

doi:10.3799/dqkx.2011.065

福建龙海牛头山新生代玄武岩橄榄岩包体的水

王 蓉^{1,2}, 张保民²

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 对福建龙海牛头山新生代玄武岩中橄榄岩包体进行了傅利叶变换红外光谱(FTIR)分析, 结果显示, 二辉橄榄岩中的辉石包体含有结构水, 均以 OH 的形式存在, 结构水含量分别如下: 单斜辉石为 $(151 \sim 845) \times 10^{-6}$, 斜方辉石为 $(40 \sim 710) \times 10^{-6}$, 全岩为 $(25 \sim 90) \times 10^{-6}$. 无论是辉石中的水含量还是全岩中的水含量, 福建牛头山地区均高于华北克拉通的安徽女山、河北汉诺坝和苏北盆地, 而与同是华北克拉通的河北阳原地区水含量相当. 实验证明辉石是牛头山地区上地幔重要的水储库. 初步推断福建牛头山经历了洋壳俯冲作用及底侵作用.

关键词: 橄榄岩; 红外光谱; 岩石学.

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2011)04-0635-08

收稿日期: 2010-11-22

Water in Peridotite Xenoliths from Niutoushan, Longhai, Fujian

WANG Rong^{1,2}, ZHANG Bao-min²

1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The analysis of infrared spectrum of pyroxene in lherzolite from peridotite xenoliths in Niutoushan, Longhai, Fujian, shows that there is water hosted in the pyroxene which exists by OH hydroxyl. The water content of clinopyroxene is $(151 \sim 845) \times 10^{-6}$, of orthopyroxene is $(40 \sim 710) \times 10^{-6}$, and of the whole rock $(25 \sim 90) \times 10^{-6}$ respectively. The water contents, both of pyroxene and of the whole rock, are higher than those in Nühan, Hannuoba and Subei basin, but are almost the same as those in Yangyuan. It demonstrates that pyroxene is the important reservoir in the upper mantle in Niutoushan. It may have experienced oceanic crust subduction and underplating in investigation locality.

Key words: peridotite xenoliths; infrared spectroscopy; petrology.

0 引言

牛头山玄武岩为福建沿海玄武岩带的一部分, 属新第三纪佛昙群上段(林友坤, 1992). 深源包体产于牛头山中心式火山构造内. 从 20 世纪 70 年代开始, 地质学家开始关注福建龙海牛头山火山岩地质情况, 对各期次玄武岩及包体的岩石化学和矿物成分(齐进英和张秀琪, 1985; 林友坤, 1992)等作了非常详尽的报道; 对于岩石中稀土元素和过渡族元素(周新民, 1981; 齐进英和张秀琪, 1985; 于学元, 1990; 夏佳, 1995)以及硫化物包体(岳可芬等, 2005)

亦有研究, 而对包体中结构水的研究鲜有报道.

牛头山表面覆盖大面积的新生代碱性玄武岩, 二辉橄榄岩碎块被玄武岩岩浆喷发快速携带至地表, 有效地保留了源区的一些信息. 包体中的一些“名义无水矿物”, 如斜方辉石、单斜辉石、橄榄石、石榴石等, 在板块俯冲过程的壳幔作用下, 蕴含 OH. 已有关于中国东部沿海地区大量新生代玄武岩含水性研究的报道, 如安徽女山(夏群科等, 1998, 2000; 郝艳涛等, 2006; Yang *et al.*, 2008)、河北汉诺坝(郭立鹤等, 1998; 夏群科等, 1999; 郝艳涛等, 2007)、苏北盆地(雷能忠等, 2009)、河北阳原(朱蓓蓓等, 2009)等地, 而关于福建省内新生代玄武岩的含水性

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40372027, 40872040).

作者简介: 王蓉(1976—), 女, 博士, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学专业研究. E-mail: joangemm@yahoo.com.cn

报道迄今为止还没有.

本文通过对福建龙海牛头山新生代玄武岩中的尖晶石二辉橄榄岩包体名义无水矿物结构水含量的分析,对福建牛头山上地幔中水的演化以及相关的地质作用进行了初步探讨.

1 地质背景和样品

福建省广泛出露新生代火山岩,它们大体上分布于北北东向的 3 个断裂带上,自东向西分别是闽东的乳山一流会—佛昙断裂带、闽中的福鼎—闽清—永定断裂带和闽西的松溪—长断裂带. 研究区龙海牛头山位于闽东断裂带中带,其 K、Ar 年龄测试为 16.7 ± 0.56 Ma(陈道公和张剑波,1992),属第三纪中新世产物. 研究对象为尖晶石二辉橄榄岩,主要由橄榄石(75%左右)、单斜辉石、斜方辉石、尖晶石(1%左右)组成. 橄榄岩包体个头不大,一般为次圆状和棱角状,直径 6 cm 左右,大者直径达 15 cm,总体呈橄榄绿,为原始粗粒结构. 样品均为“干”包体,没有观察到含水矿物.

2 分析方法

2.1 电子探针(EMP)分析

中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室对矿物成分进行了电子探针分析,仪器型号为 JCXA-733,加速电压 15 kV,电子束流 20 nA,束斑直径 2 μ m. 每个样品的每种矿物均经过了 5~8 个颗粒分析.

2.2 显微红外光谱(Micro-FTIR)分析

将包体切片,双面抛光,获得两面平行的晶片,厚度在 0.1~1.0 mm,用酒精浸泡后用水冲洗干净薄片上的树胶,将样品置于 110 $^{\circ}$ C 的烘箱中烘干. FTIR 分析使用 continu μ m 显微镜的 Nicolet 5700 型傅立叶变换显微红外光谱仪,探测器为液氮冷却的 MCT-A. IR 光谱仪分辨率为 4 cm^{-1} ,测量范围 2 000~4 000 cm^{-1} ,扫描 128 次,未采用偏光化测量,样品被测区经显微检查后发现无流体包裹体和其他杂质,实验在室温下进行,相对湿度 $\leq 50\%$. 样品厚度使用微米千分尺(精度 0.02)测量. 红外光谱的收集与分析使用 Thermo Nicolet 公司提供的 OMNIC7. 1a 软件,光谱的收集过程中使用 H_2O 校正扣除空气中的水分影响. 所有实验均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.

3 结果

3.1 主要元素

对红外光谱测试的样品都进行了多颗粒的测定,对同一矿物来说,无论是不同颗粒之间,还是在同一样品内部,电子探针结果显示,同种矿物中主要元素组成是均一的,单矿物电子探针分析的平均值列于表 1. 单斜辉石的主要成分为含铬的透辉石(Cpx,下同),其中 $\text{Mg}^{\#}$ 值($=100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$)为 90.22~92.16;斜方辉石主要成分为顽火辉石(Opx,下同),其 $\text{Mg}^{\#}$ 值为 89.69~90.21,这和对前人对本区的分析结果基本一致(林友坤,1992;夏佳,1995). 辉石主要元素之间的相关性如图 1,单斜辉石与斜方辉石中元素具有相似的相关性,即 $\text{Mg}^{\#}$ 与 Al、Ti 等主要元素大致呈现负相关,而与 Ca 呈正相关. 由于样品仅有 5 个,投图点有些分散,故未呈现明显相关性. 元素间的相关性表明牛头山橄榄岩包体是同一源区经历了不同程度熔融的残余.

3.2 结构水的赋存状态

在典型的 OH 红外吸收区域内(3 700~2 800 cm^{-1}),所有分析的橄榄石都没有明显的吸收谱带,这表明橄榄石或者不含结构水,或者结构水含量低于检出限(H_2O 的质量分数约为 5×10^{-6}). 所有的透辉石和顽火辉石都出现了明显的吸收谱带. 由图 2 看到,透辉石有 4 组吸收谱带,其位置分别为 3 633, 3 600, 3 514, 3 461 cm^{-1} ,其中 3 633 和 3 514 cm^{-1} 的峰窄而尖锐,3 600 和 3 461 cm^{-1} 的吸收谱带呈弱肩状,相对强度最强为 3 580 cm^{-1} ,且随波数降低呈逐渐减弱的趋势. 顽火辉石有 6 组吸收谱带,其位置分别为 3 580, 3 518, 3 408, 3 302, 3 200, 3 053 cm^{-1} . 相对强度上,只有 3 580, 3 518 cm^{-1} 最强,其他为中等强度;形态上,3 580, 3 518 cm^{-1} 较窄而尖锐,其他谱带宽而圆滑.

上述特征与中国东部其他地区(夏群科,1998, 2000;郝艳涛等,2006,2007;Yang *et al.*, 2008;雷能忠等,2009;朱蓓蓓等,2009)如河北汉诺坝、安徽女山、苏北盆地、河北阳原等地的橄榄岩包体切片中透辉石 IR 光谱一致;与世界上其他地区(Skogby and Rossman, 1989; Skogby *et al.*, 1990; Bell and Rossman, 1992; Ingrin and Skogby, 2000; Peslier *et al.*, 2002; Grant *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2008; Bonadiman *et al.*, 2009; Gose *et al.*, 2009)幔源辉

表 1 包体中单斜辉石、斜方辉石的电子探针分析

Table 1 Electron microprobe of Cpx and Opx

	Cpx(%)					Opx(%)				
	FLN1	FLN2	FLN3	FLN4	FLN5	FLN1	FLN2	FLN3	FLN4	FLN5
SiO ₂	50.50	50.58	50.34	50.47	50.36	53.34	54.04	53.96	53.78	53.69
TiO ₂	0.39	0.36	0.61	0.45	0.38	0.03	0.03	0.12	0.06	0.05
Al ₂ O ₃	6.12	6.04	4.35	5.50	5.91	4.66	4.44	4.95	4.68	4.75
FeO	2.98	3.03	2.75	2.92	2.82	6.64	6.84	6.79	6.76	6.82
MnO	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	0.03	0.01
MgO	15.08	15.90	17.21	16.06	16.31	33.41	33.87	33.84	33.70	34.02
CaO	21.90	21.43	23.18	22.17	21.06	0.53	0.58	0.55	0.55	0.56
Na ₂ O	1.58	1.67	0.34	1.20	1.64	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03
Cr ₂ O ₃	0.92	0.73	0.76	0.80	0.78	0.22	0.28	0.29	0.27	0.26
Total	99.46	99.74	99.55	99.59	99.26	98.87	100.21	100.54	99.87	100.19
Si	1.86	1.85	1.85	1.85	1.85	1.87	1.87	1.86	1.87	1.86
Ti	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.27	0.26	0.19	0.24	0.26	0.19	0.18	0.20	0.19	0.19
Fe	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.83	0.87	0.94	0.88	0.89	1.75	1.75	1.74	1.75	1.76
Ca	0.86	0.84	0.91	0.87	0.83	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Na	0.11	0.12	0.02	0.09	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Total	4.06	4.07	4.05	4.06	4.07	4.03	4.04	4.03	4.04	4.04
Mg [#]	90.22	90.63	92.16	90.72	91.16	90.21	89.74	89.69	89.74	89.89

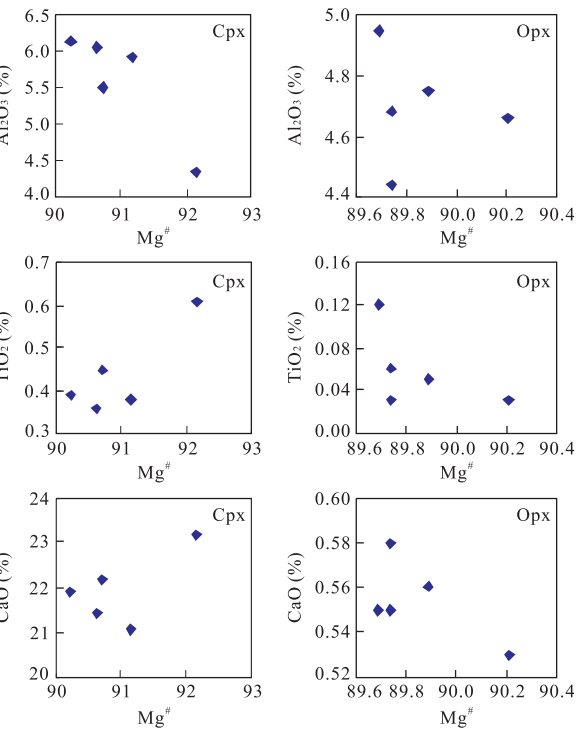


图 1 辉石中 Mg[#] 与各元素相关关系

Fig. 1 Correlations between major elements and Mg[#] of pyroxene

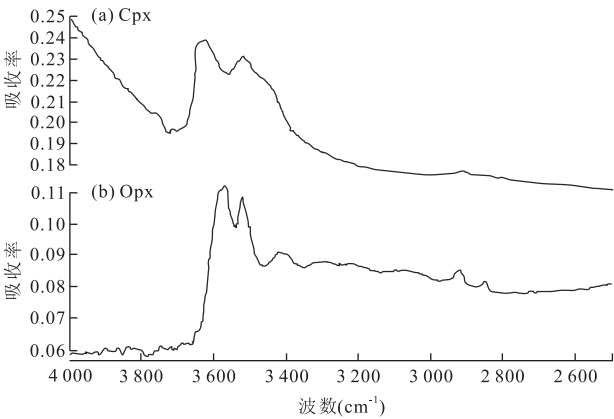


图 2 单斜辉石(a)和斜方辉石(b)代表性 IR 光谱

Fig. 2 The representative infrared spectrum of Cpx (a) and Opx (b)

光谱完全一样. 斜方辉石和 Bell *et al.* (1995) 文章中列出的顽火辉石方向的 5 组光谱特征一致, 与 skogby *et al.* (1990) 文章中列出的 3 组光谱特征也一致.

3.3 结构水含量

矿物结构水含量的计算采用 Beer-Lambert 公式:

$$\Delta = I \times c \times t \times \gamma,$$

式中: Δ 是吸收强度, 用扣除基线之后 OH 吸收峰的

石的情况也一致, 特别是位置上单斜辉石和 skogby *et al.* (1990) 文章中列出的印度产透辉石的偏振 IR

积分面积(cm^{-1}) (单斜辉石 $3\,800\sim3\,000\text{ cm}^{-1}$, 斜方辉石 $3\,750\sim2\,800\text{ cm}^{-1}$) 表示, I 是矿物的吸收系数, c 是矿物的含水量(10^{-6}), t 代表薄片中的颗粒厚度(cm), γ 是 Paterson(1982) 引入的各向异性因子. 由于矿物各个方向的吸收强度不同, 对于颗粒未定向和非偏振光的情况, $\gamma=1/3$. 矿物的吸收系数 I (Bell *et al.*, 1995) 分别为: 单斜辉石 $7.09\times10^{-6}\text{ cm}^2$, 斜方辉石 $14.84\times10^{-6}\text{ cm}^2$. 同一样品厚度均匀(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(>20 个点, 覆盖整个薄片)的平均值.

由于使用非偏振光分析, 为了减小误差, 每个橄榄岩中的单斜辉石和斜方辉石都至少测量了 9~18 个颗粒, 取其平均值作为该样品中辉石的水含量 (Kovacs *et al.*, 2008). 根据上述公式计算的结构水含量估计误差主要来自以下 4 个方面: (1) 基线校准; (2) 面积积分; (3) 薄片厚度; (4) 样品化学成分. 单个颗粒结构水含量大于 10×10^{-6} 的样品, 误差在 $10\%\sim20\%$; 小于 10×10^{-6} 的样品, 误差在 $10\%\sim50\%$. 还有, 切片方向不同, 也造成一定误差.

牛头山橄榄岩的单斜辉石结构水含量为 $151\sim845$, 顽火辉石为 $40\sim710$ (表 2). 根据每个包体岩石的矿物组合和辉石矿物的体积百分比计算出各包体全岩结构水含量. 需指出的是: (1) 此全岩水含量为透辉石和顽火辉石的结构水含量, 并不包括含水矿物的结构水, 如角闪石等; (2) 因透辉石、顽火辉石、橄榄石的密度相差不大 (约 $3.3\sim3.6\text{ g/cm}^3$), 故用体积分数代替重量分数, 误差较小; (3) 橄榄石中虽未测出 OH 特征峰, 但实验显示, $D_{\text{Cpx/Ol}}$ 的值为 $10\sim40$ (Koga *et al.*, 2003; Aubaud *et al.*, 2004; Hauri *et al.*, 2006; Tenner *et al.*, 2009), 故取单斜辉石和橄榄石的水含量比值为 40 来估计橄榄石的水含量. 牛头山橄榄岩全岩水含量为 $25\sim90$ (表 2). 样品中 FLN4 的结构水含量不论是单斜辉石、斜方辉

石还是全岩水含量, 较其余 4 个样品有些异常高, 推测是否经过后期蚀变造成包体结构水含量的异常, 因无明显证据, 故仍置于有效结果.

4 讨论

4.1 橄榄岩中的水

导致包体间结构水含量不均一的原因有可能是以下 3 种:

4.1.1 化学成分 前人的研究中表明, 辉石成分的差异会导致吸收谱带的差异 (夏群科等, 1998), 主要特征峰的位置与 $\text{Mg}^\#$ 和 Al 含量的高低有关, 高 Al ($\text{Al}_2\text{O}_3>10\%$) (Smyth and Bell, 1991)、低 $\text{Mg}^\#$ 的样品多以 $3\,470$ 峰为特征峰, 而低 Al ($\text{Al}_2\text{O}_3<5\%$)、高 $\text{Mg}^\#$ 的样品多以 $3\,620$ 峰为主要特征峰 (Skogby and Rossman, 1989; 夏群科等, 1999, 2000). 其中电子探针分析结果表明, 岩石中同种矿物主要元素组成是均一的, 不同样品同一矿物之间主要元素也差别不大, 故辉石矿物中结构水含量的差异变化不是由化学成分不同引起的.

4.1.2 构造环境 不同地区、不同岩体中名义无水矿物的结构水储量有明显差别, 即使是同一岩性的岩体, 所处地区不同 (构造环境不同), 结构水含量也显著不同 (Skogby *et al.*, 1990); 但对于同一采样区, 各样品处于同一构造环境之下, 故构造环境对结构水含量的影响甚微.

4.1.3 板块俯冲 在板块俯冲过程中名义无水矿物是将地表水携带至地球深部的最重要的载体, 而在板块折返途中由于压力降低引起水的溶解度减少, 矿物中的水又可能逃逸 (Smyth and Bell, 1991; 章军锋等, 2000; 郑永飞等, 2002). 板块俯冲过程中析出流体的交代过程是使源区富水的一个重要过程.

那所得到的结果到底是反映了地幔源区的原始值呢, 还是在动力作用过程中经历了扩散作用或与寄主岩浆发生了反应? 决定因素有 2 个: 一个是寄主岩浆上升速率, 一个是 H 在包体中和寄主岩浆间的动力学交换. 第一个因素显然有一定的影响. 资料显示, H 扩散在 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 的毫米级别的橄榄石和辉石中达到完全平衡大约只需几个小时, 故而随着岩浆的喷涌, 压力和温度的骤降, 造成了 H 的扩散. 而 H 与寄主岩浆间的动力学交换, 更是影响因素众多, 包括周围的温压条件、水含量、氧逸度以及矿物本身的反应速度等. 由图 3, 包体中 Cpx 与 Opx

表 2 福建牛头山橄榄岩中辉石结构水含量
Table 2 Water content of pyroxene of peridotite xenoliths from Niutoushan, Fujian

样品号	体积分数 (%)			水含量 (10^{-6})		
	Cpx	Opx	Ol	Cpx	Opx	WR
FLN1	7	16	77	376	75	49
FLN2	6	18	76	404	189	68
FLN3	5	13	82	239	87	29
FLN4	4	5	91	845	710	90
FLN5	10	16	74	151	40	25

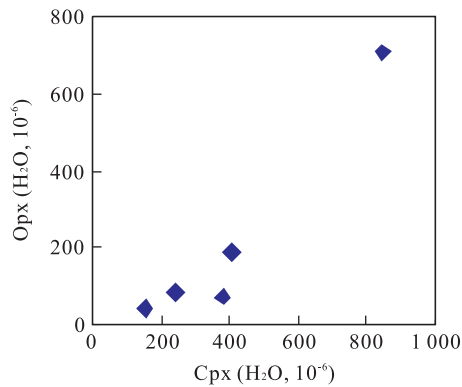


图 3 包体中单斜辉石与斜方辉石结构水含量相关关系

Fig. 3 Correlations of the water content between Cpx and Opx

结构水含量相关图表明,H 在单斜辉石和斜方辉石达到了平衡,且水含量与各元素间具有良好的相关性,说明所测结果反映的是地幔源区的信息,从而说明这些包体是上地幔部分熔融后的残余.

已有的资料表明,原始地幔尖晶石二辉橄榄岩全岩水含量为 290×10^{-6} (Bell and Rossman, 1992). 所得到的福建牛头山的全岩水含量为 $(25 \sim 90) \times 10^{-6}$, 远远低于原始值. 福建牛头山前期地质研究结果表明,该区历史上经历洋壳俯冲为大概率事件. 假如源区经历过洋壳的俯冲,那后期又经历何种构造动力作用,使该区贫水呢? 由牛头山构造地球动力学背景来看,本研究区位于中国东部华南板块,而中国东部中—新生代岩石圈在显生宙时期大规模减薄,下地壳发生岩浆底侵、拆沉等地质过程(翟明国等, 2005). 而最有可能造成地幔内水含量偏低的情况,有可能在底侵过程中,熔融岩浆发生严重去气作用(夏群科等, 2001),水以气体 H_2O 的形式逃逸,导致水含量逐渐向低值演化,从而导致偏离正常地幔值的水含量.

关于华南地区构造—岩浆—成矿地球动力学背景有 3 种观点:(1)与古太平洋板块俯冲作用有关;(2)与早中生代时期印度支那同华南碰撞造成的大陆裂解和盆地形成有关;(3)与扬子和华夏板块之间的阿尔卑斯型碰撞造山有关. 本文支持第一种观点,即本区曾发生古太平洋板块俯冲作用及底侵作用.

4.2 与东部沿海其他地区橄榄岩含水性对比

4.2.1 OH 的特征峰 三地包体中单斜辉石、斜方辉石的 Al 含量、Mg[#] 值见表 3. 从表 3 中可以看出,不管是单斜辉石还是斜方辉石中,安徽女山的 Al 含量明显高于河北汉诺坝、苏北盆地、河北阳原以及福建牛头山,而河北阳原和福建牛头山的 Al 含量

表 3 安徽女山、河北汉诺坝、苏北盆地、河北阳原和福建牛头山 Cpx、Opx Al 含量与 Mg[#] 值对比

Table 3 Comparison of Al and Mg[#] among Nüshan, Hannuoba, Subei basin, Yangyuan, Niutoushan

地区	Cpx		Opx	
	Al ₂ O ₃ (%)	Mg [#]	Al ₂ O ₃ (%)	Mg [#]
安徽女山	6.12~8.07	87.40~90.90	3.10~6.19	88.10~91.40
河北汉诺坝	2.65~6.44	90.45~92.39	2.72~4.15	89.26~91.40
苏北盆地	2.11~7.94	89.06~93.72	1.77~6.33	89.77~92.34
河北阳原	3.82~7.39	89.97~91.87	3.00~4.64	90.71~91.87
福建牛头山	4.35~6.12	90.22~92.16	4.44~4.95	89.69~90.21

相近;安徽女山的 Mg[#] 值,同样在两种辉石中均低于其他四地,而在其他四地之间则相差甚微. 由主要元素成分的差异(夏群科等, 1998),引起 OH 特征峰值略有不同.

各地 OH 特征峰位见表 4. 从表 4 中可以看出,各地以透辉石为主要成分的单斜辉石的特征峰值略有差异:(1)第一组吸收谱带值 $3\,630 \sim 3\,620\text{ cm}^{-1}$, 此组为单斜辉石主特征峰值,安徽女山、河北汉诺坝、苏北盆地一致,均为 $3\,620\text{ cm}^{-1}$,而河北阳原和福建牛头山两地相近,分别为 $3\,634$ 和 $3\,633\text{ cm}^{-1}$, 相比前者蓝移了 14 和 13 cm^{-1} ;(2)第二组吸收谱带值 $3\,550 \sim 3\,530\text{ cm}^{-1}$, 这组吸收谱带位各不相同,安徽女山、苏北盆地谱带相同,其 $3\,520\text{ cm}^{-1}$ 特征峰相比红移了 10 cm^{-1} ,而福建牛头山则蓝移了 10 cm^{-1} ,汉诺坝的则正位于吸收谱带值范围内;(3)第三组吸收谱带值 $3\,470 \sim 3\,450\text{ cm}^{-1}$,安徽女山、苏北盆地的峰值红移了 10 cm^{-1} ,河北汉诺坝和福建牛头山的峰值则正处于峰值范围内.

相比较而言,除河北阳原外,其余四地顽火辉石的差异性相对较小,主特征吸收谱带值均为 $3\,580\text{ cm}^{-1}$;次特征峰值,福建牛头山相对前两者均红移 2 cm^{-1} ,河北阳原的吸收谱带均呈现不同程度的蓝移.

对比而言,化学成分的差异对单斜辉石的吸收谱带影响更胜于斜方辉石.

4.2.2 结构水含量 安徽女山、河北汉诺坝、苏北盆地和河北阳原位于华北克拉通地带,而福建牛头山则位于华南板块,但五地构造环境相同,同属于第四纪的火山岩浆喷溢,在境内出露大面积的溢流新生代碱性玄武岩,并携带大量二辉橄榄岩包体,而其包体中的结构水含量不尽相同. 位于华北克拉通的安徽女山、河北汉诺坝以及苏北盆地,其显著的特点是水含量偏低:绝大部分橄榄岩中单斜辉石的水含量 $< 200 \times 10^{-6}$;斜方辉石 $< 80 \times 10^{-6}$;全岩 $< 30 \times$

表 4 安徽女山、河北汉诺坝、苏北盆地、河北阳原和福建牛头山 Cpx,Opx 结构 OH 的特征吸收谱带

Table 4 Absorption bands of OH in Cpx and Opx at Nūshan, Hannuoba, Subei basin, Yangyuan, Niutoushan

地区	IR 光谱 OH 特征峰(cm^{-1})	
	Cpx	Opx
安徽女山	3 620\3 520\3 440 主特征峰 3 620	3 580\3 510\3 410\3 310 主特征峰 3 580
河北汉诺坝	3 620\3 540\3 460 主特征峰 3 620	3 580\3 510\3 410\3 290 主特征峰 3 580
苏北盆地	3 620\3 520\3 440 主特征峰 3 620	3 580\3 510\3 410\3 310 主特征峰 3 580
河北阳原	3 634\ 主特征峰 3 634	3 589\3 523\3 421 主特征峰 3 589
福建牛头山	3 633\3 600\3 514\3 461 主特征峰 3 633	3 580\3 518\3 408\ 3 302\3 200\3 053 主特征峰 3 580

10^{-6} (Xia *et al.*, 2010), 而同样位于华北克拉通的河北阳原, 其水含量明显高于其余三地, 单斜辉石水含量 $> 200 \times 10^{-6}$, 斜方辉石 $> 100 \times 10^{-6}$, 全岩 $> 49 \times 10^{-6}$, 而福建牛头山的水含量位于两者之间, 不管是单斜辉石, 斜方辉石还是全岩水含量, 均高于安徽女山、河北汉诺坝及苏北盆地, 而和河北阳原地区水含量相近. 华南板块海南、广州等地区(作者未发表数据)水含量则远高于华北克拉通地区水含量, 这在一定程度上说明华南板块比华北富水. 而福建牛头山虽属于华南板块, 其水含量远低于海南、广州等地, 对其贫水的原因, 有待进一步获取详细的数据来佐证.

综合来看, 通过和已发表的世界其他地区二辉橄榄岩的全岩含水量相比, 本区结构水含量的数据为进一步证实大陆岩石圈水含量的横向不均一性提供了有力证据.

需特别指出的是, 单斜辉石结构水含量明显高于斜方辉石, 这和华北克拉通 (Yang *et al.*, 2008; Xia *et al.*, 2010) 以及世界其他地区 (Bell and Rossman, 1992; Ingrin and Skogby, 2000; Peslier *et al.*, 2002; Grant *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2008; Bonadiman *et al.*, 2009; Gose *et al.*, 2009) 是一致的. 这可能和 H 结合进入矿物的交换反应能力有关, 除了外部条件(如温压)的影响外, 更多的是矿物自身晶格结构的影响.

5 结论

(1) 福建牛头山二辉橄榄岩包体中透辉石结构

水含量为 $(151 \sim 845) \times 10^{-6}$, 顽火辉石结构水含量为 $(40 \sim 710) \times 10^{-6}$, 全岩水含量为 $(25 \sim 90) \times 10^{-6}$. (2) 牛头山不论是辉石还是全岩水含量均高于安徽女山、河北汉诺坝以及苏北盆地, 而和河北阳原地区水含量相当. (3) 初步推断该地区经历了洋壳俯冲作用及底侵作用.

上述包体中辉石的结构水的特征对比, 证明辉石是福建牛头山上地幔重要的“水储库”, 为研究区上地幔提供了结构水含量的直接证据, 也为中国东部上地幔动力学和地球化学研究提供了新的参考资料, 具有重要的科学意义.

致谢: 感谢中国科技大学地球和空间科学系夏群科教授对文章的悉心指导. 感谢评审人的宝贵意见.

References

Aubaud, C., Hauri, E. H., Hirschmann, M. M., 2004. Hydrogen partition coefficients between nominally anhydrous minerals and basaltic melts, *Geophys. Res. Lett.*, 31(20): 20611. doi: 10.1029/2004GL021341

Bell, D. R., Ihinger, P. D., Rossman, G. R., 1995. Quantitative analysis of trace OH in garnet and pyroxene, *American Mineralogist*, 80: 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

Bonadiman, C., Hao, Y. T., Coltorti, M., et al., 2009. Water contents of pyroxenes in intraplate lithospheric mantle, *Eur. J. Mineral.*, 21(3): 637—647. doi: 10.1127/0935-1221/2009/0021-1935

Chen, D. G., Zhang, J. B., 1992. Nd, Sr, Pb isotopes and K-Ar age of basaltic rocks in Longhai and Mingxi, Fujian Province, *Acta Petrologica Sinica*, 8(4): 324—331 (in Chinese with English abstract).

Gose, J., Schmädicke, E., Beran, A., 2009. Water in enstatite from Mid-Atlantic Ridge peridotite: evidence for the water content of suboceanic mantle? *Geology*, 37(6), 543—546. doi: 10.1130/G25558A.1

Grant, K., Ingrin, J., Lorland J P, et al., 2007. Water partitioning between mantle minerals from peridotite xenoliths, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 154(1): 25—34. doi: 10.1007/s00410-006-0177-1

Guo, L. H., Lin, X. Y., Xie, M. Z., et al., 1998. Water in mantle-derived xenoliths from the Hannuoba basalt, *Acta Geologica Sinica*, 72(2): 138—143 (in Chinese with English abstract).

Hao, Y. T., Xia, Q. K., Yang, X. Z., 2007. Water in minerals

- of peridotite xenoliths of Hannuoba basalts, Hebei, China; micro-FTIR results. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(6): 130—140 (in Chinese with English abstract).
- Hao, Y. T., Xia, Q. K., Yang, X. Z., et al., 2006. Water in minerals of peridotite xenoliths from Cenozoic basalts in Nüshan volcano, SE China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1713—1722 (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 Planet. Sci. Lett.*, 248(3—4): 715—734. doi: 10. 1016/j. epsl. 2006. 06. 014
- Ingrin, J., Skogby, H., 2000. Hydrogen in nominally anhydrous upper mantle minerals: concentration levels and implications. *Eur. J. Mineral.*, 12(3): 543—570. doi: 10. 1127/0935—1221/2000/0012—0543
- Koga, K., Hauri, E., Hirschmann, M., et al., 2003. Hydrogen concentration analyses using SIMS and FTIR: comparison and calibration for nominally anhydrous minerals. *Geochem. Geophys. Geosys.*, 4(2): 1019. doi: 10. 1029/2002GC000378
- Kovacs, I., Hermann, J., O'Neill, 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. *Am. Mineral.*, 93: 765—778.
- Lei, N. Z., Xia, Q. K., Hao, Y. T., et al., 2009. Water contents in peridotite xenoliths from Subei basin, eastern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 75—88 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X. A., Lee, C. A. T., Peslier, A. H., et al., 2008. Water contents in mantle xenoliths from the Colorado Plateau and vicinity: implications for the mantle rheology and hydration-induced thinning of continental lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 113, B09210. doi: 10. 1029/2007JB005540
- Lin, Y. K., 1992. Cenozoic basalts and their volcanism in Tianma-Niutou Shan area, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 8(4): 376—385 (in Chinese with English abstract).
- Paterson, M. S., 1982. The determination of hydroxyl by infrared-absorption in quartz, silicate-glasses and similar materials. *Bull. Mineral.*, 105: 20—29.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, 201(1): 69—86. doi: 10. 1016/S0012—821X(02)00663—5
- Qi, J. Y., Zhang, X. Q., 1985. Geochemistry on basalts and their mantle inclusions from MT. Niutou, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 1(1): 75—87 (in Chinese with English abstract).
- Skogby, H., Bell, D. R., Rossman, G. R., 1990. Hydroxide in pyroxene: variations in the natural environment. *Am. Mineral.*, 75: 764—774.
- Skogby, H., Rossman, G. R., 1989. OH⁻ in pyroxene: an experimental study of incorporation mechanisms and stability. *American Mineralogist*, 74: 1059—1069.
- Smyth, J. R., Bell, D. R., 1991. In corporation of hydroxyl in upper-mantle clinopyroxenes. *Nature*, 351: 732—735. doi: 10. 1038/351732a0
- Tenner, T. J., Hirschmann, M. M., Withers, A. C., et al., 2009. Hydrogen partitioning between nominally anhydrous upper mantle minerals and melt between 3 and 5 GPa and applications to hydrous peridotite partial melting. *Chem. Geol.*, 262(1—2): 42—56. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2008. 12. 006
- Xia, J., 1995. Inclusions in basalt on Niutoushan district Longhai, Fujian. *Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institutem*, 34(3): 32—41 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Q. K., Chen, D. G., Guo, L. H., 1998. Structural OH in mantle-derived clinopyroxene megacrysts from Nüshan. *Chinese Science Bulletin*, 43(20): 1742—1742.
- Xia, Q. K., Chen, D. G., Guo, L. H., et al., 1999. Structural water in mantle-derived clinopyroxene megacrysts from Hannuoba: FTIR investigations. *Acta Mineralogica Sinica*, 19(2): 161—165 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Q. K., Chen, D. G., Guo, L. H., et al., 2000. Water in peridotite xenoliths from Nüshan and Panshishan: FTIR study. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 219—225 (in Chinese with English abstract).
- 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. Geophys. Res.*, 115: B07207, 22. doi: 10. 1029/2009JB006694
- Xia, Q. K., Pan, Y. J., Chen, D. G., et al., 2001. Hydrogen isotopic compositions of mantle-derived clinopyroxene megacrysts from Hannuoba by ion microprobe: micro-scale heterogeneity. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 7—10 (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. *Chem. Geol.*, 256: 33–45. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2008. 07. 020
- Yu, X. Y., 1990. Rb, Sr and REE geochemistry of the Niutoushan basalt from the coastal area of Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 36–45 (in Chinese with English abstract).
- Yue, K. F., He, Y., Liu, W. F., 2005. Sulfides in mantle-derived xenoliths from neogene alkali basalts at Niutoushan, Fujian. *Chinese Journal of Geology*, 40(1): 114–119 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Fan, Q. C., Zhang, H. F., et al., 2005. Lower crust processes during the lithosphere thinning in eastern China: magma underplating, replacement and delamination. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1509–1526 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. F., Jin, Z. M., Green II, H. W., et al. 2000. Hydroxyl in continental deep subduction zone: evidence from UHP eclogites of the Dabie Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 46(7): 592–595.
- Zheng, Y. F., Fu, B., Gong, B., 2002. Isotope geodynamics of the subduction and exhumation of continental plate. *Geological Journal of China Universities*, 8(4): 365–379 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. M., 1981. An investigation of two basaltic series and their inclusions on Niutoushan of Fujian Province of south-eastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, (3): 382–392 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, B. B., Wang, Q., Wang, L. S., et al., 2009. Water content of peridotite xenoliths from Cenozoic basalt in Yangyuan, Hebei Province. *Geological Journal of China Universities*, 15(2): 263–272 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈道公, 张剑波, 1992. 福建龙海明溪两区玄武质火山岩钾—氩年龄和 Nd、Sr、Pb 同位素. *岩石学报*, 8(4): 324–331.
- 郭立鹤, 林兴源, 谢漫泽, 等, 1998. 河北汉诺坝玄武岩中幔源捕虏体中的水. *地质学报*, 72(2): 138–143.
- 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. *岩石矿物学杂志*, 22(6): 130–140.
- 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. *岩石学报*, 26(6): 1713–1722.
- 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. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(1): 75–88.
- 林友坤, 1992. 福建天马山—牛头山新生代玄武岩及其火山作用. *岩石学报*, 8(4): 376–385.
- 齐进英, 张秀琪, 1985. 福建牛头山玄武岩及其深源包体的地球化学研究. *岩石学报*, 1(1): 75–87.
- 夏佳, 1995. 福建龙海牛头山区玄武岩中的包体研究. *南京建筑工程学院学报*, 34(3): 32–41.
- 夏群科, 陈道公, 郭立鹤, 1998. 女山幔源单斜辉石巨晶中的结构 OH. *科学通报*, 43(16): 1764–1767.
- 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. *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. *地质科学*, 35(2): 219–225.
- 夏群科, 潘尤杰, 陈道公, 等, 2001. 汉诺坝幔源单斜辉石巨晶氢同位素组成的离子探针分析: 微尺度不均一性. *岩石学报*, 17(1): 7–10.
- 于学元, 1990. 福建沿海牛头山玄武岩的铷、锶和稀土元素地球化学. *岩石学报*, 2(1): 36–45.
- 岳可芬, 赫英, 刘文锋, 2005. 福建牛头山新近纪碱性玄武岩中地幔岩包体内硫化物研究. *地质科学*, 40(1): 114–119.
- 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. *岩石学报*, 22(1): 1509–1526.
- 章军锋, 金振民, Green II, H. W., 等, 2000. 大陆深俯冲带中的水: 来自大别山超高压榴辉岩的证据. *科学通报*, 17: 1889–1894.
- 郑永飞, 傅斌, 龚冰, 2002. 大陆板块俯冲和折返的同位素地球动力学. *高校地质学报*, 8(4): 365–379.
- 周新民, 1981. 福建省牛头山两个系列玄武岩及其包体研究. *南京大学学报(自然科学版)*, (3): 382–392.
- 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. *高校地质学报*, 15(2): 263–272.