔条件下 Li 在 Cpx 中的扩散速率比其它不相容元素快很多,因此单斜辉石中不同的微量元素配分模式以及 Li 含量核边环带表明了它们至少经历了两次地幔交代作用(Xu *et al.*, 2013)。

单斜辉石中轻稀土元素不同程度的富集表明了早期它们经历了不同程度的地幔交代作用,一般可以用亏损的地幔橄榄岩和交代介质之间的色柱层析交代反应来解释(Navon and Stolper, 1987; Bodinier *et al.*, 1990)。通常情况下,地幔交代介质主要有富

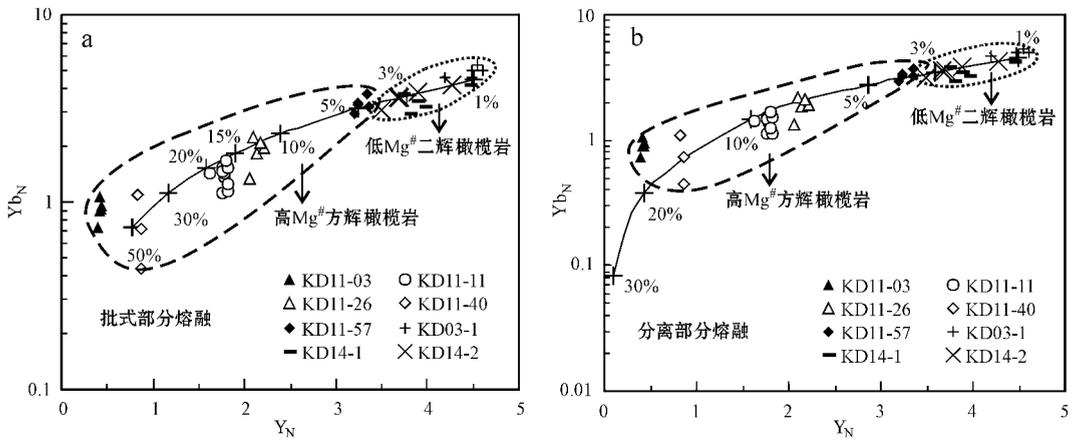


图 5 单斜辉石原始地幔(McDonough and Sun, 1995)归一化的部分熔融模拟

Fig. 5 Modeling of partial melting using primitive mantle (McDonough and Sun, 1995) normalized compositions of clinopyroxenes

碱含挥发分的硅酸盐熔体(Wulff-Pedersen *et al.*, 1996; Yogodzinski and Kelemen, 2007)碳酸盐熔体(Rudnick *et al.*, 1993; Yaxley *et al.*, 1998)或者是富水流体(Ionov *et al.*, 1997; Stalder *et al.*, 1998)。宽甸高 Mg[#] 橄榄岩样品的 Cpx 中 Nb 含量变化较大(表 4, 图 4)暗示在地幔交代中有 Nb 的加入。由于富水流体中 Nb 溶解度很低(Eggler, 1987)因此交代介质应该不是富水流体。Ti/Eu 比值和 (La/Yb)_N 比值是区分碳酸盐熔体交代和硅酸盐熔体交代的有效指标,一般经历过碳酸盐熔体交代其 Ti/Eu 比值小于 1 500,而 (La/Yb)_N 比值则大于 3(Rudnick *et al.*, 1993; Coltorti *et al.*, 1999),并且碳酸盐熔体交代一般具有富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素(Coltorti *et al.*, 1999),高 Th 和 U 含量(Touron *et al.*, 2008),高 Zr/Hf 比值(Dupuy *et al.*, 1992)的特征。宽甸高 Mg[#] 橄榄岩中 KD11-11、KD11-26 和 KD11-40 这 3 个样品富集轻稀土元素、亏损高场强元素(图 4)并且具有高的 Zr/Hf 比值(平均值分别为 43.2、43.9 和 62.2),低 Ti/Eu 比值(449-1252)和高的 (La/Yb)_N (3.13~28.4),落在了碳酸盐熔体交代的区域内(图 7)并且它们还具有较高的 La 和 Sr 含量(图 7)。另外两个高 Mg[#] 方辉橄榄岩包体及宽甸低 Mg[#] 二辉橄榄岩包体的单斜辉石具有高的 Ti/Eu 比值(2 270~6 085)和低的 (La/Yb)_N (0.23~2.80),落在了硅酸盐熔体交代的区域内(图 7),这些特征说明了宽甸岩石圈地幔经历了复杂的交代过程,既有硅酸盐熔体的交代又有碳酸盐熔体的改造。通常碳酸盐熔体

被认为是稳定克拉通的产物,因此受碳酸盐熔体交代的橄榄岩很有可能代表了古老的岩石圈地幔物质。KD11-26 中单斜辉石稀土元素呈上凸型配分模式(图 4)表明它们可能已经和富集轻稀土元素的交代介质达到了平衡(Navon and Stolper, 1987),因此根据单斜辉石微量元素含量以及这些微量元素在单斜辉石/碳酸盐熔体中的分配系数(Dasgupta *et al.*, 2009),可以计算出与这些单斜辉石达到平衡的熔体成分(图 8)。模拟计算结果表明该碳酸盐熔体与莱芜-淄博碳酸岩(Ying *et al.*, 2004)类似,也与典型的大陆火成碳酸岩(Huang *et al.*, 1995; Smithies and Marsh, 1998; Thompson *et al.*, 2002; Agashev *et al.*, 2008; Bühn, 2008; Catlos *et al.*, 2008; Gwalani *et al.*, 2010)和大洋火成碳酸岩(Hoernle *et al.*, 2002; Mourão *et al.*, 2010)类似(图 8),指示了幔源碳酸岩浆成因。3 个二辉橄榄岩样品 KD03-1、KD14-1 及 KD14-2 中单斜辉石微量元素特征(图 4)类似于我们之前研究的宽甸二辉橄榄岩样品,它们可能也经历过与俯冲太平洋板块不同部位释放出的熔/流体有关的交代改造(Xu *et al.*, 2013)。

宽甸橄榄岩中橄榄石、斜方辉石以及单斜辉石的 Li 含量核边环带(图 3)表明宽甸岩石圈地幔后期又经历了一次富 Li 熔/流体交代改造(Xu *et al.*, 2013)。在未经过地幔交代的平衡橄榄岩中,相比辉石 Li 更倾向于进入橄榄石中(“正常地幔”橄榄石中 Li 含量 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$,辉石中 Li 含量 $0.5 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-6}$) (Seitz and Woodland, 2000)。宽甸橄榄岩包体中 Li 含量分布特征为:单斜辉石 > 斜

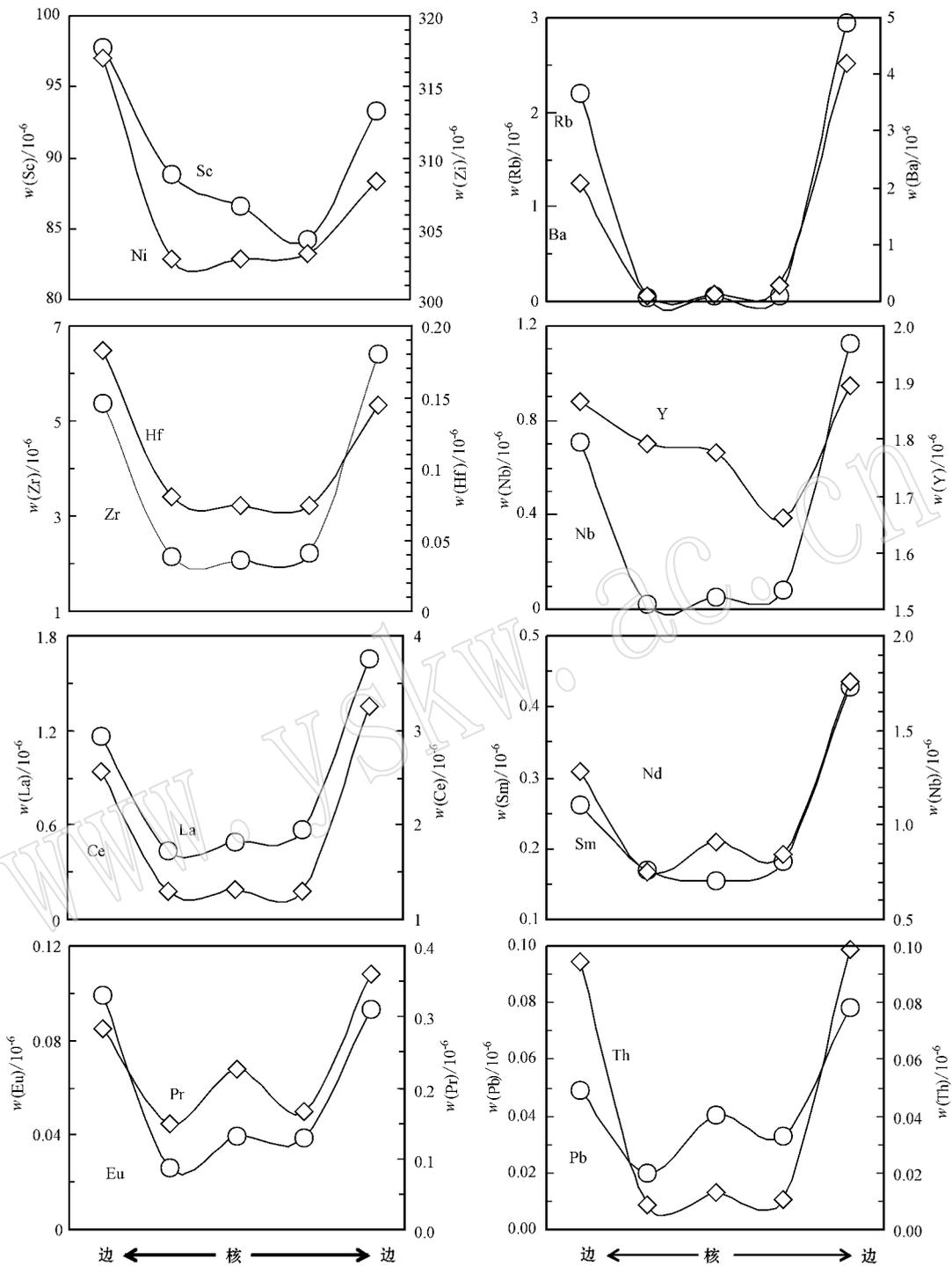


图 6 KD11-03 中单斜辉石核-边微量元素含量变化

Fig. 6 Trace element variations from core to rim across a clinopyroxene grain from KD11-03

方辉石 > 橄榄石 (图 9), 表明了它们并没有达到平衡。一般情况下, 在经历了硅酸盐熔体交代的橄榄岩中, 相比橄榄石 Li 更容易富集在辉石中 (Seitz *et al.*, 2004), 这说明了后期交代改造宽甸橄榄岩的富

Li 熔/流体介质为硅酸盐熔体。尽管本文并未对这些矿物的原位 Li 同位素进行测试, 但是我们之前的研究发现, 通常情况下, 具有高 Li 含量的矿物边部所对应的 Li 同位素一般比核部低 (Xu *et al.*, 2013), 这

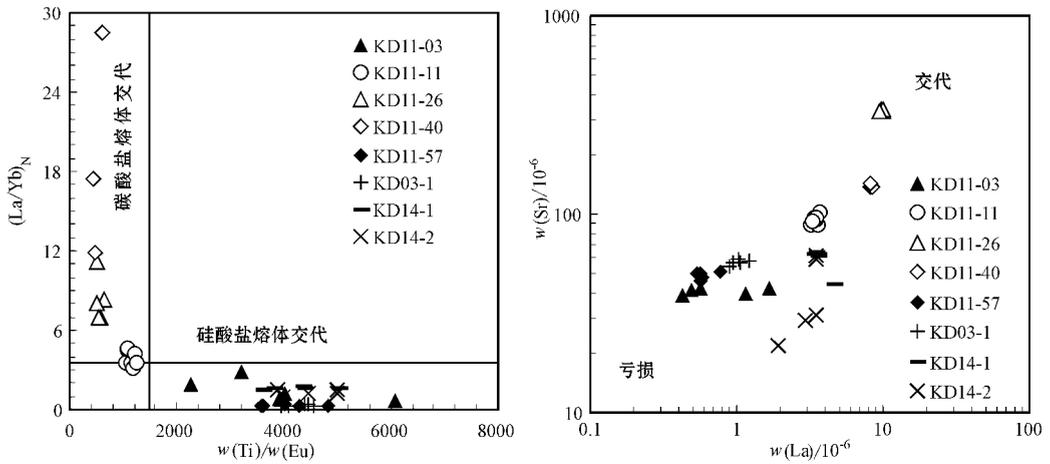


图 7 单斜辉石的 $(La/Yb)_N$ - Ti/Eu 比值以及 $Sr-La$ 含量图解(硅酸盐熔体和碳酸盐熔体交代特征来自 Coltorti 等, 1999)

Fig. 7 Plots of $(La/Yb)_N$ versus Ti/Eu and Sr versus La in clinopyroxenes (fields for carbonatitic and silicate metasomatism after Coltorti *et al.*, 1999)

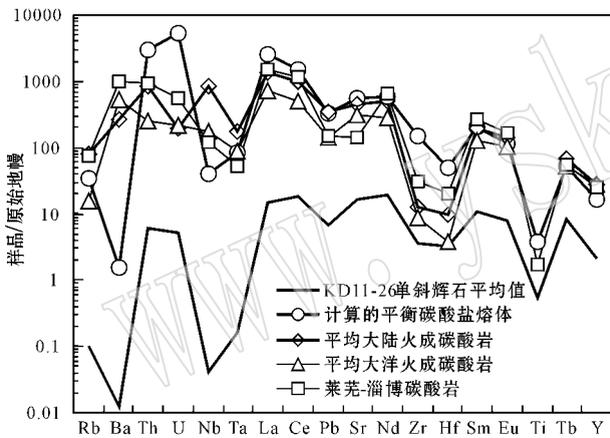


图 8 模拟计算与 KD11-26 中单斜辉石平衡的碳酸盐熔体的微量元素成分

Fig. 8 Trace element composition of hypothetical carbonatitic melt in equilibrium with clinopyroxene from KD11-26 平均大陆火成碳酸岩来自 Huang 等(1995) Smithies 和 Marsh (1998) Thompson 等(2002) Agashev 等(2008) Böhn (2008) Catlos 等(2008) 和 Gwalani 等(2010), 平均大洋火成碳酸岩来自 Hoernle 等(2002) 和 Mourão 等(2010) 莱芜-淄博碳酸岩来自 Ying 等(2004) 单斜辉石和碳酸盐熔体的分配系数来自 Dasgupta 等(2009)

Data for continental carbonates from Huang *et al.* (1995), Smithies and Marsh (1998), Thompson *et al.* (2002), Agashev *et al.* (2008), Böhn (2008), Catlos *et al.* (2008) and Gwalani *et al.* (2010); data for oceanic carbonates from Hoernle *et al.* (2002) and Mourão *et al.* (2010); Laiwu-Zibo carbonates from Ying *et al.* (2004); partition coefficients between clinopyroxenes and carbonatitic melts from Dasgupta *et al.* (2009)

可以解释为硅酸盐熔体交代时 Li 同位素经历的扩散动力学分馏。当温度在 $800 \sim 1000^\circ C$ 时,对于 1 mm 和 2 mm 大小的单斜辉石颗粒, Li 含量环带分别会在最长不到 4 Ma 和 16 Ma 内消失(图 10),这说明了最后一期的富 Li 硅酸盐熔体交代事件发生在寄主玄武岩浆喷发之前不久(Xu *et al.*, 2013)。

地球物理资料研究表明太平洋板块已经俯冲滞留在中国东部的上下地幔过渡带内,并且向西一直延伸到了太行山地区(Zhao *et al.*, 2009),这说明中国东部深部地幔长期受到扰动。Zhu 等(2012)认为太平洋板块俯冲到欧亚大陆之下及其后续作用是造成华北克拉通东部岩石圈发生减薄的主要原因。一方面俯冲本身可以释放熔/流体来交代改造岩石圈地幔(Chen and Zhou, 2005; Niu, 2005; Zhang *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2012; Xu Y G *et al.*, 2012; Xu Z *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2012),另一方面俯冲作用可以扰动软流圈,使得软流圈沿岩石圈薄弱带(如郯庐断裂带)强烈上涌并通过熔体-橄榄岩作用的方式侵蚀并置换上覆岩石圈地幔而引起华北克拉通的破坏和岩石圈的减薄(Xu, 2001; Zheng *et al.*, 2006, 2007)。宽甸地区临近太平洋板块俯冲带西缘,俯冲释放出的熔/流体(Xu *et al.*, 2013)以及来自软流圈地幔的硅酸盐和碳酸盐熔体为宽甸岩石圈地幔的改造提供了丰富的物质来源。

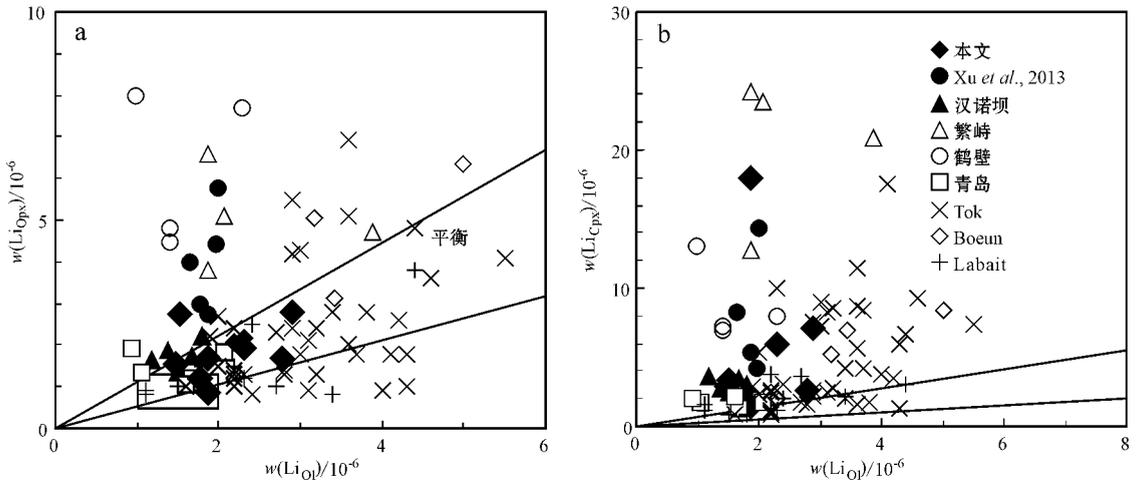


图 9 橄榄石中 Li 平均含量对斜方辉石中 Li 平均含量 (a) 单斜辉石中 Li 平均含量 (b) 图解

Fig. 9 Average Li content in olivine versus orthopyroxene (a) and clinopyroxene (b)

其他数据来源: 汉诺坝 (Tang *et al.*, 2007) 繁峙及鹤壁 (Tang *et al.*, 2010) 青岛 (Zhang *et al.*, 2010) Tok (Rudnick and Ionov, 2007) Boeur (Kil, 2010) Labait (Aulbach and Rudnick, 2009); 矩形区域代表“正常地幔”范围 (Seitz and Woodland, 2000); 两条实线之间的平衡区域代表平衡未受变代的橄榄岩 (Brenan *et al.*, 1998; Seitz and Woodland, 2000)

Peridotite xenolith data from Hannuoba (Tang *et al.*, 2007), Fanshi and Hebi (Tang *et al.*, 2010), Qingdao (Zhang *et al.*, 2010), Tok (Rudnick and Ionov, 2007), Boeun (Kil, 2010) and Labait (Aulbach and Rudnick, 2009) are shown for comparison; The rectangular fields indicate the range of the “normal mantle” (Seitz and Woodland, 2000); The fields between solid lines show the range of the equilibrated, unmetasomatized peridotites (after Brenan *et al.*, 1998; Seitz and Woodland, 2000)

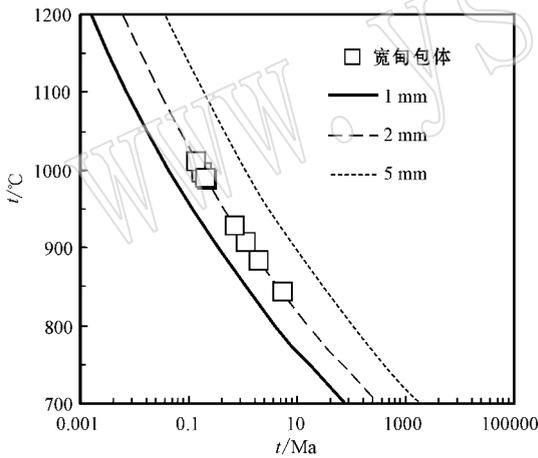


图 10 在不同地幔温度条件, 直径分别为 1、2 和 5 mm 的单斜辉石颗粒中 Li 含量环带扩散消失所需要的时间 (计算方法见 Coogan 等, 2005)

Fig. 10 Time for obliteration of zonation of Li content for 1, 2 and 5 mm wide clinopyroxene grain respectively under different mantle temperatures (calculated after Coogan *et al.*, 2005)

5 宽甸岩石圈地幔性质: 新生饱满和古老难熔组分并存

利用地幔橄榄岩包体的主量元素组成 (比如橄榄石的 F_o 值和橄榄石的含量) 可以有效地区分太古

宙和显生宙岩石圈地幔 (Boyd, 1989; Griffin *et al.*, 1998; Griffin *et al.*, 1999)。前人对中国东部新生代玄武岩中尖晶石二辉橄榄岩包体系统的岩石学、矿物学、主微量元素及 Sr-Nd 同位素地球化学研究表明, 这些二辉橄榄岩包体代表了新生的岩石圈地幔 (Zheng *et al.*, 1998; Fan *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2002; Rudnick *et al.*, 2004; Chu *et al.*, 2009; Xiao *et al.*, 2010)。宽甸低 $Mg^\#$ 二辉橄榄岩矿物组合 (表 1) 橄榄石较低的 $Mg^\#$ 和 CaO 含量 (图 3) 与中国东部晚白垩世玄武岩中低 $Mg^\#$ 橄榄岩 (Ying *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2011) 和新生代玄武岩中低 $Mg^\#$ 橄榄岩类似 (Zheng *et al.*, 1998, 2001, 2006; Fan *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2000; Gao *et al.*, 2002; Rudnick *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2008, 2010, 2012; Chu *et al.*, 2009; Xiao *et al.*, 2010)。在橄榄石 $Mg^\#$ -橄榄石含量图解上 (图 11), 宽甸低 $Mg^\#$ 二辉橄榄岩都落在显生宙橄榄岩 (Griffin *et al.*, 1998, 1999) 范围内或者附近区域, 并且落在大洋趋势线附近 (Boyd, 1989)。这些相似性说明了宽甸低 $Mg^\#$ 二辉橄榄岩的成因可能与中国东部晚白垩世玄武岩中低 $Mg^\#$ 橄榄岩 (Ying *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2011) 和新生代玄武岩中低 $Mg^\#$ 橄榄

岩的成因类似(Zheng *et al.*, 1998, 2001; Fan *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2000; Gao *et al.*, 2002; Rudnick *et al.*, 2004; Chu *et al.*, 2009; Xiao *et*

al., 2010),这也与 Wu 等(2006)报道的宽甸二辉橄榄岩包体具有较年轻的 Re 亏损 Os 模式年龄一致,可能都代表了新生的岩石圈地幔。

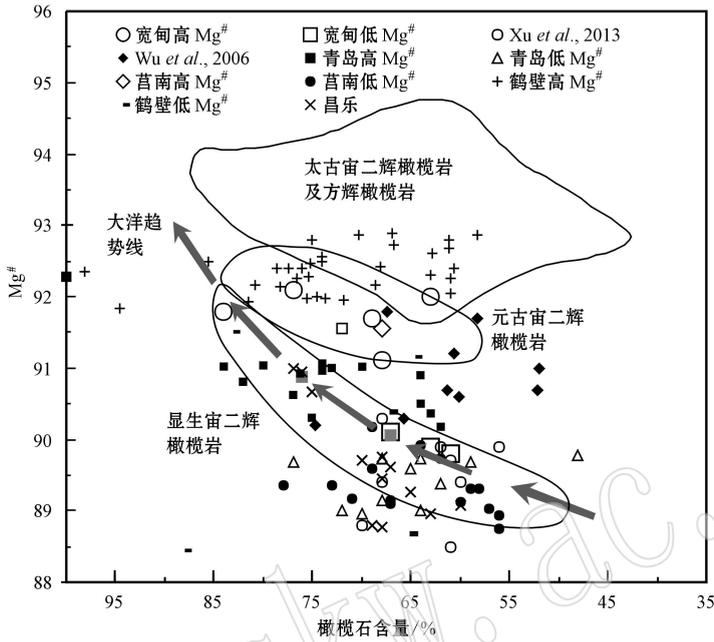


图 11 宽甸橄榄岩包体中 Mg[#]-橄榄石含量图解

Fig. 11. Modal of olivines versus Mg[#] of olivines from Kuandian peridotite xenoliths

大洋趋势线来自 Boyd (1989), 太古宙、元古宙和显生宙区域来自 Griffin 等(1999), 其他数据来源: 青岛(Zhang *et al.*, 2011)、莒南(Ying *et al.*, 2006)、鹤壁(Zheng *et al.*, 2001)及昌乐(Xiao *et al.*, 2010)

Oceanic trend after Boyd (1989); Archean, Proterozoic and Phanerozoic fields after Griffin *et al.*, 1999; Other data sources: Qingdao (Zhang *et al.*, 2011), Junan (Ying *et al.*, 2006), Hebi (Zheng *et al.*, 2001) and Changle (Xiao *et al.*, 2010)

古老岩石圈地幔(太古宙或元古宙)区别于显生宙岩石圈地幔最显著的特征就是大量高度难熔方辉橄榄岩及少量的贫单斜辉石二辉橄榄岩的出现(Boyd, 1989; Griffin *et al.*, 1999)。大多数太古宙难熔二辉橄榄岩只含有少量的单斜辉石,一般从太古宙经过元古宙到显生宙的岩石圈地幔难熔程度逐渐降低(Griffin *et al.*, 1998)。原始地幔经过玄武质熔体抽取后残留的岩石圈地幔会亏损 Al₂O₃、CaO 和 Na₂O 等玄武质组分。典型的太古宙克拉通岩石圈地幔通常都是高度亏损和难熔的,一般解释为原始地幔高度部分熔融后的残余(Boyd, 1989; Griffin *et al.*, 1999)。前人对古生代含金刚石金伯利岩中橄榄岩包体及捕虏晶的研究发现华北克拉通东部大部分岩石圈地幔是难熔的,一般是由石榴石到尖晶石相方辉橄榄岩和贫单斜辉石的二辉橄榄岩组成(Griffin *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2008),类似于南非 Kaapvaal 克拉通和西伯利亚克拉通中的地幔包

体(Boyd, 1989)。宽甸高 Mg[#]方辉橄榄岩中橄榄石 Mg[#]最高可达 92.3(表 2),类似于古生代金伯利岩中的难熔橄榄岩。宽甸高 Mg[#]方辉橄榄岩矿物及化学组成类似于鹤壁和繁峙新生代玄武岩中的高 Mg[#]橄榄岩及青岛劈石口玄武质基性岩脉中的高 Mg[#]橄榄岩(F_O 最高为 92.2)和莒南晚白垩世玄武质角砾岩中的高 Mg[#]橄榄岩(F_O 为 92)(图 11),它们一般被认为是太古宙岩石圈地幔的残留(Zheng *et al.*, 2001, 2006; Ying *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2008, 2010, 2013c; Zhang *et al.*, 2011)。所有这些特征都说明了宽甸高 Mg[#]方辉橄榄岩代表了古老难熔岩石圈地幔的残余,但是究竟是太古宙还是元古宙年龄尚不清楚。Wu 等(2006)通过对宽甸橄榄岩包体全岩 Re-Os 同位素的研究发现,该地区两个难熔方辉橄榄岩包体(F_O 值分别为 91.7 和 91.8)的 Os 同位素组成相对于现代对流上地幔是亏损的,Re 亏损年龄及 Os 模式年龄显示熔体抽取主要发生

在古元古代(1.46 ~ 1.97 Ga)甚至是太古宙(2.82 Ga),这也进一步证实了本文研究的宽甸高 Mg[#] 方辉橄榄岩包体是古老难熔岩石圈地幔的残余。两类地幔橄榄岩包体的平衡温度没有明显的差异(表 1),说明宽甸岩石圈地幔不存在明显的分层现象,不同性质的岩石圈地幔平衡温度是相互混杂叠置的。

6 结论

宽甸低 Mg[#] 二辉橄榄岩包体所经历的部分熔融程度较低,它们代表了新生饱满岩石圈地幔;宽甸高 Mg[#] 方辉橄榄岩包体经历了较高级别的部分熔融作用,它们代表了古老难熔岩石圈地幔的残留,部分方辉橄榄岩包体的微量元素特征表明了它们曾受到过幔源碳酸盐熔体的交代改造。太平洋板块俯冲释放的熔/流体以及因受俯冲作用扰动而上涌的软流圈硅酸盐和碳酸盐熔体可能对华北克拉通的破坏起到了重要作用。

致谢 衷心感谢英基丰研究员和闫峻教授对本文修改提出的宝贵意见。

References

- Agashev A, Pokhilenko N, Takazawa E, *et al.* 2008. Primary melting sequence of a deep (>250 km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada [J]. *Chemical Geology*, 255(3): 317~328.
- Aulbach S and Rudnick R. 2009. Origins of non-equilibrium lithium isotopic fractionation in xenolithic peridotite minerals: Examples from Tanzania [J]. *Chemical Geology*, 258(1~2): 17~27.
- Bühn B. 2008. The role of the volatile phase for REE and Y fractionation in low-silica carbonate magmas: implications from natural carbonatites, Namibia. *Mineralogy and Petrology*, 92(3~4): 453~470.
- Bodinier J L, Vasseur G and Vernieres J. 1990. Mechanisms of mantle metasomatism: geochemical evidence from the Lherz Orogenic peridotite [J]. *Journal of Petrology*, 31: 597~628.
- Boyd F. 1989. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 96(1~2): 15~26.
- Brenan J, Neroda E, Lundstrom C, *et al.* 1998. Behaviour of boron, beryllium, and lithium during melting and crystallization: constraints from mineral-melt partitioning experiments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(12): 2129~2141.
- Brey G P and Kohler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers [J]. *Journal of Petrology*, 31(6): 1353~1378.
- Catlos E J, Dubey C S and Sivasubramanian P. 2008. Monazite ages from carbonatites and high-grade assemblages along the Kambam Fault (Southern Granulite Terrane, South India) [J]. *American Mineralogist*, 93(8~9): 1230~1244.
- Chen L H and Zhou X H. 2005. Subduction-related metasomatism in the thinning lithosphere: Evidence from a composite dunite-orthopyroxene xenolith entrained in Mesozoic Laiwu high-Mg diorite, North China Craton [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(6): 1~20.
- Chu Z Y, Wu F Y, Walker R J, *et al.* 2009. Temporal Evolution of the Lithospheric Mantle beneath the Eastern North China Craton [J]. *Journal of Petrology*, 50(10): 1857~1898.
- Coltorti M, Ponadiman C, Hinton R, *et al.* 1999. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: evidence from clinopyroxenes and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean [J]. *Journal of Petrology*, 40(1): 133~165.
- Coogan L, Kasemann S and Chakraborty S. 2005. Rates of hydrothermal cooling of new oceanic upper crust derived from lithium-geospeedometry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2): 415~424.
- Dasgupta R, Hirschmann M M, McDonough W F, *et al.* 2009. Trace element partitioning between garnet lherzolite and carbonatite at 6.6 and 8.6 GPa with applications to the geochemistry of the mantle and of mantle-derived melts [J]. *Chemical Geology*, 262(1~2): 57~77.
- Downes H. 2001. Formation and modification of the shallow sub-continental lithospheric mantle: a review of geochemical evidence from ultramafic xenolith suites and tectonically emplaced ultramafic massifs of western and central Europe [J]. *Journal of Petrology*, 42(1): 233~250.
- Dupuy C, Liotard J and Dostal J. 1992. Zr/Hf fractionation in intraplate basaltic rocks: carbonate metasomatism in the mantle source [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(6): 2417~2423.
- Eggler D H. 1987. Solubility of Major and Trace Elements in Mantle Metasomatic Fluids: Experimental Constraints [M]. London: Mantle Metasomatism, Academic Press, 21~41.
- Fan W M, Zhang H F, Baker J, *et al.* 2000. On and off the North China Craton: Where is the Archaean keel? [J]. *Journal of Petrology*, 41(7): 933~950.
- Foley S, Andronikov A, Jacob D, *et al.* 2006. Evidence from Antarctic mantle peridotite xenoliths for changes in mineralogy, geochemistry and geothermal gradients beneath a developing rift [J]. *Geochimica*

- et *Cosmochimica Acta*, 70(12): 3 096~3 120.
- 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[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3~4): 307~322.
- Gao S, Rudnick R L, Xu W L, *et al.* 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 270(1): 41~53.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 432(7 019): 892~897.
- Griffin W, Andi Z, O'Reilly S, *et al.* 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton[J]. *Geodynamics Series*, 27: 107~126.
- Griffin W, O'Reilly S and Ryan C. 1999. The composition and origin of sub-continental lithospheric mantle. mantle petrology: field observations and high-pressure experimentation. A Tribute to France R. (Joe) Boyd[J]. *Geochemical Society Special Publications*, 6: 13~46.
- Gwalani L, Rogers K, Demény A, *et al.* 2010. The Yungul carbonatite dykes associated with the epithermal fluorite deposit at Speewah, Kimberley, Australia: carbon and oxygen isotope constraints on their origin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 98(1~4): 123~141.
- Hoernle K, Tilton G, Le Bas M J, *et al.* 2002. Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142(5): 520~542.
- Huang Y M, Hawkesworth C, Van Calsteren P, *et al.* 1995. Geochemical characteristics and origin of the Jacupiranga carbonatites, Brazil[J]. *Chemical Geology*, 119(1): 79~99.
- Ionov D A, Griffin W L and O'Reilly S Y. 1997. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle[J]. *Chemical Geology*, 141(3~4): 153~184.
- Kil Y. 2010. Lithium isotopic disequilibrium of minerals in the spinel lherzolite xenoliths from Boeun, Korea[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 107(1): 56~62.
- Lai Yong, Liu Yulin, Huang Baoling, *et al.* 2005. The characteristics of noble gases in mantle-derived xenoliths in Wudalianchi and Kuandian, NE China: MORB-like mantle and metasomated mantle[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1 373~1 381 (in Chinese with English abstract).
- Liu Congqiang and Xie Guanghong. 1993. REE and Sr, Nd isotope geochemistry of the mantle xenoliths from Huangyishan basalt, Kuandian, Liaoning Province[J]. *Scientia Geologica Sinica* 28(3): 228~234 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Deng Jinfu and E Molan. 1981. On the origin of Huangyishan alkaline basaltic magma, Kuandian County, Liaoning Province [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1: 183~196 (in Chinese with English abstract).
- Liu C Q, Huang Z L, Xie G H, *et al.* 2004. Geochemical records of mantle processes in mantle xenoliths from three Cenozoic basaltic volcanoes in eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 78(5): 1 109~1 121.
- Liu D Y, Nutman A, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of $\geq 3 800$ Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 20(4): 339~342.
- Liu S A, Teng F Z, Yang W, *et al.* 2011. High-temperature inter-mineral magnesium isotope fractionation in mantle xenoliths from the North China craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 308(1~2): 131~140.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 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]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- 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[J]. *Chemical Geology*, 257(1): 34~43.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The Composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 223~253.
- Menzies M A, Fan W M and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 76(1): 71~81.
- Mourão C, Mata J, Doucelance R, *et al.* 2010. Quaternary extrusive calcicarbonatite volcanism on Brava Island (Cape Verde): A nephelinite-carbonatite immiscibility product[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 56(2): 59~74.
- Navon O and Stolper E. 1987. Geochemical consequences of melt percolation: the upper mantle as a chromatographic column[J]. *The Journal of Geology*: 285~307.
- 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[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 9~46.
- Norman M D. 1998. Melting and metasomatism in the continental lithosphere: laser ablation ICPMS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 130(3): 240~255.
- O'Reilly S, Griffin W, Poudjom Djomani Y, *et al.* 2001. Are lithospheres forever? Tracking changes in subcontinental lithospheric mantle through time[J]. *GSA Today*, 11(4): 4~10.
- Rudnick R L and Ionov D A. 2007. Lithium elemental and isotopic dis-

- equilibrium in minerals from peridotite xenoliths from far-east Russia : Product of recent melt/fluid-rock reaction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(1~2): 278~293.
- Rudnick R L, McDonough W F and Chappell B W. 1993. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle : petrographic and geochemical characteristics [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 114(4): 463~475.
- Rudnick R L, Gao S, Ling W L, *et al.* 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton [J]. *Lithos*, 77(1~4): 609~637.
- Seitz H M, Brey G P, Lahaye Y, *et al.* 2004. Lithium isotopic signatures of peridotite xenoliths and isotopic fractionation at high temperature between olivine and pyroxenes [J]. *Chemical Geology*, 212(1~2): 163~177.
- Seitz H M and Woodland A B. 2000. The distribution of lithium in peridotitic and pyroxenitic mantle lithologies-an indicator of magmatic and metasomatic processes [J]. *Chemical Geology*, 166(1~2): 47~64.
- Smithies R and Marsh J. 1998. The Marinkas Quellen Carbonatite Complex, southern Namibia ; carbonatite magmatism with an uncontaminated depleted mantle signature in a continental setting [J]. *Chemical Geology*, 148(3): 201~212.
- Stalder R, Foley S, Brey G, *et al.* 1998. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900~1 200°C and 3.0~5.7 GPa : New experimental data for garnet, clinopyroxene, and rutile, and implications for mantle metasomatism [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(10): 1 781~1 801.
- Tang Y J, Zhang H F, Delouie E, *et al.* 2012. Slab-derived lithium isotopic signatures in mantle xenoliths from northeastern North China Craton [J]. *Lithos*, 149 : 79~90.
- Tang Y J, Zhang H F, Nakamura E, *et al.* 2010. Multistage melt/fluid-peridotite interactions in the refertilized lithospheric mantle beneath the North China Craton : Constraints from the Li-Sr-Nd isotopic disequilibrium between minerals of peridotite xenoliths [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(6): 845~861.
- Tang Y J, Zhang H F, Santosh M, *et al.* 2013a. Differential destruction of the North China Craton : A tectonic perspective [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*. Doi : 10.1016/j.jseaes. 2012. 11. 047, in press.
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, *et al.* 2013b. Widespread refertilization of cratonic and circum-cratonic lithospheric mantle [J]. *Earth-Science Reviews*, 118 : 45~68.
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, *et al.* 2013c. Highly heterogeneous lithospheric mantle beneath the Central Zone of the North China Craton evolved from Archean mantle through diverse melt refertilization [J]. *Gondwana Research*, 23(1): 130~140.
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, *et al.* 2008. Refertilization of ancient lithospheric mantle beneath the central North China Craton : evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths [J]. *Lithos*, 101(3): 435~452.
- Tang Y J, Zhang H F, Nakamura E, *et al.* 2007. Lithium isotopic systematics of peridotite xenoliths from Hannuoba, North China Craton : Implications for melt-rock interaction in the considerably thinned lithospheric mantle [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(17): 4 327~4 341.
- Tatsumoto M, Basu A R, Huang W K, *et al.* 1992. Sr, Nd, and Pb Isotopes of Ultramafic Xenoliths in Volcanic-Rocks of Eastern China-Enriched Components EMI and EMII in Subcontinental Lithosphere [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(1~2): 107~128.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust : Its Composition and Evolution* [M]. Blackwell Scientific, 328.
- Thompson R, Smith P, Gibson S, *et al.* 2002. Ankerite carbonatite from Swartbooisdrif, Namibia : The first evidence for magmatic ferrocarnatite [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(3): 377~396.
- Touron S, Renac C, O'Reilly S, *et al.* 2008. Characterization of the metasomatic agent in mantle xenoliths from Deves, Massif Central (France) using coupled in situ trace-element and O, Sr and Nd isotopic compositions [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 293(1): 177~196.
- Wang Y, Zhao Z F, Zheng Y F, *et al.* 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China [J]. *Lithos*, 125(3~4): 940~955.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, *et al.* 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1): 103~119.
- Wu F Y, Walker R J, Ren X W, *et al.* 2003. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China [J]. *Chemical Geology*, 196(1): 107~129.
- Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, *et al.* 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(19): 5 013~5 034.
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, *et al.* 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1 145~1 174 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, *et al.* 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China [J]. *Chemical Geology*, 221(1): 127~156.
- Wu Maobing, Wang Xianbin, Ye Xianren, *et al.* 2003a. He and Ar isotopic compositions in Cenozoic alkali basalts and mantle-derived xenoliths from Kuandian volcanics in Liaoning Province, China [J]. *Geochimica*, 32(5): 401~405 (in Chinese with English abstract).
- Wu Maobing, Wang Xianbin, Ye Xianren, *et al.* 2003b. Noble gas iso-

- topic compositions of Cenozoic volcanics and mantle derived xenoliths from Kuandian in Liaoning Province and their significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 254~258 (in Chinese with English abstract).
- Wulff-Pedersen E, Neumann E R and Jensen B. 1996. The upper mantle under La Palma, Canary Islands: Formation of Si-K-Na-rich melt and its importance as a metasomatic agent[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 125(2): 113~139.
- Xiao Y, Zhang H F, Fan W M, *et al.* 2010. Evolution of lithospheric mantle beneath the Tan-Lu fault zone, eastern North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths [J]. *Lithos*, 117(1~4): 229~246.
- Xie G H, Wang J W, Wei K J, *et al.* 1992. The study on geochemistry of Cenozoic volcanic rock in Huangyishan, Kuandian, Liaoning Province [A]. Liu R X. *The Age and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rock in China* [C]. Beijing: Seismic Press (in Chinese).
- Xie G H, Wang J W, Wei K J *et al.* 1990. REE and Sr, Nd, Pb isotopic geochemistry of Huangyishan basalt, Kuandian, Liaoning, Northeast China [J]. *Science in China Series B*, 33(6): 747~756.
- Xu Rong, Liu Yongsheng, Tong Xirun, *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 [J]. *Chemical Geology*, 354: 107~123.
- Xu S and Liu C Q. 2002. Noble gas abundances and isotopic compositions in mantle-derived xenoliths, NE China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(9): 755~760.
- Xu S, Nagao K, Uto K, *et al.* 1998. He, Sr and Nd isotopes of mantle-derived xenoliths in volcanic rocks of NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(5~6): 547~556.
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W, *et al.* 2000. Genesis of young lithospheric mantle in southeastern China: an LAM-ICPMS trace element study [J]. *Journal of Petrology*, 41(1): 111~148.
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9): 747~757.
- Xu Y G, Zhang H H, Qiu H N, *et al.* 2012. Oceanic crust components in continental basalts from Shuangliao, Northeast China: Derived from the mantle transition zone? [J]. *Chemical Geology*, 328: 168~184.
- Xu Z, Zhao Z F and Zheng Y F. 2012. Slab-mantle interaction for thinning of cratonic lithospheric mantle in North China: Geochemical evidence from Cenozoic continental basalts in central Shandong [J]. *Lithos*, 146~147: 202~217.
- Yaxley G M, Green D H and Kamenetsky V. 1998. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere [J]. *Journal of Petrology*, 39(11~12): 1917.
- Ying J F, Zhang H F, Kita N, *et al.* 2006. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Jünan, Shandong Province, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(3~4): 622~638.
- Ying J F, Zhou X H and Zhang H F. 2004. Geochemical and isotopic investigation of the Laiwu-Zibo carbonatites from western Shandong Province, China, and implications for their petrogenesis and enriched mantle source [J]. *Lithos*, 75(3): 413~426.
- Yogodzinski G and Kelemen P. 2007. Trace elements in clinopyroxenes from Aleutian xenoliths: Implications for primitive subduction magmatism in an island arc [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3~4): 617~632.
- Yu S Y, Xu Y G, Ma J L, *et al.* 2010. Remnants of oceanic lower crust in the subcontinental lithospheric mantle: Trace element and Sr-Nd-O isotope evidence from aluminous garnet pyroxenite xenoliths from Jiaohe, Northeast China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 297(3~4): 413~422.
- Zhang H F. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3): 768~780.
- Zhang H F, Nakamura E, Sun M, *et al.* 2007. Transformation of subcontinental lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: Evidence from a highly fertile mantle xenolith from the North China craton [J]. *International Geology Review*, 49(7): 658~679.
- Zhang H F, Deloule E, Tang Y J, *et al.* 2010. Melt/rock interaction in remains of refertilized Archean lithospheric mantle in Jiaodong Peninsula, North China Craton: Li isotopic evidence [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(2): 261~277.
- Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, *et al.* 2008. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(3): 271~293.
- Zhang J J, Zheng Y F and Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China [J]. *Lithos*, 110(1~4): 305~326.
- Zhang J, Zhang H F, Kita N, *et al.* 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 [J]. *International Geology Review*, 53(2): 182~211.
- Zhao D P, Tian Y, Lei J S, *et al.* 2009. Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia: Role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173(3~4): 197~206.

- 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[J]. *Precambrian Research*, 107(1): 45~73.
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W, *et al.* 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean craton, eastern China[J]. *International Geology Review*, 40(6): 471~499.
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W, *et al.* 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution[J]. *Lithos*, 57(1): 43~66.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2006. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath eastern China[J]. *Journal of Petrology*, 47(11): 2233~2256.
- 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[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 71(21): 5203~5225.
- Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, *et al.* 2012. Destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1135~1159.

附中文参考文献

- 赖勇, 刘玉琳, 黄宝玲, 等. 2005. 五大连池和宽甸地幔包体的惰性气体同位素特征——MORB型地幔和交代型地幔[J]. *岩石学报*, 21(5): 1373~1381.
- 刘从强, 解广轰, 1993. 辽宁宽甸黄椅山玄武岩中地幔岩捕虏体的REE及Sr、Nd同位素地球化学[J]. *地质科学*, 28(3): 228~234.
- 路凤香, 邓晋福, 鄂莫岚, 1981. 辽宁宽甸黄椅山碱性玄武岩岩浆起源问题的讨论[J]. *地球科学*, 1: 183~196.
- 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[J]. *岩石学报*, 24(6): 1145~1174.
- 吴茂炳, 王先彬, 叶先仁, 等. 2003a. 辽宁宽甸新生代火山岩和地幔包体He-Ar同位素组成[J]. *地球化学*, 32(5): 401~405.
- 吴茂炳, 王先彬, 叶先仁, 等. 2003b. 辽宁宽甸新生代火山岩和地幔包体的稀有气体同位素组成及其演化意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(3): 254~258.