

内蒙古集宁新生代玄武岩中橄榄岩包体矿物化学特征及其地幔演化意义

周媛婷 郑建平 余淳梅 陈曦 张明民

(中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在无水“干”体系的四矿物相橄榄岩中, 单斜辉石由于熔点低而通常记录着丰富的部分熔融作用和地幔交代作用信息。在详细岩相学特征和组成矿物主元素分析基础上, 重点对内蒙古集宁玄武岩中橄榄岩包体的单斜辉石进行了激光原位微量元素研究。通过与新生代时华北具古老克拉通地幔特征(如鹤壁)和具新生岩石圈地幔特征(如山旺)的橄榄岩对比, 讨论了新生代时集宁地区陆下岩石圈地幔性质及其形成和演化机制。集宁地区岩石圈地幔是相当于原始地幔经过较低程度的部分熔融抽取形成的, 除个别样品的部分熔融程度 $< 5\%$ 外, 多数样品为 $5\% \sim 10\%$ 。橄榄岩的平衡温度与橄榄石 $Mg^{\#}$ 关系表明新生代时集宁地区的陆下岩石圈地幔是不均一的, 无明显分层现象, 表现为饱满与过渡型地幔的共存。这种主体饱满并兼有过渡型地幔的不均一现象, 可能是软流圈物质对古老地幔进行不均匀侵蚀、改造和置换作用的结果。

关键词: 橄榄岩包体; 侵蚀; 置换; 内蒙古集宁; 华北; 岩石圈地幔

中图分类号: P588.14⁺5; P574.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)03-0243-15

Peridotite xenoliths in Jining Cenozoic basalts: mineral-chemistry and significance for lithospheric mantle evolution beneath the North China Craton

ZHOU Yuan-ting, ZHENG Jian-ping, YU Chun-mei, CHEN Xi and ZHANG Ming-min

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In four-facies peridotite, clinopyroxene (Cpx) contains abundant information concerning partial melting and mantle metasomatism due to its low melting point. Based on detailed studies of petrographic characteristics and major elements of minerals, the authors analyzed trace elements of Cpx in the peridotitic xenoliths from Jining area, Inner Mongolia. The properties and evolution of the subcontinental lithosphere mantle (SCLM) beneath Jining area in Cenozoic period have been discussed in comparison with things of lithospheric mantle (SCLM) beneath Hebi and Shanwang areas in the North China Craton. The peridotitic xenoliths from Hebi and Shanwang areas represent samples from the Archean (relict) and Phanerozoic (new accreted) mantle, respectively. The Jining peridotitic xenoliths are dominated by spinel-lherzolites. The lherzolites have mineral assemblage of olivine (42% ~ 72%) + orthopyroxene (12% ~ 50%) + clinopyroxene (5% ~ 20%) + spinel (< 5%). Compared with Hebi (coarse-grained) and Shanwang (fine-grained) peridotites, Jining peridotitic xenoliths mainly display the transitional porphyroclastic texture. The olivine $Mg^{\#}$ values of Jining peridotitic xenoliths range from 89.4 to 91.4, quite consistent with the data obtained by previous researchers, and are fairly close to the values of peridotitic xenoliths from Shanwang and Yangyuan xenoliths. The samples were collected from a fertile lithospheric mantle. The Jining SCLM was formed from the relics after low partial melting of the primitive mantle. Most

收稿日期: 2009-10-19; 修订日期: 2010-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(90714002, 40821061)

作者简介: 周媛婷(1985-), 汉族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: zyt59705962@163.com; 通讯作者: 郑建平, E-mail: jpzheng@cug.edu.cn

of the samples have a partial melting degree of 5% ~ 10% with only a few lower than 5%. The Jining SCLM has undergone silicate melt/fluid metasomatism, quite similar to things experienced by Shanwang SCLM. The relationship between the Ol-Mg[#] and the equilibrium temperature of the peridotites suggests the coexistence of fertile mantle and refractory-transitional mantle beneath the study area in Cenozoic period. Such phenomena might be attributed to the reformation of the cratonic SCLM by the upwelling asthenospheric materials and the eventual replacement resulting from the cooling of the upwelled asthenosphere under heterogeneous conditions.

Key words: peridotite xenoliths; asthenospheric erosion; mantle replacement; Inner Mongolia, North China; lithospheric mantle

华北地区稳定的冷、厚克拉通型岩石圈地幔于中奥陶世时被热、薄的大洋型岩石圈地幔取代 (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)。岩石圈的巨厚减薄和地幔性质的改变伴随东部沉积盆地的大量形成及高热流值、强烈的火山活动和地震活动等 (邓晋福等, 1996) 发生, 构成了我国华北克拉通中生宙重要的地质事件。华北东部克拉通岩石圈减薄目前已得到广泛认同, 但其减薄机制尚有争议 (Xu Y G, 2001; Zhang *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2007)。

近年来, 通过对包体岩石学、矿物学、地球化学研究, 获得了许多有关华北地区下地壳、上地幔组成和演化的信息 (冯家麟等, 1982; Tatsumoto *et al.*, 1992; 刘丛强等, 1996; 陈道公等, 1997; Gao *et al.*, 2002; Wilde *et al.*, 2003; 刘勇胜等, 2004; Rudnick *et al.*, 2004)。华北克拉通北缘的河北汉诺坝玄武岩因含丰富的地幔和下地壳深源包体而倍受关注, 而位于汉诺坝以西的集宁玄武岩区的幔源包体研究才刚刚开始。杜蔚等 (2006) 对发现于内蒙古集宁碱性玄武岩中的橄榄岩进行了矿物主元素的分析, 认为它们是岩浆上升过程中偶然捕获的岩石圈地幔样品。本文在对该区橄榄岩详细岩石学研究工作的基础上, 重点对单斜辉石进行了激光原位微量元素分析, 并将这些结果与华北地块内代表新生地幔的山旺橄榄岩和代表古老地幔残留的鹤壁橄榄岩进行对比, 以期华北岩石圈减薄机制提供进一步的约束。

1 地质背景

Zhao 等 (2001) 把华北克拉通划分为 3 块, 分别为东部带、西部带和中部山带。对大同及周围玄武岩的地球化学研究显示, 西部块体在新生代时期曾

经历了岩石圈减薄事件 (徐义刚, 2004)。属西部地块与中部山带交界处的内蒙古集宁地区位于华北克拉通北缘, 东邻汉诺坝玄武岩区 (图 1)。集宁新生代玄武岩区具有分布面积较大 (约 8 000 km²) 剖面显示良好的特点, 含大量橄榄岩和辉石岩包体的新生代玄武岩位于集宁西南的梅力盖图乡附近 (杜蔚等, 2006)。K-Ar 定年结果显示, 集宁玄武岩是 3 个火山喷发旋回的产物, 主要喷发期为 ~33 Ma, 22.8 ~ 22.1 Ma 和 12.2 ~ 9.4 Ma (张文慧等, 2006)。本次所研究的样品主要来自第 1 喷发旋回。

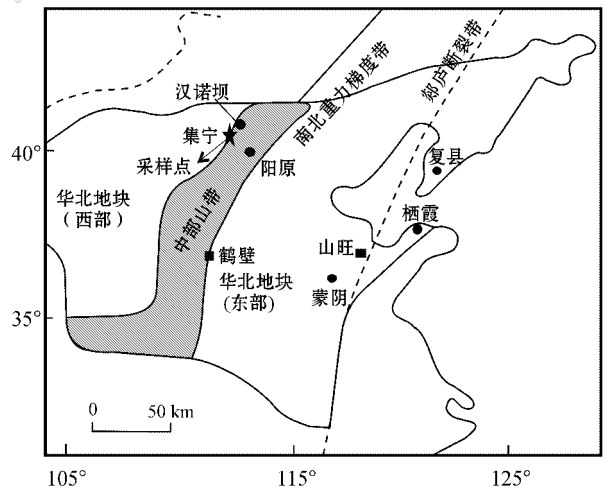


图 1 华北克拉通主要构造单元和采样点位置 (构造单元划分据 Zhao 等, 2001)

Fig. 1 Major tectonic units in the North China Craton and sampling positions (tectonic divisions after Zhao *et al.*, 2001)

2 岩相学特征

集宁橄榄岩包体主要采自集宁的三义堂附近, 岩性均为尖晶石二辉橄榄岩, 大多数样品比较新鲜, 部分风化较强, 多呈浑圆形和椭球状, 大小不等, 最大可达 30 cm (图 2a), 以尖晶石二辉橄榄岩为主。

除样品 SYT10 和 SYT18 为细粒结构外,其余皆具有碎斑状结构(图 2b)和不等粒变晶结构(表 1)。包体的矿物组成为橄榄石($Ol = 42.7\% \sim 72.1\%$)、斜方辉石($Opx = 12.1\% \sim 50.3\%$)、单斜辉石($Cpx = 4.8\% \sim 19.8\%$)和尖晶石($Sp = 0.3\% \sim 4.6\%$)。细粒结构橄榄岩中矿物颗粒较小且分布均匀,基本上无残碎斑晶,橄榄石多具“三联点”结构,表明岩石多为变形重结晶作用形成(Mercier and Nicolas, 1975; 路凤香, 1987)。具有碎斑状结构的样品,橄榄石扭折带发育,表明曾经历了破碎、塑性变形作用。与细粒结构为主、代表新生地幔的山旺橄榄岩(Zheng *et al.*, 1998)以及具粗粒结构为主、代表古老难熔地

幔的鹤壁橄榄岩(Zheng *et al.*, 2001)相比,集宁橄榄岩的结构属于上述两者的过渡类型,即以碎斑状结构为主(图 3a)。

3 分析方法

矿物主、微量元素的分析测试均在中国地质大学(武汉)国家重点实验室完成。主量元素是用 JE-OL-JXA-8100 电子探针测得,分析条件为:加速电压 15 kV,探针电流 20 nA,电子束直径 $1 \mu m$,所使用标样为美国 SPI#02753-AB 的 53 种矿物,分析结果见表 2。

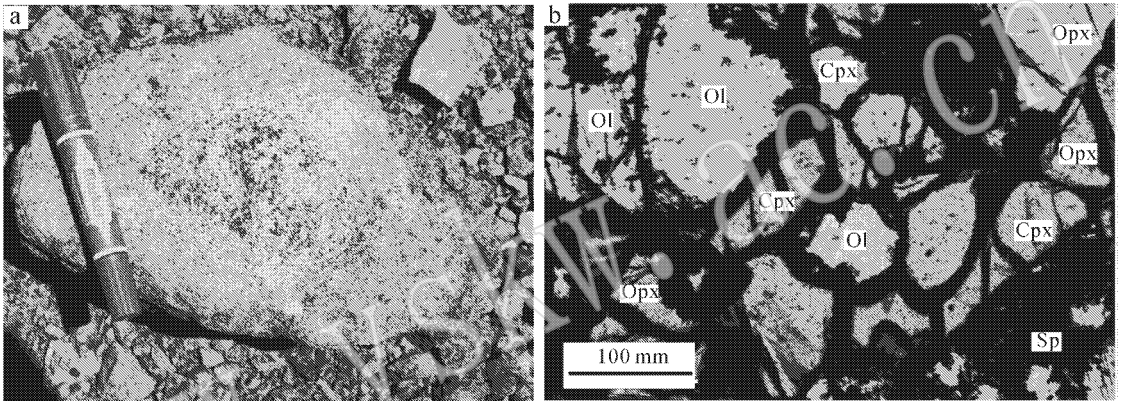


图 2 集宁橄榄岩包体手标本(a)和单偏光下代表性的碎斑状结构橄榄岩包体(b)

Fig. 2 Hand specimen(a) and representative Jining peridotite xenoliths with porphyroclastic texture under plain light(b)

表 1 集宁橄榄岩包体结构和矿物组成

Table 1 Microstructure and mineral composition of Jining peridotite xenoliths

$V_B/\%$

样品编号	结构	橄榄石 $Mg^\#$	尖晶石 $Cr^\#$	F/%	Ol	Opx	Cpx	Sp
SYT1	斑状	89.7	15.5	5.4	50.5	27.6	19.8	1.4
SYT2	斑状	90.3	17.2	6.4	44.3	36.6	16.5	2.3
SYT3	斑状	90.1	18.2	7.0	72.1	22.4	4.8	0.5
SYT4	斑状	90.1	20.8	8.3	58.7	33.8	6.4	0.7
SYT5	斑状	89.9	17.7	6.7	58.9	29.8	10.3	0.6
SYT6	斑状	89.9	17.2	6.4	71.8	20.3	6.8	0.5
SYT7	斑状	90.1	18.7	7.2	60.7	12.1	22.7	1.2
SYT9	斑状	89.7			63.2	22.4	12.8	0.8
SYT10	细粒	89.7	17	6.3	42.7	50.3	5.6	1.1
SYT11	斑状	89.4			62.7	24.8	10.3	1.8
SYT12	斑状	89.8	14.9	5.0	67.9	20.6	9.5	1.7
SYT14	斑状	90.1			62.7	28.3	7.5	1.1
SYT15	斑状	89.8	19.6	7.7	65.2	21.6	12.1	0.9
SYT16	斑状	91.4	21.7	10.1	61.2	20.2	14.1	3.8
SYT17	斑状	89.4	14	4.3	53.2	32.8	8.9	4.6
SYT18	细粒	89.8	17.6	6.6	52.2	38.5	8.8	0.3
SYT19	斑状	89.6	13	3.6	63.8	20.8	14.8	0.4
SYT20	斑状	89.8	19.6	7.7	42.7	43.7	12.5	0.8

地幔部分熔融程度(F%)根据 Hellebrand 等(2001)方法计算获得, 橄榄石 $Mg^\# = Mg/(Mg + Fe)$ (摩尔比值), 尖晶石 $Cr^\# = Cr/(Cr + Al)$ (摩尔比值)。

表 2 集宁橄榄岩包体各矿物电子探针分析结果

 $\omega_B/\%$

Table 2 Electron microprobe analyses of minerals from Jining peridotite xenoliths

编号	SYT1				SYT2				SYT3				SYT4			
类型	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			
矿物 点数	Ol 5	Opx 5	Cpx 5	Sp 5	Ol 5	Opx 5	Cpx 5	Sp 5	Ol 5	Opx 5	Cpx 5	Sp 5	Ol 2	Opx 2	Cpx 6	Sp 2
SiO ₂	41.12	55.10	52.49	0.06	41.27	55.20	52.15	0.05	41.39	55.32	53.07	0.08	39.69	55.74	50.62	0.06
TiO ₂	0.04	0.06	0.07	0.05	0.04	0.11	0.33	0.12	0.04	0.11	0.39	0.14	0.01	0.05	0.12	0.08
Al ₂ O ₃	0.01	3.56	3.89	53.64	0.00	3.39	4.79	52.44	0.01	3.26	4.86	51.48	0.04	3.77	4.36	49.57
Cr ₂ O ₃	0.01	0.39	0.76	14.62	0.01	0.45	1.06	16.18	0.01	0.39	1.08	17.07	0.01	0.56	0.99	19.36
FeO	10.06	6.34	2.50	10.17	9.53	6.03	2.29	10.11	9.64	6.11	2.30	10.19	9.81	6.09	2.33	10.00
MnO	0.16	0.15	0.08	0.13	0.12	0.14	0.09	0.13	0.14	0.14	0.09	0.16	0.12	0.15	0.09	0.16
MgO	48.57	33.71	16.34	20.50	49.12	33.76	15.41	20.35	48.81	33.93	15.41	20.30	49.67	32.75	17.04	20.29
CaO	0.05	0.53	22.83	0.00	0.02	0.56	22.01	0.01	0.04	0.51	21.41	0.00	0.05	0.57	23.02	0.00
Na ₂ O	0.01	0.03	0.64	0.01	0.01	0.06	1.33	0.01	0.03	0.06	1.30	0.02	0.02	0.06	0.87	0.01
K ₂ O	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
Sum	99.9	99.9	99.6	99.2	100.1	99.7	99.5	99.4	100.1	99.8	99.9	99.4	99.4	99.8	99.4	99.5
Mg [#]	89.7	90.5	92.2	77.9	90.3	91.0	92.4	77.9	90.1	90.9	92.3	77.7	90.1	90.6	92.9	78.5
Cr [#]			11.5	15.5			12.9	17.2			12.9	18.2			13.2	20.8

编号	SYT5				SYT6				SYT7			SYT9		
类型	尖晶石二辉橄榄岩				尖晶石二辉橄榄岩				尖晶石单辉橄榄岩			尖晶石二辉橄榄岩		
矿物 点数	Ol 5	Opx 5	Cpx 5	Sp 5	Ol 5	Opx 5	Cpx 5	Sp 5	Ol 2	Cpx 4	Sp 2	Ol 2	Opx 2	Cpx 5
SiO ₂	41.95	56.33	53.49	0.08	41.80	55.78	53.19	0.06	42.48	52.39	0.04	39.37	55.55	50.39
TiO ₂	0.05	0.05	0.13	0.05	0.03	0.05	0.16	0.08	0.04	0.50	0.17	0.02	0.06	0.13
Al ₂ O ₃	0.01	3.21	3.66	52.03	0.01	3.40	3.91	52.65	0.05	5.28	51.64	0.05	3.50	4.15
Cr ₂ O ₃	0.02	0.38	0.08	16.66	0.01	0.34	0.81	16.25	0.01	1.04	17.75	0.02	0.44	1.10
FeO	9.72	6.10	2.39	10.42	9.79	6.07	2.44	10.27	9.70	2.23	10.32	10.30	6.48	2.42
MnO	0.13	0.13	0.08	0.13	0.13	0.16	0.07	0.13	0.14	0.07	0.15	0.13	0.13	0.10
MgO	48.18	33.57	16.23	20.09	48.30	33.70	16.25	20.10	48.93	15.75	20.88	49.64	33.01	17.01
CaO	0.05	0.55	22.32	0.00	0.04	0.52	22.12	0.01	0.03	21.50	0.00	0.03	0.54	23.38
Na ₂ O	0.03	0.06	0.68	0.00	0.03	0.04	0.84	0.01	0.00	1.31	0.03	0.01	0.08	0.81
K ₂ O	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
Sum	100.1	100.4	99.7	99.5	100.1	100.1	99.8	99.5	101.4	101.1	101.0	99.5	99.8	99.5
Mg [#]	89.9	90.8	92.4	77.1	89.9	90.9	92.3	77.4	9.01	92.7	78.5	89.7	90.2	92.7
Cr [#]			1.4	17.7			12.2	17.2			11.7	18.7		15.1

编号	SYT10				SYT11			SYT12				SYT14			
类型	尖晶石橄榄二辉岩				尖晶石二辉橄榄岩			尖晶石二辉橄榄岩				尖晶石二辉橄榄岩			
矿物 点数	Ol 2	Opx 2	Cpx 5	Sp 2	Ol 2	Opx 2	Cpx 6	Ol 2	Opx 2	Cpx 6	Sp 2	Ol 2	Opx 2	Cpx 6	Sp 2
SiO ₂	39.88	55.76	50.94	0.17	39.13	55.32	50.23	40.61	55.55	52.29	0.09	41.20	55.70	52.43	0.05
TiO ₂	0.01	0.07	0.14	0.07	0.03	0.07	0.14	0.02	0.03	0.14	0.07	0.04	0.06	0.16	0.10
Al ₂ O ₃	0.06	3.68	4.62	52.68	0.05	3.88	4.83	0.04	3.74	4.65	54.30	0.06	3.55	4.22	50.63
Cr ₂ O ₃	0.02	0.40	0.90	16.10	0.01	0.47	1.14	0.01	0.36	0.82	14.17	0.01	0.45	0.98	18.38
FeO	10.19	6.31	2.45	10.27	10.61	6.55	2.62	9.96	6.23	2.48	10.35	9.54	6.09	2.34	10.50
MnO	0.14	0.12	0.09	0.16	0.13	0.14	0.10	0.16	0.15	0.09	0.13	0.14	0.16	0.08	0.14
MgO	49.45	32.94	16.80	20.27	49.88	32.69	16.49	48.48	33.02	16.34	20.49	48.42	33.21	16.45	19.74
CaO	0.05	0.55	23.07	0.02	0.04	0.60	22.75	0.03	0.55	22.00	0.02	0.04	0.55	22.38	0.02
Na ₂ O	0.02	0.02	0.83	0.07	0.01	0.07	1.11	0.01	0.06	0.99	0.03	0.02	0.06	0.82	0.01
K ₂ O	0.01		0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01		0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
Sum	99.8	99.9	99.8	99.8	99.9	99.8	99.4	99.3	99.7	99.8	99.6	99.5	99.8	99.9	99.6
Mg [#]	89.7	90.4	92.5	78.0	89.4	90.0	91.9	89.8	90.5	92.2	78.1	90.1	90.8	92.7	77.2
Cr [#]			11.6	17.0			13.7			10.6	14.9			13.5	19.6

续表 2

Continued Table 2

编号	SYT15			SYT16			SYT17			
	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	Ol	Opx	Cpx	Sp
矿物 点数	1	2	5	2	2	6	5	5	5	5
SiO ₂	39.17	55.59	50.33	39.33	55.55	51.10	41.62	55.53	52.56	0.05
TiO ₂	0.03	0.06	0.17	0.01	0.04	0.15	0.04	0.14	0.51	0.11
Al ₂ O ₃	0.03	3.73	4.56	0.04	3.42	4.50	0.01	3.62	5.99	55.05
Cr ₂ O ₃	0.03	0.32	0.76	0.02	0.44	0.95	0.02	0.36	0.98	13.38
FeO	10.23	6.30	2.56	9.15	5.54	2.48	10.29	6.40	2.54	10.28
MnO	0.10	0.15	0.08	0.12	0.11	0.09	0.13	0.15	0.10	0.14
MgO	50.04	32.93	16.91	51.19	33.76	16.67	47.98	33.04	14.90	20.50
CaO	0.05	0.52	22.95	0.03	0.51	22.76	0.03	0.55	20.67	
Na ₂ O	0.01	0.07	1.00	0.01	0.06	0.93	0.01	0.07	1.59	0.01
K ₂ O	0.00		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Sum	99.7	99.7	99.3	99.9	99.4	99.6	100.1	99.9	99.8	99.5
Mg [#]	89.8	90.4	92.2	91.0	91.6	92.4	89.4	90.3	91.3	77.7
Cr [#]			10.1			12.4			9.9	14.0

编号	SYT18				SYT19				SYT20			
	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	Ol	Opx	Cpx	SP	Ol	Opx	Cpx	Sp
矿物 点数	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
SiO ₂	40.97	55.38	52.63	0.04	41.30	55.10	52.33	0.05	41.42	55.50	52.95	0.07
TiO ₂	0.03	0.04	0.16	0.07	0.02	0.14	0.49	0.15	0.04	0.06	0.16	0.07
Al ₂ O ₃	0.02	3.35	3.96	52.03	0.01	3.65	5.96	55.63	0.00	3.28	3.64	50.29
Cr ₂ O ₃	0.10	0.40	0.90	16.56	0.01	0.37	0.93	12.42	0.02	0.43	0.80	18.21
FeO	9.88	6.23	2.44	10.40	10.12	6.43	2.57	10.29	9.91	6.18	2.40	10.74
MnO	0.15	0.16	0.09	0.15	0.13	0.15	0.09	0.12	0.02	0.15	0.09	0.14
MgO	48.59	33.65	16.26	20.22	48.48	33.66	14.95	20.70	48.58	33.62	16.65	20.00
CaO	0.01	0.04	0.56	22.19	0.03	0.45	20.78	0.02	0.03	0.55	22.28	0.02
Na ₂ O	0.01	0.04	0.89	0.02	0.02	0.07	1.65	0.02	0.01	0.03	0.84	0.02
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0.04	0.01
Sum	99.6	99.8	99.5	99.5	100.1	100.0	99.8	99.4	100.2	99.8	99.8	99.6
Mg [#]	89.8	90.7	92.3	77.3	89.6	90.4	91.3	77.9	89.8	90.7	92.6	76.5
C [#]			13.2	17.6			9.5	13.0			12.8	19.6

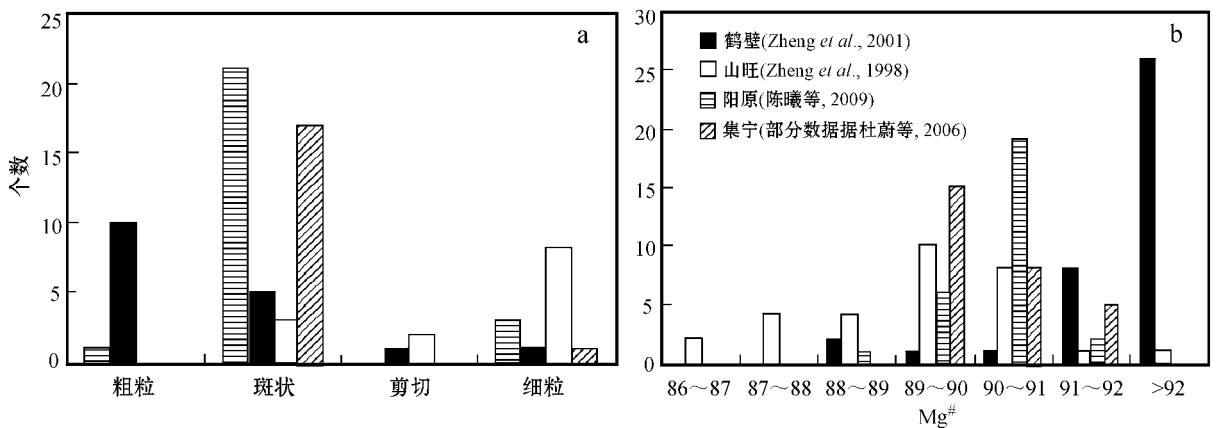


图 3 集宁橄榄岩结构(a)和橄榄石 Mg[#] 频数分布直方图(b)

Fig. 3 Frequency distribution of textures (a) and olivine-Mg[#] in olivine (b) of Jining peridotitic xenoliths

微区原位微量元素分析是用 LA-ICP-MS 测得, 激光剥蚀系统是配备有 193 nm ArF-excimer 激光器的 GeoLas 2005。分析采用的激光剥蚀孔径为 32 μm , 激光脉冲为 8 Hz, 能量密度为 12 J/cm², ICP-MS 配备屏蔽炬管的 Agilent 7 500 a。数据处理过程中橄

榄石选用 Mg、单斜辉石选用 Ca、尖晶石选用 Cr 作为内标元素, 国际标准玻璃 NIST610 用于外标校正, 绝大部分微量元素分析准确度优于 10%。橄榄石、单斜辉石、尖晶石的微量元素分析结果分别见表 3、表 4 和表 5。由于各矿物的成分在误差范围内是

表 3 集宁橄榄石微量元素分析结果

 $\omega_B/10^{-6}$

Table 3 Trace elements concentrations of olivine from Jining peridotite xenoliths

样品编号	ZYT-4	ZYT-7	ZYT-9	ZYT-10	ZYT-11	ZYT-14	ZYT-15	ZYT-16
Ca	197	130	234	349	284	213	263	206
Sc	2.37	1.75	2.25	2.45	2.12	2.53	2.58	2.51
Ti	1.52	15.6	7.04	3.61	5.07	5.80	5.18	5.10
V	2.39	2.68	1.82	2.27	2.67	2.65	2.65	2.35
Cr	58.2	55.2	49.3	52.3	62.4	68.2	56.1	73.4
Mn	1 101	1 039	1 127	1 128	1 144	1 116	1 136	1 060
Co	145	135	152	149	148	145	147	139
Ni	3 065	2 736	3 381	3 188	2 940	3 049	3 128	3 051
Zn	47.4	41.8	54.0	49.2	53.6	48.8	47.8	47.5

表 4 集宁单斜辉石微量元素分析结果

 $\omega_B/10^{-6}$

Table 4 Trace element concentrations of clinopyroxene from Jining peridotite xenoliths

样品编号	SYT4	SYT7	SYT9	SYT10	SYT11	SYT14	SYT15	SYT16
Sc	65.8	75.7	66.8	52.1	74.1	78.2	69.7	77.6
Ti	477	2788	862	491	727	832	739	625
V	241	308	219	217	254	227	260	246
Cr	7100	7524	7190	5410	7636	6334	5020	7661
Mn	633	661	634	739	667	642	664	633
Co	20.3	18.7	18.7	26.6	18.7	19.1	19.6	18.3
Ni	337	303	329	410	300	326	349	316
Zn	11.8	7.17	8.12	11.2	7.93	7.76	8.11	7.78
Ga	3.41	3.79	2.18	5.39	2.68	2.51	2.23	2.34
Rb	0.07	0.01	0.02	0.16	0.01	0.04	0.01	0.00
Sr	54.4	64.3	50.7	4.0	45.8	31.4	13.0	33.3
Y	6.33	11.8	7.73	6.56	8.93	8.47	8.43	6.48
Zr	4.08	14.3	11.3	3.58	8.87	4.78	2.75	6.65
Nb	0.74	0.41	0.27	0.53	0.81	0.31	0.33	0.34
Ba	0.10	0.06	0.10	0.20	0.05	0.21	0.16	0.23
La	2.66	1.57	2.02	0.16	2.09	1.73	0.83	1.85
Ce	6.98	4.76	4.99	0.39	5.13	2.16	1.63	3.80
Pr	0.93	0.75	0.72	0.04	0.66	0.23	0.21	0.46
Nd	2.92	3.81	3.37	0.19	2.62	1.04	1.09	2.12
Sm	0.50	1.26	0.74	0.09	0.44	0.32	0.36	0.51
Eu	0.16	0.53	0.25	0.10	0.14	0.13	0.13	0.16
Gd	0.63	1.78	1.13	0.47	0.78	0.75	0.62	0.68
Tb	0.09	0.32	0.18	0.11	0.17	0.13	0.14	0.12
Dy	0.86	2.12	1.38	0.97	1.30	1.43	1.23	0.89
Ho	0.24	0.44	0.31	0.24	0.35	0.29	0.33	0.26
Er	0.85	1.28	0.93	0.77	1.18	0.99	1.03	0.76
Tm	0.14	0.19	0.13	0.12	0.18	0.17	0.15	0.15
Yb	0.75	1.09	1.06	0.92	1.29	1.10	1.00	0.86
Lu	0.13	0.17	0.15	0.14	0.19	0.20	0.18	0.13
Hf	0.08	0.52	0.32	0.10	0.18	0.19	0.03	0.12
Ta	0.09	0.04	0.02	0.01	0.24	0.03	0.02	0.02
Pb	0.06	0.13	0.05	0.07	0.09	0.03	0.03	0.12
Th	0.16	0.18	0.12	0.01	0.11	0.21	0.07	0.20
U	0.04	0.04	0.03	0.01	0.03	0.03	0.02	0.04

表 5 集宁尖晶石微量元素分析结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 5 Trace element concentrations of spinel from Jining peridotite xenoliths

样品编号	ZYT4	ZYT7	ZYT10	ZYT14	ZYT15
Sc	0.57	0.61	0.51	1.18	0.60
Ti	227	890	225	314	244
V	644	604	562	592	497
Mn	932	881	870	951	883
Co	263	256	263	260	262
Ni	2 490	2 354	2 736	2 492	3 115
Cu	4.06	3.99	2.54	2.58	5.68
Zn	1 196	1 110	1 119	1 124	1 097
Ga	64.6	92.7	67.8	63.9	74.9
Sr	0.04	0.05	0.03	0.01	0.01
Zr	0.11	0.21	0.56	0.11	0.33
Nb	0.14	0.09	0.17	0.16	0.08

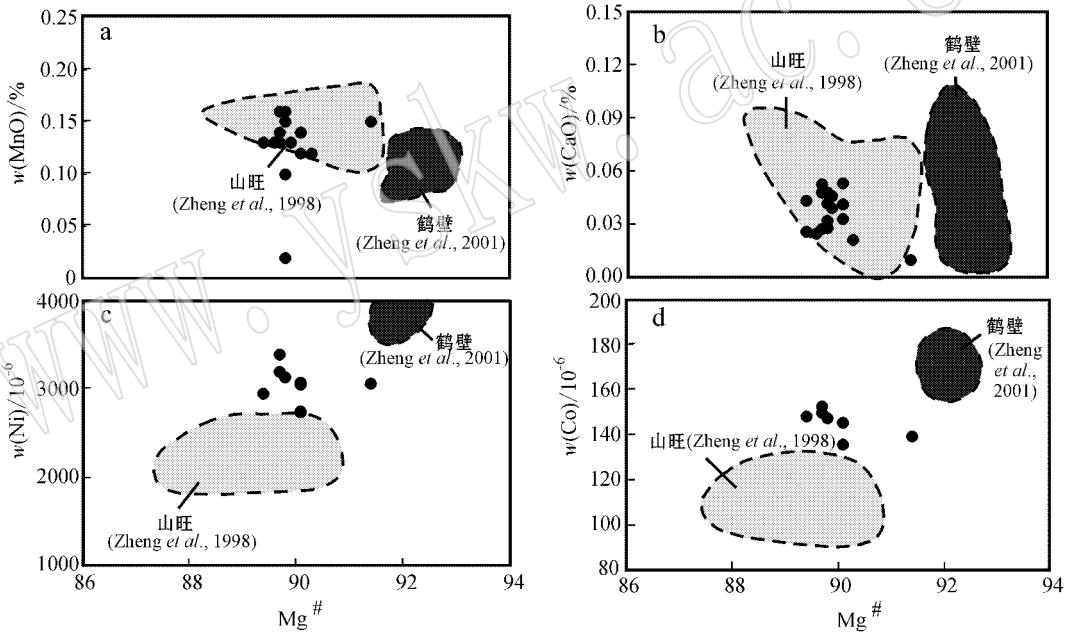
均匀的,所以在分析表中,数据为 3~5 个点的平均值。

4 分析结果

4.1 橄榄石

集宁橄榄石的 $Mg^\#$ 为 89.4~91.4,与前人结果(89.5~91.7)(杜蔚等,2006)变化范围基本一致,并且都与山旺、阳原二辉橄榄岩包体中的 $Mg^\#$ 相近(图 3b)。橄榄石的 $Mg^\#$ 对 MnO、CaO 的相关图解也可以看出,集宁橄榄石主要落入山旺区域(图 4a、4b)。

集宁橄榄石中的微量元素 Ni($2\ 736 \times 10^{-6} \sim 3\ 387 \times 10^{-6}$)和 Cd($135.4 \times 10^{-6} \sim 152.7 \times 10^{-6}$)明显介于鹤壁(Ni 平均含量 $3\ 785 \times 10^{-6}$ 、Co 平均含量

图 4 橄榄石 $Mg^\#$ 对 MnO(a)、CaO(b)、Ni(c) 和 Co(d) 图解Fig. 4 Plots of $Mg^\#$ versus MnO(a), CaO(b), Ni(c) and Co(d) in olivine

176×10^{-6})与山旺(Ni 平均含量 $1\ 372 \times 10^{-6}$ 、Co 平均含量 110×10^{-6})样品之间(图 4c、4d)。

4.2 斜方辉石

斜方辉石为 $En=88.8 \sim 91.1$ 、 $Fs=7.9 \sim 10.2$ 、 $Wo=0.8 \sim 1.5$ 的顽辉石, $Mg^\#$ 变化于 90.0~91.6 之间,与山旺橄榄岩中的斜方辉石成分总体相近,但具较高的 En 分子($En=87.2 \sim 90.0$)(Zheng *et al.*, 1998)。从 $Cr^\#$ 与 $Mg^\#$ 的相关性来看,大部分样品落入山旺区,仅杜蔚等(2006)的两个样品落在

鹤壁区的边界上(图 5)。

4.3 单斜辉石

集宁橄榄岩包体中单斜辉石为透辉石, $En=48.1 \sim 51.6$ 、 $Fs=3.5 \sim 4.8$ 、 $Wo=44.3 \sim 48.0$, $Mg^\#$ 变化于 91.3~93.1 之间, $Cr^\#$ 变化范围较宽,为 1.4~15.1。与斜方辉石所表现的特征一致,单斜辉石的 $Mg^\#$ - $Cr^\#$ 相关图解也显示出集宁大部分样品落入山旺范围内(图 6a),仅杜蔚等(2006)的两个样品落入鹤壁区域。一般来说,单斜辉石的 $Cr^\#$ 比 $Mg^\#$

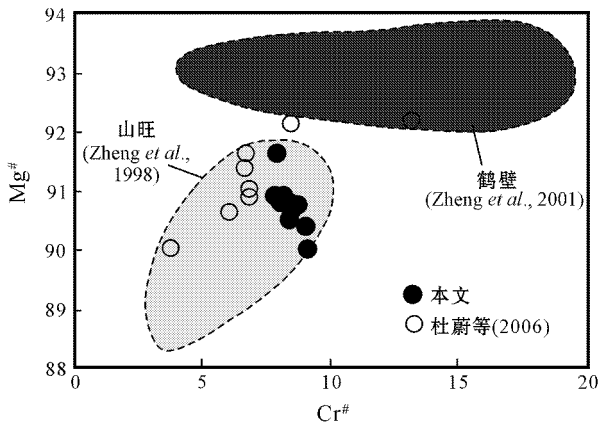


图 5 集宁橄榄岩中斜方辉石 $Mg^{\#}$ 对 $Cr^{\#}$ 图解

Fig. 5 Plots of $Mg^{\#}$ versus $Cr^{\#}$ in orthopyroxene

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。集宁宽

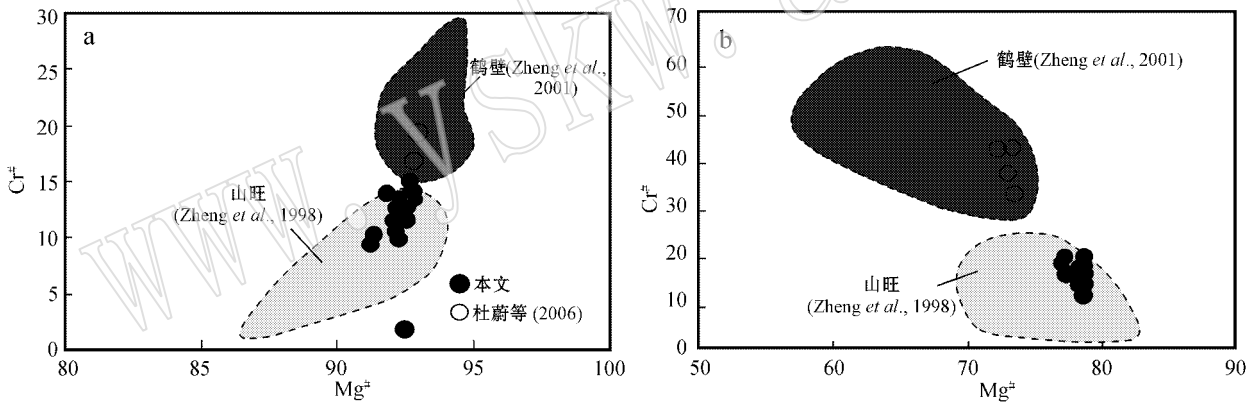


图 6 集宁橄榄岩中单斜辉石(a)和尖晶石(b)的 $Cr^{\#}$ - $Mg^{\#}$ 图解

Fig. 6 Plots of $Cr^{\#}$ versus $Mg^{\#}$ in clinopyroxene (a) and spinel (b)

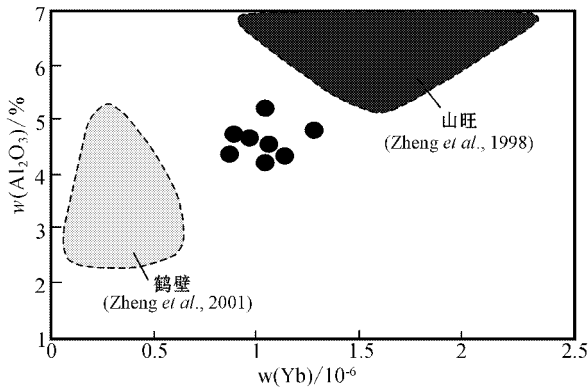


图 7 单斜辉石 Yb 对 Al_2O_3 图解

Fig. 7 Plots of Yb versus Al_2O_3 in clinopyroxene

的 $Cr^{\#}$ 范围(图 6a)反映出该区岩石圈地幔包含着经历了不同熔融程度抽取的地幔。

集宁单斜辉石中的适度不相容元素 Al_2O_3 与 Yb 有较明显的正相关性, Al_2O_3 与 Yb 含量介于鹤壁与山旺之间(图 7)。

集宁单斜辉石的相容元素 Co、Ni 丰度分别为 $18.3 \times 10^{-6} \sim 26.6 \times 10^{-6}$ 、 $299.6 \times 10^{-6} \sim 410.4 \times 10^{-6}$, 普遍低于鹤壁橄榄岩中的单斜辉石。与鹤壁样品相比, 集宁单斜辉石中不相容元素 La、Sr 含量较低且变化范围较窄, 与山旺样品较一致。总体看来, 集宁相对于鹤壁具有低 La、Ce、Sr、Nb 和 La/Yb 的特点, 大多与山旺的范围值重叠(图 8)。

集宁单斜辉石的稀土元素总量(ΣREE)变化范围大($8.9 \times 10^{-6} \sim 36 \times 10^{-6}$) ($(La/Yb)_n = 0.18 \sim 3.53$)。球粒陨石标准化配分曲线可分为 3 种类型: (I) LREE 弱富集、HREE 平坦型; ($(La/Yb)_n = 0.18 \sim 1.57$) ($(Ho/Yb)_n = 0.26 \sim 0.33$) LREE 负斜率展布,

不同样品的轻重稀土元素分异程度不同, 其中 SYT4、SYT14、SYT15 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; 从 MREE 到 Yb 随着元素不相容程度的增加, 标准化后元素含量逐渐降低, 形成平滑曲线, 有明显的 Nb 和 Ti 的负异常, 其中 SYT14、SYT15 具有明显的 Ta、Zr、Hf、Ti 等 HFSE 负异常(图 9a、9b)。 (II) LREE 先亏损后弱富集型: 仅样品 SYT10 表现为此类型, ΣREE 变化于 $9.9 \times 10^{-6} \sim 16.2 \times 10^{-6}$ 之间, 具有明显的 Nb、Ta 和 Ti 负异常, Zr、Hf 的弱负异常(图 9a、9b)。 (III) REE 平坦型: SYT7 具有平坦的稀土元素配分模式 ($(La/Yb)_n = 4.0 \sim 4.3$), 反映其受地幔交代最弱(图 9c); 其具有明显的 Nb 负异常, Th、

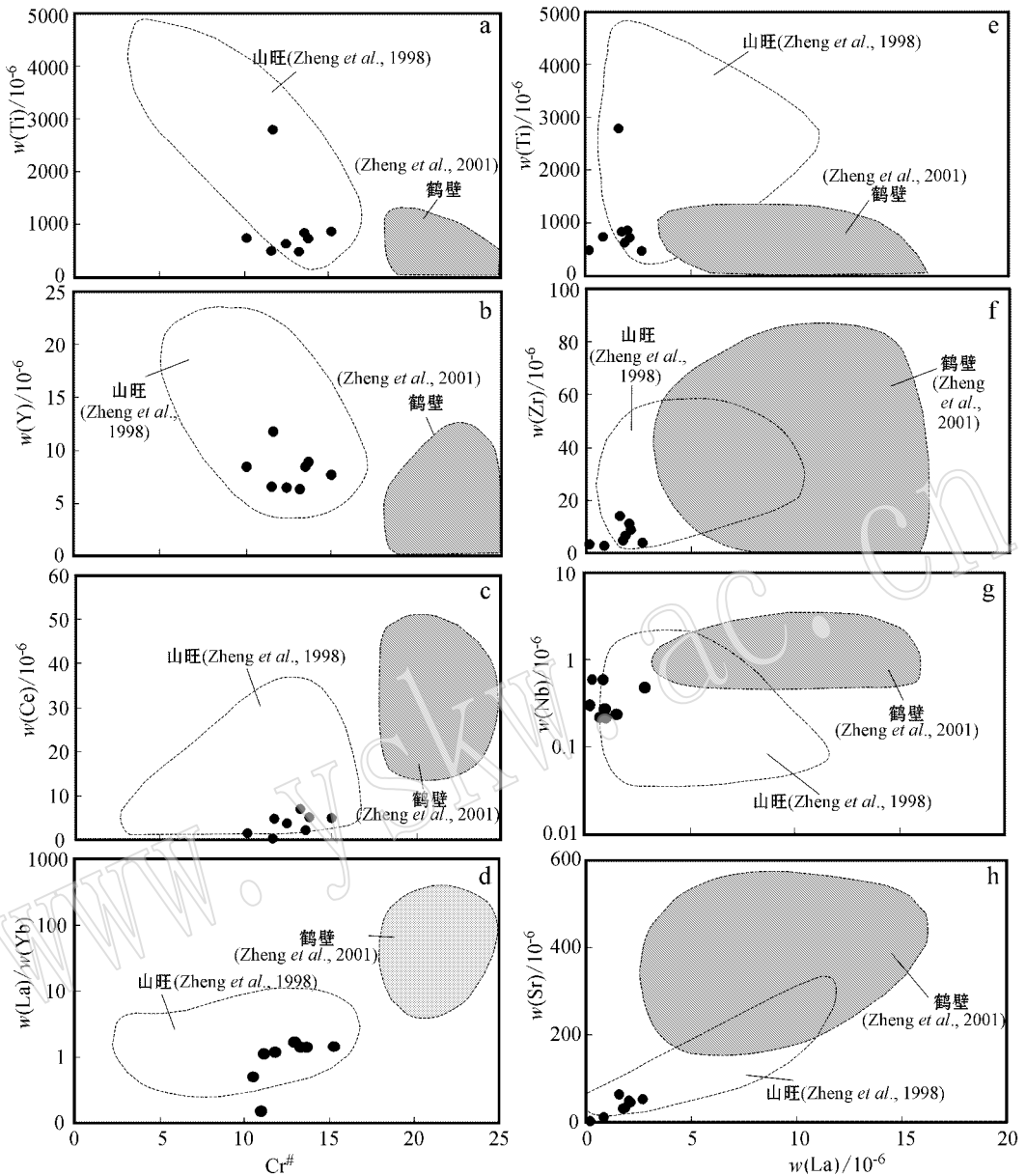


图 8 单斜辉石 $Cr^{\#}$ 对 Ti (a) Y (b) Ce (c) La/Yb (d) 和 La 对 Ti (e) Zr (f) Nb (g) Sr (h) 图解

Fig. 8 Plots of $Cr^{\#}$ versus Ti (a), Y (b), Ce (c) and La/Yb (d) and La versus Ti (e), Zr (f), Nb (g) and Sr (h) in clinopyroxene

U 正异常。

4.4 尖晶石

集宁尖晶石中的 MgO 含量为 18.3%~21.8% , $Mg^{\#}$ 变化范围为 77.0~78.5 , Al_2O_3 为 49.6%~55.6% , $Cr^{\#}$ 为 14.1~19.6。绝大部分样品投入了代表新生地幔的山旺样品区域中,仅有杜蔚等(2006)的 4 个样品投到了代表古老地幔性质的鹤壁样品中(图 6b)。

4.5 平衡温度

地幔的温度估计对于研究上地幔的物理状态、

流变学特征(Ave Lallmant *et al.*, 1980; 何永年等, 1986)以及上地幔物质结构乃至深部作用过程(Witt and Seck, 1987; 刘若新, 1990)都具有十分重要的意义。平衡温度一般被认为是橄榄岩在被玄武岩捕获时的岩石圈地幔的温度状态。对集宁橄榄岩分别用二辉石温度计(Wells, 1977)、斜方辉石的 Ca 温度计(Brey and Köhler, 1990)以及尖晶石-斜方辉石(Sachtleben and Seck, 1981)温度计进行温度计算,得出的温度相近,其平衡温度为 712~956℃,集中于 850~950℃ 附近(表 6),该范围与二辉石温度计

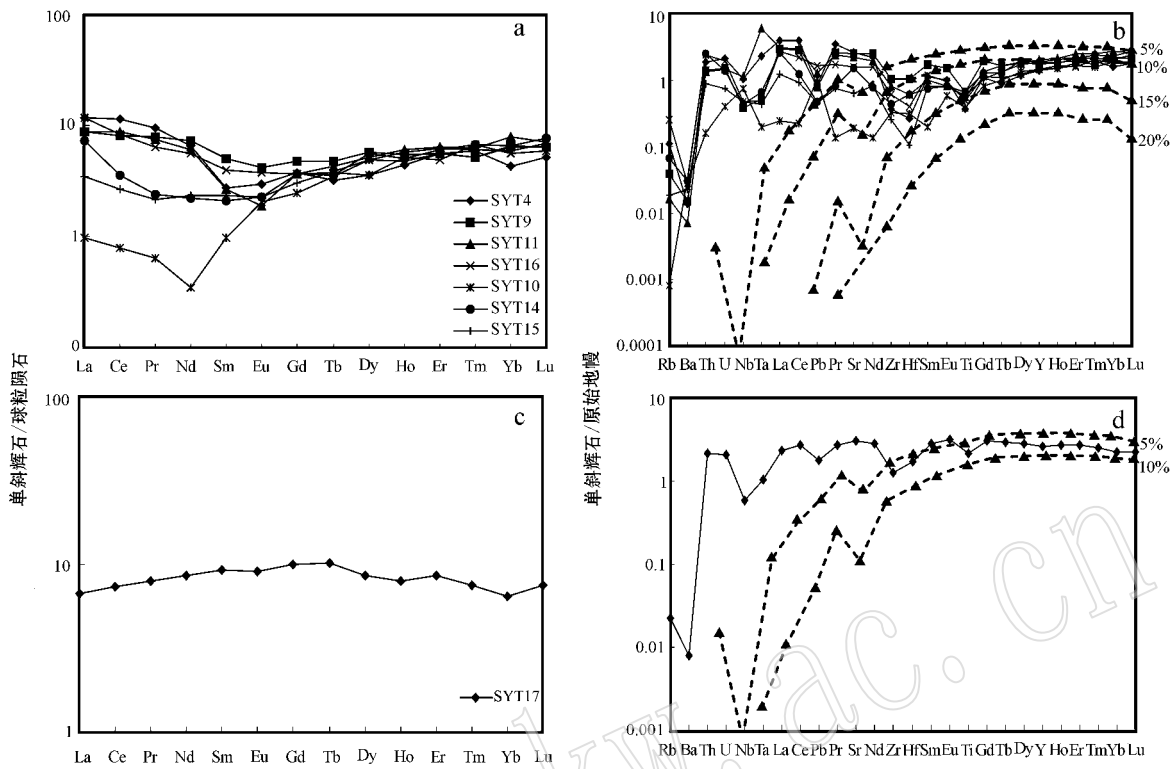


图 9 集宁单斜辉石稀土和微量元素配分模式(标准化值根据 Sun 和 McDonough, 1989)
 Fig. 9 REE and trace element patterns of clinopyroxenes from Jining peridotitic xenoliths(values of normalization after Sun and McDonough, 1989)

表 6 集宁橄榄岩包体平衡温度

Table 6 Equilibrium temperature estimates of Jining peridotite xenoliths

样品 编号	T(Wells)	T(BK)	T(SS _a)	T(SS _b)
	Opx-Cpx	Ca in Opx	Sp-Opx	Sp-Opx
SYT1	892	847	911	921
SYT2	839	788	900	910
SYT3	902	913	885	896
SYT4	880	753	959	956
SYT5	917	901	875	876
SYT6	926	914	897	901
SYT9	846	684		
SYT10	878	771	933	931
SYT11	852	712		
SYT12	929	903	932	932
SYT14	922	887	932	933
SYT15	862	716	927	928
SYT16	882	798		
SYT17	917	946	911	914
SYT18	910	884	896	904
SYT19	899	917	914	925
SYT20	925	897	898	905

T(Wells): 二辉石温度计(Wells, 1977); T(BK): 斜方辉石的 Ca 温度计(Brey and Köhler, 1990); T(SS _a) T(SS _b): 二辉石温度计和尖晶石-斜方辉石温度计, Fe 为全铁和 Fe 为 Fe³⁺(Sackleben and Seck, 1981)

(Wells, 1977)估计一致,我们把它理解为所研究橄榄岩被捕获时的平衡温度。

5 讨论

5.1 岩石圈地幔部分熔融

以橄榄岩为主体所构成的岩石圈地幔通常被认为是原始地幔经过不同部分熔融程度抽取玄武岩浆作用之后的残留物。自然界发生的熔融作用多是部分熔融过程,这种过程有两种极端情况:一是平衡部分熔融或批式熔融(batch melting),另一种是分离熔融(fractional melting)。前者是整个熔融过程中,微量元素在固相和熔体之间一直保持平衡,直到有足够的熔体聚集从熔融带移出。后者是在熔融发生时,连续地从残余固相中产生熔体。由于地幔橄榄岩中的单斜辉石含有丰富的深部作用和构造背景信息,特别是单斜辉石的微量元素特征通常可以反映全岩的微量元素特征(郑建平等, 2003),因此选择不同时代和地质背景的地幔橄榄岩,在详细岩相学研究基础上进行单斜辉石成分特别是微量元素的研究

和对比,有助于揭示东部岩石圈地幔演化过程中岩石圈巨厚减薄的机制。

在地幔熔融作用过程中,相对于橄榄石和斜方辉石,橄榄岩中的单斜辉石、尖晶石等含Al矿物相常首先被熔融。此外,由于元素相容性差异,在地幔部分熔融的再平衡过程中,Cr相对于Al、Mg相对于Fe更多的残留在矿物中。因此,橄榄石、单斜辉石的 $Mg^{\#} [Mg/(Mg+Fe)]$ 以及尖晶石的 $Cr^{\#} [Cr/(Cr+Al)]$ 常被用于判断地幔性质。经历了高程度熔融的太古宙克拉通岩石圈地幔(显示难熔特点)有较高比例的方辉橄榄岩,即使是二辉橄榄岩也具有单斜辉石含量低、橄榄石和单斜辉石的 $Mg^{\#}$ 高、尖晶石 $Cr^{\#}$ 高的特点;而显生宙地幔特征恰好相反(郑建平等, 2006)。

集宁橄榄岩矿物化学及单斜辉石LREE的配分特征(图9a)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 $K_d^Y = 0.42$ 、 $K_d^{Yb} = 0.40$ (Norman, 1998)和原始地幔组分(McDonough and Sun, 1995)所模拟计算的集宁橄榄岩大多数经历了5%~10%的部分熔融作用,主要落入山旺和鹤壁的过渡区域,仅个别样品靠近鹤壁区域(图10a)。另外,根据Ti-Yb相关图解,利用 $K_d^{Ti} = 0.1$ 进行模拟,得出了相似的地幔部分熔融程度(图10b),并与由尖晶石 $Cr^{\#}$ 所计算的部分熔融程度(3.62%~10.14%,见表1)一致。这说明新生代内蒙古集宁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,该地区岩石圈地幔既有饱满地幔,又存在过渡类型地幔。

5.2 地幔交代作用

以橄榄岩为主体所构成的岩石圈地幔在漫长的深部地质演化过程中可能经受了后期的交代作用影响。全岩或组成矿物的成分可在一定程度上反映出地幔性质与深部作用过程(郑建平等, 2007)。在无水“干”体系的四矿物相橄榄岩中,单斜辉石由于熔点低而通常记录着丰富的部分熔融作用和地幔交代作用信息(Blundy and Dalton, 2000),因此,单斜辉石微量元素及其关系特征是地幔“隐”交代作用发生与否、交代介质判别的有效指标(Zheng *et al.*, 1998, 2001)。集宁单斜辉石LREE富集型配分型式及大部分样品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、

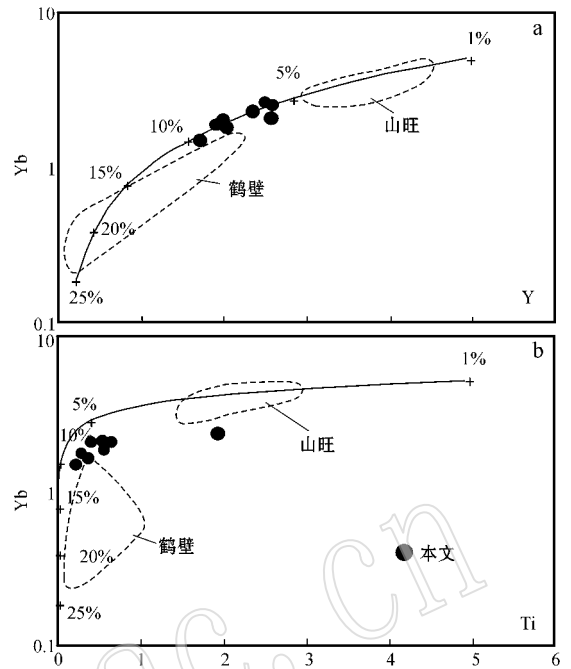


图10 集宁单斜辉石原始地幔标准化的分离熔融模拟

Fig. 10 Modeling of Jining clinopyroxene composition using primitive mantle-normalized abundance

Hf、Ti等HFSE元素负异常, Th、U正异常。由于玄武岩不具有HFSE亏损的特征(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。不相容元素及高度不相容元素由于容易受到地幔熔融抽取或地幔交代作用的改造, 因此这些元素能够更有效地反映地幔交代作用的性质和强度。其中 $(La/Yb)_0$ 和Ti/Eu的关系图解常被用以区分地幔交代中的常见介质碳酸岩岩浆与硅酸盐熔体; 高 $(La/Yb)_0$ 、低Ti/Eu多与碳酸岩熔体交代作用有关, 相反则体现硅酸盐熔体的交代作用(Coltorti *et al.*, 1999)。图11显示本文所研究橄榄岩全部落在硅酸盐交代区域, 前人的研究样品(杜蔚等, 2006)也多为硅酸盐熔/流体交代介质, 说明集宁地区岩石圈地幔与山旺地区类似, 都主要经历了硅酸盐熔/流体的交代作用, 而鹤壁岩石圈地幔则主要以碳酸盐交代作用为主, 显示该区所经历的深部地幔交代作用明显不同于古老岩石圈地幔。

5.3 华北东部不均一地幔置换作用

岩石圈减薄是中国东部地质演化的基本事实, 目前国内外学术界对于古生代到新生代岩石圈地幔性质发生的这一变化已达成共识, 但在描述这一巨大反差时却有岩石圈或下地壳拆沉(邓晋福等,

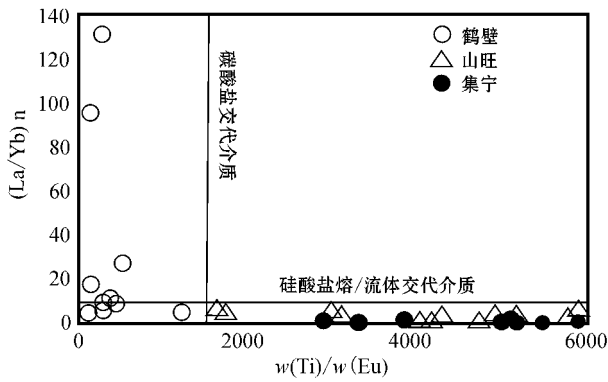


图 11 集宁单斜辉石的 Ti/Eu 对 $(La/Yb)_n$ 图解

Fig. 11 Plot of Ti/Eu versus $(La/Yb)_n$ in clinopyroxene from Jining xenoliths

1996 吴福元等, 2003; Gao *et al.*, 2004) 软流圈侵蚀(徐义刚, 1999; Fan *et al.*, 2000, 2001; Xu, 2001) 和地幔置换(Zheng *et al.*, 1998; Gao *et al.*, 2002; 张宏福等, 2004) 等多种解释。前者强调岩石圈或下地壳重物质下沉是主因, 着重物理过程, 软流圈侵蚀则强调软流圈轻物质上涌为主导, 侧重化学过程(郑建平等, 2007)。地幔的伸展作用在岩石圈减薄过程中地位也逐渐受到重视(郑建平等, 2007)。但是拆沉作用不能很好地解释华北内部古老难熔地幔与新生地幔并存或大量过渡类型地幔存在的事实(Zheng *et al.*, 2007)。

从岩石圈地幔性质角度看, 华北东部橄榄岩包体所表现出的新、老地幔共存、分布不均匀的特征(Zheng *et al.*, 2007) 可能是软流圈物质对古老岩石圈地幔的不均一侵蚀导致了东部岩石圈的剧烈减薄(郑建平, 1999)。集宁橄榄岩也显示该区存在不同性质的岩石圈地幔, 如橄榄石 $Mg^{\#}$ 所反映的大部分样品落入元古宙范围内, 只有少量的样品落入太古宙区域边缘(图 12)。

由于目前没有合适的尖晶石二辉橄榄岩地质压力计, 所以无法对包体的形成压力做定量估计, 只能进行温度的估算。平衡温度一般被认为是橄榄岩在被玄武岩捕获时的岩石圈地幔的温度。集宁橄榄岩包体平衡温度为 $850 \sim 956^{\circ}\text{C}$, 这一结果与用 BKN90 所计算的汉诺坝地区的温度范围 $935 \sim 1055^{\circ}\text{C}$ 比较接近(Rudnick *et al.*, 2004), 大体上反映了华北克拉通北缘岩石圈地幔尖晶石相部分的温度条件。据 Mercier 和 Nicola(1975) 的方法估算的集宁尖晶石二辉橄榄岩包体所记录的压力多集中于 $1.5 \sim 1.8 \text{ GPa}$, 所估算的温度为 $958 \sim 1094^{\circ}\text{C}$, 比 BM85 和

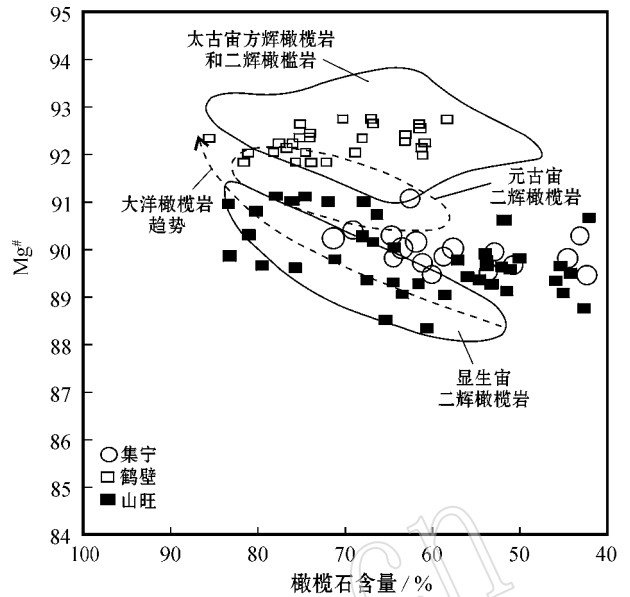


图 12 华北东部橄榄岩中橄榄石含量对 $Mg^{\#}$ 图解

Fig. 12 Plots of olivine content versus $Mg^{\#}$ of peridotites from east North China

BKN90 的计算结果略高(杜蔚等, 2006), 这可能与新生代时期华北克拉通北缘的软流层物质上涌、岩石圈相应减薄的构造环境有关(徐义刚, 2004)。

同地区、同时代寄主岩石所含的地幔橄榄岩包体平衡温度的高低可以大致反映其来源深度(O'Reilly and Griffin, 1996)。集宁橄榄岩与山旺和阳原的橄榄岩相比具有较低的平衡温度, 而且与山旺和阳原橄榄石一样, 集宁橄榄石 $Mg^{\#}$ 与平衡温度没有一定的相关性, 并且饱满的橄榄岩与过渡的橄榄岩的平衡温度是交叉的, 特别是有些饱满的橄榄岩具有比过渡地幔更低的平衡温度(图 13)。如果简单地认为岩石圈减薄是软流圈物质上涌对古老岩石圈地幔的侵蚀, 那么新生的岩石圈地幔应该来源较深, 而古老的岩石圈地幔应该来源较浅。橄榄岩的模式年龄与橄榄石 $Mg^{\#}$ 有较好的正相关性, 表明橄榄石 $Mg^{\#}$ 越高记录着越老的形成年龄, 明显反映出持续的熔-岩相互作用改造过程(Zhang *et al.*, 2002; Zhang, 2005; Zheng *et al.*, 2007)。橄榄石 $Mg^{\#}$ 与模式年龄有一定的正相关性(陈曦等, 2009), 而与温度无关, 表明软流圈物质对古老岩石圈地幔的侵蚀作用是不均匀的。因此集宁岩石圈地幔是新生地幔物质对古老地幔不均匀、混合和置换的结果, 这为华北岩石圈地幔不规则的先大幅度减薄、后小幅度增生增厚的地幔侵蚀置换模型(Zheng *et al.*, 2007; 郑

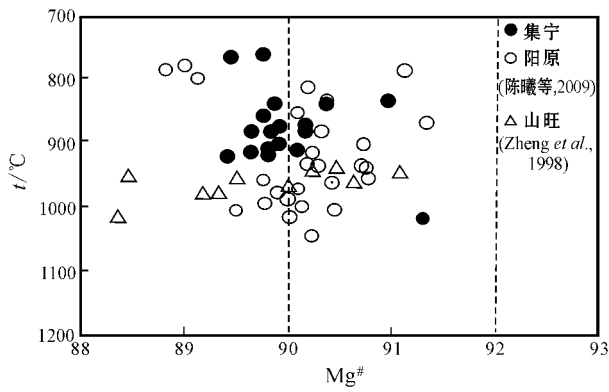


图 13 集宁橄榄石 $Mg^{\#}$ 对橄榄岩平衡温度图解

Fig. 13 Plots of $Mg^{\#}$ versus temperature in Jining peridotitic xenoliths

建平, 2009) 提供了进一步的解释。

6 结论

内蒙古集宁橄榄岩包体主要是尖晶石二辉橄榄岩。橄榄石的 $Mg^{\#}$ 为 89.4~91.4, 同时部分熔融程度估算也表明华北内部山带以西汉诺坝西南部的新生代时岩石圈饱满(部分熔融程度 < 5%)和过渡型地幔(部分熔融程度 5%~10%)共存, 并且主要经历了硅酸盐熔/流体的交代作用。平衡温度与橄榄岩的饱满或亏损程度之间没有明显的关系, 显示岩石圈地幔中不存在分层现象。集宁橄榄岩包体的矿物主量元素及单斜辉石微量元素性质表明研究区岩石圈地幔应为上涌的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不均匀置换的结果。

致谢 研究工作得到了国家自然科学基金项目(90714002 和 40821061)的支持, 郑曙工程师和刘勇胜教授在电子探针测试和激光微量元素分析方面给予了许多帮助, 特此感谢!

References

Ave Lallmant H G, Mercier J C, Carter N L, *et al.* 1980. Rheology of the upper mantle: inferences from peridotite xenoliths [J]. *Tectonophysics*, 70: 85~113.

Blundy J and Dalton J. 2000. Experimental comparison of trace element partitioning between clinopyroxene and melt in carbonate and silicate systems, and implications for mantle metasomatism [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 139: 356~371.

Brey G and Köhler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase iherzolites. II: New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers [J]. *J. Petrol.*, 31: 1352~1378.

Chen Daogong, Zhi Xiachen, Li Binxian, *et al.* 1997. Nd, Sr and Pb Isotopic Compositions and their Petrogenetic Information of Pyroxenite Xenoliths from Hannuoba basal [J]. *Geochemica*, 26(1): 1~21 (in Chinese with English abstract).

Chen Xi and Zheng Jianping. 2009. Mineral chemistry of peridotite xenoliths in Yangyuan Cenozoic basalts: Significance for lithospheric mantle evolution beneath the North China Craton [J]. *Earth Science*, 34(1): 203~219 (in Chinese with English abstract).

Coltorti M, Bonadiman C, Hinton R W, *et al.* 1999. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: evidence from clinopyroxene and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean [J]. *J. Petrol.*, 40: 133~165.

Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, *et al.* 1996. Continental Roots—Plume Tectonics of China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Du Wei, Han Baofu, Zhang Wenhui, *et al.* 2006. The discovery of peridotite xenoliths and megacrysts in Jining, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 13~23 (in Chinese with English abstract).

Fan W M, Guo F, Wang Y J, *et al.* 2001. Post-Orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 26(9~10): 733~746.

Fan W M, Zhang H F, Baker J, *et al.* 2000. On and off the North China Craton: where is the Archean keel [J]. *J. Petrol.*, 41: 933~950.

Feng J L, Xie M Z, Zhang H, *et al.* 1982. Hannuoba basalt and deep-source xenoliths [J]. *Journal of Hebei College of Geology*, 1~2: 45~63 (in Chinese).

Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, *et al.* 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3~4): 307~322.

Gao S, Liu X M, Yuan H L, *et al.* 2002. Determination of forty major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostand Newslett*, 26(2): 181~195.

Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton [J]. *Nature*, 432: 892~897.

Griffin W L, Zhang A, O'Reilly S Y, *et al.* 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton [A]. Flower M, Chung S L, Luo C H, *et al.* *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia* [C]. *Geodynamics Series 27*, American Geophysical Union, Washington D C, 107~126.

Harte B. 1977. Chemical variations in upper mantle nodules from southern African kimberlites [J]. *J. Petrol.*, 85: 279~288.

He Yongnian, Lin Chuanyong and Shi Lanbin. 1986. Some physical state of the upper mantle features contrast between Northeast China

- and North China in : from the information of mantle xenoliths [J]. Earthquake Research in China , 22 (2) : 16 ~ 23 (in Chinese).
- 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 [J]. Nature , 410 : 677 ~ 680.
- Li Tianfu , Ma Hongwen and Bai Zhiming. 1999. Temperature and pressure states of spinel-garnet transition zone beneath Hannuoba area [J]. China University of Geosciences , 13 (1) : 66 ~ 72 (in Chinese with English abstract).
- Liu Congqiang , Xie Guanghong and Zeng T Z Z. 1996. REE and Sr and Nd isotope geochemistry of mantle xenoliths from basalts in Hannuoba [J]. Acta Petrologica Sinica , 12 (3) : 382 ~ 389 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruoxin. 1990. China Chronology and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks [M]. Beijing : Earthquake Press (in Chinese).
- Liu Ruoxin , Fan Qicheng and Sun Jianzhong. 1985. Research of the garnet lherzolite xenoliths in China several parts [J]. Acta Petrologica Sinica , 1 (4) : 24 ~ 33 (in Chinese).
- Liu Yongsheng , Gao Shan , Liu Xiaoming , *et al.* 2004. Zircon geochronology of the low- ϵ Nd intermediate granulite xenoliths from Damaping , Hannuoba , China [J]. Geochemica , 33 (3) : 261 ~ 268 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang. 1987. Mantle Petrology [M]. Wuhan : China University of Geosciences Press , 92 ~ 105 (in Chinese).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. Chem. Geol. , 120 : 223 ~ 253.
- Menzies M A , Fan W M and Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of >120 km of Archean lithosphere , Sino-Korean Craton , China [A]. Prichard H M , Alabaster T , Harris N B W , *et al.* Magmatic Processes and Plate Tectonics [C]. Geological Society of London Special Publication , 76 : 71 ~ 81.
- Mercier J and Nicolas A. 1975. Textures and fabrics of uppermantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts [J]. J. Petrol. , 16 : 454 ~ 487.
- Norman M D. 1998. Melting and metasomatism in the continental lithosphere : Laser ablation ICPMS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia [J]. Contrib. Mineral. Petrol. , 130 : 240 ~ 255.
- O'Reilly S Y and Griffin W F. 1996. 4-D lithosphere mapping : methodology and example [J]. Tectonophysics , 262 (1) : 3 ~ 18.
- Rudnick R L , Gao S , Ling W L , *et al.* 2004. Petrology and geochemical of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia , North China Craton [J]. Lithos , 77 (9) : 609 ~ 637.
- Sachtchen T and Seck H A. 1981. Chemical control of Al-solubility in orthopyroxene and its implications on pyroxene geothermometry [J]. Contrib. Mineral. Petrol. , 78 : 157 ~ 165.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : implication for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Oceanic Basins [C]. Geological Society of London , Special Publication , 313 ~ 346.
- Tatsumoto M , Basu A , Huang W K , *et al.* 1992. Sr , Nd and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of eastern China : enriched components EMI and EMII in subcontinental lithosphere [J]. Earth and Planetary Science Letters , 113 : 107 ~ 128.
- Wells P R A. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems [J]. Contrib. Mineral. Petrol. , 62 : 129 ~ 139.
- Wilde S A , Zhou X H , Nemchin A A , *et al.* 2003. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton : a consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia [J]. Geology , 31 : 817 ~ 820.
- Witt G E and Seck H A. 1987. Temperature history of sheared mantle xenoliths from the west Eifel , West Germany : evidence for mantle diapirism beneath the Rhenish Massif [J]. J. Petrol. , 28 : 475 ~ 493.
- Wu Fuyuan , Ge Wenchun , Sun Deyou , *et al.* 2003. Discussion on the Lithospheric Thinning in Eastern China [J]. Earth Science Frontiers , 10 (3) : 51 ~ 60 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 1999. Roles of Thermo-mechanic and chemical erosion in continental lithospheric thinning [J]. Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry , 18 (1) : 1 ~ 5 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China : evidence , timing and mechanism [J]. Physics and Chemistry of the Earth (A) , 26 (9 ~ 10) : 747 ~ 757.
- Xu Yigang. 2004. Lithospheric thinning beneath North China : a temporal and spatial perspective [J]. Geological Journal of China University , 10 (3) : 324 ~ 331 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G , Blusztajn J , Ma J L , *et al.* 2007. Late Archean to Early Proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China craton : Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan and Fans [J]. Lithos , 102 : 25 ~ 42.
- Zhang H F. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction : a case of Sino-Korean craton [J]. Earth and Planetary Science Letters , 237 : 768 ~ 780.
- Zhang H F , Sun M , Zhou X H , *et al.* 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton : Evidence from major- , trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts [J]. Contrib. Mineral. Petrol. , 144 : 241 ~ 253.
- Zhang Hongfu , Ying Jifeng , Xu Ping , *et al.* 2004. Mesozoic basalt in the mantle olivine xenocrysts : the inspiration from the replacement process of lithospheric mantle [J]. China Science Bulletin , 49 (8) : 784 ~ 789 (in Chinese).
- Zhang Wenhui and Han Baofu. 2006. K-Ar chronology and geochemistry of Jining Cenozoic basalts , Inner Mongolia , and geodynamic implication [J]. Acta Petrologica Sinica , 22 (6) : 1597 ~ 1607 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C , Wide S A , Wood P A , *et al.* 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton : Lithological geochemical structural and P-T path constraint and tectonic evolution [J]. Precambrian Research , 107 : 45 ~ 73.

- Zheng Jianping. 1999. Meso-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning in Eastern China[M]. China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Zheng Jianping. 2009. Comparison of mantle-derived materials from different spatiotemporal settings: Implications for destructive and accretional processes of the North China Craton[J]. China Science Bulletin, 54: 1990~2007 (in Chinese).
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71: 5203~5225.
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, Yu Chunmei, et al. 2003. Mantle replacement: evidence from comparison in trace elements between peridotite and diopside from refractory and fertile mantle, North China[J]. China University of Geosciences Press, 28(3): 235~240 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, Yu Chunmei, et al. 2006. Peridotitic petrochemistry of the Eastern North China: significance for lithospheric mantle evolution[J]. Earth Science, 31(1): 49~56 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, Yu Chunmei, et al. 2007. Physical and chemical processes of the destruction of the North China Craton: evidences from peridotite[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 26(4): 327~335 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. International Geology Review, 40: 471~499.
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution[J]. Lithos, 57: 43~66.
- 冯家麟, 谢漫泽, 张红, 等. 1982. 汉诺坝玄武岩及其深源包体[J]. 河北地质学院学报, 1~2: 45~63.
- 何永年, 林传勇, 史兰斌. 1986. 我国东北与华北上地幔某些物理状态特征对比: 来自幔源包体的信息[J]. 中国地震, 2(2): 16~23.
- 李天福, 马鸿文, 白志民. 1999. 汉诺坝地区上地幔尖晶石石榴石相转变带温压条件[J]. 现代地质, 13(1): 66~72.
- 刘丛强, 解广轰, 增田彰正. 1996. 汉诺坝玄武岩中地幔捕虏体 REE 和 Sr, Nd 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 12(3): 382~389.
- 刘若新. 1990. 中国新生代火山岩年代学与地球化学[M]. 北京: 地震出版社.
- 刘若新, 樊祺诚, 孙建中. 1985. 中国几个地方的石榴石二辉橄榄岩捕虏体研究[J]. 岩石学报, 1(4): 24~33.
- 刘勇胜, 高山, 柳小明, 等. 2004. 汉诺坝大麻坪低 ϵ_{Nd} 中性麻粒岩包体单颗粒锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地球化学, 33(3): 261~268.
- 路凤香. 1987. 地幔岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 92~105.
- 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[J]. 地学前缘, 10(3): 51~60.
- 徐义刚. 1999. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄[J]. 矿物岩石地球化学通报, 18(1): 1~5.
- 徐义刚. 2004. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征[J]. 高校地质学报, 10(3): 324~331.
- 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[J]. 科学通报, 49(8): 784~789.
- 张文慧, 韩宝福. 2006. 内蒙古集宁新生代玄武岩的 K-Ar 年代学和地球化学及其深部动力学意义[J]. 岩石学报, 22(6): 1597~1607.
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄[M]. 中国地质大学出版社.
- 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[J]. 科学通报, 54: 1990~2007.
- 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 等. 2003. 地幔置换作用: 华北两类橄榄岩及其透辉石微量元素对比证据[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 28(3): 235~240.
- 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 等. 2006. 华北东部橄榄岩岩石学特征及其岩石圈地幔演化意义[J]. 地球科学, 31(1): 49~56.
- 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 等. 2007. 华北克拉通破坏的物理、化学过程: 地幔橄榄岩证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 16(4): 327~335.

附中文参考文献

- 陈道公, 支霞臣, 李彬贤, 等. 1997. 汉诺坝玄武岩中辉石岩类包体 Nd, Sr, Pb 同位素及其成因信息[J]. 地球化学, 26(1): 1~21.
- 陈曦, 郑建平. 2009. 河北阳原新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体矿物化学: 华北岩石圈地幔演化意义[J]. 地球科学, 34(1): 203~219.
- 邓晋福, 赵海岭, 莫宣学, 等. 1996. 中国大陆根-柱构造: 大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社.
- 杜蔚, 韩宝福, 张文慧, 等. 2006. 内蒙古集宁新生代玄武岩中橄榄岩包体和巨晶的发现及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(1): 13~