

粗粒与剪切结构橄榄岩捕虏体及其单斜辉石微量元素对比^{*}

郑建平¹ 路凤香¹ Suzanne Y O' REILLY² 余淳梅¹

ZHENG JianPing¹, LU FengXiang¹, Suzanne Y O' REILLY² and YU ChunMei¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; 2. 澳大利亚曼魁里大学地球与行星科学系, 悉尼 NSW2109

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

2. Department of Earth and Planetary Sciences, Macquarie University, Sydney NSW2109, Australia

2000-10-30 收稿, 2001-01-08 改回.

Zheng JP, Lu FX, O' Reilly SY and Yu CM. 2001. Comparison of the trace element of clinopyroxenes and xenoliths with coarse-grained and shear peridotites. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2):263-268

Abstract The mineral chemistry, petrochemistry and the trace element of "dry" spinel-facies peridotitic xenoliths with different microstructure and their clinopyroxenes are compared and discussed in this paper. With the increasing metamorphism and deformation of peridotites in the transform from the coarse-grained to the shear microstructure, the complex processes on enrichment and depletion existed. The metasomatism agent was the SiO₂-undersaturation silicate-carbonatite melt with strong infiltration. The results also show that the REE relationship between "dry" spinel-facies peridotitic xenoliths with different microstructure and their clinopyroxenes are following: there are obvious differences between coarse-grained peridotite and its clinopyroxene, on the other hand, the REE pattern of clinopyroxene can totally represent its host peridotite; there is only a little difference between shear peridotite and its clinopyroxene. The other high incompatible elements most probably existed as the inter-grain constituents or in fluid inclusions.

Key words Trace element, Different microstructure, Peridotite, Clinopyroxene

摘要 对山东栖霞具不同结构的“干”尖晶石相橄榄岩进行了全岩化学、微量元素、矿物成分和单斜辉石微量元素分析和对比。表明在橄榄岩从粗粒结构向剪切结构的转化中,随着变质变形作用的增强存在着复杂的熔/流体的加入富集和熔体的提取亏损作用;交代介质属具强渗透性的SiO₂不饱和的硅酸盐碳酸岩熔体。同时发现不同结构橄榄岩中单斜辉石的REE与其全岩的REE程度有如下的关系:粗粒结构橄榄岩中矿物与岩石的差别最大,但REE的配分形式可以反映全岩的情况;剪切结构橄榄岩中两者的差别较小。其它高度不相容微量元素可能主要赋存在粒间组分或/和矿物流体包裹体中。

关键词 微量元素; 不同结构; 橄榄岩; 单斜辉石

中图法分类号 P588.125; P595

在地幔橄榄岩结构序列中,原生粒状结构(粗粒结构)通常代表最原始的结构状态。随岩石圈地幔内部流变和变质重结晶作用的增强分别出现残斑状结构、剪切结构和细粒结构(Mercier and Nicolas, 1975; 路凤香, 1987)。单斜辉石是无水“干”橄榄岩中的易熔组分在深部过程研究中有着重要的意义,特别是随着激光技术的发展,快捷的单斜辉石不相容微量元素(特别是REE)分析为深部过程研究(Rivalenti *et al.*, 1996; Norman, 1998)提供了强有力的手段(陈绍海等,

1997; Zheng *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 2000)。然而,有两个问题还不太清楚:(1)在实现从粗粒结构向细粒结构转变中组分的带入和带出情况;(2)不同结构橄榄岩中的单斜辉石不相容微量元素在多大程度上可以反映全岩的情况。选择山东栖霞新生代玄武岩中不同结构的“干”橄榄岩进行全岩和其中单斜辉石微量元素的对比研究,以期对上述问题有一较深入的认识。

* 本文为国家自然科学基金项目(40072021, 49733110)和中国科学院项目(KZCX1-07)资助成果。

第一作者简介: 郑建平, 男, 1964年5月生, 博士, 教授, 从事岩石学教学与研究, E-mail: jpzhang@cug.edu.cn

1 橄榄岩的结构和主元素对比

洒霞捕虏体都属无水的“干”尖晶石橄榄岩,其结构类型包括粗粒结构和与变质变形重结晶作用有关的残碎斑状结构和剪切结构(Zheng *et al.*, 1998; 郑建平, 1999)。QX14和QX17具粗粒结构(粒径在5mm~6mm间,个别达10mm),矿物颗粒具弯曲晶面,含71.8%~74.7%的橄榄石和19.9%~23.2%的斜方辉石,有0.1%~1.4%自形的尖晶石(表1)。QX1具残碎斑状结构,是指有10%以上的橄榄石以残碎斑晶形式存在于粒度细小且自形的重结晶橄榄石颗粒之中,即2mm~5mm的他形残碎斑晶与较小的新生变晶共存。QX7和QX8具剪切结构,是指橄榄石残碎斑晶含量低于10%,变形强烈、叶理发育,具大约2%冬青叶状尖晶石和大量小于1mm具“三连点”接触的橄榄石组成。用二辉石温度计计算的上述5个样品的平衡温度分别是995℃和984℃、977℃、940℃和938℃。表中的矿物含量是由橄榄岩全岩的XRF结果与矿物电子探针分析结果经混合计算求得。与粗粒结构橄榄岩相比,剪切结构橄榄岩中橄榄石含量较低,而斜方辉石、单斜辉石和尖晶石含量较高。

所有捕虏体的 $Mg^{\#}$ 值为0.88~0.89,与原始地幔(McDonough and Sun, 1995)相似。与粗粒结构橄榄岩相比,剪切结构橄榄岩的 Al_2O_3 、 CaO 、 SiO_2 、 Na_2O 、 P_2O_5 的含量较高,而 MgO 、 NiO 含量较低,表明后者比前者相对饱满。所有捕虏体中的橄榄石 $Mg^{\#}$ 值(0.91)很均一,但粗粒结构橄榄岩中橄榄石的 NiO 含量要稍高于剪切结构者(0.40%~0.43%对0.34%~0.38%)。与粗粒结构橄榄岩相比,剪切结构橄榄岩中斜方辉石的 $Mg^{\#}$ 值及 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 MgO 含量较低, Al_2O_3 、 FeO 、 CaO 含量较高;单斜辉石的 $Mg^{\#}$ 值及 SiO_2 、 CaO 含量较低, TiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 Cr_2O_3 含量较高;尖晶石的 $Cr^{\#}$ 值较高, $Mg^{\#}$ 值较低(表1)。

2 微量元素对比

表2列出了不同结构橄榄岩及其中单斜辉石的微量元素分析结果。其中全岩的微量元素是由ICP-MS分析获得,单斜辉石的分析结果是由激光ICP-MS获得。

与粗粒结构橄榄岩相比,剪切结构橄榄岩的Sc、Ti、V、Ga、HREE和Y丰度较高,Ni、Co、Sr、Ba、Zr、Hf、Nb、Ta、Th、LREE和MREE丰度较低。除剪切结构橄榄岩中单斜辉石的Zr、Hf和MREE丰度较高(不同于全岩的特征)外,其他微量元素的丰度差异与其岩石所表现的差异特征是一致的。

粗粒结构橄榄岩(QX14和QX17)在REE球粒陨石标准化曲线上表现为LREE明显富集的形式,并体现为早期抽取(HREE部分明显低于球粒陨石呈曲线左倾)和后期强烈的交代富集过程(图1);剪切结构橄榄岩(QX7和QX8)尽

管也体现早期抽取和后期富集过程,但与粗粒结构橄榄岩相比,其富集过程非常微弱且低于球粒陨石,HREE部分与球粒陨石接近;残碎斑状结构橄榄岩(QX1)MREE明显亏损,LREE部分和HREE部分分别与剪切结构橄榄岩和粗粒结构橄榄岩相似,表现为双重性。剪切结构橄榄岩(QX7和QX8)中单斜辉石表现为亏损LREE的曲线形式,粗粒结构和残碎斑状结构橄榄岩中单斜辉石表现为富集LREE的特征。

不同结构橄榄岩及其中单斜辉石的代表性微量元素原始地幔标准化蛛网曲线见图2。图中所示的“单斜辉石的微量元素在橄榄岩中的贡献”是由单斜辉石在岩石中的含量(见表1)及其微量元素结果(见表2)计算获得。从图中可看出:1)就橄榄岩全岩来看,所有的曲线都表现出明显的U、Nb、Pb和Sr正异常,Zr和Ti的正或负异常都不明显;与粗粒结构橄榄岩相比,残碎斑状结构和剪切结构橄榄岩的U、Nb、Pb和Sr正异常要明显得多。2)就单斜辉石看,粗粒结构和残碎斑状结构橄榄岩中的U正异常、Nb负异常都较明显;所有的单斜辉石都有Zr和Ti的负异常,只不过是残碎斑状结构橄榄岩中的最明显;此外,粗粒结构橄榄岩中的还有较明显的Pb正异常、Sr负异常。3)从单斜辉石的微量元素在橄榄岩中的贡献上看,粗粒结构橄榄岩中的单斜辉石在微量元素贡献方面是有限的,但其高度不相容元素部分的配分形式基本上可以反映全岩的特征(见图2A);残碎斑状结构橄榄岩的REE,剪切结构橄榄岩的MREE-HREE都可以用单斜辉石的成分来代表,而U、Pb、Nb、Zr、Ti、Sr将附存在其它载体中。

3 讨论

3.1 地幔变质变形过程中的交代介质

通常认为原生粒状结构(粗粒结构)是地幔橄榄岩在发生部分熔融作用提取岩浆后耐熔残余在高温条件下结晶的产物,残碎斑结构是原生粒状结构在剪切应力作用下经塑性流变形成,而剪切结构(特别是细粒结构)是高度剪切流变细粒化颗粒动态重结晶的结果(Mercier and Nicolas, 1975; 路凤香, 1987)。

随粗粒结构到剪切结构橄榄岩变质变形作用的增强:1)岩石中橄榄石含量较低,而斜方辉石、单斜辉石和尖晶石含量较高,反映地幔变质变形过程中伴随有橄榄石的消耗与新生的辉石和尖晶石出现。2)除橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值基本不变外,其它矿物的 $Mg^{\#}$ 值都降低;降低的还有橄榄石的 NiO 、斜方辉石的 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 MgO 和单斜辉石的 SiO_2 、 CaO ;升高的有斜方辉石的 Al_2O_3 、 FeO 、 CaO ,单斜辉石的 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 Cr_2O_3 ,尖晶石的 $Cr^{\#}$ 值,看来在变质变形过程中除了矿物的 Cr_2O_3 和 CaO 主体发生平衡再分配外,也有较高 CaO 、 Al_2O_3 、 FeO 、 TiO_2 、 Na_2O 的熔/流体加入。3)全岩的 Al_2O_3 、 CaO 、 SiO_2 、 Na_2O 、 P_2O_5 的含量升高,而 MgO 、 NiO 含

表 1 不同结构橄榄岩的岩石化学及矿物化学对比(%)

Table 1 Comparison of mineral chemistry and petrochemistry (%) of peridotites with different microstructure

岩石结构 样品号	粗粒结构				残 碎 斑 状 结 构				剪 切 变 形 结 构																	
	QX14				QX17				QX1				QX7				QX8									
	全岩	Ol	Opx	Cpx	Sp	全岩	Ol	Opx	Cpx	Sp	全岩	Ol	Opx	Cpx	Sp	全岩	Ol	Opx	Cpx	Sp	全岩	Ol	Opx	Cpx	Sp	
矿物含量	71.8	23.2	3.5	1.4	74.7	19.9	5.4	0.1	63.0	29.6	6.2	1.2	61.1	27.3	9.5	2.1	57.4	29.7	10.9	2.0						
SiO ₂	43.61	41.08	56.41	53.57	0.05	43.68	40.97	56.94	53.84	0.04	44.95	40.98	56.90	53.83	0.02	44.34	40.77	55.92	52.59	0.02	44.82	40.70	55.96	52.60	0.04	
TiO ₂	0.03	0.01	0.02	0.07	0.07	0.03	0.01	0.01	0.01	0.14	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.05	0.18	0.05	0.03	0.02	0.02	0.20	0.02	
Al ₂ O ₃	0.99	0.01	2.49	2.27	35.93	0.72	0.01	1.86	1.79	28.45	0.84	0.01	2.14	1.84	31.36	2.07	0.01	3.07	4.18	52.59	2.15	0.01	2.97	4.80	52.08	
Cr ₂ O ₃	0.44	0.02	0.50	0.62	30.89	0.45	0.00	0.43	0.61	39.37	0.42	0.08	0.48	0.58	36.07	0.47	0.02	0.36	0.78	15.39	0.47	0.00	0.31	0.91	16.28	
FeO	8.95	8.82	5.62	2.04	14.48	9.10	8.77	5.58	2.05	14.79	9.23	9.12	5.70	2.13	13.96	8.90	9.13	6.10	2.07	10.19	8.84	9.19	6.15	2.12	10.38	
MnO	0.12	0.11	0.14	0.07	0.00	0.14	0.14	0.14	0.07	0.00	0.13	0.16	0.15	0.08	0.00	0.12	0.14	0.13	0.06	0.00	0.13	0.14	0.17	0.10	0.00	
MgO	44.03	50.49	34.86	17.46	16.89	43.60	50.47	34.98	17.82	15.44	41.57	49.84	34.66	17.77	15.89	40.74	49.98	34.41	15.86	19.79	39.80	50.12	34.11	15.40	19.76	
CaO	0.87	0.04	0.65	23.76	0.01	1.13	0.04	0.61	23.82	0.00	1.47	0.04	0.58	24.02	0.01	2.12	0.03	0.44	22.43	0.00	2.37	0.01	0.43	22.08	0.01	
Na ₂ O	0.16	0.01	0.02	0.25	0.03	0.12	0.01	0.02	0.06	0.01	0.05	0.01	0.00	0.12	0.01	0.17	0.02	0.05	1.06	0.01	0.19	0.00	0.03	1.09	0.02	
K ₂ O	0.09				0.05					0.04						0.04					0.03					
NiO	0.31	0.40	0.11	0.05	0.26	0.80	0.43	0.10	0.04	0.15	0.30	0.43	0.12	0.08	0.17	0.28	0.34	0.11	0.04	0.31	0.27	0.38	0.06	0.03	0.31	
P ₂ O ₅	0.03				0.07					0.12						0.09					0.11					
总和	99.63	101.01	100.81	100.16	98.59	99.39	100.84	100.66	100.10	98.39	99.13	100.66	100.74	100.46	97.48	99.36	100.46	100.63	99.25	98.35	99.21	100.55	100.19	99.32	98.87	
Mg#	0.89	0.91	0.92	0.93	0.68	0.89	0.91	0.92	0.94	0.74	0.88	0.91	0.92	0.94	0.67	0.89	0.91	0.91	0.93	0.78	0.88	0.91	0.91	0.93	0.77	

表 2 不同结构橄榄岩及单斜辉石微量元素分析结果($\mu\text{g/g}$)Table 2 The analyses results of different microstructure peridotites and their clinopyroxenes ($\mu\text{g/g}$)

样品号 样品	QX14		QX17		QX1		QX7		QX8	
	橄榄岩	Cpx	橄榄岩	Cpx	橄榄岩	Cpx	橄榄岩	Cpx	橄榄岩	Cpx
Sc	9	58	12	60	12	59	13	75	14	72
Ti	310	404	277	58	71	101	306	1147	309	1083
V	36	115	36	109	50	178	65	259	67	261
Co	119	18	115	19	115	21	112	18	109	19
Ni	2014	308	1960	312	1915	355	1833	275	1783	283
Ga	2.23	2.08	1.43	1.67	1.20	1.73	2.58	2.63	2.23	2.76
Rb	2.32	b. d.	0.87	b. d.	1.43	b. d.	2.12	b. d.	2.00	b. d.
Sr	54	12	77	18	97	38	93	14	95	11
Y	0.49	3.76	0.44	0.80	0.17	1.66	1.21	12.03	1.32	11.62
Zr	3.65	3.54	4.23	1.31	0.73	3.62	1.04	6.38	0.82	5.29
Nb	2.53	0.50	2.43	0.77	0.57	0.75	0.58	0.17	0.52	0.17
Ba	13	b. d.	14	b. d.	25	b. d.	25	b. d.	22	b. d.
La	0.75	1.09	0.88	1.22	0.21	2.65	0.14	0.22	0.11	0.19
Ce	1.49	2.32	1.68	1.56	0.39	4.97	0.29	0.75	0.23	0.70
Pr	0.17	0.38	0.20	0.18	0.04	0.46	0.04	0.18	0.03	0.15
Nd	0.68	1.08	0.80	0.57	0.14	1.79	0.16	1.04	0.14	1.03
Sm	0.14	0.24	0.16	b. d.	0.02	0.36	0.05	0.45	0.04	0.48
Eu	0.04	0.13	0.05	0.19	0.01	0.20	0.03	0.27	0.02	0.22
Gd	0.12	0.31	0.14	b. d.	0.02	b. d.	0.09	1.13	0.09	1.01
Tb	0.02	0.07	0.02	b. d.	0.00	b. d.	0.02	0.24	0.02	0.22
Dy	0.09	0.48	0.09	b. d.	0.02	0.52	0.15	1.97	0.16	1.77
Ho	0.02	0.16	0.02	0.10	0.01	0.13	0.04	0.50	0.04	0.46
Er	0.04	0.41	0.03	0.22	0.02	0.23	0.12	1.42	0.14	1.53
Tm	n. d.	0.10	n. d.	0.08	n. d.	0.12	n. d.	0.26	n. d.	0.20
Yb	0.05	0.52	0.04	0.34	0.03	0.40	0.14	1.64	0.16	1.40
Lu	0.01	0.12	0.01	0.10	0.01	b. d.	0.02	0.26	0.03	0.21
Hf	0.07	0.22	0.08	b. d.	0.01	b. d.	0.03	0.40	0.03	0.28
Ta	0.10	b. d.	0.10	b. d.	0.02	b. d.	0.02	b. d.	0.01	b. d.
Pb	0.25	0.78	0.36	0.41	0.20	0.32	0.23	b. d.	0.31	b. d.
Th	0.11	0.11	0.13	0.14	0.02	0.18	0.02	0.11	0.01	b. d.
U	0.05	0.45	0.33	0.38	0.39	0.49	0.23	b. d.	0.35	b. d.

b. d., 低于检测限; n. d., 未测试

量降低,反映橄榄岩的饱满程度逐渐在增加。4)REE的丰度总体降低,代之出现的是HREE丰度较高、而LREE丰度较低的剪切结构橄榄岩;粗粒结构橄榄岩表现为较高提取程度后的明显LREE富集特点,而后者则表现为较弱提取程度后的弱LREE富集特点;说明在从粗粒结构向剪切结构转变过程中存在复杂的熔/流体的加入富集和熔体的提取亏损作用。5)尽管所有的橄榄岩都表现为明显的U、Nb、Pb和Sr正异常,但随变质变形作用的增强,它们的正异常特征越趋明显,结合上面的分析和实验成果(Zindler and Jagoutz, 1988; Bodinier *et al.*, 1996)表明交代介质可能属 SiO_2 不饱和的硅酸盐碳酸岩熔体(郑建平, 2000),这种熔体通常有强的渗透性。

3.2 不同结构橄榄岩中单斜辉石的微量元素特征

通过对全岩及由单斜辉石计算的全岩不相容微量元素

对比可知:除残碎斑状结构橄榄岩单斜辉石的REE、剪切结构橄榄岩单斜辉石的MREE-HREE分别能代表其全岩特征外,其他微量元素特别是粗粒结构橄榄岩中单斜辉石的微量元素明显低于其全岩的组成。也就是说,在粗粒结构橄榄岩中单斜辉石微量元素的贡献有限,但其高度不相容元素部分的配分形式基本上可以反映全岩的特征(见图2A);残碎斑状结构橄榄岩的REE、剪切结构橄榄岩的MREE-HREE都可以用单斜辉石的组成来表示。所有橄榄岩中的U、Pb、Nb、Zr、Ti和Sr则主要附存在其它载体中。“干”尖晶石橄榄岩的不相容微量元素组成至少来自3方面的贡献(徐义刚, 1999):硅酸盐矿物(特别是单斜辉石)、粒间组分和流体包裹体。看来橄榄岩的LILE主要赋存在粒间组分或和矿物流体包裹体中,这与淋漓实验结果(Zindler and Jagoutz, 1988; Bodinier *et al.*, 1996)是一致的。

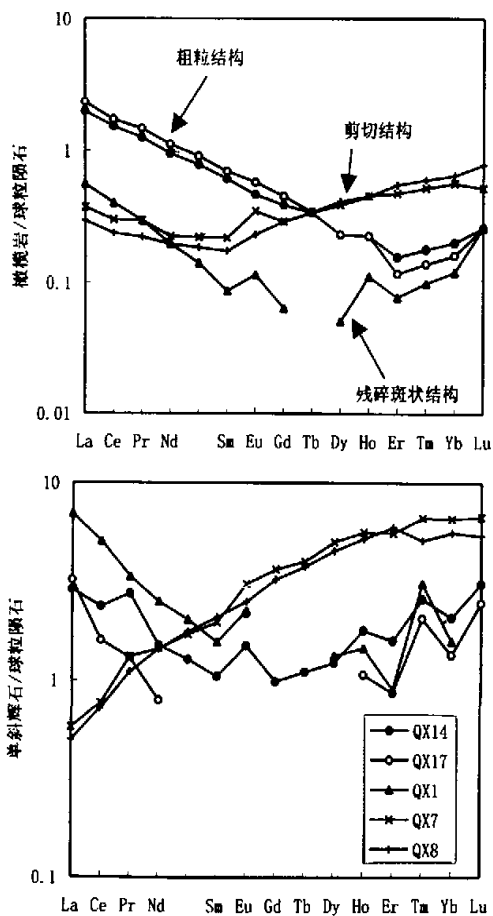


图1 不同结构橄榄岩及单斜辉石 REE 球粒陨石标准化曲线
Fig.1 REE patterns of different microstructure peridotites and their clinopyroxenes

4 认识

(1) 随从粗粒结构到剪切结构橄榄岩变质变形作用的增强,存在复杂的熔/流体的加入富集和熔体的提取亏损作用,交代介质可能属具强渗透性的 SiO_2 不饱和的硅酸盐碳酸岩熔体。

(2) 在“干”尖晶石橄榄岩中单斜辉石的 REE 并不能完全反映全岩的特征,不同结构橄榄岩中单斜辉石所反映的程度不一样:原始的粗粒结构橄榄岩中矿物与岩石的 REE 丰度差别最大,但 REE 的配分形式可以反映全岩的情况;而含较多新生成分的剪切结构橄榄岩中两者的差别较小。其它高度不相容微量元素可能主要附存在粒间组分或和矿物流体包裹体中。

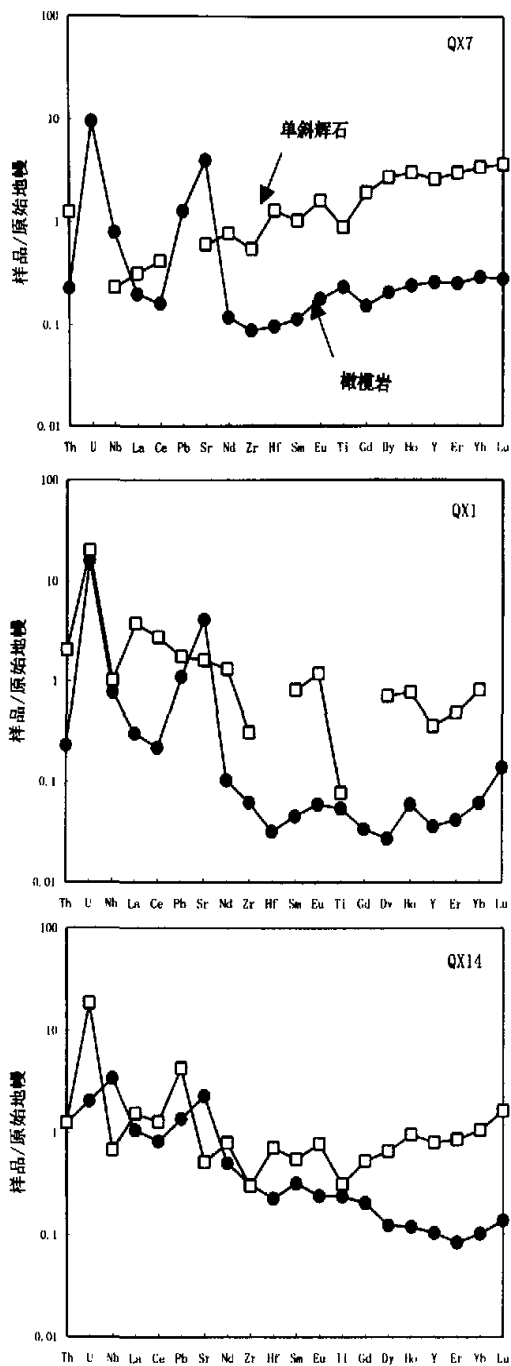


图2 不同结构橄榄岩及单斜辉石的微量元素原始地幔标准化蛛网图
(A.粗粒结构; B. 破碎斑状结构; C. 剪切结构)
Fig.2 Spidergrams of different microstructure peridotites and their clinopyroxenes

致谢 本文的完成得到了南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的支持。感谢澳大利亚 GEMOC 研究中心的 W. L. Griffin 教授和张明博士的指导和帮助!

References

- Bodinier J, Merlet C and Bedini RM. 1996. The distribution of niobium, tantalum, and other highly incompatible trace elements in the lithospheric mantle: the spinel paradox. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 16: 545-550
- Chen S, Zhou X, O' Reilly S, Griffin W, Zhang G and Zhang M. 1997. Laser ICP-MS of diopside and its geological meaning. *Chinese Science Bulletin*, 42(16):1707-1711 (in Chinese)
- Lu F. 1987. Mantle petrology. Wuhan: China University of Geosciences Press, 92-105 (in Chinese)
- McDonough W and Sun S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253
- Mercier J and Nicolas A. 1975. Textures and fabrics of upper mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *Jour. Petrol.*, 16, 454-487
- Norman M. 1998. Melting and metasomatism in the continental lithosphere: laser ablation ICPMS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.* 130: 240-255
- Rivalenti G, Vannucci R and Ramponc E. 1996. Peridotite clinopyroxene chemistry reflects mantle processes rather than continental versus oceanic settings, *Earth and Planetary Science Letters* 139:423-437
- Xu X, O' Reilly S, Griffin W and Zhou, X., 2000. Genesis of young lithospheric mantle in southeastern China: a LAM-ICPMS trace element study. *J. Petrol.* 40: 111-148
- Xu Y. 1999. The trace element of the inter-grain constituents in peridotite and the discussion on its genesis. *Chinese Science Bulletin*, 44,1670-1675 (in Chinese)
- Zheng J, O' Reilly S, Griffin W, Lu F and Zhang M. 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean craton, eastern China. *International Geology Review*, 40,471-499
- Zheng J. 1999. Mesozoic-Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning beneath the eastern China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 50-63 (in Chinese with English Abstract)
- Zheng J, Lu F, O' Reilly S, Griffin W and Zhang M. 2000. Mantle modification and mantle replacement beneath the eastern part of North China Block: Laser ICP-MS analyses on clinopyroxenes, *Chinese Sciences (series D)*, 30(4):373-382 (in Chinese)
- Zindler A and Jagoutz E. 1988. Mantle cryptology. *Geochim Cosmochim Acta*, 52:319-333

附中文参考文献

- 陈绍海, 周新华, O' Reilly SY, Griffin WL, 张国辉, 张明. 1997. 透辉石的激光探针 ICP 质谱分析及其深部地质意义. *科学通报*, 42(16): 1707-1711
- 路凤香. 1987. 地幔岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 92-105
- 徐义刚. 1999. 上地幔橄榄岩粒间组分的微量元素特征及其成因探讨. *科学通报*, 44:1670-1675
- 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, 50-63
- 郑建平, 路凤香, O' Reilly S, Griffin W, 张明. 2000. 华北东部地幔改造作用和地幔置换作用: 单斜辉石激光探针研究. *中国科学 (D辑)*, 30(4):373-382