

华北克拉通岩石圈减薄机制:来自山东白垩纪基性一中基性岩浆岩 Re-Os 同位素地球化学特征的制约

杨红梅^{1,2},凌文黎^{2*},张军波²,段瑞春¹,高永娟²,邱啸飞¹,卢山松¹

1. 国土资源部武汉地质矿产研究所同位素地球化学研究室,湖北武汉 430223

2. 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:对华北山东地区不同构造单元中生代白垩纪基性一中基性岩浆岩进行了系统的 Re-Os 同位素研究。侵入岩样品采自鲁西济南岩体、鲁中沂南岩体和胶东的观水岩墙群,火山岩样品采自鲁西蒙阴、费县、方城青山群和鲁中安丘青山群。所有样品均以低 Re($0.076 \times 10^{-9} \sim 0.711 \times 10^{-9}$)和 Os($0.006 \times 10^{-9} \sim 1.030 \times 10^{-9}$)含量以及高放射成因 Os 同位素比值为特征,其相应的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值和 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值分别为 $0.1316 \sim 0.5291$ 和 $4.30 \sim 319.00$ (安丘粗面安山岩分别高达 1.463 和 1060.000),并具有较大变化范围($0.125 \sim 2.090$ Ga)的 Os 同位素模式年龄。在 Os-Nd 和 Os-Sr 同位素关系图上,这些样品分布于典型的岩石圈地幔与地壳端元组成之间,显示壳—幔源岩浆混合特征。然而,除 1 件观水岩体(MGS0610)和费县玄武岩之外,各地质单元样品之间或所有的中生代岩浆岩作为整体,样品的 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 与 $(\text{La/Ta})_N$ 和 $(\text{Th/Nb})_N$ 比值间缺乏明显的关系,说明样品的混源 Os 同位素并非来自岩浆作用过程中的地壳围岩混染。区内基性岩浆岩 Os 同位素模式年龄 T_{MA} 明显小于古生代地幔橄榄岩包体的 Re 亏损模式年龄(T_{RD}),可能为地幔条件下源岩与再循环地壳物质发生交代作用后 Re/Os 比值升高所致。蒙阴高镁安山岩和沂南闪长岩在 Yb-Re/Yb 图解中大致位于中生代辉石岩包体与地壳端元之间,也指示了下地壳拆沉后产生的熔体与地幔岩石可能发生了交代作用。蒙阴安山岩 MMY-12($\text{SiO}_2 = 56.4\%$)具有古老壳源特征的 Os 同位素模式年龄(2.090 Ga)、高 $\text{Mg}^{\#}$ (64.6)和高 Os 含量(0.089×10^{-9}),为这一解释提供了有力的佐证。

关键词:华北克拉通;山东;中生代基性一中基性岩浆岩;Re-Os 同位素;岩石圈减薄机制;地球化学。

中图分类号:P597

文章编号:1000-2383(2013)03-0529-12

收稿日期:2012-04-17

The Lithospheric Thinning Mechanism of North China Craton: Re-Os Isotopic Geochemistry Constraint from the Cretaceous Basic to Intermediate Basic Igneous Rocks in Shandong Province

YANG Hong-mei^{1,2}, LING Wen-li^{2*}, ZHANG Jun-bo², DUAN Rui-chun¹, GAO Yong-juan², QIU Xiao-fei¹, LU Shan-song¹

1. Isotope Geochemistry Lab., Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Wuhan 430223, China

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

Abstract: A Re-Os isotopic study of Mesozoic igneous basic to intermediate basic rocks from the western-, eastern- and Yishu fault belt tectonic units in Shandong province, North China Craton (NCC), is carried out. The samples consists of 13 intrusive rocks from the Jinan, Yinan plutons and Guanshui dykes, and 13 volcanic rocks from the Anqiu, Mengyin, Feixian and Fangcheng volcanic successions. Most samples have relatively low Re ($0.076 \times 10^{-9} \sim 0.711 \times 10^{-9}$) and Os ($0.006 \times 10^{-9} \sim 1.030 \times 10^{-9}$) contents and high radiogenic $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratios, with corresponding initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio of $0.1316 \sim 0.5291$ and $\gamma_{\text{Os}}(t)$ of $4.30 \sim 319.00$, except for rock MAQ0609 of the Anqiu trachyandesite with initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio of 1.463 and $\gamma_{\text{Os}}(t)$ of 1060.000 . The igneous rocks show a wide range of 0.125 to 2.090 Ga in Os isotope modal age (T_{MA}). On the $\gamma_{\text{Os}}(t)$

基金项目:国家自然科学基金委创新研究群体科学基金(No. 40821061);国家自然科学基金重点项目(No. 90914007);教育部和国家外国专家局高等学校学科创新引智计划(No. B07039);地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金(No. GPMR200609);国土资源部公益性行业科研专项(No. 200911043-19);中国地质调查局地质调查评价专项(No. 1212011121102)。

作者简介:杨红梅(1976—),女,副研究员,博士,主要从事同位素地球化学研究。E-mail: ycyanghmei@163.com

* 通讯作者:凌文黎,E-mail:wlling@cug.edu.cn

vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ and ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) vs. $\gamma_{\text{Os}}(t)$ diagrams, these rocks are positioned between the lithospheric mantle and crust fields, indicative of a crust–mantle interaction-related origin. All but one Guanshui gabbro (MGS0610) and Feixian basalts of the samples display no clear positive correlation between $\gamma_{\text{Os}}(t)$ and $(\text{La/Ta})_N$ or $(\text{Th/Nb})_N$, which suggests that the role of crustal assimilation or contamination during the magma ascending was insignificant. Compared with the Paleozoic mantle xenoliths, these mantle-derived rocks have evidently younger Os modal ages, higher Re/Os and $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratios. These crustal signs are likely to have been resulted from interactions of partial melts derived from delaminated lower crust rocks with ambient mantle under an upper mantle depth. Besides, on the Re/Yb vs. Yb diagram, samples of the Mengyin andesites and Yinan diorites are plotted between the Mesozoic pyroxene xenoliths and crust components, which may be best explained by mantle source rocks metasomatized by partial melts of delaminated eclogitic lower crust. Furthermore, a Mengyin andesite MMY-12 ($\text{SiO}_2 = 56.4\%$) has a modal age as old as 2.090 Ga, and high $\text{Mg}^{\#}$ (64.6) and Os content (0.089×10^{-9}), which provides an additional evidence for lithospheric thinning-related interaction between the delaminated lower crust and the convecting upper mantle.

Key words: North China Craton; Shandong Province; basic to intermediate basic igneous rocks; Re-Os isotope; lithospheric thinning; geochemistry.

0 引言

华北克拉通经历了由古生代 $>200\text{ km}$ 的古老克拉通大陆型岩石圈地幔至新生代 $<70\text{ km}$ 的新生大洋型岩石圈地幔的重大演化 (Menzies *et al.*, 1993; Menzies and Xu, 1998; Fan *et al.*, 2000; Ying *et al.*, 2006). 了解巨厚岩石圈减薄事件发生动力学机制对认识古克拉通的“活化”现象具有重要意义,但目前对该动力学机制的认识存在明显分歧。具有代表性的观点大体可分为两类:由于重力失稳引发的下地壳及岩石圈地幔拆沉作用(邓晋福等, 1994; Gao *et al.*, 1998, 2001, 2004)和深部软流圈地幔物质向上对流引起对岩石圈地幔的热—化学和(或)机械侵蚀(Xu, 2001; Xu *et al.*, 2004). 由于无论是拆沉的下地壳物质部分熔融作用,还是软流圈地幔对岩石圈地幔的侵蚀作用,均将导致对残余岩石圈地幔的交代作用,因此了解交代流体的性质已成为认识华北克拉通中—新生代岩石圈减薄作用动力学机制的关键。

Re-Os 同位素体系的性质与由不相容元素构成(如 Rb-Sr 和 Sm-Nd)的同位素体系不同。在地幔岩石部分熔融过程中,中等不相容元素 Re 趋于进入岩浆,而相容元素 Os 则趋于保留在地幔中,故经历了不同演化历史的地幔和地壳岩石具有差异明显的 Re/Os 比值和放射成因 Os 同位素组成。这些特征使得 Re-Os 同位素体系在岩石圈地幔性质(Alard *et al.*, 2002)、俯冲带演化(Alves *et al.*, 2002; Woodhead and Brauns, 2004; Dale *et al.*, 2007)、地幔柱事件(Xu *et al.*, 2007)和壳—幔物质再循环(Gao *et al.*, 2008)等研究中具有突出的应用优势,且近年来在与华北克拉通岩石圈减薄事件相关的地

幔岩石研究中取得了重要成果(Gao *et al.*, 2002, 2004, 2008; Wu *et al.*, 2003; 支霞臣和秦协, 2004; Zhang *et al.*, 2008).

山东地区是研究华北克拉通中—新生代岩石圈演化的重要区域之一。区内出露的古生代金伯利岩(池际尚等, 1996)和新生代碱性玄武岩(Zheng *et al.*, 1998; Fan *et al.*, 2000; Rudnick *et al.*, 2004)携带有大量的地幔岩包体,为认识华北克拉通岩石圈减薄现象和过程提供了重要线索(张宏福, 2006)。然而,中生代岩浆岩携带的地幔包体却十分稀少(Yan *et al.*, 2003; Chen and Zhou, 2005; Ying *et al.*, 2006),对中生代地幔岩石开展直接研究及认识岩石圈减薄时期的地幔性质受到了限制。由于中生代岩浆岩被认为是岩石圈减薄作用过程中形成的产物,深入了解中生代幔源岩浆岩的源区性质和成因,尤其是其对可能存在的地幔交代作用性质的揭示,对认识区域乃至华北克拉通中—新生代岩石圈演化具有重要意义。

本文报道了对山东省境内主要构造单元白垩纪基性岩浆岩和高 Mg 安山岩开展系统 Re-Os 同位素研究的成果。通过对典型岩浆岩 Os 同位素地球化学特征的分析,探讨了其源区性质和成因,为认识华北克拉通中生代岩石圈减薄的动力学机制提供了基性—中基性岩浆岩的 Os 同位素地球化学约束。

1 地质概况和样品来源

山东省位于华北克拉通东南部,从西到东可以划分为鲁西、鲁中(郯庐断裂或沂沭断裂带)、胶东和苏鲁造山带 4 个构造单元(图 1),是中国东部中—新生代重要的岩浆岩出露区。按照地层区划,山东省

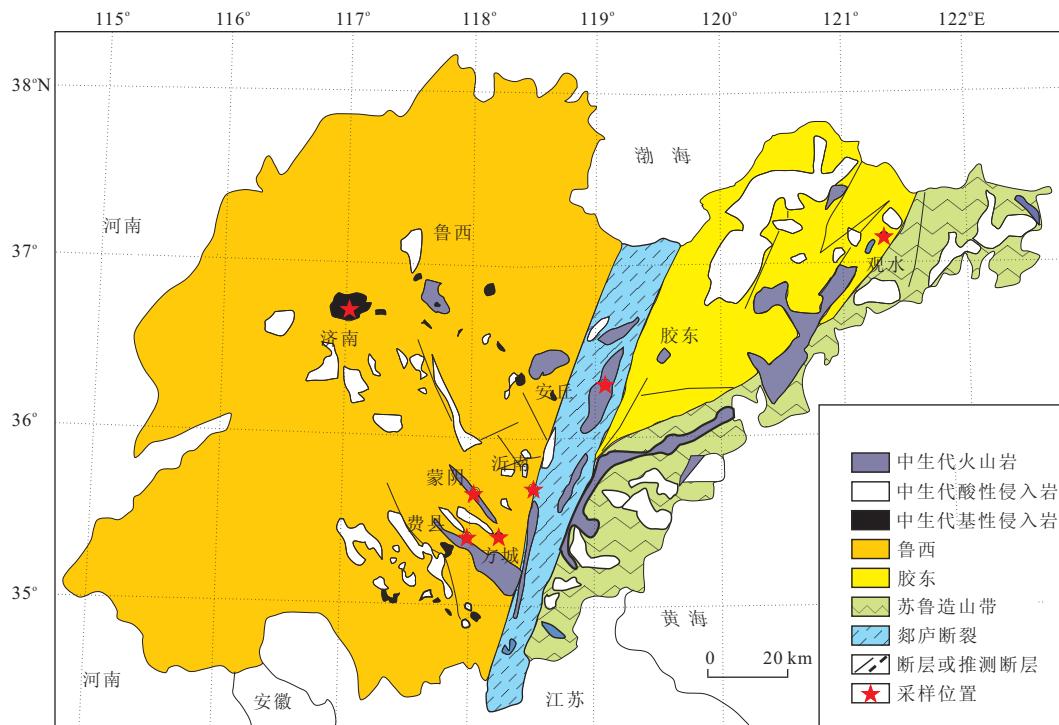


图1 山东省构造单元及中生代岩浆岩分布(据 Zhang and Sun, 2002 修改)

Fig. 1 The tectonic unit and distribution of the Mesozoic igneous rocks in Shandong Province

可分为鲁东、鲁西和华北平原3个中生代地层分区。在鲁东地层分区,缺失三叠纪和侏罗纪地层,发育白垩纪地层,从下至上由莱阳群、青山群、大盛群和王氏群组成。鲁西地层发育较全,由侏罗纪淄博群、白垩纪莱阳群、青山群、大盛群和王氏群构成,而华北平原地层分区与鲁西地层分区地层特点相似(张增奇和刘明渭,1996)。

山东中生代火山岩主要赋存于白垩纪青山群内(刘明渭等,2003),由火山熔岩和火山碎屑沉积岩系组成。鲁东地区以中、酸性岩为主,分布面积较大;鲁西地区则以中、基性岩(如蒙阴高Mg安山岩、方城玄武岩)为主,规模较小,多呈带状分布;而鲁中以发育中性、偏碱性火山岩为主,出露面积亦较小。中生代侵入岩主要出露于鲁西地区,代表性的岩体有济南岩体、邹平岩体、沂南岩体、莱芜岩体等,多为面積较小的岩株;而胶东地区侵入岩系主要为基性岩墙(如观水辉绿岩墙)。

本研究以鲁西济南、鲁中沂南和胶东观水的13件基性—中基性侵入岩,鲁中安丘、鲁西蒙阴、费县和方城13件基性—中基性火山岩为研究对象。这些样品的选择均是建立在系统的元素和Sr-Nd同位素地球化学研究的基础上(张军波,2008;张永清,2008),用于Re-Os同位素分析的样品具有高MgO

($Mg^{\#}$)、Cr和Ni含量,其Sr-Nd同位素组成没有受到围岩明显的混染,代表了各岩浆岩单元早期结晶作用的产物。

2 分析方法

在样品的加工过程中,中碎和细碎分别采用刚玉和玛瑙内胆装置。在样品Re-Os同位素分析化学流程中,称取~2 g岩石样品粉末装入Carius管中,加入适量¹⁹⁰Os稀释剂和2 mL浓HCl(优级纯HCl分别经石英亚沸蒸馏器和Teflon对瓶蒸馏器蒸馏),经乙醇—液氮浆(~−90 °C)冷冻后,加入适量¹⁸⁵Re稀释剂和4 mL浓HNO₃(纯化方法同HCl),用火焰封焊后装入不锈钢套;样品管在230 °C烘箱中溶样24 h,冷却后取出Carius管,超声30 min,再放入烘箱于230 °C溶样24 h;溶解好的样管开封后,样液用CCl₄萃取法分离Os(Cohen and Waters, 1996),并采用微蒸馏法(Birck *et al.*, 1997)进一步纯化Os; Re的分离与纯化采用AG1×8阴离子树脂交换法完成(陈雷等,2007)。Os同位素组成采用新型热电离质谱仪TRITON在负离子状态下进行测定。Re含量采用电感耦合等离子质谱ICP-MS测定。Re、Os的流程空白分别为

$\sim 7 \times 10^{-12}$ g 和 $3 \times 10^{-12} \sim 5 \times 10^{-12}$ g. 对于 Os 含量 $> 5 \times 10^{-11}$ 的样品, 其 Os 空白对样品的贡献 $< 5\%$, 基本可忽略不计. 而对于 Os 含量 $< 5 \times 10^{-11}$ 的样品, 其 Os 含量和比值数据均经空白校正. 化学全流程和质谱分析分别采用橄榄岩标样 WPR-1、辉长岩标样 TDB-1 和仪器标液 DTM 进行了质量监控, 其 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值分析结果分别为 $0.14535 \pm 0.00033(2\sigma)$ 、 $0.8789 \pm 0.0036(1\sigma)$ 和 $0.17398 \pm 0.00013(2\sigma)$, 与其对应的文献平均值 $0.14546 \pm 0.00034(2\sigma)$ (Cohen and Waters, 1996; Brauns, 2001)、 $0.863 \pm 0.047(1\sigma)$ (Ehrenbrink *et al.*, 2003; Meisel and Moster, 2004; Shinotsuka, 2006) 和 0.1739 (热电离质谱仪 TRITON 说明书) 在误差范围内完全一致. 同时对由美国马里兰大学完成的四合屯高 Mg 玄武岩 SHT-21 (Gao *et al.*, 2008) 进行了 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值重复分析, 所获结果 $0.1929 \pm 0.0014(2\sigma)$ 在误差范围内与文献值 $0.1920 \pm 0.0002(2\sigma)$ (Gao *et al.*, 2008) 相互吻合. 实验工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成.

3 分析结果

山东地区中生代基性侵入岩、青山组火山岩和辽西四合屯玄武岩样品的 Re-Os 同位素分析结果列于表 1. 样品总体上以高 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值(多数为 $0.23 \sim 0.76$)、低 Re($0.076 \times 10^{-9} \sim 0.711 \times 10^{-9}$) 和 Os($0.006 \times 10^{-9} \sim 1.030 \times 10^{-9}$) 含量为特征, 这些样品的 Re/Os 与 Os 含量之间具有负相关的分布趋势(图 2). 除鲁中安丘粗面安山岩(MAQ0609)的 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值(t 取 126 Ma) 高达 1060 之外, 其余样品的 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 介于 $4.30 \sim 319.00$ 之间. 此外, 样品的 Os 同位素模式年龄也具有 $0.125 \sim 2.090 \text{ Ga}$ 的较大变化范围.

4 讨论

4.1 Os 同位素特征与地壳混染

由于地壳与地幔岩石的 Re-Os 同位素组成差异显著, 因此幔源岩浆岩的高放射成因 Os 同位素组成反映的是否为岩浆上迁和结晶过程中受到了地壳围岩混染的结果, 对于解释岩浆岩 Re-Os 同位素的地球化学意义至关重要. 对方城和费县含幔源捕

虏晶玄武岩进行的研究表明, 其化学组成基本代表了原始幔源岩浆早期、快速结晶的特征 (Zhang *et al.*, 2002; 裴福萍等, 2004). 在济南辉长岩体和观水辉长—辉绿岩墙样品中, 选择了具有高 Mg[#] (≥ 70) 比值、高 MgO ($> 11\%$)、Ni ($186 \times 10^{-6} \sim 409 \times 10^{-6}$) 和 Cr ($835 \times 10^{-6} \sim 1101 \times 10^{-6}$) 含量特征的岩石, 它们代表了岩浆作用早期结晶或堆晶作用的产物 (张军波, 2008). 部分样品不同程度地含有橄榄石和斜方辉石堆晶, 其元素组成在一定程度上偏离了与原始岩浆的平衡, 但这些岩浆作用早期形成的岩石最大程度地避免了 AFC 过程导致的围岩混染作用, 故其 Re-Os 同位素组成更能指示岩浆源区的性质. 在岩浆结晶过程中, 元素 La 与 Ta 和 Th 与 Nb 之间具有相近的分配系数, 故单纯的岩浆结晶分异作用不会导致样品间 La/Ta 和 Th/Nb 比值的明显变化, 反之若样品的这些比值具较大的变化范围, 尤其是与其 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 具有明显的正相关时, 则指示了岩浆结晶过程受到了显著的地壳围岩混染. 图 3 为不同构造单元岩浆岩样品的 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值与 $(\text{La}/\text{Ta})_N$ 和 $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ 比值的相关关系图. 由图可见, 来自济南、沂南、蒙阴和方城的基性岩样品不仅元素比值变化有限, 且与初始 Os 同位素组成间缺乏明显的相关性, 说明样品的初始 Os 同位素组成特征基本代表了其初始岩浆的性质. 然而, 来自观水和费县的样品显示出范围相对较大的元素比值变化, 其中 1 件观水辉绿岩样品 (MGS0610) 具有较高的 $(\text{La}/\text{Ta})_N$ 、 $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ 比值和 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值, 可能指示了较明显的地壳混染. 费县玄武岩在 $(\text{La}/\text{Ta})_N-\gamma_{\text{Os}}(t)$ 关系图解(图 3a) 中略呈负相关分布, 但在 $(\text{Th}/\text{Nb})_N-\gamma_{\text{Os}}(t)$ 关系图解(图 3b) 中近似为正相关分布. 其中, SFX-52 和 SFX-58 具有较高的 $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ 比和 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值, 但其 $(\text{La}/\text{Ta})_N$ 比值却较低, 而 SFX-02 (含较多碳酸盐) 具有较高的 $(\text{La}/\text{Ta})_N$ 比值, 但其 $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ 比和 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值较低, 表明费县玄武岩的成因比较复杂, 这种 $(\text{La}/\text{Ta})_N$ 和 $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ 比之间的解耦可能源于该样品 Th 相对于 LREE 亏损.

4.2 Os-Nd-Sr 同位素特征对壳幔混合源区性质的指示

济南岩体和观水岩墙(除 MGS0610 外)样品的初始 Os 同位素比值范围分别为 $0.1316 \sim 0.5291$ 和 $0.1873 \sim 0.2236$, 而费县和方城玄武岩的范围分别为 $0.1322 \sim 0.3444$ 和 $0.1792 \sim 0.4503$ (表 1). 这些幔源岩浆岩的初始($t=125 \text{ Ma}$) Os 同位素比值均大于岩石圈地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值 $0.113 \sim$

表1 山东中生代不同构造单元基性—中基性岩浆岩 Re-Os 同位素组成

Table 1 Re-Os isotopic compositions of Mesozoic basic to intermediate basic igneous rocks from major tectonic units of the Shandong Province

样品编号	岩性 ^a	Re (10^{-9})	Os ^b (10^{-9})	$^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}^{\text{b},\text{c}}$ $\pm 2\sigma_m$	$(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_t$	$\gamma_{\text{Os}}(t)^{\text{d}}$	$T_{\text{MA}}(\text{Ga})^{\text{e}}$
鲁西济南岩体								
MJN0602	GD	0.115 5	0.019 8	28.8	0.3270 ± 0.0035	0.266 9	112.0	0.421
MJN0604	GD	0.082 7	0.019 7	21.2	0.2878 ± 0.0024	0.244 6	93.9	0.474
MJN0607	G	0.310 5	0.067 2	22.7	0.2370 ± 0.0015	0.189 9	50.5	0.297
MJN0608	G	0.136 3	0.015 4	22.6	0.6240 ± 0.0033	0.529 1	319.0	0.657
MJN0609	G	0.292 8	0.024 2	60.0	0.3357 ± 0.0042	0.210 5	66.9	0.210
MJN0610	GD	0.107 3	0.047 9	11.1	0.3308 ± 0.0006	0.307 7	144.0	1.140
MJN0613	GD	0.280 8	0.005 6	256.0	0.6659 ± 0.0058	0.131 6	4.30	0.126
胶东观水岩墙								
MGS0607	G	0.532 6	0.069 7	37.5	0.2655 ± 0.0011	0.187 3	48.4	0.224
MGS0608	MG	0.541 1	0.044 1	60.8	0.3504 ± 0.0002	0.223 6	77.2	0.221
MGS0610	G	0.453 1	0.052 1	43.6	0.4403 ± 0.0030	0.349 4	177.0	0.434
鲁中沂南岩体								
MYN0608	MD	0.107 9	0.020 1	26.4	0.2870 ± 0.0011	0.232 0	83.8	0.368
MYN0609	MD	0.119 9	0.024 8	23.7	0.2669 ± 0.0006	0.217 5	72.4	0.360
MYN0624	MD	0.114 6	0.033 4	16.7	0.2165 ± 0.0016	0.181 7	44.0	0.329
鲁中安丘火山岩								
MAQ0609	TA	0.710 7	0.007 8	586.0	2.685 ± 0.007	1.463 0	1 060.0	0.262
MAQ0609-R ^f	TA		0.010 0		2.981 ± 0.020			
鲁西蒙阴火山岩								
MMY-12	BTA	0.066 4	0.089 3	3.64	0.2420 ± 0.0021	0.234 4	85.8	2.090
MMY-15	BTA	0.157 7	0.029 9	25.8	0.2634 ± 0.0019	0.209 5	66.1	0.321
MMY-17	BA	0.102 3	0.007 3	69.9	0.4282 ± 0.0020	0.282 4	124.0	0.259
MMY-03	TA	0.089 4	0.038 7	11.3	0.2327 ± 0.0014	0.209 2	65.8	0.580
MMY-05	TA	0.203 4	0.007 2	147.0	0.7594 ± 0.0016	0.453 1	259.0	0.258
鲁西方城火山岩								
SFC-43	B	0.363 1	0.034 7	52.2	0.3818 ± 0.0028	0.273 1	116.0	0.295
SFC-44	B	0.117 4	0.025 7	22.3	0.2256 ± 0.0032	0.179 2	42.0	0.270
SFC-45	TB	0.078 9	0.019 0	65.7	0.5873 ± 0.0008	0.450 3	257.0	0.421
SFC-46	TB	0.075 5	0.015 8	23.6	0.3343 ± 0.0016	0.285 1	126.0	0.534
鲁西费县火山岩								
SFX-02	B	0.261 0	1.028 0	1.2	0.1348 ± 0.0008	0.132 2	4.8	0.567
SFX-52	B	0.310 7	0.132 2	11.7	0.3688 ± 0.0008	0.344 4	173.0	1.270
SFX-58	B	0.231 9	0.140 4	8.1	0.2995 ± 0.0010	0.282 5	124.0	1.320

注:标注 a 的:GD. 辉长闪长岩;G. 辉长岩;MG. 二长辉长岩;MD. 二长闪长岩;BTA. 玄武质粗面安山岩;BA. 玄武安山岩;TA. 粗面安山岩;B. 玄武岩;TB. 粗面玄武岩。标注 b 的:Os 含量小于 0.05×10^{-9} 的样品,其 Os 含量和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 数据均经空白校正。标注 c 的:分别采用 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}=0.002\,045$ 、 $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}=0.000\,375$ 和 $^{192}\text{Os}/^{188}\text{Os}=3.082\,71$ 进行氧同位素和质量分馏校正。标注 d 的: $\gamma_{\text{Os}}(t)=[(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{sample}}(t)/(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{chond}}(t)-1] \times 100$, $t=125$ Ma。标注 e 的:Os 同位素模式年龄 $T_{\text{MA}}=1/\lambda \cdot \ln[(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{sample}} - (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{chond}}]/(^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os})_{\text{sample}} - (^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os})_{\text{chond}}]$; 其中 $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{chond}}(t)=(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{chond},i} + (^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os})_{\text{chond}}(e^{(4.558 \times 10^9)} - e^t)$, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{chond},i}=0.095\,31$, $\lambda=1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Smoliar *et al.*, 1996), $(^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os})_{\text{chond}}=0.401\,86$, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{chond}}=0.127$ (Walker and Morgan, 1989)。标注 f 的: -R 表示重复样。

0.130 (Shirey and Walker, 1998), 指示存在一定程度的壳源物质信息, 结合其 LILE 和 LREE 富集、HFSE 强烈亏损及高放射成因 Sr (初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.705\,4 \sim 0.709\,9$) 和低放射成因 Nd ($\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-8.46 \sim -16.5$) 同位素地球化学特征 (张军波, 2008; 张永清, 2008), 表明济南、观水、费县和方城幔源岩浆岩的源区不同程度地加入了地壳组分。特

别是费县玄武岩 SFX-02 含有较多的橄榄石捕掳晶,且具有接近橄榄岩捕掳体的 Os 含量 (1.03×10^{-9}) 和 Os 同位素比值 (0.134 8), 该组成可近似代表该区中生代岩石圈地幔的性质,其较高的初始 Os 同位素比值为这一观察提供了有力的佐证。

由玄武质岩石重熔所派生的岩浆形成的蒙阴安山岩 (Ling *et al.*, 2009) 具有类似于方城玄武岩的

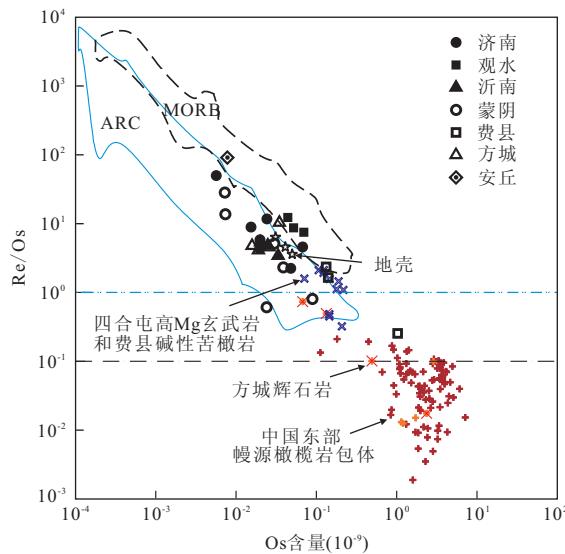


图2 山东中生代基性—中基性岩浆岩的 Re/Os-Os 关系
Fig. 2 Re/Os vs. Os of the Mesozoic basic to intermediate basic igneous rocks in Shandong Province

数据来源:洋中脊玄武岩(MORB)和岛弧玄武岩(ARC)据 Righter *et al.* (2002);新生代和古生代橄榄岩包体据 Gao *et al.* (2002)、Wu *et al.* (2003, 2006)、支霞臣等 (2001a, 2001b)、支霞臣和秦协 (2004)、Zhi *et al.* (2001) 和 Zhang *et al.* (2008);高 Mg 玄武岩和碱性苦橄岩据 Gao *et al.* (2008);方城辉石岩据 Zhang *et al.* (2008);地壳平均值据 McDonough and Sun (1995)

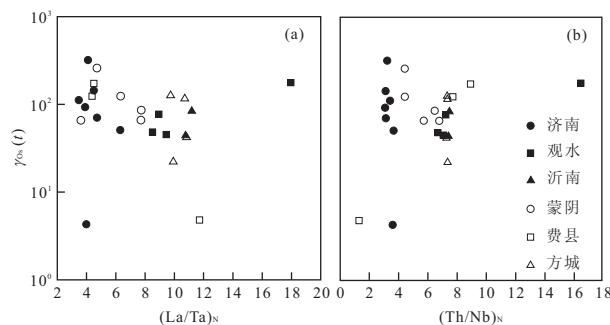


图3 山东中生代基性—中基性岩浆岩 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 与 $(\text{La}/\text{Ta})_N$ (a) 和 $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ (b) 相关关系

Fig. 3 $(\text{La}/\text{Ta})_N$ vs. $\gamma_{\text{Os}}(t)$ (a), $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ vs. $\gamma_{\text{Os}}(t)$ (b) of the Mesozoic basic to intermediate basic igneous rocks in Shandong Province

初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值 $0.2092 \sim 0.4531$, 而沂南闪长岩具有类似于观水岩墙的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值 $0.1817 \sim 0.2320$, 均显示出一定的壳源特征, 与其高放射成因 Sr(初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.7063 \sim 0.7110$) 和低放射成因 Nd($\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-10.6 \sim -16.2$) 同位素特征 (张军波, 2008; Ling *et al.*, 2009) 相符。然而, 蒙阴安山岩和沂南闪长岩均表现为类似于莱芜铁铜沟闪长岩体 (杨承海等, 2006) 的

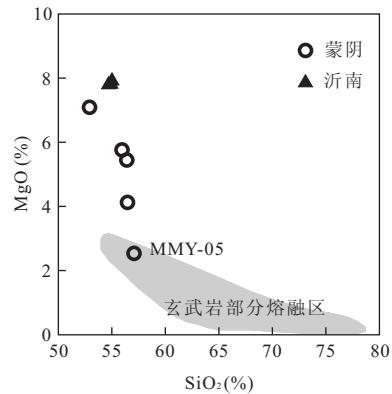


图4 山东蒙阴中生代安山岩和沂南闪长岩的 MgO-SiO_2 相关关系(玄武岩部分熔融区域据 Martin, 1999)
Fig. 4 SiO_2 vs. MgO of Mengyin Mesozoic andesites and Yinan diorites in Shandong Province

高 Mg 特征(除 MMY-05 外), 且位于玄武岩部分熔融区之上(图 4), 在 $(\text{La}/\text{Ta})_N-\gamma_{\text{Os}}(t)$ 和 $(\text{Th}/\text{Nb})_N-\gamma_{\text{Os}}(t)$ 相关关系图(图 3)中介于济南岩体和方城玄武岩之间, 表明这些安山质或闪长质岩石在其岩浆演化过程中经历了与地幔橄榄岩的交代作用(Martin, 1999)。

如 Os-Nd 和 Sr-Os 同位素关系图(图 5)所示, 除 1 件济南岩体 MJN0613 和 1 件费县玄武岩 SFX-02 之外, 其余济南、观水、费县和方城基性岩浆岩样品均明显远离 EMI 和 EMII 地幔端元区域, 大致位于岩石圈地幔与地壳端元之间; 而蒙阴安山岩和沂南闪长岩位于与这些基性岩浆岩相同的区域, 说明仅由 EMI 和 EMII 地幔端元岩石或玄武质下地壳岩石发生的部分熔融作用, 难以形成具有上述地球化学特征的山东中生代基性和中基性岩浆岩。

4.3 壳源物质的再循环

虽然山东中生代基性—中基性岩浆岩的 Os-Sr-Nd 同位素特征指示了其源区具有壳—幔物质混合的性质, 但要认识这些岩石的成因和机制, 还需要分析所加入壳源物质的性质和来源。

如前所述, 在大部分基性岩浆岩的形成过程中受到的地壳物质同化混染的影响有限, 但该作用仍可能是导致高放射成因 Os 同位素组成的原因之一, 故需要对该影响进行估算。假设:(1)幔源岩浆在上移过程中受到了地壳物质的同化混染;(2)混染的结果导致岩浆的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值达到地壳的平均值 ~ 50 。由此极端假设的受混染的岩浆岩形成后经过 125 Ma 的衰变, 样品的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值最高仅达 0.2172, 该值明显低于样品现今的 Os 同位素比值

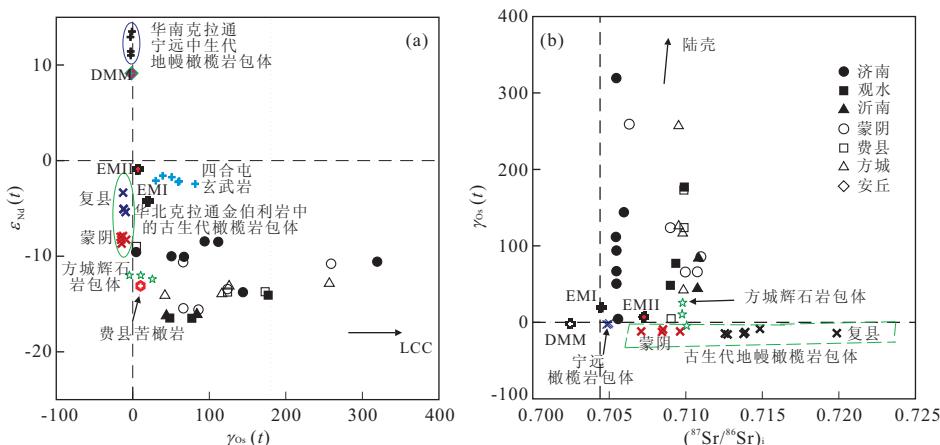


图 5 山东中生代基性—中基性岩浆岩的 Os-Nd(a)、Sr-Os(b) 同位素图解

Fig. 5 $\gamma_{Os}(t)$ vs. $\epsilon_{Nd}(t)$ (a), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $\gamma_{Os}(t)$ (b) of the Mesozoic basic to intermediate basic igneous rocks in Shandong Province

数据来源: 华北克拉通(NCC)古生代金伯利岩中的地幔橄榄岩包体、方城玄武岩中的辉石岩包体、华南克拉通(SCC)宁远中生代玄武岩中的地幔橄榄岩包体据 Zhang et al. (2008), 亏损地幔(DMM)、富集地幔 I(EMI) 和富集地幔 II(EMII) 据 Hofmann(1997) 和 Shirey and Walker(1998), 费县苦橄岩和四合屯高 Mg 玄武岩据 Gao et al. (2008). 其中, $t=125$ Ma, Sr-Nd 同位素数据待发表, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 表示初始 Sr 同位素比值

(表 1). 由于在该假设中样品的 Re-Os 同位素组成全部由地壳 Re-Os 同位素组成代替, 而实际受混染的岩浆, 其 Re-Os 同位素体系将由其源区组成和混染的地壳来源两部分组成, 且对于初始幔源岩浆, 其 Os 含量也将远高于地壳围岩的 Os, 即会进一步限制混合岩浆 Re/Os 比值的增高. 由这种假设的极端计算说明, 若山东中生代基性岩浆岩的形成过程可能受到一定程度的地壳围岩混染作用影响, 则该过程并不足以形成所观察到的高放射成因 Os 同位素比值特征. 因此, 山东基性岩高放射成因 Os 同位素组成特征主要是继承了其源区性质, 即壳源物质通过再循环进入地幔形成熔体并对地幔岩石进行交代可能是其主要的方式.

壳源物质再循环进入地幔的方式主要有陆壳或洋壳的俯冲作用(Menzies et al., 1993)和榴辉岩下地壳的拆沉作用(Kay and Kay, 1993). 由于研究区中生代地幔岩石的放射成因 Os 同位素比值(Zhang et al., 2008)相对大多数亏损的地幔岩石有所增高, 而其 Re/Os 比值低于地壳岩石或与其有关的流体值(图 2), 进而指示该时期区域岩石圈地幔的 Re-Os 同位素体系并未受到与俯冲作用有关的洋壳物质的影响, 因为洋壳俯冲作用产生的流体或熔体对地幔岩石的交代作用, 不可能只提高上覆地幔楔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值, 而不明显改变其 Re/Os 比值(Chesley et al., 2004). 事实上, 现有研究表明, 蒙古—鄂霍次克大洋板块向南俯冲出现于晚白垩纪晚期(Wu et al., 2000), 而太平洋板块向西对中国东

部的俯冲作用直至 ~ 100 Ma 才出现(Engebretson et al., 1985), 均晚于白垩纪岩浆事件发生的时间 ~ 120 Ma(Wilde et al., 2003; Wu et al., 2005). 扬子陆块于印支期向华北克拉通发生的俯冲作用是引起大陆岩石圈 Re/Os 比值增高的另一可能因素, 然而在山东地区未发现 220~230 Ma 的变质记录, 且大陆地壳的俯冲作用引发的脱水作用和地壳岩石的部分熔融作用在规模和强度上要远小于持续的洋壳俯冲作用; 由于大陆地壳俯冲作用可能引起对地幔岩石的交代作用在实质上与洋壳俯冲作用相似, 从而也难以解释所观察到的山东中生代基性岩浆岩的 Re-Os 同位素特征. 以上分析表明, 从区域大地构造演化历史的角度看, 这些基性岩浆岩高放射成因 Os 同位素比值的形成也难以与周边板块的俯冲作用相联系. 因此, 山东中生代基性岩浆岩的高放射成因 Os 同位素比值应可能来自榴辉质下地壳岩石的拆沉作用及其对地幔岩石的交代作用.

研究区中基性岩浆岩的高 Mg 和 Os 含量也可用拆沉后下地壳派生熔体与地幔岩石发生交代作用来解释. 由于元素 Yb 和 Re 在部分熔融作用或岩浆结晶分异作用过程中具有相近的不相容程度, 故可用样品的 Re/Yb 比值指示岩浆源区的组成特征. 在 Yb-Re/Yb 图解中(图 6), 基性程度相对较低的鲁西蒙阴高镁安山岩和鲁中沂南二长闪长岩, 相对鲁西济南、费县一方城和胶东观水的基性岩, 其比值和含量变化范围有限, 且蒙阴高镁安山岩和沂南闪长岩与四合屯高 Mg 玄武岩和费县碱性苦橄岩(Gao

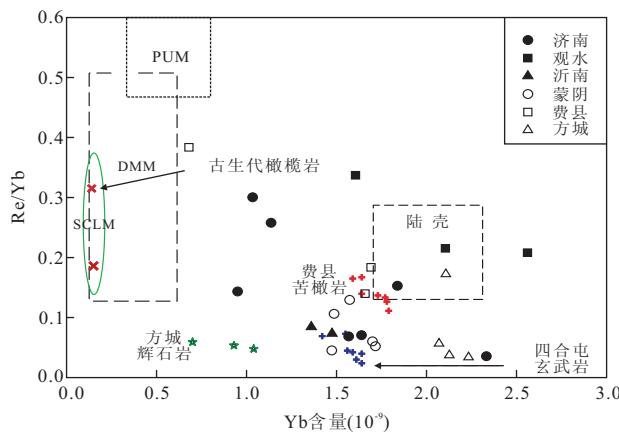


图6 山东中生代基性—中基性岩浆岩的Yb与Re/Yb相关关系(据Dicken, 2005, 数据来源同图5)

Fig. 6 Yb vs. Re/Yb of the Mesozoic basic to intermediate basic igneous rocks in Shandong Province

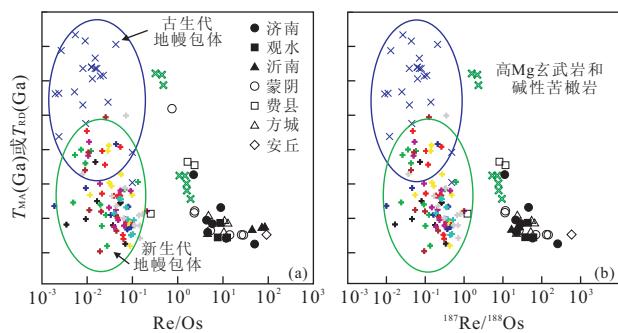


图7 山东中生代幔源岩浆岩的Os同位素模式年龄 T_{MA} 与 Re/Os (a)和 $^{187}Re/^{188}Os$ (b)关系

Fig. 7 The relationship between Os isotope model age T_{MA} and Re/Os (a), T_{MA} and $^{187}Re/^{188}Os$ (b) of the Mesozoic mantle source rocks in Shandong Province

数据来源:华北克拉通古生代和新生代地幔橄榄岩包体据Gao et al. (2002)、Meisel et al. (2001)、Wu et al. (2003)、Zhi et al. (2001)、支霞臣等(2001a, 2001b)、支霞臣和秦协(2004)、Wu et al. (2006)和Zhang et al. (2008),莱芜中生代橄榄岩包体、四合屯中生代高Mg玄武岩和费县碱性苦橄岩据Gao et al. (2008),其 T_{MA} 为本文利用该文献数据计算获得

et al., 2008)具有相似的组成,大致位于中生代辉石岩包体与地壳端元之间,而后的成因被认为与下地壳的拆沉作用有关(Gao et al., 2008)。如MMY-12安山岩($SiO_2=56.4\%$)的Os同位素模式年龄为2.09 Ga,显示为古老的壳源特征,但其Mg[#]高达64.6,且Os含量(0.0893×10^{-9})高于济南、观水和方城幔源岩浆岩的Os含量,可能是因为拆沉后的下地壳熔体与地幔岩石发生交代作用后,使得交代后的残留熔体具有高Mg和Os含量特征。

4.4 Os同位素模式年龄对下地壳拆沉作用的指示

通过与华北克拉通古生代和新生代地幔包体Re-Os同位素体系(Meisel et al., 2001; Zhi et al., 2001; 支霞臣等, 2001a, 2001b; Gao et al., 2002, 2008; Wu et al., 2003, 2006; 支霞臣和秦协, 2004; Zhang et al., 2008)进行对比,山东地区中生代幔源岩浆岩Os同位素模式年龄为认识区域岩石圈减薄过程发生了下地壳拆沉作用提供了新证据。在基性岩浆岩的Os同位素模式年龄 T_{MA} 和地幔橄榄岩的 T_{RD} 与 Re/Os 和 $^{187}Re/^{188}Os$ 相关图上(图7),中生代基性岩浆岩的Os同位素模式年龄明显小于古生代地幔包体的Re亏损模式年龄,且山东基性岩浆岩与四合屯中生代高Mg玄武岩和费县碱性苦橄岩的 T_{MA} (据Gao et al., 2008文献数据计算)与其 Re/Os (图7a)、 $^{187}Re/^{188}Os$ 比(图7b)近似成负相关,应反映了拆沉下地壳派生的熔体对地幔橄榄岩产生交代作用,进而带入了壳源岩石中的Re,导致基性岩浆岩样品的Os同位素模式年龄减小。

5 结论

(1) 山东中生代基性—中基性岩浆岩的Os-Nd-Sr同位素特征指示了其初始岩浆中具有地壳物质的组分,虽然部分岩石的地球化学特征受到了岩浆上升过程中地壳围岩混染的影响,但Os同位素组成特征显示,这些岩石的地壳物质信息主要反映了其源区组成,即岩浆岩继承了源区固有的壳—幔物质混合性质;

(2) 区内幔源基性岩浆岩Os同位素模式年龄 T_{MA} 相对于古生代地幔橄榄岩包体的Re亏损模式年龄明显偏轻及其高 Re/Os 和 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值现象,指示了拆沉下地壳岩石派生熔体对地幔橄榄岩产生交代作用,所带入的壳源物质Re导致了基性岩浆岩样品的Os同位素模式年龄减小;

(3) 山东地区中生代幔源岩浆岩的Re-Os同位素特征,为认识华北克拉通中生代岩石圈减薄过程中发生了下地壳物质的拆沉作用提供了新证据。

致谢:本研究工作得到了中国科学技术大学支霞臣教授、中国科学院广州地球化学研究所李杰博士和中国地质大学(武汉)高山院士、刘勇胜教授的大力支持与帮助,特此致谢!

References

Alard, O., Griffin, W. L., Pearson, N. J., et al., 2002. New

- Insights into the Re-Os Systematics of Sub-Continental Lithospheric Mantle from In-Situ Analysis of Sulfides. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(2): 651—663. doi:10.1016/S0012-821X(02)00799-9
- Alves, S. , Schiano, P. , Capmas, F. , et al. , 2002. Osmium Isotope Binary Mixing Arrays in Arc Volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3—4): 355—369. doi:10.1016/S0012-821X(02)00524-1
- Birck, J. L. , Barman, M. R. , Capmas, F. , 1997. Re-Os Isotopic Measurements at the Femtomole Level in Natural Samples. *Geostandards Newsletter: The Journal of Geostandards and Geoanalysis*, 21(1): 19—27. doi: 10.1111/j.1751-908X.1997.tb00528.x
- Brauns, C. M. , 2001. A Rapid, Low-Blank Technique for the Extraction of Osmium from Geological Samples. *Chemical Geology*, 176(1—4): 379—384. doi:10.1016/S0099-2541(00)00371-5
- Chen, L. , Zhi, X. C. , Zhang, Z. C. , et al. , 2007. Preliminary Study on Re-Os Isotope Geochemistry of Picrites from Lijiang Area, Yunnan Province. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 337—343 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. H. , Zhou, X. H. , 2005. Subduction-Related Metasomatism in the Thinning Lithosphere: Evidence from a Composite Dunite-Orthopyroxenite Xenolith Entrained in Mesozoic Laiwu High-Mg Diorite, North China Craton. *Geochemistry, Geophysics Geosystems*, 6(6): 1—20. doi:10.1029/2005GC000938
- Chesley, J. , Righter, K. , Ruiz, J. , 2004. Large-Scale Mantle Metasomatism: A Re-Os Perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(1—2): 49—60. doi:10.1016/S0012-821X(03)00698-8
- Chi, J. S. , Lu, F. X. , Zhao, L. , et al. , 1996. Characteristics of the Kimberlites and Paleozoic Lithospheric Mantle in North China Platform. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Cohen, A. S. , Waters, F. G. , 1996. Separation of Osmium from Geological Materials by Solvent Extraction for Analysis by Thermal Ionisation Mass Spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 332(2—3): 269—275. doi: 10.1016/0003-2670(96)00226-7
- Dale, C. W. , Gannoun, A. , Burton, K. W. , et al. , 2007. Rhodium-Osmium Isotope and Elemental Behaviour during Subduction of Oceanic Crust and the Implications for Mantle Recycling. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(1—2): 211—225. doi:10.1016/j.epsl.2006.10.029
- Deng, J. F. , Mo, X. X. , Zhao, H. L. , et al. , 1994. Lithosphere Root/De-rooting and Activation of the East China Continent. *Geoscience*, 8(3): 349—356 (in Chinese with English abstract).
- Dicken, A. P. , 2005. Radiogenic Isotope Geology, 2nd Edition. Cambridge University Press, New York, 214. doi: 10.2277/0521530172
- Ehrenbrink, B. P. , Bach, W. , Hart, S. R. , et al. , 2003. Rhodium-Osmium Isotope Systematics and Platinum Group Element Concentrations in Oceanic Crust from DSDP/ODP Sites 504 and 417/418. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4 (7): 8911—8928. doi: 10.1029/2002GC000414
- Engebretson, D. C. , Cox, A. , Gordon, R. G. , 1985. Relative Motions between Oceanic and Continental Plates in the Pacific Basins. *Special Paper-Geological Society of America*, 206: 1—59.
- Fan, W. M. , Zhang, H. F. , Baker, J. , et al. , 2000. On and off the North China Craton: Where Is the Archean Keel? *Journal of Petrology*, 41(7): 933—950. doi: 10.1093/petrology/41.7.933
- Gao, S. , Lu, T. C. , Zhang, B. R. , et al. , 1998. Chemical Composition of the Continental Crust as Revealed by Studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959—1975. doi: 10.1016/S0016-7037(98)00121-5
- Gao, S. , Qiu, Y. , Ling, W. L. , et al. , 2001. SHRIMP Single Zircon U-Pb Dating of the Kongling High-grade Metamorphic Terrain: Evidence for >3.2 Ga Old Continental Crust in the Yangtze Craton. *Science in China (Series D)*, 44(4): 326—335. doi: 10.3969/J.issn.1674-7313.2001.04.005
- 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 and Planetary Science Letters*, 198(3—4): 307—322. doi: 10.1016/S0012-821X(02)00489-2
- 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 270(1—2): 41—53. doi: 10.1016/j.epsl.2008.03.008
- Gao, S. , Rudnick, R. L. , Yuan, H. L. , et al. , 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432 (7019): 892—897. doi: 10.1038/nature03162
- Hofmann, A. W. , 1997. Mantle Geochemistry: the Message from Oceanic Volcanism. *Nature*, 385 (6613): 219—229. doi: 10.1038/385219a0

- Kay, R. W., Kay, S. M., 1993. Delamination and Delamination Magmatism. *Tectonophysics*, 219(1–3): 177–189. doi: 10.1016/0040-1951(93)90295-U
- Ling, W. L., Duan, R. C., Xie, X. J., et al., 2009. Contrasting Geochemistry of the Cretaceous Volcanic Suites in Shandong Province and Its Implications for the Mesozoic Lower Crust Delamination in the Eastern North China Craton. *Lithos*, 113(3–4): 640–658. doi: 10.1016/j.lithos.2009.07.001
- Liu, M. W., Zhang, Q. Y., Song, W. Q., 2003. Division of the Cretaceous Lithostratigraphic and Volcanic Sequences of Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 27(3): 247–253(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Yuan, H. L., et al., 2004. U-Pb Zircon Ages and Nd, Sr, and Pb Isotopes of Lower Crustal Xenoliths from North China Craton: Insights on Evolution of Lower Continental Crust. *Chemical Geology*, 211(1–2): 87–109. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.023
- Martin, H., 1999. Adakitic Magmas: Modern Analogues of Archean Granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00076-0
- 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
- Meisel, T., Moser, J., 2004. Reference Materials for Geochemical PGE Analysis: New Analytical Data for Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt and Re by Isotope Dilution ICP-MS in 11 Geological Reference Materials. *Chemical Geology*, 208(1–4): 319–338. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.04.019
- Meisel, T., Walker, R. J., Irving, A. J., et al., 2001. Osmium Isotopic Compositions of Mantle Xenoliths: A Global Perspective. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(8): 1311–1323. doi: 10.1016/S0016-7037(00)00566-4
- Menzies, M. A., Fan, W. M., Zhang, M., 1993. Palaeozoic and Cenozoic Lithoprobes and the Loss of >120 km of Archaean Lithosphere, Sino-Korean Craton, China. *Geological Society, London, Special Publications*, 76(1): 71–81. doi: 10.1144/GSL.SP.1993.076.01.04
- Menzies, M. A., Xu, Y. G., 1998. Geodynamics of the North China Craton, In: Flower, M. F. J., et al., eds., Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia, Geodynamics Series. AGU, Washington, D. C., 27: 155–165. doi: 10.1029/GD027p0155
- Pei, F. P., Xu, W. L., Wang, Q. H., et al., 2004. Mesozoic Basalt and Mineral Chemistry of the Mantle-Derived Xenocrysts in Feixian, Western Shandong, China: Constraints on Nature of Mesozoic Lithospheric Mantle. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 88–97(in Chinese with English abstract).
- Righter, K., Chesley, J. T., Ruiz, J., 2002. Genesis of Primitive, Arc-Type Basalt: Constraints from Re, Os, and Cl on the Depth of Melting and Role of Fluids. *Geology*, 30(7): 619–622. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0619:GOPATB>2.0.CO;2
- 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. *Lithos*, 77(1–4): 609–637. doi: 10.1016/j.lithos.2004.03.033
- Shinotsuka, K., 2006. Distillation of Osmium from Rock Samples and Its Application to Isotope Dilution ICP-MS. *Frontier Research on Earth Evolution*, 2: 1–4.
- Shirey, S. B., Walker, R. J., 1998. The Re-Os Isotope System in Cosmochemistry and High-Temperature Geochemistry. *Annual Review of Earth Planetary Science*, 26(1): 423–500. doi: 10.1146/annurev.earth.26.1.423
- Smoliar, M. I., Walker, R. J., Morgan, J. W., 1996. Re-Os Ages of Group IIA, IIIA, IVA and IVB Iron Meteorites. *Science*, 271(5252): 1099–1102. doi: 10.1126/science.271.5252.1099
- Walker, R. J., Morgan, J. W., 1989. Rhenium-Osmium Isotope Systematics of Carbonaceous Chondrites. *Science*, 243(4890): 519–522. doi: 10.1126/science.243.4890.519
- Wilde, S. A., Zhou, X. H., Nemchin, A. A., 2003. Mesozoic Crust-Mantle Interaction beneath the North China Craton: A Consequence of the Dispersal of Gondwana Land and Accretion of Asia. *Geology*, 31(9): 817–827. doi: 10.1130/G19489.1
- Woodhead, J., Brauns, M., 2004. Current Limitations to the Understanding of Re-Os Behaviour in Subduction Systems, with an Example from New Britain. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1–4): 309–323. doi: 10.1016/S0012-821X(04)00091-3
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2000. Phanerozoic Crustal Growth: U-Pb and Sm-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1–2): 89–113. doi: 10.1016/S0040-1951(00)00179-7
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1–2): 103–119. doi: 10.1016/j.epsl.2005.02.019
- Wu, F. Y., Walker, R. J., Ren, X. W., et al., 2003. Osmium Isotopic Constraints on the Age of Lithospheric Mantle be-

- neath North-eastern China. *Chemical Geology*, 196 (1): 107—129. doi:10.1016/S0009-2541(02)00409-6
- Wu, F. Y., Walker, R. J., Yang, Y. H., et al., 2006. The Chemical-Temporal Evolution of Lithospheric Mantle Underlying the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(19): 5013—5034. doi:10.1016/j.gca.2006.07.014
- Xu, J. F., Suzuki, K., Xu, Y. G., et al., 2007. Os, Pb, and Nd Isotope Geochemistry of the Permian Emeishan Continental Flood Basalts: Insights into the Source of a Large Igneous Province. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(8): 2104—2119. doi:10.1016/j.gca.2007.01.027
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-tectonic Destruction of the Archean Lithospheric Keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, Timing and Mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(9—10): 747—757. doi:10.1016/S1464-1895(01)00124-7
- Xu, Y. G., Huang, X. L., Ma, J. L., et al., 2004. Crust-mantle Interaction during the Tectono-thermal Reactivation of the North China Craton: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry of Mesozoic Plutons from Western Shandong. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(6): 750—767. doi:10.1007/s00410-004-0594-y
- Yan, J., Chen, J. F., Xie, Z., et al., 2003. Mantle Xenoliths from Late Cretaceous Basalt in Eastern Shandong Province: New Constraint on the Timing of Lithospheric Thinning in Eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 48 (19): 2139—2144. doi:10.1360/03wd0066
- Yang, C. H., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2006. Petrogenesis of the Mesozoic High-Mg Diorites in West Shandong: Evidence from Chronology and Petrogeochemistry. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 81—92(in Chinese with English abstract).
- 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(3—4): 622—638. doi:10.1016/j.epsl.2006.02.023
- Zhang, H. F., 2006. Complex Peridotitic Xenoliths: Rare and Important Samples for Understanding the Lithospheric Evolution. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 31—37(in Chinese with English abstract).
- 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(3): 271—293. doi:10.1007/s00410-007-0241-5
- Zhang, H. F., Sun, M., 2002. Geochemistry of Mesozoic Basalts and Mafic Dikes, Southeastern North China Craton, and Tectonic Implications. *International Geology Review*, 44(4): 370—382. doi:10.2747/0020-6814.44.4.370
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2002. Mesozoic Lithosphere Destruction beneath the North China Craton: Evidence from Major-, Trace-Element and Sr-Nd-Pb Isotope Studies of Fangcheng Basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241—253. doi:10.1007/s00410-002-0395-0
- Zhang, J. B., 2008. Lower Crust Recycling and Its Correlation with Genesis of Mesozoic High-Mg Igneous Suites in Shandong Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., 2008. Spatial Variation in Geochemistry of Mesozoic Qingshan Volcanic Suites in Shandong Province and Its Implication for the Mechanism of Lithospheric Thinning (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Q., Liu, M. W., 1996. The Lithostratigraphy of Shandong. China University of Geosciences Press, Wuhan, 207—254 (in Chinese).
- 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. doi:10.1080/00206819809465220
- Zhi, X. C., Peng, Z. C., Chen, D. G., et al., 2001. The Longevity of Subcontinental Lithospheric Mantle beneath Jiangsu-Anhui Region—The Os Isotope Model Age of Mantle-Derived Peridotite Xenoliths. *Science in China (Series D)*, 44(12): 1110—1118.
- Zhi, X. C., Qin, X., 2004. Re-Os Isotope Geochemistry of Mantle-Derived Peridotite Xenoliths from Eastern China: Constraints on the Age and Thinning of Lithosphere Mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 989—998(in Chinese with English abstract).
- Zhi, X. C., Reisberg, L., Peng, Z. C., et al., 2001a. Re-Os Isotope Geochemistry of Lithospheric Mantle beneath Northeastern Yangtze Craton: Constraint on the Origin

- and Evolution of Continental Lithospheric Mantle. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 248—250(in Chinese with English abstract).
- Zhi, X. C., Peng, Z. C., Chen, D. G., et al., 2001b. The Osmium Isotopic Compositions and Model Age Of Mantle Peridotite Xenoliths from Jiangsu-Anhui Area and Their Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 11—18 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈雷,支霞臣,张招崇,等,2007. 云南丽江苦橄岩 Re-Os 同位素地球化学初步研究. 高校地质学报, 13(2): 337—343.
- 池际尚,路凤香,赵磊,等,1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京:科学出版社.
- 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等,1994. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”. 现代地质, 8(3): 349—356.
- 刘明渭,张庆玉,宋万千,2003. 山东省白垩纪岩石地层序列与火山岩系地层划分. 地层学杂志, 27(3): 247—253.
- 裴福萍,许文良,王清海,等,2004. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕捞晶的矿物化学:对岩石圈地幔性质的制约. 高校地质学报, 10(1): 88—97.
- 杨承海,许文良,杨德彬,等,2006. 鲁西中生代高 Mg 闪长岩的成因:年代学与岩石地球化学证据. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 81—92.
- 张宏福,2006. 复杂橄榄岩捕虏体:反演岩石圈演化过程的罕见而重要的样品. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 31—37.
- 张军波,2008. 山东地区下地壳再循环及其与高 Mg 岩浆岩的成因关系(硕士学位论文). 武汉:中国地质大学.
- 张永清,2008. 山东青山群火山岩地球化学特征的空间变化及其对岩石圈减薄机制的指示(硕士学位论文). 武汉:中国地质大学.
- 张增奇,刘明渭,1996. 山东省岩石地层. 武汉:中国地质大学出版社, 207—254.
- 支霞臣,秦协,2004. 中国东部地幔橄榄岩捕虏体的 Re-Os 同位素地球化学:岩石圈地幔的形成年龄和减薄作用的制约. 岩石学报, 20(5): 989—998.
- 支霞臣,Reisberg,L.,彭子成,等,2001a. 扬子克拉通东北缘岩石圈地幔的 Re-Os 同位素地球化学:大陆岩石圈地幔的形成和演化的制约. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 248—250.
- 支霞臣,彭子成,陈道公,等,2001b. 苏皖地区幔源橄榄岩捕虏体的锇同位素组成、模式年龄及其意义. 岩石学报, 17(1): 11—18.