

下地壳含水性的演化 ——来自不同时代麻粒岩中长石水含量的证据

杨贵才^{1,2} 杨晓志¹ 夏群科¹

(1. 中国科技大学 地球和空间科学学院, 中国科学院 壳幔物质与环境重点实验室, 安徽 合肥 230026;
2. 武警黄金地质研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 利用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 和电子探针 (EMP) 分析了早古生代的松树沟麻粒岩和桐柏麻粒岩地体以及古元古代的莒南麻粒岩包体 (其寄主岩石为新生代玄武岩) 中长石的水含量和化学成分。结果显示, 麻粒岩中的长石均含有以 OH 和 H₂O 形式存在的结构水, 3 个地点的长石水含量分别为 $465 \times 10^{-6} \sim 733 \times 10^{-6}$ 、 $210 \times 10^{-6} \sim 993 \times 10^{-6}$ 和 $717 \times 10^{-6} \sim 1\,239 \times 10^{-6}$ 。对比前人报道的中生代 (道县和汉诺坝包体) 和古元古代 (女山包体、汉诺坝地体) 的麻粒岩研究结果, 发现早古生代样品和古元古代样品中长石的水含量都比中生代样品明显的高, 而早古生代和古元古代样品之间却没有差别, 指示了中国东部下地壳在中生代之前更加富水。

关键词: 结构水, 红外光谱, 斜长石, 麻粒岩, 大陆下地壳

中图分类号: P588.3; P578.968

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)04-0565-13

Temporal variation of water content in the lower continental crust: Evidence from feldspar in mafic granulites

YANG Gui-cai^{1,2}, YANG Xiao-zhi¹ and XIA Qun-ke¹

(1. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Gold Geological Institute of China Armed Police Force, Langfang 065000, China)

Abstract: Water contents and chemical compositions of normal anhydrous minerals from Early-Paleozoic Songshugou and Tongbai terrain granulites and Paleo-proterozoic Junan granulite xenoliths were obtained by Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) and electron microprobe (EMP) respectively. All granulites characterized by mafic nature were formed under the lowest crustal conditions. Plagioclases in granulites contain trace amounts of water in the form of structurally bound hydroxyl and less molecular water. Water contents (H₂O wt.) of plagioclase range from 465×10^{-6} to 733×10^{-6} at Songshugou, from 210×10^{-6} to 993×10^{-6} at Tongbai, and from 717×10^{-6} to $1\,239 \times 10^{-6}$ at Junan, respectively. Combined with previous results for Paleo-proterozoic granulites (Junan and Nushan xenoliths and Hannuoba terrain) and Mesozoic granulites (Daoxia and Hannuoba xenoliths), it seems that water contents in the lower continental crust of eastern China were variable with time. Water contents of Paleozoic and Proterozoic granulites are much higher than those of the Mesozoic granulites and there is no difference between Paleozoic and Proterozoic granulites, implying the existence of a more hydrous lower continental crust of eastern China before Mesozoic.

Key words: water content; FTIR; plagioclase; granulites; lower continental crust

收稿日期: 2011-05-25; 修订日期: 2012-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40903016)

作者简介: 杨贵才(1979-), 男, 汉族, 硕士, 工程师, 主要从事矿产资源勘查和地球化学研究, E-mail: gcyang08@mail.ustc.edu.cn.

下地壳是大陆地壳极其重要的一个圈层,它是连接深部地壳和地幔的桥梁,也是壳幔作用相当重要的场所。大陆下地壳主要由麻粒岩相岩石组成,通常称之为麻粒岩。下地壳的上部为长英质麻粒岩,下部为铁镁质麻粒岩。目前在地表出露的主要为麻粒岩地体和麻粒岩包体。麻粒岩是一种高温高压的产物,形成的温度范围为 $700\sim 950^{\circ}\text{C}$,压力为 $0.3\sim 1.8\text{ GPa}$ (Thompson and Connolly, 1990),其主要由斜方辉石、单斜辉石、石榴石、长石、石英等名义上无水矿物组成。

大量的资料显示,下地壳的化学成分是随着时间变化的(Taylor and McLennan, 1985, 1995; Rudnick, 1995; Rudnick and Fountain, 1995; Condie, 2005; Hawkesworth and Kemp, 2006; McLennan *et al.*, 2006; Rollinson, 2006, 2008),那么水的含量是不是也存在着变化呢?近来研究表明:下地壳的主

要组成矿物(辉石、长石和石榴石等)中普遍含有一定量的结构水,其含量(H_2O 的质量分数,下同)从百分之几十变化到 $6\%\sim 10\%$ (杨晓志等, 2005, 2007a; Xia *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2008a);这些水不但影响下地壳的许多物理和化学性质,而且还对岩石圈的稳定性和流变结构有重要制约(杨晓志等, 2006, 2007b, 2008; Yang *et al.*, 2008b)。

Yang等(2008a)对河北汉诺坝、安徽女山和湖南道县麻粒岩(捕虏体为主)的研究发现,形成于古元古代(约 $1.8\sim 2.0\text{ Ga}$)的麻粒岩具有比中生代(约 $120\sim 220\text{ Ma}$)明显偏高的水含量。这就不得不让我们想到,这几个地点的数据具有多大的代表性?即使存在这种变化,那么古生代麻粒岩样品中水的变化如何?基于此,本文选取了早古生代的8个松树沟麻粒岩、6个桐柏麻粒岩地体样品和6个莒南麻粒岩包体样品(图1)进行了研究。

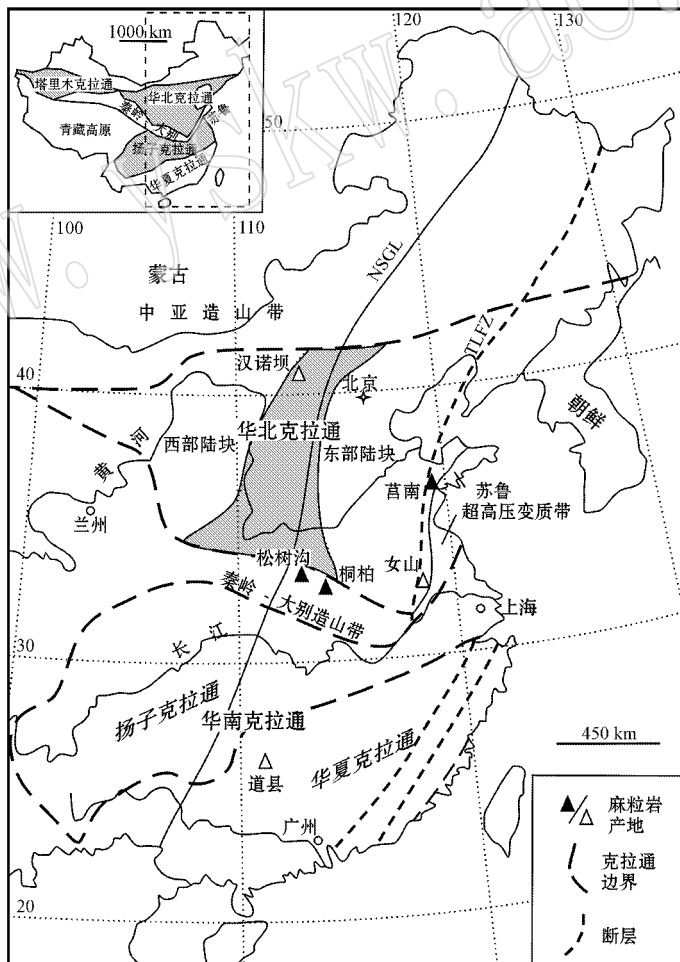


图1 中国东部区域构造简图及麻粒岩产地(据 Yang *et al.*, 2008a)

Fig. 1 Simplified tectonic units of eastern China and locations of granulite (after Yang *et al.*, 2008a)

NSGL—大兴安岭-太行山南北重力梯度带; TLFZ—郯庐断裂带

NSGL—Da Hinggan Mountains-Taihang Mountain NS-trending gravity gradient zone; TLFZ—Tan-Lu fault zone

1 地质背景

松树沟麻粒岩产于东秦岭商南县松树沟一带的秦岭群中,位于超镁铁质岩的南侧、富水杂岩的北侧,主要由高压基性麻粒岩和高压长英质麻粒岩组成(刘良等,1994,1995,1996)。高压基性麻粒岩分布在斜长角闪岩中呈透镜状的石榴角闪岩的核部,峰期变质条件为温度 $850\sim 925^{\circ}\text{C}$ 、压力 $1.45\sim 1.80\text{ GPa}$ (张建新等,2009),峰期变质年龄为 $485\pm 3\text{ Ma}$ (陈丹玲等,2004)。高压长英质麻粒岩呈透镜状或夹层状分布在斜长角闪岩的南侧,靠近斜长角闪岩(刘良等,1996),峰期温压条件为 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 、 $1.3\sim 1.6\text{ GPa}$,变质年龄为 500 Ma 左右(张建新等,2009)。本次采样为高压基性麻粒岩,主要矿物组合为石榴石+单斜辉石+斜长石+石英±金红石±钛铁矿,含有数量不等的角闪石以及与退变质有关的黑云母和绿泥石,副矿物有锆石和磷灰石。

桐柏麻粒岩地体主要位于桐柏北部的秦岭群,早期研究认为其呈透镜状分布于片麻岩中(王炎臻,1990;翟淳等,1999)。张翠光等(2002)结合麻粒岩和片麻岩的野外特征、结构构造、矿物成分、化学成分及峰期变质条件后认为,透镜状麻粒岩及其周围的片麻岩都为麻粒岩,峰期温压条件为 $700\sim 840^{\circ}\text{C}$ 、 $0.61\sim 0.85\text{ GPa}$,变质年龄为 $430\sim 480\text{ Ma}$ (Kröner *et al.*,1993;Zhang *et al.*,1998)。本次采样的麻粒岩主要矿物为紫苏辉石、石榴石、斜长石、石英和黑云母。

莒南麻粒岩包体产出于山东省莒南县城北 20 km 的玄武质角砾岩墙中,在大地构造位置上位于苏鲁超高压变质带。岩墙侵入到晚中生代斑状正长岩中,走向NWW,延伸 200 m ,平均宽 10 m 。玄武岩岩性为碧玄岩,侵位时代为 67 Ma (Ying *et al.*,2006)。玄武岩在侵位过程中携带大量包体,其主要为地幔橄榄岩、辉石岩、下地壳麻粒岩和云母、橄榄石、辉石巨晶。麻粒岩的原岩形成年龄为 $2.3\sim 2.4\text{ Ga}$,麻粒岩相变质年龄为 $1.8\sim 1.9\text{ Ga}$ (Ying *et al.*,2010)。分析样品均为新鲜的二辉麻粒岩,次棱角-圆状,大小 $1\sim 15\text{ cm}$,一般 $3\sim 5\text{ cm}$,与玄武岩的接触界限清晰,大多数样品有叶理构造。在所有矿物中,斜长石含量最高,其次为斜方辉石和单斜辉石,所有的样品都含少量石英和Fe-Ti氧化物。

2 分析测试

本文所有样品都进行了详细的显微镜下岩相学观察、电子探针(EMP)成分分析和傅里叶变换红外光谱(FTIR)结构水测定,测试分别在中国科学技术大学地球和空间科学学院电子探针和红外光谱实验室进行。

傅里叶变换红外光谱,使用Nicolet 5700型红外光谱仪及其耦合的Continu μm 红外显微镜。在测定之前,将双面抛光的薄片在酒精中浸泡 $10\sim 20\text{ h}$ 以除去矿物表面残留的环氧树脂,然后置于烘箱中,在约 100°C 下烘干 $3\sim 10\text{ h}$,以去除矿物表面和裂隙中的吸附水。红外光谱的测定在与光谱仪相连的红外显微镜上进行。分析过程中的有关参数和仪器附件如下:探测器为液氮冷却的MCT-A,测定波数范围为 $2\,500\sim 6\,000\text{ cm}^{-1}$,使用非偏振光,KBr分束器,光谱分辨率为 $2\text{ 或 }4\text{ cm}^{-1}$,光斑大小为 $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ 或 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ (根据样品颗粒大小和测定位置的样品质量调整),扫描次数为128或256次。选择透明、未发生明显蚀变或无裂痕的颗粒进行测定,测定点一般选取较大颗粒的中心位置附近。光谱的收集和处理使用Thermo Nicolet公司提供的OMINIC 7.1a软件。

电子探针所用的仪器为日本岛津公司的EP-MA1600,测定条件为:加速电压 15 kV ,束电流 20 nA ,光斑大小 $< 5\ \mu\text{m}$,使用天然或合成的氧化物作为标样。为了检验样品内和颗粒内的成分变化,每个样品中每种矿物都选了 $3\sim 5$ 个颗粒进行测试,而每个地点的样品均选择每种单矿物颗粒进行自核至边的几个不同的点分析。所有样品在测试之前均用无水酒精对薄片表面进行擦拭,在普通显微镜下选择表面干净、无蚀变的辉石、长石和石榴石颗粒进行标记,便于在电子探针下测试。

3 结果

3.1 电子探针分析结果

电子探针分析结果表明(表1、表2、表3),本文样品均为镁铁质,并且同一样品的不同颗粒之间以及同一颗粒内部化学成分变化不大。总体而言,松树沟麻粒岩、桐柏麻粒岩地体和莒南麻粒岩包体都

$w_B/\%$

表 1 松树沟麻粒岩的化学组成

Table 1 Mineral chemical compositions of Songshugou granulites

| 样号 | 矿物 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | NiO | ZnO | BaO | Total | Mg [#] | Wo | En | Fs | t ₁ /°C | t ₂ /°C | t ₃ /°C | |
|----------|-----|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------------------|------------------|------|------|------|--------|-----------------|------|------|------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| s-20 | GRT | 37.49 | 0.12 | 20.43 | 0.01 | 30.68 | 0.97 | 2.82 | 7.26 | | | 0.00 | 0.03 | | 99.80 | | 0.11 | 0.68 | 0.21 | | | | |
| | PL | 59.72 | | 25.01 | | | | 0.00 | 7.26 | 7.61 | 0.07 | | | 0.00 | 99.67 | | 0.34 | 0.65 | 0.00 | | | | |
| s-4-1(1) | CPX | 49.93 | 0.56 | 4.94 | 0.03 | 10.23 | 0.06 | 11.76 | 21.03 | 0.77 | 0.01 | 0.01 | | | 99.32 | 0.67 | 0.46 | 0.36 | 0.18 | | | | |
| | GRT | 37.85 | 0.17 | 20.99 | 0.02 | 27.48 | 0.55 | 4.99 | 7.54 | | | 0.01 | 0.05 | | 99.67 | | 0.19 | 0.60 | 0.21 | 738 | 690 | 691 | |
| s-1-2(2) | PL | 54.35 | | 29.01 | | | | 0.01 | 11.78 | 4.98 | 0.00 | | | 0.01 | 100.13 | | 0.57 | 0.43 | 0.00 | | | | |
| | CPX | 51.60 | 0.24 | 2.54 | 0.04 | 11.40 | 0.08 | 11.44 | 21.86 | 0.41 | 0.15 | 0.04 | | | 99.80 | 0.64 | 0.47 | 0.34 | 0.19 | | | | |
| s-1-2(1) | GRT | 37.87 | 0.15 | 20.96 | 0.03 | 28.37 | 0.56 | 4.37 | 7.47 | | | 0.02 | 0.07 | | 99.87 | | 0.17 | 0.62 | 0.21 | 730 | 681 | 714 | |
| | PL | 64.00 | | 22.21 | | | | 0.01 | 4.19 | 9.29 | 0.26 | | | 0.00 | 99.96 | | 0.20 | 0.79 | 0.01 | | | | |
| s-9-1(2) | CPX | 50.90 | 0.31 | 2.42 | 0.01 | 10.96 | 0.09 | 12.30 | 21.88 | 0.42 | 0.06 | 0.01 | | | 99.35 | 0.67 | 0.46 | 0.36 | 0.18 | | | | |
| | GRT | 37.74 | 0.12 | 20.96 | 0.02 | 26.94 | 0.54 | 5.10 | 7.63 | | | 0.02 | 0.03 | | 99.09 | | 0.20 | 0.59 | 0.21 | 759 | 715 | 744 | |
| s-9-1(1) | PL | 55.73 | | 27.46 | | | | 0.01 | 10.35 | 5.77 | 0.03 | | | 0.01 | 99.36 | | 0.50 | 0.50 | 0.00 | | | | |
| | CPX | 48.12 | 0.65 | 9.32 | 0.03 | 8.81 | 0.14 | 9.81 | 21.40 | 0.99 | 0.02 | 0.01 | | | 99.30 | 0.66 | 0.51 | 0.33 | 0.16 | | | | |
| s-9-3(1) | GRT | 39.15 | 0.16 | 21.78 | 0.03 | 19.21 | 0.42 | 5.84 | 13.59 | | | 0.02 | 0.03 | | 100.23 | | 0.22 | 0.41 | 0.37 | 1 066 | 1 074 | 929 | |
| | PL | 60.21 | | 24.72 | | | | 0.00 | 6.91 | 7.81 | 0.02 | | | 0.00 | 99.67 | | 0.33 | 0.67 | 0.00 | | | | |
| S-9-3(2) | CPX | 49.93 | 0.64 | 8.73 | 0.07 | 8.13 | 0.11 | 9.54 | 20.22 | 1.91 | 0.00 | 0.01 | | | 99.31 | 0.68 | 0.51 | 0.33 | 0.16 | | | | |
| | GRT | 38.40 | 0.16 | 21.42 | 0.08 | 20.55 | 0.47 | 5.29 | 13.28 | | | 0.00 | 0.05 | | 99.68 | | 0.20 | 0.44 | 0.36 | 973 | 966 | 826 | |
| S-1-1(2) | PL | 61.44 | | 23.72 | | | | 0.01 | 6.26 | 8.08 | 0.04 | | | 0.00 | 99.54 | | 0.30 | 0.70 | 0.00 | | | | |
| | CPX | 50.08 | 0.53 | 4.97 | 0.03 | 10.87 | 0.08 | 11.00 | 21.22 | 0.73 | 0.02 | 0.00 | | | 99.54 | 0.64 | 0.47 | 0.34 | 0.19 | | | | |
| S-2-3(1) | GRT | 38.41 | 0.17 | 21.03 | 0.02 | 26.54 | 0.44 | 5.16 | 8.24 | | | 0.01 | 0.05 | | 100.04 | | 0.20 | 0.57 | 0.23 | 810 | 776 | 768 | |
| | PL | 63.48 | | 22.60 | | | | 0.01 | 4.40 | 8.84 | 0.15 | | | 0.00 | 99.47 | | 0.21 | 0.78 | 0.01 | | | | |
| S-2-3(2) | CPX | 52.26 | 0.24 | 3.01 | 0.03 | 8.99 | 0.04 | 14.01 | 21.36 | 0.31 | 0.02 | 0.06 | | | 100.32 | 0.74 | 0.45 | 0.41 | 0.15 | | | | |
| | GRT | 38.78 | 0.10 | 21.42 | 0.01 | 21.86 | 0.44 | 7.53 | 9.47 | | | 0.01 | 0.03 | | 99.64 | | 0.28 | 0.46 | 0.26 | 879 | 863 | 847 | |

注：空白为未测；假设 Fe 全为 Fe²⁺；Mg[#] = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)；假设压力为 1.0 GPa，t₁、t₂、t₃ 依次为采用 Ellis-Green (1979)、Krogh (1988) 和 Berman (1995) 温度计所估算的温度值。

w_B/%

表2 桐柏麻粒岩化学组成

Table 2 Mineral chemical compositions of Tongbai granulites

| 样号 | 矿物 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | NiO | ZnO | BaO | Total | Mg [#] | W ₀ | En | Fs | t ₁ /°C | t ₂ /°C |
|-------|-----|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------------------|------------------|------|------|------|--------|-----------------|----------------|------|------|--------------------|--------------------|
| TB-19 | OPX | 51.11 | 0.09 | 1.50 | 0.03 | 28.73 | 0.58 | 16.97 | 0.43 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | | | 99.47 | 0.51 | 0.01 | 0.51 | 0.48 | | |
| | PL | 58.06 | 26.06 | | | | | 0.00 | 8.85 | 6.53 | 0.16 | | | 0.00 | 99.67 | | 0.42 | 0.57 | 0.01 | | |
| TB-21 | CPX | 51.97 | 0.41 | 3.51 | 0.19 | 10.08 | 0.23 | 12.13 | 21.02 | 0.99 | 0.01 | 0.00 | | | 100.53 | 0.68 | 0.46 | 0.37 | 0.17 | | |
| | GRT | 38.04 | 0.03 | 21.44 | 0.01 | 31.02 | 0.63 | 7.24 | 2.07 | | | 0.00 | 0.02 | | 100.52 | | 0.28 | 0.67 | 0.06 | 663 | 500 |
| | PL | 60.96 | 24.32 | | | | | 0.00 | 6.30 | 8.07 | 0.11 | | | 0.00 | 99.77 | | 0.30 | 0.69 | 0.01 | | |
| TB-10 | Kfs | 65.15 | 18.53 | | | | | 0.01 | 0.00 | 1.09 | 14.83 | | | 0.35 | 99.96 | | 0.00 | 0.10 | 0.90 | | |
| | OPX | 51.85 | 0.07 | 1.91 | 0.03 | 25.51 | 0.24 | 19.47 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | | | 99.41 | 0.58 | 0.01 | 0.57 | 0.42 | | |
| | GRT | 38.40 | 0.02 | 21.42 | 0.06 | 28.49 | 0.72 | 7.19 | 3.21 | | | 0.02 | | | 99.54 | | 0.28 | 0.63 | 0.09 | 796 | 711 |
| TB-11 | PL | 57.51 | 26.77 | | | | | 0.01 | 8.83 | 6.52 | 0.16 | | | 0.00 | 99.80 | | 0.42 | 0.57 | 0.01 | | |
| | OPX | 50.85 | 0.08 | 1.99 | 0.06 | 26.07 | 0.31 | 20.21 | 0.28 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | | | 99.88 | 0.58 | 0.01 | 0.58 | 0.42 | | |
| | GRT | 38.44 | 0.03 | 21.26 | 0.06 | 29.19 | 0.96 | 6.73 | 2.91 | | | 0.01 | 0.05 | | 99.62 | | 0.27 | 0.65 | 0.08 | 786 | 662 |
| TB-18 | PL | 58.15 | 26.02 | | | | | 0.01 | 8.35 | 6.76 | 0.21 | | | 0.02 | 99.52 | | 0.40 | 0.59 | 0.01 | | |
| | OPX | 50.75 | 0.08 | 1.58 | 0.06 | 25.97 | 0.50 | 20.24 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | | | 99.62 | 0.58 | 0.01 | 0.58 | 0.42 | | |
| | GRT | 37.87 | 0.02 | 21.12 | 0.05 | 29.03 | 1.26 | 6.05 | 4.07 | | | 0.00 | 0.01 | | 99.48 | | 0.24 | 0.64 | 0.12 | 850 | 629 |
| TB-15 | PL | 54.15 | 29.44 | | | | | 0.01 | 10.98 | 5.03 | 0.12 | | | 0.00 | 99.73 | | 0.54 | 0.45 | 0.01 | | |
| | OPX | 50.60 | 0.09 | 1.95 | 0.07 | 26.15 | 0.43 | 20.01 | 0.34 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | | | 99.66 | 0.58 | 0.01 | 0.57 | 0.42 | | |
| | PL | 56.80 | 27.09 | | | | | 0.01 | 9.77 | 5.94 | 0.11 | | | 0.00 | 99.72 | | 0.47 | 0.52 | 0.01 | | |

注: 空白为未测项; 假设 Fe 全为 Fe²⁺; Mg[#] = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺); 假设压力为 1.0 GPa; t₁ 为采用 Brey Ca-opx 温度计(1990)估算温度, t₂ 为采用 Harley 温度计(1984)估算温度; 样品 TB-21 的 3 个温度由左到右依次为采用 Ellis-Green(1979)、Krogh(1988)和 Berman(1995)温度计估算温度。

表 3 莒南麻粒岩包体的化学组成

 $w_B/\%$

Table 3 Mineral chemical compositions of Junan xenolith granulites

| 样号 | 矿物 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | BaO | NiO | Total | Mg [#] | Wo(An)En(Ab)Fs(Or) | t ₁ | t ₂ | p/GPa | | |
|---------|-----|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------------------|------------------|------|------|--------|-----------------|--------------------|----------------|----------------|-------|-----|------|
| 05LG17 | OPX | 51.26 | 0.14 | 2.20 | 0.01 | 27.69 | 0.30 | 17.61 | 0.87 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 100.12 | 0.53 | 1.84 | 52.16 | 46.00 | | | |
| | CPX | 50.72 | 0.45 | 3.62 | 0.03 | 12.41 | 0.18 | 11.15 | 20.67 | 0.71 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 99.97 | 0.62 | 45.07 | 33.82 | 21.11 | 831 | 873 | 0.93 |
| | PL | 58.78 | | 25.36 | | | | 0.02 | 7.87 | 6.24 | 1.09 | 0.04 | | 99.40 | | 38.50 | 55.17 | 6.33 | | | |
| 05LG10 | OPX | 52.42 | 0.14 | 1.89 | 0.08 | 22.53 | 0.43 | 21.19 | 0.77 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.04 | 99.53 | 0.63 | 1.60 | 61.64 | 36.76 | | | |
| | CPX | 52.10 | 0.45 | 3.43 | 0.18 | 9.97 | 0.18 | 12.40 | 20.83 | 0.94 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 100.50 | 0.69 | 45.43 | 37.61 | 16.96 | 855 | 876 | 0.94 |
| | PL | 61.61 | | 24.36 | | | | 0.02 | 6.47 | 7.04 | 0.81 | 0.09 | | 100.40 | | 32.12 | 63.13 | 4.75 | | | |
| JN09-7 | OPX | 51.52 | 0.07 | 1.77 | 0.02 | 24.06 | 0.51 | 20.70 | 0.78 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 99.44 | 0.61 | 1.62 | 59.55 | 38.83 | | | |
| | CPX | 50.70 | 0.60 | 3.66 | 0.05 | 12.14 | 0.27 | 11.27 | 20.18 | 0.93 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 99.82 | 0.62 | 44.52 | 34.58 | 20.91 | 839 | 861 | 0.99 |
| | PL | 61.27 | | 24.62 | | | | 0.01 | 6.33 | 6.54 | 1.14 | 0.09 | | 99.99 | | 32.46 | 60.61 | 6.93 | | | |
| JN09-9 | OPX | 50.98 | 0.08 | 1.94 | 0.02 | 28.21 | 1.25 | 16.55 | 0.78 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 99.85 | 0.51 | 1.70 | 50.25 | 48.05 | | | |
| | CPX | 50.88 | 0.37 | 3.62 | 0.03 | 13.02 | 0.55 | 10.52 | 20.21 | 0.77 | 0.00 | 0.04 | 0.04 | 100.02 | 0.59 | 44.91 | 32.51 | 22.58 | 821 | 863 | 0.97 |
| | PL | 60.06 | | 25.01 | | | | 0.04 | 6.80 | 6.89 | 1.03 | 0.02 | | 99.85 | | 33.23 | 60.80 | 5.97 | | | |
| JN09-10 | OPX | 52.79 | 0.18 | 1.91 | 0.06 | 22.59 | 0.40 | 21.46 | 0.77 | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 0.06 | 100.25 | 0.63 | 1.59 | 61.88 | 36.53 | | | |
| | CPX | 52.16 | 0.44 | 3.30 | 0.15 | 9.81 | 0.19 | 12.49 | 20.93 | 0.93 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 100.43 | 0.69 | 45.53 | 37.81 | 16.66 | 854 | 872 | 0.92 |
| | PL | 60.19 | | 24.42 | | | | 0.03 | 6.44 | 7.42 | 0.83 | 0.11 | | 99.44 | | 30.91 | 64.34 | 4.75 | | | |
| JN09-11 | OPX | 51.65 | 0.09 | 2.07 | 0.08 | 25.53 | 0.73 | 18.49 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 99.49 | 0.56 | 1.67 | 55.41 | 42.92 | | | |
| | CPX | 51.14 | 0.46 | 3.88 | 0.15 | 11.67 | 0.33 | 11.19 | 20.41 | 0.93 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 100.18 | 0.63 | 45.26 | 34.54 | 20.20 | 832 | 865 | 1.04 |
| | PL | 61.36 | | 24.32 | | | | 0.01 | 6.33 | 6.95 | 1.13 | 0.11 | | 100.22 | | 31.28 | 62.07 | 6.66 | | | |

注: 空白为未测项; 假设 Fe 全为 Fe²⁺; Mg[#] = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺); t₁ 和 t₂ 分别为根据 Wells(1997)和 Wood and Banno(1973)计算的温度, p 为根据 McCarthy and Patino Douce(1998)计算的压力。

与前人的汉诺坝地体麻粒岩和女山麻粒岩包体 (Yang *et al.*, 2008) 极为相似, 却与道县麻粒岩包体和汉诺坝麻粒岩包体 (Yang *et al.*, 2008) 存在差异 (图 2 和图 3)。总的来看, 莒南麻粒岩包体与松树沟麻粒岩、桐柏麻粒岩地体与前人的测试结果大致相当。辉石相对亏损 Al、Mg 和 Na, 斜长石相对亏损 Al、Ca, 富集 Na。松树沟的辉石比桐柏和莒南两个点具有相对高的 Mg[#] 值, 为 0.64~0.74, 其他两个点分别为 0.51~0.58 和 0.51~0.69, 其他组分及组成大致相当。根据斜方辉石成分判别法 (Rie-

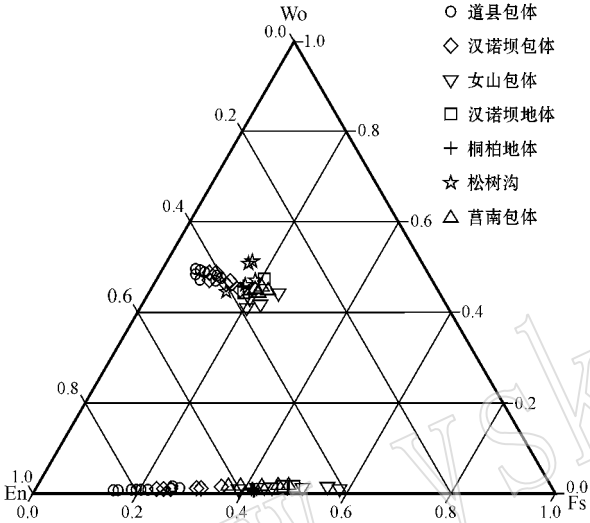


图 2 麻粒岩中辉石化学组成端员图解

Fig. 2 End-member composition of pyroxenes in granulites

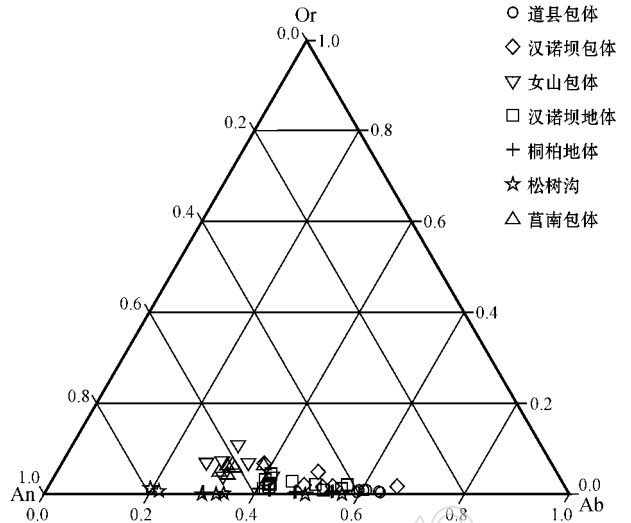


图 3 麻粒岩中斜长石的化学组成端员图解

Fig. 3 End-member composition of plagioclase in granulites

tmejir, 1983) 对含斜方辉石的桐柏麻粒岩和莒南麻粒岩进行投图, 结果显示这两套样品都是典型的变质成因麻粒岩 (图 4) 与前人研究的麻粒岩样品成因一致。

根据电子探针数据结果, 对松树沟、桐柏和莒南样品进行了温度估算。所有松树沟样品和 1 个桐柏样品 (TB-21) 中没有斜方辉石, 但含有单斜辉石和石榴石, 假定其形成压力为 1 GPa, 同时应用 Ellis-Green

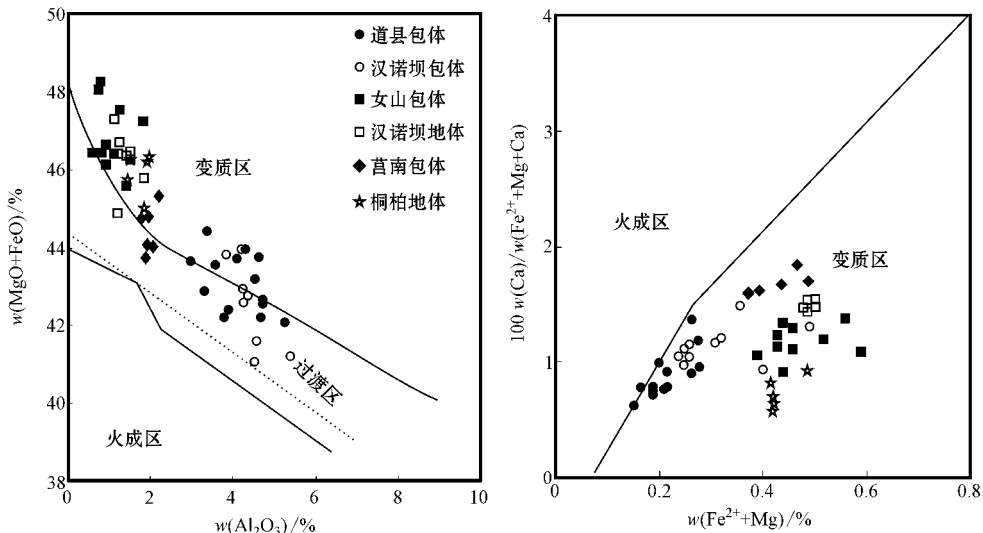


图 4 桐柏和莒南麻粒岩样品中斜方辉石成因判别图

Fig. 4 Petrogenetic discrimination diagrams of orthopyroxene in Tongbai and Junan granulites

(1979) Krogh(1988)和 Berman 等(1995)3 个温度计对温度进行估算。估计结果显示,各样品所得温度都较为接近,误差大多在 50℃ 以内,极个别达到 130℃。松树沟样品的温度为 681~1 066℃。对于大多数桐柏麻粒岩样品,只含有斜方辉石和石榴石,没有单斜辉石,故同时应用 Brey 和 Kohler(1990)的 Ca-opx 温度计和 Harley 温度计(1984)进行估算,估算的结果也较为接近,获得其温度为 500~850℃。对于不含石榴石的麻粒岩样品,前人进行过多次讨论和比较,认为 Wells(1977) Wood 和 Banno(1973)温度计估算的温度及根据 McCarthy 和 Patino Douce(1998)压力计估算的压力可信度较高(陈孝德等,2007;刘平华等,2010)。莒南麻粒岩不含石榴石,应用两种温度计获得的温度具高度的一致性,为 821~876℃,压力为 0.92~1.04 GPa。这与前人的估算结果也较为一致。根据地壳的温压特征(Thompson and Connolly,1990)和本次温压估算结果,我们认为这 3 个地点的麻粒岩来自于下地壳。

3.2 红外光谱分析结果

对松树沟和桐柏麻粒岩地体及莒南麻粒岩包体样品中斜长石的红外光谱分析显示,所有样品在 3 000~3 800 cm^{-1} 波数范围内出现峰,代表性谱图见图 5。长石的吸收峰大致可以分为 6 组:3 180~3 230、3 380~3 406、3 420~3 445、3 480~3 520、3 580~3 600 和 3 610~3 630 cm^{-1} ,但前两组峰值出现在个别样品中。长石中的 OH 结构水的峰出现在 3 050~3 200、3 350~3 450、3 500 和 3 570~3 610 cm^{-1} (Johnson and Rossman,2003),据此认为在长石中除了 OH 结构水外,还存在 H_2O 分子形式存在

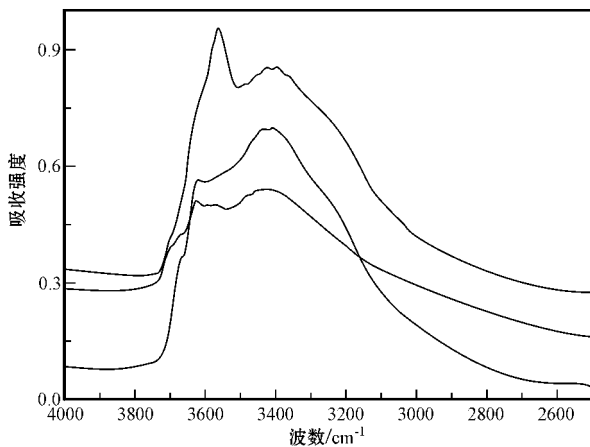


图 5 麻粒岩中斜长石的代表性红外光谱

Fig. 5 Representative spectra of plagioclases in granulites

的结构水。在极少数样品中在 $< 3\,000\ \text{cm}^{-1}$ 时也出现峰,这是由于矿物表面残留的树脂造成的,在计算时给予了扣除。

矿物中结构水含量(表示为 H_2O 的质量分数)的计算使用 Beer-Lambert 吸收定律的变形形式: $\Delta = I \times c \times t$,其中 Δ 为积分吸收面积, I 为积分吸收系数, c 为水含量, t 为厚度。斜长石使用的积分吸收系数为 $15.3 \times 10^{-6}/\text{cm}^2$ (Johnson and Rossman,2003)。计算积分吸收面积时,本文所取波数范围一般为 3 000~3 650 cm^{-1} ,但个别斜长石的波数范围可达 2 700 cm^{-1} 左右。由于使用的是非偏振光,用得到的积分吸收面积 $\times 3$ 来作为计算水含量的 Δ (Kovács *et al.*,2008)。样品的厚度使用同一薄片上多点测量(一般在 10 点以上,尽量覆盖整个薄片)的平均值。对同一样品测定了多个(> 10)长石颗粒,使用其平均值来代表这个样品中长石的水含量。至于基线的扣除,本文一般采用仿样拟合(spline fit)法(Thijssse *et al.*,1998)。

计算水含量的误差主要来自以下几个方面:①使用非偏振光测定非定向颗粒产生约 10% 的误差(Kovács *et al.*,2008);②基线扣除产生约 5% 的误差;③薄片厚度不均匀产生约 10% 的误差;④本文长石与 Johnson 和 Rossman(2003)文中使用长石的成分并不完全相同,直接使用由其推导的积分吸收系数可能引起误差,但由于长石的峰的位置大致相当,这项误差应该很小。将以上因素均考虑在内,估计计算的长石水含量的误差 $< 30\%$ 。

从测试的结果看,古生代松树沟、桐柏麻粒岩地体和古元古代的莒南麻粒岩包体中的长石的水含量都有较大的变化,水含量依次为 $465 \times 10^{-6} \sim 733 \times 10^{-6}$ 、 $210 \times 10^{-6} \sim 993 \times 10^{-6}$ 和 $717 \times 10^{-6} \sim 1\,239 \times 10^{-6}$ 。松树沟样品中有 3 个样品的长石水含量明显高,分别达到 $2\,045 \times 10^{-6}$ 、 $3\,451 \times 10^{-6}$ 和 $5\,115 \times 10^{-6}$ 。出现这种情况可能是由长石中含有较多的包裹体水造成的,以上数据是剔除这 3 个样品后的值。

对比前人测试(Yang *et al.*,2008a)的中生代下地壳道县包体、汉诺坝包体和古元古代的女山包体、汉诺坝地体的长石水含量(图 6)看出,早古生代的松树沟、桐柏麻粒岩地体和古元古代莒南麻粒岩包体、汉诺坝麻粒岩地体、女山麻粒岩包体中的长石的水含量比中生代汉诺坝麻粒岩包体、道县麻粒岩包体的高,而早古生代和古元古代样品之间则没有出现差别。

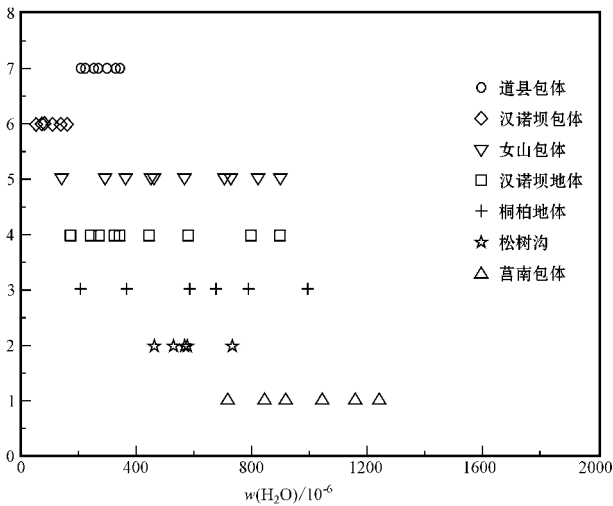


图 6 麻粒岩样品中长石水含量对比图

Fig. 6 Water content comparison of plagioclases in granulites

4 讨论

4.1 长石中的水含量能否代表源区的水含量

本文 3 套麻粒岩中斜长石的水含量能否代表其所在源区的水含量,这是一个值得商讨的问题。以下证据充分表明所测试样品的水含量即代表了其所在源区的水含量:①在测试时选择透明、干净、无裂隙的长石的中心部位,能够有效地避免H扩散丢失;

②同一样品长石颗粒之间和颗粒内部的成分相对均一,表明后期的改造作用几乎没有或很小;③在红外光谱测定时没有出现 $>3\ 650\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰,表明矿物中几乎不存在含水矿物(含水矿物一般在 $>3\ 650\ \text{cm}^{-1}$ 出现较强的吸收峰),也不存在蚀变痕迹。因此,本文所测试的麻粒岩中的长石水含量即代表了其所在源区的水含量。古生代松树沟、桐柏麻粒岩地体和古元古代的莒南麻粒岩包体中矿物计算的温压条件和斜方辉石的成因也表明它们来源于下地壳。对下地壳麻粒岩已有的研究表明,麻粒岩矿物之间基本达到了水的分配平衡(Yang *et al.*, 2008a),因此长石中水含量的差异可以指示当时下地壳水含量的差异。

4.2 下地壳水含量的差异

就不同时期麻粒岩中的长石的水含量来看,古生代和元古宙下地壳具有比中生代更高的水含量,而古生代和元古宙下地壳之间没有出现差别。本文从以下几个方面探讨了产生这种差异的原因:

(1)温度的影响。从 7 个地点的麻粒岩计算出的平衡温度(表 4)看出,虽然各点的温度变化范围较大,单个点的平均温度都集中在 $730\sim 890\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,其间并没有显示出与长石水之间有较好的相关性,说明温度不是造成水含量变化的原因,即不能判别是否由温度影响造成了这种差异。

表 4 麻粒岩中长石水含量与温度、压力对比表

Table 4 Temperature and pressure versus water content of plagioclases in granulites

| | $w(H_2O)/10^{-6}$ | $w(H_2O)_{\text{平均值}}/10^{-6}$ | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 平均温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 压力/GPa |
|-------|-------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|-----------|
| 桐柏地体 | 210~993 | 605 | 662~850 | 739 | 0.85 |
| 松树沟 | 465~733 | 575 | 681~1 074 | 821 | 1.45~1.8 |
| 莒南包体 | 717~1 239 | 986 | 821~873 | 853 | 0.86~1.12 |
| 汉诺坝地体 | 175~895 | 434 | 760~900 | 817 | 0.9~1.2 |
| 女山包体 | 145~900 | 543 | 810~920 | 870 | 0.6~0.9 |
| 汉诺坝包体 | 65~205 | 132 | 860~920 | 882 | 0.9~1.2 |
| 道县包体 | 200~350 | 281 | 850~900 | 853 | 0.9~1.2 |

(2)压力的影响。压强能在很大程度上影响水在矿物中的溶解度(Keppler and Bolfan-Casanova, 2006)。这几个点的压力范围(表 4)都为 $0.7\sim 1.8\ \text{GPa}$ 。除了松树沟具有较高的压力($1.45\sim 1.8\ \text{GPa}$)外,其他几个点都集中在 $0.8\sim 1.2\ \text{GPa}$ 之间。松树沟麻粒岩中的长石并不比其他几个点的水含量高,压力与长石水含量之间没有相关关系,说明压强也不可能影响长石中的水含量。

(3)地幔流体交代的影响。早元古代和早古生代(中生代前)的麻粒岩可能受到了地幔流体交代的影响,使其发生水合作用,显著提高了水的含量。这种机制也存在不确定性。首先,以前研究显示这几个点的样品没有遭受与熔体有关的水合作用(Huang *et al.*, 2004; Zhai *et al.*, 2005; Ying *et al.*, 2010);其次是熔体和矿物颗粒之间的二面角能够影响熔体进入矿物颗粒内部的能力,如果二面角 $>$

60° 熔体较难完全浸透矿物颗粒(Waff and Bulau, 1979),下地壳矿物与熔体之间的二面角一般都大于 60° 因此想发生完全的水合作用较难。

(4) 脱水部分熔融或成岩过程中结晶程度的影响。中生代样品可能经历了部分熔融过程中的脱水作用,或成岩过程中结晶程度较高造成了这种低水含量的特征。H 是一种高不相容元素,在部分熔融或结晶过程中优先进入熔体相。LREE 与 H 一样属于不相容元素,如果 H 亏损的话,LREE 也同样发生亏损,但是在 LREE 中并没有发现亏损,反而是这几个点的模式图都极为相似(Yang *et al.*, 2008a)。因此,熔融或结晶机制不可能是造成斜长石水含量差异的原因。

(5) 去气作用的影响。中生代样品普遍发生了去气作用,使其水含量变低,而没有改变其主、微量元素的组成。因为所有样品之间的主、微量元素的含量差距不明显,没有显示出古生代、古元古代的样品与中生代样品的差距,只能假定去气作用不影响主、微量元素组成。如果去气过程会影响水含量的话,中生代样品的去气程度较高才能导致与中生代前的样品出现如此大的差距。对氢同位素的研究不支持这一说法(Yang *et al.*, 2008a)。如果这些样品具有相似的初始氢同位素,那么它们之间的去气程度差异将 < 10% 这无疑小于样品中长石水之间的差异。去气作用不可能造成目前的这种差异。

(6) 受到 CO₂ 流体“干化”作用的影响。有研究发现,富 CO₂ 流体引起的“干化”作用能使麻粒岩中的水含量降低(Newton *et al.*, 1980)。对于麻粒岩样品中长石水含量的差异,可能富 CO₂ 流体的冲释作用对中生代样品影响更大,导致水含量的下降。但这与以下几方面不符:首先,CO₂ 与麻粒岩中水的低活度之间存在争议,最近研究显示 CO₂ 可能是变质作用的产物而不是起因(Cesare *et al.*, 2005);其次,离子探针对下地壳麻粒岩样品进行氧同位素分析表明,下地壳的氧同位素在组成上是不均一的,不管是大尺度上(Kempton and Harmon, 1992)还是小尺度上(Valley and O'Neil, 1984 ; Yang *et al.*, 2008a),说明下地壳中不可能普遍存在富 CO₂ 流体。

(7) 后期交代作用的影响。松树沟麻粒岩、桐柏麻粒岩地体和汉诺坝麻粒岩地体都不同程度地存在含水矿物(如角闪石),这些高水含量的样品可能是由后期的交代作用形成的。首先,研究显示蚀变和交代作用产生含水相矿物的过程不仅要消耗掉流

体中的水(Andrut *et al.*, 2003),还有可能消耗掉含水矿物相周围的名义上无水矿物中的水(Peslier *et al.*, 2002),所以这种含水矿物相的出现不会增加名义上无水矿物的水含量,只会不变或减少;其次,汉诺坝地体麻粒岩样品中各矿物之间的 REE 分配模式和(La/Yb)_N 与汉诺坝包体麻粒岩的一致,REE 在矿物间的分配可能处于平衡状态(Yang *et al.*, 2008a)。因此,可以说用于分析的样品不太可能明显地被后期的流体改造。另外,莒南和女山包体麻粒岩基本没有含水相矿物出现,其含水量仍然较高,因此可以认为,如此大的水含量差异不可能是由后期交代作用造成的。

(8) 原岩或起始岩浆的差异。不同时代麻粒岩中长石的水含量差异是由原岩或起始岩浆的不同引起的。中生代前的麻粒岩继承了具有较高水含量的原岩或起始岩浆的水的特点。按照这种说法,莒南和女山麻粒岩样品中既有高水含量样品也有较低的水含量样品,可能分别代表了古元古代和中生代时形成的样品。而这两种样品之间存在含水量的差异,与它们的年代学研究结果(Huang *et al.*, 2004 ; Ying *et al.*, 2010)一致。松树沟麻粒岩、桐柏麻粒岩地体和汉诺坝麻粒岩地体可能没有受到后期改造或受后期的改造较小,得以保存了原岩或原始岩浆高水含量的特点。这也印证了早期地壳是在更加富水的条件下形成的结论(Foley *et al.*, 2002, 2003 ; Condie, 2005)。

综上所述,不同时代麻粒岩的水含量差异是由原岩或原始岩浆含水量的差异造成的。古生代、古元古代麻粒岩的原岩比中生代时的更富水。一般认为,太古宙前后地壳的性质存在较大的差异(Kröner, 1985 ; Rudnick, 1995 ; Rudnick and Fountain, 1995 ; Taylor and McLennan, 1995),早期的下地壳比现今的下地壳更加富水。但对于华北克拉通甚至是中国东部的下地壳麻粒岩样品,这种差异出现在中生代前后,而不是太古宙前后,显示出特殊性。同时,我们还注意到,中生代前后华北克拉通东部的稳定性遭受到了严重的破坏。岩石圈破坏时,在上升的热的软流圈物质的烘烤作用下,下地壳乃至上地幔的岩浆发生严重的脱水作用,使得岩浆中的含水量比中生代之前的减少,进而导致了中生代前后下地壳麻粒岩中长石的水含量出现较大差异。

5 结论

早古生代和古元古代麻粒岩样品中主要矿物的化学组成存在较大的相似性,它们都与中生代的样品存在差异。各时代矿物之间和矿物颗粒内部的成分相对均一。松树沟麻粒岩中的石榴石具有较均一的化学成分,这与前人研究的汉诺坝麻粒岩地体中的石榴石有明显的不同。

麻粒岩中的名义上无水矿物都含有以 OH 和 H₂O 形式存在的结构水。莒南麻粒岩中斜长石的水含量为 $717 \times 10^{-6} \sim 1239 \times 10^{-6}$,松树沟麻粒岩中斜长石的水含量为 $465 \times 10^{-6} \sim 733 \times 10^{-6}$,桐柏的斜长石的为 $210 \times 10^{-6} \sim 993 \times 10^{-6}$ 。

从麻粒岩中斜长石水含量来看,中国东部下地壳在不同时代的水含量存在差别,早古生代和古元古代样品的水含量明显高于中生代的,而早古生代和古元古代之间没有出现差别,指示了中生代之前的下地壳更加富水。

致谢 在中国科学技术大学学习的3年间,赵子福教授、谢智博士和赵波、赵子灵等人给予学习上的教诲及生活上的关心,在实验中冯敏老师、杨燕、李佩、刘佳、顾笑 博士给予了帮助和指导,在此表示感谢。同时感谢评审人提出中肯的修改意见。

Reference

Andrut M, Brandstatter F and Beran A. 2003. Trace hydrogen zoning in diopside [J]. *Mineral. Petrol.*, 78 : 231~241.

Berman R G, Aranovich L Y, Genkin M, *et al.* 1995. Phase equilibrium constraints on the stability of biotite: Part I. Mg-Al biotite in the system K₂O-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-CO₂ [J]. *Current Research (Geological Survey of Canada)*, 995-E : 253~261.

Brey G P and Kohler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites: II. New thermobarometer, and practical assessment of existing thermobarometers [J]. *J. Petrol.*, 31 : 1353~1378.

Cesare B, Meli S, Nodari L, *et al.* 2005. Fe³⁺ reduction during biotite melting in graphitic metapelites: another origin of CO₂ in granulites [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 149 : 129~140.

Chen Danling, Liu Liang, Sun Yong, *et al.* 2004. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulites from North Qinling and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49 (21) : 2296~2304.

Chen Xiaode, Lin Chuanyong and Shi Lanbin. 2007. Rheology of the lower crust beneath the northern part of North China: inferences from lower

crustal xenoliths from Hannuoba basalts, Hebei Province, China [J]. *Science in China (Series D)*, 50(8) : 1128~1141.

Condie K C. 2005. *Earth as an Evolving Planetary System* [M]. Elsevier Academic Press, 447.

Ellis D J and Green D H. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 71 : 13~22.

Foley S F, Tiepolo M and Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones [J]. *Nature*, 417 : 837~840.

Foley S F, Buhre S and Jacob D E. 2003. Evolution of the Archean crust by delamination and shallow subduction [J]. *Nature*, 421 : 249~252.

Harley S L. 1984. The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet in FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ and CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ [J]. *Journal of Petrology*, 25(3) : 665~696.

Hawkesworth C J and Kemp A I S. 2006. Evolution of the continental crust [J]. *Nature*, 443 : 811~817.

Huang X L, Xu Y G. and Liu D Y. 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, east China: Implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean Craton [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68 : 127~149.

Johnson E A and Rossman G R. 2003. The concentration and speciation of hydrogen in feldspars using FTIR and 1H MAS NMR spectroscopy [J]. *Am. Mineral.*, 88 : 901~911.

Johnson E A and Rossman G R. 2004. A survey of hydrous species and concentrations in igneous feldspars [J]. *Am. Mineral.*, 89 : 586~600.

Kempton P D and Harmon R S. 1992. Oxygen isotope evidence for large-scale hybridization of the lower crust during magmatic underplating [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3) : 971~986.

Keppler H and Bolfan-Casanova N. 2006. Thermodynamics of water solubility and partitioning [A]. Keppler H and Smyth J R. *Water in Nominally Anhydrous Minerals* [C]. *Mineralogical Society of America*, Washington D C, 62 : 193~230.

Kovács 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 [J]. *Am. Mineral.*, 93 : 765~778.

Krogh E J. 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer: a reinterpretation of existing experimental data [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99 : 44~48.

Kröner A. 1985. Evolution of the Archean continental crust [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 13 : 49~74.

Kröner A, Zhang G W and Sun Y. 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling Belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of Eastern Asia [J]. *Tectonics*, 12 : 245~255.

Liu Liang and Zhou Dingwu. 1994. Discovery and study of high pressure mafic granulites in Songshugou area of Shangnan, East Qinling [J]. *Chinese Science Bulletin*, 40(4) : 400~404.

- Liu Liang, Zhou Dingwu, Dong Yunpeng, *et al.* 1995. High pressure metabasites and their retrograde metamorphic P-T-t path from Songshugou area, eastern Qinling Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 127~136 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Zhou Dingwu, Wang Yan, *et al.* 1996. Study and implication of the high-pressure felsic granulites in the Qinling complex of East Qinling [J]. *Science in China (Series D)*, 26(Suppl): 56~63 (in Chinese with English abstract).
- Liu Pinghua, Liu Fulai, Wang Fang, *et al.* 2010. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of mafic high-pressure (HP) granulites from the Shandong Peninsula, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2039~2056 (in Chinese with English abstract).
- McCarthy T C and Patino Douce A E. 1998. Empirical calibration of the silica Catschermak's-anorthite (SCAN) geobarometer [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(5): 675~686.
- McLennan S M, Taylor S R and Hemming S R. 2006. Composition, differentiation, and evolution of continental crust: constraints from sedimentary rocks and heat flow [A]. Brown C D and Rushmer T. *Evolution and Differentiation of the Continental Crust* [C]. Cambridge University Press, 92~134.
- Newton R C, Smith J V and Windley B F. 1980. Carbonic metamorphism, granulites and crustal growth [J]. *Nature*, 288: 45~50.
- 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.
- Rietmeijer F M J. 1983. Chemical distinction between igneous and metamorphic orthopyroxenes especially those coexisting with Ca-rich clinopyroxenes: A re-evaluation [J]. *Mineralogical Magazine*, 47: 143~151.
- Rollinson H R. 2006. Crustal generation in the Archean [A]. Brown C D and Rushmer T. *Evolution and Differentiation of the Continental Crust* [C]. Cambridge University Press, 173~230.
- Rollinson H R. 2008. Secular evolution of the continental crust: implications for crust evolution models [J]. *Geoch. Geophys. Geosys.*, 9: Q12010.
- Rudnick R L. 1995. Making continental crust [J]. *Nature*, 378: 571~578.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective [J]. *Rev. Geophys.*, 33: 267~309.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution* [M]. Blackwell Scientific, Boston, 312.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Rev. Geophys.*, 33: 241~265.
- Thijsse B J, Hollanders M A and Hendrikse J. 1998. A Practical Algorithm for Least-Squares Spline Approximation of Data Containing Noise [J]. *Computers in Physics*, 12(4): 393~399.
- Thompson A B and Connolly J A. 1990. Metamorphic fluids and anomalous porosities in the lower crust [J]. *Tectonophysics*, 182: 47~55.
- Valley J W and O'Neil J R. 1984. Fluid heterogeneity during granulite facies metamorphism in the Adirondacks: Stable isotope evidence [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 85: 158~173.
- Waff H S and Bulau J R. 1979. Equilibrium fluid distribution in an ultramafic partial melt under hydrostatic stress conditions [J]. *J. Geophys. Res.*, 84: 6109~6114.
- Wang Jiangzhen. 1990. The metamorphic mineralogy and p-t conditions in Qinling Group from northern part of Tongbai, Henan Province [J]. *Journal of Chengde Geology College*, 17(1): 13~22 (in Chinese with English abstract).
- Wells P R A. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 62: 129~139.
- Wood B J and Banno S. 1973. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 42: 109~124.
- Xia Q K, Yang X Z, Deloule E, *et al.* 2006. Water in the lower crustal granulite xenoliths from Nushan, eastern China [J]. *J. Geophys. Res.*, 111.
- Xiang Hua, Zhang Li, Zhong Zengqiu, *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronology and metamorphism of mafic granulite from North Tongbai, central China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 348~358 (in Chinese with English abstract).
- Yang X Z, Deloule E, Xia Q K, *et al.* 2008a. Water contrast between Precambrian and Phanerozoic continental lower crust in eastern China [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: B08207.
- Yang Xiaozhi, Xia Qunke, Deloule E, *et al.* 2007a. Water in granulites: implications for the nature and evolution of the lower continental crust [J]. *Progress in Natural Sciences*, 17: 117~130 (in Chinese with English abstract).
- Yang X Z, Xia Q K, Deloule E, *et al.* 2008b. 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, Fan Qicheng, *et al.* 2007b. Water in Neoproterozoic and Mesozoic lower Continental crust, North China: A case study from Hannuoba [J]. *Geochemistry*, 36: 113~119 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaozhi, Xia Qunke, Fan Qicheng, *et al.* 2008. Rheology of the continental lithosphere and the effects of water [J]. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 96~112 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaozhi, Xia Qunke, Sheng Yingming, *et al.* 2005. Structural water in lower crustal granulite xenoliths from Nvshan volcano: Micro-FTIR investigation [J]. *Acta Petrol. Sinica*, 21(6): 1669~1676 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaozhi, Xia Qunke, Yu Huimin, *et al.* 2006. Origin of high electrical conductivity in the lower continental crust: structural water in minerals [J]. *Advance in Earth Sciences*, 21: 31~38 (in Chinese with English abstract).
- Ying J F, Zhang H, Kita N, *et al.* 2006. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Jünan, Shandong Province, China [J]. *Earth and*

Planetary Science Letters, 244(3-4):622-638.

Ying J F, Zhang H F and Tang Y J. 2010. Lower crustal xenoliths from Junan, Shandong province and their bearing on the nature of the lower crust beneath the North China Craton [J]. Lithos, 119(3-4):363-376.

Zhai Chun, Lin Jinhui and Gong Xiasheng. 1999. Origin and significance of Ti-rich amphibles in high-pressure granulites from southern Henan Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 19(1):63-69 (in Chinese with English abstract).

Zhai M G, Guo J H and Liu W J. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review [J]. J. Asian Earth Sci., 24:547-561.

Zhang Cuiguang, Wei Chunjing and Zhang Ali. 2002. The p-t conditions of granulite facies metamorphism in Tongbai area, Henan Province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(3):242-250 (in Chinese with English abstract).

Zhang H F, Gao S, Zhang L, et al. 1998. Granulite genesis and tectonic evolution in Tongbai area: single zircon evaporation ages and Nd isotopic geochemistry [J]. Journal of China University of Geosciences, 9(3):174-179.

Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Meng Fancong, et al. 2009. Paired high-pressure granulites and eclogites in collision orogens and their geodynamic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 25(9):2050-2066 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈丹玲, 刘良, 孙勇等. 2004. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 科学通报, 49(18):1901-1908.

陈孝德, 林传勇, 史兰斌, 2007. 华北北部下地壳的流变学特征——河北汉诺坝下地壳包体提供的信息 [J]. 中国科学(D 辑): 地球

科学, 37(5):593-604.

刘良, 周鼎武. 1994. 东秦岭商南松树沟高压基性麻粒岩的发现及初步研究 [J]. 科学通报, 39(17):1659-1661.

刘良, 周鼎武, 董云鹏, 等. 1995. 东秦岭松树沟高压变质基性岩石及基退变质作用的 PTt 演化轨迹 [J]. 岩石学报, 11(2):127-136.

刘良, 周鼎武, 王焰, 等. 1996. 东秦岭秦岭杂岩中的长英质高压麻粒岩及其地质意义初探 [J]. 中国科学, 26(增刊):56-63.

刘平华, 刘福来, 王舫, 等. 2010. 山东半岛基性高压麻粒岩的成因及变质演化 [J]. 岩石学报, 26(07):2039-2056.

王奖臻. 1990. 河南桐柏北部秦岭群中麻粒岩相变质作用及变质矿物温压条件的研究 [J]. 成都地质学院院报, 17(1):13-22.

向华, 张利, 钟增球, 等. 2009. 北桐柏地区镁铁质麻粒岩锆石 U-Pb 年代学及变质作用 [J]. 岩石学报, 25(2):348-358.

杨晓志, 夏群科, Delouie E, 等. 2007a. 麻粒岩中的水对大陆下地壳性质和演化的启示 [J]. 自然科学进展, 17:148-162.

杨晓志, 夏群科, 樊祺诚, 等. 2007b. 华北晚太古代和中生代大陆下地壳中的水: 以汉诺坝地区为例 [J]. 地球化学, 36:113-119.

杨晓志, 夏群科, 樊祺诚, 等. 2008. 大陆岩石圈的流变学性质和矿物中的水 [J]. 地学前缘, 15(3):96-112.

杨晓志, 夏群科, 盛英明, 等. 2005. 安徽女山下地壳麻粒岩包体中的水: 红外光谱分析 [J]. 岩石学报, 21(6):1669-1676.

杨晓志, 夏群科, 于慧敏, 等. 2006. 大陆下地壳高电导率的起源: 矿物中的结构水 [J]. 地球科学进展, 21:31-38.

翟淳, 林金辉, 龚夏生. 1999. 豫南高压麻粒岩中富钛角闪石类的成因和意义 [J]. 矿物学报, 19(1):63-69.

张翠光, 魏春景, 张阿利. 2002. 河南桐柏麻粒岩相变质作用的 p-t 条件 [J]. 岩石矿物学杂志, 21(3):242-249.

张建新, 于胜尧, 孟繁聪, 等. 2009. 造山带中成对出现的高压麻粒岩与榴辉岩及其地球动力学意义 [J]. 岩石学报, 25(9):2050-2066.