doi:10.3799/dqkx.2013.049

不同大地构造背景橄榄岩结构水特征

汪 洋1,金振民2,史 峰2

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074

摘要: 名义无水矿物(NAMs)中的结构水在地球内部演化中扮演了重要角色.应用红外光谱对产自5个构造背景下的13个 二辉橄榄岩进行了详细的结构水测定,探讨不同构造背景下橄榄岩结构水的含量和赋存机制.研究显示,全岩和橄榄石结构 水含量按构造背景从高到低排序,依次为超高压地体、地幔柱、稳定克拉通、俯冲带和活化克拉通,反映了橄榄岩的水含量与 构造环境具有显著相关性.在相同构造背景下,石榴石二辉橄榄岩比尖晶石二辉橄榄岩含更多结构水,表明上地幔水分布可 能具有分层性.超高压地体和稳定克拉通样品中橄榄石具有[Si]空位导致的吸收峰3611~3613 cm⁻¹,而缺乏由[Fe³⁺]引起 的吸收峰3325 cm⁻¹和3355 cm⁻¹,表明地幔的还原性随深度增强.

关键词:构造背景;二辉橄榄岩;红外光谱;结构水;构造;地球物理. 中图分类号: P313.1 文章编号: 1000-2383(2013)03-0489-12

收稿日期: 2012-12-25

Characteristics of Hydroxyl in Lherzolite from Different Geological Setting

WANG Yang¹, JIN Zhen-min², SHI Feng²

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Hydroxyl in minerals from upper mantle peridotite plays an important role in the evolution of the earth's interior. In order to understand the correlation between geological setting and hydroxyl incorporation in lherzolite, OH contents of 13 garnet/spinel lherzolite samples from different geological settings (i. e. stable craton, reactivated craton, mantle plume, subduction zone and UHP terrane) were investigated by fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis. The results demonstrate: (1) water contents in olivine and bulk rock follow the trend of UHP terrain >mantle plumb>stable craton >subduction zone >activated craton; (2) garnet lherzolite contains more water than that of spinel lherzolite for samples from the same geological setting, indicating that the upper mantle should be stratified with depth in terms of water distribution; (3) the presence of [Si] deficiency-caused IR peaks at $3 \, 611-3 \, 613 \, \text{cm}^{-1}$ together with the absence of [Fe³⁺] caused peaks at $3 \, 325 \, \text{cm}^{-1}$ and $3 \, 355 \, \text{cm}^{-1}$ indicates the upper mantle is more reduced with increasing pressure.

Key words: geological setting; lherzolite; fourier transform infrared; hydroxyl; tectonics; geophysics.

水在地球内部演化中扮演着重要的角色,在地 幔以及壳幔之间的水循环对地球动力过程起到了关 键作用.水在地球深部主要以结构水的形式赋存于 名义无水矿物中(NAMs, nominally anhydrous minerals). NAMs指的是矿物的理想化学式并不含 H,但是却以结构水的形式赋存了一定量的H(郭立 鹤等,1998;夏群科等,2008).同含水矿物相比,虽 然这些 NAMs含水量要低很多,但是名义无水矿物 却是上地幔重要的储水库(Bell and Rossman, 1992).橄榄岩是上地幔主要组成岩石,因此橄榄岩 各矿物(主要为橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、尖晶石 和石榴石)结构水含量和赋存机制的研究对认识地 球深部水循环具有重要意义.

前人研究认为 H 在橄榄石中有 4 种主要替代 机制(Kovács *et al.*, 2010):第1 种是 4 个 H 替代 一个 Si 空位, $[Si] = (4H)^{x}$, 生成化学式为

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 41174076).

作者简介:汪洋(1980一),女,博士研究生,主要研究固体地球物理、地球内部结构水研究. E-mail: bushi730@163. com

 $Mg_2H_4O_4$ 的结构,吸收峰在 3 613 cm⁻¹、 3 580 cm⁻¹、3 567 cm⁻¹附近;第 2 种是 2 个 H 替代 在 M1 位 Mg, $\lceil Mg \rceil = (2H)^{X}_{Mg}$ 生成化学式为 MgH_2SiO_4 的结构,吸收峰在 3 160 cm⁻¹、 3 220 cm⁻¹附近;第 3 种是钛斜硅镁石点位错造成 的, $[Ti] = \{Ti^{4+}\}_{Mg} (2H)^{s}, Ti^{4+} 在 M1 位置替代,$ 由于电价平衡,在Si的空位包含有2个H,化学式 为 MgTi[6] H₂O₄, 红外吸收峰在 3 572 cm⁻¹、 3 525 cm⁻¹ 附近(Balan et al., 2011);第4 种是三价 阳离子和 1 个 H 成对替代 2 个 Mg, [triv] ={Me³⁺}^{Mg}(H)^{Mg},生成 M³⁺HSiO₄,红外吸收光谱在 3 300~3 400 cm⁻¹. 辉石中 OH 的替代机制研究则 没有橄榄石详细,这是由于幔源辉石的结构水含量 非常高,从几百到几千个10-6(此处结构水含量单 位 µg/g,下同),没有足够的微量元素可以用于解释 H的赋存.对单斜辉石而言,透辉石和普通辉石吸 收峰(3 530 cm⁻¹)强度和三价铝离子含量之间存在 相关性,这一现象在弧下地幔楔样品的测试结果中 得到了证实(Peslier et al., 2002);在西伯利亚产出 的绿辉石中,四面体配位铝(Al^{IV})的数量和3500~ 3540 cm⁻¹吸收峰强度之间存在相关性,同时吸收 峰谱线位置和 Al^{W} 的数量也存在相关性(Skogby, 2006). Bell et al. (2004) 报道在南非 Monastery 金 伯利岩巨晶中,结构水含量和 Ti 含量存在1:1的 关系,但这并不意味着 H 和 Ti 存在 1:1 的替代机 制,因为其他元素(比如 K)也同 H 含量存在正相关 性. 对绿辉石而言因为 M2 空位与钙埃斯科拉分子 Ca-Eskola(Ca0.5AlSi2O6)有关,而产自南非金伯利 岩的绿辉石中,3460 cm⁻¹吸收峰强度和 M2 阳离子 空位相关,所以 OH 含量可能与钙埃斯科拉分子含 量相关(Smyth et al., 1991). 该现象后来由高温高 压实验所证实(Rauch and Keppler, 2002; Bromiley and Keppler, 2004; Stalder, 2004).

综上所述,在橄榄岩的主要名义无水矿物橄榄石和辉石中,橄榄石有较多高温高压实验数据作参考,所以橄榄石中结构水赋存机制远比辉石研究程度要高.前人针对橄榄岩名义无水矿物开展了很多结构水的研究工作(Peslier et al., 2010; Yu et al., 2011; Xia et al., 2012),而对不同构造背景条件下橄榄岩结构水含量和赋存机制的对比研究则很有限.本文报道了产自5个不同构造背景下的13个二辉橄榄岩样品详细的显微傅里叶变换红外光谱(Micro-FTIR)研究结果.对二辉橄榄岩各主要

矿物的结构水赋存机制和含量进行了详细对比研究,据此讨论了不同构造背景下橄榄石结构水赋存 差异以及可能的地球深部水循环分布特征.

1 样品地质背景

本次研究的二辉橄榄岩样品共计 13 件,分别产 自 5 种不同构造背景:活化克拉通、稳定克拉通、俯 冲带、超高压地体和地幔柱.

1.1 活化克拉通

样品 DMP-18 为典型的尖晶石二辉橄榄岩,采 自华北克拉通北缘河北张家口大麻坪地区. 华北克 拉通具有 38 亿年历史,是地球上最古老的大陆之 一,经历了复杂的构造演化(Liu et al., 1992; Kusky et al., 2007; 翟明国, 2011).大麻坪橄榄岩 形成的温压范围大致为 910~1 027 °C,1. 25~ 2.46 GPa,对应深度 45~80 km 左右(俞佳宁, 2009).样品为1个尖晶石二辉橄榄岩(图 1a).各矿 物含量如下:ol为50%~55%,opx为20%~25%, cpx为20%,sp为2%~3%(ol. olivine,橄榄石; opx. orthopyroxene,斜方辉石;cpx. clinopyroxene, 单斜辉石(图 1a),单斜辉石中出溶斜方辉石(图 1a).

1.2 稳定克拉通

稳定克拉通石榴石二辉橄榄岩样品 SA-1 采自南 非卡普瓦尔克拉通.已有研究表明南非卡普瓦尔克拉 通在 35~20 亿年,经历了复杂的构造演化(李上森, 1996).该石榴石二辉橄榄岩样品温压范围是 7.0~ 7.4 GPa,916~1 518 °C (Grant *et al.*, 2007).石榴石 二辉橄榄岩样品岩相学照片见图 1c~1d.该样品 ol 为 55%~60%;opx 为 30%~35%;cpx 为 5%;gt 为 2%~3%(gt. garnet,石榴石).沿矿物颗粒边界和裂 隙普遍发生蚀变并生成次生矿物金云母等.

1.3 俯冲带

俯冲带样品采自我国东部福建省明溪县玄武质 火山碎屑岩.明溪橄榄岩包体平衡温度和压力范围 分别为:1027~1227℃,1.9~2.6 GPa,相当于深 度60~80 km(金振民等,1993),年龄小于5 Ma(Ho et al.,2003).本次研究共分析了8个样品,包括尖 晶石二辉橄榄岩、石榴石二辉橄榄岩和过渡性样品, 如图 1e~1f 所示,其中尖晶石二辉橄榄岩:ol为 80%~85%;opx为10%;cpx为5%;sp<1%;石榴 石二辉橄榄岩:ol为 60%~70%;opx为10%~



图 1 不同构造背景下二辉橄榄岩样品显微照片

Fig. 1 Photomicrographaphs of lherzolite from different geological settings

a. 大麻坪尖晶石二辉橄榄岩样品 DMP-18,单偏光;b. 大麻坪尖晶石二辉橄榄岩样品 DMP-18,正交偏光;c. 南非金伯利岩石榴石二辉橄榄岩 SA-1,单偏光;d. 南非金伯利岩石榴石二辉橄榄岩 SA-1,正交偏光;e. 明溪石榴石二辉橄榄样品 M1,正交偏光;f. 明溪石榴石二辉橄榄样品 M1, 正交偏光; g. 阿尔卑斯石榴石二辉橄榄岩样品 Arami-1, 单偏光; h. 阿尔卑斯石榴石二辉橄榄岩样品 Arami-1, 正交偏光; i. 夏威夷尖晶石 二辉橄榄岩 HW-1,单偏光;j. 夏威夷尖晶石二辉橄榄岩 HW-1 正交偏光

15%;cpx为5%~10%;gt为5%~10%.

1.4 超高压地体

超高压地体型石榴二辉橄榄岩样品 Arami-1 产

于阿尔卑斯西部 Arami 超高压地体中. 该石榴石二 辉橄榄岩呈透镜状产在榴辉岩中,榴辉岩和橄榄岩 一同经历了高压变质作用(Dobrzhinetskaya *et al.*, 2002).该样品来源深度大于 250 km(Bozhilov *et al.*, 1999),石榴石橄榄岩中 FeTiO₃ 和铬铁 矿出溶表明来源的深度可能大于 300 km(Dobrzhinetskaya *et al.*, 1996).Arami产出石榴石二辉橄 榄岩,该样品的矿物含量为:ol为 50%;opx 为 40%;cpx 为 5%;gt 为 2%;phl 为 1%~2%(phl.phlogopite,金云母),其中可见斜方辉石包裹有橄榄 石、单斜辉石和石榴石(图 1g~1h).

1.5 地幔柱

本次研究共采集 2 件地幔柱橄榄岩样品(HW-1,HW-2),其中 HW-1 为二辉橄榄岩,HW-2 为尖 晶石二辉橄榄岩,这 2 件样品均采自夏威夷瓦胡岛. 前人研究表明夏威夷地幔柱可能产生于下地幔 (Montelli *et al.*,2006),同时地震数据显示其也可 能来自核幔边界附近(Weis *et al.*,2011).夏威夷 二辉橄榄岩样品由拉板玄武岩带出地表,该拉斑玄 武岩年龄为 2 Ma(Norman and Garcia,1999).尖晶 石二辉橄榄岩 HW-2 矿物含量如下:ol为 60%~ 70%;opx为 20%~25 %;cpx为 10%~15%;sp为 1%~2%,斜方辉石中含有尖晶石包裹体.而不含尖 晶石的二辉橄榄岩(HW-1)的斜方辉石中出溶单斜 辉石,且包裹有橄榄石和单斜辉石(图 1i~1j).

2 分析方法

2.1 傅立叶红外光谱分析

显微傅里叶红外光测试在中国地质大学(武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室完成.使用仪 器为显微镜傅里叶红外光谱仪,型号为美国热电 Nicolet 6700/Nicolet continµm microscope/Nicolet.分析采用 KBr 分束器,液氮冷却 MCT-A 探头, 分析条件为分辨率 4 cm⁻¹,测定波数范围 400~ 5 000 cm⁻¹,扫描次数为 128~512,非偏正光,分析 时室内温度 19 °C,湿度 30%~45%,每分析 1 次样 品扣除 1 次背景.应用光谱处理软件 OMNIC 进行 红外光谱的数据处理.

结构水含量计算是以 Beer-Lambert 公式为基础,

 $\Delta = \boldsymbol{\varepsilon} \times \boldsymbol{c} \times \boldsymbol{t} \times \boldsymbol{\gamma} ,$

其中: Δ 是吸收强度的积分面积(单位: cm⁻¹); ϵ 是 矿物红外吸收系数(单位: 10⁶ cm⁻²),橄榄石的红外 吸收系数为 5.32×10⁶ cm⁻²,单斜辉石的红外吸收 系数为 14.84×10⁶ cm⁻²,斜方辉石的红外吸收系 数为 7.09×10⁶ cm⁻² (Bell *et al.*, 1995; Bell *et al.*, 2003);*c* 是结构水浓度(单位:10⁻⁶);*t* 是样 品厚度(单位:cm),γ 方向因子这里取值为 1/3.

应用 Beer-Lambert 公式计算水含量,计算结果 的误差来自晶体定向、样品厚度、积分吸收系数和背 景.由于不能简单地扣除不含水背景,所以为了获得 平滑的基线,只能手动获得 OH 振动吸收峰.应用 OMNIC 软件数学公式校正,其最大的误差来自吸 收光谱的背景.确定这个背景误差的方法是:应用 OMNIC 软件重复手动测量具有最低和最高水含量 的一对样品,背景校正 2~4 遍.

所有二辉橄榄岩样品均经过双面抛光,样品厚 度控制在 0.08~0.20 mm. 根据每个样品矿物颗粒 大小,使样品厚度范围小于单矿物晶体的粒径,保证 每次红外探测时对应的是矿物单晶.为了在应用透 射法时得到较强的信号,选择的样品厚度较大,并且 能够在光学显微镜下检查矿物包体和微裂隙.在测 试时,应尽量避免裂隙和包体. 样品在丙酮中浸泡 24 h 以除掉薄片里的树胶,蒸馏水清洗样品多次.在 110 ℃烘箱中干燥至少 24 h 以除去样品表面和裂隙 中的吸附水.

2.2 电子探针分析

矿物成分分析使用的仪器为中国科学技术大学 壳幔过程与环境重点实验室的岛津 EPMA-1600 电 子探针.分析条件为束电流 20 nA,加速电压 15 kV, 探测区域 <5 μm,以天然矿物或合成的氧化物作为 标准,应用 ZAF 法对测试数据进行校正.测量每个 矿物的核部到边部的化学成分,每个样品每个矿物 测量3~4 个颗粒.误差低于 5%(Na 元素的误差是 10%).

3 结果

3.1 矿物的化学成分

表1中列出了5个代表性橄榄岩样品橄榄石、 单斜辉石、斜方辉石、尖晶石和石榴石的平均化学成 分. 从核部和边部成分对比以及不同颗粒之间的成 分对比结果看,未发现明显化学成分差异. 其中橄榄 石端元组份(fo=89.5~91.3; fa=8.59~10.28; tp=0.10~0.18),斜方辉石的端元组份(en= $40.9\sim45.6$; fs=6.3~20.7; wo=41.50~49.30), 单斜辉石的端元组份(en=82.20~89.90; fs= $9.50\sim13.30$; wo= $1.20\sim6.10$),石榴石端元组份 (alm=0.18~0.19; gross=0.084~0.12; py= $0.69\sim0.70$; spess= $0.06\sim0.008$; uva= $0\sim0.045$)

	明溪石榴石二辉橄榄岩(M-1)			(M-1)	明溪尖晶石二辉橄榄岩(M-2)				大麻坪(DMP-18)				
	cpx	opx	ol	gt	cpx	opx	ol	$^{\rm sp}$	cpx	opx	ol	$^{\mathrm{sp}}$	
SiO_2	52.58	55.27	41.06	42.27	52.61	54.38	0.01	0.09	52.10	55.49	41.00	0.06	
TiO_2	0.47	0.14	0.00	0.16	0.09	0.07	0.05	0.07	0.44	0.05	0.02	0.11	
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	6.00	4.39	0.03	22.74	4.42	4.17	9.72	47.15	5.82	3.53	0.00	54.56	
FeO*	2.91	0.57	9.82	7.76	2.76	5.86	0.02	12.37	2.53	6.21	9.47	12.08	
MnO	0.06	6.12	0.14	0.28	0.06	0.10	0.00	0.17	0.07	0.11	0.10	0.13	
MgO	15.10	0.09	47.98	19.50	16.59	32.45	0.14	19.06	14.70	32.81	48.39	19.50	
CaO	19.41	31.42	0.08	5.06	21.07	0.95	48.06	0.00	21.40	0.59	0.02	0.00	
Na_2O	1.56	0.85	0.01	0.00	0.70	0.05	41.03	0.00	1.49	0.06	0.00	0.00	
K_2O	0.01	0.13	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
Cr_2O_3	1.28	0.00	0.05	1.59	1.00	0.62	0.00	20.75	0.82	0.32	0.01	12.58	
NiO	0.05	0.12	0.31	0.00	0.03	0.12	0.10	0.25	0.00	0.00	0.00	0.35	
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	
Sum	99.45	99.09	99.47	99.35	99.34	98.76	99.15	99.96	99.30	99.17	99.00	99.35	
Mg♯	90.24	90.15	89.70	81.74	91.47	90.81	90.30		91.19	90.80	90.11		
	夏威夷尖晶石二辉橄榄岩		辉橄榄岩(HW-2)			南非石榴石二辉			SA-1)			
	cpx		opx	ol		$^{\rm sp}$	срх	:	opx	ol		gt	
SiO ₂	52.11	l	54.95	41.03		0.04	54.5	9	57.83	41.17	7	41.29	
TiO_2	0.14 0.06		0.06	0.04	0.04		0.17		0.04	0.03	3	0.11	
Al_2O_3	5.35		3.69	0.01	0.01 4		5.31 2.89		0.74 0		. 00 22. 42		
FeO*	2.81		6.16	9.86	12.65		2.59		5.26	8.22	2	8.55	
MnO	0.06		0.13	0.17		0.09	0.04		0.09	0.09)	0.39	
MgO	15.17 32.09		32.09	47.82 1		18.17 15.1		1 34.79		49.05		19.14	
CaO	20.73	3	0.84	0.06		0.00	20.11		0.24	0.01	l	4.57	
Na_2O	1.52	2	0.09	0.00		0.00	2.33		0.05 0.0		0 0.00		
K_2O	0.01	1	0.01	0.00	.00 0.0		0.01		0.00	0.00)	0.00	
Cr_2O_3	1.26	3	0.65	0.00	4	21.72	1.3	1	0.09	0.01	l	1.54	
NiO	0.00)	0.00	0.00		0.18	0.0	8	0.12	0.30)	0.00	
ZnO	0.00)	0.00	0.00		0.06	0.0	0	0.00	0.00)	0.00	
Sum	99.16	5	98.66	99.00	0 98.28		99.2	3	99.24	98.88	3	98.00	
Mg♯	90.59)	90.28	89.63	63		91.2	3	92.19	91.40)		

表1 二辉橄榄岩矿物化学组成

Table 1 Representative compositions of minerals in lherzolites

注:除尖晶石外,Fe 当作 FeO. Mg#=Mg/(Mg+Fe).

(fo. forsterite,镁橄榄石; fa. fayalite,铁橄榄石; tp. tephroite,锰橄榄石; en. enstatite,顽火辉石; fs. fer-rosilite,铁辉石; wo. wollastonite,硅灰石; alm. al-mandite,铁铝榴石; gross. grossular,钙铝榴石; py. pyrope,镁铝榴石; spess. spessartine,锰铝榴石; uva. uvarovite,钙铬榴石).

3.2 橄榄岩主要矿物红外光谱特征

二辉橄榄岩红外吸收光谱如图 2 所示.除了大麻坪橄榄石外(不含结构水,或低于检出限),所有的橄榄石单矿物颗粒都检测到了 OH 的吸收峰.同时石榴石和尖晶石也都未观察到 OH 引起红外吸收峰.本研究中 2 种辉石 OH 的红外吸收峰与前人研究结果一致(Bell, 1992; Peslier *et al.*, 2002; Skogby, 2006; Sundvall and Stalder, 2011).下面分别对橄榄石、单斜辉石和斜方辉石的红外吸收峰特征进行讨论.

3.2.1 单斜辉石 从图 2a 中可以看出单斜辉石的 吸收峰可分为 3 组:(1)3 630~3 640 cm⁻¹;(2)

3 530~3 540 cm⁻¹;(3)3 454 cm⁻¹. 所有样品单斜辉 石颗粒在组(1)3 630~3 640 cm⁻¹附近表现出较强 的吸收,个别光谱在组(3)3 454 cm⁻¹出现非常弱的 峰,组(2)3 530~3 540 cm⁻¹并不是在所有样品中都 会出现.

3.2.2 斜方辉石 斜方辉石吸收峰在(1)3590~ 3600 cm⁻¹,(2)3410~3427 cm⁻¹,(3)3060~ 3300 cm⁻¹(图2b).本研究中,组(1)和(2)以尖峰形 式出现;组(3)的峰通常较宽,同时吸收强度较弱.

3.2.3 橄榄石橄榄石的 OH 吸收峰较为复杂. 结合前人对橄榄石结构水研究,本研究中将橄榄石 的吸收峰分为 2 组: (1) 3 700~3 450 cm⁻¹和(2) 3 450~3 100 cm⁻¹ (Bai and Kohlstedt, 1992). 图 2c 中, 3 700~3 450 cm⁻¹ 附近的吸收峰出现在所有橄 榄石颗粒中,并且以尖峰形式出现; 组(2) 在夏威夷 和明溪的样品中出现,并且吸收峰较微弱. 所有样品 中均出现 3 571 cm⁻¹、3 524 cm⁻¹ 吸收峰,并且吸收 峰最强.



图 2 二辉橄榄岩(a)单斜辉石、(b)斜方辉石、(c)橄榄石红 外吸收谱线

Fig. 2 Representative FTIR spectra of clinepyroxene (a), orthopyroxene (b), olivine (c) in lherzolite from different geological settings

3.3 结构水含量

结构水含量计算结果总结见表 2. 单矿物含水 量分为:单斜辉石 $151 \times 10^{-6} \sim 550 \times 10^{-6}$,斜方辉 石 $63 \times 10^{-6} \sim 202 \times 10^{-6}$,橄榄石 $0 \sim 112 \times 10^{-6}$;全 岩含水量为 $25 \times 10^{-6} \sim 197 \times 10^{-6}$.本研究中大麻坪 opx 含水量($41 \times 10^{-6} \sim 117 \times 10^{-6}$),与 Yang et al. (2008)汉诺坝斜方辉石结构水含量($20 \times 10^{-6} \sim$ 55×10^{-6})相比偏高.华北克拉通斜方辉石结构水含 量(63×10^{-6})的数值范围与华北克拉通东部(方山、 蓬莱、昌乐、鹤壁等)的数据结果($5 \times 10^{-6} \sim 140 \times$ 10^{-6})一致.明溪橄榄石结构水含量($10 \times 10^{-6} \sim$ 45×10^{-6})与 Yu et al. (2011)对明溪橄榄岩的研究 测试结果($0 \sim 38 \times 10^{-6}$) 一致. Wang and Zhang (2011)对华夏板块橄榄岩开展的相关研究结果却表明,该地区的橄榄石不含结构水.夏威夷单斜辉石结构水含量在 $300 \times 10^{-6} \sim 572 \times 10^{-6}$, Sundvall *et al*. (2009)研究夏威夷瓦胡岛地区盐湖(salt lake crater)样品,单斜辉石结构水含量 $259 \times 10^{-6} \sim 449 \times 10^{-6}$,数据结果较本研究偏低.

南非样品橄榄岩中橄榄石水含量比前人研究结 果偏高(Kurosawa *et al.*, 1997; Grant *et al.*, 2007; Peslier *et al.*, 2010),全岩含水量与前人研 究结果一致(Grant *et al.*, 2007).

3.4 结构水在橄榄岩中不同矿物之间的分配系数3.4.1 单斜辉石和斜方辉石之间水含量分配系数

本研究中橄榄岩单斜辉石和斜方辉石之间水的分配 系数 D^{ppx/opx}=2.41,如图 3a 所示.依据前人针对橄榄 岩开展的结构水研究(图 3b)表明,单斜辉石与斜方 辉石结构水含量之间的分配系数 D^{ppx/opx}=2.44,与本 研究结果 2.41 近似,这也与明溪地区二辉橄榄岩研 究结果(2.3±0.8)一致(Yu et al., 2011).

3.4.2 辉石与橄榄石之间结构水的分配系数 辉 石与橄榄石之间结构水的分配关系则要复杂得多 (图 4). 橄榄石和辉石之间结构水含量分配差异很 大,本研究中 13 个样品辉石与橄榄石结构水含量分 配系数 $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 12\pm 8$, $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 5\pm 4$. 其中石榴石二 辉橄榄岩中 $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 9.5\pm 5.7$, $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 3.7\pm 2.2$ (n=7); 尖晶石二辉橄榄岩中 $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 15.6\pm 4.8$, $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 8\pm 1.1(n=4)$. 都小于 Grant *et al*. (2007) 报道的:石榴石二辉橄榄岩 $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 22\pm 24$, $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 11.7\pm 9.5(n=4)$, 尖晶石二辉橄榄岩 $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 88\pm 48$, $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 40.7\pm 19.8(n=4)$.

具体而言,阿尔卑斯 Arami 超高压石榴石二辉橄 榄岩 $D_{\rm H}^{\rm px/ol}$ =3.8, $D_{\rm H}^{\rm px/ol}$ =1.5(*n*=1);南非稳定克拉通 石榴石二辉橄榄岩 $D_{\rm H}^{\rm px/ol}$ =6.4, $D_{\rm H}^{\rm px/ol}$ =2.5(*n*=1);夏 威夷地幔柱二辉橄榄岩 $D_{\rm H}^{\rm px/ol}$ =3.8, $D_{\rm H}^{\rm px/ol}$ =4.3±2.6 (*n*=2);它们都小于明溪的俯冲带二辉橄榄岩 $D_{\rm H}^{\rm px/ol}$ = 15.5±4.9, $D_{\rm H}^{\rm px/ol}$ =6.6±2.5(*n*=8).

4 讨论

4.1 不同构造背景橄榄岩中橄榄石和两种辉石结 构水含量差异

笔者研究结果表明,来自不同构造背景的二辉 橄榄岩的结构水含量呈现一定规律.全岩结构水含

表 2 不同构造背景二辉橄榄岩结构水含量

Table 2 Summary of OH concentrations of cpx, opx and ol in lherzolite from different geological settings

构造背景	超高压地体	稳定克拉通	活化克拉通	地	幔柱				俯	中带			
样品	Arami	SA-1	DMP-18	HW-1	HW-2	M-1	M11-5	M11-14	M11-16	M11-17	M-2	M11-44	M11-46
岩性	gt lher	gt lher	sp lher	lher	sp lher	gt lher	sp lher	sp lher	sp lher				
cpx	420	513	200	550	_	230	299	275	287	169	172	203	151
opx	163	202	63	195	179	100	82	105	133	78	134	91	97
ol	112	80	0	110	26	21	20	18	25	16	16	10	11
全岩	156	138	25	197	50	50	67	84	81	59	35	46	36

注:矿物代号见表 1. 表中水含量单位是 10⁻⁶. 夏威夷 HW-2 单斜辉石颗粒粒径过小,低于检测线.





Fig. 3 OH partitioning coefficient between opx and cpx in lherzolite

a. 本次研究样品来自南非、大麻坪、明溪、夏威夷、Arami; b. 全球不同地区橄榄岩两种辉石结构水含量分配系数(前人研究). 图释说明: NCC. 华北克拉通(Yang *et al.*, 2008; Bonadiman *et al.*, 2009; Xia *et al.*, 2010; Xia *et al.*, 2012); CP. 北美科罗拉多高原(Matveev and Stachel, 2007; Li *et al.*, 2008); SA. 南非卡普瓦尔克拉通(Kurosawa *et al.*, 1997; Bell *et al.*, 2004; Grant *et al.*, 2007; Peslier *et al.*, 2010); SEC. 中国东南部(Yu *et al.*, 2011); Off C. 非克拉通地区(Kurosawa *et al.*, 1997; Peslier and Luhr 2006; Grant *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2008; Sundvall and Stalder, 2011); MW. 地幔楔 (Kurosawa *et al.*, 1997; Peslier *et al.*, 2006; Muramoto *et al.*, 2011)

量:超高压地体>地幔柱>稳定克拉通>俯冲带> 活化克拉通.在本研究中的13个二辉橄榄岩样品 中,来自超高压地体的石榴石二辉橄榄岩全岩结构 水含量(156×10⁻⁶)最高,地幔柱次之(50×10⁻⁶~ 197×10⁻⁶),南非稳定克拉通石榴石二辉橄榄岩 (138×10⁻⁶)居中,俯冲带尖晶/石榴石二辉橄榄岩 (36×10⁻⁶~84×10⁻⁶)较低,活化克拉通尖晶二辉 橄榄岩(25×10⁻⁶)最低;橄榄石结构水含量与全岩 含水量呈现一致规律,超高压地体(112×10⁻⁶)>地 幔柱(110×10⁻⁶)>稳定克拉通(80×10⁻⁶)>俯冲 带(10×10⁻⁶~25×10⁻⁶)>活化克拉通(<1× 10⁻⁶).而来自稳定克拉通的两种辉石的结构水含量 最高,其结构水含量呈现稳定克拉通>超高压地 体>地幔柱>俯冲带>活化克拉通的特征.

对同一构造背景而言,石榴石二辉橄榄岩全岩 以及组成矿物具有较高的结构水含量,如明溪石榴 石二辉橄榄岩全岩含水量 50×10⁻⁶~84×10⁻⁶,而 尖晶石二辉橄榄岩则为 35×10⁻⁶~46×10⁻⁶.该现 象在实验研究结果中也有类似发现,根据 Berry et al. (2005)实验研究结果表明,橄榄石结构水含量 在石榴石橄榄岩中(20×10⁻⁶~100×10⁻⁶)比尖晶 石橄榄岩中(8×10⁻⁶~30×10⁻⁶)要高.本研究结果 表明地幔含水量可能是分层的,尽管来自不同的构 造地区,经历了不同地幔过程,但石榴石二辉橄榄岩 的含水量普遍高于尖晶石二辉橄榄岩.

4.2 两种辉石与橄榄石结构水分配系数随压力增 加而降低

对比不同构造背景橄榄岩中两种辉石的结构水 分配系数可以发现,单斜辉石与斜方辉石含水量相 关性较为一致(图 3b). Xia *et al*. (2010)报道华北克 拉通地幔捕掳体在经历携带至地表的过程中,两种 辉石的结构水赋存状态基本保持平衡,本研究结果 与该观点一致,说明辉石中的结构水较好地保持了 源区地幔岩中的含水特征. 但辉石和橄榄石之间的 结构水分配则随压力增加而逐渐降低. 明溪橄榄岩 压力范围 1.9~2.6 GPa(金振民等,1993),其两种 辉石与橄榄石间的分配系数为 $D_{\rm H}^{\rm epx/ol}=15.5\pm4.9$, $D_{\rm H}^{\rm epx/ol}=6.6\pm2.5(n=8);南非橄榄岩压力范围为$



图 4 橄榄岩橄榄石与单斜辉石(a)和斜方辉石(b)结构水含 量相关性(图释同图 3)

Fig. 4 Measured water contents in olivine plotted against water contents in cpx (a) and opx (b) in peridotite xenoliths from different tectonic regions

2.5~7.4 GPa(Grant *et al.*, 2007),其分配系数为 $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 6.4, D_{\rm H}^{\rm opx/ol} = 2.5(n=1).$ 因此,随着压力升 高,辉石与橄榄石之间的水分配系数逐渐降低.实验 研究表明,辉石和橄榄石之间水分配系数结果如下: $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 28\pm 2(n=2), D_{\rm H}^{\rm opx/ol} = 14\pm 2(n=4)(P=$ 1.8 GPa)(Aubaud *et al.*, 2004), $D_{\rm H}^{\rm cpx/ol} = 15\pm 5$ $(n=5), D_{\rm H}^{\rm opx/ol} = 10\pm 3(n=8)(P=0.5\sim1.6$ GPa) (Hauri *et al.*, 2006), $D_{\rm H}^{\rm opx/ol} = 1.5\pm 0.2(n=3)$ (P=8.0 GPa)(Hirschmann *et al.*, 2009). 从实验 结果来看,压力越大,分配系数越低.所以本文针对 天然样品的分析结果与高温高压实验的分析结果是 一致的. 由此可见随着压力降低,结构水在辉石和橄 榄石之间的分配系数增大.

通过实验获得的辉石和橄榄石结构水含量分配 系数,可以直接反演地幔源区橄榄石结构水含量;据 此反演华北克拉通橄榄石结构水含量为5×10⁻⁶~ 13×10⁻⁶,推导全岩含水量为30×10⁻⁶~36× 10⁻⁶,比之前高出10×10⁻⁶.类似地反演明溪橄榄 石水含量,反演结果与测试结果数据差异很小.由此 可以说明,橄榄岩包体在出露地表的过程中即便发 生了 H 扩散现象,对于本研究的结论也没有实质性 的影响.导致结构水在辉石和橄榄石之间分配系数 随压力变化的原因可能是辉石结构水含量随压力增 加而降低.这一结论是通过高温高压实验研究得出 的:随着压力增加,单斜辉石所在的地幔环境水逸度 f_{H2}0降低,而结构水含量又与水逸度的平方根成正 比,因此压力增加将导致辉石中结构水含量减少 (Bromiley and Kepple, 2004);与之相反,橄榄石结 构水含量则随压力增加而逐渐升高(Kohstedt et al., 1996),这 2 种变化导致的结果正是结构水 在辉石和橄榄石之间的分配系数随压力增加而 降低.

4.3 不同构造背景橄榄岩结构水赋存机制

4.3.1 单斜辉石中结构水赋存机制 尖晶石二辉 橄榄岩(明溪和大麻坪)的吸收谱线比石榴石二辉橄 榄岩(Arami 和南非)的吸收谱线多了一条在 3530 cm⁻¹附近的吸收峰.这种差异性可能是由 Al 造成.这里将本研究的数据和 Peslier *et al*.(2002) 尖晶石二辉橄榄岩中的数据一起分析比较.由图 5 可知,在尖晶石二辉橄榄岩中,四次配位铝离子的含 量和 3530 cm⁻¹的吸收强度呈正相关,说明该吸收 峰的差异可能由四次配位铝离子 Al³⁺的含量变化 引起.

需要注意的是,本次研究采用的是非偏振光,而 单斜辉石在3530 cm⁻¹的红外吸收峰具有各向异性 $\gamma > \alpha = \beta$ (Skogby, 2006),所以这种差异性也可能是 由单斜辉石结构水红外吸收峰的各向异性造成的, 其具体原因有待进一步研究来证实.

4.3.2 斜方辉石结构水赋存机制 比较本研究斜



图 5 Al³⁺数目与 3 530 cm⁻¹吸收峰强度关系

Fig. 5 Correlation between absorption coefficients for the $3\ 540\ {\rm cm}^{-1}$ band in clinopyroxene spectra and ${\rm Al}^{3+}$ content

Table 5 Off balld position (chi) and possi	bie planer Or	r-earing derect	t for mantie onvine			
	超高压	地幔柱	地幔柱	俯冲带	俯冲带	稳定克拉通	晶格缺陷和矿物相			
	gt lher	lher	sp lher	gt lher	spinel lher	gt lher				
	3 637				3 637		serpentine			
	3 623									
	3 613					3 611	Si			
	3 591						10 Å-phase,			
	3 571	3 571	3 571	3 571	3 571	3 571	Ti-clinohumite			
	3 524	3 524	3 527	3 524	3 524(7)	3 524	Ti-clinohumite			
		3 355	3 355	3 355	3 355		Fe^{3+}			
					3 325		Fe^{3+}			
					3 425		Ti-clinohumite			
						3 481				
				3 4 3 7	3 4 3 7					
					3 660		10 Å-phase			

表 3 不同构造背景二辉橄榄岩橄榄石红外吸收峰(cm⁻¹)以及与之对应晶格缺陷

Γable 3 OH band position (cm⁻¹) and possible planer OH-earing defect for mantle olivin

方辉石 OH 吸收谱线,南非单斜辉石吸收峰向高波 数移动.阿尔卑斯 Arami 和南非金伯利岩 3518 cm^{-1} 强吸收峰,而其他地区的样品则是 3590 cm^{-1} 吸收峰强.对于来源深度更深的阿尔卑 斯 Arami 和南非金伯利岩 3518 cm^{-1} 吸收强度大, 3518 cm^{-1} 是这 2 个地区吸收峰最高的.而其他地 区的样品则是 3590 cm^{-1} 吸收峰最高;前人的测试 结果也表明南非二辉橄榄岩中 opx 红外吸收峰 3518 cm^{-1} 吸收强度大(Grant *et al.*, 2007; Katayama *et al.*, 2011),世界其他地区(包括华北克拉 通、华夏板块、科罗拉多高原、夏威夷)则是 3590 cm^{-1} 附近的吸收峰占优势(Yang *et al.*, 2008; Bonadiman *et al.*, 2009; Sundvall and Stalder, 2011).

4.3.3 橄榄石结构水赋存机制 依据前人的研究 结果,引起橄榄石 OH 红外吸收主要有 4 种方式 (Berry et al., 2005).根据橄榄石的 4 种赋存机制, 将本研究测试的 13 个样品橄榄石吸收峰总结在表 3 中.如表 3 所示,阿尔卑斯(Arami)和南非橄榄石 具有[Si]空位引起的吸收峰 3 611~3 613 cm⁻¹,缺 乏由 [Fe³⁺]引起的吸收峰 3 325 cm⁻¹和 3 355 cm⁻¹.不仅本文中得到的南非橄榄石红外吸 收谱线有此现象,前人使用偏振光或非偏正光测试 结果中也有类似的现象(Grant et al., 2007; Peslier et al., 2008).考虑到 Arami 超高压地体和南非 稳定克拉通金伯利岩橄榄岩来源深度比其他地区 深,缺乏由[Fe³⁺]引起的吸收峰似乎也表明随深度 增加地幔的还原性增强.

在天然橄榄石中典型的吸收光谱在组(1) 3700~3450 cm⁻¹, 一般少见组(2)3450~ 3 100 cm⁻¹ (Miller *et al.*, 1987; Bell and Rossman, 1992; Bell *et al.*, 2004).本研究中明溪、夏威 夷的橄榄石均出现组(2)3 450~3 100 cm⁻¹的吸收 峰.明溪橄榄石在3 437 cm⁻¹附近具有 OH 吸收谱 线,而在 Yu *et al.* (2011)分析明溪橄榄石也有类似 的特征,吸收峰在 3 431 cm⁻¹附近,所以该谱线为明 溪橄榄石特征谱线,引起该吸收峰的原因还有待进 一步研究.

5 结论

本次研究对来自稳定克拉通、活化克拉通、超高 压地体、俯冲带和地幔柱 5 种不同构造背景下的 13 个二辉橄榄岩样品进行了详细的 FTIR 结构水测试 工作.获得如下结论:

(1)全岩和橄榄石结构水含量呈现超高压地体>地幔柱>稳定克拉通>俯冲带>活化克拉通的特征,单斜辉石和斜方辉石结构水含量则呈现稳定克拉通>超高压地体>地幔柱>俯冲带>活化克拉通的特征;

(2)同一构造背景下,石榴石二辉橄榄岩比尖晶 石二辉橄榄岩具有更高的结构水含量,表明上地幔 结构水含量具有分层性;

(3)尖晶石二辉橄榄岩(明溪和大麻坪)的吸收 谱线比石榴石二辉橄榄岩(Arami和南非)的谱线要 多一条在3530 cm⁻¹附近的吸收峰.四次配位铝离 子的含量和3530 cm⁻¹的吸收强度呈正相关.来源 深度更深的超高压地体和稳定克拉通样品中橄榄石 具有[Si]空位导致的吸收峰3611~3613 cm⁻¹,而 缺乏由[Fe³⁺]引起的吸收峰3325 cm⁻¹和 3 355 cm⁻¹,从结构水研究角度表明地幔的还原性 随深度增强.

致谢:本研究的过程中,电子探针分析得到了中 国科技大学壳幔物质与环境实验室的大力支持,在 此表示感谢.

References

- Aubaud, C., Hauri, E. H., Hirschmann, M. M., 2004. Hydrogen Partition Coefficients between Nominally Anhydrous Minerals and Basaltic Melts. *Geophysical Research Letters*, 31 (20): L20611. doi: 10. 1029/ 2004GL021341
- Bai, Q., Kohlstedt, D. L., 1992. Substantial Hydrogen Solubility in Olivine and Implications for Water Storage in the Mantle. *Nature*, 357: 672 - 674. doi: 10. 1038/ 357672a0
- Balan, E., Ingrin, J., Delattre, S., et al., 2011. Theoretical Infrared Spectrum of OH-Defects in Forsterite. *Europe*an Journal of Mineralogy, 23(3): 285-292. doi: 10. 1127/0935-1221/2011/0023-2090
- Bell, D. R., 1992. Water in Mantle Minerals. *Nature*, 357: 646-647. doi:10.1038/357646a0
- Bell, D. R., Ihinger, P. D., Rossman, G. R., 1995. Quantitative Analysis of Trace OH in Garnet and Pyroxenes. *American Mineralogist*, 80(5-6): 465-474.
- Bell, D. R., Rossman, G. R., 1992. Water in Earth's Mantle: The Role of Nominally Anhydrous Minerals. *Science*, 255(5050): 1391 – 1397. doi: 10. 1126/science. 255. 5050. 1391
- Bell, D. R., Rossman, G. R., Maldener J., et al., 2003. Hydroxide in Olivine: A Quantitative Determination of the Absolute Amount and Calibration of the IR Spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2): 2105. doi: 10.1029/2001JB000679
- Bell, D. R., Rossman, G. R., Moore, R. O., 2004. Abundance and Partitioning of OH in a High-Pressure Magmatic System: Megacrysts from the Monastery Kimberlite, South Africa. *Journal of Petrology*, 45 (8): 1539 – 1564. doi: 10.1093/petrology/egh015
- Berry, A. J., Hermann, J., O'Neill, H. S. C., et al., 2005. Fingerprinting the Water Site in Mantle Olivine. *Geolo*gy, 33(11):869-872. doi: 10.1130/G21759.1
- Bonadiman, C., Hao, Y., Coltorti, M., et al., 2009. Water Contents of Pyroxenes in Intraplate Lithospheric Mantle. European Journal of Mineralogy, 21(3): 637-647. doi: 10.1127/0935-1221/2009/0021-1935
- Bozhilov, K. N., Green, H. W., Dobrzhinetskaya, L., 1999. Clinoenstatite in Alpe Arami Peridotite: Additional Ev-

idence of Very High Pressure. *Science*, 284 (5411): 128–132. doi: 10.1126/science. 284.5411.128

- Bromiley, G., Keppler, H., 2004. An Experimental Investigation of Hydroxyl Solubility in Jadeite and Na-Rich Clinopyroxenes. *Contributions to Mineralogy and Petrolo*gy, 147(2): 189-200. doi: 10.1007/s00410-003-0551-1
- Dobrzhinetskaya, L. F., Green, H. W., Wang, S., 1996. Alpe Arami: A Peridotite Massif from Depths of More than 300 Kilometers. *Science*, 271 (5257): 1841-1845. doi: 10.1126/science. 271.5257
- Dobrzhinetskaya, L. F., Schweinehage, R., Massonne, H. J., et al., 2002. Silica Precipitates in Omphacite from Eclogite at Alpe Arami, Switzerland: Evidence of Deep Subduction. *Journal of Metamorphic Geology*, 20 (5): 481-492. doi:10.1046/j.1525-1314.2002.00383. x
- Grant, K., Ingrin, J., Lorand, J. P., 2007. Water Partitioning between Mantle Minerals from Peridotite Xenoliths. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(1): 15-34. doi:10.1007/s00410-006-0177-1
- Guo, L. H., Lin, X. Y., Xie, M. Z., et al., 1998. Water in Mantle-Derived Xelloliths from the Hannuoba Basalt. Acta Geologica Sinica, 72 (2): 138 – 143 (in Chinese with English abstract).
- Hauri, E. H., Gaetani, G. A., Green, T. H., 2006. Partitioning of Water during Melting of the Earth's Upper Mantle at H₂O-Undersaturated Conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(3-4), 715-734. doi: 10.1016/j. epsl. 2006. 06. 014
- Hirschmann, M. M., Tenner, T., Aubaud, C., et al., 2009. Dehydration Melting of Nominally Anhydrous Mantle: The Primacy of Partitioning. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 176 (1 - 2); 54 - 68. doi: 10. 1016/j. pepi. 2009. 04. 001
- Ho,K. S., Chen, J. C., Lo, C. H., et al., 2003. 40 Ar-³⁹ Ar Dating and Geochemical Characteristics of Late Cenozoic Basaltic Rocks from the Zhejiang-Fujian Region, SE China: Eruption Ages. Magma Evolution and Petrogenesis. *Chemical Geology*, 197(1-4):287-318. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00399-6
- Jin, Z. M., Green, H. W., Borch, R. S., et al., 1994. Mantle-Derived Xenoliths and the Token of a Modern Back-Arc Geotherm beneath Eastern China. Science in China (Series B), 23(4): 472-479(in Chinese).
- Katayama, I., Michibayashi, K., Terao, R., 2011. Water Content of the Mantle Xenoliths from Kimberley and Implications for Explaining Textural Variations in Cratonic Roots, *Geological Journal*, 46(2-3):173-182.

doi: 10.1002/gj.1216

- Kohstedt, D. L., Keppler, H., Rubie, D. C., 1996. Solubility of Water in the α , β , and γ Phases of $(Mg, Fe)_2 SiO_4$. *Contrib. Minerl. Petrol.*, 123(4): 345 - 357. doi: 10. 1007/s004100050161
- Kovács, I., O'Neill, H. S. C., Hermann, J., et al., 2010. Site-specific Infrared OH Absorption Coefficients for Water Substitution into Olivine. *American Mineralogist*, 95 (2-3): 292-299. doi:10.2138/am. 2010.3313
- Kurosawa, M., Yurimoto, H., Sueno, S., 1997. Patterns in the Hydrogen and Trace Element Compositions of Mantle Olivines. *Physics and Chemistry of Minerals*, 24 (6): 385–395. doi: 10.1007/s002690050052
- Kusky, T. M., Windley, B. F., Zhai, M. G., 2007. Tectonic Evolution of the North China Block: From Orogen to Craton to Orogen. *Geological Society*(Spel.), 280(4): 1-34. doi: 10.1144/SP280.1
- Li, S. S., 1996. Kaavaapl Craton Tectonic Evolition. *Geological Survey and Research*, 73:39-42(in Chinese).
- Li,Z. X. A., Lee, C. T. A., Peslier, A. H., 2008. Water Contents in Mantle Xenoliths from the Colorado Plateau and Vicinity: Implications for the Mantle Rheology and Hydration-Induced Thinning of Continental Lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 113 (B9): B09210. doi: 10.1029/2007JB005540
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3 800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4), 339-342. doi: 10.1130/0091-7613
- Matveev, S., Stachel, T., 2007. FTIR Spectroscopy of OH in Olivine: A New Tool in Kimberlite Exploration. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71 (22): 5528 – 5543. doi: 10.1016/j.gca. 2007.08.016
- Miller, G. H., Rossman, G. R., Harlow, G. E., 1987. The Natural Occurrence of Hydroxide in Olivine. *Physics* and Chemistry of Minerals, 14(5):461-472. doi: 10. 1007/BF00628824
- Montelli, R., Nolet, G., Dahlen, F. A., et al., 2006. A Catalogue of Deep Mantle Plumes: New Results from Finite-Frequency Tomography. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7 (11): Q11007. doi: 10. 1029/2006GC001248
- Muramoto, M., Michibayashi, K., Ando, J., et al., 2011. Rheological Contrast between Garnet and Clinopyroxene in the Mantle Wedge: An Example from Higashi-Akaishi Peridotite Mass, SW Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 184(1-2): 14-33. doi: 10.1016/j. pepi. 2010. 10.008

- Norman, M. D., Garcia, M. O., 1999. Primitive Magmas and Source Characteristics of the Hawaiian Plume: Petrology and Geochemistry of Shield Picrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1-2): 27-44. doi:10. 1016/S0012-821X(99)00043-6
- Peslier, A. H., Luhr, J. F., 2006. Hydrogen Loss from Olivines in Mantle Xenoliths from Simcoe (USA) and Mexico: Mafic Alkalic Magma Ascent Rates and Water Budget of the Sub-Continental Lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 242(3-4): 302-319. doi: 10.1016/j. epsl. 2005. 12.019
- Peslier, A. H., Luhr, J. F., Post, J., 2002. Low Water Contents in Pyroxenes from Spinel-Peridotites of the Oxidized, Sub-Arc Mantle Wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 201(1): 69-86. doi: 10.1016/S001 2-821X(02)00663-5
- Peslier, A. H., Woodland, A. B., Bell, D. R., et al., 2010. Olivine Water Contents in the Continental Lithosphere and the Longevity of Cratons. *Nature*, 467:78-81. doi: 10.1038/nature09317
- Peslier, A. H., Woodland, A. B., Wolff, J. A., 2008. Fast Kimberlite Ascent Rates Estimated from Hydrogen Diffusion Profiles in Xenolithic Mantle Olivines from Southern Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (11): 2711-2722. doi: 10.1016/j.gca. 2008.03.019
- Rauch, M., Keppler, H., 2002. Water Solubility in Orthopyroxene. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 525-536. doi: 10.1007/s00410-002-0365-6
- Skogby, H., 2006. Water in Natural Mantle Minerals I: Pyroxenes. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 62 (1):155–167. doi: 10.2138/rmg. 2006. 62.7
- Smyth, J. R., Bell, D. R., Rossman, G. R., 1991. Incorporation of Hydroxyl in Upper-Mantle Clinopyroxenes. Nature, 351:732 - 735 doi: 10.1038/351732a0
- Stalder, R., 2004. Influence of Fe, Cr and Al on Hydrogen Incorporation in Orthopyroxene. European Journal of Mineralogy, 16(5): 703-711. doi: 10.1127/0935-1221/2004/0016-0703
- Sundvall, R., Skogby, H., Stalder, R., 2009. Hydrogen Diffusion in Synthetic Fe-Free Diopside. European Journal of Mineralogy, 21(5):963-970. doi: 10.1127/0935-1221/2009/0021-1971
- Sundvall, R., Stalder, R., 2011. Water in Upper Mantle Pyroxene Megacrysts and Xenocrysts: A Survey Study. American Mineralogist, 96 (8-9): 1215-1227. doi: 10.2138/am, 2011.3641
- Wang, R., Zhang, B. M., 2011. Water in Peridotite Xenoliths from South China. Science China (Earth Sciences), 54

(10): 1511-1522. doi: 10. 1007/s11430-011-4196-z

- Weis, D., M. O. Garcia, J. M. Rhodes, et al., 2011. Role of the Deep Mantle in Generating the Compositional Asymmetry of the Hawaiian Mantle Plume. Nature Geoscience, 4: 831-838. doi: 10.1038/ngeo1328
- Xia, Q. K., Hao, Y., Li, P., et al., 2010. Low Water Content of the Cenozoic Lithospheric Mantle beneath the Eastern Part of the North China Craton. Journal of Geophysical Research, 115 (B7): B07207. doi: 10.1029/ 2009JB006694
- Xia, Q. K., Hao, Y. T., Liu, S. C., et al., 2012. Water Contents of the Cenozoic Lithospheric Mantle beneath the Western Part of the North China Craton: Peridotite Xenolith Constraints. *Gondwana Research*, 23 (1): 108-118. doi: 10.1016/j.gr. 2012. 01.010
- Xia, Q. K., Yang, X. Z., Hao, Y. T., et al., 2008. Water Distribution and Circulation in the Deep Earth. *Earth Science Frontiers*, 14(2):10-23(in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Z., Xia, Q. K., Deloule, E., et al., 2008. Water in Minerals of the Continental Lithospheric Mantle and Overlying Lower Crust: A Comparative Study of Peridotite and Granulite Xenoliths from the North China Craton. *Chemical Geology*, 256(1-2):33-45. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2008. 07. 020
- Yu, J. M. ,2009. Mineralogical Researching of Olivine in Hebei Damaping (Dissertation). China University of Geo-

sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

- Yu, Y., Xu, X. S., Griffin, W. L., 2011. H₂O Contents and Their Modification in the Cenozoic Subcontinental Lithospheric Mantle beneath the Cathaysia Block, SE China. *Lithos*, 126(3-4): 182-197. doi: 10.1016/j. lithos. 2011. 07.009
- Zhai, M. G., 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A Summary and Review. Science China (Earth Sciences), 41(8): 1037 – 1046. doi: 10. 1007/ s11430-011-4250-x (in Chinese).

附中文参考文献

- 郭立鹤,林兴源,谢漫泽,等,1998.河北汉诺坝玄武岩中幔源 虏体中的水.地质学报,72(2):138-143.
- 金振民, Green, H. W., Borch, R. S., 金淑燕, 等, 1993. 幔源 包体和中国东部现代弧后地热标志. 中国科学(B辑): 472-479.
- 李上森,1996.南非卡普瓦尔地块的构造演化.国外前寒武 纪地质,73:39-42.
- 夏群科,杨晓志,郝艳涛,等,2008. 深部地球中水的分布和循 环. 地学前缘,14(2):10-22.
- 俞佳宁,2009.河北大麻坪橄榄石的矿物学研究(硕士学位论 文).北京:中国地质大学.
- 翟明国,2011.克拉通化与华北陆块的形成.中国科学(地球 科学),41(8):1037-1046.