

# 河北汉诺坝玄武岩中橄榄岩包体矿物的含水性研究 ——微区红外光谱分析

郝艳涛, 夏群科, 杨晓志

(中国科学院壳幔物质与环境实验室, 中国科技大学地球与空间科学学院 安徽 合肥 230026)

**摘要:**对12个来自河北汉诺坝玄武岩的橄榄岩包体中的单斜辉石和斜方辉石进行了详细的微区傅立叶变换红外光谱(Micro-FTIR)分析。结果显示,所有的单斜辉石和斜方辉石颗粒都含有以OH形式存在的结构水。对部分粒径较大的辉石颗粒内部的多点分析表明,结构水含量表现出中心高边缘低的不均一分布。这种不均一分布的特征应该来自于包体上升过程中由于压力降低而引起的H扩散。如果用每个样品多个测定颗粒的中心部位的平均值来代表该样品,12个样品的单斜辉石水含量为 $48 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$ ,斜方辉石水含量 $20 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$ 。根据矿物水含量(假设橄榄石的水含量为 $2 \times 10^{-6}$ )和它们的体积分数计算的全岩水含量为 $11 \times 10^{-6} \sim 48 \times 10^{-6}$ 。结合已经发表的橄榄岩包体数据来看,在岩石圈地幔的物理化学条件下,单斜辉石与斜方辉石之间水的平衡分配系数大约为 $2.2 \pm 0.6$ ,岩石圈中水的分布可能具有纵向和横向上的不均一性。

**关键词:**结构水;红外光谱;橄榄岩;汉诺坝;岩石圈不均一性

中图分类号:P575.4;P588.12<sup>+</sup>5

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2007)02-0130-11

## Water in minerals from peridotite xenoliths of Hannuoba basalts, Hebei, China: micro-FTIR results

HAO Yan-tao, XIA Qun-ke and YANG Xiao-zhi

(CAS Laboratory of Crust-Mantle Material and Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Anhydrous minerals (olivine, clinopyroxene and orthopyroxene) from 12 peridotite xenoliths hosted by basalts in Hannuoba of Hebei were investigated by micro-Fourier transform infrared spectrometry (FTIR). No distinct OH absorption bands can be found in olivines, whereas all the analyzed clinopyroxene (Cpx) and orthopyroxene (Opx) grains contain structural water in the form of OH. The structural water contents of pyroxenes show inhomogeneous distribution within individual grains characterized by higher contents in the core and lower in the rim. Low water contents at grain rims probably result from hydrogen diffusion after pressure decrease upon rock ascending. The range of the average core water content of multi grains ( $>10$ ) from the same sample for the twelve Hannuoba peridotites is  $48 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$  and  $20 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$  for Cpx and Opx respectively. On the basis of water contents of the minerals and their volume proportions, the water contents of the whole rocks are estimated to be  $11 \times 10^{-6} \sim 48 \times 10^{-6}$ . Combined with the available data of peridotite xenoliths worldwide, it is held that, under the physical and chemical conditions of lithospheric mantle,

收稿日期:2006-07-14;修订日期:2006-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40473007,40673028);中法先进研究计划(T05-02);教育部“新世纪优秀人才支持计划”;中国科学院研究生科学与社会实践项目;中国科学技术大学研究生创新基金资助项目

作者简介:郝艳涛(1982-) 硕士研究生 地球化学专业 E-mail: ythao@mail.ustc.edu.cn;通讯作者:夏群科 教授 E-mail: qkxia@ustc.edu.cn

the water partition coefficient between clinopyroxene and orthopyroxene should be  $2.2 \pm 0.6$ , and the water distribution in lithosphere seems to be heterogeneous both at global and regional scales.

**Key words:** structural water; FTIR; peridotite; Hannuoba; heterogeneity

岩中产水是地球区别于其他星球的最显著特点,是人类赖以生存的基础。即使只有微量水的存在,矿物和岩石的许多物理化学性质(如流速、流变学特征、导电性、光学性质、熔融温度、离子的扩散行为等)以及地球深部多种地质作用(如部分熔融、流体交代、拆离(detachment)、拆沉(delamination)、底侵(underplating)等)的发生和发展也会受到明显的影响。甚至有人认为如果没有水,板块运动都不会发生(Regenauer-Lieb *et al.*, 2001; Regenauer-Lieb and Yuen, 2003)。因此,研究深部地球不同层圈中水的含量、分布和演化一直是地球科学领域的重大基础问题之一。

位于华北克拉通的河北汉诺坝地区是我国著名的深源包体产地,新生代玄武岩产出类型丰富的来自下地壳、上地幔以及壳幔过渡带的岩石包体和矿物捕虏晶。对这些深源物质已有了大量出色的岩石学、矿物学、地球化学、年代学和地球物理学的工作(樊祺诚等, 2002; 夏琼霞等, 2004; Song and Frey, 1989; Fan and Hooper, 1990; Tatsumoto *et al.*, 1992; Fan *et al.*, 2000; Gao *et al.*, 2000, 2002; Chen *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2001, 2004; Xu, 2002; Zhou *et al.*, 2002; Wilde *et al.*, 2003; Rudnick *et al.*, 2004),但是迄今为止仅有郭立鹤等(1998)报道了5个尖晶石二辉橄榄岩、3个辉石岩中矿物的结构水含量和夏群科等(1999)报道了3个单斜辉石巨晶的结构水含量。本文运用微区傅立叶变换红外光谱技术(Micro-FTIR)对来自河北汉诺坝玄武岩中的12个橄榄岩包体进行了详细的矿物结构水分析。

## 1 样品和分析方法

12个样品均采自汉诺坝大麻坪地区。除样品P4为尖晶石方辉橄榄岩(Cpx约5%)、样品P8为橄榄石二辉橄榄岩(Cpx<sub>50</sub>Opx<sub>25</sub>Ol<sub>25</sub>)外,其余均为尖晶石二辉橄榄岩。样品新鲜,呈翠绿色。橄榄岩为原生粒状、镶嵌粒状、板状等粒状结构,三联点常见。样品中橄榄石和斜方辉石的颗粒粗大,粒径普遍大于1 mm,少数斜方辉石可达0.5 cm,单斜辉石颗粒

的粒径基本都小于1 mm。12个样品中的8个已经进行过全岩的主量元素、微量元素、Re-Os同位素分析以及单斜辉石的微量元素分析(夏琼霞等, 2004),P3和P14表现出的全岩和单斜辉石轻稀土元素富集特征表明它们经历了隐性地幔交代作用,由Os同位素代理等时线得到的年龄为1.7~2.0 Ga,表明汉诺坝尖晶石相橄榄岩所代表的是中元古代的岩石圈地幔。

### 1.1 红外光谱

本文的主要工作内容是对橄榄岩包体进行矿物结构水的分析。将橄榄岩包体切割成长约2~5 cm、宽约1 cm的小块,双面抛光,厚度控制在0.15~0.3 mm之间。这样的厚度范围小于单个晶体的粒径,确保了红外光谱分析时探测的是单晶,但同时又远远大于常规岩石薄片的厚度,目的是为了红外光谱分析时获得较强的信号。为清除制样过程中薄片表面残余的树脂,在进行红外光谱分析前将样品放入丙酮中浸泡>24 h,再用无水乙醇和蒸馏水反复清洗。然后置于烘箱中,在100℃下干燥至少6 h以除去样品表面和裂隙中的吸附水。傅里叶变换红外光谱分析使用带continuum显微镜的Nicolet 5700型红外光谱仪,探测器为液氮冷却的MCT-A,使用非偏振光。样品及空白的扫描次数均为128次,分辨率为 $8 \text{ cm}^{-1}$ 。分析区域位于单个颗粒内部,避开可见的包裹体和裂痕,为保证较高的信噪比,一般情况下分析区域设置为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ ,少数颗粒较小的情况下为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 。光谱的收集和处理使用Thermo Nicolet公司提供的OMINIC 7.1a软件。光谱的收集过程中使用H<sub>2</sub>O校正扣除空气中的水分影响。所有分析在中国科技大学地球与空间科学学院的显微红外光谱实验室完成。

### 1.2 电子探针

橄榄岩包体矿物的主要元素组成在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室的电子探针室进行,采用JEOL JXA-8800M型电子探针,束电流20 nA,加速电压15 kV,探测区域 $<5 \mu\text{m}$ ,天然矿物或合成的氧化物作为标准,所有测试数据进行ZAF校正。

## 2 结果

### 2.1 矿物的化学组成和包体的温度估计

所有橄榄岩样品中的单斜辉石、斜方辉石、橄榄石和尖晶石都进行了多点多颗粒的电子探针分析,由于同一样品内部化学组成均一,表1~4中只列出了多点分析的平均值。单斜辉石的SiO<sub>2</sub>含量为52.06%~53.66%,MgO含量为14.44%~16.83%,FeO含量为2.23%~2.82%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为2.65%~6.44%,CaO含量为20.76%~21.97%,Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量为0.66%~1.24%,Mg<sup>#</sup>值[(100 Mg/(Mg+Fe))]为90.45~92.39;斜方辉石的SiO<sub>2</sub>含量为55.00%~56.63%,MgO含量为31.99%~33.01%,FeO含量为5.54%~7.05%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为2.72%~4.15%,CaO含量为20.76%~21.97%,Mg<sup>#</sup>值为89.26~91.40;橄榄石的MgO含量为47.71%~49.74%,FeO含量为8.73%~11.2%,Mg<sup>#</sup>值为88.61~91.04;尖晶石的成分变

化范围较大,FeO含量为10.94%~15.63%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为31.11%~58.84%,Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量为9.25%~34.81%。本文样品的化学组成落在前人报道的范围之内(Song and Frey, 1989; Fan and Hooper, 1990; Chen *et al.*, 2001; Rudnick *et al.*, 2004)。图1示意了汉诺坝橄榄岩样品中辉石[包括本文数据和Rudnick等(2004)的数据]之间的化学成分相关性,除受过地幔交代作用的P3、P14和属于橄榄二辉岩的P8在部分图中表现出偏离以外。无论是单斜辉石还是斜方辉石,Mg<sup>#</sup>值都与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>呈现大致的负相关,与Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>呈现大致的正相关,这与全岩数据所指示的一致(夏琼霞等, 2004; Song and Frey, 1989; Fan and Hooper, 1990; Chen *et al.*, 2001; Rudnick *et al.*, 2004),表明汉诺坝橄榄岩样品是同一源区不同程度部分熔融的残余。

利用Brey和Kohler(1990)的二辉石温度计计算的本文橄榄岩包体的形成温度为880~1010℃,也落在前人报道的利用同样温度计计算的汉诺坝橄榄岩温度范围(750~1150℃, Song and Frey, 1989;

表1 汉诺坝橄榄岩包体中橄榄石的主要元素组成

ω<sub>B</sub>/%

Table 1 Chemical composition of olivines in peridotite xenoliths from Hannuoba

样品号	P1	P2	P3	P4	P6	P8	P11	P12	P13	P14	P15	P17
SiO <sub>2</sub>	40.31	41.25	40.64	40.99	40.63	40.31	40.62	40.27	40.37	40.83	40.47	40.66
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01
FeO	10.44	10.36	11.02	8.73	9.64	9.89	9.86	10.16	10.89	10.15	10.68	9.56
MnO	0.49	0.46	0.47	0.49	0.53	0.46	0.51	0.48	0.48	0.52	0.52	0.65
MgO	48.53	47.71	48.10	49.74	48.86	49.03	48.93	48.91	48.38	48.76	48.28	48.76
CaO	0.02	0.03	0.01	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.82	99.85	100.29	100.09	99.74	99.78	100.01	99.92	100.20	100.31	100.04	99.72
Si	0.99	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.22	0.21	0.23	0.18	0.20	0.20	0.20	0.21	0.22	0.21	0.22	0.20
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	1.78	1.75	1.76	1.81	1.79	1.80	1.79	1.80	1.78	1.78	1.77	1.79
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	3.01	2.99	3.00	3.00	3.00	3.01	3.00	3.01	3.01	3.00	3.00	3.00
Mg <sup>#</sup>	89.23	89.15	88.61	91.04	90.04	89.84	89.85	89.56	88.79	89.55	88.96	90.09

表 2 汉诺坝橄榄岩包体中单斜辉石的主要元素组成

 $w_B/\%$ 

Table 2 Chemical composition of clinopyroxenes in peridotite xenoliths from Hannuoba

样品号	P1	P2	P3	P4	P6	P8	P11	P12	P13	P14	P15	P17
SiO <sub>2</sub>	53.04	53.02	52.15	53.66	52.52	52.06	52.06	52.24	53.13	52.51	52.28	52.94
TiO <sub>2</sub>	0.53	0.41	1.05	0.20	0.35	0.19	0.47	0.50	0.58	0.68	0.59	0.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.80	5.73	5.07	2.65	4.98	4.44	5.57	5.37	6.44	5.84	5.70	5.33
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.77	0.93	0.89	1.24	0.92	0.74	0.74	0.80	0.69	0.89	0.66	0.81
FeO	2.43	2.65	2.51	2.47	2.76	2.75	2.73	2.82	2.72	2.23	2.63	2.55
MnO	0.23	0.30	0.37	0.33	0.38	0.31	0.28	0.33	0.24	0.33	0.41	0.36
MgO	14.56	14.65	14.89	16.83	15.43	16.13	15.38	15.38	14.44	14.55	14.92	14.67
CaO	21.19	20.76	21.97	21.75	21.21	22.15	20.85	20.81	20.86	21.40	21.11	20.98
Na <sub>2</sub> O	1.07	1.16	0.97	0.72	0.99	0.54	0.98	0.98	1.24	1.12	1.12	0.92
K <sub>2</sub> O	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.63	99.62	99.88	99.85	99.55	99.30	99.06	99.24	100.33	99.54	99.43	99.01
Si	1.92	1.92	1.90	1.95	1.91	1.90	1.90	1.91	1.91	1.91	1.90	1.93
Ti	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
Al	0.25	0.24	0.22	0.11	0.21	0.19	0.24	0.23	0.27	0.25	0.24	0.23
Cr	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
Fe	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.07	0.08	0.08
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.79	0.79	0.81	0.91	0.84	0.88	0.84	0.84	0.77	0.79	0.81	0.80
Ca	0.82	0.81	0.86	0.85	0.83	0.87	0.82	0.81	0.80	0.83	0.82	0.82
Na	0.08	0.08	0.07	0.05	0.07	0.04	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08	0.07
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	3.97	3.97	3.99	4.00	3.99	4.00	3.99	3.99	3.97	3.98	3.99	3.96
Mg <sup>#</sup>	91.45	90.78	91.38	92.39	90.87	91.29	90.96	90.68	90.45	92.09	91.00	91.11

表 3 汉诺坝橄榄岩包体中斜方辉石的主要元素组成

 $w_B/\%$ 

Table 3 Chemical composition of orthopyroxenes in peridotite xenoliths from Hannuoba

样品号	P1	P2	P3	P4	P6	P8	P11	P12	P13	P14	P15	P17
SiO <sub>2</sub>	56.33	56.21	55.86	56.31	55.54	55.03	55.12	55.00	56.19	56.03	55.26	55.98
Ti <sub>2</sub> O	0.10	0.07	0.26	0.11	0.10	0.05	0.12	0.14	0.11	0.12	0.14	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.50	3.57	3.20	2.72	3.65	4.07	4.15	3.90	4.02	3.40	3.82	3.92
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26	0.33	0.33	0.59	0.46	0.39	0.40	0.36	0.26	0.25	0.30	0.33
FeO	6.51	6.58	7.05	5.54	6.12	6.67	6.02	6.36	6.79	6.30	6.65	5.87
MnO	0.60	0.54	0.47	0.57	0.47	0.50	0.55	0.57	0.56	0.40	0.60	0.50
MgO	32.92	31.99	32.86	33.00	32.40	32.85	32.76	32.55	31.97	33.01	32.37	32.23
CaO	0.38	0.43	0.37	0.81	0.68	0.74	0.70	0.63	0.49	0.36	0.57	0.62
Na <sub>2</sub> O	0.05	0.06	0.03	0.06	0.05	0.05	0.06	0.04	0.07	0.05	0.06	0.06
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.65	99.77	100.43	99.71	99.49	100.35	99.86	99.55	100.46	99.91	99.78	99.63
Si	1.93	1.94	1.93	1.95	1.93	1.90	1.91	1.91	1.93	1.93	1.92	1.94
Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.14	0.15	0.13	0.11	0.15	0.17	0.17	0.16	0.16	0.14	0.16	0.16
Cr	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe	0.19	0.19	0.20	0.16	0.18	0.19	0.17	0.19	0.20	0.18	0.19	0.17
Mn	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
Mg	1.68	1.65	1.69	1.70	1.68	1.69	1.69	1.69	1.64	1.70	1.68	1.66
Ca	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	3.99	3.98	4.00	3.99	3.99	4.01	4.00	4.00	3.98	3.99	4.00	3.98
Mg <sup>#</sup>	90.02	89.66	89.26	91.40	90.42	89.77	90.66	90.12	89.36	90.33	89.66	90.72

表4 汉诺坝橄榄岩包体中央晶石的主要元素组成

 $w_B/\%$ 

Table 4 Chemical composition of spinels in peridotite xenoliths from Hannuoba

样品号	P1	P2	P3	P4	P6	P8	P11	P12	P13	P15	P17	P14
SiO <sub>2</sub>	0.00	0.05	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.02	0.05	0.00
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.15	0.36	0.35	0.18	0.07	0.19	0.23	0.12	0.21	0.15	0.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57.27	53.96	51.00	31.11	50.10	54.03	54.39	53.93	58.84	57.68	53.00	55.74
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.00	13.27	17.07	34.81	17.60	14.75	13.82	14.53	9.25	10.07	14.52	11.88
FeO	11.68	12.35	12.61	15.63	11.87	12.13	11.82	11.21	11.62	10.94	12.00	11.20
MnO	0.57	0.50	0.62	0.89	0.56	0.59	0.45	0.40	0.48	0.37	0.51	0.46
MgO	18.39	19.24	18.45	16.90	19.25	19.71	19.96	19.64	20.14	20.32	19.74	19.70
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	98.96	99.52	100.14	99.73	99.60	101.33	100.69	99.95	100.47	99.60	99.98	99.14
Si	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.78	1.69	1.61	1.08	1.59	1.66	1.68	1.67	1.79	1.77	1.65	1.73
Cr	0.23	0.28	0.36	0.81	0.37	0.30	0.29	0.30	0.19	0.21	0.30	0.25
Fe	0.26	0.27	0.28	0.38	0.27	0.26	0.26	0.25	0.25	0.24	0.27	0.25
Mn	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.72	0.76	0.74	0.74	0.77	0.77	0.78	0.77	0.77	0.79	0.78	0.77
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	3.00	3.01	3.01	3.05	3.02	3.01	3.02	3.01	3.01	3.01	3.02	3.01
Mg <sup>#</sup>	73.74	73.52	72.29	65.85	74.31	74.34	75.07	75.74	75.56	76.81	74.58	75.82

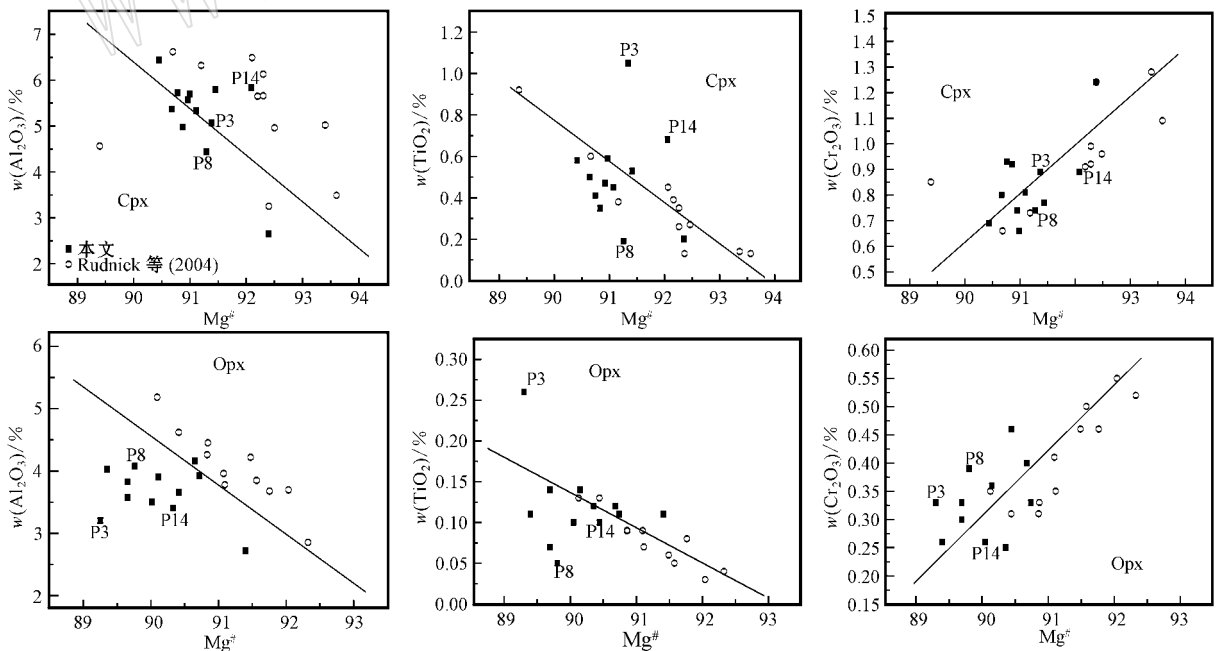


图1 汉诺坝橄榄岩包体中辉石的主要元素相关图

Fig. 1 Correlations of major elements in pyroxenes of peridotite xenoliths from Hannuoba

Fan and Hooper, 1990; Chen *et al.*, 2001; Rudnick *et al.*, 2004) 之内。

### 2.2 矿物结构水的赋存状态

在典型的 OH 红外吸收区域内( 3 700 ~ 2 800  $\text{cm}^{-1}$  )所有分析的橄榄石( 每个样品至少分析了 7 个以上的颗粒 )都没有明显的吸收峰, 这表明橄榄石要么不含结构水, 要么结构水含量低于检出限(  $\text{H}_2\text{O}$  的质量分数约为  $2 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$  )。所有的单斜辉石和斜方辉石都出现了明显的吸收峰。单斜辉石吸收峰可分为 3 组 3 630 ~ 3 620  $\text{cm}^{-1}$ 、3 550 ~ 3 530  $\text{cm}^{-1}$  和 3 470 ~ 3 450  $\text{cm}^{-1}$  斜方辉石的吸收峰主要

也是 3 组 3 600 ~ 3 580  $\text{cm}^{-1}$ 、3 520 ~ 3 510  $\text{cm}^{-1}$  和 3 420 ~ 3 410  $\text{cm}^{-1}$  部分样品出现 3 290  $\text{cm}^{-1}$  的小峰。这些吸收峰的位置和谱带特征与其他地区幔源辉石的情况一致( Skogby and Rossman, 1989; Skogby *et al.*, 1990; Bell and Rossman, 1992; Ingrin and Skogby, 2000; Peslier *et al.*, 2002; 郭立鹤等, 1998; 夏群科等, 2000; 郝艳涛等, 2006 )可以确定是辉石矿物中的结构 OH 引起的。图 2 是单斜辉石和斜方辉石的代表性红外光谱图, 图中 2 900  $\text{cm}^{-1}$  峰是残存的树脂, 3 740 和 3 840  $\text{cm}^{-1}$  峰是光源引起的, 都和矿物本身无关, 其余的是矿物结构 OH 的吸收峰。

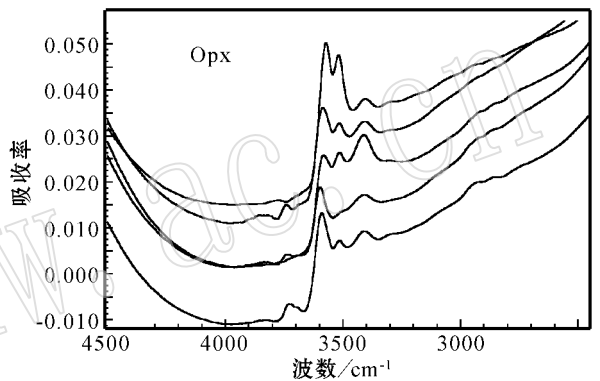
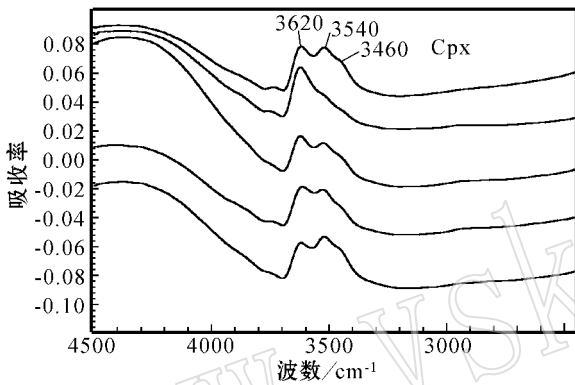


图 2 汉诺坝单斜辉石和斜方辉石的代表性红外光谱图

Fig. 2 Representative IR spectra of clinopyroxene and orthopyroxene from Hannuoba peridotites

### 2.3 矿物结构水的含量

使用 Beer-Lambert 公式( 吸收强度 = 吸收系数  $\times$  厚度  $\times$  水含量  $\times$  方向因子 )计算本文样品的结构水含量(  $\text{H}_2\text{O}$  的质量分数, 下同 )。吸收强度用扣除基线( baseline )之后的 OH 吸收峰的积分面积( 3 700 ~ 2 800  $\text{cm}^{-1}$  )表示, 吸收系数采用 Bell 等( 1995 )提供的值: 单斜辉石为  $7.09 / (10^{-6} \cdot \text{cm}^2)$ , 斜方辉石为  $14.84 / (10^{-6} \cdot \text{cm}^2)$ ; 方向因子对于辉石取  $1/3$  ( Paterson, 1982 )。由于同一样品的厚度均匀( 误差  $< 10\%$  ), 所以在计算同一样品内不同颗粒的水含量时使用多点测量(  $> 30$  个点, 覆盖整个薄片 )的平均值。由于使用非偏振光分析光学上非均质的晶体会引起非系统的偏差( Libowitzky and Rossman, 1996 )因此笔者对每个橄榄岩中的单斜辉石和斜方辉石都分析了 10 ~ 15 个颗粒( 覆盖整个薄片 ), 而每个颗粒都尽可能地分析多点, 用所有颗粒中心部位的平均值来代表该样品中单斜辉石和斜方辉石的水含量。对于颗粒较大的辉石进行了多点测试, 发现

它们的 OH 吸收强度( 对应于水含量 )表现出中心高边缘低的特征, 图 3 示意了 1 个粒径约 5 mm 的斜方辉石的情况。因为电子探针数据显示这些颗粒的主要元素组成是均一的, 这种 OH 吸收强度不均一分布的特征应该来自于包体上升过程中由于压力降低

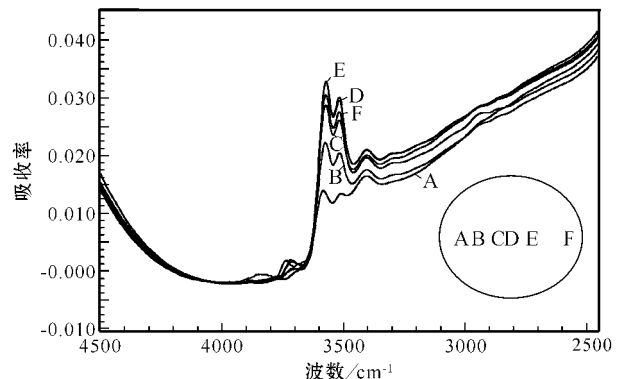


图 3 汉诺坝橄榄岩中斜方辉石颗粒内部结构水含量的变化

Fig. 3 Variation of water content represented by absorption intensity in an orthopyroxene grain

而引起的 H 扩散,因此在计算该样品中斜方辉石的水含量时,只用中心分析点的值去参与平均,用所有颗粒中心部位的平均值来代表该样品中单斜辉石和斜方辉石的水含量。

12 个样品的单斜辉石水含量为  $48 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$ ,斜方辉石水含量为  $20 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$  (表 5)。全岩的水含量是根据单矿物的结构水含量和它们的体积分数来计算的,由于单斜辉石、斜方辉石、橄榄石的密度相差不大(约  $3.3 \sim 3.6 \text{ g/cm}^3$ ),使用体积分数代替质量分数带来的误差很小。假设橄榄石的水含量约为  $2 \times 10^{-6}$  (FTIR 的检测限),全岩水含量为  $11 \times 10^{-6} \sim 48 \times 10^{-6}$  (表 5)。由于郭立鹤等(1998)是用他们自己的未正式发表的吸收系数计算矿物水含量的,因此不好和本文的数据进行直接对比。

表 5 汉诺坝橄榄岩包体矿物和全岩的水含量

Table 5 Water content of minerals and whole-rocks of peridotite xenoliths from Hannuoba

样品号	$\varphi_B/\%$			$w(\text{H}_2\text{O})/10^{-6}$		
	Cpx	Opx	Ol	Cpx	Opx	全岩
P1	20	30	50	85	23	25
P2	15	30	55	91	40	27
P3	20	30	50	60	20	19
P4	5	35	60	48	21	11
P6	15	30	55	152	53	40
P8	40	35	25	87	37	48
P11	20	30	50	72	33	25
P12	25	25	50	108	33	36
P13	20	30	50	99	47	35
P14	15	35	50	143	55	42
P15	15	30	55	123	55	36
P17	15	35	50	100	34	28

### 3 讨论

#### 3.1 汉诺坝橄榄岩的原始水含量

地幔橄榄岩矿物水含量的测定结果是否代表其在地幔源区的原始值,即包体被携带上升至地表的过程中是否经历了扩散和/或与寄主岩浆发生反应,取决于两个因素:寄主岩浆的上升速率;H 在包体和寄主岩浆间的动力学交换。动力学实验数据显示 H 扩散在  $1000^\circ\text{C}$  的 mm 级别的橄榄石和辉石中达到完全平衡大约只需要几个小时(Kohlstedt and Mackwell, 1998; Hercule and Ingrin, 1999; Carpenter *et al.*, 2000; Stadler and Skogby, 2003)。但是 H 的扩

散还与周围环境有关,周围环境中的水含量、氧逸度等都会改变 H 的扩散速率。另外, H 在辉石中的结合不只取决于扩散速率,还取决于 H 结合进入矿物中的交换反应速率。这些反应(如与 H 结合的点-缺陷的平衡)与 H 的扩散速率相比,速度要慢得多。在硅酸盐中 H 比其他的缺陷扩散快得多(Kohlstedt and Mackwell, 1998)。同女山橄榄岩相似,汉诺坝橄榄岩中某些斜方辉石表现出核高边低的水含量分布特征,这表明汉诺坝橄榄岩矿物在被寄主岩浆携带上升的过程中经历了由于压力骤然降低而引起的 H 扩散。但是和其他地区橄榄岩一样,单斜辉石和斜方辉石之间 H 平衡(图 4,见下节讨论)的保存说明,矿物颗粒核部的水含量可能代表了其原始值,因为本文计算单斜辉石和斜方辉石的水含量时用的是每个样品中所有被测颗粒的核部平均值。

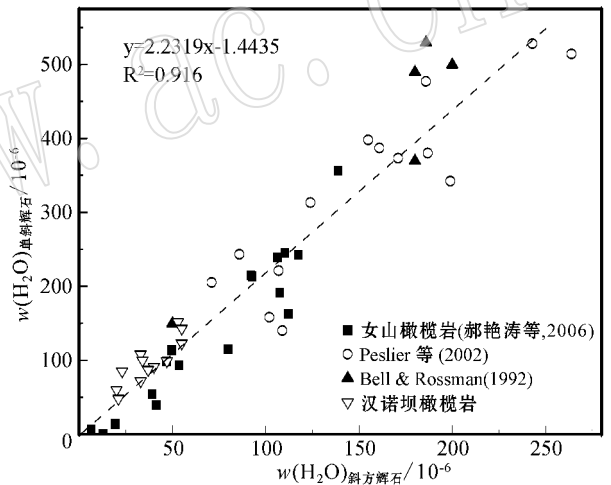
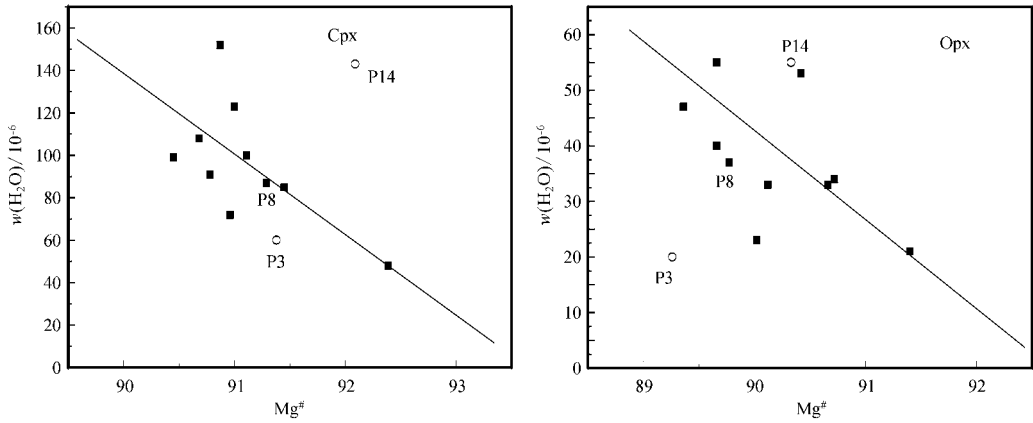


图 4 橄榄岩包体中单斜辉石和斜方辉石的水含量

Fig. 4  $\text{H}_2\text{O}$  contents of clinopyroxenes and orthopyroxenes from peridotite xenoliths

图 5 示意了单斜辉石和斜方辉石的  $\text{H}_2\text{O}$  含量与  $\text{Mg}^\#$  值的关系,如果撇开经历过交代作用的 P3、P14  $\text{H}_2\text{O}$  含量与  $\text{Mg}^\#$  值表现出负相关关系。 $\text{H}_2\text{O}$  与 Ce 具有相似的分配系数(0.01, Michael, 1995),具有高度不相容的特征,在熔融过程中易于进入熔体相,从而使得残余固相随着部分熔融程度的增加而逐渐亏损  $\text{H}_2\text{O}$ ,因此负相关关系表明矿物中的水含量受部分熔融控制,P3 和 P14 的偏离应该是交代作用所致。

汉诺坝橄榄岩全岩的水含量为  $11 \times 10^{-6} \sim 48 \times 10^{-6}$ ,远远低于原始地幔橄榄岩的值(尖晶石二辉橄榄岩  $290 \times 10^{-6}$ ,石榴石二辉橄榄岩  $245 \times 10^{-6}$ ,Bell

图 5 汉诺坝辉石水含量与  $Mg^{\#}$  值的相关图Fig. 5  $H_2O$  contents and  $Mg^{\#}$  values of pyroxenes of peridotite xenoliths from Hannuoba

and Rossman, 1992) 这符合部分熔融残余的特征。

### 3.2 单斜辉石与斜方辉石中水的平衡分配

与其他地区的情况相同,12 个汉诺坝橄榄岩中单斜辉石与斜方辉石的水含量之间呈现良好的正相关关系。图 4 显示了目前已经发表的橄榄岩包体中单斜辉石和斜方辉石的水含量的相关性,数据包括:2 个来自新墨西哥 Kilbourne Hole 新生代玄武岩中的尖晶石二辉橄榄岩包体(Bell and Rossman, 1992),1 个来自英属哥伦比亚 West Kettle River 新生代玄武岩中的尖晶石二辉橄榄岩包体(Bell and Rossman, 1992),1 个来自南非和 1 个来自纳米比亚古生代金伯利岩中的石榴石橄榄岩包体(Bell and Rossman, 1992),14 个来自美国 Mexican 和 Simcoe 新生代玄武岩中的尖晶石二辉橄榄岩包体(Peslier *et al.*, 2002),14 个女山新生代玄武岩中的尖晶石二辉橄榄岩包体(郝艳涛等, 2006)和 12 个汉诺坝新生代玄武岩中的二辉橄榄岩包体(本文)。所有这些数据构成一条相关性非常好( $R^2=0.91$ )、斜率(即单斜辉石与斜方辉石的水含量之比)为 2.23 的趋势线。良好的相关性暗示橄榄岩中的两种辉石可能都达到了水的平衡,这和岩石圈地幔的高温以及辉石矿物中 H 的快速扩散(Hercule and Ingrin, 1999; Carpenter *et al.*, 2000; Stadler and Skogby, 2003)是吻合的。如果将所有样品中单斜辉石与斜方辉石水含量的比值进行算术平均的话,其值为  $2.22 \pm 0.60$ 。Bell 等(2004)根据来自南非金伯利岩的同源地幔巨晶组合的分析结果得到的  $D_{H_2O}(\alpha_{cpx/opx})$  为  $2.0 \pm 0.3$ 。由此笔者提出,在岩石圈地幔的物理化学条件下,单斜辉石与斜方辉石之间水的平衡分配系数

大约为  $2.2 \pm 0.6$ 。

### 3.3 大陆岩石圈水含量的垂向不均一性

本文结果表明,汉诺坝橄榄岩中单斜辉石的水含量为  $48 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$ ,斜方辉石水含量为  $20 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$ ,而共存的来自下地壳的二辉麻粒岩中单斜辉石和斜方辉石的水含量要高得多,分别为  $279 \times 10^{-6} \sim 1223 \times 10^{-6}$  和  $55 \times 10^{-6} \sim 228 \times 10^{-6}$ (课题组未发表数据)。安徽女山的情况也是如此,橄榄岩中单斜辉石的水含量为  $6 \times 10^{-6} \sim 356 \times 10^{-6}$ ,斜方辉石水含量为  $6 \times 10^{-6} \sim 139 \times 10^{-6}$ (郝艳涛等, 2006);而共存的来自下地壳的二辉麻粒岩中单斜辉石和斜方辉石的水含量分别为  $200 \times 10^{-6} \sim 2330 \times 10^{-6}$  和  $140 \times 10^{-6} \sim 1270 \times 10^{-6}$ (杨晓志等, 2005)。图 6 示意了汉诺坝和女山的情况。这些数据直观地显示,大陆下地壳具有比岩石圈地幔高得多的水含量,也就是说,大陆岩石圈的水含量存在垂向不均一性。下地壳麻粒岩和上地幔橄榄岩水含量的差异可能与橄榄岩是熔融残余而麻粒岩的原岩是固结的熔体有关。下地壳水含量高说明其更“软”更“轻”,这一方面有助于保持岩石圈结构的稳定,另一方面暗示壳幔界面是个力学上可以“解耦”的部位,在此可以发生下地壳和上地幔的相对滑移。

中国东部中-新生代岩石圈的大规模减薄是显生宙中国大陆岩石圈演化中的重大事件,下地壳过程(岩浆底侵、拆沉等)在其中扮演的角色日益受到学者们的关注(翟明国等, 2005)。下地壳发生拆沉的一个条件是其加厚过程中发生榴辉岩化,造成重力不平衡。汉诺坝和女山下地壳麻粒岩的高水含



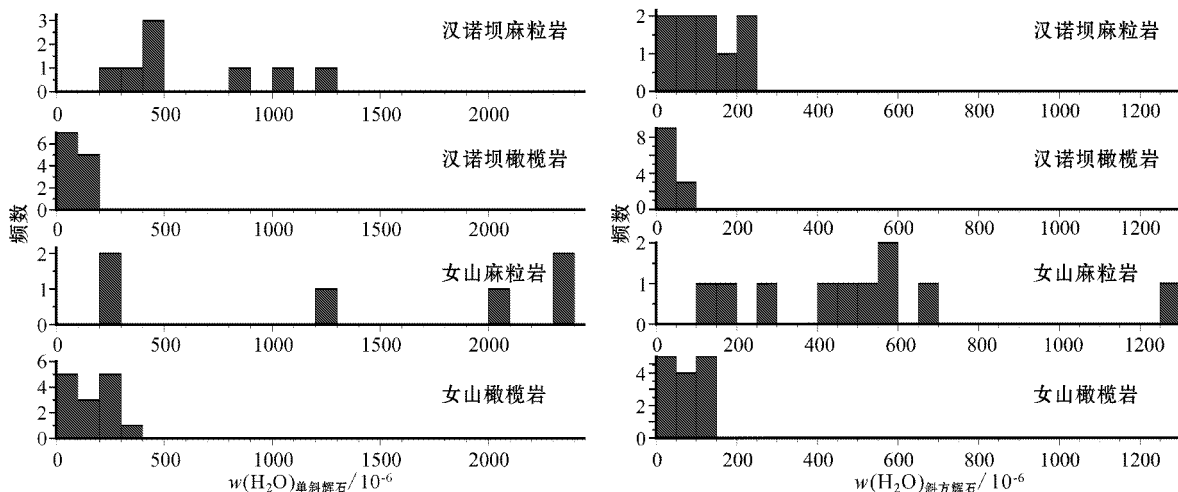


图 6 汉诺坝和女山两地麻粒岩和橄榄岩中辉石水含量的差异

Fig. 6 Water differences in pyroxenes of granulite and peridotite xenoliths from Hannuoba and Nushan

量及其在加厚过程中从矿物中逃逸出来成为自由流体为麻粒岩的榴辉岩化提供了条件,因为水的存在是榴辉岩化的前提和“催化剂”(Leech, 2001)。

### 3.4 岩石圈地幔中水含量的横向不均一性

Bell 和 Rossman(1992)报道了 3 个来自新生代碱性玄武岩的尖晶石二辉橄榄岩和 3 个来自古生代金伯利岩的石榴石二辉橄榄岩红外光谱分析结果,单斜辉石水含量为  $150 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ ,斜方辉石水含量为  $50 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 。Peslier 等(2002)报道了美国 Simcoe 和 Mexico 两个地区尖晶石二辉橄榄岩中辉石的数据,单斜辉石水含量为  $140 \times 10^{-6} \sim 528 \times 10^{-6}$ ,斜方辉石水含量为  $39 \times 10^{-6} \sim 265 \times 10^{-6}$ 。郝艳涛等(2006)对中国东部安徽女山橄榄岩包体的研究结果为,单斜辉石水含量为  $6 \times 10^{-6} \sim 356 \times 10^{-6}$ ,斜方辉石水含量  $6 \times 10^{-6} \sim 139 \times 10^{-6}$ 。本文汉诺坝橄榄岩中单斜辉石水含量为  $48 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$ ,斜方辉石水含量为  $20 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$ 。图 4 显示了以上这些结果。这些来自不同地区的包体的含水性的差异表明,岩石圈地幔中水的分布具有横向的大尺度不均一性。

以下因素可以造成水的不均一分布:①原始水含量的不均一性,包括同一时代空间上的不均一性和不同时代地幔水含量的差异;②部分熔融程度的不同;③源区是否经历了流体交代以及交代程度的差异。在目前水含量的数据还不多,配套数据(即主要元素-微量元素-同位素的配套分析)更少的情况下,很难将观察到的不均一性解释清楚。从图 4 来看,美国 Simcoe 和 Mexico 地区、新墨西哥 Kil-

bourne Hole 地区和安徽女山地区新生代玄武岩中的尖晶石二辉橄榄岩具有相对高的水含量,这 3 个地区的共同特点是受到过俯冲洋壳析出流体的交代(Peslier *et al.*, 2002; Perkins *et al.*, 2006; Xia *et al.*, 2004; Yu *et al.*, 2005)。因此,流体交代是使得源区富水的一个重要过程。来自南非和纳米比亚古生代金伯利岩的石榴石二辉橄榄岩样品也表现出高的水含量(Bell and Rossman, 1992),这可能反映了水含量的压力效应(Bell and Rossman, 1992)和/或地幔含水性的时代(古生代-新生代?)差异。

## 4 结论

(1)汉诺坝橄榄岩包体中的单斜辉石和斜方辉石含有以 OH 形式存在的结构水。单斜辉石水含量为  $48 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$ ,斜方辉石水含量  $20 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$ 。根据矿物水含量(假设橄榄石的水含量为  $2 \times 10^{-6}$ )和它们的体积分数计算的全岩水含量为  $11 \times 10^{-6} \sim 48 \times 10^{-6}$ 。

(2)结合已经发表的橄榄岩包体的数据来看,在岩石圈地幔的物理化学条件下,单斜辉石与斜方辉石之间水的平衡分配系数大约为  $2.2 \pm 0.6$ ;岩石圈中水的分布可能具有纵向和横向上的不均一性。

致谢 感谢支霞臣教授提供样品。

## References

Bell D R, Ihinger P D and Rossman G R. 1995. Quantitative analysis of

- hydroxyl in garnet and pyroxene [ J ]. *American Mineralogist*, 80 : 465~474.
- Bell D R and Rossman G R. 1992. Water in the earth 's mantle : the role of nominally anhydrous minerals [ J ]. *Science*, 255 : 1391~1397.
- Bell D R, Rossman G R and Moore R O. 2004. Abundance and partitioning of OH in a high-pressure magmatic system megacrysts from the Monastery Kimberlite, south Africa [ J ]. *Journal of Petrology*, 45 : 1539~1564.
- Brey G P and Kohler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites : II. New thermo- barometers and practical assessment of existing thermobarometers [ J ]. *Journal of Petrology*, 31 : 1353~1378.
- Carpenter W S, Mackwell S and Dyar D. 2000. Hydrogen in diopside : Diffusion profiles [ J ]. *American Mineralogist*, 85 : 480~487.
- Chen S H, O'Reilly S Y, Zhou X H, *et al.* 2001. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China : evidence from xenoliths [ J ]. *Lithos*, 56 : 267~301.
- Fan Q and Hooper P. 1990. The Cenozoic basaltic rocks of eastern China : petrology and chemical compositions [ J ]. *Journal of Petrology*, 32 : 765~810.
- Fan Q C, Sui J L, Liu R X, *et al.* 2000. Petrology and geochemistry of Jinlongdingzi active. volcano - the most recent basaltic explosive volcano at Longgang [ J ]. *Chinese Journal Geochemistry*, 19 : 312~317.
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Liu Ruoxin, *et al.* 2002. Periods of Quaternary volcanic activity in Longgang area, Jilin Province [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4) : 495~500 ( in Chinese with English abstract ).
- Gao S, Kern H, Liu Y S, *et al.* 2000. Measured and calculated seismic velocities and densities for granulites from xenolith occurrences and adjacent exposed lower crustal sections : A comparative study from the North China craton [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 105 : 18965~18976.
- Gao S, Rudnick L R, Carlson R W, *et al.* 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton [ J ]. *Earth Planetary Science Letter*, 198 : 307~322.
- Guo Lihe, Lin Xingyuan, Xie Manze, *et al.* 1998. Water in mantle xenoliths hosted by basalts from Hannuoba, Hebei [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 72(2) : 138~143 ( in Chinese with English abstract ).
- Hao Yantao, Xia Qunke, Yang Xiaozhi, *et al.* 2006. Water in minerals of peridotite xenoliths from Cenozoic basalts in Nushan volcano, SE China [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6) : 1713~1722 ( in Chinese with English abstract ).
- Hercule S and Ingrin J. 1999. Hydrogen in diopside : diffusion, kinetics of extraction-incorporation, and solubility [ J ]. *American Mineralogist*, 84 : 1577~1587.
- Ingrin J and Skogby H. 2000. Hydrogen in nominally anhydrous upper-mantle minerals : concentration levels and implications [ J ]. *European Journal of Mineralogy*, 12 : 543~570.
- Kohlstedt D L and Mackwell S J. 1998. Diffusion of hydrogen and intrinsic point defects in olivine [ J ]. *Zeitschrift for Physikalische Chemie*, 307 : 147~162.
- Leech M L. 2001. Arrested orogenic development : eclogitization, delamination, and tectonic collapse [ J ]. *Earth Planetary Science Letter*, 185 : 149~159.
- Libowitzky E and Rossman G R. 1996. Principles of quantitative absorbance measurements in anisotropic crystals [ J ]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 23(6) : 319~327.
- Liu Y S, Gao S, Jin S Y, *et al.* 2001. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba Basalt, North China Craton : Implications for petrogenesis and lower crustal composition [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 : 2589~2604.
- Liu Y S, Gao S, Yuan H L, *et al.* 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 [ J ]. *Chemical Geology*, 211 : 87~109.
- Michael P J. 1995. Regionally distinctive sources of depleted MORB : evidence from trace elements and H<sub>2</sub>O [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 131 : 301~320.
- Paterson M S. 1982. The determination of hydroxyl by infrared-absorption in quartz, silicate-glasses and similar materials [ J ]. *Bulletine de Mineralogie*, 105 : 20~29.
- Perkins G B, Sharp Z D and Selverstone J. 2006. Oxygen isotope evidence for subduction and rift-related mantle metasomatism beneath the Colorado Plateau-Rio Grande rift transition [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151 : 633~650.
- Peslier A H, Luhr J F and Post J. 2002. Low water contents on pyroxenes from spinel-peridotite of the oxidized, sub-arc mantle wedge [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 201 : 69~86.
- Regenauer-Lieb K and Yuen D A. 2003. Modeling shear zones in geological and planetary sciences : solid-and fluid-thermal-mechanical approaches [ J ]. *Earth-Science Reviews*, 63 : 295~349.
- Regenauer-Lieb K, Yuen D A and Branlund J. 2001. The Initiation of Subduction : Criticality by Addition of Water [ J ]. *Science*, 294 : 578~580.
- Rudnick R L, Gao S, Ling W L, *et al.* 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton [ J ]. *Lithos*, 77 : 609~637.
- Skogby H, Bell D R and Rossman G R. 1990. Hydroxide in pyroxene : Variations in the natural environment [ J ]. *Am. Mineral.*, 75 : 764~774.
- Skogby H and Rossman G R. 1989. OH in pyroxene : an experimental study of incorporation mechanisms and stability [ J ]. *Am. Mineral.*, 74 : 1059~1069.
- Song Y and Frey F A. 1989. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, Eastern China : Implications for subcontinental mantle heterogeneity [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53 : 97~113.
- Stalder R and Skogby H. 2003. Hydrogen diffusion in natural and synthetic orthopyroxene [ J ]. *Phy. Chem. Mineral.*, 30 : 12~19.
- Tatsumoto M, Basu A R, Wankang H, *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 , 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.
- Xia Qiongxia , Zhi Xiachen , Meng Qing , *et al.* 2004. The trace element and Re-Os isotopic geochemistry of mantle-derived peridotite xenoliths from Hannuoba : Nature and age of SCLM beneath the area [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 20( 5 ) : 1 215~1 224 ( in Chinese with English abstract ).
- Xia Q K , Chen D G , Guo L H , *et al.* 1999. Structural water in mantle-derived clinopyroxene megacrysts from Hannuoba : FTIR investigations [ J ]. *Acta Mineralogica Sinica* , 29( 2 ) : 161~165.
- Xia Qunke , Chen Daogong , Guo Lihe , *et al.* 2000. Water in peridotite xenoliths from Nushan and Panshishan : FTIR study [ J ]. *Science Geologica Sinica* , 35( 2 ) : 219~225 ( in Chinese with English abstract ).
- Xia Q K , Dallai L and Delouie E. 2004. Oxygen and hydrogen isotope heterogeneity of clinopyroxene megacrysts from Nushan Volcano , SE China [ J ]. *Chemical Geology* , 209 : 137~151.
- Xu Y G. 2002. Evidence for crustal components in the mantle and constraints on crustal recycling mechanisms : pyroxenite xenoliths from Hannuoba , North China [ J ]. *Chemical Geology* , 182 : 301~322.
- Yang Xiaozhi , Xia Qunke , Sheng Yingming , *et al.* 2005. Structural water in lower crustal granulite xenoliths from Nushan volcano : Micro-FTIR investigations [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 21( 6 ) : 1 669~1 676 ( in Chinese with English abstract ).
- Yu H M , Xia Q K , Dallai L , *et al.* 2005. Oxygen isotopic and trace element compositions of peridotite xenoliths from Nushan volcano , SE China and implications for mantle metasomatism [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 21( 3 ) : 829~838.
- Zhai Mingguo , Fan Qicheng , Zhang Hongfu , *et al.* 2005. Lower crust processes during the lithosphere thinning in eastern China magma underplating , replacement and delamination [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 21( 1 ) : 1 509~1 526 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhou X , Sun M , Zhang G , *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.

## 附中文参考文献

- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 等. 2002. 吉林龙岗第四纪火山活动分期 [ J ]. *岩石学报* , 18( 4 ) : 495~500.
- 郭立鹤, 林兴源, 谢漫泽, 等. 1998. 汉诺坝玄武岩中幔源包体中的水 [ J ]. *地质学报* , 72( 2 ) : 138~143.
- 郝艳涛, 夏群科, 杨晓志, 等. 2006. 安徽女山新生代玄武岩中橄榄岩包体矿物的含水性研究 [ J ]. *岩石学报* , 22( 6 ) : 1 713~1 722.
- 夏琼霞, 支霞巨, 孟庆, 等. 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 [ J ]. *岩石学报* , 20 : 1 215~1 224.
- 夏群科, 陈道公, 郭立鹤, 等. 1999. 汉诺坝幔源单斜辉石巨晶中的结构水 红外光谱观察 [ J ]. *矿物学报* , 19( 2 ) : 161~165.
- 夏群科, 陈道公, 郭立鹤, 等. 2000. 女山和盘石山橄榄岩包体中的水 红外光谱研究 [ J ]. *地质科学* , 35( 2 ) : 219~225.
- 杨晓志, 夏群科, 盛英明, 等. 2005. 安徽女山下地壳麻粒岩包体中的水 : 红外光谱分析 [ J ]. *岩石学报* , 21( 6 ) : 1 669~1 676.
- 翟明国, 樊祺诚, 张宏福, 等. 2005. 华北东部岩石圈减薄过程中的下地壳过程 : 岩浆底侵、置换与拆沉作用 [ J ]. *岩石学报* , 21 : 1 509~1 526.