

# 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

杜蔚, 韩宝福, 张文慧, 刘志强

(北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 地球与空间科学学院, 北京 100871)

**摘要:** 内蒙古集宁新生代玄武岩产于华北克拉通北缘, 属于广义的“汉诺坝玄武岩”。首次在三义堂附近的碱性玄武岩中发现了大量的橄榄岩包体、辉石和长石以及少量的含钛磁铁矿巨晶。包体主要是尖晶石二辉橄榄岩, 造岩矿物为橄榄石 + 斜方辉石 + 单斜辉石 + 尖晶石, 辉石巨晶主要为透辉石和普通辉石, 长石巨晶主要是歪长石和少量斜长石。1.5 GPa 条件下, 尖晶石二辉橄榄岩样品所记录的平衡温度与汉诺坝相近, 集中于 950°C 左右, 大体上反映了华北克拉通北缘大陆岩石圈地幔尖晶石相部分的温度状态。单斜辉石巨晶的结晶温压大于幔源包体的平衡温压, 表明巨晶的来源深度可能大于包体。包体的结构及矿物成分分析表明, 这些包体是玄武质岩浆上升过程中偶然捕获岩石圈地幔的岩石碎块。二辉橄榄岩包体中橄榄石高  $Mg^{\#}$  值 (89.5 ~ 91.7) 和较高的 NiO 含量 (0.29% ~ 0.55%) 暗示集宁玄武岩中的橄榄岩包体来自较高熔融程度的岩石圈地幔。

**关键词:** 新生代玄武岩; 橄榄岩包体; 巨晶; 岩石圈地幔; 集宁

中图分类号: P588.14<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)01-0013-12

## The discovery of peridotite xenoliths and megacrysts in Jining, Inner Mongolia

DU Wei, HAN Bao-fu, ZHANG Wen-hui and LIU Zhi-qiang

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Located in Inner Mongolia, the northern edge of the North China craton, Jining Cenozoic basalts belong to the generalized “Hannuoba Basalts”. A lot of peridotite xenoliths as well as some pyroxene, feldspar and titanomagnetite megacrysts were discovered for the first time in the alkali basalt southeast of Sanyitang. Most of these xenoliths are spinel lherzolites with the assemblage of olivine + orthopyroxene + clinopyroxene + spinel. The pyroxene megacrysts are mostly diopside and augite in composition. Feldspar megacrysts are mainly anorthoclase and minor plagioclase. The equilibrium temperature represented by these spinel lherzolite xenoliths is about 950°C at 1.5 GPa, which is almost the same as that of the Hannuoba xenoliths and reflects the temperature of spinel phase in the lithospheric mantle beneath the northern edge of the North China craton. The crystallization temperature and pressure of clinopyroxene megacrysts are higher than those of lherzolite xenoliths, implying an origin deeper than that of the peridotite xenoliths. Petrography and mineral chemistry of these xenoliths indicate that they are fragments of the upper mantle captured by basaltic magmas along the ascending way. The high  $Mg^{\#}$  (89.5 ~ 91.7) and high NiO (0.29% ~ 0.55%) contents of olivines demonstrate that Jining peridotite xenoliths are derived from the infusible lithospheric mantle.

**Key words:** Cenozoic basalt; peridotite xenolith; megacryst; lithospheric mantle; Jining

收稿日期: 2005-03-15; 修订日期: 2005-05-09

基金项目: 教育部“跨世纪人才培养计划”资助项目

作者简介: 杜蔚 (1980-), 女, 硕士研究生, 构造地质学、岩石地球化学方向, 通讯作者: 韩宝福, 男, 教授, E-mail: bfhan@pku.edu.cn

中国东部地区广泛分布新生代玄武岩,其中碱性、偏碱性玄武质火山岩中含有丰富的超镁铁质包体和高压巨晶(鄂莫岚等,1987;刘若新等,1992)。这些超镁铁质包体和高压巨晶是直接来自地幔的样品,提供了关于大陆岩石圈地幔组成、性质和演化过程的重要信息,因而得到了广泛的研究(池际尚等,1988;Liu *et al.*,1991;刘丛强等,1994;Fan *et al.*,1998;李延河等,2001;李天福等,2002;Zhou *et al.*,2002)为深入研究中国东部大陆岩石圈地幔的形成演化提供了重要依据。华北克拉通北缘的河北汉诺坝玄武岩因含丰富的地幔-下地壳深源包体而成为研究的重点,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)。但是位于汉诺坝以西的集宁玄武岩,虽然属于广义“汉诺坝玄武岩”(刘若新等,1985),但却一直没有深源包体的报道。2003年,笔者在集宁碱性玄武岩中发现了丰富的橄榄岩包体及辉石和长

石等巨晶,本文在对包体和巨晶的矿物化学组成进行分析的基础上,对包体的来源进行初步探讨。

## 1 地质背景

新生代以来,中国大陆东部的岩石圈受到拉张,产生一系列的拉伸构造(邓晋福等,1990),沿着深断裂,大量幔源玄武质岩浆喷出地表,在北起黑龙江、南至海南岛的广泛区域内形成了很多玄武质火山岩带。华北断块北缘的西起阴山东至辽南的东西岩带就是其中之一(鄂莫岚等,1987),而集宁玄武岩则是新生代以来该岩带重要的活动中心之一。集宁地区主要火山活动发生在中新世(罗修泉等,1990),但在北部的乌兰哈达仍有保存完好的火山锥,说明火山活动一直持续到很晚。集宁新生代玄武岩总面积约8000 km<sup>2</sup>(图1),形成高原熔岩台地,厚度数十米至250 m不等,从西北的灰腾梁到东南部的丰镇稍微减薄。在集宁西南的三义堂附近,玄武岩呈层状产出,柱状解理发育,但柱体较小,碎裂比较严重,主要是灰黑色致密块状的玄武岩,本文所报道的橄榄岩包体及辉石巨晶、长石巨晶就产于该玄武岩中。

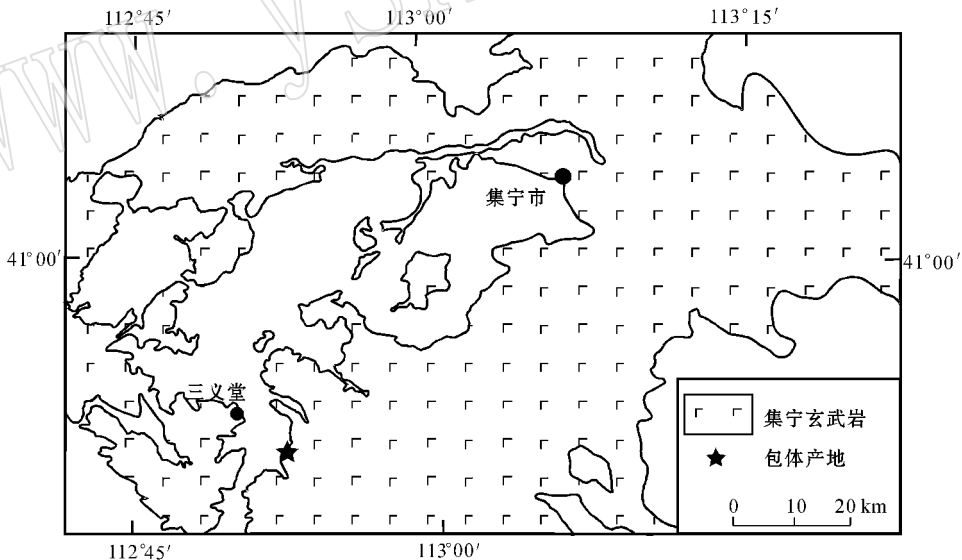


图 1 集宁地区新生代玄武岩分布图

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of Jining Cenozoic basalt

## 2 岩相学和矿物学特征

### 2.1 橄榄岩包体

包体均为绿色型,主要是尖晶石二辉橄榄岩(图2a),占包体总量的90%以上。包体呈浑圆形、椭圆形和边界较圆滑的不规则形,大小不等,最大可达30

cm。多数样品比较新鲜,部分风化较强,这可能与它们的矿物组成和结构不同有关。包体的矿物组成为橄榄石(Ol)、斜方辉石(Opx)、单斜辉石(Cpx)和尖晶石(Sp),具有原生不等粒结构、不等粒变晶结构和残斑结构。包体与寄主岩之间的界线十分清晰,局部发育有约1 mm的反应边,表现为与包体接触部

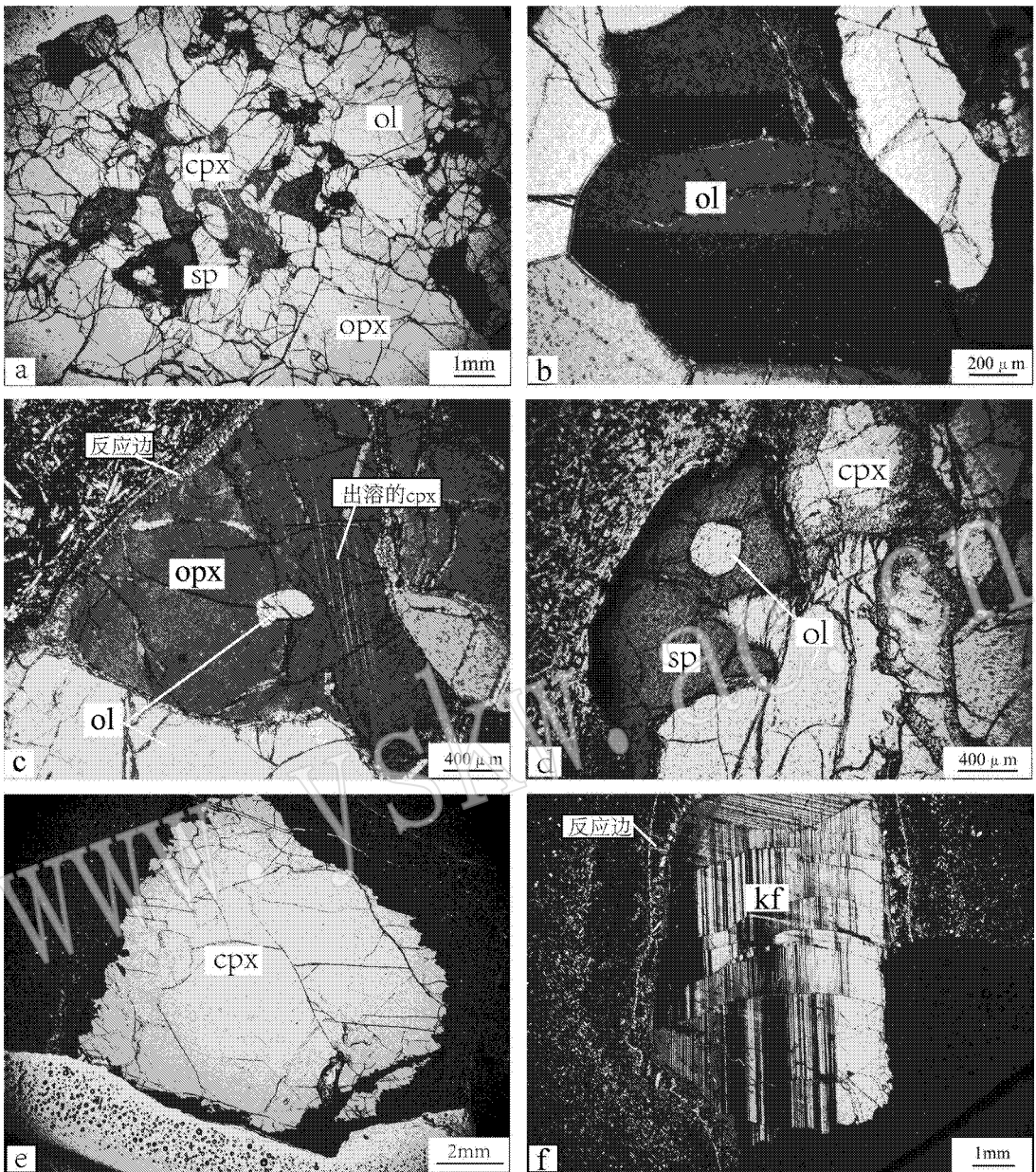


图 2 尖晶石二辉橄榄岩包体及辉石、长石巨晶镜下照片

Fig. 2 Photomicrographs of spinel ilmenite olivine rock inclusions, pyroxene and feldspar megacrysts

a—尖晶石二辉橄榄岩 正交偏光 b—橄榄石的扭折带和三连点 正交偏光 c—包体与寄主岩接触部位的斜方辉石, 出现反应边, 内部有出溶现象 正交偏光 d—包体与寄主岩接触部位的尖晶石, 有黑边 正交偏光 e—单斜辉石巨晶, 出现反应边 单偏光; f—钾长石巨晶 明显的反应边和双晶 正交偏光

a—spinel ilmenite olivine rock, cross polarized b—olivine with kinkband and triple junction, cross polarized c—orthopyroxene with a reaction border and clinopyroxene exsolution lamellae, cross polarized d—spinel in spinel ilmenite olivine rock with a black border, cross polarized e—clinopyroxene megacryst with a reaction border, plane polarized f—feldspar megacryst with a reaction border and Carlsbad-albite compound twin, cross polarized

位的寄主岩中矿物颗粒普遍变细。

橄榄石是尖晶石二辉橄榄岩包体中含量最多的矿物, 橄榄绿色或浅绿色, 解理不发育, 占矿物总含量的 40%~60%。橄榄石有时呈现两个世代: 第一个世代的颗粒呈碎斑出现, 颗粒较小, 一般为 2 mm

×1.5 mm, 是经历破碎、塑性变形作用后的产物, 碎斑的最大特点是具有板状的或楔形的扭折带(图 2b); 第二个世代是重结晶的产物, 自形程度较好、未变形, 颗粒一般较小且分布均匀, 多具有平直的边界, 呈 120°交角的三连点。

斜方辉石含量仅次于橄榄石,一般 30%~40%,镜下无色透明,呈不规则状、港湾状,解理断续弯曲,可能是应力作用下发生塑性变形的结果。斜方辉石也有两个世代,第一个世代的碎斑数量较少但是个体较大,最大可达 1.5 cm,反映其抵抗能力较强,碎斑通常有出溶叶片。包体与寄主岩接触部位的斜方辉石有明显的反应边(图 2c)。

单斜辉石为翠绿色,含量较少,一般 <15%,镜下为浅绿色,多为它形颗粒,粒径比橄榄石、斜方辉石小,分布于两者之间。单斜辉石发育有部分熔融结构,表面或边缘呈麻点状,或者出现“海绵边”,个别单斜辉石也有出溶现象。

尖晶石含量最少,一般 3%~5%,多数为黄褐色,个别褐红色,呈它形粒状、冬青叶状分布于粒间或被包于橄榄石及辉石之中,在与寄主岩的接触部位出现黑色不透明边(图 2d)。

## 2.2 巨晶

玄武岩中的巨晶主要是辉石、长石和磁铁矿。含量最丰富的是长石巨晶,约占巨晶总量的 60%,个体大小不等,一般长 1~3 cm,个别可达 6 cm,晶体无色透明,解理完全,可见到完整平直的晶面,普遍发育有反应边(图 2f)。单斜辉石巨晶含量较少(图 2e),个体较小,个别超过 1 cm。辉石巨晶多呈浑圆和次棱角的碎块状,黑色或褐黑色,具有贝壳状断口,玻璃光泽。可见 1 mm 左右的反应边,构成巨晶的外壳,说明它们被玄武岩浆携带上升到地表的过程中经历了熔蚀反应。个别单斜辉石巨晶有出溶现象。磁铁矿巨晶数量少,个体比较小。

## 3 矿物化学特征

主要造岩矿物的化学成分分析是在北京大学地球与空间科学学院 JXA-8100 电子探针上完成的,分析条件:加速电压 15 kV,束流  $1 \times 10^{-8}$  A,束斑 1  $\mu\text{m}$ ,修正方法 PRZ,标准样品来自美国 SPI 公司。

### 3.1 橄榄石

包体中橄榄石的  $\text{SiO}_2$  含量为 39.27%~40.76%, $\text{FeO}$  含量为 8.33%~10.37%, $\text{MgO}$  含量为 49.61%~51.37%, $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量为 0%~0.10%, $\text{CaO}$  含量为 0.02%~0.07%, $\text{NiO}$  含量较高(0.29%~0.55%), $\text{Mg}^\#$  值较高(89.50~91.68)(表 1)。

随着  $\text{Mg}^\#$  值的上升,橄榄石的  $\text{NiO}$  含量有明显升高的趋势(图 3)。BS9-7 和 BS9-9、BS14-5 和 BS14-7 分别是斜方辉石与寄主岩接触部位同一反应边的中部和边部的橄榄石,它们的  $\text{NiO}$  含量明显低于包体中的橄榄石, $\text{Mg}^\#$  值也稍微偏低。同一反应边中,边部的橄榄石(BS9-9、BS14-7) $\text{Mg}^\#$  值很低(66.4~69.3),与内部的橄榄石相比均有  $\text{FeO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$  含量增高、 $\text{MgO}$  含量降低的趋势(表 1)。

### 3.2 斜方辉石

包体中斜方辉石的  $\text{SiO}_2$  含量为 53.71~55.66%, $\text{MgO}$  含量为 33.48%~35.25%, $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 2.21%~4.75%, $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量为 0.31%~0.52%, $\text{CaO}$  含量略高(0.43%~0.54%), $\text{Mg}^\#$  值变化范围为 89.91%~92.06, $W_o = 0.8 \sim 1.51$ , $E_n = 88.81 \sim 91.14$ , $F_s = 7.97 \sim 10.22$ (表 2),主要是斜顽辉石(图 4),与我国其他地区玄武岩中同类包体的斜

表 1 橄榄岩包体中的橄榄石化学成分

$w_B/\%$

Table 1 Chemical composition of olivine in peridotite xenoliths

样品	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{NiO}$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	Total	$\text{Mg}^\#$	
尖晶石 二辉橄 榄岩包 体	B88-2	39.80	0.02	0.00	9.42	0.07	50.47	0.03	0.00	0.01	0.55	100.37	90.52	
	BS9-4	40.76	0.00	0.02	8.74	0.18	50.05	0.02	0.00	0.01	0.42	100.27	91.09	
	JS6-2	40.36	0.00	0.01	8.84	0.15	51.19	0.06	0.00	0.00	0.54	101.15	91.17	
	JN27-4	40.00	0.00	0.00	8.69	0.15	50.94	0.05	0.00	0.00	0.43	100.26	91.24	
	JN6-4	39.82	0.01	0.00	10.37	0.17	49.61	0.05	0.00	0.00	0.39	100.48	89.50	
	JS14-4	40.50	0.00	0.00	9.35	0.11	50.38	0.02	0.02	0.02	0.37	0.01	100.78	90.58
	JS17-3	40.11	0.02	0.00	9.92	0.08	50.04	0.02	0.02	0.00	0.29	0.01	100.51	89.99
	JS18-2	40.17	0.02	0.00	8.33	0.17	51.37	0.05	0.00	0.00	0.34	0.05	100.50	91.68
	JS2-6	39.27	0.00	0.03	10.02	0.13	50.65	0.04	0.04	0.01	0.46	0.10	100.75	90.03
	JS3-3	40.01	0.00	0.01	8.81	0.12	51.20	0.07	0.03	0.00	0.45	0.08	100.78	91.21
反应边	BS9-7	39.48	0.06	0.00	13.29	0.31	47.54	0.20	0.04	0.01	0.16	0.03	101.12	86.44
	BS9-9	36.44	0.03	0.03	28.76	0.60	33.96	0.48	0.00	0.01	0.17	0.00	100.48	67.81
	BS14-5	39.56	0.00	0.02	13.91	0.32	46.97	0.18	0.01	0.01	0.11	0.05	101.14	85.76
	BS14-7	36.68	0.05	0.05	27.76	0.67	35.21	0.43	0.00	0.00	0.11	0.03	100.99	69.31

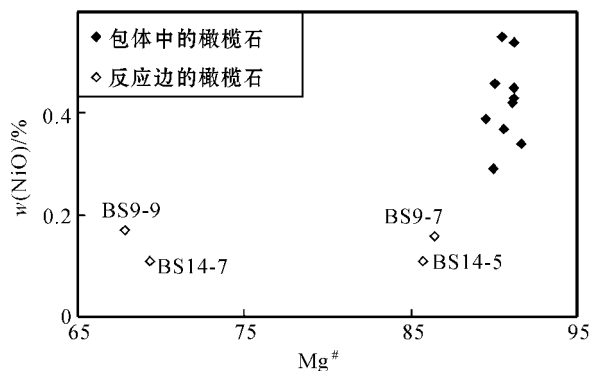


图 3 橄榄石中 NiO-Mg<sup>#</sup> 相关图

Fig. 3 Mg<sup>#</sup> versus NiO in olivine

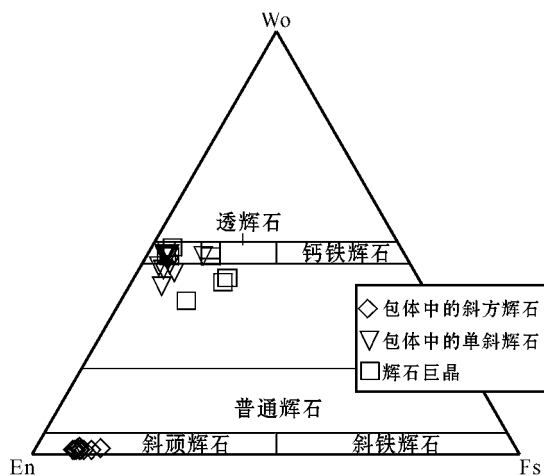


图 4 橄榄岩包体中的辉石和辉石巨晶分类图解

Fig. 4 Classification diagram of pyroxenes in ilherzolite xenoliths and pyroxene megacrysts

方辉石成分变化范围相似(鄂莫岚等,1987)。

斜方辉石还作为单斜辉石出溶的叶片(JS2-2、BS14-4、NN3-2),其化学成分与二辉橄榄岩包体中的斜方辉石没有很大差别(表 2)。

### 3.3 单斜辉石

#### 3.3.1 包体中的单斜辉石

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 2.60% ~ 6.81% ,MnO 含量为 0.01% ~ 0.16% ,NiO 含量为 0% ~ 0.11% ,MgO 含量为 14.70% ~ 16.98% ,Na<sub>2</sub>O 含量变化范围很大,介于 0.65% ~ 2.03% 之间,这与单斜辉石常见的“海绵边”熔融结构有关,Wo = 44.52 ~ 48.02 ,En = 48.08 ~ 51.63 ,Fs = 3.45 ~ 4.76(表 3),主要是透辉

石(图 4),Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量很高(0.72% ~ 1.16%),属于铬透辉石。共生的单斜辉石与斜方辉石的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量具有良好的相关性(图 5),表明样品在矿物化学上是平衡的。BS9-8 和 BS14-6 是包体中斜方辉石与寄主岩接触部位反应边中的单斜辉石,具有高 TiO<sub>2</sub>、FeO 和低 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的特点(表 3)。

#### 3.3.2 单斜辉石巨晶

集宁玄武岩中的单斜辉石巨晶有两种:一种辉石巨晶的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高(8.35% ~ 10.51%),MnO

表 2 橄榄岩包体中的斜方辉石化学组成

w<sub>p</sub>/%

Table 2 Chemical composition of orthopyroxene in peridotite xenoliths

样品	包体中的斜方辉石								出溶的斜方辉石		
	BSS-1	BS9-1	JN27-1	JN6-2	JS14-1	JS17-4	JS18-4	JS3-1	BS14-4	JS2-2	NN3-2
SiO <sub>2</sub>	54.76	54.80	55.40	53.71	54.67	54.65	54.61	55.66	54.56	54.42	54.81
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.09	0.10	0.15	0.00	0.14	0.04	0.00	0.00	0.06	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.50	3.65	3.65	4.71	3.47	3.93	3.42	2.27	3.48	4.75	4.16
FeO	6.17	5.82	6.04	6.76	5.67	6.16	5.41	5.50	5.40	5.95	5.69
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.45	0.37	0.42	0.31	0.39	0.45	0.48	0.52	0.38	0.42	0.33
MnO	0.13	0.15	0.17	0.16	0.10	0.08	0.07	0.18	0.17	0.17	0.14
NiO	0.09	0.12	0.08	0.17	0.12	0.11	0.10	0.21	0.04	0.05	0.19
MgO	33.48	34.70	34.14	33.73	34.73	34.37	35.17	35.25	34.64	34.03	33.73
CaO	0.53	0.43	0.49	0.51	0.48	0.47	0.48	0.54	0.49	0.95	0.79
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.08	0.04	0.04	0.05	0.07	0.04	0.17	0.02	0.13	0.07
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Total	100.36	100.22	100.54	100.25	99.68	100.43	99.83	100.31	99.19	100.94	100.00
Wo	1.02	0.81	0.93	0.97	0.90	0.88	0.89	1.00	0.92	1.79	1.51
En	89.53	90.46	89.90	88.81	90.65	89.95	91.14	90.79	90.88	89.21	89.78
Fs	9.45	8.73	9.18	10.22	8.45	9.16	7.97	8.21	8.20	9.00	8.71
Mg <sup>#</sup>	90.63	91.38	90.97	89.91	91.61	90.88	92.06	91.95	91.95	91.08	91.34
Cr <sup>#</sup>	6.19	6.37	6.96	4.04	7.24	7.06	8.61	13.33	6.62	5.47	5.08

表 3 橄榄岩包体中的单斜辉石化学组成

 $w_B/\%$ 

Table 3 Chemical composition of clinopyroxene in peridotite xenoliths

样品	包体中的单斜辉石									颗粒中心	边部	反应边中的单斜辉石	
	BS8-3	JN27-2	JN6-1	JS14-3	JS17-2	JS18-1	JS2-1	JS3-2	BS9-2	BS9-3	BS9-8	BS14-6	
SiO <sub>2</sub>	51.97	52.02	51.04	52.11	52.50	51.81	51.51	53.77	51.55	52.40	50.07	53.57	
TiO <sub>2</sub>	0.48	0.34	0.61	0.10	0.26	0.45	0.32	0.07	0.45	0.41	1.31	0.09	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.17	4.88	6.81	4.16	5.97	5.24	6.43	2.60	5.72	4.84	3.06	1.02	
FeO	2.14	2.17	2.52	2.28	2.41	2.20	2.48	2.22	1.85	2.07	6.84	4.66	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.16	0.75	0.72	0.86	1.08	0.95	0.78	0.77	1.03	1.00	0.25	0.42	
MnO	0.12	0.05	0.16	0.16	0.14	0.10	0.12	0.04	0.01	0.03	0.19	0.16	
NiO	0.00	0.10	0.11	0.00	0.07	0.05	0.02	0.03	0.02	0.05	0.03	0.05	
MgO	16.86	15.62	15.17	16.44	14.87	16.05	15.57	16.98	14.70	15.59	14.11	17.32	
CaO	22.67	21.15	20.75	21.95	20.35	21.71	20.73	20.37	20.24	20.75	22.11	20.82	
Na <sub>2</sub> O	0.65	1.45	1.51	0.82	1.86	1.18	1.69	1.70	2.03	1.75	0.73	0.76	
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	
Total	99.22	98.53	99.41	98.88	99.51	99.75	99.65	98.56	97.61	98.89	98.70	98.91	
Wo	47.33	47.40	47.21	46.97	47.29	47.36	46.66	44.52	48.02	47.07	46.81	42.77	
En	48.98	48.71	48.03	48.95	48.08	48.72	48.77	51.63	48.53	49.21	41.57	49.50	
Fs	3.69	3.89	4.76	4.08	4.63	3.92	4.57	3.86	3.45	3.72	11.62	7.73	
Mg <sup>#</sup>	93.39	92.81	91.53	92.75	91.68	92.82	91.79	93.13	93.40	93.07	78.62	86.81	
Cr <sup>#</sup>	19.41	9.48	6.73	12.25	10.84	10.80	7.46	16.54	10.75	12.29	4.96	21.43	

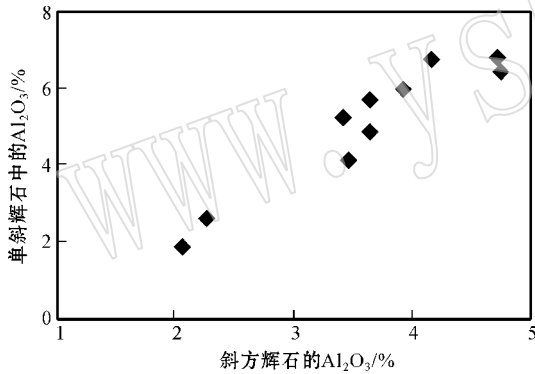
图 5 共生的斜方辉石和单斜辉石中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的相关图解

Fig. 5 Relationship of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> between coexisting clinopyroxene and orthopyroxene

含量为 0.12% ~ 0.19% ,MgO 含量为 10.99% ~ 15.64% ,Na<sub>2</sub>O 含量为 1.67% ~ 2.37% ,Wo = 36.03 ~ 41.58 ,En = 39.22 ~ 50.42 ,Fs = 13.55 ~ 19.20(表 4),为普通辉石(图 4)。另外一种辉石巨晶的化学成分与包体中的单斜辉石相近,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 1.36% ~ 6.99% ,MnO 含量为 0.03% ~ 0.17% ,MgO 含量为 13.35% ~ 17.26% ,Na<sub>2</sub>O 含量为 0.73% ~ 1.81% ,Wo = 46.65 ~ 48.70 ,En = 40.03 ~ 48.82 ,Fs = 3.86 ~ 13.25(表 4),为透辉石(图 4)。

### 3.4 尖晶石

包体中尖晶石的化学成分变化范围非常大,

SiO<sub>2</sub> 含量为 0.01% ~ 0.19% ,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 30.99% ~ 58.42% ,Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 8.93% ~ 38.34% ,TiO<sub>2</sub> 含量为 0.01% ~ 0.14% ,NiO 含量为 0.15% ~ 0.46% ,MgO 含量为 17.00% ~ 21.59% ,Cr/(Cr + Al) 比值变化范围为 0.09 ~ 0.45 ,主要是低铬尖晶石和少量铬尖晶石。与寄主岩接触部位的尖晶石发育黑色不透明环边(BS9-6),以高 FeO、TiO<sub>2</sub> 和低 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO 为特征(表 5)。

### 3.5 长石

玄武岩中长石巨晶主要是钾长石(透长石和歪长石)和少量斜长石(图 6)。钾长石 SiO<sub>2</sub> 含量为 61.43% ~ 65.01% ,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 17.90% ~ 22.15% ,CaO 含量为 0.21% ~ 3.77% ,K<sub>2</sub>O 含量为 6.48 ~ 8.87% ,An = 1.0 ~ 17.9 ,Or = 14.3 ~ 42.7 ,Ab = 56.3 ~ 74.3。斜长石以高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、高 CaO 和低 K<sub>2</sub>O 为特征(表 4)。

## 4 平衡温压的计算

橄榄岩包体的共生矿物组合所记录的平衡温度和压力近似反映了岩石圈地幔现今的热状态,可以用来确定包体样品在岩石圈地幔中的来源深度。试用几种常用的辉石地质温度计后发现,不同温度计对同一样品所计算的温度可差 50 ~ 100℃,甚至 200℃。

表 4 巨晶的化学组成

 $w_B/\%$ 

Table 4 Chemical composition of pyroxene and feldspar megacrysts

样品	普通辉石			透辉石				
	BS1-1	BS14-1	JS44-1	BS14-2	BS15-1	JS8-1	NN3-1	BS7-2
SiO <sub>2</sub>	46.73	47.46	50.14	47.12	50.84	53.64	51.04	48.88
TiO <sub>2</sub>	2.10	2.01	0.61	1.89	0.63	0.11	0.57	2.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.51	10.27	8.35	5.61	6.99	1.36	6.75	4.51
FeO	9.47	9.49	7.30	7.71	2.63	2.38	2.51	7.56
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.17	0.04	0.00	0.62	0.00	0.99	0.02
MnO	0.12	0.14	0.19	0.17	0.12	0.05	0.03	0.10
NiO	0.00	0.00	0.08	0.07	0.03	0.02	0.05	0.00
MgO	10.99	11.62	15.64	13.36	15.47	17.26	14.29	13.35
CaO	16.21	16.16	15.55	21.70	20.70	23.28	20.76	22.60
Na <sub>2</sub> O	2.33	2.37	1.67	0.79	1.37	0.73	1.81	0.79
K <sub>2</sub> O	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	98.49	99.71	99.57	98.42	99.40	98.83	98.80	99.81
W <sub>0</sub>	41.58	40.56	36.03	46.73	46.65	47.32	48.70	47.93
En	39.22	40.58	50.42	40.03	48.51	48.82	46.65	39.39
Fs	19.20	18.87	13.55	13.25	4.84	3.86	4.65	12.68

样品	钾长石				斜长石			
	JS40-1	BS6-2	JN24-1	JN21-1	JN12-2	JN29-1	BS14-3	
SiO <sub>2</sub>	61.43	64.87	65.01	64.99	64.37	60.10	57.12	
TiO <sub>2</sub>	0.10	0.05	0.00	0.02	0.15	0.02	0.18	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.15	20.40	19.97	20.05	17.90	23.55	25.59	
FeO	0.32	0.10	0.11	0.08	0.61	0.23	0.70	
MnO	0.00	0.02	0.00	0.07	0.05	0.08	0.00	
MgO	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.04	0.05	
CaO	3.77	0.85	0.81	0.91	0.21	5.58	7.39	
Na <sub>2</sub> O	7.91	8.61	8.87	7.95	6.48	7.90	6.49	
K <sub>2</sub> O	2.54	4.01	3.99	3.99	7.46	0.99	0.55	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.03	0.01	0.00	0.04	0.01	0.07	
NiO	0.01	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.02	
Total	98.27	98.95	98.86	98.06	97.27	98.50	98.16	
Ab	67.80	73.50	74.30	71.80	56.30	67.90	59.40	
An	17.90	4.00	3.70	4.50	1.00	26.50	37.30	
Or	14.30	22.50	22.00	23.70	42.70	5.60	3.30	

表 5 橄榄岩包体的尖晶石化学组成

 $w_B/\%$ 

Table 5 Chemical composition of spinel in peridotite xenoliths

样品	JS14-2	JS18-3	BS8-4	JS2-7	JN6-3	BS9-5	JS17-1	JS3-4	JS38-1	JS6-1	BS9-6
SiO <sub>2</sub>	0.04	0.01	0.03	0.06	0.19	0.05	0.03	0.01	0.05	0.06	0.07
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.11	0.07	0.01	0.14	0.02	0.03	0.05	0.04	0.03	12.52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51.96	52.99	52.40	58.42	58.01	54.23	54.18	39.14	31.43	30.99	11.14
FeO	11.07	9.77	9.74	9.80	10.60	9.84	10.50	12.36	13.03	13.38	58.06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.96	15.63	15.96	10.10	8.93	14.06	14.26	29.61	38.34	37.85	9.61
MnO	0.26	0.24	0.20	0.11	0.20	0.14	0.24	0.34	0.45	0.37	0.51
NiO	0.41	0.37	0.44	0.37	0.46	0.25	0.35	0.15	0.22	0.18	0.12
MgO	20.67	20.93	20.92	21.59	20.84	21.08	20.64	18.34	17.28	17.00	5.62
CaO	0.00	0.00	0.01	0.02	0.07	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.02	0.00	0.06	0.02	0.07	0.00	0.02	0.01	0.04	0.04
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Total	100.49	100.07	99.77	100.54	99.47	99.74	100.24	100.02	100.85	99.90	97.71
Cr/(Cr+Al)	0.17	0.17	0.17	0.10	0.09	0.15	0.15	0.34	0.45	0.45	0.37

表中 BS9-6 为包体与寄主岩接触部位的尖晶石的边部,其他为包体内部的尖晶石。

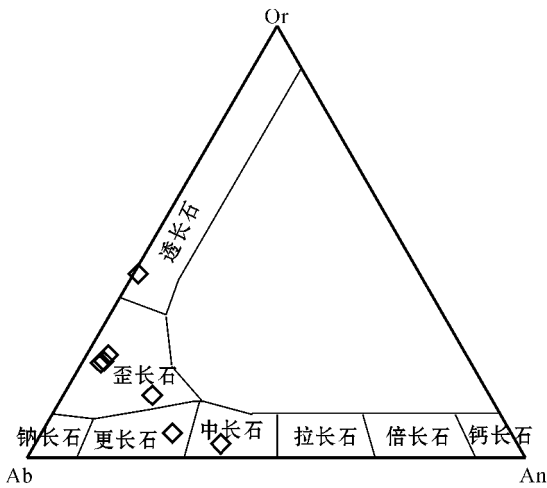


图 6 集宁玄武岩中长石巨晶的成分变化

Fig. 6 Chemical composition of feldspar megacrysts in Jining basalt

Bertrand 和 Mercier(1985) 以下记作 BM85) 和 Brey & Kohler(1990) 以下记作 BKN90) 根据自然体系平衡实验校正的二辉石温度计一直被认为是比较适用于自然体系的温度计。当压力条件变化为 1~3 GPa 时, 计算出的温度变化范围在 30℃ 以内(表 6), 比在已知压力值重现实验温度条件时的误差稍大(Brey and Kohler, 1990), 而尖晶石二辉橄榄岩的平衡压力范围为 0.8~2.5 GPa(Kohler and Brey, 1990)。所以, 对尖晶石相样品在无准确压力值时,

假设它为 1.5 GPa 所获得的平衡温度大体反映包体所记录的平衡温度。用 BKN90 和 BM85 两种方法, 计算所得的温度集中于 950℃ 附近(表 6), 这一结果与用 BKN90 所计算的汉诺坝地区的温度范围 935~1 055℃ 相当(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。其中选用尖晶石二辉橄榄岩中的二辉石(JS3-BS9) 计算的温度范围分别为 886~987℃ 和 911~1 012℃; 选用单斜辉石巨晶(BS14) 计算的温度偏高, 为 1 002℃ 和 1 086℃; 包体中的辉石如果有出溶现象(BS8 和 BS9) 则温度偏低, 范围为 862~916℃, 这与选用单斜辉石与其出溶的斜方辉石(NN3 和 JS2) 所计算得到的结果(857~973℃) 相当, 反映出在岩浆上升过程中有温度下降的阶段, 也进一步说明, 温度下降时, 斜方辉石颗粒中心发生出溶作用。

对尖晶石相橄榄岩的压力估计至今没有理想的方法。据 Mercier(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 1.5~1.8 GPa, 用此法所估算的温度为 958~1 094℃, 比 BM85 和 BKN90 的计算结果略高, 在  $p-T$  投影图中位于大洋地温线(据 Ringwood, 1975) 以上的同一深度上, 包体的温度比大洋地温平均值高出约 65℃(图 7), 曲线近平行于大洋地温, 这是产有包体的大陆区的普遍现象, 通常将之归因于裂谷事件当中的

表 6 温度(℃) 和压力(GPa) 的计算结果

Table 6 Temperatures calculated from different geothermometers(℃) and pressures(GPa)

样品	JS3	JS14	JS17	JS18	JN6	JN27	BS8	BS9	BS14	NN3	JS2	
BKN90	1.0G	980	943	949	938	967	879	855	856	1 075	856	963
	1.5G	987	950	956	931	974	886	862	862	1 086	863	973
	2.0G	993	958	965	944	981	893	868	869	1 096	870	982
	2.5G	1 000	965	973	951	988	900	874	875	1 106	878	991
	3.0G	1 006	973	982	958	996	906	880	881	1 116	885	1 000
	$\Delta t$	7	8	8	5	7	7	6	6	10	8	9
BM85	1.0G	1 005	929	909	945	972	902	902	875	995	851	883
	1.5G	1 012	935	911	952	979	918	916	881	1 002	857	889
	2.0G	1 019	942	917	957	986	918	916	887	1 008	863	895
	2.5G	1 026	949	923	964	993	919	920	894	1 015	869	902
	3.0G	1 033	955	930	970	999	925	926	900	1 017	875	908
	$\Delta t$	7	7	5	6	7	7	6	6	6	6	6
$\mu$ (M75)	985	974	968	975	989	973	986	958	974	1 045	1 094	
$\mu$ (M75)	2.53	1.82	1.62	1.83	1.50	1.75	1.56	1.68	1.81	2.18	2.28	

表中 BKN90 和 BM85 分别为根据 Brey and Kohler(1990) 和 Bertrand and Mercier(1985) 的二辉石温度计, 当压力变化为 1.0~3.0 GPa 时的计算结果, 其中  $\Delta t$  表示  $^{\circ}\text{C}/0.5 \text{ GPa}$ ;  $\mu$ (M75) 和  $\mu$ (M75) 分别是用 Mercier & Cartier(1975) 的斜方辉石温压计计算的温压结果; JS3~BS9 是选用尖晶石二辉橄榄岩中的二辉石计算的结果, 其中 BS8 和 BS9 包体中的辉石有出溶现象; BS14 是选用单斜辉石巨晶的计算结果; NN3 和 JS2 是选用单斜辉石与其出溶的斜方辉石计算的结果。



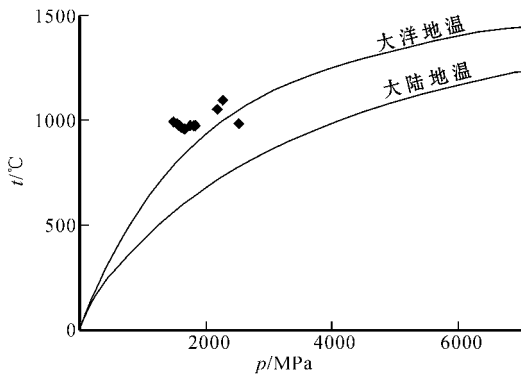


图 7 尖晶石二辉橄榄岩包体的温度压力投影图

Fig. 7 Pressure - temperature diagram of spinel ilmenite xenoliths

软流圈热物质的上涌使包体受到地幔深部的热作用(李天福等, 1999), 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)。

## 5 讨论

### 5.1 部分熔融作用

橄榄岩中单斜辉石的 Al 原子数越高, 通常代表橄榄岩受熔融抽取的程度越低(Seyler *et al.*, 1994), 而单斜辉石的  $Cr^{\#}$  值能反映地幔橄榄岩的部分熔融程度,  $Cr^{\#}$  值越高代表橄榄岩受熔融抽取的程度越高(陈绍海等, 1997)。另外, 尖晶石的  $Cr/(Cr+Al)$  也是反映岩石部分熔融程度的一个参数,  $Cr/(Cr+Al)$  越大, 反映岩石的部分熔融程度越高(Dick *et al.*, 1984; Seyler *et al.*, 1994)。集宁玄武岩中橄榄岩包体的单斜辉石  $Al_2O_3$  的含量明显低于汉诺坝地区的 6.09, 而  $Cr^{\#}$  值高于汉诺坝地区(平均 4.58); 包体中尖晶石的  $Cr_2O_3$  含量为 10.10% ~ 37.85%, 高于汉诺坝的 8.26% ~ 16.37%(汉诺坝的数据来源于冯家麟等, 1982), 说明集宁玄武岩中二辉橄榄岩包体经历了较高级别的部分熔融。

### 5.2 地幔的底辟上升

集宁的橄榄岩包体普遍发育碎斑结构, 斜方辉石和单斜辉石都有出溶现象, 加之各种变形结构(橄榄石的扭折带等), 均暗示了本区上地幔曾经历底辟上升。这种现象在我国东北、华北地区新生代玄武岩的橄榄岩包体中普遍存在(鄂莫岚等, 1987), 表明上地幔的底辟上升可能是大范围的。集宁玄武岩中

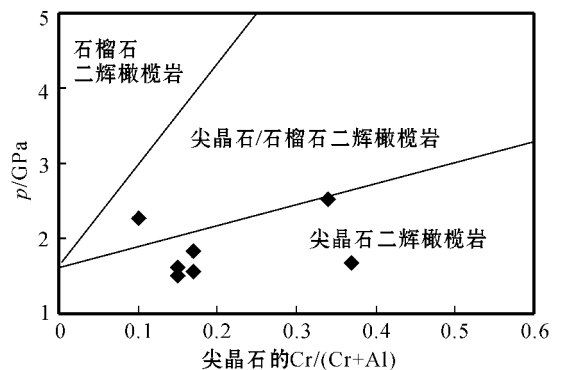
二辉橄榄岩包体所估算的温度有一定的变化(从原始颗粒的  $>950^{\circ}C$  到具有出溶现象的  $850 \sim 900^{\circ}C$ ), 也可能与上地幔的底辟上升有关系, 当温度较高的软流圈或岩石圈底部因某种原因底辟上升至岩石圈时, 由于底辟体与周围岩石圈无论在热状态还是在流变学特征上均存在很大差异, 两个地质体之间就不可避免有一个再平衡过程(徐义刚等, 1996)。

### 5.3 包体的来源深度

中国东部新生代幔源原始玄武质岩浆起源深度主要在 50 ~ 80 km 范围内(邓晋福等, 1987; 1990), 其中汉诺坝地区为 50 ~ 70 km(李天福等, 1999; 樊祺诚等, 2001), 而据地球物理资料推定的中国东部软流圈顶界深度为 60 ~ 83 km(樊祺诚等, 1990), 因此中国东部新生代玄武岩来源于软流圈。集宁地区丰镇的下地壳深度 42.8 km(祝治平等, 1997), 而根据尖晶石二辉橄榄岩的压力所估算的深度为 50 ~ 65 km。因此, 集宁玄武岩中的尖晶石二辉橄榄岩来自岩石圈地幔, 而玄武岩的来源深度应更大。

岩石学资料的积累表明, 华北地区上地幔中存在着由尖晶石向石榴石转变的过渡带(鄂莫岚等, 1987; Fan *et al.*, 1989)。尖晶石二辉橄榄岩相向石榴石二辉橄榄岩相转变的深度在 60 ~ 80 km 范围内(刘若新等, 1990; 樊祺诚等, 1997; 李天福等, 1999)。虽然集宁玄武岩中尖晶石二辉橄榄岩包体中的尖晶石具有较高的  $Cr/(Cr+Al)$  值, 但大都落入尖晶石二辉橄榄岩区(图 8), 表明几乎所有的样品均来自于岩石圈地幔的尖晶石二辉橄榄岩带。

另外, 橄榄石的 NiO 含量和  $Mg^{\#}$  值通常是地幔难熔程度的良好指示(郑建平, 1999)。集宁橄榄岩

图 8 尖晶石的  $Cr/(Cr+Al)$  与压力的关系

(据 Carroll Webb and Wood, 1986)

Fig. 8 Relationship of  $Cr/(Cr+Al)$  in spinel and pressure

(after Carroll Webb and Wood, 1986)

包体中橄榄石的  $Mg^{\#}$  值(89.5~91.7)和  $NiO$  含量(0.29~0.55%)高于汉诺坝同类包体中的橄榄石,暗示集宁玄武岩来自较高难熔程度的岩石圈地幔。

#### 5.4 包体成因

橄榄岩包体均一的矿物组成、高  $Mg^{\#}$  值以及变质和变形结构,表明它们是来自上地幔已无争议。但对橄榄岩包体的成因目前主要存在着两种不同的观点。一种观点认为,它是熔出玄武质岩浆后的难熔的上地幔残余物质(从柏林等,1982;刘若新等,1985;邱家骧等,1986;鄂莫岚等,1987;池际尚等,1988;邓晋福等,1988);另一种观点认为,它是玄武质岩浆上升途中捕获的上地幔岩石的碎块,为偶然包体,与玄武质岩浆的生成无直接联系(Tatsumoto *et al.*, 1992;刘丛强等,1996;朱炳泉等,1998)。

同一幔源包体样品中橄榄石、辉石和全岩的 $^3He/^4He$ 值十分均一,汉诺坝新生代玄武岩中幔源包体和高压巨晶的 $^3He/^4He$ 值明显不同,表明二辉橄榄岩包体与辉石巨晶形成于不同的地幔源区(李延河等,2001)。汉诺坝普通辉石巨晶与寄主岩之间的Nd、Sr和Pb同位素系统的不平衡表明巨晶不是从寄主岩中结晶形成的(Tatsumoto *et al.*, 1992)。集宁玄武岩中单斜辉石巨晶的结晶温压大于幔源包体的平衡温压,表明巨晶的来源深度可能大于包体的深度。尖晶石二辉橄榄岩包体由平衡矿物集合体组成,矿物成分稳定且变化幅度小,表明是在地幔条件下长期均匀化的结果。实验岩石学的研究表明,歪长石形成的压力条件为0.8~1.0 GPa(Green *et al.*, 1970;Chapman, 1976),即相当于25~33 km的深度范围,显然它与单斜辉石巨晶的形成条件不同。而辉石巨晶和长石巨晶普遍发育的浅色反应边可能就是矿物被捕获后与寄主玄武岩反应的结果。因此,集宁新生代玄武岩中的包体、巨晶可能来源于不同的地幔源区,这些幔源包体和巨晶是玄武质岩浆上升过程中偶然捕获的,与寄主玄武岩浆没有必然的成因联系。

## 6 小结

(1)集宁市三义堂附近的新生代玄武岩含有丰富的橄榄岩包体,主要是尖晶石二辉橄榄岩。与包体相伴生的主要是普通辉石和透辉石巨晶,长石巨晶主要是歪长石和少量斜长石。

(2)集宁玄武岩中尖晶石二辉橄榄岩记录的平

衡温度在950℃左右,与汉诺坝包体所记录的平衡温度接近,大致反映了华北克拉通北缘大陆岩石圈地幔尖晶石相部分的温度状态。单斜辉石巨晶的结晶温压大于幔源包体的平衡温压,表明巨晶的来源深度可能大于包体。

(3)集宁玄武岩中尖晶石二辉橄榄岩包体是玄武岩岩浆上升过程中偶然捕获的岩石圈地幔的岩石碎块,在被玄武岩捕获之前,岩石圈经历了较高级度的部分熔融。

致谢 本文工作曾得到刘树文教授和魏春景教授的指点;电子探针分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室舒桂明老师指导下完成;审稿人认真细致地阅读本文并提出了启发性修改意见,在此一并致以谢意。

## References

- Bertrand P and Mercier J C. 1985. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 76: 109~122.
- Brey G P and Kohler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers [J]. *Journal of Petrology*, 31: 1353~1378.
- Carroll Webb S A and Wood B J. 1986. Spinel-pyroxene-garnet relationship and their dependence on Cr/Al ration [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 471~480.
- Chapman N A. 1976. Inclusions and megacrysts from undersaturated tuff sand basanites, East Fife, Scotland [J]. *Journal of Petrology*, 17: 472~498.
- Chen Daogong, Zhi Xiachen, Li Binxian, *et al.* 1997. Nd, Sr and Pb isotopic compositions and their petrogenetic information of pyroxenite xenoliths from Hannuoba basalts, China [J]. *Geochimica*, 26(1): 1~21 (in Chinese with English abstract).
- Chen Shaohai, Zhou Xinhua, O'Reilly S Y, *et al.* 1997. Trace element characteristics in the diopsides of peridotite xenoliths: a laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry study [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(7): 579~584.
- Chi Jishang. 1988. Study on Cenozoic Basalt and Upper Mantle in Eastern China (with Special Concern to Kimberlite) [M]. Beijing: Publishing House of China University of Geosciences (in Chinese).
- Cong Bolin and Zhang Ruyuan. 1982. Genetic petrology study on Hannuoba basalt and its ultramafic xenoliths [J]. *Science in China*, B(12): 1109~1122 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Lu Fengxiang and E Molan. 1987. The origin of Hannuoba basalt magma and the ascending *p-t* path [J]. *Geological Review*, 33(4): 317~323 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Lu Fengxiang and E Molan. 1988. Ultramafic nodules in Hannuoba basalts and the nature of the upper mantle inferred [A]. *Mineralogy and Petrology Paper Collections* (No. 4) [C]. Beijing:

- Geological Publishing House, 23~35 (in Chinese).
- Deng Jinfu and Zhao Hailing. 1990. The nature and change of the Cenozoic upper asthenosphere in Eastern China [ A ]. Professional Committee for Mantle Mineralogy, Petrology and Geochemistry under China Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Collected Papers on Upper Mantle Characteristics and Dynamics of China [ C ]. Beijing: Seismological Publishing House, 8~13 (in Chinese).
- Dick H J B and Bullen B. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type and spatially associated lavas [ J ]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 86: 54~76.
- E Molan and Zhao Dasheng. 1987. Cenozoic Basalt and Xenoliths from Depth in Eastern China [ M ]. Beijing: Scientific Publishing House (in Chinese).
- Fan Q C and Hooper P R. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of Eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherms [ J ]. Journal of Petrology, 30: 1117~1158.
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Li Ni, *et al.* 1998. Zircon chronology and REE geochemistry of granulite xenoliths at Hannuoba [ J ]. Chinese Science Bulletin, 43: 1510~1515.
- Fan Qicheng and Liu Ruoxin. 1990. Study on phase transition of multiple spinel-garnet peridotite in upper mantle beneath Eastern China [ A ]. Professional Committee for Mantle Mineralogy, Petrology and Geochemistry under China Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Collected Papers on Upper Mantle Characteristics and Dynamics of China [ C ]. Beijing: Seismological Publishing House, 72~82 (in Chinese).
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Liu Ruoxin, *et al.* 2001. Eclogite facies garnet - pyroxenolite xenolith in Hannuoba area: New evidence of magma underplating [ J ]. Acta Petrologica Sinica, 17(1): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Fan W M and Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China [ J ]. Geotectonics et Metallogenia, 16: 171~180.
- Feng Jialin, Xie Manze, Zhang Hong, *et al.* 1982. Hannuoba basalt and deep xenoliths in it [ J ]. Transaction of Hebei Geological College, (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.
- Green D H and Hibberson W. 1970. The instability of plagioclase in peridotite at high pressure [ J ]. Lithos, 3: 209~221.
- Kohler T P and Brey G P. 1990. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with application [ J ]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54(7~9): 2375~2388.
- Li Tianfu and Ma Hongwen. 2002. Clinopyroxene - melt equilibrium temperature and pressure of Cenozoic basalts with special reference to the genesis of mantle xenoliths in some areas of eastern China [ J ]. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(1): 11~23 (in Chinese with English abstract).
- Li Tianfu, Ma Hongwen and Bai Zhimin. 1999. The temperature and pressure states of spinel-garnet transition zone beneath Hannuoba area [ J ]. Geoscience, 13(1): 66~72 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanhe, Li Jincheng, Song Hebin, *et al.* 2001. Helium isotope studies of the mantle xenoliths and megacrysts from the Cenozoic basalts in Hannuoba, Hebei Province, China [ J ]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(4): 214~217 (in Chinese with English abstract).
- Liu C Q, Masuda A and Xie G H. 1991. Isotope and trace-element geochemistry of alkali basalts and associated megacrysts from the Huangyishan volcano, Kuandian, Liaoning, NE China [ J ]. Chemical geology, 97: 219~231.
- Liu Congqiang, Masuda A and Xie Guanghong. 1994. Major- and trace-element compositions of Cenozoic basalts in eastern China: petrogenesis and mantle source [ J ]. Chemical geology, 114: 19~42 (in Chinese with English abstract).
- Liu Congqiang, Xie Guanghong and Masuda A. 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, Chen Wenji, Sun Jianzhong, *et al.* 1992. K-Ar ages and tectonic settings of Cenozoic volcanic rocks in China [ A ]. Liu Ruoxin. Chronology and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks in China [ C ]. Beijing: Seismological Publishing House, 1~43 (in Chinese).
- Liu Ruoxin, Fan Qicheng and Sun Jianzhong. 1985. Study on garnet lherzolite xenoliths from several places in China [ J ]. Acta Petrologica Sinica, 1(4): 24~33 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruoxin and Ma Baolin. 1990. The sequence of rocks and physical properties in uppermost mantle beneath North China [ A ]. Professional Committee for Mantle Mineralogy, Petrology and Geochemistry under China Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Collected Papers on Upper Mantle Characteristics and Dynamics of China [ C ]. Beijing: Seismological Publishing House, 1~7 (in Chinese).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Liu Xiaoming, *et al.* 2004. Zircon geochronology of the low  $\epsilon$ Nd intermediate granulite xenoliths from Damaping, Hannuoba, China [ J ]. Geochimica, 33(3): 261~268 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xiuquan and Chen Qitong. 1990. Preliminary Study on Geochronology for Cenozoic Basalts from Inner Mongolia [ J ]. Acta Petrologica et Mineralogica, 9(1): 37~46 (in Chinese with English abstract).
- Mercier J C C. 1976. Single pyroxene geothermometry and geobarometry [ J ]. American Mineralogist, 61: 603~615.
- Mercier J C C and Carter N L. 1975. Pyroxene geotherms [ J ]. Journal of Geophysical Research, 80: 3349~3362.
- Qiu Jiaxing, Li Changnian and Ma Changqian. 1986. Study on tectonic settings and magma genetic mechanism of Hannuoba basalt [ J ]. Acta Petrologica Sinica, 2(3): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Ringwood A E. 1975. Composition and Petrology of the Earth's Mantle [ M ]. McGraw-Hill, New York.
- Rudnick R L, Gao S, Li W, *et al.* 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton [ J ]. Lithos, 77: 609~637.
- Seyler M and Bonatti E. 1994. Na, Al and Al in clinopyroxene of subcontinental and suboceanic ridge peridotites: A clue to different melting processes in the mantle [ J ]. Earth and Planetary Science Letters, 122: 271~289.
- 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.
- 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.
- Wood B J and Banno S. 1973. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 42: 109~124.
- Xu Yigang. 1993. Geothermometers applicable to the mantle xenoliths [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 167~180 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 2004. Lithospheric thinning beneath North China: A temporal and spatial perspective [J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 324~331 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang, Lin Chuanyong, Menzies M A, *et al.* 1996. Thermal history and metasomatic processes in the upper mantle beneath Wangqing, NE China—implication from mineral chemistry of a spinel periodotite xenolith [J]. *Geochimica*, 25(5): 481~494 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, O'Reilly S, *et al.* 2000. Mantle modification and mantle replacement beneath the eastern part of North China Block: Laser ICP-MS analyses on clinopyroxenes [J]. *Chinese Sciences (series D)*, 30(4): 373~382 (in Chinese).
- Zheng Jianping. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning Beneath the Eastern China [M]. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Zhou X H, Sun M, Zhang G H, *et al.* 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton [J]. *Lithos*, 62: 111~124.
- Zhu Bingquan, Li Xianhua, Dai Mo, *et al.* 1998. Isotope System Theory and Application in Earth Science with Regard to Evolution of China Continental Mantle [M]. Beijing: Scientific Publishing House (in Chinese).
- Zhu Zhiping, Zhang Xiankang, Zhang Jianshi, *et al.* 1997. Study on crust-mantle tectonics and its velocity structure of Beijing-Hualai-Fengzhen Profile [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 19(5): 499~505 (in Chinese).
- 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.
- 陈绍海, 周新华, O'Reilly S Y, 等. 1997. 辉石的激光探针 ICP 质谱分析及其深部地质意义 [J]. *科学通报*, 42(16): 1707~1711.
- 池际尚. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩) [M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 从柏林, 张儒媛. 1982. 汉诺坝玄武岩及其超镁铁质岩包体的成因岩石学研究 [J]. *中国科学*, 12(12): 1109~1122.
- 邓晋福, 路凤香, 鄂莫岚. 1988. 汉诺坝玄武岩中超镁铁岩包体及其推导的地幔性质 [A]. *矿物学岩石学论丛* [C]. 北京: 地质出版社, (4): 23~35.
- 邓晋福, 路凤香, 鄂莫岚. 1987. 汉诺坝玄武岩岩浆起源及上升的 P-T 路线 [J]. *地质评论*, 33(4): 317~323.
- 邓晋福, 赵海玲. 1990. 中国东部新生代上部软流圈性质及变迁历史 [A]. *中国矿物岩石地球化学学会地幔矿物岩石地球化学专业委员会. 中国上地幔特征与动力学论文集* [C]. 地震出版社, 67~91.
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体 [M]. 北京: 科学出版社.
- 樊祺诚, 刘若新. 1990. 上地幔尖晶石-石榴石复合橄榄岩与相转变研究 [A]. *中国矿物岩石地球化学学会地幔矿物岩石地球化学专业委员会. 中国上地幔特征与动力学论文集* [C]. 北京: 地震出版社.
- 樊祺诚, 刘若新, 谢鸿森, 等. 1997. 上地幔尖晶石-石榴石相转变实验研究及意义 [J]. *中国科学(D辑)*, 27(2): 109~113.
- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 等. 2001. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩——岩浆底侵作用新证据 [J]. *岩石学报*, 17(1): 1~6.
- 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.
- 李天福, 马鸿文. 2002. 中国东部几个地区新生代玄武岩中单斜辉石-熔体平衡温压——兼论幔源包体的成因 [J]. *岩石矿物学杂志*, 21(1): 11~23.
- 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.
- 李延河, 李金城, 宋鹤彬, 等. 2001. 河北汉诺坝新生代玄武岩中幔源包体和高压巨晶的氩同位素地球化学研究 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 214~217.
- 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.
- 刘丛强, 增田彰正, 解广轰. 1994. 辽宁宽甸黄椅山玄武岩地幔包体的 REE 和 Sr, Nd 同位素地球化学 [J]. *地质科学*, 28(3): 228~234.
- 刘若新, 陈文寄, 孙建中, 等. 1992. 中国新生代火山岩的 K-Ar 年代与构造环境 [A]. 刘若新. *中国新生代火山岩年代学与地球化学* [C]. 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.
- 刘若新, 马宝林. 1990. 华北地区地幔最上部岩石-物性分厘 [A]. *中国矿物岩石地球化学学会地幔矿物岩石地球化学专业委员会. 中国上地幔特征与动力学论文集* [C]. 北京: 地震出版社.
- 刘勇胜, 高山, 柳小明, 等. 2004. 汉诺坝大麻坪低  $\epsilon_{\text{Nd}}$  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.
- 罗修泉, 陈启桐. 1990. 内蒙古新生代玄武岩年代学初步研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 9(1): 37~46.
- 邱家骧, 李昌年, 马昌前. 1986. 汉诺坝玄武岩板块构造环境及岩浆成因机理的分析 [J]. *岩石学报*, 2(3): 1~11.
- 徐义刚. 1993. 适用于幔源包体的地质温度计 [J]. *岩石学报*, 9(2): 167~180.
- 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.
- 徐义刚, 林传勇, Menzies M A, 等. 1996. 吉林汪清尖晶石橄榄岩包体的矿物化学成分指示意义——上地幔温度史和交代作用 [J]. *地球化学*, 25(5): 481~494.
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中国新生代岩石圈减薄 [M]. 中国地质大学出版社.
- 郑建平, 路凤香, O'Reilly S Y, 等. 2000. 华北东部地幔改造和置换作用(单斜辉石激光探针研究) [J]. *中国科学(D辑)*, 30(4): 373~382.
- 朱炳泉, 李献华, 戴谟, 等. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化 [M]. 北京: 科学出版社.
- 祝治平, 张先康, 张建狮, 等. 1997. 北京—怀柔—丰镇剖面地壳上地幔构造与速度结构研究 [J]. *地震学报*, 19(5): 499~50.