

汉诺坝橄榄岩捕虏体的单斜辉石 LAM-ICPMS 分析及其岩石圈地幔演化意义

余淳梅¹, 郑建平^{1,2}, W. L. Griffin³

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

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

3. 澳大利亚曼魁里大学地球与行星科学系 GEMOC 实验中心, 悉尼 2109

摘要: 橄榄岩成分及其中矿物(如单斜辉石)微量元素组成可以很好地揭示岩石圈地幔性质。在对汉诺坝新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体做详细岩相学和岩石化学研究基础上, 重点分析了单斜辉石的激光原位微量元素, 并探讨了新生代华北克拉通北缘岩石圈地幔特征及地幔演化。汉诺坝地区岩石圈地幔是相当于原始地幔经过不同程度的部分熔融抽取形成的, 除个别样品的部分熔融程度为 15%~20% 外, 多数样品 < 5%。全岩主元素、单斜辉石成分体现出新生代汉诺坝地区的岩石圈地幔是很不均一的, 在主体饱满型中有亏损型地幔的残留。这种共存现象可能是软流圈物质对古老地幔进行侵蚀、混合和改造置换的结果。单斜辉石微量元素组成所体现的碳酸岩岩浆交代作用和硅酸盐熔/流体的交代作用也支持这一认识。

关键词: 橄榄岩捕虏体; 单斜辉石; LAM-ICPMS; 岩石圈地幔演化; 汉诺坝; 华北克拉通。

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2006)01-0093-08

收稿日期: 2005-09-20

LAM-ICPMS Analysis on Clinopyroxenes of Peridotite Xenoliths from Hannuoba and Its Significance on Lithospheric Mantle Evolution

YU Chun-mei¹, ZHENG Jian-ping^{1,2}, W. L. Griffin³

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

3. GEMOC, Department of Earth and Planetary Sciences, Macquarie University, Sydney, NSW 2109, Australia

Abstract: The compositions of the whole rocks and trace elements of minerals in peridotites can reflect the characters of lithospheric mantle. The nature and evolution of the Cenozoic lithospheric mantle beneath Hannuoba, which is located on the north edge of the intra-North China orogenic belt, are mainly discussed based on the in situ, LAM-ICPMS detected trace element compositions of clinopyroxenes in the Hannuoba peridotitic xenoliths, combined with detailed petrographic and petrochemical studies. The Hannuoba lithospheric mantle was formed by different partial melting of the primitive mantle. Most of the samples reflect a partial melting degree of lower than 5% with a few samples of 15%—20%. Major element compositions of the whole rocks and geochemical compositions of clinopyroxenes reveal the coexistence of both fertile and depleted mantle underneath the Hannuoba region during the Cenozoic. This was probably caused by the asthenospheric mantle that replaced the aged craton mantle through erosion, intermingling and modification. Our conclusion is further supported by the existence of both carbonatitic magmatic material and silicate melt/fluid metasomatism as magnified by the trace element compositions of the clinopyroxenes from the Hannuoba lithospheric mantle.

Key words: peridotite xenoliths; clinopyroxene; LAM-ICPMS; lithospheric mantle evolution; Hannuoba; North China craton.

基金项目: 中国地质大学(武汉)优秀青年教师资助计划项目(No. CUGQNL10); 国家杰出青年基金项目(No. 40425002); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0441)。

作者简介: 余淳梅(1977—), 女, 讲师, 从事岩石学、矿物学的教学及研究工作。E-mail: chmyu@cug.edu.cn

华北克拉通在中奥陶世仍然稳定存在的冷厚克拉通型岩石圈地幔到新生代时已转变为大洋型岩石圈地幔(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; 郑建平, 1999), 仅在部分地区有古老岩石圈地幔的残留(Zheng *et al.*, 2001). 位于华北克拉通北缘的河北汉诺坝因广泛发育的新生代碱性玄武岩中有丰富的橄榄岩捕虏体(Song *et al.*, 1989; Chen *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2002; Rudnick *et al.*, 2004)成为研究华北克拉通岩石圈地幔演化的热点地区. Gao *et al.* (2002)通过对橄榄岩全岩 Re-Os 同位素的研究认为该区的古老地幔已于 1.9 Ga 发生了置换作用. 这种置换是否很彻底, 抑或是仍然有古老地幔的残余? 橄榄岩成分及其中矿物(如单斜辉石)微量元素组成已被公认可很好地揭示岩石圈地幔性质(Griffin *et al.*, 1998, 1999). 在对汉诺坝地区橄榄岩捕虏体进行全岩及单矿物化学分析的基础上, 重点讨论了单斜辉石的 LAM-ICPMS 微量元素分析结果. 利用这些结果与华北克拉通内代表新生地幔的山旺橄榄岩捕虏体和代表古老地幔残留的鹤壁橄榄岩捕虏体进行对比, 获取了华北东部岩石圈地幔演化的有用信息.

鹤壁位处南北重力梯度带上, 该带是中国东部岩石圈减薄作用强弱变化的过渡带, 其橄榄岩捕虏体代表了古老岩石圈地幔的浅部残留(Zheng *et al.*, 2001). 山旺位于华北东部地块的郯庐断裂带内部, 其橄榄岩捕虏体代表了新增生的岩石圈地幔(Zheng *et al.*, 1998).

1 样品与分析技术

汉诺坝位处华北克拉通北缘(图 1). 该区新生代喷发的碱性玄武岩中含有丰富的橄榄岩(Song *et al.*, 1989; Chen *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2002; Rudnick *et al.*, 2004)、辉石岩(Xu *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2001)和麻粒岩(Zhou *et al.*, 2002)捕虏体而成为研究华北克拉通岩石圈壳、幔演化的热点地区.

橄榄岩捕虏体主要采自大麻坪和接沙坝. 它们皆很新鲜, 多呈椭球状, 大小在 5~30 cm 间. 以尖晶石二辉橄榄岩为主, 有少量的方辉橄榄岩. 除样品 DM02-10、DM02-16 为细粒剪切结构外, 其余皆为中、粗粒结构. 矿物组合为 Ol+Opx+Cpx±Sp, 橄榄石含量约 40%~75%, 斜方辉石占 5%~42%,

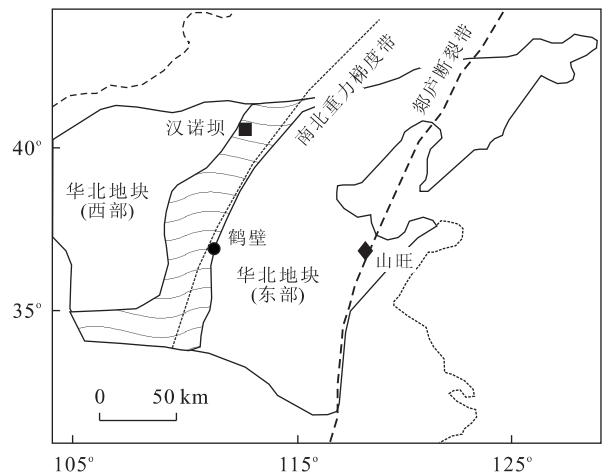


图 1 华北克拉通主要构造单元及样品出露位置(构造单元划分据 Zhao *et al.*, 2000 略修改)

Fig. 1 Major tectonic units and sample position in North China craton

表 1 汉诺坝橄榄岩捕虏体组成矿物的 Mg[#] 和 Cr[#] 值

Table 1 Values of Mg[#] and Cr[#] of minerals in peridotites from Hannuoba

样品号	Ol		Cpx		Opx		Sp	
	Mg [#]	Mg [#]	Cr [#]	Mg [#]	Cr [#]	Mg [#]	Cr [#]	
DM02-3	90.8	92.0	9.90	91.5	7.60	78.2	17.5	
DM02-4	90.8	92.2	12.4	91.4	7.90	76.2	21.0	
DM02-5	89.7	90.9	8.60	90.1	5.00	75.9	10.7	
DM02-6	86.4	87.4	3.20	87.2	2.70	72.6	7.40	
DM02-8	91.5	94.3	28.0	92.3	17.2	65.5	59.5	
DM02-9	91.2	92.9	23.7	91.9	14.0			
DM02-10	89.2	89.5	18.0	90.2	12.0	63.1	41.9	
DM02-11	90.6	91.5	9.30	91.2	6.50	77.8	15.6	
DM02-12	91.1	90.5	17.8	91.5	13.2	69.0	38.9	
DM02-13	89.9	91.9	7.10	90.7	4.30	79.2	9.50	
DM02-14	90.8	91.5	14.4	91.1	11.5	72.1	32.4	
DM02-15	89.6	91.6	7.30	90.3	4.60	77.7	10.0	
DM02-16	90.5	91.8	10.1	91.3	7.10	76.3	19.2	
DM02-17	90.7	93.3	16.7	91.6	9.70	72.5	30.1	
DM02-19	90.9	92.6	10.7	91.5	6.00	78.0	15.9	
JSB02-1	89.6	90.0	5.80	90.1	4.20	77.3	9.30	
JSB02-2	92.8	93.5	25.3	93.6	17.5			
JSB02-5	89.6	90.1	10.4	90.3	7.70	73.7	19.9	
JSB02-6	88.4	88.5	4.30	88.9	3.70	75.5	7.20	
JSB02-7-1	89.7	90.2	10.6	90.2	8.10	73.4	20.0	

单斜辉石 5%~25%, 尖晶石 <5%. 橄榄石扭折带发育, 具细粒结构的样品中橄榄石多呈三联点接触. 可见单斜辉石被橄榄石包裹的现象. 橄榄石、单斜辉石和斜方辉石常有流体包裹体.

样品分析均在澳大利亚 Macquarie 大学完成. 橄榄岩矿物的主量成分分析是在 Cameca SX-100

表 2 代表性汉诺坝橄榄岩捕虏体中单斜辉石微量元素含量(10^{-6})

Table 2 Trace element abundance of Cpx in representative peridotite xenoliths from Hannuoba

样品	DM02-4	DM02-8 (核部)	DM02-8 (边部)	DM02-9	DM02-10	DM02-11	DM02-12 (核部)	DM02-12 (边部)	DM02-15	DM02-16	DM02-19	JSB02-2
Sc	64	62	70	67	80	62.9	58.3	143	63	65	72	93
V	243	154	161	198	295	245	244	824	264	252	278	286
Co	19	21	20	21	20	20	21	485	17	21	19	15
Ni	333	335	357	317	331	325	332	6645	276	345	320	285
Rb	<0.02	0.05	<0.03	<0.01	0.06	<0.01	<0.01	<0.19	0.02	<0.04	<0.02	<0.01
Sr	35	124	95	159	290	54.8	269	155	67	39	54	95
Y	11.9		1.78	6.61	14.6	13.3	14.8	13.6	18.9	13.7	14.3	17.9
Zr	14.1	9.19	9.92	8.38	160	16	196	154	33	17	19	48
Nb	0.42	0.39	0.38	1.91	8.76	0.34	3.89	3.88	0.41	0.14	0.72	0.59
Ba	<0.04	0.67	0.12	0.1	0.26	<0.02	<0.03	<0.46	0.1	0.13	0.05	0.07
La	0.5	3.58	2.85	6.04	8.69	0.77	7.14	3.34	0.97	0.73	1.04	3.21
Ce	1.8	9.44	7.75	14.7	30.1	2.69	20.1	15.6	3.06	2.06	3.12	9.65
Pr	0.38	1.5	1.21	1.68	5.18	0.52	3.13	1.84	0.62	0.41	0.56	1.4
Nd	2.35	6.94	5.63	6.54	27	2.97	15.6	8.14	3.78	2.56	3.18	6.26
Sm	1	1.03	0.94	1.27	7.4	1.1	4.71	2.63	1.65	1.09	1.22	1.49
Eu	0.4	0.34	0.25	0.43	3.15	0.47	1.75	1.13	0.66	0.45	0.47	0.59
Gd	1.47	0.77	0.63	1.25	6.39	1.66	4.87	2.58	2.45	1.70	1.77	1.97
Tb	0.28	0.09	0.08		0.81		0.67	0.44	0.45	0.32	0.33	0.39
Dy	2.06	0.5	0.39	1.27	4.09	2.28	3.72	2.96	3.16	2.40	2.41	3.18
Ho	0.44	0.09	0.08	0.27	0.61	0.51	0.61	0.50	0.74	0.52	0.54	0.70
Er	1.35	0.16	0.21	0.71	1.24	1.47	1.29	1.36	2.15	1.50	1.60	2.08
Tm	0.19		0.02		0.14		0.15	0.20	0.30	0.22	0.22	0.27
Yb	1.21	0.09	0.16	0.69	0.72	1.45	0.84	1.26	2.07	1.40	1.50	1.72
Lu	0.17		0.03	0.10	0.12	0.21	0.11	0.15	0.29	0.20	0.21	0.21
Hf	0.49	0.18	0.22	0.27	2.45	0.47	4.01	3.27	1.04	0.62	0.69	2.05
Ta	0.03	0.03	0.05	0.26	0.54	0.02	0.56	0.47	0.03	0.02	0.03	0.09
Pb	0.05	0.05	0.06	0.03	0.27	0.06	0.18	1.43	0.05	0.10	0.07	0.10
Th	0.03	0.22	0.16	0.53	0.35	0.03	0.50	0.21	0.05	0.06	0.10	0.11
U	<0.01	0.07	0.04	0.15	0.49	0.01	0.13	0.16	0.02	<0.02	0.02	0.04

电子探针上完成的。加速电压和工作电流分别是 15 keV 和 20 nA。分析硅酸盐矿物时电子束直径是 5 μm 。矿物微量元素是在 Perkin-Elmer Sciex ELAN 5100 电感耦合等离子体质谱与 266 nm UV 激光剥蚀探针(LAM-ICPMS)的联机上进行的,激光束直径为 20~30 μm ,剥蚀深度为 30~50 μm ,仪器运行条件、精度、检测极限等可见 Norman *et al.* (1996)。全岩主量元素分析在 Macquarie 大学 GE-MOC 中心的 XRF 实验室完成。

2 分析结果

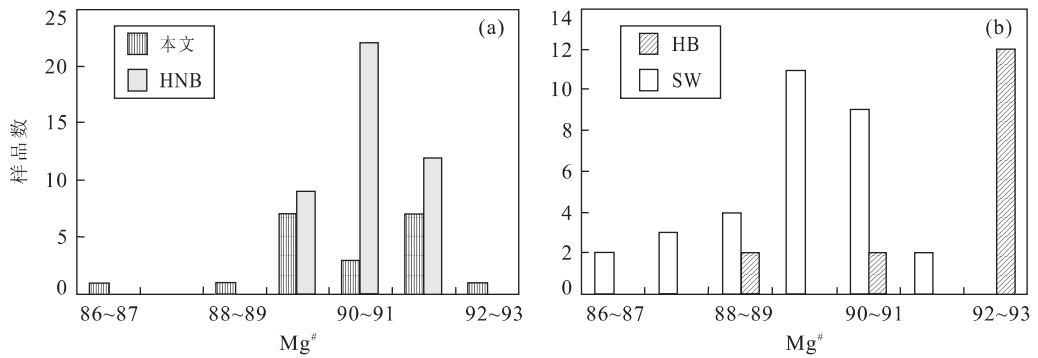
2.1 矿物化学特征

对汉诺坝橄榄岩捕虏体中组成矿物进行了中心与边缘的主元素和微量元素分析,计算了各主要矿物的 $\text{Mg}^\#$ 和 $\text{Cr}^\#$ 值(表 1)。总体上橄榄岩中矿物成

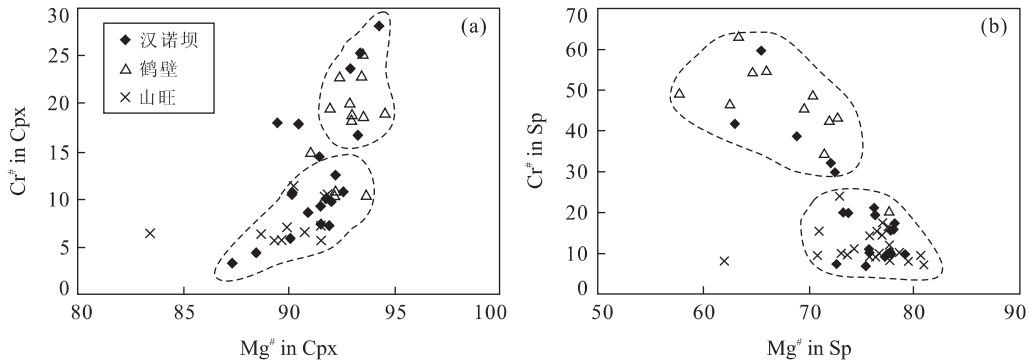
分较为均一,仅个别矿物的中心与边缘微量元素略有差别(如 DM02-8 与 DM02-12,表 2)。

2.1.1 主量元素 橄榄石的 $\text{Mg}^\#$ 为 86.4~92.8,较前人(Song *et al.*, 1989; Chen *et al.*, 2001; Rudnick *et al.*, 2004)对该区已有的分析结果变化范围宽。这一范围跨越了位于郯庐断裂带内的代表新生岩石圈地幔的山东山旺二辉橄榄岩捕虏体中橄榄石 $\text{Mg}^\#$,其主要变化集中在 89~91 之间;而代表古老地幔残余的河南鹤壁地区橄榄岩捕虏体中橄榄石 $\text{Mg}^\#$ 则多数大于 92(图 2)。

汉诺坝橄榄岩捕虏体中单斜辉石 Al_2O_3 范围值在 1.52%~7.46% 之间, Cr_2O_3 含量 0.36%~2.18%,为铬透辉石($\text{Wo} = 42.5 \sim 48.2$, $\text{En} = 47.4 \sim 52.2$, $\text{Fs} = 3.04 \sim 6.95$)。 $\text{Mg}^\#$ 值变化在 87.4~94.3 之间, $\text{Cr}^\#$ 变化范围较宽,为 3.2~28.0。 $\text{Mg}^\# - \text{Cr}^\#$ 相关图(图 3a)显示汉诺坝样品既有落入新生地幔区域内的,也有投在鹤壁所代表的古老地

图 2 橄榄岩中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 频数分布Fig. 2 Frequency distribution of $Mg^{\#}$ in olivine of peridotites

HNB, 汉诺坝数据引自 Song *et al.* (1989)、Chen *et al.* (2001)和 Rudnick *et al.* (2004); HB, 鹤壁数据来源于 Zheng *et al.* (2001); SW, 山旺数据引自 Zheng *et al.* (1998)和郑建平(1999)

图 3 不同地区橄榄岩中单斜辉石及尖晶石 $Mg^{\#}$ — $Cr^{\#}$ 关系图Fig. 3 Plots of $Mg^{\#}$ vs. $Cr^{\#}$ of Cpx and Sp in peridotites from different localities

山旺数据引自 Zheng *et al.*, 1998; 鹤壁数据引自 Zheng *et al.*, 2005; 郑建平, 1999

幔范围内。一般地,单斜辉石的 $Cr^{\#}$ 值比 $Mg^{\#}$ 更能反映地幔熔融程度(郑建平等,2003), $Cr^{\#}$ 值越高表示橄榄岩受熔融抽取的程度也越高,汉诺坝宽的 $Cr^{\#}$ 值反映出该区岩石圈地幔经历了复杂的不同程度熔融抽取过程,表明该区不同橄榄岩样品所代表的岩石圈地幔性质存在难熔到饱满的明显差异。

橄榄岩捕虏体组成矿物中的斜方辉石属顽火辉石,En 介于 85.9~92.5 之间,Wo 为 0.88~2.60, Fs 为 6.32~12.6。其 $Cr^{\#}$ 值为 2.7~17.5, $Mg^{\#}$ 变化于 87.2~93.6 之间,跨越了鹤壁(Zheng *et al.*, 2001)和山旺橄榄岩捕虏体中斜方辉石的相应值(郑建平,1999)。

尖晶石中 MgO 变化范围为 14.96%~21.40%, $Mg^{\#}$ 变化范围为 63.1~79.2, Al_2O_3 为 21.7%~59.2%, $Cr^{\#}$ 为 7.20~59.5。图 3b 显示汉诺坝尖晶石 $Mg^{\#}$ 、 $Cr^{\#}$ 变化范围相对较宽,部分样品投入了代表新生地幔的山旺样品区域内,而部分

样品则与代表古老地幔性质的鹤壁样品 $Mg^{\#}$ 、 $Cr^{\#}$ 变化范围接近,同样表明汉诺坝地区存在 2 种不同性质的岩石圈地幔。

2.1.2 微量元素 表 2 数据为 3~6 个数据点的平均值。单斜辉石的相容元素 Co、Ni 丰度分别为 $(15\sim27)\times 10^{-6}$ 与 $(229\sim435)\times 10^{-6}$,普遍低于鹤壁橄榄岩中单斜辉石,但样品 DM02-12 边部有异常高的 Co、Ni 含量 $(485\times 10^{-6}$ 与 $6\ 645\times 10^{-6})$,其原因有待进一步研究。汉诺坝及山旺样品中不相容元素 La、Sr 含量较低且窄,鹤壁则有高且较宽的值。汉诺坝 Zr 的变化范围也很宽,为 $(0.74\sim196)\times 10^{-6}$; Hf 和 Th 分别为 $(0.05\sim4.76)\times 10^{-6}$ 和 $(0.01\sim0.53)\times 10^{-6}$ 。大多数样品的相关性都较差,显示它们受到了交代作用的影响。

2.1.3 稀土元素 单斜辉石的稀土总量($\sum REE$)变化范围较大 $(10.1\sim95.4)\times 10^{-6}$ 。 $(La/Yb)_N = 0.26\sim26.38$ 。个别样品(如 DM02-8、DM02-12)

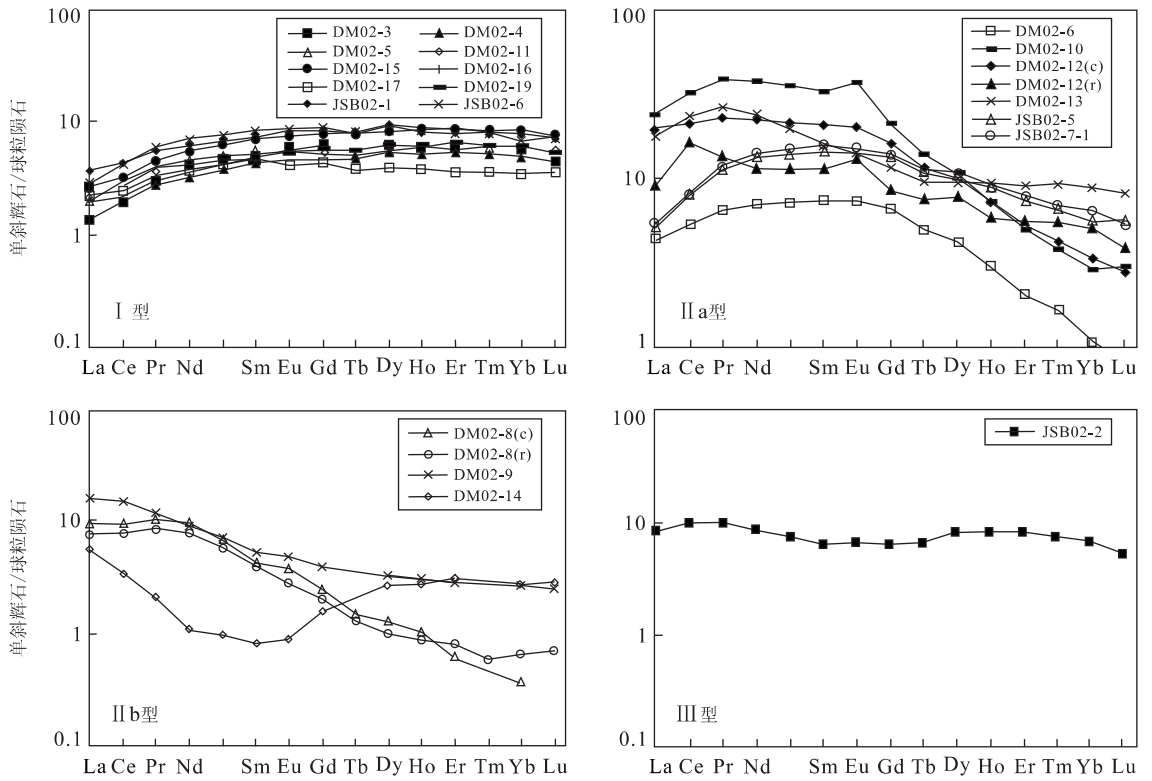


图 4 橄榄岩捕虏体中 Cpx 稀土元素配分型式

Fig. 4 REE patterns of Cpx in peridotite xenoliths

中单斜辉石的中心与边部的各稀土元素含量差异较大。球粒陨石标准化配分型式可分为 3 种类型(图 4): (I) LREE 亏损型, $(La/Yb)_N = 0.26 \sim 0.64$, $\sum REE$ 变化在 $(13.2 \sim 24.9) \times 10^{-6}$ 之间(平均为 19.0×10^{-6}), MREE-HREE 呈平坦分布; (II) LREE 富集型, $\sum REE$ 为 $(10.1 \sim 95.4) \times 10^{-6}$ (平均为 51.0×10^{-6})。根据 LREE 的形态又可细分为 2 类: (a) La 到 Eu 呈正斜率展布, 呈倒 U 型, HREE 与 MREE 分异较强烈, 这种配分型式可能与流体的交代有关 (Hauri and Hart, 1994); (b) LREE 负斜率展布, 不同样品的轻重稀土分异程度不同, $(La/Yb)_N = 2.06 \sim 26.4$, 其中 DM02-8 边部的 LREE-MREE 的含量低、而 HREE 部分稍微高于核部, DM02-14 的 REE 表现为明显的 U 型分布, 反映部分熔融作用之后又受到过流体的交代作用, 致使 LREE 富集; (III) 平坦型, $(La/Yb)_N = 1.26$, 仅 1 个样品呈此类型 (JSB02-2)。

2.2 全岩主量元素特征

汉诺坝橄榄岩全岩主量元素丰度见表 3。SiO₂ 含量平均为 43.2%; MgO 含量变化范围为 38.9%~50.0%。Mg[#] 变化较大(图 5), 最高可达

92.4, 部分与古老地幔特征 (Zheng *et al.*, 2001) 相似, 但大部分与山旺样品类似, 都落入了新生地幔 (Zheng *et al.*, 1998) 区域内。Al₂O₃ 为 0.62%~3.34%, CaO 含量为 0.31%~2.99%, 低于原始地幔相应值。这一现象说明汉诺坝既可能存在类似于鹤壁的难熔地幔, 又存在类似山旺饱满岩石圈地幔。

3 讨论

3.1 岩石圈地幔的部分熔融与亏损事件

汉诺坝橄榄岩岩石化学(图 5)及单斜辉石 LREE 亏损的配分特征(图 4, I 型)表明它们经历了地幔部分熔融作用。橄榄石 Mg[#]、单斜辉石和尖晶石 Cr[#] 的相对高低可反映熔融抽取程度。利用 Johnson *et al.* (1990) 提供的方法, 对单斜辉石的微量元素进行了分离熔融程度的模拟计算(图 6)。HREE 最不容易受后来交代事件的影响, 而被用以估计地幔的部分熔融程度。利用这一方法获得的新生代汉诺坝岩石圈地幔是原始地幔经过不同程度部分熔融之后的产物: 个别样品的部分熔融程度较高, 为 15%~20% (如样品 DM02-8); 大部分样品

表 3 汉诺坝地幔橄榄岩主量元素组成

Table 3 Major element compositions of peridotite xenoliths from Hannuoba

%

样品	DM02-4	DM02-8	DM02-9	DM02-10	DM02-11	DM02-12	DM02-13	DM02-15	DM02-16	DM02-19	JSB02-2
SiO ₂	44.0	43.0	42.1	42.7	43.5	42.4	43.9	45.0	44.2	43.3	41.0
TiO ₂	0.04	0.08	0.06	0.09	0.04	0.12	0.11	0.11	0.09	0.06	0.05
Al ₂ O ₃	1.72	1.43	0.81	1.54	1.66	1.29	3.08	3.34	2.68	2.22	0.62
Fe ₂ O ₃	8.55	8.65	8.78	9.85	8.86	8.69	8.78	8.68	8.48	8.28	7.44
MnO	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.11	0.13	0.13	0.12	0.12	0.10
MgO	43.1	44.5	46.5	43.5	44.1	46.5	40.5	38.9	41.6	42.9	50.0
CaO	1.37	1.79	1.26	1.15	1.18	0.52	2.56	2.99	2.07	1.99	0.31
Na ₂ O	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08
K ₂ O	<0.01	0.03	0.02	0.03	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	0.04	<0.01	0.08
P ₂ O ₅	<0.01	0.02	0.01	0.02	<0.01	0.02	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
S	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	0.01	<0.003	<0.003	<0.003
Cr ₂ O ₃	0.36	0.21	0.15	0.40	0.26	0.26	0.35	0.38	0.41	0.42	0.31
LOI	0.51	0.06	-0.04	0.25	0.08	-0.09	0.43	0.38	0.16	0.35	-0.20
Total	99.8	99.8	99.81	99.60	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9	99.6	99.8

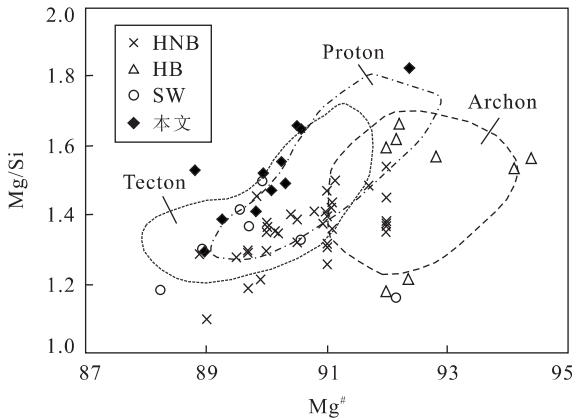


图 5 汉诺坝地幔橄榄岩捕虏体主量元素关系

Fig. 5 Correlation plots of major elements in peridotite xenoliths from Hannuoba

Archon: >2.5 Ga; Tecton: <1.0 Ga (Griffin *et al.*, 1999)

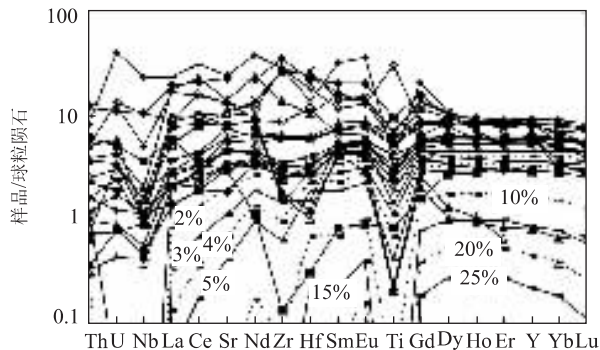


图 6 分离熔融模型与汉诺坝单斜辉石实测成分比较

Fig. 6 Comparison between fractional model melting and analyzed composition in Cpx from Hannuoba

等样品). 利用尖晶石 $Cr^{\#}$ 对部分熔融程度 (Hellebrand *et al.*, 2001) 进行的估算 (0.3%~19%), 也表明汉诺坝地区岩石圈地幔既有饱满型地幔, 又存在难熔地幔.

3.2 地幔富集事件

汉诺坝单斜辉石 LREE 两种富集型配分型式及部分样品 REE 的 U 型分布皆是富集地幔的特征, 且它们的不相容元素丰度要明显高于 LREE 亏损型的样品. 相对于 REE, 它们有明显的 Ta、Zr、Hf、Ti 等 HFSE 元素负异常, Th、U 正异常. 由于玄武岩不具有亏损 HFSE 的特征 (李天福等, 1999), 因此交代介质不可能来自于寄主岩, 说明了它们受到地幔流体的交代作用. 通常认为导致地幔富集的交代介质有富碱的硅酸盐熔体或流体 (Wulff-Pedersen *et al.*, 1996) 和富 CO₂ ± H₂O 的碳酸盐熔体 (Bell *et al.*, 1998). 一般认为, 不相容元素与 La 相关性较好说明交代介质是硅酸盐质的, Ti、V 与 La 相关性好则表明是碳酸岩岩浆交代. 汉诺坝单斜辉石中 La 与不相容元素 Sr、Ce、Nd 具有较好的相关性, 而与 V 相关性较差, 说明交代介质应是以硅酸盐质为主的. 同时, 将本文所测数据投到 Ti/Eu - (La/Yb)_N 图中判断交代介质 (图 7), 汉诺坝橄榄岩捕虏体大多落入硅酸盐交代区域, 个别落入碳酸岩岩浆交代范围 (如样品 DM02-08 和 DM02-10), 与鹤壁橄榄岩交代介质类似 (Zheng *et al.*, 2004). 说明汉诺坝地区岩石圈地幔经历了复杂的交代过程, 既有硅酸盐熔/流体的交代又有碳酸岩岩浆的改造.

来自部分熔融程度 <5% 的原始地幔 (如 DM02-3

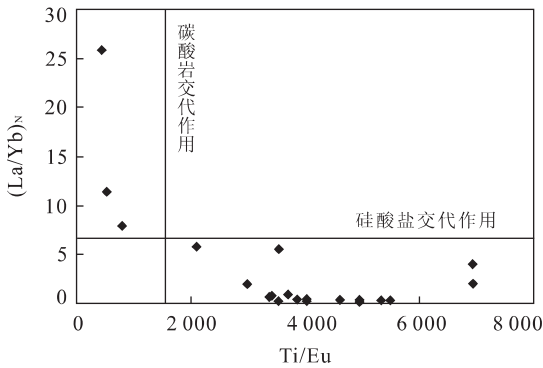


图 7 汉诺坝橄榄岩捕虏体中单斜辉石的 Ti/Eu—(La/Yb)_N 图解

Fig. 7 Plot of Ti/Eu vs. (La/Yb)_N of Cpx in peridotite xenoliths from Hannuoba

3.3 华北北缘汉诺坝地区新生代岩石圈地幔特征

华北地块于 1.7~1.8 Ga 完成基底的克拉通化后,直至古生代金伯利岩浆活动之前一直处于“稳定”状态。中生代时,华北地块又开始活化,古生代时期存在的古老、冷而厚达 200 多 km 的岩石圈根被新生地幔所置换,至新生代时厚度已转变为 80~150 km(郑建平, 1999),这一地质事实已被广泛接受。对上述科学事实的解释有不同的认识:有岩石圈地幔或下地壳的拆沉(delamination)(邓晋福等, 1996;吴福元等, 2003; Gao *et al.*, 2004)、热—化学侵蚀(Xu, 2001)、“蘑菇云”式的地幔置换作用(Yuan, 1996;郑建平, 1999;路凤香等, 2000)等来解释这一减薄过程。由于克拉通地幔所具有的高难熔和漂浮性质,在克拉通内部一般情况下不会发生大面积的拆沉作用(Griffin *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 1998)。橄榄岩矿物及岩石地球化学特征反映出汉诺坝新生代时岩石圈地幔主体是新生饱满性质的,但同时也存在古老、难熔的地幔。其中的硫化物包裹体 Re-Os 原位年龄也显示该区岩石圈地幔有老(2.2 Ga)有新(1.2~1.4 Ga, 0.7~0.9 Ga, 作者待刊资料)。这种关系最好的解释是新生地幔物质对古老地幔不均匀侵蚀、混合甚至置换的结果(郑建平, 1999)。

4 结论

汉诺坝新生代玄武岩中橄榄岩有很宽的全岩化学组成。它们宽的橄榄石 Mg[#]、单斜辉石 Cr[#],也表明华北北缘新生代时岩石圈有饱满和难熔地幔。其

中前者是主体,来自于经历<5%部分熔融程度的产物,后者(部分熔融程度 15%~20%)作为残留体形式存在。饱满和难熔地幔所具有不同的流体交代介质(前者为硅酸盐熔体,后者是碳酸岩熔体)说明它们有不同的演化历史。饱满和难熔性质地幔的共存现象进一步表明:华北东部岩石圈所经历的上涌软流圈物质通过侵蚀、混合和改造并最终实现对古老岩石圈地幔不均匀置换作用。

References

- Bell, K., Kjarsgaard, B. A., Simonetti, A., 1998. Carbonatites into the twenty-first century. *J. Petrol.*, 39: 1839—1845.
- Chen, S. H., O'Reilly, S. Y., Zhou, X. H., et al., 2001. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean craton, China; Evidence from xenoliths. *Lithos*, 56: 267—301.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Carlson, R. W., 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 198: 307—322.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892—897.
- Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., Ryan, C. G., 1999. The composition and origin of sub-continental lithospheric mantle. In: Fei, Y., Berka, C. M., Mysen, B. O., eds., *Mantle petrology: Field observations and high-pressure experimentation; A tribute to Francis R. (Joe) Boyd. The Geochemical Society, Special Publication*, 6: 13—45.
- Griffin, W. L., Zhang, A., O'Reilly, S. Y., et al., 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower, M., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. Amer. Geodynamics Series*, 27: 107—126. American Geophysical Union, Washington, D. C.
- Hauri, E. H., Hart, S. R., 1994. Constraints on the melt migration from mantle plumes: A trace element study of peridotite xenoliths from Savai'i, Western Samoa. *J. Geophys. Res.*, 99: 24301—24322.
- Hellebrand, E., Snow, J. E., Dick, H. J. B., et al., 2001. Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites. *Nature*, 410: 677—680.
- Johnson, K. T. M., Dick, H. J. B., Shimizu, N., 1990. Melting in the oceanic upper mantle: An ion microprobe

- study of diopside in abyssal peridotites. *J. Geophys. Res.*, 95:2661—2678.
- Li, T. F., Ma, H. W., Bai, Z. M., 1999. Geochemical characteristics and genetic model of Hannuoba basalts, Hebei Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(3): 217—228 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Jin, S. Y., 2001. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba basalt, North China craton; Implications for petrogenesis and lower crustal composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(15): 2589—2604.
- Lu, F. X., Zheng, J. P., Li, W. P., et al., 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle evolution in the eastern China: The “mushroom cloud” model. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 97—107 (in Chinese with English abstract).
- Menzies, M. A., Fan, W. M., Zhang, M., 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Pridard, H. M., Alabaster, T., Harris, N. B. W., et al., eds., Magmatic processes and plate tectonics. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 76: 71—81.
- Norman, M. D., Pearson, N. J., Sharma, A., et al., 1996. Quantitative analysis of trace elements in geological materials by laser ablation ICPMS: Instrumental operating conditions and calibration values of NIST glasses. *Geostand. Newsl.*, 20: 247—261.
- Rudnick, R. L., Gao, S., Ling, W. L., 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 77: 609—637.
- Song, Y., Frey, F. A., 1989. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, eastern China; Implications for subcontinental mantle heterogeneity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 97—113.
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 2003. Discussion on the lithospheric thinning in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51—60 (in Chinese with English abstract).
- Wulff-Pedersen, E., Neumann, E. R., Jensen, B. B., 1996. The upper mantle under La Palma, Canary Island: Formation of Si-K-Na-rich melt and its importance as a metasomatic agent. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 125: 113—139.
- 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, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9—10): 747—757.
- Xu, Y. G., 2002. Evidence for crustal components in the mantle and constraints on crustal recycling mechanisms: Pyroxenite xenoliths from Hannuoba, North China. *Chemical Geology*, 182: 301—322.
- Yuan, X. C., 1996. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model. *Science in China (Series D)*, 39(3): 235—244.
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China craton; Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Res.*, 103: 55—88.
- Zheng, J. P., 1999. Mesozoic-Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning, East China. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2005. Late Mesozoic-Eocene mantle replacement beneath the eastern North China craton; Evidences from the Paleozoic and Cenozoic peridotite xenoliths. *Intern. Geol. Rev.*, 47: 457—472.
- 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. *Int. Geol. Rev.*, 40: 471—499.
- Zheng, J. P., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2001. Relics of the Archean mantle beneath eastern part of the North China block and its significance in lithospheric evolution. *Lithos*, 57: 43—66.
- Zheng, J. P., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2004. Nature and evolution of Mesozoic-Cenozoic lithospheric mantle beneath the Cathaysia block, SE China. *Lithos*, 74: 41—65.
- Zhou, X. H., Sun, M., Zhang, G. H., et al., 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton. *Lithos*, 62: 111—124.

附中文参考文献

- 李天福, 马鸿文, 白志民, 1999. 汉诺坝玄武岩的地球化学特征及成因模式. *岩石矿物学杂志*, 18(3): 217—228.
- 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等, 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型. *地学前缘*, 7(1): 97—107.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等, 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. *地学前缘*, 10(3): 51—60.
- 郑建平, 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社.