

华北克拉通中、新生代典型火山岩的岩石成因： Hf 同位素新证据*

杨岳衡^{1 2} 张宏福^{1**} 谢烈文¹ 刘颖³ 祁昌实^{2 3} 涂湘林³

YANG YueHeng^{1 2}, ZHANG HongFu^{1**}, XIE LieWen¹, LIU Ying³, QI ChangShi^{2 3} and TU XiangLin³

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室 9825 信箱, 北京 100029

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 中国科学院广州地球化学研究所 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2006-02-26 收稿, 2006-05-09 改回。

Yang YH, Zhang HF, Xie LW, Liu Y, Qi CS and Tu XL. 2006. Petrogenesis of typical Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from the North China Craton: new evidence from Hf isotopic studies. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6) 1665 – 1671

Abstract High precision Hf isotopic data are firstly reported for the typical Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks (alkaline basalts, tholeiites, and high-Mg andesites) from the North China Craton in this paper. The results show that these Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks have completely different Hf isotopic compositions with a large range in $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (-18.4 ~ 9.6) with an excellently positive correlation between Hf and Nd isotopes. Among them, the Cenozoic Changle-Linqu and Late Cretaceous Jianguo (~105Ma) alkaline basalts possess very high Hf and Nd isotopic compositions ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 6.8 \sim 9.6$; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 0.4 \sim 4.9$), indicating their derivation from the undifferentiated asthenospheric source. Early Cretaceous Fangcheng (125Ma) alkaline basalts and tholeiites have extremely low Hf and Nd isotopic ratios ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -15.6 \sim -18.4$; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -12.8 \sim -14.4$), representing their origination from an enriched sub-continental lithospheric mantle. Wulahada (142Ma) high-Mg andesites show relatively lower Hf and Nd isotopic ratios ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.1 \sim -2.6$), implying a derivation from old refractory lithospheric mantle contaminated with melt fluid released from subducted crustal materials. Relatively larger variations in Hf isotopic compositions of basalts ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) / \varepsilon_{\text{Nd}}(t) > 1$) demonstrate that the Hf isotopes could be better tracer of mantle sources than the Nd isotopes

Key words Hf isotope, Mesozoic, Cenozoic, Volcanic rocks, Petrogenesis

摘要 本文首次报道了华北克拉通中、新生代典型火山岩 (碱性玄武岩、拉斑玄武岩和高镁安山岩) 的高精度 Hf 同位素数据。结果表明, 这些中、新生代火山岩具有完全不同的 Hf 同位素组成, 即具有很宽的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (-18.4 ~ 9.6) 变化范围, 并和 Nd 同位素有很好的正相关性。其中新生代昌乐-临朐地区和晚白垩世碱铜 (~105Ma) 地区的碱性玄武岩具有高 Hf 同位素 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 6.8 \sim 9.6$) 和高 Nd 同位素组成 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 0.4 \sim 4.9$), 表明其来源于亏损的软流圈, 代表未分异无混染的原始岩浆组成; 早白垩世方城 (125Ma) 碱性玄武岩和拉斑玄武岩具有极低的 Hf 同位素 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -15.6 \sim -18.4$) 和低 Nd 同位素组成 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -12.8 \sim -14.4$), 代表了富集的大陆岩石圈地幔的 Hf 同位素组成; 乌拉哈达 (142Ma) 地区的高镁安山岩具有较低的 Hf 同位素 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.1 \sim -2.6$) 和低的 Nd 同位素组成, 代表古老难熔的岩石圈地幔橄榄岩与俯冲的地壳物质相互作用的结果。玄武岩中较大的 Hf 同位素组成范围 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) / \varepsilon_{\text{Nd}}(t) > 1$) 说明 Hf 同位素比 Nd 同位素具有更好的源区示踪结果。

* 本文受国家自然科学基金委大陆动力学重点项目 (40534022)、杰出青年科学基金 (40225009) 和中国科学院广州地球化学研究所所长测试基金联合资助

第一作者简介: 杨岳衡, 男, 1970 年生, 在职博士生, 同位素地球化学专业, E-mail: yangyueheng@mail.iggcas.ac.cn

** 通讯作者: 张宏福, 男, 1962 年生, 研究员, 岩石学和地球化学专业, E-mail: hfzhang@mail.iggcas.ac.cn

关键词 Hf 同位素 新生代 中生代 火山岩 岩石成因
中图法分类号 P588.122

近二十年来,我国华北古老克拉通以其独特的演化历史一直受到国内外地学界的广泛关注。华北东部(太行山及其以东地区)稳定克拉通自古生代尤其是中、新生代以来的强烈构造和岩浆活动,致使古老岩石圈大规模地减薄。这一巨厚的岩石圈减薄现象使得该区成为全球研究岩石圈演化历史的理想地区(Griffin *et al.*, 1992; Menzies *et al.*, 1993)。中生代特别是晚中生代是华北东部构造转折和岩石圈减薄的主要时期(翟明国等, 2003),这一时期的幔源岩浆活动的研究对探讨华北东部岩石圈减薄过程及其制约机制尤为重要(Zhang *et al.*, 2002; 2003; 2004)。由于大陆岩石圈地幔和软流圈的 Hf 和 Nd 同位素组成有很大的差异(Griffin *et al.*, 2000)因此,本文试图以华北克拉通中、新生代典型地区火山岩为例,探讨中生代华北克拉通北缘(碱锅和乌拉哈达地区)以及中、新生代华北克拉通内部(昌乐-临朐和方城地区)的玄武岩和高镁安山岩的 Hf 同位素地球化学特征,并结合已发表的 Nd 同位素组成,进一步反演这些典型地区中、新生代火山岩的来源,从而为进一步探讨该区中、新生代岩石圈的演化历史提供 Hf 同位素地球化学制约。

1 地质背景和样品

华北克拉通是我国最古老的,也是最大的太古代克拉通(图1)。它的南部与古生代~三叠纪的秦岭-大别-苏鲁造山带相邻(Li *et al.*, 1993; Meng and Zhang, 2000),北部则与东西向的中亚造山带相邻(Şengör *et al.*, 1999; Davis *et al.*, 2001)。克拉通的基底主要是太古代-早元古代麻粒岩、变质火山岩和沉积岩组成,其盖层为寒武~奥陶纪灰岩、石炭纪~二叠纪的碎屑岩和中生代的盆地沉积物(Zhao *et al.*, 2002)。华北克拉通由东部和西部两个太古代的陆块组成。西部陆块,从前寒武以来一直比较稳定。而东部陆块显生宙以来的大规模岩浆活动比较频繁(图1)(Chen *et al.*, 1997, 1999; Davis *et al.*, 2001; Ren *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2004 及其参考文献)。本次工作的样品采自华北克拉通北缘的辽宁省阜新市碱锅和乌拉哈达地区以及华北克拉通内部山东省昌乐-临朐和方城地区。所研究的样品的主量、微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素组成详见文献(张宏福和郑建平, 2003; Zhang *et al.*, 2002, 2003)。

碱锅位于辽宁西部的阜新地区,地处华北克拉通太古代冀鲁辽古陆核的北缘。碱锅玄武岩分布于阜新组的厚层杂色砂岩-砂砾岩中,年龄约为 105.5Ma(Zhu *et al.*, 2004)。玄武岩为灰黑色,致密块状构造,柱状节理发育,柱体多为典型的六棱柱或五棱柱,直径多在 10~20cm,其组成为碱性玄武岩(张宏福和郑建平, 2003)。玄武岩中含少量地幔橄榄岩捕虏体。橄榄岩包体小,主要为尖晶石-辉石-辉石-辉石。乌拉哈

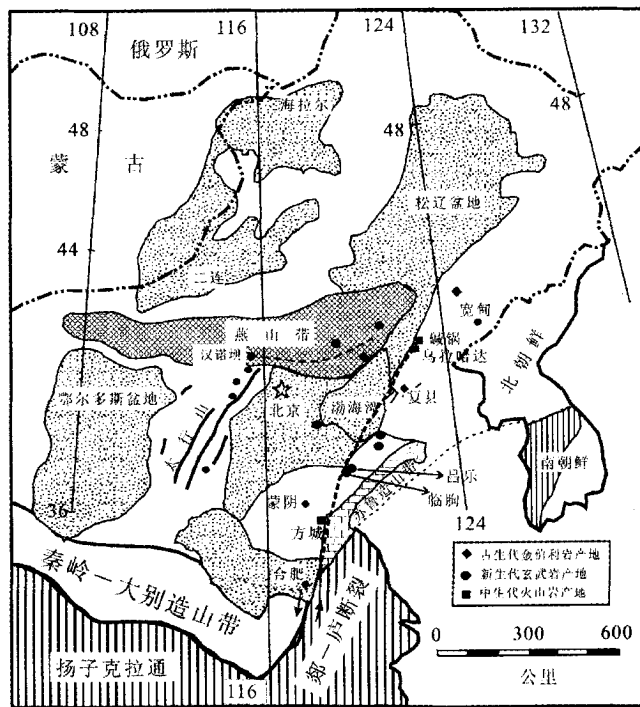


图1 华北克拉通及其周边主要构造地质简图(据 Zhang *et al.*, 2003 修改)

Fig. 1 Simplified geological map showing the major tectonic units of the NCC and its surrounding areas.

达离碱锅很近,其火山喷发年龄为 142Ma,熔岩也为灰黑色,致密块状构造,与碱锅地区玄武岩不同的是柱状节理不发育(Zhang *et al.*, 2003),组成为高镁玄武安山岩。

方城玄武岩位于华北克拉通内部的山东临沂地区,为青山组火山岩的一部分。其形成年龄为 125Ma(Zhang *et al.*, 2002)。钻井勘查表明溢流玄武质岩厚度大约 100 米,底部伴随有少量的苦橄岩,顶部则有极少的安山岩。玄武岩呈黑绿色,为斑状结构和块状构造。斑晶由单斜辉石、橄榄石和少量的斜方辉石组成(Zhang *et al.*, 2002)。值得注意的是该地区火山岩含有较多的地幔橄榄石和辉石捕虏体(张宏福等, 2004; 裴福萍等, 2004; Zhang, 2005)及辉石岩捕虏体(Zhang *et al.*, 2002)。

昌乐-临朐地区玄武岩分布在郯城-庐江断裂带中段的山东省昌乐县和临朐县境内。该区玄武岩呈似层状,直接覆盖在老第三系五图组含煤河湖相沉积岩之上,形成大面积熔岩台地或熔岩穹丘,环形火山口随处可见,柱状节理发育。区内玄武质岩浆活动主要有三期(王萍等, 1996):牛山期岩浆活动(14.48Ma);山旺期岩浆活动(9.97 ± 0.91Ma);和尧山期岩浆活动(4.34 ± 0.19Ma)。在牛山期和山旺期岩浆活动间歇期发育有著名的有“万卷书”之称的含众多昆虫类和植

物化石以及琥珀的火山湖相硅藻土页岩(王胜源等, 2003), 为我国著名的地质旅游地之一。该区玄武岩在岩石类型上主要为碧玄武岩和碱性玄武岩。在昌乐五图方山、北岩和临胸山旺等地玄武岩中含有大量的尖晶石二辉橄榄岩捕虏体和歪长石巨晶(王萍等, 1996)。该区玄武岩柱状节理发育, 柱体细而密。玄武岩呈灰黑-暗绿色, 具斑状结构和块状构造。斑晶主要为橄榄石和斜长石, 基质为隐晶-玻璃质, 其中尧山玄武岩结晶很好, 为粗玄结构。

2 分析方法

火山岩的 Hf 同位素化学分离是在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成的。方法简述如下: 将 100mg 样品粉末与 200mg $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 混合均匀后置于铂金坩埚中, 用 XRF 制玻璃片的高频感应炉在 1250°C 下溶解 15 分钟将样品分解, 然后将碱熔的样品用 2M HCl 溶解, 采用 HCK 单柱 Ln-Spec 提取色谱方法将 Hf 和基体元素及干扰元素分离, 详细的分析方法参见文献(李献华等, 2005), 而分离后的 Hf 同位素测试分析则在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室新引进的 Neptune MC-ICP-MS 上进行(徐平等, 2004), 我们使用 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 和 JMC-475 标准的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 = 0.282160 进行质量分馏和外部校正。与本文样品同时分析的玄武岩国际标样 BHVO-2、W-2 和 JB-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 0.283087 ± 12 和 0.282986 ± 09 , 与文献报道的结果均在误差范围内一致(Bizzarro *et al.*, 2003; Kleinhanns *et al.*, 2002; Le Fevre and Pin, 2001)。

3 结果与讨论

华北克拉通中、新生代典型火山岩的 Hf 同位素分析结果见表 1。结果表明这些中、新生代典型火山岩具有完全不同的 Hf 同位素组成, 即具有很宽的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (-18.4 ~ 9.6) 变化范围, 并和 Nd 同位素有很好的正相关关系(图 2)。

3.1 昌乐-临胸玄武岩

华北克拉通内部昌乐和临胸地区的玄武岩具有非常类似的 Hf 同位素特征。样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值变化范围较小, 其变化范围为 0.282960 ~ 0.283037。而且从昌乐至临胸 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值逐渐降低。昌乐地区的玄武岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值非常集中, 其范围在 0.283019 ~ 0.283037 之间。取 $t = 10\text{Ma}$, 计算它们的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$, 昌乐地区的玄武岩具有最高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+9.0 ~ +9.6), 高于其他所有地区。其中 04CLT-03 样品最高为 +9.6, 04CLF-03 样品最低为 +9.0。临胸地区的玄武岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值为 0.282960 ~ 0.283017, 其变化范围较昌乐地区玄武岩稍宽,

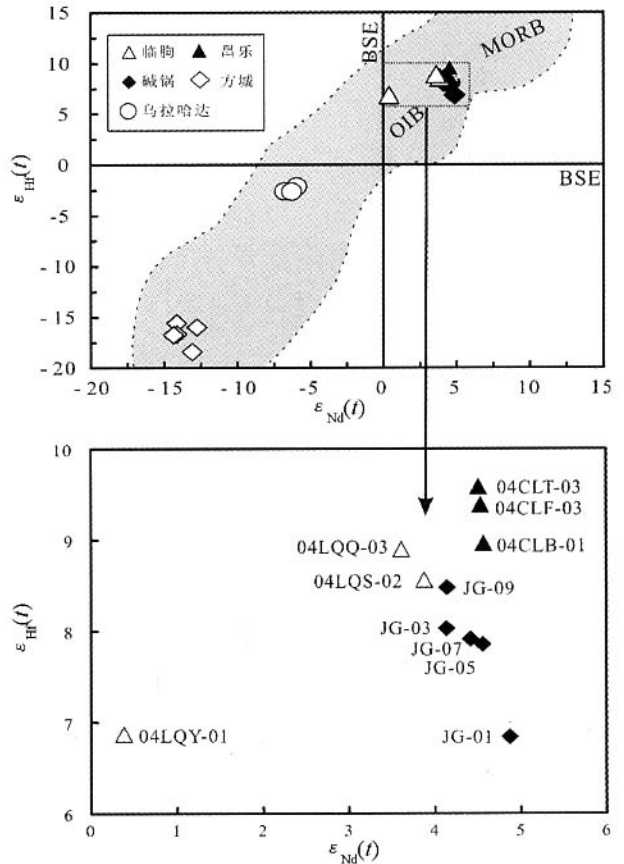


图 2 华北克拉通中、新生代典型火山岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 相关关系图

图中阴影部分代表由现代 OIB、MORB 和陆源碎屑沉积物构成的 Hf-Nd 同位素变化趋势范围(Vervoort *et al.*, 1999);

Fig. 2 Plot of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ of typical Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from the NCC

其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在 +6.9 ~ +8.9, 普遍低于昌乐地区玄武岩。有趣的是, 丘志力等(2005)对昌乐地区, 赋存在第三纪碱性橄榄玄武岩中的三颗锆石巨晶的原位 Hf 同位素分析显示, 锆石巨晶 Hf 同位素组成 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.28302 ~ 0.28308, 所对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 +8.7 ~ +10.8) 和该地区的全岩玄武岩的 Hf 同位素组成在误差范围内也完全一致。他们认为该锆石巨晶不是寄主岩浆结晶的产物, 并认为与由地壳物质加入导致的地幔交代作用有关。然而, 锆石和寄主岩全岩 Hf 同位素的一致性说明这些锆石很可能是从该寄主玄武岩中结晶的。昌乐-临胸玄武岩的这种 Hf 同位素特征表明其来源于亏损的软流圈, 代表未分异无混染的原始岩浆组成。

3.2 碱锅玄武岩

地处华北克拉通北缘的碱锅地区的玄武岩和克拉通内部的昌乐-临胸玄武岩有着非常相似的 Hf 同位素组成。样

表1 华北克拉通中、新生代典型火山岩的 Hf 同位素分析结果

Table 1 Hf isotopic compositions of the typical volcanic rocks from the NCC

采样地区	样品号	岩石类型	年龄 Ma	$\varepsilon_{Nd}(t)$	Lu	Hf	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	$\frac{\varepsilon_{Hf}(t)}{\varepsilon_{Nd}(t)}$
					ppm	ppm	Measured	Initial			
临胸	04LQY-01			0.39	0.21	4.29	0.0070	0.282961 ± 08	0.282960	6.9	17.5
	04LQS-02	玄武岩	10	3.88	0.23	6.00	0.0055	0.283009 ± 06	0.283008	8.6	2.2
	04LQQ-03			3.62	0.25	4.31	0.0082	0.283019 ± 10	0.283017	8.9	2.5
昌乐	04CLB-01			4.57	0.28	9.96	0.0039	0.283020 ± 10	0.283019	9.0	2.0
	04CLF-03	玄武岩	10	4.54	0.19	6.07	0.0043	0.283032 ± 06	0.283031	9.4	2.1
	04CLT-03			4.51	0.27	5.84	0.0066	0.283038 ± 07	0.283037	9.6	2.1
碱锅	JG-01			4.88	0.28	4.90	0.0081	0.282916 ± 08	0.282900	6.8	1.4
	JG-03			4.14	0.29	5.27	0.0078	0.282949 ± 06	0.282934	8.0	1.9
	JG-05	玄武岩	105.5	4.56	0.32	5.48	0.0083	0.282945 ± 10	0.282929	7.9	1.7
	JG-07			4.42	0.27	5.15	0.0074	0.282945 ± 08	0.282930	7.9	1.8
	JG-09			4.15	0.30	5.37	0.0079	0.282962 ± 08	0.282946	8.5	2.1
方城	FC1-1	碱性玄武岩		-13.09	0.35	6.80	0.0073	0.282191 ± 07	0.282174	-18.4	1.4
	FC5-1	拉斑玄武岩	125	-14.16	0.28	6.10	0.0065	0.282270 ± 13	0.282255	-15.6	1.1
	FC6-1	拉斑玄武岩		-14.14	0.30	6.00	0.0071	0.282240 ± 13	0.282223	-16.7	1.2
	FC7	拉斑玄武岩		-14.38	0.25	5.40	0.0066	0.282237 ± 09	0.282222	-16.7	1.2
	FC4	安山岩	116	-12.78	0.15	3.40	0.0063	0.282262 ± 08	0.282248	-16.0	1.3
乌拉哈达	WLHD-02			-5.96	0.19	3.62	0.0075	0.282644 ± 09	0.282624	-2.1	0.4
	WLHD-04	高镁安山岩	142.4	-6.77	0.19	3.49	0.0077	0.282631 ± 06	0.282610	-2.6	0.4
	WLHD-06			-6.31	0.23	3.59	0.0091	0.282634 ± 07	0.282610	-2.6	0.4

Lu 和 Hf 含量以及 Nd 同位素数据引自 Zhang *et al.* (2002, 2003), Hf 同位素校正所用参数和公式: $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{CHUR}} = 0.0322$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{CHUR}} = 0.282772$, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$, $\varepsilon_{Hf}(t) = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, t} - 1) \times 10^4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, t} = 0.282772 - 0.0322 \times (e^{\lambda t} - 1)$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i = (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{sample, today}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{sample, today}} \times (e^{\lambda t} - 1)$ 。

品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值也比较集中, 其范围在 0.282900 ~ 0.282946, 其 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值从 +6.8 ~ +8.5, 普遍较昌乐和临胸地区的玄武岩低。中生代碱锅山玄武岩的地球化学和同位素组成与新生代宽甸和汉诺坝玄武岩非常相似(Zhang *et al.*, 2003)。他们都具有现代 MORB 和 OIB 的共同特征, 被认为是来源于软流圈地幔。碱锅玄武岩比宽甸玄武岩具有更高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值, 即更为亏损。因此, 碱锅玄武岩的 Hf 同位素组成显示其来源于上涌的软流圈。

3.3 方城玄武岩与安山岩

方城地区与昌乐-临胸地区同处于华北克拉通内部, 但他们有着完全不同地 Hf 同位素组成, 该地区的玄武岩和安山岩具有极低的 Hf 同位素组成, 低于所有的其他地区。其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值也比较集中, 为 0.282174 ~ 0.282255, 对应的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为 -18.4 ~ -15.6, 其中 FC1-1 样品最低, 为 -18.4。该 Hf 同位素组成与根据玄武岩的元素和 Sr-Nd-Pb 的同位素地球化学特征得出的结论, 即它的来源于受地壳物质强烈改变的岩石圈地幔(Zhang *et al.*, 2002)。因此, 它们能够代表该地区中生代大陆岩石圈地幔的 Hf 同位素组成。

3.4 乌拉哈达高镁安山岩

与碱锅同处于克拉通北缘的乌拉哈达地区高镁安山岩的 Hf 同位素特征则明显不同。其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值特别

集中, 为 0.282610 ~ 0.282624, 在分析误差范围内完全一致。其 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值集中在 -2.6 ~ -2.1, 具有较低的 Hf 同位素组成。该同位素组成可能是古老难熔的岩石圈地幔橄榄岩与俯冲的陆壳物质相互作用的结果。

3.5 典型火山岩的 Hf 同位素有效示踪

与 Sm-Nd 同位素体系类似, 地幔部分熔融过程中由于 Hf 较 Lu 更容易进入熔体, 从而造成亏损地幔中高 Lu/Hf 比值, 其放射性成因 Hf 将随演化快速增加, 而产生的熔体(新生的地壳组分)由于具有低 Lu/Hf 比值, 其放射性成因 Hf 增加缓慢。同时, 由于大陆岩石圈地幔和软流圈的 Hf 和 Nd 同位素组成存在很大的差异(Griffin *et al.*, 2000)。因此 Hf 同位素对火山岩的来源及其成因能够提供重要的信息。

华北古生代和新生代岩石圈地幔性质和组成特征分别是基于对古生代金伯利岩和新生代玄武岩携带的地幔橄榄岩捕虏体的研究获得的。同理, 华北中生代玄武岩携带的地幔橄榄岩捕虏体是探讨中生代岩石圈地幔性质和组成特征最直接的方法。然而, 遗憾的是华北东南部早白垩世火山岩基本不含地幔橄榄岩捕虏体, 仅在方城玄武岩中含有辉石岩捕虏体和橄榄石、辉石捕虏体(Zhang *et al.*, 2002, 2004; 裴福萍等, 2004; Zhang, 2005)。尽管晚白垩世玄武质火山岩含有少量地幔橄榄岩捕虏体(Ying *et al.*, 2004)。因此, 早白垩世及其以前中生代火山岩就成为研究岩石圈地幔性质

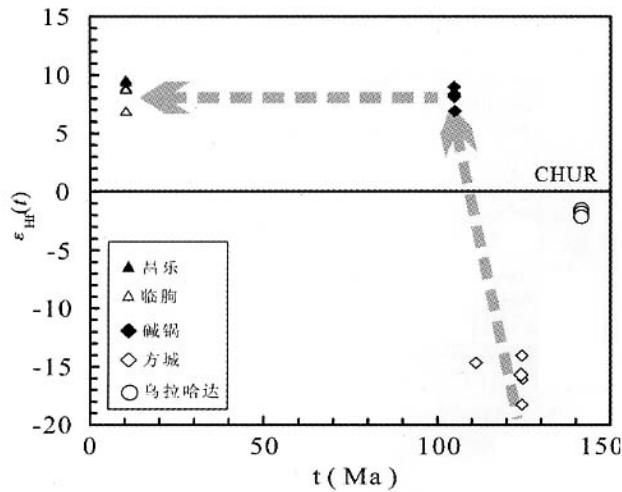


图3 华北克拉通中、新生代典型火山岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ -年龄 (t) 投影图

Fig. 3 Relationship between $\epsilon_{Hf}(t)$ and age of typical volcanic rocks from NCC

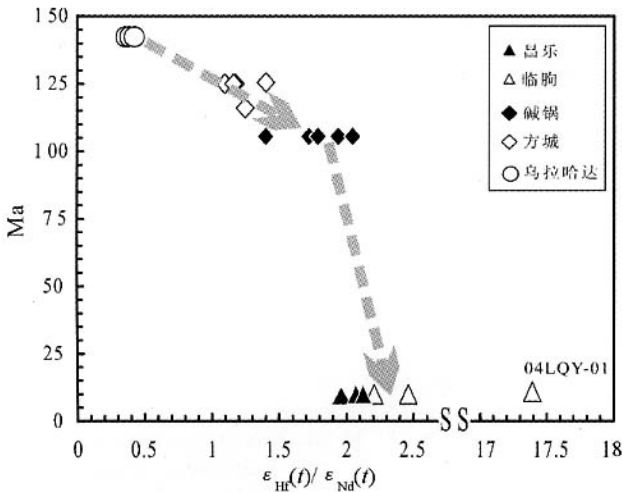


图4 华北克拉通中、新生代典型火山岩的 $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 比值与年龄 (t) 关系图

Fig. 4 The relationship between $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ ratios and age of volcanic rocks from NCC

和组成的唯一途径。

方城地区出现的具典型岩石圈地幔源的含大量辉石岩捕虏体以及橄榄石和辉石捕虏晶的玄武岩为反演华北南缘中生代岩石圈地幔组成和性质提供了很好的实例 (Zhang *et al.*, 2002)。方城玄武岩形成于 125Ma (K-Ar 年龄, Zhang *et al.*, 2002), 属青山组火山岩的一部分, 主要为拉斑玄武岩。它的同位素地球化学特征都说明该套玄武质火山岩不同于大陆裂谷型火山岩, 而具有岛弧火山岩的某些地球化学特征。同时方城玄武岩的高镁特征和相对低的硅、碱含量 (与华北新生代玄武岩相比) 以及含有辉石岩捕虏体等特征说明

其上升过程中未受到明显的地壳混染作用的影响 (Zhang *et al.*, 2002)。因此, 方城玄武岩的地球化学特征能够代表其源区的特征。这说明方城玄武岩以及整个青山组火山岩很可能直接来源于富集的岩石圈地幔。基于古生代岩石圈地幔的地球化学反演, 如此富集的晚中生代岩石圈地幔不可能由古生代岩石圈地幔直接演化而成和简单的地幔交代作用所致。这就要求该区域岩石圈地幔曾经遭受过富集 LREE 和 LILE、而亏损 HFSE, 并具有高的 Sr 同位素和低的 Nd 和 Pb 同位素的熔体的改造。合理的解释是这种熔体来源于俯冲的陆壳物质的部分熔融。因此, 方城玄武岩是来自岩石圈地幔, 而且在产生部分熔融之前, 它经历了与俯冲的地壳物质的相互作用过程。方城玄武岩的发现暗示华北东南缘中生代岩石圈地幔受到过俯冲陆壳物质的强烈改造。这就首次将华北东南缘岩石圈的演化过程与大别-苏鲁造山带的形成和演化连续了起来 (Zhang *et al.*, 2002)。该地区的玄武岩的 Hf 同位素特征进一步证明了这一点。即强烈富集的 Hf 同位素组成亦需要岩石圈地幔的部分熔融前加入大量的地壳物质, 才能产生如此低的 Hf 同位素组成。

古生代向南俯冲的蒙古洋也同样改造了华北克拉通北缘的岩石圈地幔, 即为乌拉哈达高镁安山岩的源区。乌拉哈达高镁安山岩的地球化学特征也和东北新生代富钾玄武岩很相似。他们的源区被认为是交代富集地幔物质的部分熔融 (Zhang *et al.*, 2003)。Hf 同位素地球化学特征同样说明乌拉哈达高镁安山岩是来源于古老难熔的岩石圈地幔, 但曾被俯冲的蒙古洋岩石圈熔融形成的熔体所改造。岩石圈伸展造成了富集的岩石圈地幔的减压熔融, 从而形成了高镁安山岩和高钾、钙碱性的华北克拉通北缘的火山岩。

从华北克拉通典型火山岩的年龄和 $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 比值关系 (图 3; 4) 可以看出, 年龄与 $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 比值总体上呈负的相关关系, 即年龄越老, $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 比值越小, 年龄越年轻, $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 比值越大; 同时年龄越老, $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 比值越汇聚, 区别非常小, 年龄越年轻, $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 比值则越分散, 越容易区别; 除了乌拉哈达地区的高镁安山岩的 $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 比值小于 1 外, 其他地区 $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 比值均大于 1, 其中临朐地区的 04LQY04-01 样品达到了最高, 为 17.5, 这些都充分说明了 Hf 同位素能够比 Nd 同位素更有效的进行源区示踪, 特别是新生代火山岩的形成源区。因此 Hf 同位素很可能成为另一个重要的地幔源区组成的示踪手段。

4 结论

华北克拉通中、新生代典型火山岩的 Hf 同位素具有很宽的变化范围 ($\epsilon_{Hf}(t) = -18.4 \sim +9.6$), 并和 Nd 同位素有很好的正相关性。新生代吕乐-临朐地区和晚白垩世碱锅地区的碱性玄武岩具有高 Hf ($\epsilon_{Hf}(t) = 6.8 \sim 9.6$) 和高 Nd ($\epsilon_{Nd}(t) = 0.39 \sim 4.88$) 同位素组成, 表明其来源于亏损的

软流圈;早白垩世方城地区碱性玄武岩和拉斑玄武岩具有极低的 Hf ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -15.6 \sim -18.4$) 和低 Nd ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -12.78 \sim -14.38$) 同位素组成, 代表富集的大陆岩石圈地幔的 Hf 同位素组成; 乌拉哈达地区的高镁安山岩具有较低的 Hf ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.1 \sim -2.6$) 同位素组成, 代表古老难熔的岩石圈地幔橄辉岩与俯冲的陆壳物质相互作用的结果。同时中、新生代典型的火山岩中较大的 Hf 组成范围 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)/\varepsilon_{\text{Nd}}(t) > 1$) 说明 Hf 同位素比 Nd 同位素具有更好的源区示踪结果。

致谢 Hf 同位素化学分离是在中国科学院广州地球化学研究所完成的, 感谢李献华研究员的细心指导和热心帮助。两位审稿人提出了宝贵的修改意见, 进一步完善了论文, 在此深表谢意。

References

- Bizzarro M, Baker J, Ulfbeck D. 2003. A new digestion and chemical separation technique for rapid and highly reproducible determination of Lu/Hf and Hf isotope ratios in geological materials by MC-ICPMS. *Geostandards Newsletter*, 27: 133–145
- Chen WJ, Zhou XH, Li Q, Yang JH, et al. 1999. Research on Mesozoic volcanic chronology, geochemistry and tectonic settings around the Liaohe River (in Chinese). Internal report of the Institute of Geology, Seismological Bureau of China
- Chen YX, Chen WJ, Zhou XH, et al. 1997. Liaoxi and Adjacent Mesozoic Volcanics-Chronology, Geochemistry and Tectonic Settings (in Chinese). The Seismological Press, Beijing
- Davis G, Zheng YD, Wang C, et al. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yangshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation* (eds. H. S. Hendrix and G. A. Davis), pp: 171–197. Boulder Colorado, Geological Society of America Memoir 194
- Griffin W L, O'Reilly S Y, Ryan C G. 1992. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa, Siberia and China: Proton microprobe studies. *Proc International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and its Environs*. Beijing: Science Press, 1–20
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E et al. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 133–147
- Kleinhanns, I C, Kreissig, K, Kamber, B S, et al. 2002. Combined chemical separation of Lu, Hf, Sm, Nd, and REEs from a single rock digest: precise and accurate isotope determinations of Lu-Hf and Sm-Nd using multicollector-ICPMS. *Analytical Chemistry*, 74: 67–73
- Le Fevre, B and Pin, C. 2001. An extraction chromatography method for Hf separation prior to isotopic analysis using multiple collection ICP-mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 73: 2453–2460
- Li SG, Xiao YL, Liou DL, et al. 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites-Timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 89–111
- Li XH, Qi CS, Liu Y, et al. 2005. Rapid Separation of Hf from Rock Samples for Isotope analysis by MC-ICPMS: A Modified Single-Column Extraction Chromatography Method. *Geochimica*, 34(2): 109–114 (in Chinese with English abstract)
- Meng QR, and Zhang GW. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics* 323: 183–196
- Menzies M A, Fan WM, Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120km of Archaean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. *Geol Soc Spec Pub*, 76: 71–78
- Pei FP, Xu WL, Wang HQ, 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)
- Ren JY, Tamaki K, Li ST, et al. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamics setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics* 344: 175–205
- Sengor A M C, Natal'in B A, and Burtman V S. 1999. Evolution of the alitaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature* 364: 299–307
- Vervoort J, Patchett, P J, Blichert-Toft J, et al. 1999. Relationships between Lu Hf and Sm Nd isotopic systems in the global sedimentary system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168: 79–99
- Wang P, Li GC. 1996. The Corundum and Concomitant Minerals of Cenozoic Basalts in ChangLe, ShanDong Province. *Architectural Material Geology*, 4: 23–28 (in Chinese with English abstract)
- Wang SY, Liu MW, Liang BQ, et al. 2003. New Discovery of Cenozoic Volcanic Craters and its Significance of Tourism and Geology in Changle County, Shandong Province. *Land and Resources in ShangDng Province*, 8: 48–50 (in Chinese with English abstract)
- Xu P, Wu FY, Xie LW, et al. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1642–1648
- Ying JF, Zhou XH, Zhang HF. 2004. Geochemical and isotopic investigation of the Laiwu-Zibo carbonatites from western Shandong Province, China, and implications for their petrogenesis and enriched mantle source. *Lithos*, 75: 413–426
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH, et al. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67: 4373–4387
- Zhang HF, Zheng JP. 2003. The North China Mesozoic Basalts: Geochemical characters and Petrological genesis: Taken LiaoNing FuXin as a example. *Chinese Science Bulletin*, 48(6): 603–609 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH, 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: 241–253
- Zhang HF. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: a case of Sino-Korean craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 237: 768–780
- Zhang HF, Sun M, Zhou MF, et al. 2004. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geological Magazine*, 141: 55–62
- Zhang HF, Ying JF, Xu P, et al. 2004. Mantle olivine xenocrysts entrained in Mesozoic basalts from the North China craton: Implication for replacement process of lithospheric mantle. *Chinese Science Bulletin*, 49(9): 961–966
- Zhao GC, Wilde S A, Cawood P A, and Sun M. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping complexes: Implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *Am. J. Sci.* 302: 191–226
- Zhu RX, Hoffman KA, Nomade S, et al. 2004. Geomagnetic

paleointensity and direct age determination of the ISEA (MOR ?) chron. *Earth and Planetary Science Letters* 217 285 - 295

附中文参考文献

- 李献华,祁昌实,刘颖等. 2005. 岩石样品快速 Hf 分离与 MC-ICPMS 同位素分析:一个改进的单柱提取色谱方法. *地球化学*, 34 (2):109 - 114
- 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虏晶的矿物化学:对岩石圈地幔性质的制约. *高校地质学报*, 10 (1):88 - 97
- 丘志力,吴福元,于庆媛等. 2005. 中国东部新生代玄武岩中锆石巨晶的 Hf 同位素组成. *科学通报*, 50(21):2370 - 2379
- 王萍,李国昌. 1996. 山东昌乐新生代玄武质岩石中的刚玉及共存矿物. *建材地质* 4 :23 - 28
- 王胜源,刘明渭,梁邦启等. 2003. 山东省昌乐县新生代火山口新发现及旅游地质意义. *山东国土资源*, 8 :48 - 50
- 徐平,吴福元,谢烈文等. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素. *科学通报* 49(14):1403 - 1410
- 张宏福,郑建平. 2003. 华北中生代玄武岩的地球化学特征与岩石成因:以辽宁阜新为例. *科学通报* 48(6):603 - 609
- 张宏福,英基丰,徐平等. 2004. 华北中生代玄武岩中地幔橄榄石捕虏晶:对岩石圈地幔置换过程的启示. *科学通报*, 49(8):784 - 789
- 翟明国,朱日祥,刘建明等. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. *中国科学(D)* 33 :913 - 920