

# 汉诺坝玄武岩中熔体-捕虏体相互作用初步研究

杜星星 樊祺诚

(中国地震局地质研究所,北京 100029)

**摘要:**汉诺坝新生代玄武岩捕获的地幔橄榄岩及其解体矿物橄榄石、单斜辉石、斜方辉石捕虏晶,普遍发育反应边结构,提供了玄武岩浆在上升穿越岩石圈地幔过程中橄榄岩-熔体相互作用的重要信息。橄榄石和单斜辉石捕虏晶反应边的成分变化一致,由核部富镁向边部富铁变化,趋同于玄武岩中相应斑晶的成分。斜方辉石捕虏晶反应边一般由橄榄石+单斜辉石+玻璃构成,多为双层结构,反应边矿物橄榄石、单斜辉石较相应的地幔矿物富铁,其富硅、碱的中酸性玻璃成分,为中国东部地幔矿物包裹体中存在的富硅、碱熔体的来源提供了重要信息。同时发现橄榄岩捕虏体中尖晶石颜色、成分的变化与温度的关系。地幔矿物捕虏晶反应边结构(非平衡结构)得以保存,暗示了玄武岩浆的快速上升。而大规模的熔体-捕虏体相互作用,改变着岩石圈地幔的性质。

**关键词:**熔体-捕虏体相互作用 捕虏晶 反应边 岩石圈地幔 玄武岩 汉诺坝

中图分类号: P588.14<sup>+</sup>5; P574.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)04-0377-10

## A preliminary study of the melt-xenolith interaction in Hannuoba basalt

DU Xing-xing and FAN Qi-cheng

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

**Abstract:** During the migration of basaltic magma through the lithosphere mantle, the interaction between melt and peridotite inevitably took place and led to the compositional variation of the lithosphere mantle. Mantle peridotite and its disaggregated minerals such as olivine (Ol), clinopyroxene (Cpx) and orthopyroxene (Opx) xenocrysts were captured by the Cenozoic basalt in Hannuoba. The xenocrysts usually have the reaction rim structure, which provides important information about the melt-xenolith interaction during the migration of basaltic magma through the lithosphere mantle. The xenocrysts in basalt are on the whole perfectly round, embayed or serrated in shape and have characteristic reaction rim structure which distinguishes them from relatively euhedral and small phenocrysts in basalt. Based on microscopic petrographic observations and electron microprobe analyses of xenocrysts and their reaction rims, this paper deals tentatively with the melt-xenolith interaction. The rims of Ol and Cpx xenocrysts show similar compositional variations from the Mg-rich core to the Fe-rich rim. The composition of the outer part of the reaction rim tends to be close to the composition of the phenocryst in basalt. Olivine composition changes from the core (Fo 88~90) to the rim (Fo 68~72). Clinopyroxene composition changes from Mg<sup>#</sup>90 to Mg<sup>#</sup>74, with the corresponding variation of diopside in the core to salite in the rim. Usually, the reaction rim of Opx with double-layered structure consists of Ol + Cpx + Glass. The composition of Ol and Cpx in the Opx reaction rim is rich in Fe relative to its mantle counterpart. Meanwhile, the reaction rim minerals will become richer in Fe and poorer in Mg with the Opx xenocrysts approaching the host basalt. The glass constituent rich in silicon and alkali (the content of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O is respectively 64%~67%, 18%~19%, 5%~7% and 6%~9%) in the Opx reaction rim offers important

收稿日期: 2009-11-11; 修订日期: 2009-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772038)

作者简介: 杜星星(1985-),女,博士研究生,主要从事火山与地球内部化学研究, E-mail: xingdudx@163.com

information concerning the origin of Si- and alkali-rich melt inclusions present in mantle minerals in eastern China. It is thought that Si- and alkali-rich melt might have resulted from the reaction between basaltic magma and Opx in peridotite, i. e., the reaction basaltic magma (Si-poor melt) + Opx  $\rightarrow$  Si-rich melt + Ol + Cpx. It is also found that the variation of color and composition of the spinel (Sp) in one peridotite xenolith is related to temperature: when the temperature rises, the content of Cr in Sp increases, so does Al in melt. The preservation of the reaction rim structure or disequilibrium structure in xenocrysts implies rapid uprising of the host basalt. The extensive melt-xenolith interaction inevitably changed the properties of the lithosphere mantle.

**Key words:** melt-xenolith interaction; xenocryst; reaction rim; lithosphere mantle; basalt; Hannuoba

在玄武岩浆上升穿越岩石圈地幔的过程中橄榄岩-熔体的相互作用不可避免,也是岩石圈地幔组成转变的重要方式。Kelemen 等(1992)通过对全球各种来源地幔橄榄岩捕虏体的岩石学矿物学和主微量元素的研究发现,橄榄岩-熔体的反应消耗橄榄石生成辉石,这一现象在古老岩石圈地幔中相当普遍。这已陆续被中国东部中、新生代火山岩中的地幔橄榄岩捕虏体研究所证实(韩秀伶等,1992;Zhang *et al.*, 2004;汤艳杰等,2004;裴福萍等,2004;Liu *et al.*, 2005;Zhang, 2005;张宏福,2006;王微等,2006,2007;于宋月等,2007)。

华北克拉通北部的汉诺坝地区新生代玄武岩中含有丰富的地幔岩石捕虏体,有关玄武岩及其中各种类型捕虏体岩石的岩石矿物学、地球化学研究层出不穷,可是关于该地区玄武岩浆与捕虏体岩石之间相互作用关系的研究却不多见。本文在对汉诺坝地幔岩石捕虏体岩相观察的基础上,进行了矿物及其反应边电子探针分析,初步探讨熔体-捕虏体岩石的相互作用,揭示华北岩石圈演化的信息。

## 1 熔体-捕虏体相互作用的岩相学特征

汉诺坝新生代玄武岩中常见地幔岩石捕虏体或其解体的捕虏晶矿物,它们作为玄武岩浆上升过程中捕获的偶然捕虏体(或称包体),在手标本上有时可观察到被高温玄武质岩浆烘烤形成的淬火边。显微镜下捕虏晶常被溶蚀成浑圆状、港湾状或锯齿状,并且形成了反应边或反应环带结构(图1),区别于玄武岩中相对自形、较小的斑晶矿物。

通过显微镜和电子探针背散射观察,发现橄榄石和单斜辉石捕虏晶具有明显的环带结构,从核部到边部灰度渐变过渡(图1a、1b、1c、1d),反映了铁含量的逐渐增加。斜方辉石捕虏晶的反应边相对复杂,一般可分为内外两层(图1e、1f、1h),内层由细粒

单斜辉石(Cpx)和橄榄石(Ol)垂直于斜方辉石主晶边界呈齿状交生,其间有少量玻璃(Glass)充填;从内层到外层Ol逐渐增多,Cpx逐渐减少直至消失;外层由相对粗大的Ol颗粒组成,Ol粒间充填有零星细粒的钛磁铁矿(Mt-Ups)。

显微镜下,还可观察到采自大麻坪的一块被玄武岩捕获的尖晶石橄榄岩(WD952),由靠近玄武岩的一侧向橄榄岩内部,尖晶石颜色由深变浅(深棕红色 $\rightarrow$ 棕红色 $\rightarrow$ 黄褐色 $\rightarrow$ 黄色),寓含受玄武岩浆烘烤导致了尖晶石成分的渐变。

## 2 矿物化学特征

捕虏晶及其反应边矿物测试分析在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成,电子探针仪器型号JXA-8100,工作条件为,加速电压15 kV,电子束流10 nA,束斑3  $\mu\text{m}$ 。电子探针分析结果列于表1~表5。

### 2.1 橄榄石

根据橄榄石捕虏晶从核部到边部的成分变化特征(表1、图2),可以将橄榄石反应环带分为以下两种类型。

第一类为常见的橄榄石正环带,从核部 $\rightarrow$ 幔部 $\rightarrow$ 边部,FeO含量先缓慢增加再大幅度升高,MgO含量变化反之,SiO<sub>2</sub>含量和NiO含量逐渐减少,MnO含量和CaO含量总体趋势增加。在主量元素对Fo的相关图(图2)上可以看到,SiO<sub>2</sub>、MgO和NiO对Fo呈良好的正相关关系,而FeO、MnO和CaO含量和Fo则呈良好的负相关关系。矿物成分由核部(Fo 88~90)和幔部(Fo 83~85)的贵橄榄石变为边部的透铁橄榄石(Fo 68~72),趋近于玄武岩中橄榄石斑晶成分(Fo 68~69)。

另一类橄榄石反应环带较少见,是一种复杂环带(08JSB01-1 2),橄榄石从核部 $\rightarrow$ 幔部 $\rightarrow$ 边部,FeO

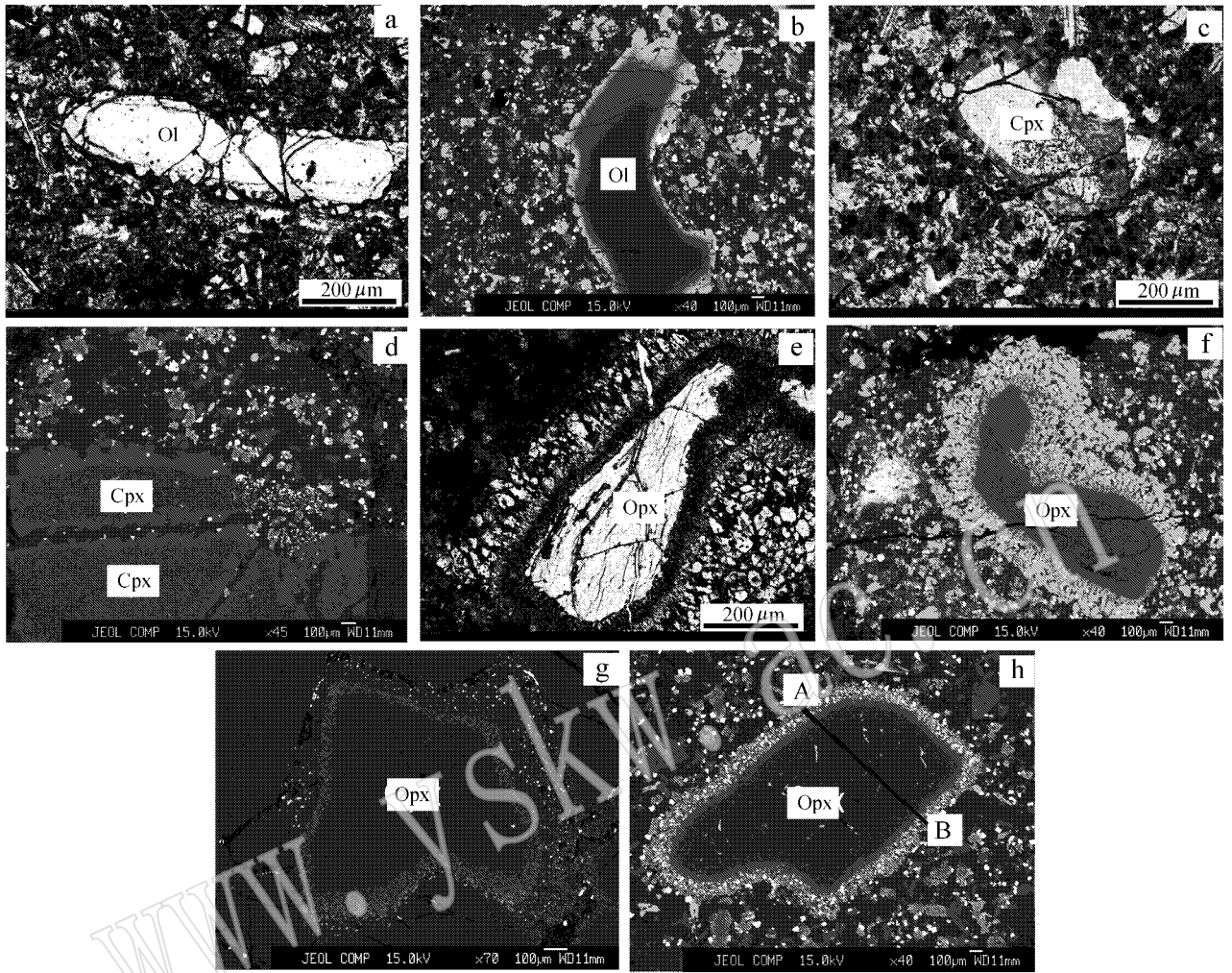


图 1 熔体-捕虏晶反应关系显微照片(a, c, e)和电子探针背散射图像(b, d, f, g, h)

Fig. 1 Microphotographs (a, c, e) and backscattered electron images (b, d, f, g, h) of the reaction relationship

between melt and xenocrysts

a, b—橄榄石反应边; c, d—单斜辉石反应边; e, f, g, h—斜方辉石反应边; h 中 AB 为测试的线剖面

a, b—reaction rim of Ol; c, d—reaction rim of Cpx; e, f, g, h—reaction rim of Opx; AB in h shows the analyzed profile

含量先大幅度增加后再有所降低, MgO 含量变化反之, SiO<sub>2</sub> 含量和 NiO 含量逐渐减少, MnO 含量和 CaO 含量变化为先增后减。矿物成分由核部的贵橄榄石 (Fo 89~90) 突变到幔部的透铁橄榄石 (Fo 69~71), 边部的 Fo 又增大变化为贵橄榄石 (Fo 75~77)。橄榄石反应边成分的波动推测与玄武岩浆成分的波动有关, 可能反映了后期原始岩浆的再补给过程 (黄小龙等 2007)。

### 2.2 斜方辉石

斜方辉石捕虏晶的反应边组成为 Ol + Cpx + 玻璃, 捕虏晶及其反应边电子探针分析结果列于表 2 和表 3。反应边内层和过渡层的橄榄石成分为贵橄

榄石 (Fo 84~87), 低于地幔橄榄岩中的橄榄石成分 (一般 Fo 90±); 外层橄榄石与玄武岩中橄榄石斑晶成分相当, 均为透铁橄榄石 (Fo 67~75, 一般 <70)。斜方辉石反应边内层的单斜辉石为顽透辉石, 较地幔橄榄岩中的透辉石富 SiO<sub>2</sub>、MgO 和 FeO, 贫 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。过渡层单斜辉石成分变化较广, 但都趋近于玄武岩中次透辉石斑晶成分 (图 3)。斜方辉石反应边中的橄榄石和单斜辉石成分变化都具有明显的 FeO 和 MgO 相关关系 (图 4)。对斜方辉石捕虏晶 (08JSB01) 的线剖面 (图 1h A—B) 分析, 发现捕虏晶内部成分无变化, 同时也证实了上述反应边矿物的成分变化。另外发现当玄武岩浆沿裂隙灌入捕虏体

表 1 橄榄石捕虏晶反应边电子探针分析结果

w<sub>B</sub>/%

Table 1 Electron microprobe analyses of the reaction rim of Ol xenocrysts

样品号		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Total	Fo
08JSB01	1-c	41.05	0.05	0.00	0.01	10.39	0.12	48.40	0.09	0.41	100.52	89.2
	1-m	36.29	0.12	0.10	0.11	27.70	0.52	33.86	0.48	0.17	99.35	68.5
	1-r	37.83	0.02	0.00	0.03	20.92	0.27	39.03	0.18	0.21	98.49	76.9
	2-c	39.86	0.03	0.06	0.01	9.13	0.15	48.44	0.06	0.38	98.12	90.4
	2-m	37.72	0.05	0.00	0.06	26.66	0.47	35.94	0.39	0.18	101.47	70.6
	2-r	37.65	0.00	0.04	0.03	22.97	0.40	38.43	0.34	0.14	100.00	74.9
	3-c	38.54	0.00	0.15	0.02	10.83	0.18	46.64	0.09	0.40	96.85	88.5
	3-m	39.86	0.02	0.00	0.05	14.51	0.11	45.10	0.05	0.27	99.97	84.7
	3-r	36.31	0.02	0.00	0.01	26.27	0.48	34.59	0.43	0.05	98.16	70.1
p	36.80	0.06	0.01	0.03	28.10	0.39	35.10	0.43	0.08	101.00	69.0	
CJ956	1-c	40.71	0.00	0.05	0.00	11.17	0.13	47.41	0.04	0.45	99.96	88.3
	1-m	39.62	0.00	0.00	0.02	15.90	0.13	44.31	0.04	0.36	100.38	83.2
	1-r	36.59	0.10	0.02	0.03	25.23	0.49	35.77	0.42	0.11	98.76	71.6
	p	37.51	0.05	0.00	0.04	28.88	0.44	34.19	0.40	0.11	101.62	67.8
HDW7	1-c	41.35	0.00	0.00	0.03	9.79	0.09	49.11	0.05	0.33	100.75	89.9
	1-r	36.75	0.27	0.01	0.02	28.10	0.46	33.16	0.32	0.13	99.22	67.8
	2-c	39.39	0.00	0.42	0.03	8.88	0.13	45.16	0.04	0.38	94.43	90.1
	2-m	38.15	0.04	0.35	0.00	14.05	0.15	42.18	0.05	0.28	95.25	84.3
	2-r	36.92	0.00	0.22	0.05	27.37	0.47	32.92	0.44	0.09	98.48	68.2
p	37.11	0.02	0.00	0.04	27.16	0.44	34.04	0.46	0.06	99.33	69.1	

08JSB01 和 CJ956 采自接沙坝, HDW7 采自大麻坪; c—核部, m—幔部, r—边部, p—斑晶, 下同。

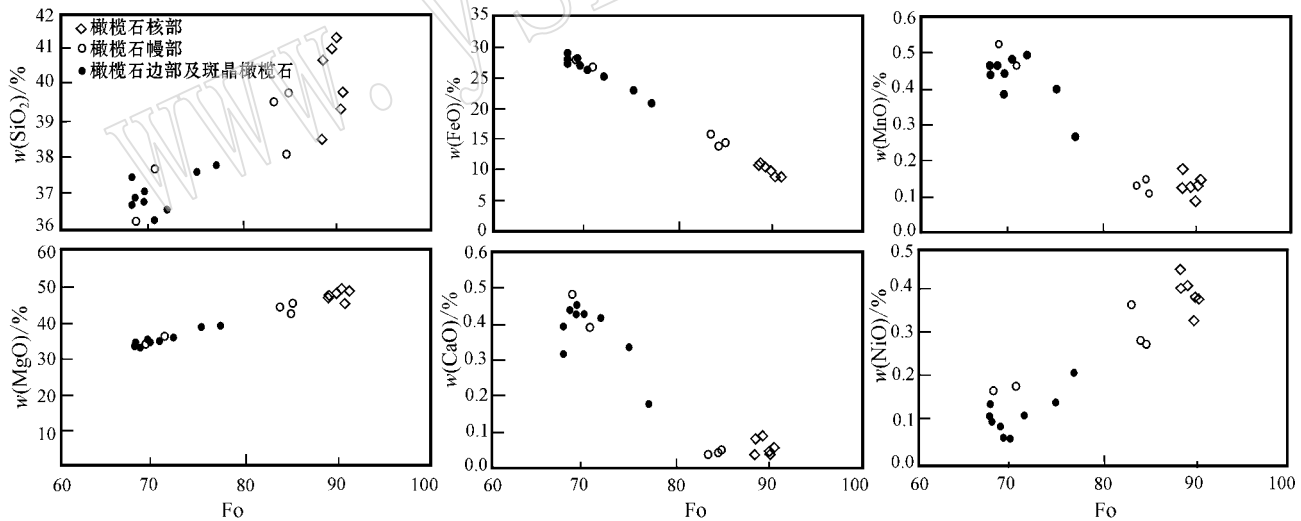


图 2 橄榄石捕虏晶反应边成分变化图

Fig. 2 Chemical variations of the reaction rim of Ol xenocrysts

岩石内部,只形成斜方辉石单层结构反应边(图 1g),其矿物组成依然为 Ol + Cpx + 玻璃,反应边中 3 种矿物交替排列。反应边中 Ol 成分高于双层结构反应边内层的 Ol 成分( $Fo < 87$ ),为最富镁的贵橄榄石( $Fo > 88$ ),其他反应产物与双层结构反应边内层的相同。

反应边内层零星填隙的玻璃成分富 SiO<sub>2</sub>、

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O(分别为 64% ~ 67%、18% ~ 19%、5% ~ 7%、6% ~ 9%),特别富 K<sub>2</sub>O 且 K<sub>2</sub>O > Na<sub>2</sub>O 这类似于早先报道的中国东部地幔矿物包裹体中的富硅、碱熔体的成分(Fan *et al.*, 1997, 2006)暗示了它们之间可能具成因联系。反应边外层零星细粒钛磁铁矿的 TiO<sub>2</sub>、FeO、MgO 含量分别约为 26%、69% 和 3%,与玄武岩中钛磁铁矿成分

表 2 斜方辉石捕虏晶反应边电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of the reaction rim of Opx xenocrysts

矿物	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	Total	Fe <sup>o</sup> /Mg <sup>#</sup>	W <sub>Fe</sub> /An	Er/Ab	Fs <sup>o</sup> /Or
08 SE01																
1	Op	56.16	0.07	3.79	5.85	0.10	32.26	0.65	0.12	0.00	0.16	99.62	90.8	1.3	89.4	9.3
1-i	Cpx	55.42	0.20	0.68	3.88	0.14	18.46	19.71	0.65	0.00	0.00	100.25	89.4	40.6	52.9	6.5
1-t	Cpx	51.83	1.13	0.82	7.37	0.18	14.71	20.96	0.64	0.01	0.11	100.81	78.1	44.3	43.2	12.5
1-o	Ol	35.91	0.13	0.07	27.99	0.48	32.59	0.36	0.05	0.01	0.06	97.88	67.5			
1-o	Mt-Ups	0.15	25.76	0.50	68.41	0.64	3.10	0.14	0.00	0.00	0.06	100.33				
2	Op	55.63	0.06	0.57	5.74	0.13	32.81	0.67	0.05	0.00	0.10	99.22	91.1	1.3	89.7	9.0
2-i	Ol	40.12	0.00	0.12	15.42	0.19	44.45	0.20	0.03	0.02	0.20	100.78	83.7			
2-i	Cpx	55.67	0.16	0.80	4.31	0.12	18.45	19.32	0.61	0.06	0.05	100.22	88.4	39.9	53.0	7.1
2-t	Cpx	49.05	2.33	0.45	7.40	0.13	12.75	22.36	0.56	0.05	0.03	100.94	75.4	48.6	38.6	12.8
2-o	Ol	36.56	0.08	0.06	26.84	0.46	34.31	0.48	0.02	0.00	0.13	98.95	69.5			
2-o	Mt-Ups	0.07	26.52	0.65	69.29	0.59	3.45	0.08	0.07	0.00	0.02	101.86				
p	Ol	36.80	0.06	0.01	28.10	0.39	35.10	0.43	0.01	0.00	0.08	101.01	69.0			
	Cpx	46.19	3.24	0.04	8.42	0.08	11.76	21.97	0.56	0.00	0.03	99.13	71.3	48.9	36.4	14.8
	Pl	52.81	0.15	0.04	29.57	0.01	0.07	12.36	4.21	0.32	0.00	100.09	60.7	60.7	37.4	1.9
	Mt-Ups	0.12	27.30	0.20	70.47	0.64	2.11	0.07	0.08	0.01	0.06	101.70				
HDW7																
1	Op	55.26	0.05	0.56	7.61	0.19	31.94	0.37	0.03	0.03	0.09	100.08	88.2	0.7	87.3	12.0
1-i	Ol	40.70	0.00	0.01	13.90	0.20	45.46	0.13	0.00	0.00	0.21	100.60	85.4			
1-i	Cpx	55.52	0.02	1.59	4.50	0.16	19.22	17.48	0.73	0.01	0.06	99.87	88.4	36.5	55.9	7.6
1-i	Glass	66.12	0.22	0.07	17.78	0.99	0.36	0.09	4.92	9.36	0.00	99.91				
1-t	Cpx	52.96	0.81	0.56	5.32	0.08	15.44	22.11	0.56	0.01	0.06	99.78	83.8	46.3	44.9	8.8
1-o	Ol	37.53	0.05	0.03	22.29	0.38	38.29	0.25	0.02	0.03	0.04	98.94	75.4			
2	Op	56.30	0.13	0.47	5.87	0.12	32.78	0.60	0.10	0.00	0.11	100.01	90.9	1.2	89.6	9.2
2-i	Cpx	55.21	0.19	0.83	4.17	0.18	18.48	19.31	0.63	0.03	0.01	99.56	88.8	39.9	53.1	7.0
2-i	Glass	66.93	0.02	0.00	18.30	0.01	0.29	0.15	6.53	6.83	0.06	100.21				
2-i	Ol	40.82	0.02	0.07	13.50	0.23	46.03	0.18	0.01	0.04	0.17	101.07	85.9	0.8	58.8	40.5
p	Ol	37.11	0.02	0.00	27.16	0.44	34.04	0.46	0.00	0.02	0.06	99.34	69.1			

续表 2

Continued Table 2

矿物	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	Total	Fe/Mg <sup>#</sup>	Wt%/An	En/Ab	Fs/Or
08DM15																
1	OpX	56.14	0.07	0.48	3.63	5.71	0.11	33.32	0.50	0.06	0.10	100.11	91.2	1.0	90.2	8.8
1-i	Cpx	54.76	0.17	1.07	0.58	4.27	0.09	18.42	19.11	0.67	0.07	99.22	88.5	39.7	53.2	7.1
1-i	Ol	40.49	0.02	0.11	0.01	14.83	0.20	44.77	0.25	0.05	0.12	100.84	84.3			
1-o	Ol	36.77	0.04	0.03	0.01	29.52	0.48	33.52	0.43	0.06	0.12	101.00	66.9			
p	Ol	36.78	0.10	0.05	0.00	28.44	0.44	34.01	0.39	0.03	0.09	100.33	68.1			
	Cpx	50.19	2.21	0.07	2.93	7.21	0.08	13.33	21.99	0.71	0.04	98.76	76.7	47.6	40.1	12.3
08JSEB03																
1	OpX	56.58	0.11	0.78	3.10	5.28	0.16	32.96	1.10	0.09	0.22	100.38	91.7	2.2	89.5	8.3
	Ol	41.41	0.08	0.09	0.07	10.06	0.20	47.00	0.39	0.02	0.27	99.58	89.3			
	Cpx	54.43	0.60	1.02	1.01	2.88	0.08	17.49	21.99	0.64	0.02	100.17	91.5	45.2	50.0	4.7
	Glass	64.04	0.76	0.00	19.39	0.61	0.02	0.44	1.21	6.33	0.02	99.09				
CJ955																
1	OpX	55.39	0.20	0.27	5.07	6.43	0.14	31.45	0.81	0.11	0.10	99.97	89.7	1.6	88.0	10.3
	Ol	40.87	0.07	0.07	0.00	10.96	0.18	46.71	0.12	0.00	0.17	99.14	88.4			
	Cpx	53.67	1.44	0.76	1.74	3.18	0.01	17.93	20.76	0.48	0.04	100.02	90.9	43.1	51.7	5.2
	Glass	66.36	0.55	0.00	18.94	0.29	0.02	0.00	0.50	6.38	0.02	100.04				
WD9535																
p	Ol	35.71	0.07	0.02	0.03	30.36	0.58	30.91	0.47	0.00	0.11	98.27	64.5			
	Cpx	47.10	2.81	0.06	6.27	8.66	0.14	11.77	22.02	0.60	0.00	99.43	70.8	48.7	36.2	15.2
	Pl	53.85	0.11	0.01	28.49	0.49	0.00	0.01	10.91	4.77	0.01	98.93	54.9	54.9	43.4	1.7

08JSEB03 和 CJ955 采自接沙坝, 08DM15 和 WD9535 采自大麻坪, 其中 08JSEB03 和 CJ955 为橄榄岩内部斜方辉石反应边; i—内层, t—过渡层, o—外层, p—斑晶, Mg<sup>#</sup> = 100 Mg/(Mg + Fe), 下同。

表 3 斜方辉石捕虏晶剖面电子探针分析结果

$\omega_B/\%$

Table 3 Electron microprobe analyses of the section composition of Opx xenocrysts

矿物	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	NiO	Total	Fe/Mg <sup>#</sup>	Wo/An	En/Ab	Fs/Or	
1	Ol-o	36.00	0.04	0.03	0.02	27.44	0.40	34.39	0.41	0.02	0.08	98.83	69.1			
2	Ol-o	35.71	0.14	0.21	0.45	27.38	0.46	33.74	0.39	0.01	0.12	98.61	68.7			
3	Mt-Ups	0.30	24.56	1.96	2.86	65.92	0.54	4.08	0.09	0.01	0.15	100.47				
4	Cpx-t	48.56	2.38	0.41	5.90	7.71	0.10	12.89	21.99	0.60	0.03	100.57	74.9	47.8	39.0	13.2
5	Cpx-i	54.51	0.10	0.96	0.52	4.36	0.19	18.67	19.17	0.62	0.02	99.12	88.4	39.4	53.3	7.3
6	Opx	56.26	0.06	0.53	3.48	5.72	0.11	33.27	0.73	0.05	0.11	100.32	91.2	1.4	89.8	8.8
7	Opx	56.09	0.06	0.47	3.46	5.79	0.14	33.30	0.73	0.09	0.10	100.23	91.1	1.4	89.6	9.0
8	Opx	56.11	0.04	0.53	3.31	5.77	0.15	33.08	0.65	0.09	0.07	99.80	91.1	1.3	89.7	9.0
9	Opx	55.83	0.01	0.64	3.36	5.79	0.14	33.74	0.70	0.07	0.16	100.44	91.2	1.3	89.8	8.9
10	Opx	56.41	0.06	0.64	3.51	6.01	0.10	33.25	0.75	0.07	0.10	100.90	90.8	1.5	89.3	9.2
11	Opx	56.24	0.08	0.55	3.44	5.96	0.12	33.27	0.74	0.07	0.13	100.60	90.9	1.4	89.4	9.2
12	Opx	56.32	0.10	0.51	3.45	5.72	0.12	33.23	0.74	0.10	0.13	100.42	91.2	1.4	89.7	8.8
13	Opx	56.03	0.09	0.57	3.41	6.03	0.10	33.35	0.73	0.06	0.14	100.51	90.8	1.4	89.4	9.2
14	Opx	56.41	0.05	0.61	3.38	5.74	0.10	33.25	0.66	0.07	0.03	100.30	91.2	1.3	89.9	8.9
15	Opx	56.60	0.02	0.51	3.48	5.99	0.10	33.24	0.68	0.05	0.11	100.78	90.8	1.3	89.5	9.2
16	Opx	55.99	0.02	0.48	3.47	5.86	0.17	33.07	0.79	0.05	0.11	100.01	91.0	1.5	89.3	9.1
17	Opx	55.00	0.00	0.54	3.60	5.34	0.15	34.04	0.76	0.08	0.08	99.59	91.9	1.4	90.4	8.2
18	Opx	56.55	0.05	0.52	3.52	5.77	0.17	33.34	0.68	0.09	0.12	100.81	91.1	1.3	89.7	9.0
19	Opx	56.23	0.02	0.54	3.52	5.76	0.09	33.50	0.70	0.08	0.05	100.49	91.2	1.3	89.9	8.8
20	Opx	56.08	0.02	0.54	3.47	5.94	0.11	33.20	0.67	0.06	0.08	100.17	90.9	1.3	89.5	9.2
21	Opx	55.99	0.04	0.54	3.37	5.83	0.11	33.38	0.58	0.10	0.11	100.05	91.1	1.1	89.9	9.0
22	Opx	56.30	0.08	0.52	3.43	5.98	0.11	33.13	0.65	0.07	0.08	100.35	90.8	1.3	89.5	9.2
23	Opx	56.39	0.00	0.52	3.49	5.71	0.14	33.10	0.70	0.07	0.17	100.29	91.2	1.4	89.7	8.9
24	Opx	54.48	0.08	0.92	3.76	5.92	0.14	31.77	0.75	0.08	0.17	98.07	90.5	1.5	89.0	9.5
25	Opx	54.84	0.04	0.62	3.41	5.48	0.10	33.25	0.70	0.07	0.12	98.63	91.5	1.4	90.1	8.5
26	Opx	55.99	0.01	0.50	3.43	5.74	0.19	32.93	0.68	0.07	0.09	99.63	91.1	1.3	89.6	9.1
27	Opx	56.48	0.01	0.51	3.28	5.86	0.12	33.24	0.68	0.06	0.11	100.35	91.0	1.3	89.6	9.1
28	Opx	55.47	0.03	0.79	3.47	6.07	0.18	32.40	0.65	0.08	0.07	99.21	90.5	1.3	89.1	9.6
29	Opx	55.76	0.09	0.53	3.55	5.96	0.12	32.74	0.73	0.08	0.08	99.64	90.7	1.4	89.3	9.3
30	Ol-i	40.41	0.03	0.46	0.28	12.69	0.15	47.48	0.19	0.04	0.26	101.99	87.0			
31	Cpx-i	54.70	0.14	1.58	0.70	4.31	0.15	19.96	18.18	0.76	0.00	100.48	89.2	36.8	56.2	7.0
32	Cpx-t	49.98	1.69	0.45	4.32	7.08	0.06	13.59	22.14	0.54	0.00	99.85	77.4	47.5	40.5	12.0
33	Ol-o	35.65	0.89	0.20	1.13	27.87	0.44	32.58	0.38	0.03	0.12	99.29	67.6			
34	Ol-o	36.24	0.08	0.04	0.00	27.66	0.48	33.84	0.49	0.04	0.08	98.95	68.5			

A—B 分析剖面见图 1 h 相应测点 1~34。

表 4 单斜辉石捕虏晶反应边电子探针分析结果

$\omega_B/\%$

Table 4 Electron microprobe analyses of the reaction rim of Cpx xenocrysts

样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Total	Wo	En	Fs	Mg <sup>#</sup>	
08JSB01	1-c	51.36	0.69	0.37	5.45	2.95	0.10	16.06	20.22	0.89	98.07	45.0	49.7	5.3	90.7
	1-r	45.02	3.03	0.10	6.78	7.47	0.08	11.99	22.28	0.60	97.34	49.7	37.2	13.1	74.1
	2-c	53.01	0.55	0.91	3.86	2.87	0.07	15.25	21.71	1.00	99.25	48.0	46.9	5.1	90.4
	2-r	46.83	2.98	0.06	6.53	7.55	0.10	12.23	22.32	0.52	99.11	49.3	37.6	13.2	74.3
	p	46.19	3.24	0.04	6.83	8.42	0.08	11.76	21.97	0.56	99.10	48.9	36.4	14.8	71.3

表 5 橄榄岩捕虏体(WD952)中尖晶石电子探针分析结果

 $\omega_B/\%$ 

Table 5 Electron microprobe analyses of spinel composition in peridotite xenoliths

序号	颜色	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	Na <sub>2</sub> O	NiO	Total	Cr <sup>#</sup>
1	深棕红色	0.33	16.66	48.61	0.20	0.13	21.57	2.06	0.47	100.03	18.7
2	棕红色	0.28	15.84	50.11	9.64	0.26	21.76	2.00	0.10	99.99	17.5
3	黄褐色	0.20	12.78	52.81	9.15	0.00	22.28	1.78	0.54	99.54	14.0
4	黄色	0.09	9.50	56.32	9.39	0.00	23.07	1.78	0.25	100.40	10.2
5	黄色	0.11	9.31	56.52	8.65	0.00	22.83	1.70	0.59	99.71	9.9

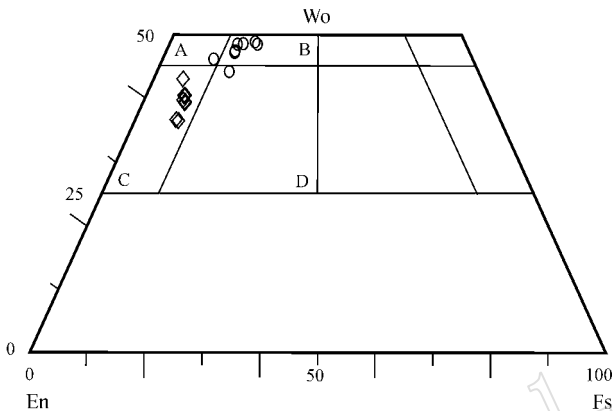
1~5 表示尖晶石从靠近玄武岩一侧向捕虏体内部颜色、成分的逐渐变化  $Cr^{\#} = 100 Cr/(Al + Cr)$ 

图 3 斜方辉石捕虏晶反应边单斜辉石成分

Fig. 3 Cpx composition of the reaction rim of Opx xenocrysts

A—透辉石; B—次透辉石; C—顽透辉石; D—普通辉石

A—diopside, B—salite, C—endiopside, D—augite

一致。除成分相同外,岩相学的观察也发现钛磁铁矿在玄武岩中分布广泛,因此可以确定它来自玄武岩浆。

### 2.3 单斜辉石

与橄榄石相比,单斜辉石捕虏晶从核部→边部,同样显示了明显的 FeO 含量增加和 MgO 含量减少(表 4)。在主量元素对  $Mg^{\#}$  相关图上,  $SiO_2$ 、MgO、 $Na_2O$  与  $Mg^{\#}$  呈较好的正相关关系,  $TiO_2$ 、 $Al_2O_3$  和 FeO 呈负相关,与 CaO 的相关性不明显。单斜辉石  $Mg^{\#}$  值从核部约 90 变化到边部约 74,矿物成分由透辉石变为次透辉石,趋近于玄武岩中次透辉石斑晶成分(图略)。

### 2.4 尖晶石

我们观察到被捕获的尖晶石橄榄岩捕虏体中尖晶石颜色、成分的逐渐变化(表 5)。从靠近玄武岩一侧向捕虏体内部(表 5 中 1→5),尖晶石颜色从深棕红色(具磁铁矿黑色边)→棕红色→黄褐色→黄色变化,其化学成分呈现明显的  $Cr_2O_3$  (16.66% → 15.84% → 12.78% → 9.50% → 9.31%) 及 FeO (10.20% → 9.64% → 9.15% → 9.39% → 8.65%) 降

低和  $MgO$  (21.57% → 21.76% → 22.28% → 23.07% → 22.83%) 及  $Al_2O_3$  (48.61% → 50.11% → 52.81% → 56.32% → 56.52%) 升高,相应的从富  $Cr^{\#}$  尖晶石向低  $Cr^{\#}$  尖晶石变化(18.7 → 17.5 → 14.0 → 10.2 → 9.9)。

## 3 讨论与结论

本文的捕虏晶为地幔橄榄岩捕虏体的解体矿物,较玄武岩中的斑晶矿物大得多,并且形态不规则,常被熔蚀成浑圆状、港湾状或锯齿状,具反应边结构。相比,玄武岩斑晶则大多表现为半自形-自形,无反应边结构。成分上捕虏晶与斑晶的  $Mg^{\#}$  也有很大差异,前者极富  $Mg^{\#}$  (约 90 ±),后者  $Mg^{\#}$  大多变化于 70 ±。Nakamura(1995)研究表明高温条件下橄榄石中的 Fe-Mg 扩散速率很快,如果要保存完好的橄榄石环带结构则要求反应进行的时间很短,即玄武岩浆的上升速度很快。在本文的研究当中不仅见到橄榄石反应环带,还保留有单斜辉石反应环带,这些不平衡结构的存在都说明反应时间并不充分,未达到矿物成分的平衡,从而间接暗示了玄武岩浆的快速上升。

橄榄石和单斜辉石捕虏晶反应边的成分变化一致,由核部富镁向边部富铁变化,同时钙也略有增加,表明矿物与玄武岩浆之间仅发生了元素的交换,并未产生新的矿物,反应的结果造成捕虏晶边部成分趋同于玄武岩斑晶成分。斜方辉石捕虏晶的反应边组成(Ol + Cpx + 玻璃)与 Shaw 和 Dingwell(2006)的观察结果一致,并得到了实验岩石学的支持(Shaw, 1999; Shaw and Dingwell, 2008),即高温条件下不饱和的硅质熔体与地幔岩会发生反应,反应的结果使橄榄石形成反应环带,斜方辉石生成反应边(Ol + Cpx + 玻璃)。同时,他还提出地幔橄榄岩捕虏体不同结构部位产出的熔体成分不同,富硅-碱熔体只见于 Opx 反应边中,这从本文的研究结果



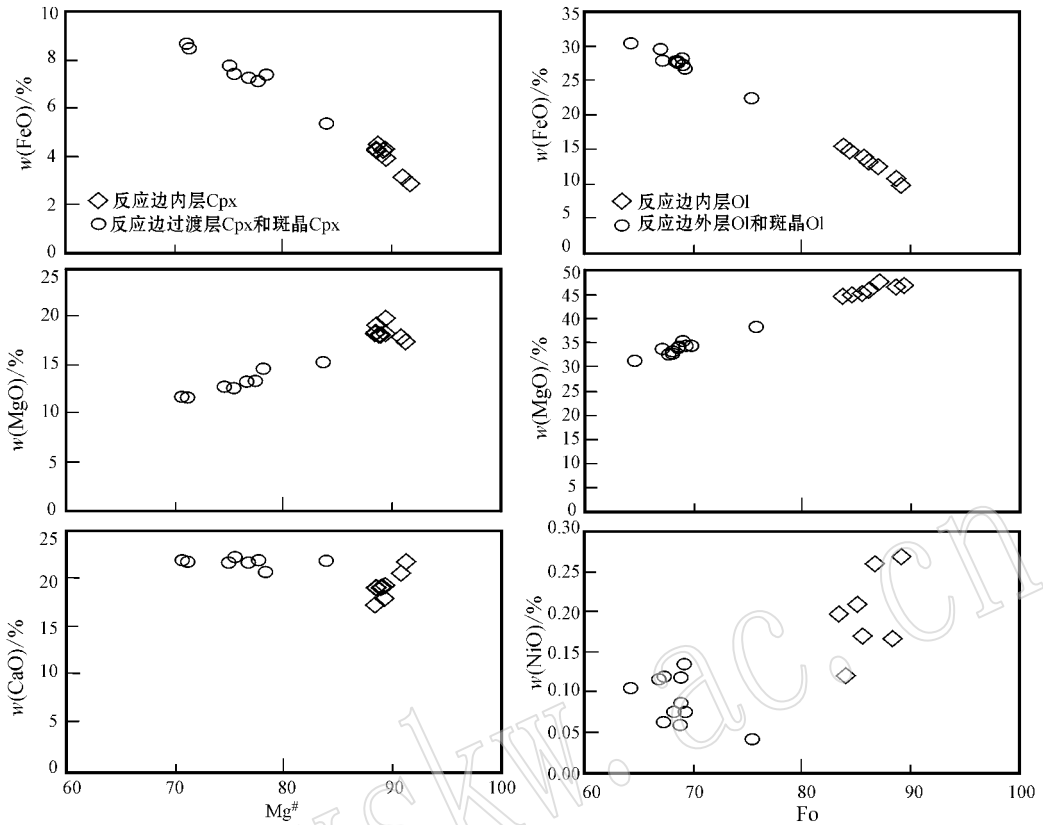


图 4 斜方辉石捕虏晶反应边橄榄石、单斜辉石成分变化图

Fig. 4 Ol and Cpx chemical variations of the reaction rim of Opx xenocrysts

也得以证实。具双层反应边结构的斜方辉石捕虏晶,其反应边内层矿物成分与橄榄岩内部斜方辉石单层反应边的矿物成分相当,揭示了熔体-捕虏体相互作用产生的反应边结构与反应边矿物成分变化受控于两者接触的温度和成分交换关系,外层矿物成分更趋同于相应的玄武岩斑晶成分。

汉诺坝以及中国东部许多地区不同类型的地幔岩矿物中都陆续发现有富硅、碱的中酸性硅酸盐熔体包裹体(Fan *et al.*, 1997, 2006; 樊祺诚等, 2008), 这些熔体的成分与玄武质熔体相差甚远,但与本文斜方辉石反应边中的熔体成分相当。由此推断这些富硅-碱熔体的形成可能就是玄武质岩浆与地幔岩中斜方辉石反应的结果,即玄武质岩浆(贫硅熔体) + Opx → 富硅熔体 + Ol + Cpx,之后富硅熔体又被捕获到矿物晶格中封存起来。这与 Shaw(1999)提出的富硅、碱的玻璃包裹体的成因为 Opx 与玄武岩浆反应的结果相一致。至于这些富硅-碱熔体是如何重新进入地幔矿物晶格当中并被封存起来形成包裹体,是值得继续探索的问题。

玄武岩浆在上升过程中与上覆岩石圈地幔橄

岩的反应十分普遍,最终结果造成了岩石圈地幔由富镁向富铁转变。如果这种反应大规模的存在,势必会改变岩石圈地幔的性质(由亏损地幔转变为富集地幔),这已成为近年来华北克拉通减薄讨论的热点。

致谢 感谢在样品电子探针分析过程中中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室毛骞和马玉光热情的帮助;感谢两位审稿人对本文提出的宝贵修改意见。

References

Fan Q C, Liu R X, Xu P, *et al.* 1997. Mid-acidic silicate melt found in continental mantle of eastern China[J]. Chinese Sciences Bulletin, 42(10): 879~880.  
 Fan Qicheng, Sui Jianli, Sun Qian, *et al.* 2008. Melt inclusions of peridotites in Weizhou Island, Northern Bay: New evidence of mantle metasomatism in subcontinent lithospheric mantle[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(11): 2495~2500 (in Chinese with English abstract).  
 Fan Q C, Sui J L, Xu P, *et al.* 2006. Si- and alkali-rich melt inclusions

- in the minerals of mantle peridotites from eastern China: Implication for lithospheric evolution [J]. *Science in China (Series D)*, 49(1): 43~49.
- Han Xiuling, Li Jiaju, Lin Chuanyong, *et al.* 1992. The zonal structure of olivine in inclusions within basalts [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 4: 363~368 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Yang Qijun, *et al.* 2007. Genesis of compositional zoning of clinopyroxene phenocrysts in the Wozhong late Eocene high-Mg ultrapotassic lavas, western Yunnan, China: Magma replenishment-mixing process [J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 250~260 (in Chinese with English abstract).
- Kelemen P B, Dick J B and Quick J E. 1992. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle [J]. *Nature*, 358: 635~641.
- Liu Y S, Gao S, Lee C-T A, *et al.* 2005. Melt-peridotite interactions: Links between garnet pyroxenite and high-Mg<sup>#</sup> signature of continental crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 234: 39~57.
- Nakamura M. 1995. Residence time and crystallization history of nickeliferous olivine phenocrysts from the northern Yatsugatake volcanoes, Central Japan: Application of a growth and diffusion model in the system Mg-Fe-Ni [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66: 81~100.
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Wang Qinghai, *et al.* 2004. Mesozoic basalt and mineral chemistry of the mantle-derived xenocrysts in Feixian, western Shandong, China: Constraints on nature of Mesozoic lithospheric mantle [J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 88~97 (in Chinese with English abstract).
- Shaw C S J. 1999. Dissolution of orthopyroxene in basanitic magma between 0.4 and 2 GPa: further implications for the origin of Si-rich alkaline glass inclusions in mantle xenoliths [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 135: 114~132.
- Shaw C S J and Dingwell D B. 2008. Experimental peridotite-melt reaction at one atmosphere: a textural and chemical study [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 155: 199~214.
- Shaw C S J, Heidelbach F and Dingwell D B. 2006. The origin of reaction textures in mantle peridotite xenoliths from Sal Island, Cape Verde: the case for "metasomatism" by the host lava [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 151: 681~697.
- Tang Yanjie, Zhang Hongfu and Ying Jifeng. 2004. High-Mg olivine xenocrysts entrained in Cenozoic basalts in central Taihang Mountains: relicts of old lithospheric mantle [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1243~1252 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Xu Wenliang, Ji Weiqiang, *et al.* 2006. Late Mesozoic and Paleogene basalts and deep-derived xenocrysts in eastern Liaoning Province, China: Constraints on nature of lithospheric mantle [J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 30~40 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Xu Wenliang, Wang Dongyan, *et al.* 2007. Caiyuanzi paleogene basalts and deep-derived xenocrysts in eastern Liaoning, China: constraints on nature and deep progress of the Cenozoic lithospheric mantle [J]. *Mineral. Petrol.*, 27(1): 63~70 (in Chinese with English abstract).
- Yu Songyue, Xu Yigang, Huang Xiaolong, *et al.* 2007. Characteristics of melt-rock reaction in Shuangliao peridotite xenoliths and their implications to mantle metasomatism [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 213~222 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu. 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 Hongfu. 2006. Peridotite-melt interaction: an important mechanism for the compositional transformation of lithospheric mantle [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 65~75 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Ying Jifeng, Xu Ping, *et al.* 2004. Mantle olivine xenocrysts entrained in Mesozoic basalts from the North China craton: Implication for replacement process of lithospheric mantle [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(9): 961~966.

## 附中文参考文献

- 樊祺诚, 隋建立, 孙谦, 等. 2008. 北部湾涠洲岛橄榄岩中熔体包裹体——大陆岩石圈地幔交代作用的新证据 [J]. *岩石学报*, 24(11): 2495~2500.
- 韩秀伶, 李家驹, 林传勇, 等. 1992. 玄武岩中包体橄榄石的分带现象 [J]. *地质科学*, 4: 363~368.
- 黄小龙, 徐义刚, 杨启军, 等. 2007. 滇西高台晚始新世高镁富钾火山岩中单斜辉石斑晶环带结构的成因: 岩浆补给-混合过程 [J]. *高校地质学报*, 13(2): 250~260.
- 裴福萍, 许文良, 王清海, 等. 2004. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约 [J]. *高校地质学报*, 10(1): 88~97.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 2004. 太行山中段新生代玄武岩中高镁橄榄石捕虏晶: 残留古老岩石圈地幔样品 [J]. *岩石学报*, 20(5): 1243~1252.
- 王微, 许文良, 纪伟强, 等. 2006. 辽东中生代晚期和古近纪玄武岩及深源捕虏晶——对岩石圈地幔性质的制约 [J]. *高校地质学报*, 12(1): 30~40.
- 王微, 许文良, 王冬艳, 等. 2007. 辽东菜园子古近纪玄武岩和深源捕虏晶: 对新生代岩石圈地幔性质及深部作用过程的制约 [J]. *矿物岩石*, 27(1): 63~70.
- 于宋月, 徐义刚, 黄小龙, 等. 2007. 吉林双辽地区橄榄岩包体中熔体-岩石作用特种及其对地幔交代作用的启示 [J]. *岩石矿物学杂志*, 26(3): 213~222.
- 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 [J]. *地学前缘*, 13(2): 65~75.