

汉诺坝捕虏体辉石岩和麻粒岩的成因探讨*

杜星星 樊祺诚

DU XingXing and FAN QiCheng

中国地震局地质研究所, 北京 100029

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

2011-06-01 收稿, 2011-08-14 改回.

Du XX and Fan QC. 2011. Discussion on genesis of pyroxenite and granulite xenoliths from Hannuoba. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10):2927–2936

Abstract The Cenozoic basalts from Hannuoba contain abundant xenoliths derived from mantle and crust. As pyroxenite and granulite xenoliths appear very similar by naked eye sometimes, it is easy to confound the two kinds of rocks. Here we present our research on the genesis of pyroxenite and granulite xenoliths through petrographical observation, mineral chemistry and trace element and Sr-Nd isotopic compositions of clinopyroxene. The results indicate that the two kinds of xenoliths are remarkably different. Granulite xenoliths have layered cumulate structure and both kinds of pyroxenes (salite and bronzite) are relatively rich in FeO and poor in MgO. Clinopyroxene in granulite xenolith is relatively enriched in REE and characterized by high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and low $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios. In contrast, pyroxenite xenoliths generally show massive structure. Diopside and bronzite-enstatite of the pyroxenite xenoliths are relatively rich in MgO and poor in FeO. Clinopyroxene in pyroxenite xenolith shows very low REE content and a REE-depleted pattern. Isotopic compositions of pyroxenite xenoliths are between those of peridotite and granulite xenoliths. The above features as a whole suggest that granulite xenoliths result from magma underplating, which was subjected to lower crustal contamination. However, the pyroxenite xenoliths, distinguished from peridotite and granulite xenoliths, are derived from enriched mantle.

Key words Xenolith; Pyroxenite; Granulite; Genetic significance; Hannuoba

摘要 汉诺坝新生代玄武岩中含有丰富的地幔和地壳岩石捕虏体,其中捕虏体辉石岩和麻粒岩由于外观上具有一定的相似性,两者容易混淆,导致研究上的误区。本文以辉石岩和麻粒岩捕虏体作为研究对象,通过岩相学观察结合矿物主元素分析、单斜辉石微量元素和 Sr-Nd 同位素分析,对两种捕虏体进行深入的研究和对比以探讨其成因意义。结果表明,上述各方面二者都存在明显的差别,捕虏体麻粒岩具有层状堆晶构造,两种辉石矿物(次透辉石和古铜辉石)相对贫 MgO 富 FeO,单斜辉石的 REE 相对富集,以高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为特征;而捕虏体辉石岩一般呈块状构造,两种辉石矿物(透辉石和古铜辉石-顽火辉石)相对富 MgO 贫 FeO,单斜辉石 REE 总量极低呈亏损模式,同位素组成上介于捕虏体橄辉岩和麻粒岩之间。捕虏体麻粒岩特征表明它是幔源岩浆底侵作用形成,岩浆受到了下地壳的混染;而捕虏体辉石岩明显不同于橄辉岩和麻粒岩的成因,来自于富集地幔。

关键词 捕虏体;辉石岩;麻粒岩;成因意义;汉诺坝

中图法分类号 P575

1 引言

位于华北克拉通北缘的汉诺坝地区因第三纪玄武岩(王慧芬等,1985;刘若新等,1992)中含有丰富的地幔和地壳捕

虏体而受到地学界的广泛关注。对于该地区地幔橄辉岩捕虏体的研究很早就已展开,并且取得了相当多的成果(冯家麟等,1982;鄂莫岚和赵大升,1987;Song and Frey,1989;刘丛强等,1996;陈绍海等,1997;Chen *et al.*,2001;Gao *et al.*,2002;Rudnick *et al.*,2004;夏琼霞等,2004;余淳梅等,2006),

* 本文受国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91014007)和面上项目(40972047)联合资助。

第一作者简介:杜星星,女,1985年生,博士研究生,岩石学专业,E-mail: xingdux@163.com

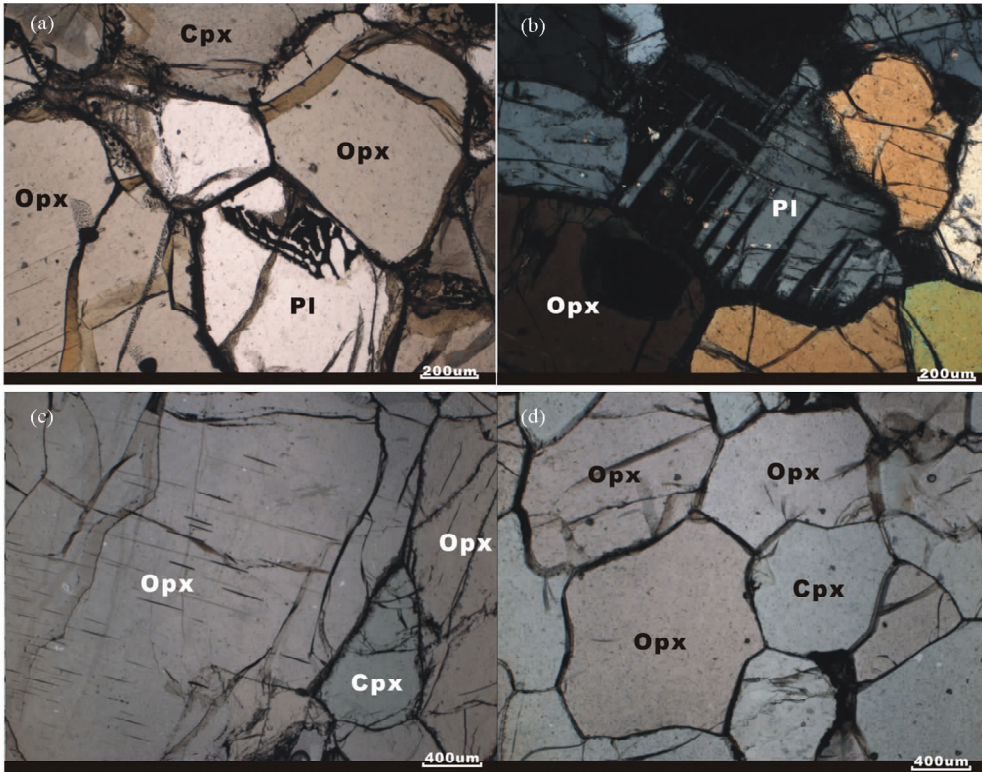


图1 汉诺坝捕虏体麻粒岩和辉石岩典型结构的显微照片

(a)-麻粒岩的花岗变晶结构(单偏光);(b)-麻粒岩中斜长石的变形双晶(正交偏光);(c)-辉石岩的原生粒状结构(单偏光);(d)-辉石岩的粒状镶嵌结构(单偏光)

Fig.1 Microphotographs of typical structure in granulite and pyroxenite xenoliths from Hannuoba

而对于非橄榄岩捕虏体如辉石岩和麻粒岩的研究则相对较少,特别是两者外观上的相似性,容易将二者混淆。

对于辉石岩捕虏体,最初是通过颜色的划分将其分为富Cr绿色辉石岩和富Al黑色辉石岩。绿色辉石岩通常认为是与尖晶石二辉橄榄岩具有相似的成因,即原始地幔经不同程度熔融后的残余(White, 1966; Jackson and Wright, 1970);而黑色辉石岩通常认为是玄武岩浆早期的堆积产物(徐义刚等, 1997; 董振信等, 1999; 黄小龙等, 2001; Xu, 2002)。从柏林和张儒媛(1982)早就提出,汉诺坝玄武岩中的部分黑色辉石岩可能相当于下地壳的麻粒岩,而并非火成成因。作者近年来也发现仅以颜色的差异并不能很好的区分不同类型的辉石岩,相反有些被认为是黑色辉石岩的岩石其实属于麻粒岩的范畴,它们只是不含或仅含极少量的长石。相对橄榄岩来说辉石岩的成因较为复杂,通常有以下几种认识,如幔源岩浆早期结晶的产物(徐义刚等, 1997; 董振信等, 1999; 黄小龙等, 2001; Xu, 2002),地幔部分熔融残余(White, 1966; Jackson and Wright, 1970),橄榄岩捕虏体与熔体/流体的反应成因(宗克清等, 2005; Liu *et al.*, 2005),橄榄岩熔出的辉石岩熔浆结晶的产物(鄂莫岚等, 1982)等。第一种观点目前得到多数学者的认可。

汉诺坝周边地区存在的太古宙麻粒岩地体(翟明国等, 1992; 郭敬辉等, 1993),以往一直被视作下地壳的代表,将古

论今的加以研究。自从20世纪90年代在汉诺坝新生代玄武岩中发现高温、年轻的麻粒岩捕虏体,并从岩浆底侵成因的观点提出其具有现今下地壳的特征(樊祺诚等, 1996, 1998),之后不同学者取得了诸多关于麻粒岩捕虏体的岩石学、地球化学和物性方面的研究成果,对现今下地壳的认识逐步提升(陈绍海等, 1998; 张国辉等, 1998a, b; Liu *et al.*, 2001, 2004; 樊祺诚等, 2002, 2005; Zhou *et al.*, 2002)。由于古老的太古宙麻粒岩地体是经历了复杂的地质演化过程才到达地表,相比之下新生代玄武岩中的麻粒岩捕虏体是通过岩浆的快速携带上升到达地表,应当更能够直接反映现今下地壳的性质。通过麻粒岩捕虏体和麻粒岩地体的对比(Rushmer, 1993; 黄小龙等, 2001; 樊祺诚等, 2005),总结认为前者才能够代表现今的下地壳,而后者只是古老下地壳的残留。因此对麻粒岩捕虏体的研究可以提供关于下地壳组成和演化过程等方面的信息。

由于捕虏体辉石岩的组成矿物是辉石,岩石类型包括二辉岩和单辉岩。捕虏体麻粒岩的主要岩石类型是麻粒岩相斜长二辉岩(樊祺诚等, 2005),组成矿物除了两种辉石外,斜长石的含量可以从多到少甚至到无,以致无异于黑色的捕虏体辉石岩。所以如果未能从岩相学方面严格加以区分,混淆了捕虏体麻粒岩和辉石岩,将这两种含辉石的岩石泛称为辉石岩,有碍于成因岩石学的研究。

本文选择了汉诺坝地区新生代玄武岩中的辉石岩和麻粒岩捕虏体作为研究对象,在岩石结构构造和岩相学观察研究基础上,结合矿物主量元素分析、单斜辉石微量元素和 Sr-Nd 同位素分析,对底侵成因的麻粒岩捕虏体和火成辉石岩捕虏体进行深入的研究和对比,探讨它们的成因及对该地区壳幔体系演化过程的意义。

2 岩相学特征

2.1 捕虏体麻粒岩

研究样品包括捕虏体斜长二辉麻粒岩和缺失斜长石的二辉麻粒岩。斜长二辉麻粒岩的矿物组合为 Opx(斜方辉石) + Cpx(单斜辉石) + Pl(斜长石),通常为中粒(1~2mm),辉石颗粒粒径一般稍大于长石,典型的花岗变晶结构(图 1a)。岩石大多具有层状堆晶构造,两种辉石和斜长石构成黑白相间的条带,部分样品也呈黑色块状。斜长石含量变化范围很广可以从 10%~90%,并且常发育有变形双晶(图 1b),可能暗示了岩石曾经历过应力作用。由于该类岩石的软弱性,常沿裂隙或矿物颗粒边界灌入一些流体或熔体,使矿物中流体/熔体包裹体发育,并见到斜方辉石边部产生反应边。一个条带状样品的辉石富集域中几乎不含长石,而长石富集域中只零星存在少量辉石颗粒,暗示了部分被误认为是黑色的辉石岩可能是条带状麻粒岩的辉石富集域。偶见样品中有极少量副矿物金红石的存在。

二辉麻粒岩是斜长二辉麻粒岩中缺失斜长石的极端情况,只有两种辉石组成,常被误当作黑色辉石岩,但手标本观察隐约可见其堆晶特征。二辉麻粒岩的矿物组合为 Opx + Cpx,中-粗粒,矿物粒度 2mm ±,由于受到风化作用矿物表面粗糙边界粗黑,单斜辉石较斜方辉石更易受风化,部分样品中矿物内部包裹体多见。二辉麻粒岩手标本颜色为黑色,样品表面常见风化的白色表皮。同种矿物单斜辉石和斜方辉石的镜下特征与斜长二辉麻粒岩中相似,而明显区别于捕虏体二辉岩。

2.2 捕虏体辉石岩

本文研究的捕虏体辉石岩包括二辉岩、橄榄二辉岩和单斜辉石岩。二辉岩呈暗绿色,由 Opx + Cpx 组成,有些可含少量尖晶石(<5%),两种辉石含量变化很大此消彼长,有时一种辉石含量<10%。含尖晶石的二辉岩都为原生粒状结构,矿物颗粒粗大,有些可达 5mm;不含尖晶石的二辉岩呈原生粒状结构-粒状镶嵌结构(图 1c, d),矿物粒度基本都>2mm,为中-粗粒结构。尖晶石随成分的变化颜色会有所不同,有褐色和暗绿色两种。二辉岩在显微镜下两种辉石极易区分,单斜辉石颜色浅绿色,斜方辉石浅红色,前者干涉色高多为 II 级颜色鲜艳,后者不超过 I 级紫红。斜方辉石颗粒中偶见出溶页理。

绿色橄榄二辉岩的矿物组合为 Opx + Cpx + Ol(橄榄石)

+ Sp(尖晶石),橄榄石含量<10%,尖晶石呈褐色含量<5%。其中辉石颗粒粒径在 2~4mm 之间,橄榄石和尖晶石呈填隙状分布在辉石粒间,粒度<2mm,部分橄榄石发生了蛇纹石化。

单斜辉石岩为黑色,矿物组成几乎全为单斜辉石,偶见极少量(<3%)的斜方辉石或尖晶石,粒状镶嵌结构,矿物粒度 2~3mm。

3 样品的处理及分析方法

样品中矿物主量元素电子探针分析实验,是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。电子探针仪器型号为 JXA-8100,工作条件为加速电压 15kV,电子束流 10nA,束斑大小 5μm。每个矿物基本上都采用至少 2~3 个点测定以求平均值。

在电子探针分析基础上,选择不同类型岩石的典型样品进行激光探针测定。激光探针测试是在中国科技大学的中国科学院壳幔物质与环境重点实验室完成,激光探针仪器型号是配有 193nm ArF-eximer 激光器的 ELAN DRC II 型 ICP-MS,激光器的基本波长为 1064nm(红外),分析时采用脉冲工作模式,频率为 10Hz,测试时激光束的束斑直径设为 90/60μm。选区通过普通光学显微镜实现,分析过程中以 NIST 610 玻璃作为标样,分析精度约 3%,准确度介于 10%~15%之间。以电子探针分析获得的单斜辉石的 CaO 含量作为内标,计算其稀土元素和微量元素含量。测试时选择至少 3~4 个单斜辉石颗粒以求平均值。

对不同类型岩石的典型样品还进行了单斜辉石的 Sr-Nd 同位素测定。实验的前处理以及测试工作都是在同位素地球化学国家重点实验室(广州)完成的。样品采用 HF + HNO₃ 混合酸溶解的方法,并以专用的阳离子交换技术进行分离。同位素比值的测定是在 MicroMass ISOPROBE 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICPMS)上进行的。

4 数据结果分析

4.1 矿物化学成分

矿物电子探针分析结果列于表 1(由于数据量较大,这里只列出代表性分析结果,感兴趣的读者可向作者询问详细结果)。捕虏体麻粒岩(包括斜长二辉麻粒岩和二辉麻粒岩)与捕虏体辉石岩(包括二辉岩、橄榄二辉岩和单斜辉石岩)的单斜辉石主量元素-Mg[#]变化图上可以发现,FeO^T、MgO、SiO₂对 Mg[#]的相关性很好,FeO^T负相关,MgO 和 SiO₂正相关;TiO₂和 Cr₂O₃也表现出较好的相关性,TiO₂负相关,Cr₂O₃正相关;其余 Al₂O₃、CaO、Na₂O 则与 Mg[#]缺乏相关性(图 2)。捕虏体麻粒岩的两种辉石比捕虏体辉石岩的两种辉石相对贫 MgO、SiO₂而富 FeO。捕虏体麻粒岩中单斜辉石和斜方辉石分别为次透辉石和古铜辉石(En 72~78);捕虏

表1 汉诺坝捕虏体麻粒岩和辉石岩矿物电子探针分析结果(wt%)

Table 1 Electron microprobe analyses of minerals in granulite and pyroxenite xenoliths from Hannuoba (wt%)

岩石类型 样品数	斜长二辉麻粒岩 n=3		二辉麻粒岩 n=8		二辉岩 n=13		橄榄二辉岩 n=3		单斜辉石岩 n=2
	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx
SiO ₂	50.23~50.52	52.33~52.74	48.01~51.74	50.49~53.87	51.31~52.96	53.78~56.28	51.86~52.84	54.97~55.63	48.71~50.25
平均值	50.34	52.55	50.27	52.53	52.09	54.83	52.21	55.35	49.48
TiO ₂	0.88~0.94	0.13~0.17	0.55~1.54	0.11~0.30	0.22~1.13	0.02~0.27	0.33~0.79	0.11~0.18	0.52~0.54
平均值	0.91	0.15	0.96	0.16	0.51	0.11	0.59	0.15	0.53
Cr ₂ O ₃	0.01~0.13	0.06~0.26	0.02~0.72	0.03~0.46	0.10~1.26	0.05~0.67	0.53~0.57	0.21~0.25	0.11~0.20
平均值	0.08	0.13	0.30	0.19	0.62	0.37	0.55	0.23	0.16
Al ₂ O ₃	6.38~6.54	4.49~4.92	5.17~8.61	3.54~8.61	3.81~7.67	2.45~5.71	6.09~7.13	4.00~4.89	7.69~8.79
平均值	6.47	4.74	6.83	5.20	6.35	4.65	6.54	4.48	8.24
FeO ^T	5.91~6.70	14.74~15.79	5.18~7.27	12.97~16.12	2.10~3.87	5.70~8.87	2.18~2.44	5.47~6.16	3.76~5.09
平均值	6.19	15.23	6.00	14.22	3.19	7.75	2.35	5.84	4.43
MnO	0.09~0.15	0.23~0.28	0.06~0.18	0.19~0.42	0.05~0.13	0.12~0.24	0.08~0.10	0.12~0.15	0.06~0.11
平均值	0.11	0.26	0.13	0.26	0.10	0.17	0.09	0.13	0.09
MgO	13.15~13.44	26.12~27.01	11.72~13.84	24.20~28.15	13.77~15.23	29.76~32.52	14.55~14.94	32.10~33.00	13.35~13.99
平均值	13.33	26.60	12.81	26.48	14.52	31.21	14.79	32.48	13.67
CaO	20.95~21.42	0.46~0.54	20.05~21.64	0.47~2.16	19.05~22.78	0.32~0.93	20.28~21.41	0.50~0.58	22.15~22.29
平均值	21.22	0.49	20.90	0.71	21.02	0.55	20.91	0.55	22.22
Na ₂ O	0.92~1.01	0.02~0.03	0.98~2.08	0.03~0.09	0.74~2.11	0.02~0.17	1.47~1.60	0.07~0.10	0.43~0.80
平均值	0.95	0.03	1.35	0.05	1.35	0.07	1.53	0.08	0.62
Total	99.60~99.62	99.99~100.36	99.12~100.02	99.01~101.11	99.06~100.63	98.73~100.75	98.34~100.53	99.01~99.85	98.62~100.04
平均值	99.61	100.19	99.56	99.81	99.75	99.72	99.56	99.29	99.33
Wo	47.0~47.8		46.8~49.1		45.4~50.0		47.2~48.9		49.5~49.8
En	41.0~41.8	73.5~75.6	38.9~42.9	72.1~78.4	43.3~48.4	84.6~89.7	47.0~48.2	89.4~90.1	41.5~43.5
Fs	10.5~12.0		9.3~13.3		4.0~7.4		4.1~4.6		6.9~9.0
Mg [#]	77.8~80.2		75.0~82.4		86.6~92.4		91.6~92.3		82.4~86.9

岩石类型 样品数	斜长二辉麻粒岩 Pl			橄榄二辉岩 Ol			橄榄二辉岩 Sp		二辉岩 Sp	
	DM9859	DM9860	DM9871	HD68	08JSB08	08JSB08-2	08JSB08-2	CJ955	DM9842	08DM15
SiO ₂	53.30	52.88	54.62	41.38	41.29	40.19	0.01	0.01	0.04	0.05
TiO ₂	0.02	0.04	0.05	0.04	0.07	0.01	0.17	0.25	0.04	0.04
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	7.08	7.31	1.08	3.52
Al ₂ O ₃	28.79	28.95	27.62	0.02	0.00	0.00	59.72	57.75	64.97	62.56
FeO ^T	0.13	0.10	0.11	9.45	8.81	9.88	9.81	12.84	12.06	11.23
MnO	0.00	0.01	0.00	0.07	0.18	0.13	0.07	0.30	0.20	0.13
MgO	0.01	0.01	0.02	48.17	48.80	49.27	20.64	18.01	20.50	20.09
CaO	11.45	11.71	10.36	0.02	0.03	0.04	0.03	0.01	0.01	0.02
Na ₂ O	4.83	4.62	5.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
K ₂ O	0.35	0.34	0.32	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00
NiO	n. d.	n. d.	n. d.	0.35	0.40	0.47	0.54	0.23	0.26	0.54
Total	98.87	98.69	98.37	99.51	99.60	100.00	98.07	96.73	99.17	98.17
An/Fo	55.6	57.2	51.1	90.1	90.8	89.9				
Ab/Cr [#]	42.4	40.8	47.1				7.4	7.8	1.1	3.6
Or	2.0	2.0	1.9							

注:DM,HD,HDW 和 WD 样品采自大麻坪,JSB 和 CJ 样品采自接沙坝;n. d. 表示未检测

体辉石岩中的单斜辉石都为透辉石,但二辉岩的斜方辉石为古铜辉石(En 84~87),橄榄二辉岩的斜方辉石为顽火辉石(En 89~90)(图3)。麻粒岩和单斜辉石岩的单斜辉石贫Cr₂O₃(≤0.3%)呈黑色,而二辉岩和橄榄二辉岩中透辉石较富Cr₂O₃(0.55%~0.62%)呈暗绿色,一般二辉橄榄岩中的单斜辉石Cr₂O₃含量更高而呈翠绿色。斜长二辉麻粒岩中

斜长石的成分An 51~57,属于拉长石。对斜长二辉麻粒岩中的斜长石An值和单斜辉石Mg[#]值及斜方辉石En值分别作图(图略),发现它们具有一定正相关性,表明随着岩石基性程度的增加,斜长石An值、单斜辉石Mg[#]值和斜方辉石En值都相应增大。橄榄二辉岩中的橄榄石为镁橄榄石Fo 90~91,橄榄二辉岩和二辉岩中的尖晶石属于铝尖晶石(Cr[#]<8)

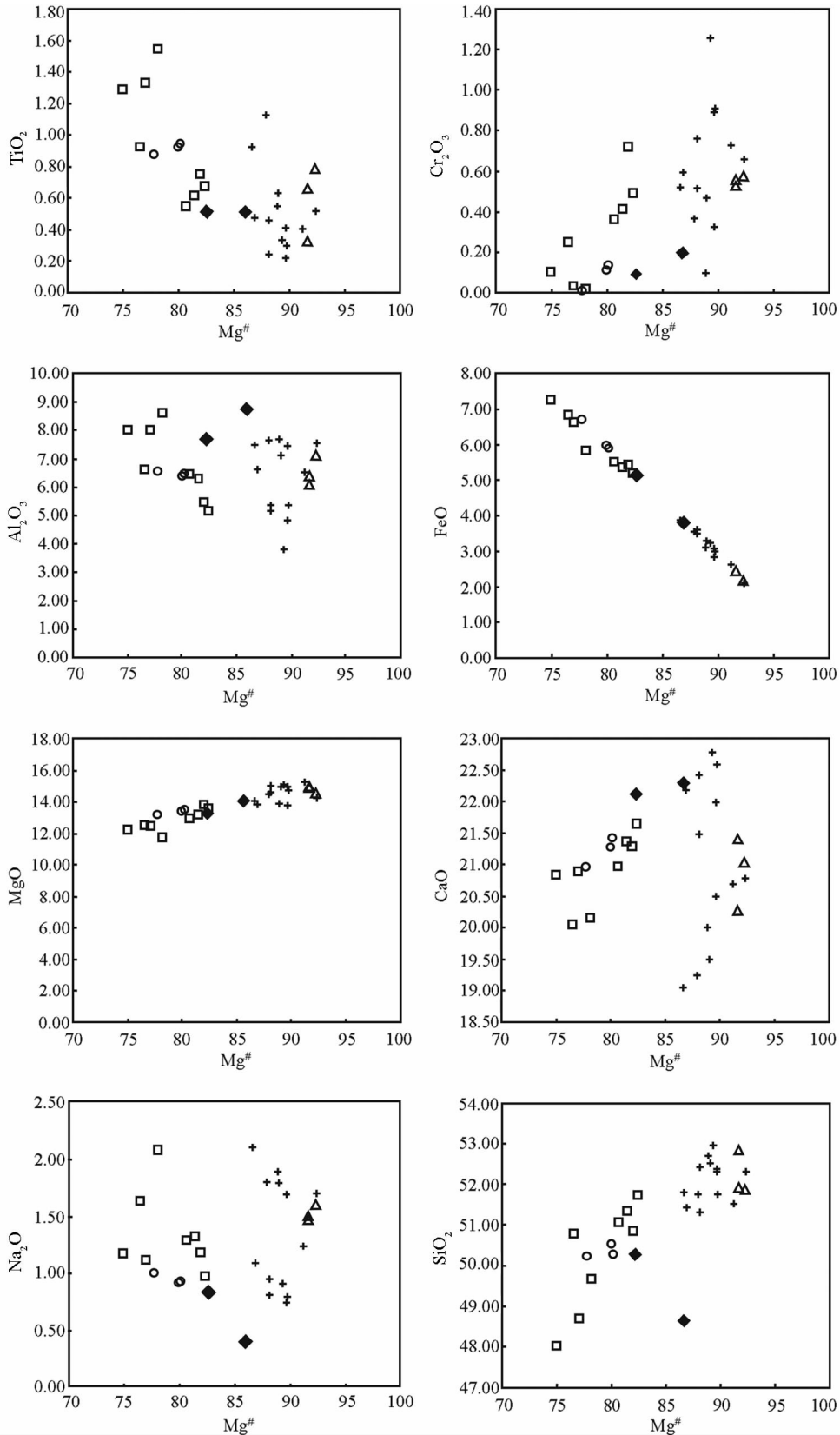


图2 汉诺坝捕虏体麻粒岩与辉石岩的单斜辉石主量元素-Mg[#]相关图解

○-斜长二辉麻粒岩; □-二辉麻粒岩; + -二辉岩; △-橄榄二辉岩; ◆-单斜辉石岩

Fig.2 Major element-Mg[#] correlation diagram of clinopyroxene in granulite and pyroxenite xenoliths from Hannuoba

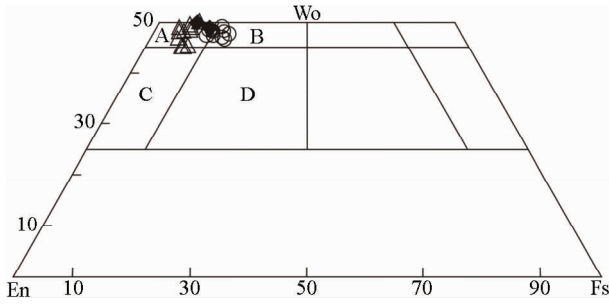


图3 汉诺坝捕虏体麻粒岩与辉石岩的单斜辉石成分
A-透辉石;B-次透辉石;C-顽透辉石;D-普通辉石. ○-斜长二辉麻粒岩和二辉麻粒岩;△-二辉岩和橄榄二辉岩;◆-单斜辉石岩
Fig. 3 Clinopyroxene composition in granulite and pyroxenite xenoliths from Hannuoba

表2 汉诺坝代表性捕虏体麻粒岩和辉石岩的单斜辉石微量元素含量 ($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace element abundance of clinopyroxene in representative granulite and pyroxenite xenoliths from Hannuoba ($\times 10^{-6}$)

岩石类型	二辉岩	单斜辉石岩		二辉麻粒岩		斜长二辉麻粒岩	
样品号	08JSB07	WD9519	WD9531	HDW13	WD9528	WD9532	WD9534
Sc	45.41	13.10	13.25	71.73	85.85	76.17	83.44
V	154.6	57.31	67.97	294.2	353.70	385.9	313.5
Co	28.51	10.18	16.30	32.61	37.27	37.64	34.23
Ni	346.3	19.54	30.62	60.00	62.93	70.59	82.38
Ga	2.32	11.97	14.50	8.49	13.11	12.73	11.14
Pb	b. d.	1.89	2.29	0.51	0.21	0.11	0.10
Sr	39.2	138	183	140	233	59.8	78.7
Zr	0.70	99.12	117.43	27.87	34.57	31.99	28.51
Hf	b. d.	2.27	3.19	1.25	1.45	1.34	1.24
Ti	631.7	2639	2192	3763	6685	5286	4488
Y	2.88	6.73	9.36	15.71	17.36	17.13	16.99
La	0.19	11.59	9.30	2.87	2.84	3.73	2.82
Ce	0.60	34.11	30.03	12.06	12.49	16.02	12.05
Pr	0.10	4.72	4.38	2.19	2.45	2.72	2.27
Nd	0.60	19.67	20.80	14.15	14.98	15.20	13.20
Sm	0.25	3.67	3.69	3.70	4.36	4.08	3.96
Eu	0.13	0.99	1.03	1.29	1.58	1.29	1.27
Gd	0.42	4.97	3.49	3.81	3.92	2.77	3.80
Tb	0.07	0.46	0.39	0.59	0.63	0.63	0.58
Dy	0.54	1.46	1.95	3.35	3.68	3.44	3.55
Ho	0.09	0.29	0.37	0.56	0.73	0.63	0.69
Er	0.31	0.93	0.98	1.55	1.83	1.60	1.82
Tm	0.04	0.10	0.13	0.18	0.25	0.20	0.24
Yb	0.32	0.71	0.87	1.20	1.51	1.28	1.50
Lu	0.04	0.09	0.13	0.18	0.20	0.17	0.21
Σ REE	3.68	83.87	77.52	47.67	51.45	53.78	47.98
La/Yb	0.59	16.35	10.67	2.40	1.89	2.93	1.89

注:b. d. 表示低于检测限

成分与分类,分别与不同作者早先的研究结果吻合(鄂莫岚等,1987;樊祺诚等,1996,2005;陈绍海等,1998;Rudnick *et al.*,2004)。

本文采用 Wells(1977)二辉石温度计估算了捕虏体麻粒岩和辉石岩的平衡温度(计算结果略)。斜长二辉麻粒岩和二辉麻粒岩的平衡温度范围介于 845 ~ 909°C 之间,落在前人研究的麻粒岩 800 ~ 1000°C 温度范围内(樊祺诚等,1996,2005;陈绍海等,1998)。二辉岩的温度变化范围较大在 826 ~ 987°C 之间,橄榄二辉岩的温度在 890 ~ 940°C 之间。值得注意的是,含尖晶石的二辉岩和不含尖晶石的二辉岩相比,前者有较高的平衡温度(>900°C),后者 <900°C,说明含尖晶石的二辉岩比不含尖晶石的二辉岩形成温度高(Chen *et al.*,2001)。

4.2 单斜辉石微量元素成分

汉诺坝代表性捕虏体麻粒岩和辉石岩的单斜辉石微量元素分析结果列于表2。绿色二辉岩(08JSB07)中单斜辉石稀土元素显示了与该地区大多数二辉橄榄岩相似的 LREE 亏损 HREE 平坦的特征(陈绍海等,1997;余淳梅等,2006),只是相对于橄榄岩 Σ REE 更低达 3.68×10^{-6} (二辉岩 1 \times 球粒陨石 \pm ,橄榄岩为 $10 \times$ 球粒陨石 \pm)。单斜辉石岩中单斜辉石的 Σ REE 较高($\sim 80 \times 10^{-6}$),稀土配分型式表现为强烈的 LREE 富集和 HREE 亏损的特征。斜长二辉麻粒岩和二辉麻粒岩单斜辉石的 Σ REE ($\sim 50 \times 10^{-6}$) 明显高于绿色二辉岩中单斜辉石的稀土元素总量,稀土配分型式呈现 LREE、HREE 略显亏损和 MREE 相对富集的倒“U”型模式,二者无论稀土总量还是稀土配分型式都雷同,表明它们是同一成因(图4a)。

二辉岩单斜辉石中除稀土元素外其他微量元素含量也普遍很低($<1 \times$ 原始地幔),但却呈现出非常明显的 Sr 正异常、Zr(Pb、Hf) 负异常、Ti 略亏损。相比,斜长二辉麻粒岩和二辉麻粒岩中单斜辉石除了和二辉岩中相同的 Zr 和 Ti 负异常外,还具有 Sr 和 Pb 不同程度的负异常,可能与岩石中斜长石的分离结晶作用有关。单斜辉石岩中单斜辉石微量元素表现为 Ti 的明显负异常,Pb 和 Sr 弱亏损,Zr 无明显的亏损现象,区别于二辉岩和麻粒岩的单斜辉石配分特征(图4b)。

4.3 单斜辉石 Sr-Nd 同位素组成

代表性捕虏体麻粒岩和辉石岩 Sr-Nd 同位素组成见表3。两个不含尖晶石的二辉岩的 Sr 同位素组成均一($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7049$),Nd 同位素变化范围相对较大($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5121 \sim 0.5128$),总体上表现出较地幔橄榄岩和寄主玄武岩相对高 Sr 低 Nd 的特征。由于样品 Sr 同位素组成上的均一性,就排除了交代作用对岩石的影响,而 Nd 同位素变化大,尤其是 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 偏高(0.512773),与前人的极少数辉石岩结果类似,寓示了辉石岩成因上的复杂性。二辉麻粒岩和斜长二辉麻粒岩都显示出较捕虏体二辉岩更高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

(Carswell,1980)。以上捕虏体麻粒岩和辉石岩的矿物化学

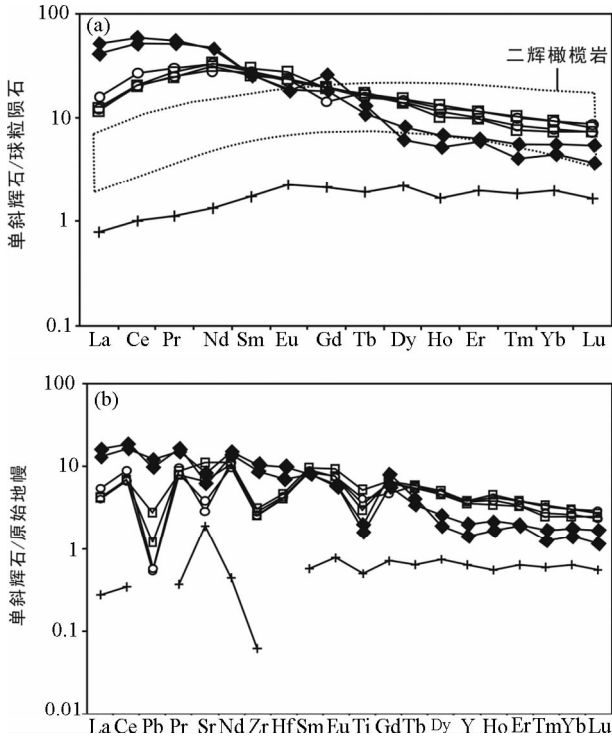


图4 汉诺坝代表性捕虏体麻粒岩和辉石岩的单斜辉石稀土元素球粒陨石标准化图 (a, 球粒陨石值据 Anders and Grevesse, 1989) 和微量元素原始地幔标准化图 (b, 原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)

○-斜长二辉麻粒岩; □-二辉麻粒岩; + -二辉岩; ◆-单斜辉石岩
Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, chondrite-normalized values after Anders and Grevesse, 1989) and primitive mantle-normalized diagrams of trace elements (b, primitive mantle-normalized values after Sun and McDonough, 1989) for clinopyroxene in representative granulite and pyroxenite xenoliths from Hannuoba

表3 汉诺坝代表性捕虏体麻粒岩和辉石岩的单斜辉石的 Sr、Nd 同位素组成

Table 3 Compositions of Sr and Nd isotopes of clinopyroxene in representative granulite and pyroxenite xenoliths from Hannuoba

岩石类型	样品号	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$	2σ	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$	2σ
二辉岩	08DM12	0.704915	0.000011	0.512773	0.000118
二辉岩	08JSB07	0.704901	0.000016	0.512104	0.000011
二辉麻粒岩	08DM40	0.707262	0.000014	0.511389	0.000116
斜长二辉麻粒岩	DM9861	0.708379	0.000018	0.511791	0.000006
斜长二辉麻粒岩	DM9871	0.707966	0.000016	0.511760	0.000008

和更低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 组成, 并且含斜长石的麻粒岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7080 \sim 0.7084$) 比不含斜长石的麻粒岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7073$) 具有更高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 暗示了斜长石含量对岩石中 Sr 同位素组成的影响。

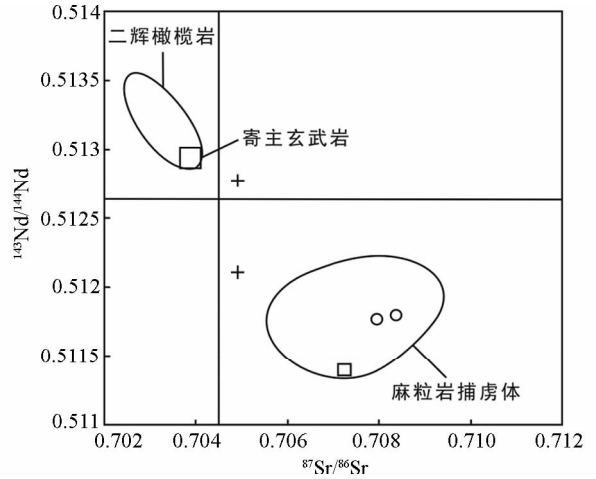


图5 汉诺坝地区不同类型岩石的 Sr-Nd 同位素图解
二辉橄榄岩据 Song and Frey, 1989; 寄主玄武岩据 Song et al., 1990; 麻粒岩据张国辉等, 1998a 和 Liu et al., 2004. ○-斜长二辉麻粒岩; □-二辉麻粒岩; + -二辉岩
Fig. 5 Plots of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for different types of rocks from Hannuoba

综合前人的研究结果, 将汉诺坝地区的玄武岩及其中各种类型岩石捕虏体的 Sr-Nd 同位素投图 (图 5), 发现地幔橄榄岩、寄主玄武岩、辉石岩、麻粒岩捕虏体具有较好的负相关性, 而早期麻粒岩地体的 Sr-Nd 同位素组成很分散 (郭敬辉等, 1993; 图中略)。捕虏体麻粒岩显示向 EMI 富集地幔过渡的特征, 而两个绿色二辉岩远离捕虏体麻粒岩, 与原始地幔也存在偏离。以往的 Sr-Nd 同位素资料显示 (陈道公等, 1997; 张国辉等, 1998a; Xu, 2002; Liu et al., 2004), 有相当一部分辉石岩具有与捕虏体麻粒岩类似的向 EMI 富集地幔过渡的同位素特征, 可能是误将麻粒岩当作辉石岩所致 (樊祺诚等, 2005); 还有一部分辉石岩同位素组成落在玄武岩附近, 可能与玄武岩浆早期结晶有关。本文的结果表明, 捕虏体辉石岩与麻粒岩具有不同的来源和成因。

5 讨论与结论

研究表明, 捕虏体麻粒岩和捕虏体辉石岩, 无论是岩石的结构构造, 还是矿物成分以及单斜辉石的微量元素和 Sr-Nd 同位素组成上都存在明显差别, 它们具有不同的来源和成因。捕虏体麻粒岩中两种辉石和斜长石形成层状堆晶构造, 两种辉石矿物 (次透辉石和古铜辉石) 相对贫 MgO 富 FeO, 单斜辉石 REE 相对富集呈倒“U”型模式, 具有广泛的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的同位素特征。捕虏体麻粒岩是晚中生代时期基性岩浆的底侵成因已经得到多数学者的认可, 并且认为岩浆底侵作用具有长期性和持续性 (Bohlen and Mezger, 1989; Rushmer, 1993; 樊祺诚和刘若新, 1996; 樊祺诚等, 1998, 2005; Chen et al., 2001; Liu et al., 2001, 2004; Zhou

et al., 2002; Wilde *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2009)。麻粒岩所表现出的 REE 富集型式和高 Sr 低 Nd 同位素特征都表明, 地幔源区曾经经历过富集作用, 无论是源区的地壳混染(张国辉等, 1998b; 刘勇胜等, 2004; Zheng *et al.*, 2009) 还是地幔交代作用(Zhou *et al.*, 2002), 似乎都是可行的解释。由于 Sm-Nd 体系的稳定性较好容易保持封闭, 即使发生麻粒岩相变质也很难使其发生分离和迁移, 计算两种麻粒岩的 Sm/Nd 比值, 分布在 0.26 ~ 0.30 之间, 高于上地壳低于原始地幔, 趋向于下地壳, 表明岩浆底侵到壳幔边界受到了下地壳的混染。

捕虏体辉石岩一般为块状构造, 原生粒状-粒状镶嵌结构, 两种辉石矿物(透辉石和古铜辉石-顽火辉石) 相对富 MgO 贫 FeO, 这些结构构造和矿物成分上的特征都与该地区地幔橄榄岩具有相似性。辉石岩中单斜辉石 REE 总量低并呈与二辉橄榄岩相似的亏损配分特征, 暗示了它可能也是地幔部分熔融残余的产物。辉石岩中 Zr, Hf 的亏损和 Sr 的富集与橄榄岩中无 Zr, Hf 负异常和 Sr 正异常形成鲜明对比, 表明它们为不同源区, 尤其是不相容元素 Sr 的正异常应当是源区本身的特征而非后期交代作用形成, 因为如果经历过交代富集作用势必会造成其他 LILE 和 LREE 的富集, 但文中未见到该类特征。无论从 REE 元素还是同位素组成特征所反映的信息, 都排除了辉石岩同玄武岩浆的成因联系, 并且 Zr, Ti 这些 HFSE 的亏损也表明非玄武岩浆结晶成因(徐义刚等, 1997)。本文中辉石岩同位素组成介于捕虏体橄榄岩和麻粒岩之间, 与麻粒岩相比低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, 与橄榄岩和玄武岩相比又显低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 偏离原始地幔, 可能表明捕虏体辉石岩来自富集地幔, 又由于它相对橄榄岩较低的 Nd 同位素组成暗示了是早期富集事件的产物(陈道公等, 1997; 刘勇胜等, 2004)。同位素结果显示, 辉石岩具有多成因性, 不可否认前人的研究结果中有相当一部分辉石岩是玄武岩浆早期结晶成因, 而本文的辉石岩又揭示出富集地幔成因。

致谢 感谢两位审稿人对本文提出的宝贵修改意见。

References

- Anders E and Grevesse N. 1989. Abundances of the elements; Meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 197–214
- Bohlen SR and Mezger K. 1989. Origin of granulite terranes and the formation of the lowermost continental crust. *Science*, 244: 326–329
- Carswell DA. 1980. Mantle derived iherzolite nodules associated with kimberlite, carbonatite and basalt magmatism: A review. *Lithos*, 13: 121–138
- Chen DG, Zhi XC, Li BX, Wang YX and Yang JD. 1997. Nd, Sr and Pb isotopic compositions and their petrologic information of pyroxenite xenoliths from Hannuoba basalts, China. *Geochimica*, 26(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Chen SH, Zhou XH, O' Reilly SY, Griffin WL, Zhang GH and Zhang M. 1997. Diopside laser probe ICP mass spectrum analysis and its deep geological applications. *Chinese Science Bulletin*, 42(16): 1707–1711 (in Chinese)
- Chen SH, Zhang GH, Zhou XH, Sun M, Feng JL and Xie MZ. 1998. Petrological investigations on the granulite xenoliths from Hannuoba basalts, northern Sino-Korean craton. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 366–380 (in Chinese with English abstract)
- Chen SH, O' Reilly SY, Zhou XH, Griffin WL, Zhang GH, Sun M, Feng JL and Zhang M. 2001. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China: Evidence from xenoliths. *Lithos*, 56: 267–301
- Cong BL and Zhang RY. 1982. Petrogenesis of the Hannuoba basalts and ultramafic xenoliths. *Science in China (Series B)*, 12: 1109–1122 (in Chinese)
- E ML, Lu FX and Deng JF. 1982. The petrological features of ultramafic inclusions and the origin of pyroxenites in Wangqing, Jilin, China. *Earth Science*, 3: 39–56 (in Chinese with English abstract)
- E ML and Zhao DS. 1987. Cenozoic Basalts and Deep-seated Xenoliths in Eastern China. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Dong ZX, Chen LH, Yang JM and Ma HW. 1999. The characteristics of spinel compositions in mantle-derived xenoliths from alkali basalts and their petrogenetic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 607–615 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC and Liu RX. 1996. The high-temperature granulite xenoliths in Hannuoba basalt. *Chinese Science Bulletin*, 41(3): 235–238 (in Chinese)
- Fan QC, Liu RX, Li HM, Li N, Sui JL and Lin ZR. 1998. Zircon geochronology and rare earth element geochemistry of granulite xenoliths from Hannuoba. *Chinese Science Bulletin*, 43(18): 1510–1515
- Fan QC, Sui JL, Zhang HF, Zhai MG and Xie HS. 2002. Experimental study on the P wave velocity in rocks from lower crust and crust-mantle transitional zone beneath the Hannuoba. *Progress in Natural Science*, 12(12): 925–929
- Fan QC, Zhang HF, Sui JL, Zhai MG, Sun Q and Li N. 2005. Magma underplating and Hannuoba present crust-mantle transitional zone composition: Xenolith petrological and geochemical evidence. *Science in China (Series D)*, 48(8): 1089–1105
- Feng JL, Xie MZ, Zhang H and Li WX. 1982. Hannuoba basalts and its deep source xenoliths. *Bulletin of Hebei Geological College*, 1–2: 45–63 (in Chinese)
- Gao S, Rudnick RL, Carlson RW, McDonough WF and Liu YS. 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 198: 307–322
- Guo JH, Zhai MG, Zhang YG, Li YG, Yan YH and Zhang WH. 1993. Early Precambrian Manjinggou high-pressure granulite melange belt on the south edge of the Huaian complex, North China craton: Geological features, petrology and isotopic geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 329–341 (in Chinese with English abstract)
- Huang XL, Xu YG, Chu XL, Zhang HX and Liu CQ. 2001. Geochemical comparative studies of some granulite terranes and granulite xenoliths from North China craton. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 318–328 (in Chinese with English abstract)
- Jackson ED and Wright TL. 1970. Xenoliths in the Honolulu volcanic series. *Petrology*, 13: 405–430
- Liu CQ, Xie GH and Akimasa M. 1996. REE and Sr and Nd isotope geochemistry of mantle xenoliths from basalts in Hannuoba. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 382–389 (in Chinese with English abstract)
- Liu RX, Chen WJ, Sun JZ and Li DM. 1992. K-Ar age and structural environment of the Cenozoic volcanics in China. In: Liu RX (ed.). *Geochronology and Geochemistry of the Cenozoic Volcanics in China*. Beijing: Seismological Press, 1–43 (in Chinese)
- Liu YS, Gao S, Jin SY, Hu SH, Sun M, Zhao ZB and Feng JL. 2001. Geochemistry and petrogenesis of lower crustal xenoliths from Hannuoba, North China: Implications for the continental lower crustal composition and evolution at convergent margin. *Geochim.*

- Cosmochim. Acta, 65(15): 2589–2604
- Liu YS, Gao S, Yuan HL, Zhou L, Liu XM, Wang XC, Hu ZC and Wang LS. 2004. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton; Insights on evolution of lower continental crust. *Chemical Geology*, 211: 87–109
- Liu YS, Yuan HL, Gao S, Hu ZC, Wang XC, Liu XM and Ling WL. 2004. U-Pb zircon ages of olivine-pyroxenite xenoliths in Hannuoba; Genetic relationships between 97 ~ 158Ma magma underplating and granulite facies metamorphism. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 790–797 (in Chinese)
- Liu YS, Gao S, Lee CTA, Hu SH, Liu XM and Yuan HL. 2005. Melt-peridotite interactions: Links between garnet pyroxenite and high-Mg[#] signature of continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 234: 39–57
- Rudnick RL, Gao S, Ling WL, Liu YS and McDonough WF. 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 77: 609–637
- Rushmer T. 1993. Experimental high-pressure granulites: Some applications to natural mafic xenolith suites and Archean granulite terranes. *Geology*, 21: 411–414
- Song Y and Frey FA. 1989. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalts from Hannuoba, eastern China; Implications for subcontinental mantle heterogeneity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 97–113
- Song Y, Frey FA and Zhi XC. 1990. Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China; Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle. *Chemical Geology*, 85: 35–52
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Spec. Pub. Geol. Soc. Lond., 42: 313–345
- Wang HF, Dai TM, Fan SK and Yang XC. 1985. K-Ar dating of Hannuoba basalts at Zhangjiakou. *Geochimica*, 3: 206–215 (in Chinese with English abstract)
- Wells PRA. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 62: 129–139
- White RW. 1966. Ultramafic inclusions in basaltic rocks from Hawaii. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 12: 254–314
- Wilde SA, Zhou XH, Nemchin AA and Sun M. 2003. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. *Geology*, 31(9): 817–820
- Xia QX, Zhi XC, Meng Q, Zheng L and Peng ZC. 2004. The trace element and Re-Os isotopic geochemistry of mantle-derived peridotite xenoliths from Hannuoba; Nature and age of SCLM beneath the area. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1215–1224 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Menzies MA, Lin CY and Hinton RW. 1997. Trace element compositions of mantle-derived xenoliths from Yitong, Jilin Province and their petrogenetic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 13(1): 14–26 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG. 2002. Evidence for crustal components in the mantle and constraints on crustal recycling mechanisms; Pyroxenite xenoliths from Hannuoba, North China. *Chemical Geology*, 182: 301–322
- Yu CM, Zheng JP and Griffin WL. 2006. LAM-ICPMS analysis on clinopyroxenes of peridotite xenoliths from Hannuoba and its significance on lithospheric mantle evolution. *Earth Science*, 31(1): 93–100 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Guo JH, Yan YH, Han XL and Li YG. 1992. Discovery and preliminary study of Archean high pressure basic granulite in North China. *Science in China (Series B)*, 12: 1325–1330 (in Chinese)
- Zhang GH, Zhou XH, Sun M, Chen SH and Feng JL. 1998a. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts, Hebei Province, and their implications for geologic process. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 190–197 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GH, Zhou XH, Chen SH and Sun M. 1998b. Sr-Nd-Pb isotopes' quintuple space characteristics of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts and their implications for geologic process. *Chinese Science Bulletin*, 43(20): 2218–2222 (in Chinese)
- Zheng JP, Griffin WL, Qi L, O'Reilly SY, Sun M, Zheng S, Pearson N, Gao JF, Yu CM, Su YP, Tang HY, Liu QS and Wu XL. 2009. Age and composition of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts reflect Paleogene underplating beneath the North China Craton. *Chemical Geology*, 264: 266–280
- Zhou XH, Sun M, Zhang GH and Chen SH. 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China; Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton. *Lithos*, 62(3–4): 111–124
- Zong KQ, Liu YS, Gao S, Yuan HL, Liu XM and Wang XC. 2005. In situ trace elemental compositions and geodynamic significance of clinopyroxene in pyroxenite xenoliths from Hannuoba. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 909–920 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈道公, 支霞臣, 李彬贤, 王银喜, 杨杰东. 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. *地球化学*, 26(1): 1–12
- 陈绍海, 周新华, O'Reilly SY, Griffin WL, 张国辉, Zhang M. 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
- 陈绍海, 张国辉, 周新华, 孙敏, 冯家麟, 谢漫泽. 1998. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类捕虏体的岩石学特征. *岩石学报*, 14(3): 366–380
- 从柏林, 张儒瑗. 1982. 汉诺坝玄武岩及其超镁铁质岩包体的成因岩石学研究. *中国科学(B辑)*, 12: 1109–1122
- 董振信, 陈立辉, 杨建民, 马鸿文. 1999. 碱性玄武岩中幔源岩石包体内尖晶石成分特征及其岩石学成因意义. *岩石学报*, 15(4): 607–615
- 鄂莫岚, 路凤香, 邓晋福. 1982. 吉林汪清超镁铁岩包体的岩石学特征及辉石岩成因问题的讨论. *地球科学*, 3: 39–56
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社
- 樊祺诚, 刘若新. 1996. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. *科学通报*, 41(3): 235–238
- 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 李霓, 隋建立, 林卓然. 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学. *科学通报*, 43(2): 133–137
- 樊祺诚, 隋建立, 张宏福, 翟明国, 谢鸿森. 2002. 汉诺坝地区下地壳与壳-幔过渡带岩石波速实验研究. *自然科学进展*, 12(10): 1094–1097
- 樊祺诚, 张宏福, 隋建立, 翟明国, 孙谦, 李霓. 2005. 岩浆底侵作用与汉诺坝现今壳幔边界组成-捕虏体岩石学与地球化学证据. *中国科学(D辑)*, 35(1): 1–14
- 冯家麟, 谢漫泽, 张红, 李文宣. 1982. 汉诺坝玄武岩及其深源包体. *河北地质学院院报*, 1–2: 45–63
- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 李永刚, 阎月华, 张雯华. 1993. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混染岩带地质特征、岩石学和同位素年代学. *岩石学报*, 9(4): 329–341

- 黄小龙, 徐义刚, 储雪蕾, 张鸿祥, 刘丛强. 2001. 华北地台部分麻粒岩地体及包体的地球化学特征对比. 岩石矿物学杂志, 20(3): 318-328
- 刘从强, 解广轰, 增田彰正. 1996. 汉诺坝玄武岩中地幔岩捕虏体 REE 和 Sr、Nd 同位素地球化学. 岩石学报, 12(3): 382-389
- 刘若新, 陈文寄, 孙建中, 李大明. 1992. 中国新生代火山岩的 K-Ar 年代与构造环境. 见: 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1-43
- 刘勇胜, 袁洪林, 高山, 胡兆初, 王选策, 柳小明, 凌文黎. 2004. 汉诺坝橄榄辉石岩包体锆石 U-Pb 年龄: 97~158Ma 岩浆底侵作用和麻粒岩相变质作用之间的成因联系. 科学通报, 49(8): 790-797
- 王慧芬, 戴檀谟, 范嗣昆, 杨学昌. 1985. 张家口汉诺坝玄武岩 K-Ar 年龄计时. 地球化学, 3: 206-215
- 夏琼霞, 支霞臣, 孟庆, 郑磊, 彭子成. 2004. 汉诺坝幔源橄榄岩包体的微量元素和 Re-Os 同位素地球化学: SCLM 的性质和形成时代. 岩石学报, 20(5): 1215-1224
- 徐义刚, Menzies MA, 林传勇, Hinton RW. 1997. 吉林伊通幔源包体的微量元素组成及其成因岩石学意义. 岩石学报, 13(1): 14-26
- 余淳梅, 郑建平, Griffin WL. 2006. 汉诺坝橄榄岩捕虏体的单斜辉石 LAM-ICPMS 分析及其岩石圈地幔演化意义. 地球科学, 31(1): 93-100
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 韩秀伶, 李永刚. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 中国科学(B辑), 12: 1325-1330
- 张国辉, 周新华, 孙敏, 陈绍海, 冯家麟. 1998a. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类和辉石岩类捕虏体 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 14(2): 190-197
- 张国辉, 周新华, 陈绍海, 孙敏. 1998b. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩和辉石岩捕虏体 Sr-Nd-Pb 同位素五维空间特征及其地质意义. 科学通报, 43(20): 2218-2222
- 宗克清, 刘勇胜, 高山, 袁洪林, 柳小明, 王选策. 2005. 汉诺坝辉石岩包体中单斜辉石的微区微量元素组成特征及其地球动力学意义. 岩石学报, 21(3): 909-920