

# 辉南新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体矿物化学 与华北岩石圈地幔演化

鲁江姑, 郑建平

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, 武汉, 430074

**内容提要:**利用电子探针和 LA-ICPMS 对吉林辉南新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体的矿物进行了主、微量元素分析, 讨论了辉南陆下岩石圈地幔的性质及其在华北克拉通破坏过程中的意义。橄榄石、单斜辉石和尖晶石的  $Mg^{\#}$  和  $Cr^{\#}$  均表明该区陆下岩石圈地幔主体是饱满的, 同时也存在少量过渡和难熔型地幔。单斜辉石球粒陨石标准化的 REE 配分形式包括 LREE 亏损、倒 U 字型 REE 和 LREE 富集等不同类型, 这些特征说明辉南陆下岩石圈地幔经历了低于 10% 的分离部分熔融作用, 并遭受后期硅酸盐熔体交代作用, 但个别样品有碳酸岩熔体交代的残留。橄榄石  $Mg^{\#}$  和平衡温度无相关性, 说明辉南陆下岩石圈地幔不存在明显的分层而是交叉并置的。这些地幔特征和华北东部其他地区新生代的主体地幔性质相似, 显示饱满地幔和难熔地幔的共存, 可能是熔-岩反应、侵蚀作用和上涌软流圈物质冷却转变置换的综合结果。

**关键词:** 橄榄岩; 矿物化学; 陆下岩石圈地幔; 地幔置换; 吉林辉南

华北克拉通是欧亚大陆为数不多出露有太古代岩石的地区, 已知最老的地壳岩石年龄大于 3.6Ga (Liu et al., 1992; Zheng et al., 2004)。对山东蒙阴和辽宁复县金伯利岩中捕虏体/捕虏晶的详细研究表明在中奥陶世以前, 华北克拉通仍存在冷、厚的克拉通型岩石圈根(路凤香和郑建平, 1996; Griffin et al., 1998); 新生代玄武岩携带的幔源捕虏体则显示此时该区岩石圈地幔具热、薄的特点, 即“大洋型”岩石圈地幔特征(Fan and Menzies, 1992)。岩石圈的去根减薄这一事实已得到广泛认同(Menzies et al., 1993; 邓晋福等, 1996; Griffin et al., 1998; Zheng et al., 1998; 徐义刚, 1999; 郑建平, 1999; 吴福元等, 1999; Zhang et al., 2002, 2003, 2004), 但在减薄机制、起始时间、动力学背景、地幔性质转变的方式等还存在不同的认识(吴福元等, 2003, 2008)。与华北东部其他地区相比, 华北东北缘辉南陆下岩石圈地幔性质的研究还比较有限(Xu et al., 2003; 徐义刚等, 2003; 张志海等, 2006), 这在一定程度上制约了对整个华北岩石圈演化的研究。本文对这一地区橄榄岩捕虏体中的矿物进行了系统的主、微量元素原位分析, 并通过与华北克拉通内具不同地幔

性质的山旺和鹤壁橄榄岩进行对比, 旨在进一步探索新生代时华北东北缘岩石圈地幔性质, 为深入认识整个华北岩石圈地幔演化提供更完整的资料。山旺位于华北东部地块郟庐断裂带内部, 其橄榄岩捕虏体代表了新生饱满岩石圈地幔特征(Zheng et al., 1998, 2006); 远离郟庐断裂带的鹤壁位处南北重力梯度带上, 其橄榄岩捕虏体总体是古老难熔岩石圈地幔的浅部残留(Zheng et al., 2001, 2007)。

## 1 地质背景和岩石学的特征

南北重力梯度带和郟庐断裂带是华北克拉通内的两大地质构造异常带。前者将华北克拉通分为东西两部分: 西部为热流值低、岩石圈厚度大的鄂尔多斯地块; 东部为热流值高、岩石圈厚度小的冀鲁辽地块(Wang et al., 1985; 马杏垣, 1991; 袁学诚, 1996)。后者是中国东部乃至东亚具磁异常特征的重要岩石圈断裂(Xu et al., 1994)。位于华北克拉通东北缘的辉南新生代玄武岩属龙岗火山群(罗兆华, 1984)(图 1), 其喷发年龄小于 0.6Ma(Fan et al., 2000)。橄榄岩样品采自龙岗火山群西部的大椅山新生代玄武岩中, 主要为尖晶石二辉橄榄岩和

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 90714002、40673002)资助的成果。

收稿日期: 2009-07-16; 改回日期: 2010-09-20; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 鲁江姑, 女。硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。通讯作者: 郑建平, 博士、教授, 从事岩石学教学和科研。Email: jpzheng@cug.edu.cn。

少量方辉橄榄岩。其矿物组成变化范围为橄榄石(Ol, 48%~82%), 斜方辉石(Opx, 12%~40%), 单斜辉石(Cpx, 2%~14%), 尖晶石(Sp, 1%~3%)。橄榄岩多为残碎斑结构(尖晶石二辉橄榄岩,  $Cpx \geq 5\%$ ), 少量粗粒结构(如方辉橄榄岩 J230, Cpx 含量约为 2%)。

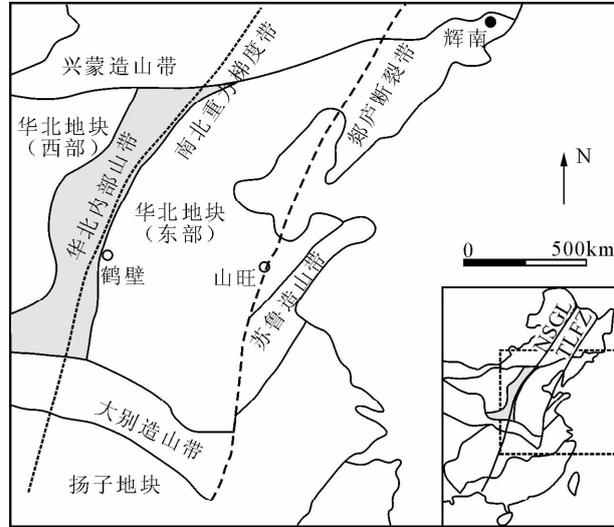


图1 华北克拉通主要构造单元及采样位置(构造单元划分据 Zhao et al., 2001)图中 NSGL 代表南北重力梯度带; TLFZ 为郯庐断裂带

Fig. 1 Major tectonic units and sample location in the North China craton (tectonic division after Zhao et al., 2001). NSGL, North-South Gravity Lineament; TLFZ, Tan-Lu translithospheric Fault Zone

## 2 分析方法

矿物的主、微量元素测试均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。主量元素分析在 JEOL-JXA-8100 型电子探针上完成, 分析条件为: 加速电压 15kV, 标准电流 20nA, 电子束直径 10  $\mu\text{m}$ , 选取美国 SPI<sup>®</sup> 02753-AB 的 53 种矿物做标样。分析结果见表 1, 各矿物的成分是均匀的, 数据是 2~4 个点的平均值。单斜辉石的微量元素是采用 LA-ICPMS 测定, 激光剥蚀系统为波长为 193nm 的 GeoLas2005, 分析条件为: 激光剥蚀孔径 32  $\mu\text{m}$ , 激光脉冲 8Hz, 能量密度 1.2mJ。详细测试方法见 Gao et al. (2002)。数据处理过程中选用橄榄石的 Mg, 单斜辉石的 Ca, 尖晶石的 Cr 作为内标元素, 国际标准玻璃 NIST610 用于外标校正。绝大部分微量元素的分析精度优于 10%。分析结果见表 2, 各矿物的成分是均匀的, 数据为 3 个点的平均值。

## 3 分析结果

### 3.1 矿物化学

#### 3.1.1 橄榄石和斜方辉石

橄榄石  $Mg^{\#}$  (100Mg/Mg+Fe) 可以直接反映地幔饱满和难熔的性质(郑建平, 1999), 其中  $Mg^{\#}$  大于 92 表示地幔难熔,  $Mg^{\#}$  小于 90 表示地幔饱满,  $Mg^{\#}$  在两者之间为过渡类型地幔(Zheng et al., 2007)。本文辉南橄榄岩中橄榄石  $Mg^{\#}$  为 88.1~90.9(平均值为 89.8), 和 Xu et al. (2003) 报道的该区橄榄岩中橄榄石  $Mg^{\#}$  基本一致。总体上, 辉南橄榄岩中橄榄石  $Mg^{\#}$  与山旺饱满新生地幔橄榄石  $Mg^{\#}$  相近(图 2)。橄榄石中 CaO 的含量较高, 为 0.02%~0.16%, 多数大于 0.09%, 暗示较高的温度状态(O'Reilly et al., 1996)。辉南橄榄岩中斜方辉石的  $Mg^{\#}$  变化范围为 88.6~91.3, 并与  $Cr^{\#}$  成较陡的正斜率线性相关。

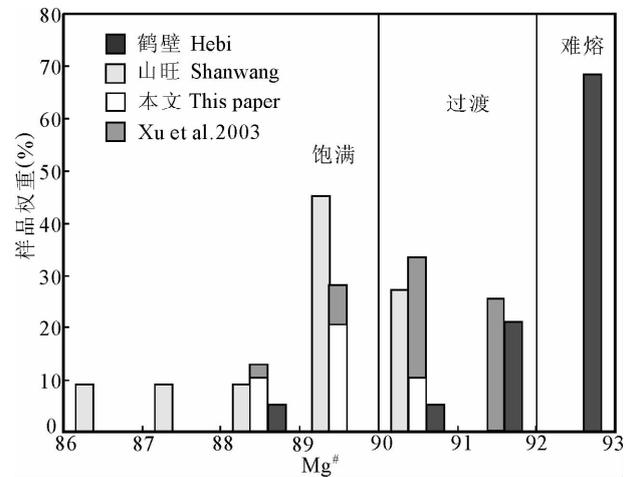


图2 辉南橄榄岩中橄榄石  $Mg^{\#}$  分布图

Fig. 2 Distribution of  $Mg^{\#}$  in olivines from Huinan peridotite xenoliths

其他数据来源: 辉南其他数据, Xu 等(2003); 山旺, Zheng 等(1998); 鹤壁, Zheng 等(2001)

Other data sources: parts of data from Huinan, Xu et al. (2003); Shanwang, Zheng et al. (1998); Hebi, Zheng et al. (2001)

#### 3.1.2 单斜辉石

辉南橄榄岩中单斜辉石均为透辉石,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  含量分别为 50.7%~53.3%, 4.85%~6.62%, 0.81%~1.48%。透辉石的  $Mg^{\#}$  为 88.7~92.2;  $Cr^{\#}$  (100Cr/Cr+Al) 变化范围较宽, 为 3.9~15.8。一般来说, 单斜辉石中的 Al 含量越高, 相

表 1 辉南橄榄岩捕虏体各矿物电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses (%) of minerals from the Huinan peridotite xenoliths

编号 类型	J230 方辉橄榄岩				J083 尖晶石二辉橄榄岩				J079 尖晶石二辉橄榄岩				J298 尖晶石二辉橄榄岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
点数	3	3	3	3	3	3	3	3	2	4	3	3	3	3	3	3
SiO <sub>2</sub>	40.81	55.51	51.93	0.10	41.13	55.64	52.57	0.07	40.87	55.50	52.13	0.10	41.08	56.00	53.31	0.13
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.10	0.48	0.20	0.03	0.09	0.33	0.10	0.04	0.20	0.76	0.25	0.04	0.10	0.30	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	3.37	5.10	48.49	0.04	3.32	5.51	52.00	0.04	3.65	5.05	55.35	0.05	3.02	4.85	41.59
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.35	0.77	17.55	0.00	0.31	1.01	15.08	0.00	0.32	0.58	12.28	0.01	0.57	1.36	24.96
FeO	11.19	7.13	3.41	14.47	9.77	6.19	2.69	12.35	9.72	6.28	2.77	10.63	9.00	5.87	2.88	13.52
MnO	0.12	0.11	0.09	0.13	0.12	0.12	0.06	0.11	0.12	0.12	0.07	0.08	0.09	0.11	0.04	0.15
MgO	47.14	32.42	15.57	18.47	48.21	33.33	14.76	19.70	48.26	32.77	16.12	20.80	49.42	32.84	15.79	18.70
CaO	0.06	0.57	21.34	0.01	0.03	0.47	21.20	0.00	0.09	0.50	21.00	0.00	0.11	0.81	20.07	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.03	0.81	0.02	0.01	0.31	1.30	0.01	0.02	0.04	0.88	0.01	0.01	0.08	1.17	0.01
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Total	99.42	99.61	99.50	99.45	99.33	99.79	99.45	99.42	99.20	99.37	99.37	99.50	99.80	99.41	99.77	99.29
[O]	4	6	6	4	4	6	6	4	4	6	6	4	4	6	6	4
Si	1.010	1.930	1.896	0.003	1.012	1.928	1.913	0.002	1.008	1.926	1.898	0.003	1.004	1.941	1.928	0.004
Al	0.001	0.138	0.220	0.004	0.001	0.135	0.237	0.002	0.001	0.149	0.217	0.005	0.001	0.123	0.207	0.005
Ti	0.000	0.003	0.008	1.557	0.001	0.002	0.009	1.632	0.001	0.005	0.021	1.706	0.001	0.003	0.008	1.371
Cr	0.000	0.010	0.022	0.378	0.000	0.009	0.029	0.320	0.000	0.009	0.017	0.254	0.000	0.016	0.039	0.552
Fe	0.232	0.207	0.104	0.330	0.201	0.179	0.082	0.272	0.201	0.182	0.084	0.232	0.184	0.170	0.087	0.316
Mn	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.001	0.003
Mg	1.740	1.680	0.848	0.750	1.769	1.722	0.558	0.790	1.774	1.695	0.875	0.811	1.800	1.697	0.851	0.780
Ca	0.002	0.021	0.835	0.000	0.001	0.018	0.827	0.000	0.002	0.019	0.820	0.000	0.003	0.030	0.778	0.000
Na	0.001	0.002	0.058	0.001	0.000	0.003	0.092	0.001	0.001	0.003	0.062	0.000	0.000	0.006	0.082	0.000
K	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Total	2.989	3.995	3.999	3.019	2.987	4.000	3.991	3.022	2.991	3.992	3.996	3.018	2.995	3.990	3.982	3.042
Mg <sup>#</sup>	88.4	89.1	89.2	69.7	89.9	90.6	90.8	74.2	89.9	90.4	91.3	77.9	90.8	91.0	90.8	71.3
Cr <sup>#</sup>			9.1	19.5			10.0	16.3			7.2	13.0			15.8	28.7
F(%)				7.7				5.9				3.6				11.5

编号 类型	J197 尖晶石二辉橄榄岩				J206 尖晶石二辉橄榄岩				J328 尖晶石二辉橄榄岩				J301 尖晶石二辉橄榄岩			
	Ol	Opx	Cpx	Sp												
点数	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SiO <sub>2</sub>	40.85	55.77	52.29	0.11	40.82	55.75	52.04	0.06	41.06	55.6	52.38	0.11	40.55	55.11	51.76	0.15
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.12	0.51	0.12	0.03	0.11	0.54	0.14	0.03	0.09	0.51	0.15	0.03	0.1	0.56	0.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	3.66	5.95	57.74	0.03	3.26	5.1	52.29	0.04	3.84	6.2	56.33	0.05	4.15	6.38	60.63
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0.23	0.6	9.01	0	0.34	0.78	15.65	0	0.29	0.8	10.62	0	0.17	0.37	4.99
FeO	10.41	6.53	2.95	11.16	8.91	5.84	2.39	11.67	10.15	6.47	2.86	11.2	10.89	7.04	3.25	12.02
MnO	0.13	0.15	0.06	0.09	0.11	0.11	0.06	0.1	0.11	0.12	0.07	0.09	0.12	0.15	0.06	0.08
MgO	47.75	32.26	15.12	21.12	49.63	33.86	15.77	19.94	47.97	32.43	14.61	20.83	48.03	32.54	15.33	21.01
CaO	0.1	0.48	20.67	0.01	0.05	0.46	21.91	0.01	0.09	0.47	20.45	0.01	0.13	0.53	20.54	0
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.06	1.18	0.01	0	0.03	0.95	0.03	0.01	0.07	1.48	0.01	0.01	0.08	1.05	0.01
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0	0.01	0.01	0
Total	99.31	99.27	99.33	99.36	99.59	99.77	99.54	99.88	99.47	99.38	99.37	99.37	99.81	99.86	99.32	99.22
[O]	4	6	6	4	4	6	6	4	4	6	6	4	4	6	6	4
Si	1.009	1.937	1.902	0.003	0.000	1.924	1.895	0.002	1.011	1.930	1.905	0.003	1.000	0.005	1.885	0.004
Ti	0.001	0.150	0.255	0.002	0.000	0.133	0.219	0.003	0.001	0.157	0.266	0.003	0.001	0.000	0.274	0.006
Al	0.001	0.003	0.014	1.767	0.000	0.003	0.015	1.633	0.001	0.002	0.014	1.734	0.000	0.005	0.015	1.840
Cr	0.000	0.006	0.017	0.185	1.812	0.009	0.022	0.328	0.000	0.008	0.023	0.219	0.000	1.682	0.011	0.102
Fe	0.215	0.190	0.090	0.242	0.001	0.169	0.073	0.259	0.209	0.188	0.087	0.245	0.225	0.020	0.099	0.259
Mn	0.003	0.004	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002
Mg	1.758	1.671	0.820	0.817	0.001	1.742	0.856	0.788	1.761	1.677	0.792	0.811	1.766	0.169	0.832	0.806
Ca	0.003	0.018	0.806	0.000	0.000	0.017	0.855	0.000	0.002	0.017	0.796	0.000	0.003	0.003	0.802	0.000
Na	0.000	0.004	0.084	0.000	0.182	0.002	0.067	0.001	0.001	0.005	0.104	0.001	0.000	0.204	0.074	0.001
K	0.000	0.000	0.001	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.911	0.000	0.000
Total	2.990	3.984	3.990	3.013	3.000	4.003	4.003	3.031	2.988	3.988	3.989	3.018	2.999	4.002	3.995	3.016
Mg <sup>#</sup>	89.2	89.9	90.2	77.3	90.9	91.3	92.2	75.5	89.5	90.0	90.2	77.0	88.8	89.3	89.5	75.9
Cr <sup>#</sup>			6.0	9.0			9.0	17.0			8.0	11.0			4.0	5.0
F(%)								6.1				2.1				

续表 1

编号	J001				J247				J198				J300			
	尖晶石二辉橄榄岩				尖晶石二辉橄榄岩				尖晶石二辉橄榄岩				尖晶石二辉橄榄岩			
类型	Ol	Opx	Cpx	Sp												
矿物	Ol	Opx	Cpx	Sp												
点数	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SiO <sub>2</sub>	41.13	55.64	52.04	0.14	41.15	55.88	52.44	0.06	40.88	54.72	51.7	0.13	40.57	54.49	52.15	0.13
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.11	0.47	0.22	0.03	0.11	0.48	0.13	0.01	0.13	0.46	0.19	0.03	0.11	0.5	0.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	3.69	6.03	54.76	0.06	3.64	5.81	53.39	0.09	4.58	6.6	57.81	0.08	4.65	6.16	60.51
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.25	0.82	11.36	0	0.36	0.98	13.47	0.01	0.35	0.61	9.23	0	0.24	0.37	4.97
FeO	9.65	6.05	3.01	11.77	9.69	6.18	2.69	11.66	10.32	6.7	3.08	10.86	10.94	7.04	3.21	12.05
MnO	0.13	0.11	0.07	0.1	0.12	0.12	0.08	0.12	0.13	0.11	0.06	0.09	0.14	0.14	0.07	0.08
MgO	48.46	33.05	15.06	20.89	48.31	32.47	14.81	20.53	47.63	32.01	15.82	21.32	48	32.28	15.11	21.4
CaO	0.11	0.6	20.58	0.01	0.06	0.47	20.63	0	0.16	0.62	20.27	0	0.13	0.47	20.67	0
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.08	1.2	0.01	0.02	0.07	1.47	0.02	0.03	0.09	1.1	0.01	0.03	0.11	1.14	0.01
K <sub>2</sub> O	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01
Total	99.71	99.57	99.29	99.27	99.45	99.31	99.41	99.41	99.27	99.32	99.72	99.66	99.9	99.53	99.39	99.37
[O]	4	6	6	4	4	6	6	4	4	6	6	4	4	6	6	4
Si	1.009	1.925	1.896	0.004	1.011	1.938	1.907	0.002	1.010	1.905	1.874	0.003	1.000	1.897	1.898	0.003
Ti	0.002	0.150	0.259	0.004	0.002	0.149	0.249	0.003	0.003	0.188	0.282	0.004	0.002	0.191	0.264	0.004
Al	0.000	0.003	0.013	1.699	0.000	0.003	0.013	1.665	0.000	0.003	0.013	1.762	0.001	0.003	0.014	1.835
Cr	0.002	0.007	0.024	0.236	0.000	0.010	0.028	0.282	0.000	0.010	0.017	0.189	0.000	0.007	0.011	0.101
Fe	0.198	0.175	0.092	0.259	0.199	0.179	0.082	0.258	0.213	0.195	0.093	0.235	0.225	0.205	0.098	0.259
Mn	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004	0.002	0.002
Mg	1.772	1.705	0.818	0.820	1.769	1.679	0.803	0.810	1.754	1.662	0.855	0.822	1.763	1.675	0.820	0.820
Ca	0.003	0.022	0.804	0.000	0.002	0.018	0.804	0.000	0.004	0.023	0.787	0.000	0.003	0.017	0.806	0.000
Na	0.001	0.005	0.085	0.001	0.001	0.005	0.104	0.001	0.001	0.006	0.078	0.001	0.001	0.007	0.080	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Total	2.990	3.996	3.992	3.025	2.988	3.983	3.993	3.025	2.989		4.002	3.036	2.999	4.006	3.992	3.027
Mg <sup>#</sup>	90.0	90.8	90.0	76.2	90.0	90.4	90.8	76.0	89.3	89.6	90.2	77.9	88.8	89.2	89.5	76.2
Cr <sup>#</sup>			8	12			10	14			6	10			4	5
F(%)				3.0				4.7								

编号	J294			J297				J193				J082			
	尖晶石二辉橄榄岩			尖晶石二辉橄榄岩				尖晶石二辉橄榄岩				尖晶石二辉橄榄岩			
类型	Ol	Opx	Cpx	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
矿物	Ol	Opx	Cpx	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp	Ol	Opx	Cpx	Sp
点数	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SiO <sub>2</sub>	40.69	55.11	51.75	40.56	54.89	50.66	0.13	40.83	55.24	52.32	0.16	40.68	55.16	52.14	0.11
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.13	0.42	0.03	0.26	1.07	0.42	0.02	0.11	0.47	0.19	0.03	0.12	0.49	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	4.34	5.28	0.08	4.19	6.62	56.81	0.07	3.92	6.15	56.63	0.08	4.1	5.82	56.18
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.38	1.11	0	0.2	0.57	8.32	0	0.28	0.64	9.61	0.86	0.35	0.8	10.22
FeO	10.13	6.5	2.8	11.45	7.32	3.52	13.1	10.1	6.42	3.15	11.43	9.67	6.18	2.86	11.58
MnO	0.12	0.13	0.05	0.14	0.14	0.07	0.1	0.13	0.14	0.08	0.08	0.12	0.13	0.05	0.09
MgO	48.48	31.81	14.78	46.92	31.68	15.28	20.55	48.08	32.56	15.34	21.18	47.7	32.67	15.08	21.02
CaO	0.02	1.32	21.56	0.13	0.62	20.7	0.01	0.15	0.6	20.24	0.01	0.11	0.52	21.02	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.11	1.22	0.01	0.09	1.04	0.01	0.01	0.08	1.08	0	0.02	0.09	1.13	0.01
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.03	0	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0
Total	99.54	99.83	99	99.32	99.39	99.54	99.46	99.39	99.36	99.45	99.29	99.29	99.32	99.4	99.45
[O]	4	6	6	4	6	6	4	4	6	6	4	4	6	6	4
Si	1.002	1.911	1.899	1.006	1.914	1.850	0.003	1.007	1.920	1.900	0.004	1.004	1.915	1.898	0.003
Ti	0.001	0.177	0.228	0.002	0.172	0.285	0.008	0.002	0.160	0.263	0.004	0.002	0.168	0.250	0.005
Al	0.001	0.003	0.012	0.001	0.007	0.029	1.752	0.000	0.003	0.013	1.741	0.000	0.003	0.014	1.730
Cr	0.000	0.011	0.046	0.000	0.005	0.016	0.172	0.000	0.008	0.018	0.198	0.017	0.010	0.041	0.211
Fe	0.209	0.189	0.086	0.238	0.214	0.108	0.287	0.003	0.186	0.096	0.249	0.200	0.179	0.087	0.253
Mn	0.003	0.004	0.002	0.003	0.004	0.002	0.002	1.767	0.004	0.002	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002
Mg	1.780	1.644	0.811	1.737	1.647	0.832	0.801	0.004	1.687	0.830	0.824	1.755	1.691	0.816	0.818
Ca	0.001	0.049	0.848	0.003	0.023	0.810	0.000	0.208	0.023	0.787	0.000	0.003	0.019	0.820	0.000
Na	0.000	0.007	0.087	0.000	0.006	0.073	0.000	0.000	0.005	0.077	0.000	0.001	0.006	0.080	0.001
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Total	2.997	3.995	4.003	2.991	3.993	4.007	3.027	2.992	3.996	3.985	3.023	2.986	3.996	3.992	3.018
Mg <sup>#</sup>	89.60	89.80	90.48	88.06	88.63	88.65	73.85	89.55	90.13	89.77	76.93	89.88	90.50	90.47	76.57
Cr <sup>#</sup>			0.12			0.05	0.09			0.07	0.1			0.08	0.11
F(%)											1.2				1.8

表 2 辉南橄榄岩中单斜辉石微量元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )Table 2 Trace element concentrations of clinopyroxenes ( $\times 10^{-6}$ ) from the Huinan peridotite xenoliths

编号	J083	J079	J230	J298	J197	J206	J328	J301	J001	J247	J198	J300	J294	J297	J193	J082
Li	1.07	0.98	1.60	1.25	1.52	1.02	0.75	1.03	0.95	0.86	1.30	1.15	1.30	1.23	0.93	0.89
Sc	79.22	82.30	48.65	90.72	74.35	78.29	74.50	65.55	69.41	72.41	66.39	56.11	69.65	67.16	77.23	74.58
Ti	1877	4639	2163	1763	3112	3009	2864	3239	2891	2923	2795	2620	2544	6391	2934	2732
V	266	370	141	255	266	285	276	269	273	266	270	254	277	318	277	277
Cr	6796	4068	5383	9873	4236	5869	5360	2698	6264	7421	4740	2722	5490	4200	5123	5408
Co	18.12	22.96	21.43	23.25	20.88	17.53	18.84	22.87	18.78	17.68	22.52	25.44	18.52	24.21	19.24	20.68
Ni	303	366	330	412	359	303	332	383	342	302	374	397	302	404	363	352
Cu	1.37	3.49	2.13	2.19	2.03	b. d.	1.69	1.76	1.62	3.00	b. d.	1.85	0.82	1.68	1.86	1.72
Zn	6.28	9.49	11.94	10.77	8.87	5.99	6.30	10.32	7.05	6.82	12.31	9.86	5.55	11.86	6.57	6.16
Sr	20	41	90	111	23	38	40	29	34	63	23	48	24	65	34	34
Y	14.18	15.54	25.13	13.71	19.73	12.48	18.39	19.63	19.69	19.32	18.05	18.27	16.66	22.64	19.82	17.29
Zr	12.63	30.44	80.39	58.37	19.95	23.75	22.04	14.24	17.58	28.60	13.50	11.80	8.03	33.00	20.35	17.23
Nb	0.05	0.04	0.55	1.38	0.12	0.05	0.03	0.40	0.09	0.11	0.07	0.60	0.11	0.49	0.11	0.11
La	0.35	0.60	3.80	13.65	0.35	1.20	0.37	1.86	0.35	0.98	0.22	2.96	0.57	2.65	0.33	0.58
Ce	1.26	2.88	13.18	20.99	1.26	4.08	1.95	2.11	1.67	3.69	1.14	5.96	1.96	8.91	1.69	2.03
Pr	0.27	0.67	2.53	1.88	0.30	0.78	0.45	0.49	0.38	0.73	0.29	0.68	0.36	1.56	0.42	0.40
Nd	1.80	4.78	15.25	6.34	2.63	4.75	3.08	2.96	2.85	4.11	2.19	3.24	2.00	8.65	2.70	2.83
Sm	0.86	1.99	4.82	1.79	1.32	1.72	1.32	1.63	1.54	1.48	1.33	1.37	1.06	2.57	1.35	1.11
Eu	0.38	0.78	1.80	0.68	0.63	0.69	0.62	0.69	0.65	0.69	0.58	0.67	0.52	1.23	0.67	0.54
Gd	1.41	2.68	5.27	2.33	2.31	2.24	2.25	2.54	2.44	2.30	2.14	2.28	1.92	3.77	2.22	2.15
Tb	0.31	0.49	0.84	0.39	0.48	0.41	0.44	0.51	0.50	0.48	0.45	0.46	0.38	0.67	0.50	0.41
Dy	2.29	3.12	4.96	2.61	3.36	2.49	3.29	3.55	3.35	3.27	3.08	3.20	2.77	4.46	3.51	3.22
Ho	0.53	0.62	0.96	0.52	0.74	0.50	0.69	0.73	0.72	0.72	0.66	0.67	0.59	0.86	0.73	0.62
Er	1.64	1.54	2.63	1.48	2.19	1.35	2.07	2.23	2.30	2.20	1.94	2.05	1.83	2.43	2.21	1.96
Tm	0.25	0.21	0.33	0.19	0.33	0.17	0.28	0.30	0.28	0.29	0.27	0.28	0.25	0.31	0.29	0.26
Yb	1.58	1.38	2.10	1.17	2.02	1.11	2.03	1.85	1.93	1.95	1.94	1.78	1.68	1.94	2.10	1.58
Lu	0.24	0.18	0.30	0.17	0.30	0.17	0.30	0.30	0.29	0.28	0.31	0.28	0.24	0.29	0.32	0.25
Hf	0.47	1.39	3.83	1.23	0.88	1.37	0.81	0.89	0.70	0.89	0.55	0.55	0.42	1.05	0.80	0.71
Ta	b. d.	0.01	0.16	0.09	0.01	0.02	b. d.	0.03	b. d.	0.01	0.00	0.11	0.01	0.07	0.01	0.02
Th	0.02	0.03	0.27	3.09	0.31	0.05	0.00	0.07	0.02	0.02	0.00	0.10	0.01	0.08	0.02	0.03
U	0.00	0.01	0.05	0.53	0.06	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01
Pb	0.06	0.44	0.15	0.53	0.13	0.24	0.06	0.10	0.10	0.95	0.09	0.21	0.14	0.14	0.16	0.02

注: b. d. 为低于检测限。

应的  $Mg^\#$  和  $Cr^\#$  含量越低,表明橄榄岩受熔融抽取程度也越低。因此,可用单斜辉石的  $Al_2O_3$ 、 $Mg^\#$ 、 $Cr^\#$  之间的协变关系来大致反映橄榄岩受熔融抽取的程度(郑建平等,2001)。辉南橄榄岩中单斜辉石的  $Al_2O_3$  和  $Mg^\#$  呈明显的负相关,且既有落入山旺新生饱满地幔区的,也有投在鹤壁古老难熔地幔区内的(图 3a)。其中,方辉橄榄岩 J230 中橄榄石具有最低的  $Mg^\#$ ,单斜辉石也有较低的  $Mg^\#$ 、 $Al_2O_3$ ,较高的  $Cr^\#$ ,该辉石还具有低  $Na_2O$ ,相对高  $CaO$ 、 $FeO$ 、 $MnO$  的特点,可能是反应成因的(Xu et al., 2003;徐义刚等,2003)。透辉石的  $Cr^\#$  和  $Mg^\#$  呈明显的正相关,和图 3a 显示了相似的地幔特征(图 3b),代表着古老难熔地幔和新生饱满地幔共存。

透辉石的 La 变化范围较大,为  $0.22 \times 10^{-6} \sim$

$13.65 \times 10^{-6}$ 。根据球粒陨石标准化 REE 配分模式(图 4a,4b)可将辉南橄榄岩中单斜辉石进一步可分为 4 种类型:(1) LREE 富集型,(La/Yb)<sub>N</sub> 为 7.93(如 J298)(图 4a),可能是部分熔融后受地幔交代的产物(Nixon et al., 1987);(2) 倒 U 字型 REE, LREE/HREE 为 1.23(如 J230)(图 4a),可能与富 LREE 的玄武质熔体反应形成(Xu et al., 2003);(3) REE 近平坦型, LREE/HREE 为 1.13(如 J297)(图 4a),具有原始地幔的特征;(4) LREE 亏损型(图 4b), LREE/HREE 为 0.11~0.34,其中 J301 和 J300 中 La 显示了弱的富集,但样品总体仍为亏损型,反映了不同程度熔融抽取玄武质熔体后残留的特点。

单斜辉石微量元素原始地幔标准化曲线见图 4c,4d。大部分单斜辉石都有明显或较明显的 Nb、

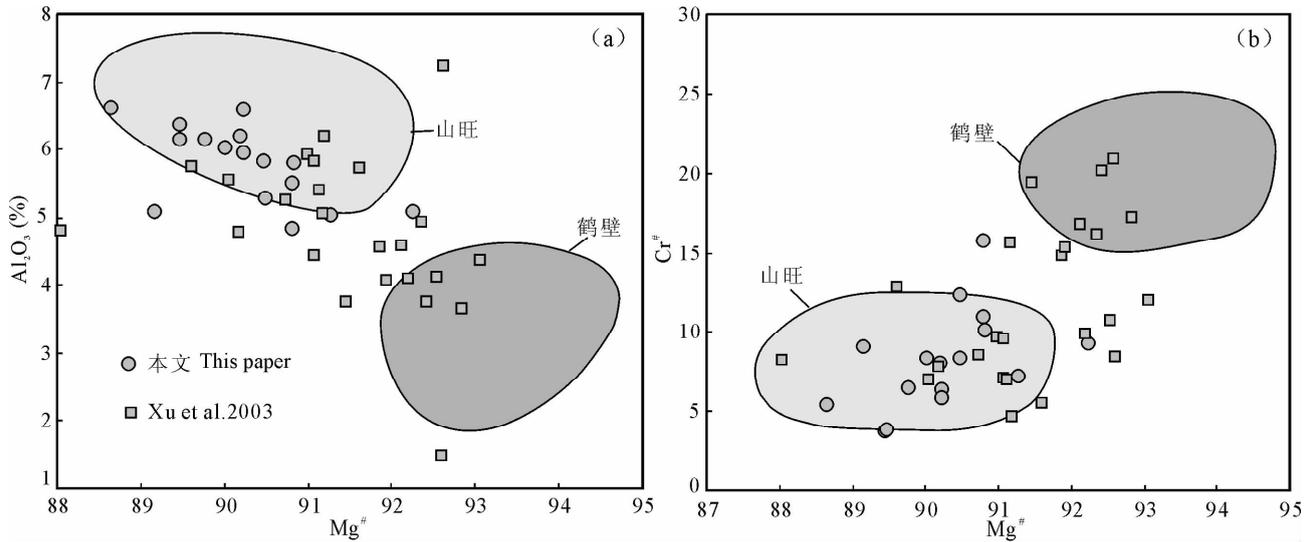


图 3 辉南单斜辉石中  $Mg^\#$  vs  $Al_2O_3$  (a)、 $Mg^\#$  vs  $Cr^\#$  (b) 图解

Fig. 3  $Mg^\#$  vs  $Al_2O_3$  (a),  $Mg^\#$  vs  $Cr^\#$  (b) in clinopyroxenes from Huinan peridotites

其他数据来源: 辉南其他数据, Xu 等(2003); 山旺, Zheng 等(1998); 鹤壁, Zheng 等(2001)

Other data sources: parts of data from Huinan, Xu et al. (2003); Shanwang, Zheng et al. (1998); Hebi, Zheng et al. (2001)

Ti、Zr 的负异常, 个别样品显示了 Zr 的弱正异常 (如 J298)。随 LREE 富集程度的增加, Zr、Nb、Th、U 的丰度总体上是增加的, 且 LREE 亏损的样品 Nb 负异常也较明显。此外, 单斜辉石中 LREE 富集型样品显示明显的 Pb 负异常而 LREE 亏损型样品都有较明显的 Pb 正异常。La、Ce 等多显示富集特点。且在大多数样品中 Sr 相对于相邻 REE 元素负异常较明显。

$Cr^\#$  与不相容元素 Ti (图 5a)、Y (图 5b) 呈弱负相关, 与 Ce (图 5c) 呈弱正相关, 而与 La/Yb (图 5d) 没有明显的相关性; La 与大多不相容元素的相关性也较明显, 与 Ti 呈弱负相关 (图 5e), 与 Zr 相关性不明显 (图 5f), 与 Nb (图 5g) 和 Sr (图 5h) 呈明显的正相关, 表明该区陆下岩石圈地幔至少经历了两幕事件, 即原始部分熔融作用和后期交代改造作用。

### 3.1.3 尖晶石

尖晶石中 MgO 含量为 18.5%~21.4%;  $Mg^\#$  的变化范围窄, 为 69.7~77.9;  $Cr_2O_3$  的含量为 4.97%~24.96%;  $Cr^\#$  为 5.0~28.7。尖晶石的  $Cr^\#$  常用于地幔部分熔融程度的判断 (Hellbrand et al., 2001)。单斜辉石  $Mg^\#$  和尖晶石  $Cr^\#$  呈较明显的正相关, 除少部分样品落入鹤壁区域, 大多样品均落入山旺区内 (图 6a)。尖晶石的  $Mg^\#$  和  $Cr^\#$  相关图中也显示了类似的特征 (图 6b), 由此说明辉南陆下岩石圈地幔存在古老难熔和新生饱满地幔。

### 3.2 平衡温度

为避免使用单个地质温度计造成的系统误差,

表 3 辉南橄榄岩捕虏体平衡温度估计 (°C)

Table 3 Estimated equilibration temperatures (°C) for Huinan peridotite xenoliths

样品编号	T(SS, a)	T(SS, b)	T(SS, c)	T(BK)	T(Wells)
J083	905	916	825	919	900
J079	919	918	946	1019	996
J230	944	949	958	983	963
J298	943	948	1001	1075	1017
J197	909	904	1009	1000	964
J206	898	904	832	912	917
J328	938	935	1007	974	933
J301	958	963	930	1028	988
J001	928	931	946	1012	963
J247	933	929	1036	958	927
J198	1008	1010	1018	1059	1023
J300	1009	1017	963	1003	968
J294	—	—	—	870	886
J297	981	985	1004	1013	985
J193	945	948	958	1059	1003
J082	971	973	980	975	947

注: T(SS,a)、T(SS,b)、T(SS,c) 分别为二辉石温度计、尖晶石-斜方辉石温度计 (Fe 为全铁)、尖晶石-斜方辉石温度计 (Fe 为  $Fe^{3+}$ ), Sachtleben and Seck (1981); T(Wells), 二辉石温度计, Wells (1977); T(BK), 斜方辉石 Ca 温度计, Brey and Kohler (1990)。

13476856432 我们对辉南橄榄岩样品分别采用二辉石温度计 (Wells, 1977), 斜方辉石 Ca 温度计 (Brey and Kohler, 1990), 以及尖晶石-斜方辉石温度计 (Sachtleben and Seck, 1981) 估算其陆下岩石圈地幔的平衡温度。假定压力为 1.5GPa, 三种地质温度

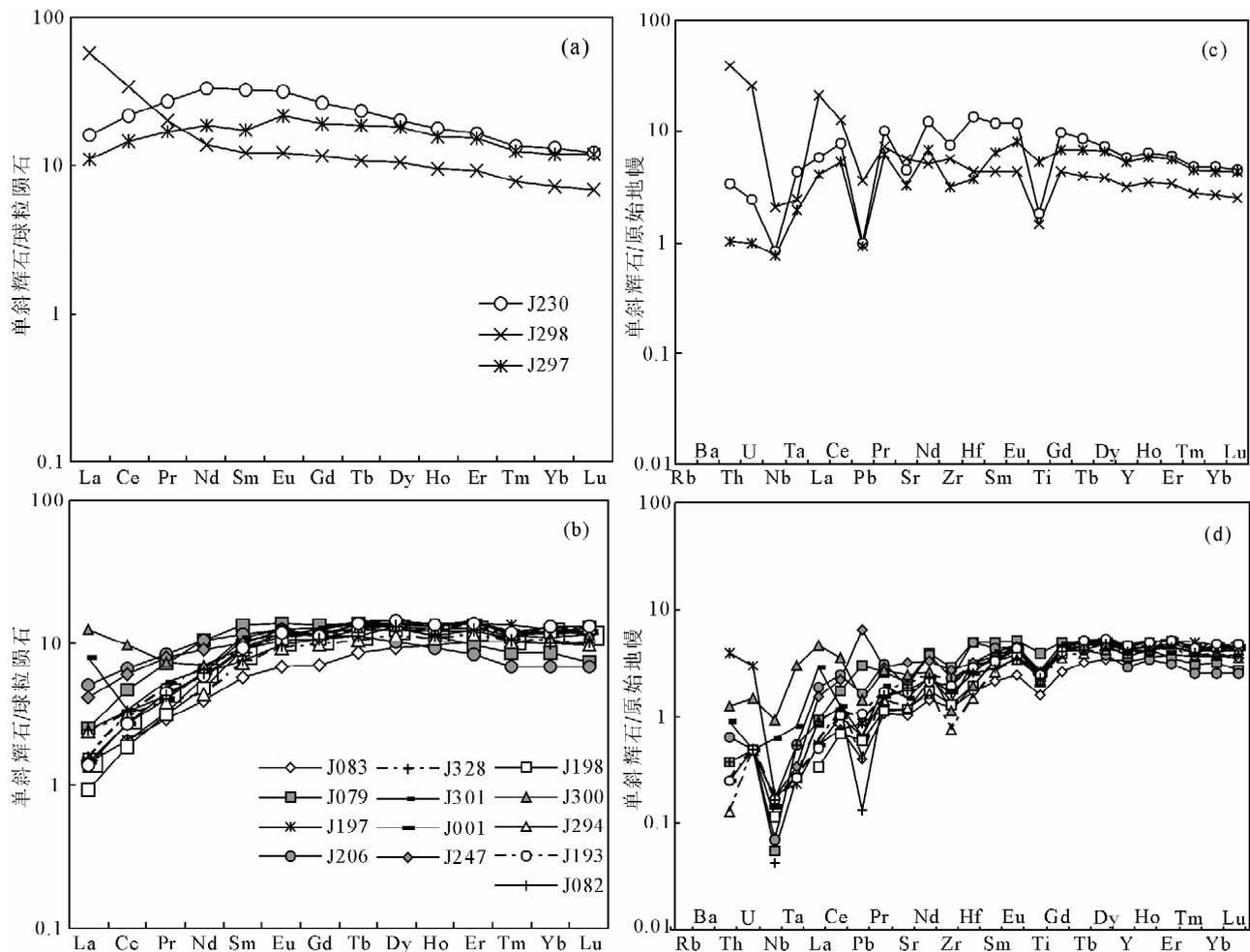


图4 辉南单斜辉石稀土元素和微量元素的配分模式,标准化数值根据 McDonough and Sun(1995);c,d 图例分别同 a、b  
Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a and b) and primitive mantle-normalized spidergrams (c and d) of clinopyroxenes from Huinan peridotites; chondrite and primitive mantle data from McDonough and Sun (1995)

计给出了相似的温度值(表3)。其中二辉石温度计(Wells, 1977)估计的辉南陆下岩石圈地幔的平衡温度为  $886^{\circ}\text{C}\sim 1023^{\circ}\text{C}$ 。橄榄石  $\text{Mg}^{\#}$  和平衡温度没有明显的相关性,且有些低  $\text{Mg}^{\#}$  的橄榄石样品具有更高或更低的平衡温度(图7),显示不同性质的岩石圈地幔平衡温度是相互重叠的。

## 4 讨论

### 4.1 部分熔融作用

近年来,深部地质研究表明大陆岩石圈地幔多经历了复杂的部分熔融作用和地幔交代作用。其中橄榄岩各矿物含量以及矿物(特别是透辉石)中的主、微量元素的特征,可用于反映陆下岩石圈地幔饱满和难熔的性质(Johnson et al., 1990; Norman, 1998)。有关地幔经历的部分熔融程度计算主要有:(1)依据全岩和矿物主量元素的标志性参数  $\text{Mg}^{\#}$ 、

$\text{Cr}^{\#}$  值进行估计。利用尖晶石的  $\text{Cr}^{\#}$  (Hellbrand et al., 2001)估算本文辉南陆下岩石圈地幔主体经历了  $1.2\%\sim 11.5\%$  部分熔融程度(表1)。(2)通过微量元素之间的关系模型进行估计。Johnson 等(1990)和 Norman(1998)建立了原始地幔在分离熔融和批式熔融作用条件下单斜辉石不相容微量元素间的协变关系模型。如果按照批式熔融模型进行计算,需要高达  $25\%$  甚至更多的部分熔融才能满足辉南单斜辉石微量元素的丰度要求,这与实际情况不符。因此,本文采用了分离部分熔融模型估算其部分熔融程度。随着地幔部分熔融程度的升高,不相容元素(如 LILE, LREE, 特别是 HFSE)的丰度急剧下降,反映它们具有强烈的活动性。而 Y 和 HREE 的丰度尽管降低但较平稳,说明它们在部分熔融和地幔交代过程中是相对不活动的组分,能够较好的反映部分熔融程度(图4)。在  $\text{Yb}_N\text{-Y}_N$  相关

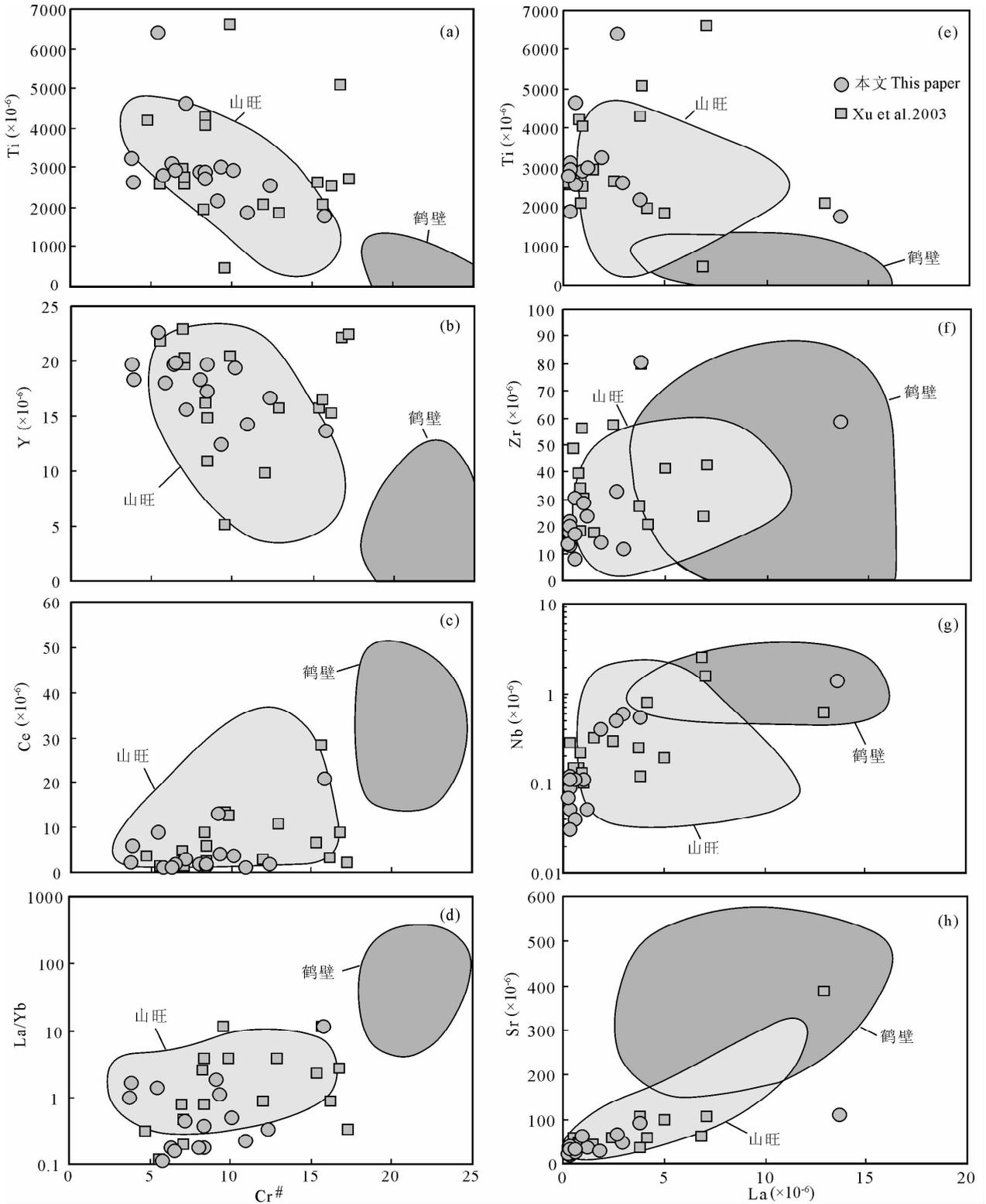


图 5 辉南单斜辉石  $Cr^\#$  与 Ti, Yb, Ce, La/Yb 以及 La 与 Ti, Zr, Nb, Sr 的图解; a-d, f-g 图例同 e

Fig. 5  $Cr^\#$  vs Ti, Yb, Ce and La/Yb, and La vs Ti, Zr, Nb and Sr in clinopyroxenes from Huinan peridotites

其他数据来源: 辉南其他数据, Xu et al. (2003); 山旺, Zheng et al. (1998); 鹤壁, Zheng 等 (2001)

Other data sources: parts of data from Huinan, Xu et al. (2003); Shanwang, Zheng et al. (1998); Hebi, Zheng et al. (2001)

图中(图 8a), 绝大多数样品部分熔融程度低于 10%。在  $Yb_N - Zr_N$  的相关图(图 8b)得到低于 5%

的部分熔融程度, 但只有部分样品落入熔融曲线上, 另一些样品偏离熔融曲线, 表明这些元素受到后期

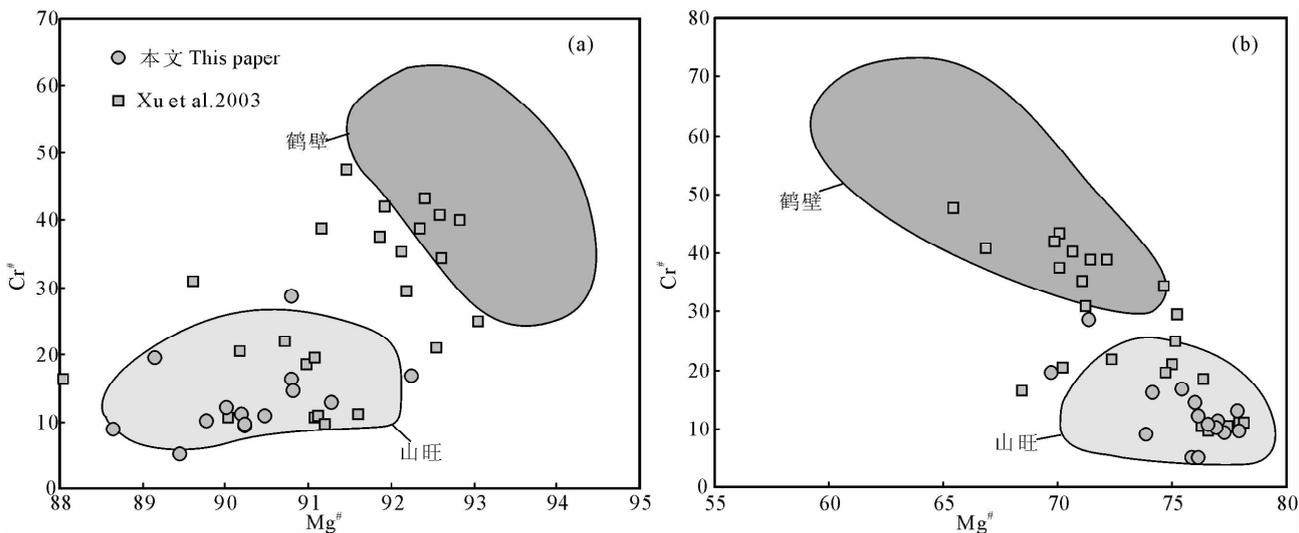


图 6 辉南单斜辉石和尖晶石  $Mg^{\#}$  (a)与尖晶石的  $Cr^{\#}$  (b)图解

Fig. 6  $Mg^{\#}$  in clinopyroxenes vs  $Cr^{\#}$  in spinels (a), and  $Mg^{\#}$  vs  $Cr^{\#}$  in spinels (b) in spinel from Huinan peridotites

其他数据来源: 辉南其他数据, Xu 等(2003); 山旺, Zheng 等(1998); 鹤壁, Zheng 等(2001)

Other data sources: parts of data from Huinan, Xu et al. (2003); Shanwang, Zheng et al. (1998); Hebi, Zheng et al. (2001)

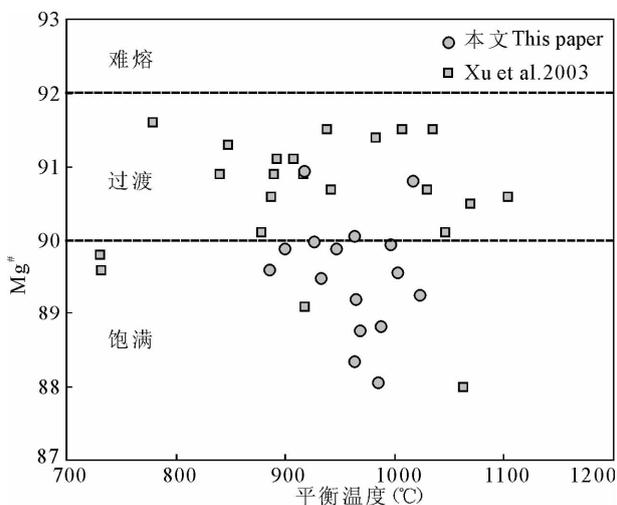


图 7 辉南橄榄岩平衡温度和橄榄石  $Mg^{\#}$  相关图

辉南其他数据来源, Xu 等(2003)

Fig. 7 Equilibration temperatures vs olivine- $Mg^{\#}$  in Huinan peridotites. Other data sources from Huinan, Xu et al. (2003)

熔/流体交代作用的影响。因各个样品的偏离程度和偏离方向不一致,说明此处岩石圈地幔经历了不同性质的地幔交代作用改造(图 8b)。而且 MREE (如 Gd)、Nb 及 Sr 等与  $Yb_N$  的相关图也得到低于 10% 的部分熔融程度,与尖晶石  $Cr^{\#}$  计算的熔融程度结果相似,说明辉南陆下岩石圈地幔主体经历了低于 10% 的部分熔融和复杂的地幔交代作用。

#### 4.2 地幔交代作用

陆下岩石圈地幔在受部分熔融抽取作用后往往

会受到深部熔/流体的交代改造作用。其中橄榄岩中单斜辉石的微量元素可以代表全岩的微量元素特征,是地幔交代作用发生与否,甚至是交代介质性质判别的有效指标(Meen, 1987)。微量元素和  $Yb_N$  的相关图中,部分样品的  $Zr_N$  明显偏离熔融曲线,反映辉南陆下岩石圈地幔受到过深部熔/流体的交代改造作用(图 8b)。通常地幔交代介质包括碳酸岩熔体(Yaxley et al., 1998),与俯冲作用有关的  $H_2O - CO_2$  流体(Stalder et al., 1998)和富含挥发份的硅酸盐熔体(Zangana et al., 1999)等。与亏损 LREE 的 Cpx 样品相比,富集 LREE 的 Cpx 样品中 Nb 含量较高,暗示在地幔交代中有 Nb 的加入(图 4c)。由于富水流体不传输 Nb(Eggler, 1987),因此交代介质不可能是富水流体。LREE 富集的样品 J298 中 LREE 和 HREE 分异明显,且富集 LILE(图 4c),微量元素与那些受碳酸岩熔体交代的特征相似(Bluzstajn and Shimizu, 1994)。然而纯粹的碳酸岩质交代不能实现 Zr 的富集,因为碳酸岩一般亏损 Zr,所以必须要有另一种富 Zr 的熔体与碳酸岩熔体共同作用。橄榄石 CaO 含量较高,反映有 Ca 的富集,而一般认为尖晶石橄榄岩中 Ca 的富集反映形成于  $SiO_2$  不饱和熔体,但难以区分是碳酸岩还是硅酸盐质(Zinngrebe and Foley, 1995)。其中透辉石中  $(La/Yb)_N$  和  $Ti/Eu$  关系图常用来区分碳酸岩和硅酸盐熔体(Coltorti et al., 1999)。高的  $(La/Yb)_N$ , 低的  $Ti/Eu$ , 多体现碳酸岩熔体的交代作用,一般与稳定大陆的岩浆作用有关(Menzies, 1990;

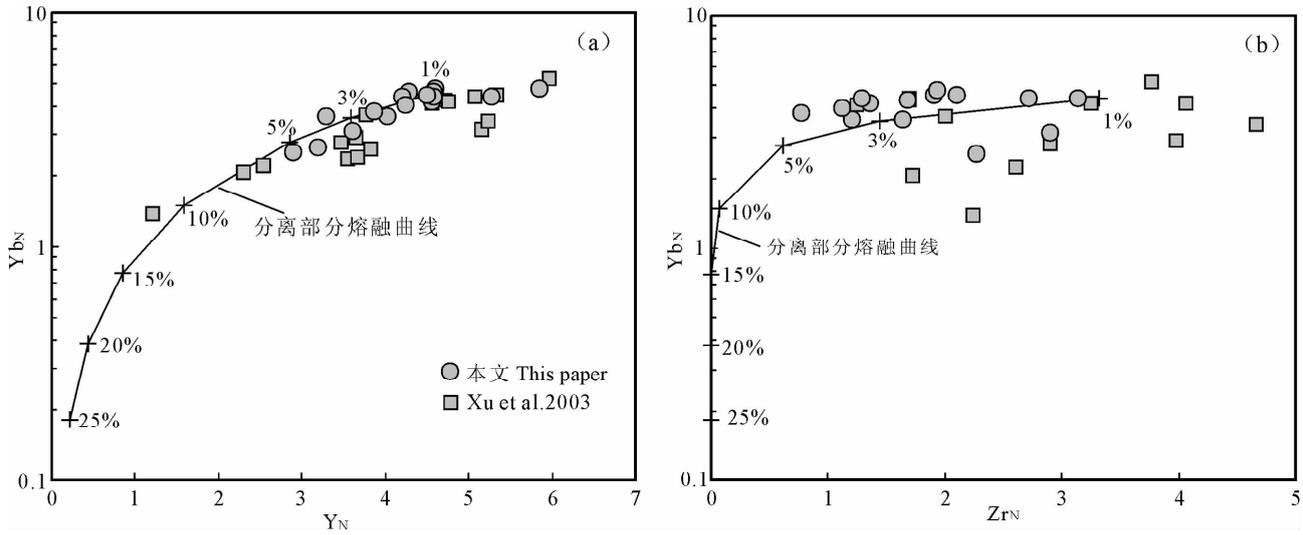


图 8 辉南单斜辉石原始地幔标准化的分离部分熔融模拟图(原始地幔标准化 McDonough and Sun, 1995)  
辉南其他数据来源, Xu 等(2003)

Fig. 8 Modeling of fractional partial melting using clinopyroxene compositions for Huinan peridotites (primitive mantle-normalized, McDonough and Sun, 1995). Fractional melting degrees from 1% to 25% were calculated by the method of Norman (1998). Other data sources from Huinan, Xu et al. (2003)

郑建平, 2009)。低的  $(La/Yb)_N$ , 高的  $Ti/Eu$ , 多与硅酸盐熔体交代有关。辉南样品中仅少数落入两者过渡区(如 J230), 其他样品均落入硅酸盐熔体交代区(图 9), 表明此处岩石圈地幔主体是受硅酸盐熔体交代, 个别样品显示碳酸岩熔体交代的残留。

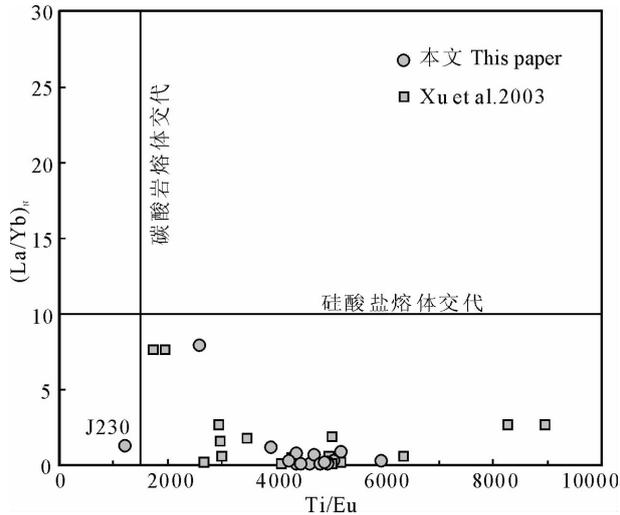


图 9 辉南单斜辉石微量元素  $Ti/Eu$  和  $(La/Yb)_N$  图解  
辉南其他数据来源, Xu 等(2003)

Fig. 9  $Ti/Eu$  vs  $(La/Yb)_N$  of clinopyroxenes in Huinan peridotites. Other data sources from Huinan, Xu et al. (2003)

### 4.3 岩石圈减薄和地幔置换作用

华北克拉通东部岩石圈地幔自显生宙以来地幔

性质发生了根本性的变化, 就其破坏机制来说, 还存在很多争论, 主要有岩石圈拆沉(邓晋福等, 1996; 吴福元等, 2003; Gao et al., 2004)和热-机械-化学侵蚀(徐义刚, 1999; 郑建平, 1999; Zhang et al., 2003, 2004; 周新华, 2006)两种不同解释。

如果拆沉作用是辉南陆下岩石圈减薄的机制, 那么如今辉南地区应为新生的岩石圈地幔, 原先存在的古老岩石圈地幔将伴随有下地壳一并进入软流圈地幔而全部消失。然而地球物理资料表明: 华北岩石圈地幔下部的速度结构由并置的陡倾高速层和低速层组成, 代表残余地幔与新生地幔并存(袁学诚, 2007)。而且橄榄石、单斜辉石和尖晶石的  $Mg^\#$  和  $Cr^\#$  的图解中也表明古老难熔地幔残余和新生饱满地幔并存(图 2, 3, 6)。辉南地区过渡型的橄榄岩与其主体饱满橄榄岩的平衡温度是重叠的(图 7), 说明具不同性质的岩石圈地幔在垂向上是交叉并置的, 不存在上新下老的分层分带现象, 显示辉南陆下岩石圈地幔存在持续的改造过程。因此, 拆沉作用不能很好地解释华北内部岩石圈减薄和克拉通破坏。

华北克拉通内部较长的岩浆作用时限、高度不均一性的减薄过程以及中生代缺乏大规模软流圈成因的玄武岩等都更倾向于支持逐渐的“热-机械-化学侵蚀减薄”的模型。如果是均匀的侵蚀作用造成华北内部岩石圈的减薄(Menzies et al., 1993), 则

现今的岩石圈地幔是由上部减薄后的残留和下部新生地幔组成,橄榄石的  $Mg^{\#}$  和平衡温度应该呈较明显的相关性,岩石圈地幔出现分层现象,但这和实际情况不符(图 7),说明岩石圈地幔不存在饱满和难熔地幔的分层。橄榄岩-熔体的相互作用被认为是岩石圈地幔转变的重要方式(Zhang et al., 2003, 2007; Zhang, 2005; 张宏福, 2006),特别是对大量过渡型地幔的存在,可能说明持续的熔-岩反应。反应的熔体主要有地壳来源和软流圈地幔来源,这些熔体与橄榄岩相互作用导致岩石圈组成转变和快速富集(张宏福, 2006; Zhang et al., 2007)。相对地壳来源的熔体,软流圈来源的熔体与岩石圈地幔橄榄岩相互作用可能更为普遍(张宏福, 2006)。若熔体来源于软流圈地幔,它的稀土元素型式表现为轻稀土富集性质,与古老的岩石圈地幔反应将会导致新形成的地幔橄榄岩也表现为轻稀土富集特点,而大多数样品表现为轻稀土亏损的特点(图 4d)。Zheng et al. (2007)和郑建平(2009)曾详细讨论了单纯的熔-岩作用在解释岩石圈中、新生代巨大减薄现象可能存在的局限性,并认为需要上涌软流圈物质冷却转变置换来实现。从辉南陆下岩石圈新生地幔和残留地幔共存、大量单斜辉石中 LREE 亏损等现象,进一步支持其岩石圈地幔经历了长期交代改造作用、侵蚀作用和上涌软流圈物质冷却转变置换等综合结果(Zheng et al., 2007)。

## 5 结论

辉南新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体矿物化学性质表明华北东北缘新生代岩石圈地幔主体是饱满型地幔特征,相当于原始地幔经历低于 10% 部分熔融程度抽取的产物,同时橄榄石较宽的  $Mg^{\#}$  以及单斜辉石和尖晶石宽的  $Mg^{\#}$ 、 $Cr^{\#}$ ,说明辉南陆下岩石圈地幔存在过渡和难熔型的橄榄岩样品。利用微量元素之间的协变关系表明该区陆下岩石圈地幔经历了不同程度的部分熔融作用和复杂的地幔交代作用,交代介质主体是硅酸盐熔体,但个别样品有碳酸岩熔体交代的残留。橄榄石  $Mg^{\#}$  和平衡温度无相关性表明不同性质地幔在垂向上是交叉并置的,显示出岩石圈减薄过程中不均匀侵蚀置换作用的结果。

**致谢:**研究工作得到国家自然科学基金项目(90714002、40673002)的资助。感谢陈曦、汤华云、张志海、熊庆、马强等在电子探针测试、激光原位微量元素分析以及成图等方面的协助,同时感谢审稿

专家的意见,特此感谢!

## 参 考 文 献

- 邓晋福,赵海玲,莫宣学,吴宗絮,罗照华. 1996. 中国大陆根-柱构造: 大陆动力学的钥匙. 北京:地质出版社.
- 马杏垣. 1991. 江苏响水至内蒙古满都拉地质断面. 地质学报, 56(3):427~447.
- 路凤香,郑建平. 1996. 华北古生代岩石圈地幔特征. 见:池际尚和路凤香(主编). 华北金伯利岩与古生代岩石圈地幔特征. 北京:科学出版社, 215~274.
- 罗照华. 1984. 吉林辉南大椅山玄武岩中超镁铁岩包体的研究. 地球科学——武汉地质学报, 1:73~80.
- 吴福元,孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用和岩石圈减薄. 长春科技大学学报, 29:313~318.
- 吴福元,葛文春,孙德有,郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究的几个问题. 地学前缘, 10(3):51~60.
- 吴福元,徐义刚,高山,郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24(6):1145~1174.
- 徐义刚. 1999. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄. 矿物岩石地球化学通报, 18:1~5.
- 徐义刚,黄小龙,Thirlwall M F,陈小明. 2003. 吉林辉南“反应”成因方辉橄榄岩包体及其深部动力学意义. 岩石学报, 19(1):19~26.
- 袁学诚. 1996. 中国地球物理图集. 北京:地质出版社, 59~62.
- 袁学诚. 2007. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因. 中国地质, 34(5):737~758.
- 张宏福. 2006. 橄榄岩-熔体的相互作用:岩石圈地幔组成转变的重要方式. 地学前缘, 13(2):65~75.
- 张志海,郑建平,马鸿文. 2006. 吉林汪清-辉南地幔透辉石微量元素及其记录的地幔熔融和交代作用. 地质科技情报, 25(6):9~16.
- 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, 1~112.
- 郑建平,路凤香, O'Reilly S Y, Griffin W L, 张明. 2000. 华北东部地幔改造作用和置换作用:单斜辉石激光探针研究. 中国科学, 30(4):373~382.
- 郑建平,路凤香, O'Reilly S Y, 罗照华. 2001. 新疆托云地幔单斜辉石微量元素与西南天山岩石圈深部过程. 科学通报, 46(6):497~501.
- 郑建平,余淳梅,路凤香,张志海,汤华云. 2007. 华北东部大陆岩石圈地幔组成、年龄与岩石圈减薄. 地学前缘, 14(2):87~97.
- 郑建平. 2009. 不同时空背景幔源物质对比与华北深部岩石圈破坏和增生过程. 科学通报, 54(1):1~18.
- 周新华. 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘, 13:50~64.
- Blusztajn J, Shimizu N. 1994. The trace-element variations in clinopyroxenes from spinel peridotite xenoliths from southwest Poland. Chemical Geology, 111: 227~243.
- Brey G P, Kohler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. Journal of Petrology, 31: 1352~1378.

- Coltorti M, Bonadiman C, Hinton R W, Siena F, Upton B G. 1999. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: evidence from clinopyroxenes and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean. *Journal of Petrology*, 40(1): 133~165.
- Eggler D H. 1987. Solubility of major and trace elements in mantle metasomatic fluid: experimental constraints. In: Menzies M A and Hawkesworth C J (eds.), *Mantle Metasomatism*. London: Academic Press Geology Series, 21~41.
- Fan Q C, Sui J L, Liu R X, Wei H Q, Li N. 2000. Petrology and geochemistry of Jinlongdingzi active volcano—the most recent basaltic explosive volcano at Longgang. *Chinese Journal of Geochemistry*, 19(4): 312~317.
- Fan W M, Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonica et Metallogenia*, 16: 171~180.
- Gao S, Liu X M, Yuan H L, Hattendorf B, Gunther D, Chen L, Hu S H. 2002. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma—mass spectrometry. *Geostandards Newsletter*, 26(2): 181~196.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892~897.
- Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, Ryan C G. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M et al. (eds.), *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. American Geophysical Union, Washington, DC, 107~126.
- Hellebrand E, Snow J E, Dick H J B, Hofmann A W. 2001. Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites. *Nature*, 410: 677~681.
- Johnson K T M, Dick H J B, Shimizu N. 1990. Melting in the oceanic upper mantle: an ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *Journal of Geophysical Research*, 95: 2661~2678.
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. 1992. Remnants of  $\geq 3800$  Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20: 339~342.
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223~253.
- Meen J K. 1987. Mantle metasomatism and carbonates: an experimental study of a complex relationship. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 215: 91~100.
- Menzies M A. 1990. *Continental Mantle*. London: Oxford Science Publications, 1~184.
- Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of  $>120$  km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M et al. (eds.), *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Geological Society Special Publication, 76: 71~81.
- Nixon P H. 1987. Kimberlitic xenoliths and their cratonic setting. In: Nixon P H (eds.), *Mantle Xenoliths*. Wiley Chichester, 215~239.
- Norman M D. 1998. Melting and metasomatism in the continental lithosphere: laser ablation ICPMS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 130: 240~255.
- O'Reilly S Y, Griffin W L. 1996. 4-D lithosphere mapping: methodology and examples. *Tectonophysics*, 262: 3~18.
- Sachtleben T, Seck H A. 1981. Chemical control of Al-solubility in orthopyroxene and its implications on pyroxene geothermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78: 157~165.
- Stalder R, Foley S F, Brey G P, Horn I. 1998. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900~1200 C and 3.0~5.7Gpa; new experimental data for garnet, clinopyroxene, and rutile, and implications for mantle metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1781~1801.
- Wells P R A. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 62: 129~139.
- Wang J Y, Chen M X, Wang J A, Deng X. 1985. On the evolution of the geothermal regime of the North China basin. *Journal of Geodynamics*, 4: 133~148.
- Xu J W, Zhu G. 1994. Tectonic models of the Tanlu fault zone, eastern China. *International Geology Review*, 36: 771~784.
- Xu Y G, Martin A, Menzies M A, Huang X L, Liu Y, Chen X M. 2003. "Reactive" harzburgites from Huinan, NE China: Products of the lithosphere-asthenosphere interaction during lithospheric thinning? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 487~505.
- Yaxley G M, Green D H, Kamenetsky V. 1998. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere. *Journal of Petrology*, 39: 1917~1930.
- Zangana N A, Downes H, Thirlwall M F, Marriner G F, Bea F. 1999. Geochemical variation in peridotite xenoliths and their constituent clinopyroxenes from Ray Pic (French Massif Central): implications for the composition of the shallow lithospheric mantle. *Chemical Geology*, 153: 11~35.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. 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: 241~254.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M, Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4373~4387.
- Zhang H F, Ying J F, Xu P, Ma Y G. 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.
- Zhang H F. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean Craton. Earth and Planetary Science Letters, 237: 768~780.
- Zhang H F, Ying J F, Shimoda G, Kita N T, Morishita Y, Shao J A, Tang Y J. 2007. Importance of melt circulation and crust~mantle interaction in the lithospheric evolution beneath the North China Craton; evidence from Mesozoic basalt-borne clinopyroxene xenocrysts and pyroxenite xenoliths. Lithos, 96: 67~89.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. Precambrian Research, 107: 45~73.
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu F X, Zhang M. 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong Peninsula, Sino ~ Korean Craton. International Geology Review, 40: 471~499.
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu F X, Zhang M, Pearson N J. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block; significance for lithosphere evolution. Lithos, 57: 43~66.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Lu FX, Wang C Y, Zhang M, Wang F Z, Li H M. 2004. 3.6 Ga lower crust in central China; New evidence on the assembly of the North China Craton. Geology, 32(3): 229~232.
- Zheng J P, Sun M, Zhou M F, Robinson P. 2005. Trace elemental and PGE geochemical constraints of Mesozoic and Cenozoic peridotitic xenoliths on lithospheric evolution of the North China Craton. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69 (13): 3401~3418.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yang J S, Li T F, Zhang M, Zhang R Y, Liou J G. 2006. Mineral Chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere; constraints on mantle evolution beneath Eastern China. Journal of Petrology, 47: 2233~2276.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yu C M, Zhang H F, Pearson N, Zhang M. 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71: 5203~5225.
- Zingrebe E, Foley S F. 1995. Metasomatism in mantle xenoliths from Gees, West Eifel, Germany; evidence for the genesis of calc-alkaline glasses and metasomatic Ca-enrichment. Contributions to Mineralogy and Petrology, 122: 79~96.

## Mineralogical Chemistry of Peridotite Xenoliths from the Huinan Cenozoic Basalts: Implication for Evolution of the Lithospheric Mantle beneath the North China Craton

LU Jianguo, ZHENG Jianping

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

### Abstract

A suite of peridotite xenoliths from the Huinan Cenozoic basalts in Jilin Province was studied to provide constraints on the nature and evolution of subcontinental lithospheric mantle (SCLM) beneath this region using electron microprobe and LA-ICPMS.  $Mg^\#$  and  $Cr^\#$  of olivines, clinopyroxenes and spinels from the Huinan peridotite xenoliths show the SCLM beneath this region is mainly fertile mantle with minor transitional/refractory relics. Chondrite-normalized REE patterns of clinopyroxenes vary widely from LREE-depleted, through convex-upward to LREE-enriched, indicating the SCLM have undergone lower than 10% fractional partial melting from primitive mantle and later silicate melt metasomatism with only a little carbonatitic melt metasomatism overprinting. No correlation between  $Mg^\#$  in olivine and equilibration temperature suggests that there is no obvious stratification within the Huinan SCLM. These mantle characteristics, similar with that of dominate Cenozoic mantle beneath other parts of the eastern North China, reveal the coexistence of fertile and transitional lithospheric mantle beneath this region and represent comprehensive results that newly accreted materials replace the aged lithospheric mantle through melt-rock interaction /erosion and the cooling of the upwelled asthenosphere.

**Key words:** peridotite xenoliths; mineral chemistry; SCLM; mantle replacement; Huinan area in Jilin Province