

# 滇东南马关木厂新生代玄武岩中橄榄岩包体的含水性

朱 萌, 王 蓉, 谢志鹏, 范爱玲

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘 要:** 对来自滇东南马关木厂的尖晶石二辉橄榄岩中名义上无水矿物(NAMs)进行显微傅里叶变换红外光谱(Micro-FTIR)分析,结果显示,单斜辉石、斜方辉石和橄榄石中均含有以羟基形式存在的结构水,单斜辉石的水含量为  $160 \times 10^{-6} \sim 557 \times 10^{-6}$  (质量分数,下同),斜方辉石的水含量为  $85 \times 10^{-6} \sim 207 \times 10^{-6}$ ,橄榄石的水含量为  $5 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ ,根据矿物百分比含量估算的全岩水含量为  $46 \times 10^{-6} \sim 137 \times 10^{-6}$ ;元素地球化学特征表明,本次研究的橄榄岩包体是岩石圈地幔经历较低程度部分熔融的残余;低(La/Yb)<sub>N</sub>值(0.22~0.57)以及高Ti/Eu比值(4 076~6 772)暗示橄榄岩可能经历了以硅酸盐熔体为交代介质的微弱地幔交代作用;单斜辉石的微量元素组成比较单一,整体表现出高场强元素、大离子亲石元素以及轻稀土元素的同步亏损;结合中国东部地区已经发表的橄榄岩包体含水量数据来看,滇东南马关木厂岩石圈地幔具有明显富水的特征,可能与该区自中生代以来遭受的新特提斯洋壳大规模俯冲流体交代作用有关;与华北克拉通含水量的明显差异有可能反映的是两地岩石圈地幔正处于不同的演化阶段。

**关键词:** 橄榄岩包体; 结构水; 岩石圈地幔; 木厂

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)03-0371-18

## Water content of peridotite xenoliths in Cenozoic basalt from Muchang of Maguan, southeastern Yunnan Province

ZHU Meng, WANG Rong, XIE Zhi-peng and FAN Ai-ling

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

**Abstract:** Nominally anhydrous minerals, i. e., clinopyroxene (Cpx), orthopyroxene (Opx) and olivine (Ol), from peridotite xenoliths hosted by Cenozoic basalts in Muchang, Maguan, southeastern Yunnan Province, were investigated by micro-Fourier transform infrared spectrometry (FTIR). Most of Ol and all the Cpx and Opx grains contain structural water in the form of OH. The range of the average core water content (H<sub>2</sub>O) of multi grains (>10) in the same sample from the analyzed Muchang peridotites is  $160 \times 10^{-6} \sim 557 \times 10^{-6}$ ,  $85 \times 10^{-6} \sim 207 \times 10^{-6}$  and  $5 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$  for Cpx, Opx and Ol respectively. The whole-rock water content recalculated according to mineral volume proportions varies from  $46 \times 10^{-6}$  to  $137 \times 10^{-6}$ , much richer than that in the North China Craton. Elemental fractionation suggests that the peridotite xenoliths are relicts of primary mantle with partial melting. Low (La/Yb)<sub>N</sub>(0.22~0.57) and high Ti/Eu (4 076~6 772) of clinopyroxenes suggest that Muchang lithospheric mantle has undergone low mantle metasomatism by silicate melt. Apparently, the large-scale Neo-Tethys oceanic crust subduction and fluid metasomatism contributed to the rich water in Muchang, which implies that the mantle in Muchang was the new proliferative mantle and the geological evolution differed from that of the North China Craton in Cenozoic.

收稿日期: 2017-01-06; 接受日期: 2017-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41363002); 教育部博士点新教师基金项目(20135314120008)

作者简介: 朱 萌(1992-), 男, 汉族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: ahyzhu@163.com; 通讯作者: 王 蓉(1976-), 女, 汉族, 副教授, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学的教学与研究工作, E-mail: gemmjewel@gmail.com。

**Key words:** peridotite xenolith; structural water; lithospheric mantle; Muchang

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (41363002); Doctoral Fund of Ministry of Education of China (20135314120008)

对于地球内部圈层的相关研究一直以来都是地球科学领域的重大基础问题之一。岩石圈地幔是深部地球圈层的重要组成部分,其主要组成矿物包括橄榄石、辉石、石榴子石和长石等,这些矿物的化学分子式中都不含 H,称之为“名义上无水矿物”(NAMs)。近年来的研究表明,这些 NAMs 在上地幔的温压条件下可以储存一定量的水以结构羟基的形式存在于矿物的晶格缺陷中:天然产出的幔源橄榄石通常含有  $1 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$  的水;辉石水含量通常在  $200 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ ;而石榴石水含量在  $50 \times 10^{-6}$  左右(Bell and Rossman, 1992; Rossman, 1996; Peslier *et al.*, 2002; Matsyuk and Langer, 2004; Beran, 2006; Johnson, 2006)。即使是微量的水也可以显著影响着地幔矿物的许多物理化学性质,包括电导率、熔融温度、离子扩散、流变强度等(Gaetani *et al.*, 1993; Hirth and Kohlstedt, 1996; Hofmeister, 2004; Yoshino and Katsura, 2013),进而影响着地球内部许多的动力学过程诸如板块运动、地幔对流、壳幔相互作用、岩石圈的变形机制、俯冲板块中的物质交换、地震火山活动等(Williams and Hemley, 2001; Asimow and Langmuir, 2003; Dixon *et al.*, 2004; Karato, 2011; Grove *et al.*, 2012)。此外 NAMs 中的水在地质上还有许多应用:利用橄榄石中水扩散的时间来计算岩浆上升速率(Demouchy *et al.*, 2006; Peslier *et al.*, 2008, 2015);利用水在单斜辉石斑晶和熔体之间的分配系数来计算母岩浆的水含量(Hauri *et al.*, 2006; O'Leary *et al.*, 2010; Novella *et al.*, 2014);利用全岩的  $H_2O/Ce$  比值可以进行地幔源区示踪(Dixon and Clague, 2001; Salters and Stracke, 2004; Plank *et al.*, 2013)。因此,研究水在地幔矿物中的含量、分布及其效应对于深入了解岩石圈地幔的性质、演化以及地球内部的各种地质过程有着极为重要的科学意义。

中国东部地区发育了大量新生代玄武岩,其中产出各种类型的橄榄岩包体。前人对该地区橄榄岩包体的含水性做了大量研究工作(郝艳涛等, 2006, 2007; 杨晓志等, 2007; Yang *et al.*, 2008; 朱蓓蓓等, 2009; 雷能忠等, 2009; 夏群科等, 2010; 杨贵才等, 2012),认为岩石圈地幔的水含量具有横向和纵

向上不均一分布的特点,并且华北克拉通岩石圈地幔整体具有较低的水含量与岩石圈减薄过程中持续上涌的软流圈的热扰动密切相关(Xia *et al.*, 2010)。Hao 等(2016)认为中国东部新生代岩石圈地幔水含量的区域性变化不可能是由部分熔融、地幔交代或氧化还原状态变化所单独引起的,这种区域性差异可能暗示了地幔有不同的起源和经历了不同的动力学过程。

本文对滇东南特提斯域马关木厂的新生代玄武岩中橄榄岩包体的含水性 and 元素地球化学特征进行了研究,初步探讨了滇东南地区岩石圈地幔的性质,为上地幔岩石圈的地质演化提供了一定证据,丰富了特提斯域背景下岩石圈地幔的含水性,并分析了华北克拉通与华南地区之间岩石圈地幔含水量明显差异的可能原因。

## 1 地质背景和样品

滇东南马关地区位于青藏高原东缘云南省文山州境内,大地构造上处于扬子地台的西南缘,是滇藏特提斯与华南褶皱系的过渡地带。自晚新生代以来,滇东南地区一直处于比较活动的构造环境下,大规模的陆内俯冲作用和区域性的东西向伸展作用使得该区火山活动相当频繁,与之相应的还发育了早晚两期高钾岩浆活动(魏启荣等, 2003; 莫宣学等, 2007)。其中晚期高钾岩浆活动沿红河断裂带南段和印支块体南部分布,马关地区含地幔岩包体的碧玄岩和钾玄岩即形成于该晚期高钾岩浆活动(舒小辛, 1995; 喻学惠等, 2006)。

马关地区缺失了早古生代的奥陶系上统和整个志留系、中生代的侏罗系和白垩系地层,其他各时代地层均较发育。研究区位于马关地区的木厂街一带,区内主要发育寒武系和奥陶系地层,包括寒武系下寒武统冲庄组、大寨组,中寒武统的田蓬组、龙哈组,上寒武统的歇场组、唐家坝组、博寨田组,奥陶系下奥陶统的南津关组、分乡组、红花圈组、湄潭组,中奥陶统的十字铺组。本次研究的橄榄岩包体采自马关木厂街一带广泛发育的火山角砾岩筒和碧玄岩岩管中(图1)。

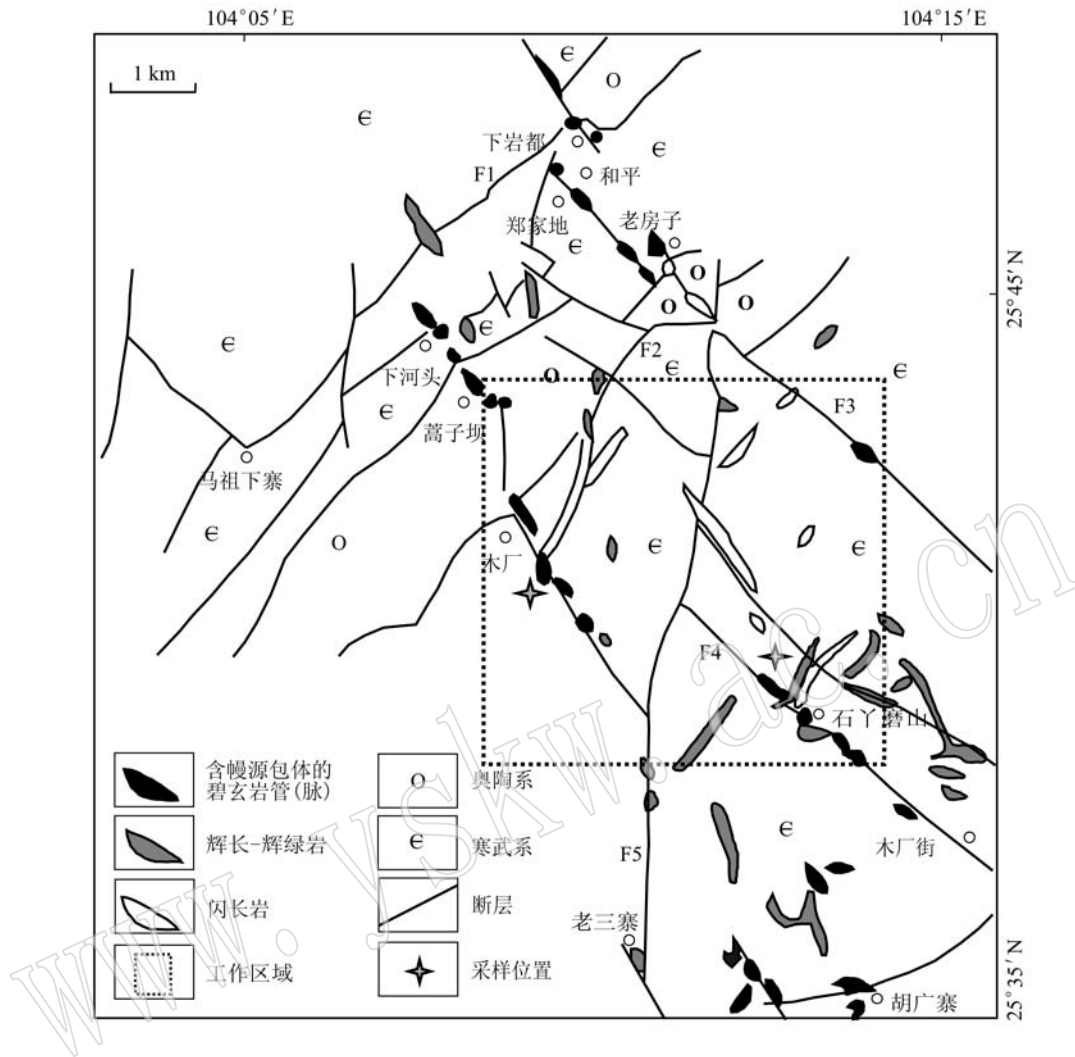


图 1 马关地区木厂地质简图(据魏启荣等,2003)

Fig. 1 Simplified geological map of Muchang in Maguan (after Wei Qirong *et al.*, 2003)

包体类型以尖晶石二辉橄榄岩为主,大小不一,多呈椭圆形或扁圆形,直径在几厘米到十几厘米之间,少数可达 20 cm 以上。包体外观呈现翠绿色-黄绿色-红褐色,块状构造,中细粒-中粗粒结构,颗粒较细者抗风化能力较强,多为翠绿色(图 2a),呈致密块状,颗粒较粗者多遭受后期蚀变,多为黄绿色(图 2b),结构较为疏松。另有少量包体由于其中铁镁矿物受氧化而呈红褐色。

包体薄片在偏光镜下可见主要矿物的三联点结构(图 2c),主要矿物组合为橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和尖晶石,其中橄榄石占 52%~70%,无色至浅黄色,半自形或他形粒状,晶体内发育裂纹,有的沿裂纹发生轻微的蛇纹石化,扭折带发育;单斜辉石占 8%~20%,淡绿色,呈不规则板片状,解理不明显,局部发育裂隙;斜方辉石占 18%~35%,呈棕褐色,

他形粒状或短柱状;尖晶石占 2%~5%,棕褐色,他形粒状,多充填在其他矿物的裂隙之中(图 2d)。

## 2 分析方法

橄榄岩包体矿物的主要元素组成分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的电子探针室利用配备 4 道波谱仪的 JEOL JXA-8100 型电子探针完成,样品需先制作成普通探针薄片,实验前先在偏光显微镜下进行观察,挑选出新鲜的矿物颗粒进行标记。工作条件为:加速电压 15 kV,加速电流 20 nA,束斑直径 2 μm,使用天然矿物或合成的氧化物作为标样。所有测试数据均进行了 ZAF 校正处理。

单斜辉石是地幔橄榄岩中微量元素的主要载

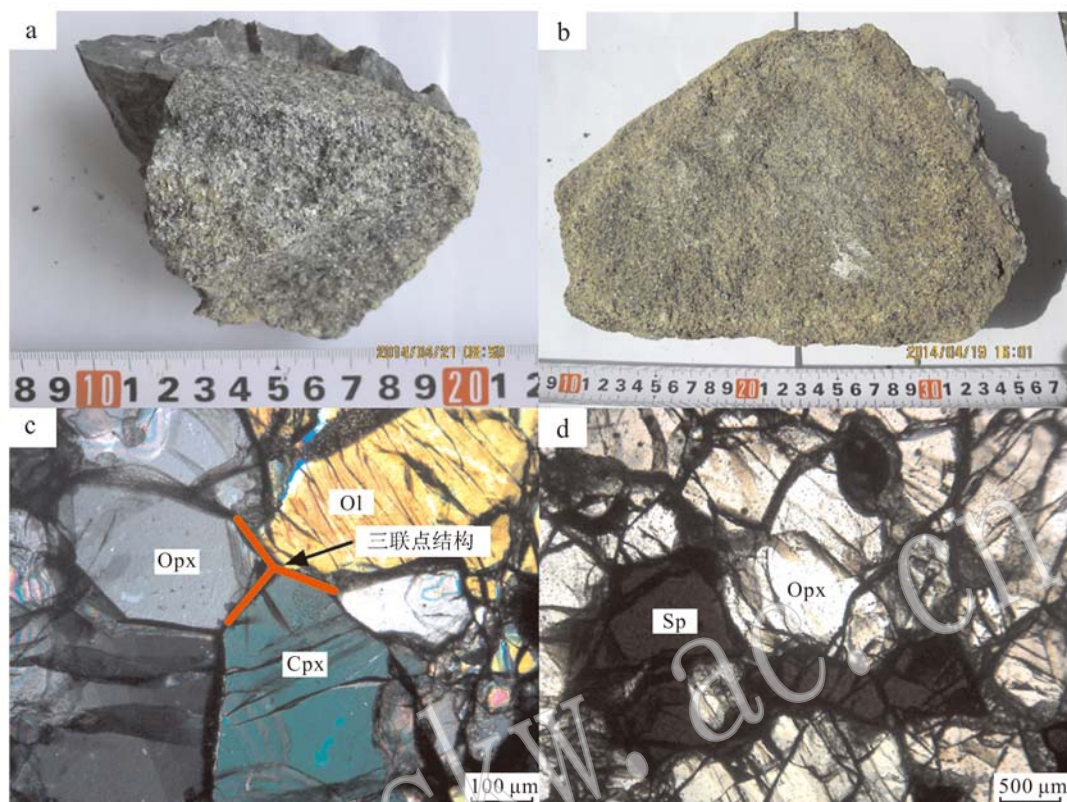


图 2 木厂橄榄岩包体手标本及显微结构照片

Fig. 2 Photos of hand specimens and microstructure of Muchang peridotite xenoliths

a—新鲜的翠绿色橄榄岩包体; b—遭受蚀变的黄绿色橄榄岩包体; c—主要矿物的三联点结构(+); d—尖晶石充填在斜方辉石裂隙中(-)  
a—fresh emerald peridotite xenolith; b—altered yellow-green peridotite xenolith; c—triple junction among major minerals(+);  
d—spinel filling orthopyroxenes fissure(-)

体,因此其微量元素特征可以反映全岩的微量元素特征。单斜辉石的微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 LA-ICP MS 实验室进行。分析使用的激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,等离子体质谱仪为 Agilent 7500a,激光能量 70 mJ,频率 8 Hz,激光束斑直径 32  $\mu\text{m}$ 。分析精度视元素含量大小在 5%~10% 之间变化。具体分析条件及流程详见 Liu 等(2008)。

橄榄岩包体矿物的红外光谱分析在中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室的红外光谱实验室进行。选择新鲜未遭受明显蚀变的包体样品,实验前将岩石样品制成双面抛光的薄片,厚度控制在 0.3~0.5 mm 左右。这样的厚度一是确保红外光谱分析时测定的是单个晶体,二是可以使实验过程中获得较强的信号。由于制样过程中薄片表面会有树脂残余,因此在进行红外光谱分析前需将样品进行清洗。先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,最后置于 100  $^{\circ}\text{C}$  烘箱中干燥至少 6 h 以除去样品表面和裂隙中的吸附水。红外光谱分析使用 Nicolet 5700 型傅里叶变化红外光谱仪,带有 continu  $\mu\text{m}$  显微镜,探测器为 MCT-A,实验过程中使用液氮冷却,光源为非偏振光。IR 光谱仪分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ ,测量范围为 2 000~5 000  $\text{cm}^{-1}$ ,样品及空白区域扫描次数均为 128 次。测定点一般选取透明、未发生明显蚀变或无裂痕且较大的颗粒中心位置附近。光谱的收集和处理使用 Thermo Nicolet 公司提供的 OMNIC 8.2 软件。光谱的收集过程中使用  $\text{H}_2\text{O}$  校正扣除空气中的水分影响。

### 3 结果

#### 3.1 主要元素组成

利用电子探针(EMP)对橄榄岩包体样品中的单斜辉石、斜方辉石、橄榄石和尖晶石进行了多点多颗

粒的分析,结果显示,对于同一样品内的同种矿物,无论是同一颗粒内部还是不同颗粒之间,其化学组成都是均一的,因此表 1~4 中列出的是多点分析的平均值。其中橄榄石、单斜辉石、斜方辉石的  $Mg^\#$  分别为 88.87 ~ 90.77、90.07 ~ 90.93、89.41 ~ 91.28,尖晶石的  $Cr^\#$  和  $Mg^\#$  分别为 7.76~14.67 和 77.46~78.86。橄榄石的  $Mg^\#$  能够直接反映地幔饱满和难熔的性质,指示岩石圈地幔主要组成元素的饱满与亏损程度,因此能够在一定程度上指示岩石圈地幔的性质及其经历的演化过程(Johnson *et al.*, 1990; Norman, 1998)。当  $Mg^\#$  大于 92 时表示地幔难熔,小于 90 时表示地幔饱满,在 90~92 之间则为过渡型地幔(Griffin *et al.*, 2003; 汤艳杰等, 2011)。木厂的样品表现出饱满型地幔向过渡型地幔转化的特点。

有研究表明,单斜辉石中的某些主要元素(如 Al 和 Fe)含量越高,相应的  $Mg^\#$  则越低,表明橄榄岩受熔融抽取的程度越低(郑建平等, 2001)。木厂样品中两种辉石的  $Mg^\#$  和其主要元素之间均呈现出较

好的相关性(图 3),无论是单斜辉石还是斜方辉石,其  $Mg^\#$  与  $Al_2O_3$ 、FeO 均呈现明显的负相关性,而与 CaO 则呈现出明显的正相关性。主要元素的这些明显的相关性表明木厂的橄榄岩包体是岩石圈地幔经历不同程度部分熔融的残余。

利用 Brey 等(1990)的二辉石温度计与斜方辉石(Ca-In-Opx)温度计分别计算了马关木厂橄榄岩包体的形成温度(假定压力为 1.5 GPa),两种温度计计算结果分别为 1 042~1 175℃ 和 955~1 060℃,相差 50~100℃ 左右(表 2),温度的变化范围与前人的计算结果比较一致(魏启荣等, 2004; 夏萍等, 2006; 喻学惠等, 2006)。

### 3.2 微量元素特征

利用激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP MS)对橄榄岩包体中的单斜辉石进行了多点多颗粒的分析,每个样品至少分析 5 个以上单斜辉石颗粒,还在较大颗粒内部进行多点分析。结果显示,木厂橄榄岩包体中的单斜辉石具有比较单一的稀土和微量元素组成(表 5)。

表 1 木厂橄榄岩包体中单斜辉石的主要元素组成  
Table 1 Major elements of clinopyroxenes from Muchang peridotite

$\omega_B/\%$

样品号	MC-001A	MC-001B	MC-001C	MC-003A	MC-003B	MC-004	MC-010	MC-019
SiO <sub>2</sub>	52.53	52.26	52.14	53.52	52.22	52.69	52.07	51.98
TiO <sub>2</sub>	0.61	0.37	0.39	0.05	0.58	0.52	0.44	0.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.01	6.70	6.64	4.16	6.98	6.69	6.37	6.80
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.76	1.00	1.10	0.89	0.60	0.71	0.94	0.68
FeO	2.78	2.99	3.03	2.50	2.92	2.75	2.70	2.79
MnO	0.07	0.11	0.08	0.08	0.09	0.10	0.09	0.12
MgO	15.33	16.23	15.84	16.82	14.93	15.38	15.27	15.50
CaO	19.34	18.69	18.68	21.26	19.39	19.41	19.69	19.70
Na <sub>2</sub> O	1.84	1.13	1.15	0.73	1.37	1.22	1.22	1.67
K <sub>2</sub> O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
NiO	0.08	0.07	0.04	0.10	0.07	0.07	0.07	0.05
Total	100.35	99.57	99.08	100.12	99.15	99.53	98.88	99.79
以 6 个氧原子为基准计算的阳离子数								
Si	1.89	1.89	1.89	1.93	1.90	1.90	1.90	1.88
Ti	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01
Al	0.30	0.29	0.28	0.18	0.30	0.28	0.27	0.29
Cr	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
Fe	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.82	0.87	0.86	0.91	0.81	0.83	0.83	0.84
Ca	0.74	0.72	0.73	0.82	0.75	0.75	0.77	0.76
Na	0.13	0.08	0.08	0.05	0.10	0.09	0.09	0.12
K	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
Total	4.00	3.98	3.98	3.99	3.98	3.97	3.98	4.01
$Mg^\#$	90.77	90.60	90.27	92.29	90.07	90.84	90.93	90.84

注:  $Mg^\# = 100 Mg/(Mg + Fe)$ 。

表 2 木厂橄榄岩包体中斜方辉石的主要元素组成

 $w_B/\%$ 

Table 2 Major elements of orthopyroxenes from Muchang peridotite

样品号	MC-001A	MC-001B	MC-001C	MC-003A	MC-003B	MC-004	MC-010	MC-019
SiO <sub>2</sub>	55.20	55.12	55.08	55.34	54.88	54.61	55.49	54.76
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.09	0.08	0.00	0.13	0.12	0.11	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.64	5.15	5.17	3.63	4.72	4.44	4.18	4.60
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.37	0.55	0.52	0.60	0.43	0.39	0.36	0.37
FeO	6.26	6.00	5.99	5.68	6.84	6.29	5.99	6.29
MnO	0.13	0.13	0.15	0.11	0.14	0.14	0.11	0.11
MgO	32.44	32.69	32.37	33.32	32.39	33.39	32.77	32.55
CaO	0.66	1.03	0.95	0.71	0.68	0.70	0.70	0.74
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.09	0.12	0.07	0.06	0.07	0.10	0.07
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.14	0.11	0.09	0.10	0.09	0.11	0.13	0.11
Total	100.07	100.96	100.52	99.57	100.35	100.26	99.92	99.70
以 6 个氧原子为基准计算的阳离子数								
Si	1.91	1.89	1.89	1.92	1.90	1.89	1.92	1.90
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.19	0.21	0.21	0.15	0.19	0.18	0.17	0.19
Cr	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe	0.18	0.17	0.17	0.16	0.20	0.18	0.17	0.18
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	1.67	1.67	1.66	1.72	1.67	1.72	1.69	1.68
Ca	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Na	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
K	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
Total	3.99	4.00	4.00	4.00	4.00	4.02	3.99	4.00
Mg <sup>#</sup>	90.22	90.66	90.59	91.28	89.41	90.48	90.69	90.22
$t_1/^\circ\text{C}$	1064	1175	1168	1046	1091	1122	1090	1042
$t_2/^\circ\text{C}$	955	1060	1039	973	962	969	966	983

注:  $t_1$  为二辉石温度计;  $t_2$  为斜方辉石温度计。

表 3 木厂橄榄岩包体中橄榄石的主要元素组成

 $w_B/\%$ 

Table 3 Major elements of olivines from Muchang peridotite

样品号	MC-001A	MC-001B	MC-001C	MC-003A	MC-003B	MC-004	MC-010	MC-019
SiO <sub>2</sub>	41.08	41.31	41.42	40.82	40.42	40.57	40.95	41.10
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.03	0.01	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.13	0.05	0.00
FeO	9.86	9.55	9.63	9.19	10.95	9.83	9.47	9.58
MnO	0.16	0.10	0.12	0.15	0.15	0.13	0.14	0.14
MgO	49.58	50.22	49.76	50.70	49.03	49.32	49.95	49.72
CaO	0.05	0.08	0.08	0.07	0.04	0.06	0.05	0.04
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
NiO	0.34	0.39	0.36	0.36	0.36	0.36	0.35	0.36
Total	101.15	101.74	101.43	101.32	100.99	100.43	100.96	100.98
以 4 个氧原子为基准计算的阳离子数								
Si	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
Ti	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
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.20	0.19	0.19	0.19	0.22	0.20	0.19	0.19
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	1.79	1.80	1.79	1.83	1.79	1.80	1.81	1.80
Ca	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
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Total	3.00	3.00	3.00	3.01	3.01	3.01	3.01	3.00
Mg <sup>#</sup>	89.97	90.36	90.21	90.77	88.87	89.94	90.39	90.25

表 4 木厂橄榄岩包体中尖晶石的主要元素组成

$w_B/\%$

Table 4 Major elements of spinels from Muchang peridotite

样品号	MC-001A	MC-001B	MC-001C	MC-003A	MC-003B	MC-004	MC-010	MC-019
SiO <sub>2</sub>	0.03	0.08	0.06	0.07	0.04	0.10	0.03	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.16	0.18	0.17	0.13	0.20	0.10	0.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57.86	54.32	53.77	54.57	59.31	53.37	58.33	58.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.31	13.09	13.48	12.98	7.44	13.68	9.58	9.45
FeO	10.32	10.37	10.70	10.72	11.00	10.69	10.48	10.44
MnO	0.12	0.13	0.10	0.10	0.12	0.14	0.10	0.08
MgO	21.56	21.70	21.12	21.20	21.21	21.03	21.61	21.49
CaO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.03	0.03	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00
K <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
NiO	0.35	0.32	0.36	0.32	0.42	0.29	0.37	0.35
Total	99.74	100.19	99.84	100.13	99.65	99.53	100.62	99.99
以 4 个氧原子为基准计算的阳离子数								
Si	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.77	1.68	1.67	1.68	1.81	1.67	1.77	1.77
Cr	0.19	0.27	0.28	0.27	0.15	0.29	0.19	0.19
Fe	0.22	0.23	0.24	0.23	0.24	0.24	0.23	0.23
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.83	0.85	0.83	0.83	0.82	0.83	0.83	0.83
Ca	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
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Total	3.02	3.03	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02
Cr <sup>#</sup>	9.75	13.92	14.40	13.76	7.76	14.67	9.93	9.85
Mg <sup>#</sup>	78.83	78.86	77.87	77.89	77.46	77.81	78.62	78.59

注:  $Cr^{\#} = Cr / (Cr + Al) \times 100$ 。

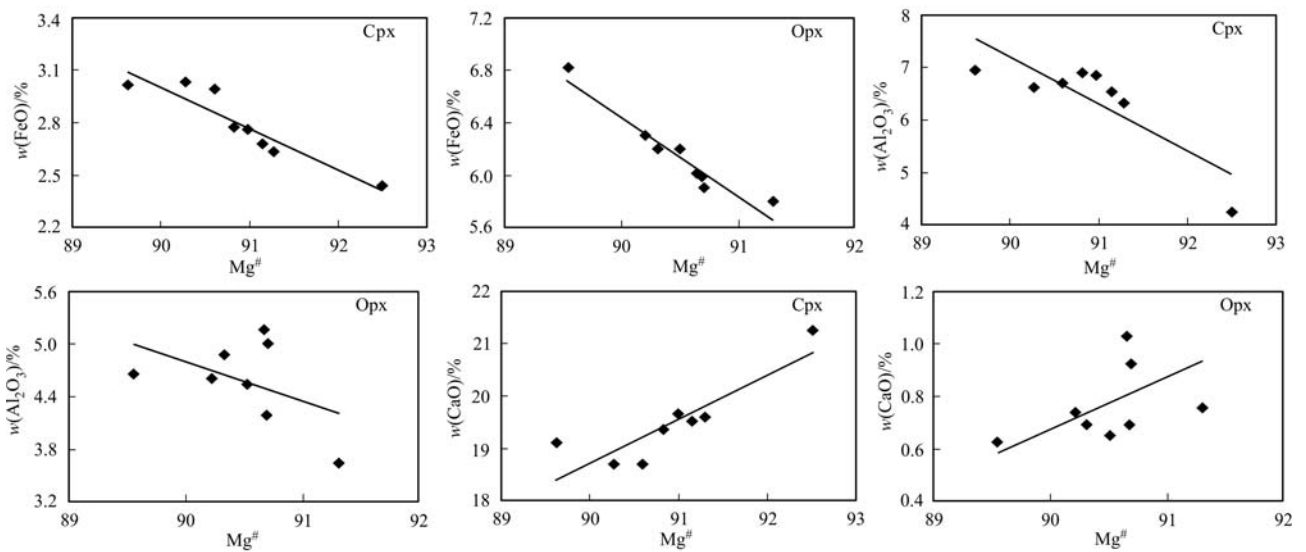


图 3 木厂橄榄岩包体中辉石的主要元素相关图

Fig. 3 Correlations between major elements and Mg<sup>#</sup> of clinopyroxene and orthopyroxene from Muchang peridotite

表 5 木厂橄榄岩中单斜辉石的微量元素含量

 $w_B/10^{-6}$ 

Table 5 Trace elements of clinopyroxenes from Muchang peridotite

样品号	MC-001A	MC-001B	MC-001C	MC-003A	MC-003B	MC-004	MC-010	MC-019
Rb	0.022	0.014	0.015	0.036	0.011	—	0.021	0.027
Ba	0.041	0.136	0.097	0.040	0.038	0.040	0.022	0.116
Th	0.004	0.022	0.032	0.017	0.014	0.009	0.041	0.009
U	0.005	0.011	0.006	0.003	—	0.005	0.015	0.006
Ta	0.015	0.020	0.024	0.014	0.012	0.013	0.010	0.009
Pb	0.018	0.040	0.046	0.008	0.014	0.025	0.019	0.061
Be	0.049	0.127	0.069	—	0.199	0.442	0.123	0.062
Nb	0.068	0.375	0.391	0.191	0.022	0.081	0.111	0.075
Lu	0.269	0.196	0.226	0.096	0.307	0.261	0.244	0.278
Tm	0.310	0.254	0.238	0.101	0.319	0.321	0.285	0.322
Tb	0.479	0.371	0.391	0.085	0.504	0.529	0.482	0.472
Pr	0.633	0.578	0.572	0.202	0.729	0.633	0.565	0.620
La	0.666	0.939	0.838	0.535	0.916	0.804	0.764	0.655
Ho	0.696	0.620	0.569	0.194	0.719	0.768	0.651	0.669
Eu	0.750	0.570	0.664	0.072	0.780	0.707	0.621	0.811
Ge	0.766	0.951	0.641	0.925	0.815	0.721	0.969	0.878
Hf	1.151	0.846	0.773	0.049	1.206	0.960	0.912	0.963
Cu	1.275	1.778	1.538	0.996	1.499	1.136	1.333	1.539
Li	1.386	1.414	1.215	2.623	4.524	2.295	3.792	1.179
Sm	1.684	1.811	1.298	0.090	1.951	1.737	1.611	1.757
Yb	2.197	1.827	1.747	0.674	2.023	2.034	1.853	1.871
Er	2.703	1.825	1.696	0.569	2.443	2.055	1.898	2.141
Gd	2.834	2.215	2.218	0.537	2.932	2.473	2.409	2.784
Ce	2.927	3.378	3.230	1.570	3.624	3.369	2.980	3.039
B	3.397	3.129	4.776	11.416	3.255	2.907	7.454	2.347
Dy	3.621	2.719	2.794	0.780	3.289	3.300	3.156	3.386
Ga	3.996	4.768	4.526	2.361	4.634	3.966	3.665	4.028
Nd	4.116	3.671	3.189	0.920	4.323	4.075	3.754	3.644
Zn	8.031	11.169	9.691	7.825	8.204	7.114	8.921	7.481
Y	20.45	17.30	16.14	5.30	20.09	19.48	18.39	19.60
Co	21.46	25.89	25.58	22.16	22.03	22.62	22.13	23.11
P	29.17	122.65	124.15	97.22	154.28	72.63	55.15	55.08
Zr	35.58	26.16	25.45	2.49	36.47	30.64	25.38	30.78
Sc	59.34	54.87	53.89	56.28	61.68	60.93	59.04	63.16
Sr	67.77	66.97	65.14	34.89	75.21	69.99	62.49	73.01
V	277.1	248.9	243.2	236.7	281.8	274.4	263.2	277.8
Ni	342.1	435.5	422.5	402.6	321.9	365.9	356.5	362.4
Ti	4 010	2 636	2 529	485	4 063	3 192	3 346	3 346

注：—表示未测出。

木厂单斜辉石的稀土总量在  $6.43 \times 10^{-6} \sim 24.86 \times 10^{-6}$  之间, 其中仅样品 MC-003A 的值为 6.43(其他样品均在 20 以上), 推测该样品可能遭受后期蚀变, 导致测得的稀土元素总量偏低。反映轻重稀土分异程度的  $(La/Yb)_N$  值在 0.22~0.57 之间。在稀土元素的 CI 球粒陨石标准化(图 4a)图解中可以明显看出, 曲线表现出轻稀土相对左倾、重稀土相对平坦的分配模式, 表明单斜辉石样品具有微

弱的轻稀土亏损和重稀土相对富集的特征。在经原始地幔标准化(图 4b)的微量元素蛛网图中, 可以观察到 Ba、K、Nb、Pb、P、Ti 等元素明显的负异常, 表明单斜辉石样品微量元素总体显示出亏损高场强元素和大离子亲石元素的特征。

### 3.3 红外光谱特征

利用显微傅立叶变换红外光谱(Micro-FTIR)对橄榄岩包体样品中的单斜辉石、斜方辉石和橄榄石



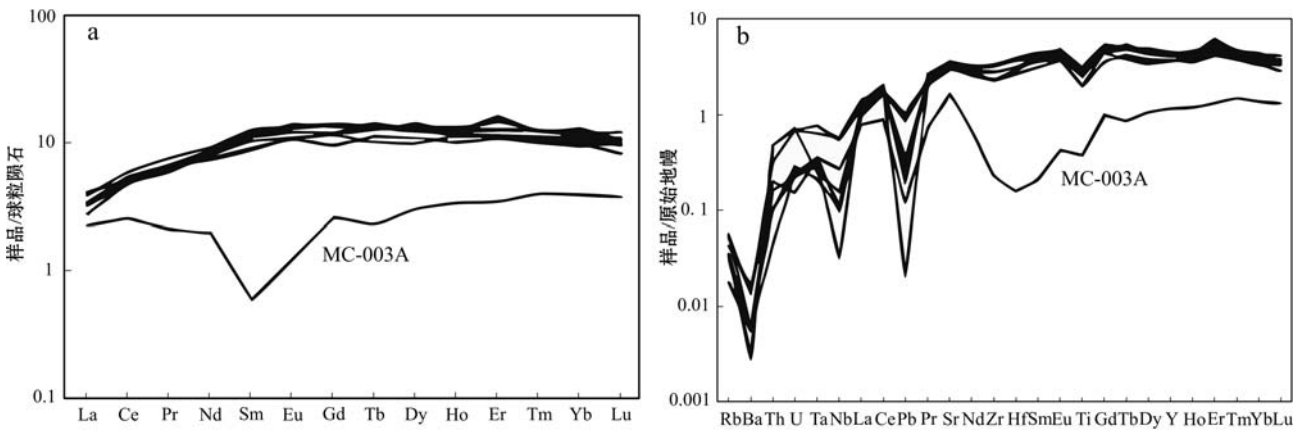


图 4 木厂橄榄岩包体中单斜辉石的稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b) (标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)  
 Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergram (b) of clinopyroxene from Muchang peridotite (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

进行了多点多颗粒的分析。结果显示,在典型的 OH 红外吸收区域内(3 700~2 800  $\text{cm}^{-1}$ ),所有进行分析的单斜辉石和斜方辉石都出现了明显的 OH 吸收峰,大部分样品中的橄榄石也出现较为明显的 OH 吸收峰。

单斜辉石的 OH 吸收峰主要有 3 组,分别位于 3 640~3 620  $\text{cm}^{-1}$ 、3 550~3 530  $\text{cm}^{-1}$ 、3 470~3 450  $\text{cm}^{-1}$ ,其中以 3 640~3 620  $\text{cm}^{-1}$ 的吸收峰相对强度最强,在部分样品中表现为单峰的形式,其形态多呈现出窄而尖锐的特点,而其它两组吸收峰则呈现出宽而圆滑的特点(图 5 中的 Cpx)。

斜方辉石的 OH 吸收峰主要也有 3 组: 3 600~3 580  $\text{cm}^{-1}$ 、3 525~3 515  $\text{cm}^{-1}$ 、3 425~3 415  $\text{cm}^{-1}$ ,其中以 3 600~3 580  $\text{cm}^{-1}$ 的吸收峰相对强度最强,形态窄而尖锐,3 425~3 415  $\text{cm}^{-1}$ 的吸收峰形态宽而圆滑,而 3 525~3 515  $\text{cm}^{-1}$ 的吸收峰相对强度则较弱(图 5 中的 Opx)。上述两种辉石的 OH 吸收峰的位置和光谱特征与其他地区幔源辉石的情况基本一致(Bell and Rossman, 1992; Rossman, 1996; Peslier *et al.*, 2002; Matsyuk and Langer, 2004; Beran, 2006; Johnson, 2006; 郝艳涛等, 2006, 2007; 杨晓志等, 2007; 朱蓓蓓等, 2009; 雷能忠等, 2009; 夏群科等,

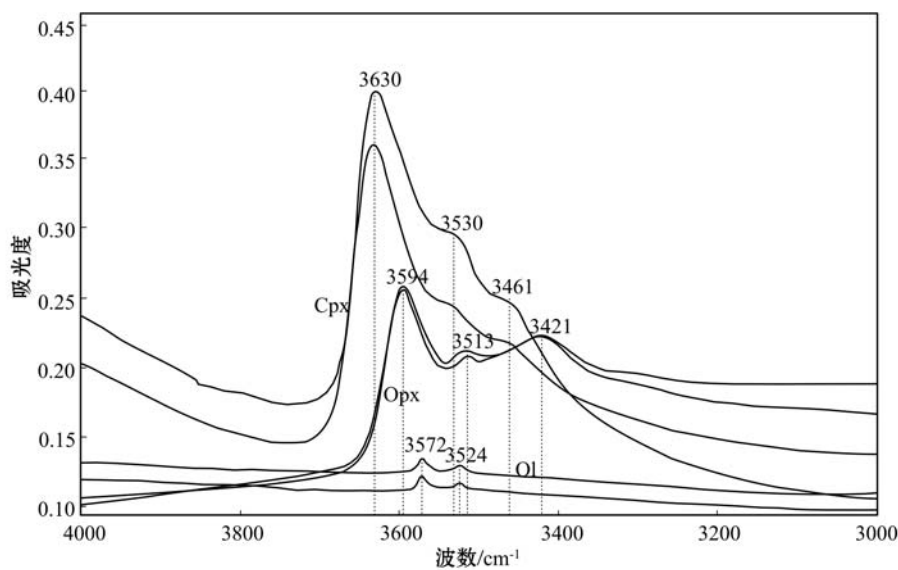


图 5 木厂单斜辉石、斜方辉石、橄榄石代表性红外光谱  
 Fig. 5 Representative IR spectra of clinopyroxene, orthopyroxene and olivine from Muchang

2000, 2010; 王蓉等, 2011a, 2011b; 杨贵才等, 2012; 赵起超等, 2015), 可以确定是由于矿物晶格缺陷中的结构 OH 所引起。

本次进行红外光谱分析的大部分橄榄石也显示出较为明显的 OH 吸收峰, 说明该区橄榄石中存在一定量的结构水。橄榄石的 OH 吸收峰主要有 2 组, 分别位于  $3\ 575\ \text{cm}^{-1}$  和  $3\ 525\ \text{cm}^{-1}$  附近, 其波数变化范围相对于两种辉石较小, 导致其波峰的形态呈现出比两种辉石更窄而尖锐的特点(图 5 中的 OL)。

### 3.4 矿物结构水含量计算

矿物水含量的计算采用 Beer-Lambert 公式:  $\Delta = Ict\gamma$ 。式中  $\Delta$  是吸收强度,  $I$  是矿物的吸收系数,  $c$  是矿物的含水量 ( $10^{-6}$ ),  $t$  代表薄片中的矿物颗粒厚度 (cm),  $\gamma$  是各向异性因子。吸收强度用基线校正之后的 OH 吸收峰的积分面积 ( $\text{cm}^{-1}$ ) 表示, 对于橄榄石积分范围取  $3\ 650 \sim 3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ , 对于单斜辉石积分范围取  $3\ 800 \sim 3\ 000\ \text{cm}^{-1}$ , 对于斜方辉石积分范围取  $3\ 700 \sim 2\ 800\ \text{cm}^{-1}$ ; 吸收系数分别为: 橄榄石  $5.319 \times 10^{-6}\ \text{cm}^2$ , 单斜辉石  $7.09 \times 10^{-6}\ \text{cm}^2$ , 斜方辉石  $14.864 \times 10^{-6}\ \text{cm}^2$  (Bell *et al.*, 1995); 对于颗粒未定向和非偏振光的情况, Kovacs 等(2008)修正了 Paterson(1982)关于各向异性因子  $\gamma = 1/3$  的提法, 认为非偏正光的平均吸光度在随机取向的情况下, 近似于总吸光度的三分之一, 因此在计算含水量时, 总吸光度可以用非定向测得的吸光度乘以 3 来表示。同一样品厚度均匀 (误差  $< 10\%$ ), 所以在计算同一样品内不同矿物颗粒的水含量时使用多点测量 (每个样品测量的总点数均大于 30, 覆盖整个薄片) 的平均值。由于实验过程使用非偏振光分析, 为了减小误差, 对每个样品中的每种矿物都至少测量了 10 个以上颗粒 (覆盖整个薄片), 取

其平均值来代表样品中不同矿物的水含量 (Libowitzky and Rossman, 1996)。水含量测量和计算的总误差小于  $30\%$ , 主要来自于非偏振光的使用, 基线校正的误差, 样品厚度测量的误差, 以及样品化学成分与前人所用样品存在差异等 (Bell *et al.*, 1995, 2003; Yang *et al.*, 2008)。

马关木厂橄榄岩包体矿物的水含量数据见表 6。单斜辉石的水含量为  $160 \times 10^{-6} \sim 557 \times 10^{-6}$ , 斜方辉石的水含量为  $85 \times 10^{-6} \sim 207 \times 10^{-6}$ , 橄榄石的水含量为  $5 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ , 根据矿物百分比含量估算的全岩水含量为  $46 \times 10^{-6} \sim 137 \times 10^{-6}$ 。其中 MC-003A 号样品由于后期蚀变的影响, 导致两种辉石水含量明显偏低, 而橄榄石水含量则相对较高, 因此未计算全岩含水量。

## 4 讨论

### 4.1 地幔部分熔融和交代作用

地幔橄榄岩一般是原始地幔发生部分熔融和交代作用的固相残余, 因此橄榄岩包体矿物的主、微量元素在一定程度上可以反映岩石圈地幔饱满和难熔的性质。木厂橄榄岩包体矿物的主要元素之间呈现出良好的相关性, 符合地幔部分熔融残余的解释, 是岩石圈地幔经历不同程度部分熔融的残余。此外, 微量元素中 Y 和 Yb 这 2 个元素不受后期交代作用的影响, 它们的含量可以用来指示橄榄岩经历部分熔融的程度 (Norman, 1998)。图 6 是根据分离熔融模型 (Johnson *et al.*, 1990) 来模拟计算橄榄岩源区的部分熔融曲线, 从图中可以看出, 除了一个样品 MC-003A 由于后期蚀变的影响导致  $Y_N$  和  $Yb_N$  偏低, 投出的点落在  $10\%$  以外, 其他样品部分熔融程度

表 6 木厂橄榄岩包体的矿物组成及水含量

Table 6 Mineral model and water content from Muchang peridotite

样品号	矿物百分含量/%			水含量/ $10^{-6}$			全岩
	Cpx	Opx	Ol	Cpx	Opx	Ol	
MC-001A	10	26	64	557	207	12	117
MC-001B	21	27	52	418	167	8	137
MC-001C	15	25	60	460	175	8	118
MC-003A*	10	31	59	168	89	18	-
MC-003B	11	36	53	354	85	5	72
MC-004	12	23	65	160	105	5	46
MC-010	9	21	70	470	200	9	91
WT-004	8	38	54	375	96	9	71

注: MC-003A 号样品由于后期蚀变的影响, 橄榄石水含量明显偏高, 因此未计算全岩含水量。

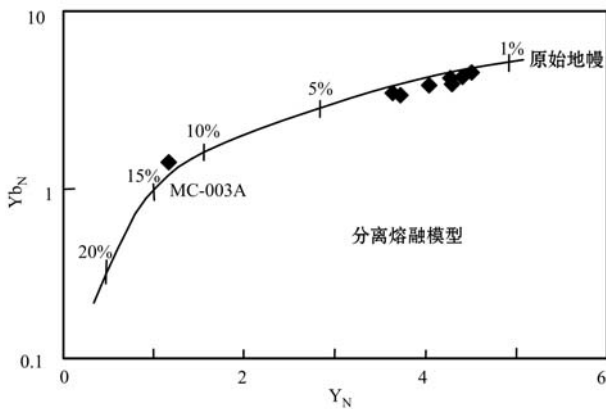


图6 木厂橄榄岩包体中单斜辉石的 Yb 和 Y 相关图解  
(据 Johnson *et al.*, 1990)

Fig. 6 Yb versus Y diagram of clinopyroxene from Muchang peridotite (after Johnson *et al.*, 1990)

均小于 5%，多数样品介于 1%~4% 之间。说明木厂橄榄岩包体部分熔融程度较低。本次进行微量元素分析 8 件样品中，反映轻重稀土分异程度的  $(La/Yb)_N$  均小于 1，比值在 0.22~0.57 之间，样品的 Ti/Eu 比值较高(4 076~6 772)，说明样品可能经历了微弱的交代作用，且交代介质以硅酸盐熔体为主。

木厂橄榄岩包体的主、微量元素成分比较单一，是岩石圈地幔经历不同程度部分熔融的固相残余，部分熔融程度较低。可能经历了以硅酸盐熔体为交代介质的微弱的地幔交代作用。

#### 4.2 包体中原始水含量的保存

对于本次研究的两种辉石样品，以下几点可以充分说明它们保存了源区的水含量：① 矿物化学成分的均一分布。对于同一包体样品，不论是主量元素还是微量元素，从矿物颗粒中心到边缘两种辉石的化学成分在误差范围内都是均一的，不同样品之间矿物化学成分的变化也符合地幔部分熔融的解释。② 颗粒内部水含量的均一分布。对样品中颗粒较大的两种辉石进行了从中心到边缘的多点分析，发现其水含量都是均匀分布的，表明辉石在上升过程中并没有经历明显的 H 扩散。③ 两种辉石之间一致的分配系数。两种辉石的水含量呈现出很好的相关性(图 7)，拟合的分配系数为 2.19，与前人所得结果比较一致(Xia *et al.*, 2013)，暗示水在两种辉石中基本达到平衡，因此可以代表源区的水含量信息(Grant *et al.*, 2007)。

一般来讲，在橄榄岩包体随岩浆上升至地表的过程中，去气作用能够显著影响 NAMs 中的水含量。

研究表明，橄榄石的水含量远低于其在地幔温压条件下的值(Peslier and Luhr, 2006; Smyth *et al.*, 2006; Hui *et al.*, 2015)，但辉石的水含量在随岩浆上升过程中却不会受到干扰，能够保存其在源区的信息(Bell *et al.*, 2004; Peslier *et al.*, 2006; Grant *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2008; Gose *et al.*, 2009)。造成这种现象的原因除了橄榄石和辉石中 H 的扩散速率存在差异之外，也可能是因为橄榄石强度比辉石低(Yamamoto *et al.*, 2008)，在包体上升过程中更容易被破坏，促使其中的水发生扩散丢失。虽然包体中橄榄石的水含量由于氢的扩散丢失而不能代表源区的水含量，但由于其含量很低(比辉石低一个数量级以上)，在计算全岩水含量时贡献很小，因此计算得到的全岩水含量可以代表岩石圈地幔水含量的下限。

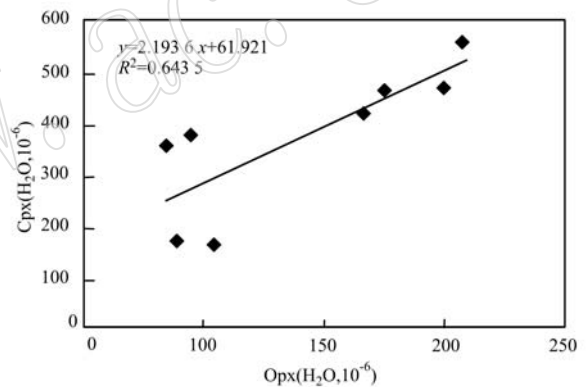


图7 木厂橄榄岩中两种辉石水含量的相关性

Fig. 7 Correlation of H<sub>2</sub>O between clinopyroxene and orthopyroxene from Muchang peridotite

#### 4.3 水的不均一分布

木厂橄榄岩包体样品中单斜辉石的水含量为  $160 \times 10^{-6} \sim 557 \times 10^{-6}$ ，斜方辉石的水含量为  $85 \times 10^{-6} \sim 207 \times 10^{-6}$ ，橄榄石的水含量为  $5 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ ，根据矿物百分比含量估算的全岩水含量为  $46 \times 10^{-6} \sim 137 \times 10^{-6}$ 。可以发现不同样品之间的水含量变化范围不大，同一样品中同种矿物之间的水含量也不存在明显差异。本文研究的包体样品中，橄榄石的  $Mg^{\#}$  为 88.87~90.77，两种辉石的水含量与橄榄石的  $Mg^{\#}$  并不存在明显的相关性，表明木厂岩石圈地幔的水含量并不主要受地幔部分熔融程度的控制，而更可能受到该地区后期经历的俯冲流体交代影响。

经历硅酸盐熔体交代的橄榄岩，其单斜辉石具

有低  $(La/Yb)_N$  和高  $Ti/Eu$  的特点 (Coltorti *et al.*, 1999)。本次研究的单斜辉石样品  $(La/Yb)_N$  均小于 1, 比值在 0.22~0.57 之间, 样品的  $Ti/Eu$  比值则较高 (4 076~6 772), 说明样品可能经历了以硅酸盐熔体为主的微弱的地幔交代作用, 其对含水量的影响可能并不大。

在华南地区与华北克拉通地区橄榄岩含水量对比图中(图 8)可以看到, 华南地区岩石圈地幔与华北

克拉通地区相比明显富水。华南地区橄榄岩包体中单斜辉石水含量多集中在  $200 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ , 斜方辉石水含量多集中在  $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ , 全岩水含量多集中在  $40 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ , 而华北克拉通地区橄榄岩包体中单斜辉石水含量多集中在  $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ , 斜方辉石水含量多集中在  $50 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ , 全岩水含量多集中在  $20 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$ 。

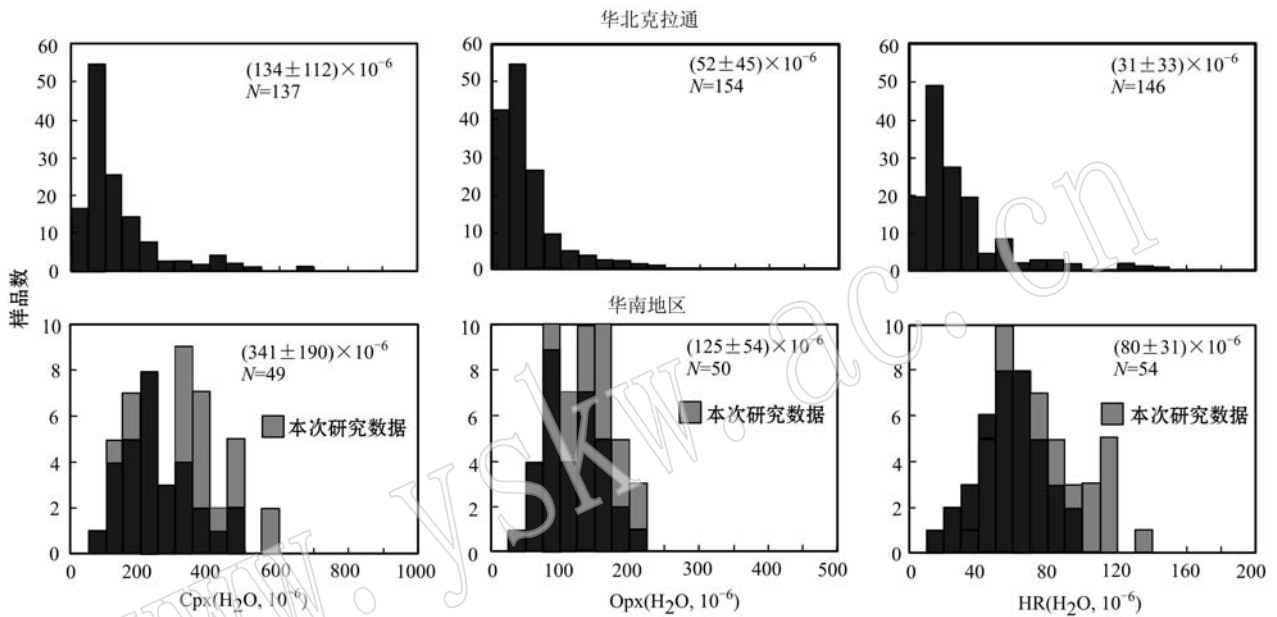


图 8 华南地区与华北克拉通橄榄岩中水含量的对比(引自夏群科等, 2013; 本次研究数据包含课题组部分未发表数据)

Fig. 8 Comparison of water in peridotites between the South China block and the North China Craton (after Xia Qunke *et al.*, 2013; including unpublished data of this study)

#### 4.4 含水量对滇东南岩石圈地幔演化的制约

木厂橄榄岩包体主要元素化学组成简单, 在尖晶石的  $Mg^\#$  和  $Cr^\#$  相关图中(图 9a), 可以看到样品全部落在深海橄榄岩的区域内; 在橄榄石的  $Mg^\#$  和斜方辉石含量的相关图中(图 9b), 样品基本都落在显生宙橄榄岩的范围, 表明岩石圈地幔相对比较年轻。黄行凯等(2011)对包体的 Re-Os 同位素进行研究, 结果显示该区岩石圈地幔的亏损年龄在 254~604 Ma 之间, 也证明了这一点。木厂单斜辉石的微量元素组成比较单一, 整体表现出高场强元素(Nb、Pb、P 和 Ti)、大离子亲石元素(Ba 和 K)和轻稀土元素的同步亏损, 具有与 MORB 相似的微量和稀土元素组成(张树明等, 2002), 推测木厂橄榄岩的形成可能与 MORB 型软流圈有关。考虑到包体的形成温度在  $1175^\circ\text{C}$  以下, 普遍低于软流圈的温度 ( $1280^\circ\text{C}$  以上), 因此木厂橄榄岩很可能代表了软流

圈地幔经历减压上升和热扩散后新生成的岩石圈地幔, 而且年代至少在晚古生代之前。Hao 等(2016)结合华南板块的高含水量和地球化学特征, 也认为其岩石圈地幔大部分是来自于软流圈的增生。

一般认为, 在俯冲带或者板片俯冲所能影响的区域, 蚀变的洋壳或上覆水饱和的沉积物层在俯冲过程中可以脱水从而导致被俯冲的地幔楔相对富水 (Peslier *et al.*, 2002)。滇东南地区在中生代经历了古特提斯洋的闭合和新特提斯洋的打开, 晚三叠世末—早侏罗世初古特提斯洋盆完全闭合, 大致与此同时或略早, 新特提斯洋盆开始打开, 并大致于早—中侏罗世之交扩张到最大规模, 然后开始俯冲消减, 在白垩纪—古近纪之交完全闭合(莫宣学等, 2007)。在这一系列的特提斯洋盆的打开和闭合过程中, 滇东南地区经历了复杂的洋壳和陆内俯冲(张志斌等, 2006), 岩石圈地幔遭受了大规模的俯冲流体交代,

从而相对富水。经历过大规模俯冲体系作用的地区,岩石圈发生破坏是一个大概率事件。黄行凯(2012)通过对橄榄岩包体 Re-Os 同位素以及玄武岩

全岩 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 定年的研究,认为马关地区岩石圈地幔在 22~16 Ma 发生了快速的减薄,减薄的原因可能与软流圈的底辟上涌有关。

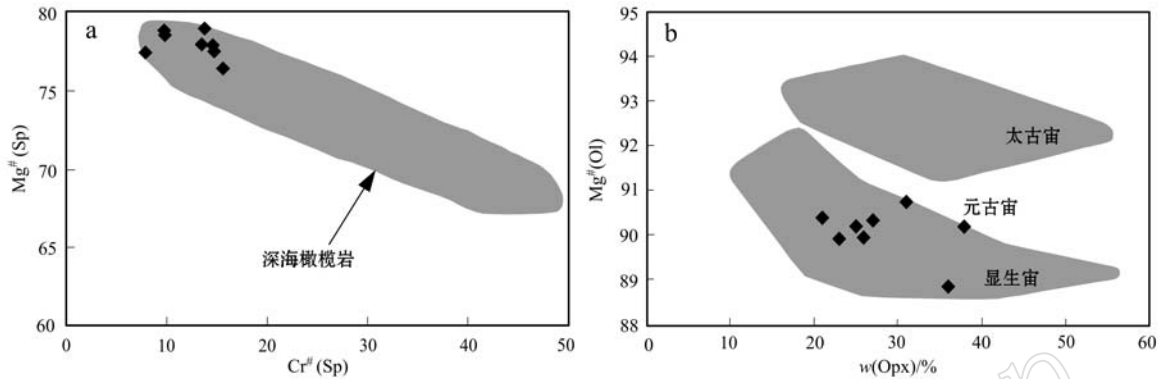


图 9 木厂橄榄岩中尖晶石的  $\text{Mg}^\#$  与  $\text{Cr}^\#$  (a) 和橄榄石的  $\text{Mg}^\#$  与 Opx 含量 (b) 相关图解(深海橄榄岩范围据 Dick and Bullen, 1984; 太古宙、元古宙和显生宙地幔范围据 Kelemen *et al.*, 1998)

Fig. 9  $\text{Mg}^\#$  versus  $\text{Cr}^\#$  of spinel (a) and  $\text{Mg}^\#$  of olivine versus Opx (%) (b) from Muchang peridotite (abyssal peridotite after Dick and Bullen, 1984; Achaean, Proterozoic and Phanerozoic mantle after Kelemen and Bullen, 1998)

华北克拉通岩石圈自中生代以来经历了大规模的减薄,厚度在 120 km 以上 (Menzies *et al.*, 1993)。虽然不同学者对华北克拉通岩石圈减薄的机制还存在很大的争议(Xu, 2001; 吴福元等, 2003; 牛耀龄, 2005),但大多数学者也都认同克拉通破坏一个前提是岩石圈地幔力学性质的弱化(吴福元等, 2008)。自中生代以来,华北克拉通经历了一系列的俯冲作用:包括三叠纪末期扬子板块的北向俯冲和晚中生代以来的太平洋板片向东亚的西向俯冲(Wu *et al.*, 2005; Menzies *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2007)。俯冲释放的水可能上升去影响上覆的岩石圈地幔,这种影响很大程度上导致了岩石圈地幔的力学性质的弱化。与之对应,这种弱化可能使下覆软流圈地幔的上涌增强,从而使得地幔交代介质携带大量的  $\text{H}_2\text{O}$  和 LILE 富集的熔体至岩石圈地幔,显著地降低岩石圈地幔岩石的固相线和粘滞度,使其富集变得密度更大而且更易溶。随着减薄作用的进行,持续上涌的软流圈的热扰动(加热造成水的逸失或熔融造成水的抽取)使得岩石圈地幔的含水量不断降低,这可能是华北克拉通岩石圈地幔普遍贫水的原因之一(Xia *et al.*, 2010)。

华南地区和华北克拉通同样经历了相邻的陆块和洋壳俯冲作用而导致岩石圈地幔相对富水,随后两地的岩石圈地幔也都发生了破坏减薄。尽管破坏

的机制可能有所差异,但减薄却是一个不争的事实。作为减薄的一个结果,两地岩石圈地幔的水含量却存在明显差异。前已述及,木厂岩石圈地幔的水含量并不主要受地幔部分熔融的控制,地幔交代作用对其影响也很小。而处于不同构造环境下的华南和 华北克拉通地区,其含水量的明显差异更有可能反映的是两地岩石圈地幔正处于不同的演化阶段。滇东南岩石圈地幔自中生代以来经历了一系列复杂的洋壳和陆内俯冲从而富水,在新生代(22~16 Ma)发生了快速的减薄。而华北克拉通岩石圈地幔多为残余的地幔,破坏在中生代就已开始,而且至少持续了 100 Ma 以上(朱日祥等, 2011, 2012),岩石圈地幔的水含量持续降低是伴随着整个减薄过程的。以滇东南马关木厂为代表的华南地区,其减薄发生的年限相对较短,基本介于该区两期岩浆活动之间(黄行凯等, 2013),软流圈的底辟上涌对上覆岩石圈地幔的影响非常有限,因此岩石圈地幔基本保留了自中生代以来在俯冲过程中流体交代作用所导致的富水特征。研究表明,华南地区要么没有经历与华北克拉通相似的岩石圈减薄事件,要么减薄机制有所不同(Hao *et al.*, 2016)。综上所述,本文支持第 2 种观点,华南地区很可能经历与华北克拉通相似的岩石圈减薄事件,只是减薄发生时间以及持续年限有所不同,含水量的明显差异有可能反映的是两地岩石

圈地幔正处于不同的演化阶段。

## 5 结论

(1) 本次研究的橄榄岩包体是岩石圈地幔经历不同程度部分熔融的残余, 部分熔融程度较低。可能经历了以硅酸盐熔体为交代介质的微弱的地幔交代作用。包体中单斜辉石的微量元素组成比较简单, 整体表现出高场强元素(Nb、Pb、P 和 Ti)、大离子亲石元素(Ba 和 K)和轻稀土元素的同步亏损, 具有与 MORB 相似的微量和稀土元素组成。

(2) 木厂地区橄榄岩包体的主要组成矿物单斜辉石、斜方辉石和橄榄石都含有一定量以羟基形式存在的结构水。单斜辉石的水含量为  $160 \times 10^{-6} \sim 557 \times 10^{-6}$ , 斜方辉石的水含量为  $85 \times 10^{-6} \sim 207 \times 10^{-6}$ , 橄榄石的水含量为  $5 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ , 根据矿物百分比含量估算的全岩水含量为  $46 \times 10^{-6} \sim 137 \times 10^{-6}$ 。

(3) 滇东南马关木厂岩石圈地幔具有明显富水的特征, 可能与该区自中生代以来遭受的新特提斯洋壳大规模俯冲流体交代作用有关。华南地区与华北克拉通水含量的明显差异有可能反映的是两地岩石圈地幔正处于不同的演化阶段。

## References

- Asimow P D and Langmuir C H. 2003. The important of water to oceanic mantle melting regimes[J]. *Nature*, 421: 815~820.
- Bell D R and Rossman G R. 1992. Water in Earth's mantle: The role of nominally anhydrous minerals[J]. *Science*, 255: 1391~1397.
- Bell D R, Jhinger P D and Rossman G R. 1995. Quantitative analysis of hydroxyl in garnet and pyroxene[J]. *American Mineralogist*, 80: 465~474.
- 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[J]. *Journal of Geophysical Research*, 108, doi: 10.1029/2001JB000679.
- 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(8): 1539~1564.
- Beran A. 2006. Water in natural mantle minerals II: Olivine, garnet and accessory minerals[J]. *Rev Mineral Geochem*, 62: 169~191.
- 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.
- Coltorti M, Bonadiman C, Hinton R W, *et al.* 1999. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: evidence from clinopyroxenes and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean [J]. *J. Petrol.*, 40: 133~165.
- Demouchy S, Jacobsen S D, Gaillard F, *et al.* 2006. Rapid magma ascent recorded by water diffusion profiles in mantle olivine[J]. *Geology*, 34: 429~432.
- Dick H J B and Bullen T. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86(1): 54~76.
- Dixon J E and Clague D A. 2001. Volatiles in basaltic glasses from Loihi seamount, Hawaii: Evidence for a relatively dry plume component [J]. *Journal of Petrology*, 42: 627~654.
- Dixon J E, Dixon T H, Bell D R, *et al.* 2004. Lateral variation in upper mantle viscosity: Role of water[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 222: 451~467.
- Gaetani G A, Grove T L and Bryan W B. 1993. The influence of water on the petrogenesis of subduction related igneous rocks[J]. *Nature*, 365: 332~334.
- Gose J, Schmadicke E and Beran A. 2009. Water in enstatite from Mid-Atlantic Ridge peridotite: Evidence for the water content of suboceanic mantle? [J]. *Geology*, 37: 543~546.
- Grant K, Ingrin G, Lorland J P, *et al.* 2007. Water partition between mantle minerals from peridotite xenoliths [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 154: 25~34.
- Griffin W L, O'Reilly S Y, Abe N, *et al.* 2003. The origin and evolution of Archean lithospheric mantle[J]. *Precambrian Research*, 127(1): 19~41.
- Grove T L, Till C B and Krawczynski M J. 2012. The role of H<sub>2</sub>O in subduction zone magmatism[J]. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 40: 413~439.
- 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).
- Hao Yantao, Xia Qunke and Yang Xiaozhi. 2007. Water in minerals from peridotite xenoliths of Hannuoba basalts, Hebei, China: micro-FTIR results[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 26(2): 130~140 (in

- Chinese with English abstract).
- Hao Y T, Xia Q K, Jia Z B, *et al.* 2016. Regional-scale heterogeneity in the water content of the Cenozoic lithospheric mantle of Eastern China[J]. *Geophys. Res.*, 121: 517~537.
- Hauri E H, Gaetani G A and Green T H. 2006. Partitioning of water during melting of the Earth's upper mantle at H<sub>2</sub>O-undersaturated conditions[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 248: 715~734.
- Hirth G and Kohlstedt D L. 1996. Water in the oceanic upper mantle: Implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 144: 93~108.
- Hofmeister A M. 2004. Enhancement of radiative transfer in the upper mantle by OH- in minerals[J]. *Phys Earth Planet Inter.*, 146: 483~495.
- Huang Xingkai. 2012. The Petrological and Geochemical Characteristics of Cenozoic Basalts and Mantle-derived Xenoliths from Maguan and Pingbian Area, Southeastern Yunnan Province and Its Significance of Deep Geodynamics[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Huang Xingkai, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2011. The composition and age of subcontinental lithospheric mantle beneath Maguan, Yunnan Province: constraints from Re-Os isotopes of mantle-derived peridotitic xenoliths[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2646~2654 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xingkai, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2013. Geochemical characteristics and geodynamic significance of Cenozoic basalts from Maguan and Pingbian, Southeastern Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1325~1337 (in Chinese with English abstract).
- Hui H, Peslier A H, Rudnick R L, *et al.* 2015. Plume-cratonic lithosphere interaction recorded by water and other trace elements in peridotite xenoliths from the Labait volcano, Tanzania[J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 16: 1687~1710.
- Johnson E A. 2006. Water in nominally anhydrous crustal minerals: Speciation, concentration, and geologic significance[J]. *Rev. Mineral Geochem.*, 62: 117~154.
- Johnson K, Dick H J B and Shimizu N. 1990. Melting in the oceanic upper mantle: An ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*(1978~2012), 95(B3): 2661~2678.
- Karato S I. 2011. Water distribution across the mantle transition zone and its implications for global material circulation[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 301: 413~423.
- Kelemen P B, Hart S R and Bernstein S. 1998. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 164(1/2): 387~406.
- Kovács I, Hermann J, O'Neill H S C, *et al.* 2008. Quantitative absorbance spectroscopy with unpolarized light: Part II. Experimental evaluation and development of a protocol for quantitative analysis of mineral IR spectra[J]. *American Mineralogist*, 93(5~6): 765~778.
- Lei Nengzhong, Xia Qunke, Hao Yantao, *et al.* 2009. Water contents in peridotite xenoliths from Subei basin, Eastern China[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 34: 75~88 (in Chinese with English abstract).
- 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, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chem. Geol.*, 257: 34~43.
- Masyuk S S and Langer K. 2004. Hydroxyl in olivines from mantle xenoliths in kimberlites of the Siberian platform[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 147: 413~437.
- Menzies M A, Fan W M and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean Craton, China[J]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 76(1): 71~81.
- Menzies M, Xu Y G, Zhang H F, *et al.* 2007. Integration of geology, geophysics and geochemistry: a key to understanding the North China Craton[J]. *Lithos*, 96: 1~21.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2007. Migration of the Tibetan Cenozoic potassic volcanism and its transition to Eastern Basaltic Province: implications for crustal and mantle flow[J]. *Geoscience*, 21(2): 255~264 (in Chinese with English abstract).
- Niu Yaoling. 2005. Generation and evolution of basaltic magmas: some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic-Cenozoic basaltic volcanism in Eastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 9~46 (in Chinese with English abstract).
- Norman M D. 1998. Melting and metasomatism in the continental lithosphere: Laser ablation ICP-MS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 130(3/4): 240~255.
- Novella D, Frost D J, Hauri E H, *et al.* 2014. The distribution of H<sub>2</sub>O between silicate melt and nominally anhydrous peridotite and the on-

- set of hydrous melting in the deep upper mantle[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 400: 1~13.
- O'Leary J A, Gaetani G A and Hauri E H. 2010. The effect of tetrahedral  $Al^{3+}$  on the partitioning of water between clinopyroxene and silicate melt[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 297: 111~120.
- 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.
- Peslier A H, Bizimis M and Matney M. 2015. Water disequilibrium in olivines from Hawaiian peridotites: Recent metasomatism, H diffusion and magma ascent rates[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 154: 98~117.
- Peslier A H and 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[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 242: 302~319.
- Peslier A H, Luhr J F and Post J. 2002. Low water contents in pyroxenes from spinel-peridotites of the oxidized, sub-arc mantle wedge [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 201: 69~86.
- Peslier A H, Woodland A B and Wolff J A. 2008. Fast kimberlite ascent estimated from hydrogen diffusion profiles in xenolithic mantle olivines from southern Africa[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 72: 2711~2722.
- Plank T, Kelley K A, Zimmer M M, *et al.* 2013. Why do mafic magmas contain ~4 wt% water on average? [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 364: 168~179.
- Rossmann G R. 1996. Studies of OH in nominally anhydrous minerals [J]. *Phys. Chem. Mineral.*, 23: 299~304.
- Salters V J M and Stracke A. 2004. Composition of the depleted mantle [J]. *Geochem. Geophys Geosyst.*, 5: 469~484.
- Shu Xiaoxin. 1995. The genesis of cpx-peridotitic xenoliths in basanite of Maguan, Yunnan Province[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 14(1): 47~51(in Chinese with English abstract).
- Smyth J R, Frost D J, Nestola F, *et al.* 2006. Olivine hydration in the deep upper mantle: Effects of temperature and silica activity[J]. *Geophys Res. Lett.*, 33: L15301, doi: 10.1029/2006GL026194.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society*, 42(1): 313~345.
- Sun W, Ding X, Hu Y H, *et al.* 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 262: 533~542.
- Tang Yanjie, Zhang Hongfu, Ying Jifeng, *et al.* 2011. Indicative significance of olivine in mantle peridotites[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(1): 24~33(in Chinese with English abstract).
- Wang Rong and Zhang Baomin. 2011a. Water in peridotite xenoliths from Niutoushan, Longhai, Fujian[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 36(4): 635~642(in Chinese with English abstract).
- Wang Rong and Zhang Baomin. 2011b. Water in peridotite xenoliths from South China[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(10): 1511~1522.
- Wei Qirang and Wang Jianghai. 2004. Equilibrium P-T conditions of spinel-lherzolite xenoliths and their significance in the Maguan area, Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(3): 278~284(in Chinese with English abstract).
- Wei Qirong, Wang Jianghai and Xie Guanghong. 2003. The Chemical composition characteristics of clinopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in Maguan area, Eastern Tibet and its significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 87~92(in Chinese with English abstract).
- Williams Q and Hemley R J. 2001. Hydrogen in the deep earth[J]. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 29: 365~418.
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, *et al.* 2003. Discussions on the lithospheric thinning in Eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51~60(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, *et al.* 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233: 103~119.
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, *et al.* 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145~1174(in Chinese with English abstract).
- Xia Ping and Xu Yigang. 2006. Mantle-derived xenoliths in Maguan Cenozoic potassic basalt, Southeast Yunnan and its bearing on lithospheric composition and dynamics[J]. *Geochimica*, 35(1): 27~40(in Chinese with English abstract).
- Xia Qunke, Chen Daogong, Guo Libe, *et al.* 2000. Water in peridotite xenoliths from Nushan and Panshishan: FTIR study[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 219~225(in Chinese with English abstract).
- Xia Qunke, Xing Lingbo, Feng Min, *et al.* 2010. Water content and element geochemistry of peridotite xenoliths hosted by Early-Jurassic basalt in Ningyuan, Hunan Province[J]. *Acta Petrol. Mineral.*,



- 29(2): 113~124(in Chinese with English abstract).
- Xia Q K and Hao Y T. 2013. The distribution of water in the continental lithospheric mantle and its implications for the stability of continents[J]. Chinese Science Bulletin, 58(32): 3 879~3 889.
- Xia Q K, Hao Y T, Li P, *et al.* 2010. Low water content of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern part of the North China Craton[J]. J. Geophys Res., 115: B07207, doi: 10. 1029/2009JB006694.
- Xia Q K, Hao Y T, Liu S C, *et al.* 2013. Water contents of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the western part of the North China Craton: Peridotite xenolith constraints[J]. Gondwana Research, 23(1): 108~118.
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism[J]. Physics and Chemistry of the Earth(A), 26: 747~757.
- Yamamoto J, Ando J I, Kagi H, *et al.* 2008. In situ strength measurements on natural upper-mantle minerals[J]. Phys. Chem. Miner., 35: 249~257.
- Yang Guicai, Yang Xiaozhi, Hao Yantao, *et al.* 2012. Water content difference between continental lower crust and lithospheric mantle: granulite and peridotite xenoliths hosted in basalts from Junan, Shandong Province[J]. Acta Petrol. Mineral., 31(5): 691~700 (in Chinese with English abstract).
- Yang X Z, Xia Q K, Deloule E, *et al.* 2008. Water in minerals of continental lithospheric mantle and overlying lower crust: A comparative study of peridotite and granulite xenoliths from the North China Craton[J]. Chem. Geol., 256: 33~45.
- Yang Xiaozhi, Xia Qunke, Yang Yan, *et al.* 2007. Water in continental lower crust and lithospheric mantle: A FTIR study from xenoliths[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 37(8): 964~973(in Chinese with English abstract).
- Yoshino T and Katsura T. 2013. Electrical conductivity of mantle minerals: Role of water in conductivity anomalies[J]. Annu. Rev. Earth Planet Sci., 41: 605~628.
- Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Zeng Pusheng, *et al.* 2006. A Study on the mantle xenoliths in the Cenozoic volcanic rocks from Maguan area, Yunnan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 621~630 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuming and Wang Fangzheng. 2002. Basalt's action on research geosphere deep-course and structural setting[J]. Advance in Earth Sciences, 17(5): 685~692(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhibin, Li Chaoyang, Tu Guangchi, *et al.* 2006. Geotectonic evolution background and ore-forming process of Pb-Zn deposits in Chuan-Di-an-Qian area of Southwest China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 30(3): 343~354(in Chinese with English abstract).
- Zhao Qichao, Xia Qunke, Liu Shaochen, *et al.* 2015. Water content and element geochemistry of peridotite xenoliths hosted by Cenozoic basalt in Longgang and Wangqing, Jilin Province[J]. Earth Science Frontiers, 22(1): 360~373(in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, O'Reilly S Y, *et al.* 2001. Trace-element of Tuoyun clinopyroxene: implication for the deep processes of lithospheric mantle beneath the Tianshan, west China[J]. Chinese Science Bulletin, 46(6): 497~502(in Chinese).
- Zhu Beibei, Wang Qin, Wang Liangshu, *et al.* 2009. Water content of peridotite xenoliths from Cenozoic basalt in Yangyuan, Hebei Province[J]. Geological Journal of China Universities, 15: 263~272(in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, *et al.* 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. Science China Earth Sciences, 54: 789~797.
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, *et al.* 2012. Destruction of the North China Craton[J]. Science China Earth Sciences, 55(10): 1 565~1 587.

## 附中文参考文献

- 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.
- 郝艳涛, 夏群科, 杨晓志. 2007. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 26(2): 130~140.
- 黄行凯. 2012. 滇东南马关和屏边地区新生代玄武岩和地幔包体的岩石地球化学特征及深部动力学意义[D]. 北京: 中国地质大学.
- 黄行凯, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2011. 云南马关地区岩石圈地幔组成和年龄: 地幔橄榄岩包体的 Re-Os 同位素限制[J]. 岩石学报, 27(9): 2 646~2 654.
- 黄行凯, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2013. 滇东南马关和屏边地区新生代玄武岩地球化学特征及深部动力学意义[J]. 岩石学报, 29(4): 1 325~1 337.
- 雷能忠, 夏群科, 郝艳涛, 等. 2009. 苏北盆地新生代玄武岩中橄榄岩包体的含水性[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 34: 75~88.

- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 2007. 青藏新生代钾质火山活动的时空迁移及向东部玄武岩省的过渡: 壳幔深部物质流的暗示[J]. 现代地质, 21(2): 255~264.
- 牛耀龄. 2005. 玄武岩浆起源和演化的一些基本概念以及对东部中-新生代基性火山岩成因的新思路[J]. 高校地质学报, 11(1): 9~46.
- 舒小辛. 1995. 云南马关地区碧玄岩中单辉橄榄岩包体的成因[J]. 岩石矿物学杂志, 14(1): 47~51.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰, 等. 2011. 地幔橄榄岩中橄榄石的指示意义[J]. 地球科学与环境学报, 33(1): 24~33.
- 王蓉, 张保民. 2011a. 福建龙海牛头山新生代玄武岩橄榄岩包体的水[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 36(4): 635~642.
- 王蓉, 张保民. 2011b. 华南地区新生代玄武岩中橄榄岩包体的含水性[J]. 中国科学: 地球科学, 41(6): 832~844.
- 魏启荣, 王江海. 2004. 云南马关尖晶石相二辉橄榄岩包体的平衡温压条件及其指示意义[J]. 矿物学报, 24(3): 278~284.
- 魏启荣, 王江海, 解广轰. 2003. 青藏东缘马关尖晶石二辉橄榄岩包体中单斜辉石的成分特征及其意义[J]. 地学前缘, 10(3): 87~92.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 10(3): 51~60.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145~1174.
- 夏萍, 徐义刚. 2006. 滇东南马关地区新生代钾质玄武岩中幔源包体研究: 深部物质组成与动力学过程探讨[J]. 地球化学, 35(1): 27~40.
- 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.
- 夏群科, 郝艳涛. 2013. 大陆岩石圈地幔中水的分布和大陆稳定性[J]. 科学通报, 58(34): 3489~3500.
- 夏群科, 邢凌波, 冯敏, 等. 2010. 湖南宁远早侏罗世玄武岩中橄榄岩包体的含水性及元素地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 29(2): 113~124.
- 杨贵才, 杨晓志, 郝艳涛, 等. 2012. 大陆下地壳和岩石圈地幔含水性的差异——山东莒南玄武岩中深源包体的初步观察[J]. 岩石矿物学杂志, 31(5): 691~700.
- 杨晓志, 夏群科, 杨燕, 等. 2007. 大陆下地壳和岩石圈地幔中的水: 基于捕虏体的红外光谱分析[J]. 中国科学技术大学学报, 37(8): 964~973.
- 喻学惠, 莫宣学, 曾普胜, 等. 2006. 云南马关地区新生代碧玄岩中地幔包体研究[J]. 岩石学报, 22(3): 621~630.
- 张树明, 王方正. 2002. 玄武岩在研究岩石圈深部过程及构造背景中的应用[J]. 地球科学进展, 17(5): 685~692.
- 张志斌, 李朝阳, 涂光焱, 等. 2006. 川、滇、黔接壤地区铅锌矿床产出的大地构造演化背景及成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 30(3): 343~354.
- 赵起超, 夏群科, 刘少辰, 等. 2015. 吉林汪清和龙岗新生代岩石圈地幔的含水性及元素地球化学特征[J]. 地学前缘, 22(1): 360~373.
- 郑建平, 陆凤香, O'Reilly S Y, 等. 2001. 新疆托云地幔单斜辉石微量元素与西南天山岩石圈深部过程[J]. 科学通报, 46(6): 497~502.
- 朱蓓蓓, 王勤, 王良书, 等. 2009. 河北阳原新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体的含水量研究[J]. 高校地质学报, 15: 263~272.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583~592.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 2012. 华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1135~1159.