

文章编号: 1000-6524(2004)04-0289-09

超高压变质作用过程中的流体-岩石相互作用

——中国大陆科学钻探工程主孔(0~2050 m)岩心的氧同位素证据

张泽明¹, 肖益林², Jochen HOEFS², 高勇军²

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 德国哥廷根大学地学中心, 德国)

摘要: 中国大陆科学钻探工程主孔位于苏鲁超高压变质带南部的东海地区。该钻孔0~2050 m井段钻遇的岩石主要是榴辉岩、正片麻岩、副片麻岩和石榴石橄榄岩。激光原位氧同位素研究表明, 变质矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有显著的不均一性, 从-6.8‰变化至+7.5‰。空间上看, 从近地表至1000 m深度 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐降低, 向更深处又逐渐升高。位于钻孔1100~1600 m深度之间的正片麻岩是新元古代花岗岩体, 该岩体的侵入为表壳岩与低氧同位素大气降水之间的水-岩交换作用提供了热源, 并导致岩体附近的围岩发生了最强烈的水-岩蚀变, 因此具有极低的氧同位素值。研究还显示, 在厘米尺度内, 大多数超高压变质矿物之间具有平衡的氧同位素组成, 所获得的超高压峰期变质温度为700~882℃, 与矿物之间的主元素交换温度计获得的结果基本相同。超高压变形与变质分异、高压退变质作用及其伴生的局部流体活动可能是造成超高压变质矿物氧同位素不平衡的主要原因。研究进一步证明, 超高压变质岩原岩的异常低氧同位素特征在大陆板块的俯冲与折返过程中得以较好保存, 在超高压变质前期、同期和后期均没有大规模的透入性流体活动发生。与围岩呈构造接触关系的石榴石橄榄岩具有正常地幔岩的氧同位素成分, 它很可能是构造侵位到俯冲带之间的地幔楔状体, 并不具有与表壳岩相同的前超高压变质历史。

关键词: 超高压变质作用; 氧同位素; 流体-岩石相互作用; 岩心; 中国大陆科学钻探工程

中图分类号: P588.3; P597+.2

文献标识码: A

The fluid-rock interaction of UHP metamorphism: Oxygen isotopic study of the core rocks from the main hole (0~2050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project

ZHANG Ze_ming¹, XIAO Yi_lin², Jochen HOEFS² and GAO Yong_jun²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Geoscience Center, Goettingen University, Germany)

Abstract: The main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD) with a target depth of 5000 m is located in the southern segment of the Sulu ultra-high pressure (UHP) metamorphic belt in central eastern China. Nearly continuous core samples from the depth interval of 0~2050 m are UHP metamorphic rocks consisting of eclogite, paragneiss, orthogneiss (granitic gneiss) and garnet peridotite. In-situ laser oxygen isotope analyses of UHP minerals from drill cores indicate that the $\delta^{18}\text{O}$ values ranging from -6.8‰ to +7.5‰ gradually decrease from the surface to the depth of 1100 m and then increase with the increasing depth. Late Proterozoic granitic intrusion (orthogneiss) occurring at the depth interval of 1100~1600 m must have been a heat source for the fluid-rock interaction between the supracrustal rock and the low oxygen isotopic

收稿日期: 2004-05-24; 修订日期: 2004-07-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(973计划)(2003CB716501); 国家自然科学基金重大项目(40399142)

作者简介: 张泽明(1961-), 男, 研究员, 主要从事岩石学研究, E-mail: zzm@ccsd.org.cn.

meteoric water. Therefore, an extremely intense interaction between the granitic body and the country rock at the contact zone produced the lowest oxygen isotopic value in adjacent eclogite. Most UHP minerals show equilibrium oxygen isotopic compositions at a centimeter scale. Peak_UHP metamorphic temperatures are estimated at 700~ 882 °C by the oxygen isotopic thermometer. Deformation and different degrees of recrystallization during syn_UHP metamorphism and post_UHP retrogression as well as related local fluid interaction may be the main factors responsible for oxygen isotopic disequilibrium between UHP and retrograde minerals. Studies also demonstrate that the extremely low oxygen isotopic compositions of UHP minerals were preserved during the subduction and exhumation of the continental plate, and large scale fluid flow did not occur during the pre-, syn-, and post_UHP metamorphism. Garnet-peridotites nearly 80 m thick are in tectonic contact with supracrustal rocks and have oxygen isotopic values of normal mantle rocks. This suggests that, in contrast to the deeply subducted supracrustal rocks, the ultramafic rocks are a tectonic slice derived from the mantle wedge above the subduction zone and have not been subjected to the hydrothermal alteration with the low oxygen isotopic meteoric water.

Key words: UHP metamorphism; oxygen isotope; fluid-rock interaction; core; Chinese Continental Scientific Drilling Project

由于具极低氧同位素成分超高压变质岩的发现,在过去的十多年里,对大别-苏鲁超高压变质带的相关研究得到广泛开展(Yui *et al.*, 1995; Zheng *et al.*, 1996, 1998, 1999, 2003a; Baker *et al.*, 1997; Rumble & Yui, 1998; Rumble *et al.*, 2002)。研究证明,超高压变质岩的原岩曾经出露于地表,与低氧同位素的大气降水发生了水-岩交换作用。由于大陆板块具有很快的俯冲与折返速率,并在俯冲到最深处时停留时间很短(Zheng *et al.*, 2003a),尽管壳岩被俯冲到大于 100 km 的地幔,然后又折返回地表,但其原岩的地球化学特征却被较好地保存下来。超高压变质岩氧同位素成分的明显差异以及矿物流体包裹体研究(You *et al.*, 1996; Xiao *et al.*, 2000, 2001; Frantz *et al.*, 2001; Fu *et al.*, 2001, 2003; Zhang *et al.*^{①②})也说明,在超高压变质作用的前期、峰期和后期都没有大规模的透入性流体活动,俯冲的表壳岩与地幔岩之间及超高压变质块体内部均未发生过有意义的流体交换。同时,近年来的研究也表明,部分超高压变质矿物之间的氧同位素并不具超高压条件下的平衡特征,它很可能是在超高压变质岩的退变质过程中,由于通道式流体的加入发生了局部的流体-岩石相互作用,使超高压变质矿物的氧同位素成分被改变(Zheng *et al.*, 1999)。但这种推测还需要相关的研究加以证明。

本文利用原位氧同位素分析技术,对中国大陆科学钻探工程主孔 2 050 m 深度以上的超高压变质岩进行了较系统的研究,首次提供了超高压变质岩氧同位素成分在深度空间上的变化信息,初步揭示出氧同位素成分在厘米尺度内的变化特征,并结合深入的岩相学和年代学研究,对超高压变质岩氧同位素成分在宏观与微区尺度上的不均性进行了初步的成因分析,以此为超高压变质过程的流体来源与演化过程及壳-幔物质相互作用提供重要限定。

1 钻孔地质和岩石学特征

中国大陆科学钻探工程(CCSDB)主孔位于江苏省东海县东南 17 km 的毛北村附近(34°25' N, 118°40' E),构造上位于苏鲁超高压变质带的南部,设计井深为 5 000 m。本文研究的是该钻孔 2 050 m 深度以上井段的岩心,岩心采集率为 89% (0~ 100 m 没有取心)。该井段主要由榴辉岩组成,累积厚度达 1 200 m,其他岩石类型包括正片麻岩、副片麻岩、石榴石橄榄岩和少量的片岩和石英岩。根据岩石的空间组合及岩石化学成分特征,可将钻孔 100~ 2 050 m 井段划分成 7 个岩石单元(图 1)。第 1 单元(100~ 248 m)主要由含石英或多硅白云母榴辉岩组成,含有薄层状黑云母片麻岩、石榴石二云片麻岩夹层

① Zhang Z M, Xiao Y L, Liu F L, *et al.* Petrogenesis of UHP metamorphic rocks from Qinglongshan, Southern Sulu, East-Central China (in review).

② Zhang Z M, Shen K, Xiao Y L, *et al.* Fluid composition and evolution of UHP metamorphism: A case study of fluid inclusions of the drill cores in southern Sulu, Eastern China [J]. *Inter. Geol. Re.* (in press).

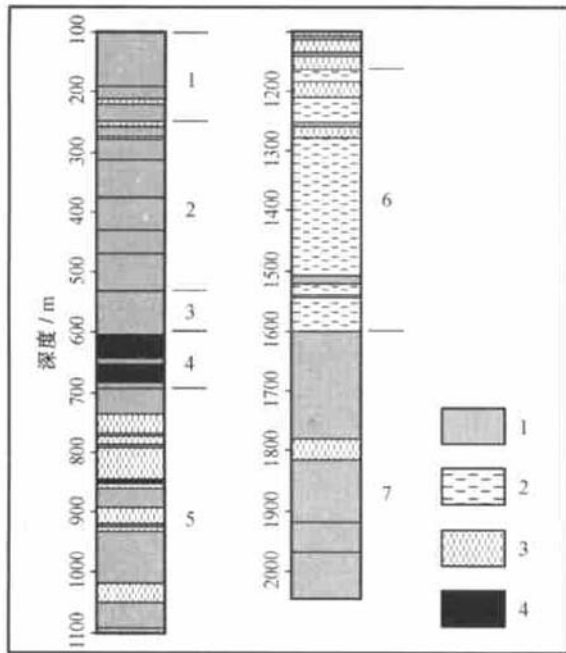


图1 中国大陆科学钻探工程主孔100~2050 m岩性柱状图及单元划分

Fig. 1 Lithological profile of the main hole (100~2050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project
1—榴辉岩; 2—副片麻岩; 3—正片麻岩; 4—超基性岩
1—eclogite; 2—paragneiss; 3—orthogneiss; 4—ultra-mafic rock

(图1); 第2单元(248~530 m)由3层含石英榴辉岩夹2层金红石榴辉岩组成, 具有少量的黑云斜长片麻岩和二云片麻岩夹层; 第3单元(530~600 m)由富金红石榴辉岩组成, 金红石含量可达8%~10%; 第4单元(600~695 m), 主要由石榴石橄榄岩组成, 含少量榴辉岩薄层体或透镜体; 第5单元(695~1160 m)由榴辉岩与副片麻岩呈互层状产出; 第6单元(1160~1600 m)主要由正变质的长英质片麻岩组成, 夹少量的榴辉岩或斜长角闪岩薄层; 第7单元(1600~2050 m)主要由榴辉岩组成, 具黑云斜长片麻岩和黑云二长片麻岩夹层。

榴辉岩的矿物组成主要是石榴石(Grt)和绿辉石(Omp), 含少量石英(Qtz)(或柯石英)、多硅白云母(Phn)、蓝晶石(Ky)、角闪石(Amp)、黝帘石(绿帘石)(Ep)、金红石(Rt)和锆石(Zr)。温、压计算结果表明, 榴辉岩的峰期变质温压条件是678~816℃和3.1~4.4 GPa。地球化学研究表明, 超高压变质岩

的原岩有3种类型(张泽明等, 2004): 第1种为变质表壳岩, 包括第1.5和7单元, 为变质的沉积-火山岩系; 第2种为层状基性侵入体, 包括第2和3单元, 它们都经历了复杂的分异结晶和变质分异改造; 第3种为地幔楔状体, 是第4单元超高压基性岩的原岩。钻孔中的正、副片麻岩均经历了超高压变质作用, 片麻岩的锆石中普遍含有柯石英包体, 有的还有石榴石、硬玉、绿辉石、多硅白云母和文石包体。锆石SHRIMP U-Pb定年结果表明, 正片麻岩的原岩形成时代为663~750 Ma, 超高压变质年龄为226~230 Ma, 角闪岩相退变质年龄为203~214 Ma(刘福来等, 2004)。

由表1可见, 本文所研究的样品主要是榴辉岩, 因为它可以较好地保存超高压变质阶段(UHP)的矿物组合。样品B505R377和B901R599是副片麻岩, 样品B695R483是典型的正片麻岩, 它们由角闪岩相(AM)变质矿物组成。值得注意的是, 大别-苏鲁超高压变质带普遍出现一种特殊的高压脉体, 在榴辉岩中呈透镜状、囊状或条痕状产出, 主要由石英、多硅白云母、绿帘石和角闪石组成, 可含少量的蓝晶石、石榴石、绿辉石和金红石。矿物组成和温压计算结果均表明, 高压脉体形成在高压榴辉岩相(HP)阶段, 即超高压变质岩抬升初期的退变质过程中(Cong *et al.*, 1996; Franz *et al.*, 2001; Zhang *et al.*^①)。此外, 在大别-苏鲁超高压榴辉岩中经常出现粗大的、富含石榴石、绿辉石包体的变斑晶角闪石和绿帘石(或黝帘石), 矿物包裹关系和矿物的化学成分特征均表明它们主要形成于高压退变质(HP)阶段。除样品B36R38P2b是高压脉之外, 表1中列出的高压阶段矿物在榴辉岩中呈变斑晶的角闪石、绿帘石和石英或石英集合体。除Amp为角闪石以外, 文中其他矿物代号据Kretz(1983)。

2 实验方法

矿物氧同位素分析由德国哥廷根大学地学中心氧同位素实验室采用激光原位分析技术完成。将分析样品切成长约15 mm、宽10 mm和厚2 mm的岩石薄片, 用蒸馏水在超声波中清洗干净, 然后在真空高温炉中(300℃)干燥一天以上。原位分析采用的

① Zhang Z M, Rumble D, Liou J, *et al.* Oxygen isotope geochemistry of rocks from the Pre-Pilot Hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD_PPH1) (in review).

表1 超高压变质岩的矿物组成及形成阶段

Table 1 Mineral assemblage and growth stages of the UHP metamorphic rocks

| 样号 | 深度/m | 岩石 | 超高压阶段矿物组成 | 高压阶段矿物组成 | 角闪岩相阶段矿物组成 |
|--------------|-------|-------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| B2R6P1a | 104 | 榴辉岩 | Grt, Omp, Rt | Qtz | |
| B36R38P2b | 167 | 高压脉 | | Omp, Phn, Qtz, Ep | |
| B153R131R1s | 352 | 榴辉岩 | Grt, Omp, Rt | | Sym |
| B237R206P1p | 493 | 退变榴辉岩 | Grt | Amp, Qtz | |
| B255R215P3a | 520 | 退变榴辉岩 | Grt | Qtz, Amp | |
| B287R235 | 572 | 榴辉岩 | Grt, Omp, Amp, Rt | | |
| B289R235 | 576 | 榴辉岩 | Grt, Omp, Rt | | Amp |
| B319R262P16a | 630 | 榴辉岩 | Grt, Omp, Rt | Amp | |
| B333R268P6 | 652 | 榴辉岩 | Grt, Omp, Phn, Rt | Amp | |
| B349R276 | 679 | 石榴橄榄岩 | Grt, Cpx, Opx, Ol | | |
| B505R377 | 928 | 片麻岩 | | | Grt, Bt, Ep, Qtz, Fel |
| B552R399 | 1 003 | 榴辉岩 | Grt, Omp, Phn, Rt | Ep, Amp, Qtz | Pl, Bt |
| B695R483 | 1 262 | 片麻岩 | | | Fel, Qtz, Ms, Bt, Ep |
| B901R599 | 1 731 | 片麻岩 | | | Fel, Qtz, Ms, Bt |
| B1018R641 | 1 940 | 榴辉岩 | Grt, Omp, Phn, Rt | | |
| B1033R645 | 1 964 | 榴辉岩 | Grt, Omp, Ky, Phn, Rt | | |

是 ArF 激光氟化技术, 分析原理见 Fiebig 等(1999), 分析过程与分析精度见 Xiao 等(2000, 2001) 详细描述。激光分析点的大小除石英为 500 μm 外, 其他矿物为 250~300 μm 。与传统的氧同位素分析方法相比, 原位分析技术不需要进行单矿物分离, 可以直接对岩石样品中的单个矿物进行分析, 因此可以揭示出氧同位素成分在毫米尺度上的变化, 对较大的矿物颗粒还可以进行氧同位素成分环带分析。

本文从 2 050 m 以上井段中选择了 16 个样品, 其岩石学特征见表 1, 代表性的矿物氧同位素分析结果见表 2, 氧同位素温度计算结果见表 3, 超高压变质矿物氧同位素组成与深度关系见图 2。

3 结果与成因探讨

(1) 氧同位素分析结果显示(表 2 和图 2), 各种超高压变质矿物氧同位素组成具有很大的变化范围, 如石榴石 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -6.8‰~+6.0‰, 绿辉石为 -5.2‰~+6.7‰, 石英为 -1.7‰~+7.1‰。而且, 除 1 700 m 以下的 3 个样品和第 4 单元中的石榴石橄榄岩和榴辉岩外, 其他样品均显示不同程度的低氧同位素特征。这进一步证明, 东海地区的超高压变质岩原岩在近地表条件下与具有极低氧同位素成分的大气降水发生过不同程度的水-岩交换作用(Rumble & Yui, 1998; Zheng *et al.*, 1998)。相邻样品之间明显的氧同位素成分差异, 也证明在超高压变质前期、峰期和后期都没有发生大规模的透入性流体流动。

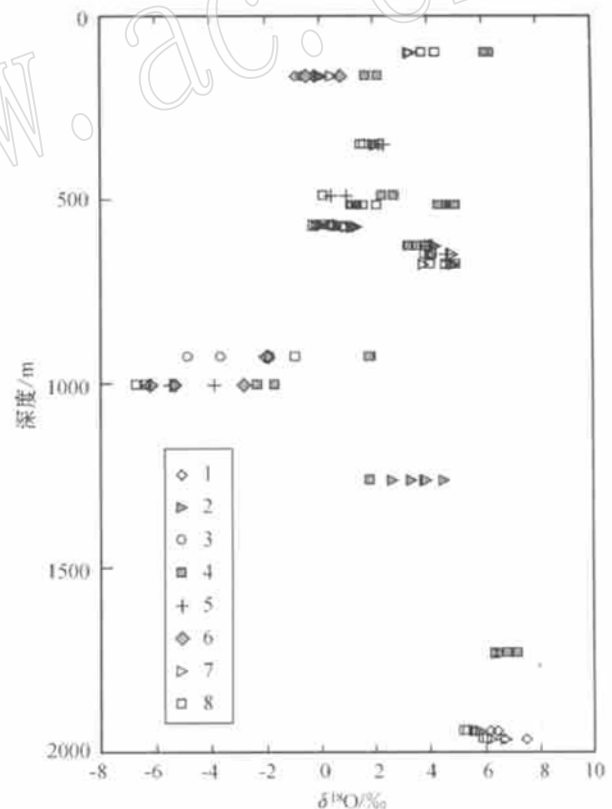


图2 超高压变质矿物氧同位素组成及样品深度

Fig. 2 Oxygen isotopic compositions of the UHP metamorphic minerals and sampling depths

1—白云母; 2—长石; 3—黑云母; 4—石英; 5—角闪石;

6—绿帘石; 7—绿辉石; 8—石榴石

1—muscovite; 2—feldspar; 3—biotite; 4—quartz;

5—amphibole; 6—epidote; 7—omphacite; 8—garnet

表 2 岩心样品的氧同位素组成

$\delta^{18}O/ \%$

Table 2 Oxygen isotopic compositions of minerals from the drill hole core samples

| 样品号 | 深度/m | Grt | Omp | Ep | Amp | Qtz | Ol | Bt | Mu | Fel |
|-------------|-------|----------------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|----------------|-----|----------------|------------|------------|
| B2R6P1a | 104 | 3.7 | 3.3 3.4 | | | 6.2 6.0 | | | | |
| B36R38P2b | 167 | | 1.1 1.0 | 0.8 0.5 | | 2.6 3.1 | | | 0.5 0.8 | |
| B153R131R1s | 352 | 1.5 1.6 | 2.1 2.0 | | 2.2 2.3 | | | | | |
| B237R206P1p | 493 | 0.1 0.1 | | | 1.0 0.4 | 2.2 2.7 | | | | |
| B255R215P3 | 520 | 1.3 1.5 | | | | 4.8 4.8 | | | | |
| B287R235_1 | 572 | 0.4 0.0 0.4 | 0.0 - 0.2 0.1 | | | | | | | |
| B289R235_4 | 576 | 0.8 0.6 | 1.3 1.1 | | | | | | | |
| B319R262P16 | 630 | 3.4 3.5 3.6 3.2 | 4.2 4.1 | | 4.0 3.9 4.0 4.1 | | | | | |
| B333R268P6 | 652 | 3.8 4.0 | 4.9 | | 4.6 4.7 | | | | | |
| B349R276/ 1 | 679 | 4.5 4.9 | 4.6 4.8 | | | | 5.0 | | | |
| B505R377_2 | 928 | - 1.9 | | - 1.9 - 2.0 | | 1.8 1.7 | | - 3.7 - 4.9 | | |
| B552R399_1 | 1 003 | - 6.5 - 6.8 - 6.4 - 6.3 | - 5.2 | - 5.3 - 6.2 - 2.8 | - 5.5 - 5.4 - 3.9 | - 2.4 - 1.7 | | | | |
| B695R483_1 | 1 262 | | | | | | | | | 3.8 3.9 |
| B901R599_1 | 1 731 | | | | | | | | | 6.4 6.6 |
| B1018R641_1 | 1 940 | 5.2 5.3 | 5.6 5.8 | | | | | | 6.4 6.2 | |
| B1033R645_1 | 1 964 | 6.0 5.9 | 6.7 6.2 | | | | | | 6.7 7.5 | |

表 3 根据氧同位素温度计(Zheng, 1993a 和 1993b) 计算出的各阶段变质作用温度

℃

Table 3 Metamorphic temperatures estimated by the oxygen isotopic thermometer (Zheng, 1993a and 1993b)

| 样品号 | 超高压阶段 | | 高压阶段 | | | 角闪岩相阶段 | | | |
|-------------|--------------|------------|---------|--------------|------------|------------|------------|--------|------------|
| | Qtz_Grt | Qtz_Omp | Qtz_Omp | Qtz_Ep | Qtz_Ms | Qtz_Amp | Qtz_Grt | Qtz_Ep | Qtz_Bt |
| B2R6P1a | 1 080 920 | 680 720 | | | | | | | |
| B36R38P2b | | | 958 | 767 692 | 676 592 | | | | |
| B237R206P1p | 882 | | | | | 929 753 | | | |
| B255R215P3 | 700 740 | | | | | | | | |
| B505R377_2 | | | | | | | 665 830 | 457 | 421 375 |
| B552R399_1 | 610 565 | 697 585 | | 570 1 140 | | 620 817 | | | |

(2) 从图2中可以看出,具最低氧同位素组成的榴辉岩样品(1 003 m)与第6单元,即正片麻岩(体)相邻,从这个样品向上和向下,氧同位素值都有逐渐升高的趋势,呈V字型分布。如果不考虑第4单元中的3个样品(630~ 679 m),这种分布形式更为明显。研究表明,超高压变质岩的原岩与低氧同位素大气降水发生水-岩交换作用的程度取决于温度。Rumble等(2002)和Zheng等(2003a)推测这个热源是新元古代形成的花岗岩侵入体。本研究证明,钻孔中第6单元就是一个形成在晚元古代的花岗岩体(663~ 750 Ma)(刘福来等,2004)。该岩体侵位提供的热量使位于接触带附近的岩石与大气降水发生了最为强烈的水-岩交换作用,使其具有最低的氧同位素成分,而远离接触带(向上)温度降低,水-岩相互作用程度逐渐减弱,氧同位素值逐渐升高。

(3) 石榴石橄榄岩和其中的榴辉岩具有正常地幔岩氧同位素组成,1 700 m以下的副片麻岩和榴辉岩具有正常变质岩的氧同位素成分,说明它们的原岩并未与大气降水发生相互作用。研究表明,石榴石橄榄岩(体)与围岩片麻岩之间为韧性剪切带,它很可能是通过构造运移到片麻岩之中的。在东海芝罘坊,与围岩呈构造接触的石榴石橄榄岩也具有正常的地幔岩氧同位素值,而围岩榴辉岩和片麻岩具有异常低的氧同位素值(Zheng *et al.*, 2003b; Zhang *et al.*^①)。有人认为石榴石橄榄岩直接来自于俯冲带之上的地幔楔状体,在超高压变质岩折返过程中被带到地表(Zhang *et al.*, 2000),并没有经历新元古代的水-岩相互作用。

(4) 在分析样品的尺度内(< 2 cm)中,超高压变质、高压退变质和角闪岩相退变质阶段形成的同类矿物多具有相同的氧同位素组成(表2和图3)。但在一个经历高压退变质的榴辉岩样品中(B552R399),尽管石榴石和绿辉石具有相同的氧同位素组成,但却是不平衡的。同时,样品中的高压变质矿物石英、绿帘石和角闪石的氧同位素值明显不同,最大差值可达3.4‰(图4)。在榴辉岩的高压退变质过程中,大量含水矿物的形成很可能说明有外来流体参与了变质反应。氧同位素成分的不均匀性和不平衡,很可能表明这种外来流体在局部的厘米尺度也是非透入性的。

(5) 对比研究表明,高压变质阶段形成的矿物基本上继承了原超高压变质岩的氧同位素成分特征,即超高压变质矿物的氧同位素值高,高压变质矿物的氧同位素值也高。这表明,即使在高压含水矿物的形成过程中有外来流体加入,但这种流体对全岩化学成分的改变也是有限的。

(6) 图5显示,有4个榴辉岩样品中的绿辉石与石榴石之间的氧同位素分配并没有达到平衡,它们之间的 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ (‰)不在0~ 1之间。观察表明,其中B2R6P1a和B552R399样品受到了明显的高压退变质改造,而另两个样品中石榴石与绿辉石分别富集呈条带状,并具有明显的矿物线理,表明经历了强烈的超高压变形和变质分异。因此,推测在流体存在条件下的变形与变质分异、高压退变质作用都会破坏超高压矿物之间的原始氧同位素平衡。

(7) 通过矿物原位氧同位素分析,可利用结构上平衡的相邻矿物对进行氧同位素温度计算。据相关的氧同位素温度计(Zheng, 1993a, 1993b)计算结果显示,绿辉石与石榴石之间氧同位素不平衡的样品B2R6P1a和B552R399获得了很大、且不合理的温度范围,进一步证明相应矿物对之间的氧同位素是不平衡的。排除这两个样品,所得出的超高压变质阶段的温度为700~ 882℃(表3),这与石榴石-绿辉石之间的Fe-Mg交换温度计获得的结果基本相同。对高压和角闪岩相变质阶段,氧同位素温度计获得的温度范围分别是592~ 958℃和375~ 830℃(表3),这样大的温度范围明显不合理,说明这些矿物之间的氧同位素成分并没有在相应的变质作用阶段达到平衡。

4 主要认识

在前人大量相关研究的基础上,本文来自深度空间的氧同位素研究结果进一步证明,由超高压变质岩原岩构成的巨量大陆壳物质,在被俯冲到地幔深度之前,在近地表环境下与低氧同位素组成的大气降水发生了不同程度的水-岩交换作用。同时,本文还得出以下几点重要认识:①晚元古代侵入的花岗岩体为表壳岩与大气降水之间的水-岩相互作用提供了热源,并在岩体与围岩的接触带发生了最

① Zhang Z M, Rumble D, Liou J, *et al.* Oxygen isotope geochemistry of rocks from the Pre-Pilot Hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD_PPH1) (in review).

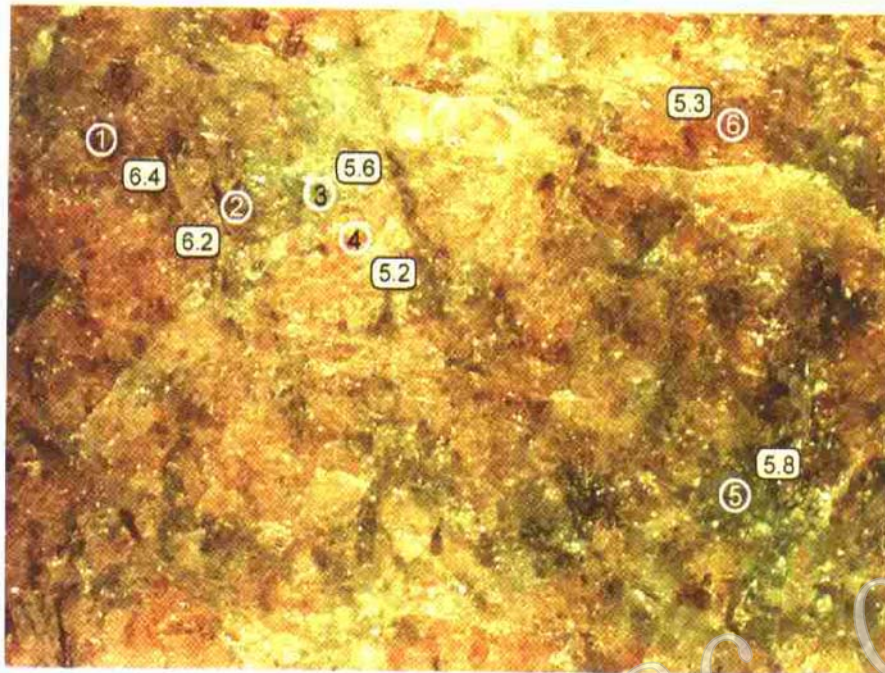


图 3 榴辉岩样品 B1018R641 氧同位素原位分析值

Fig.3 In-situ oxygen isotopic analyses of eclogite (Sample B1018R641)

分析点 4 和 6 为石榴石, 3 和 5 为绿辉石, 1 和 2 为多硅白云母, 图长边为 1.3cm

Analytical points 4 and 6 are garnet, 3 and 5 omphacite, and 1 and 2 phengite. side width of the diagram is 1.3 cm

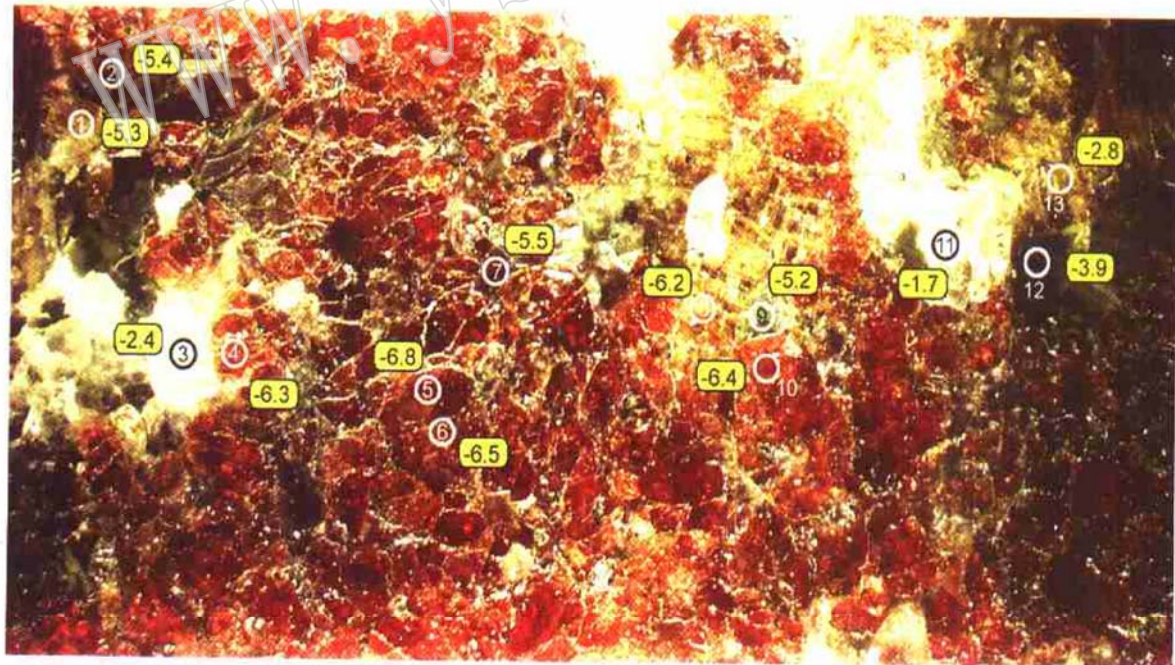


图 4 榴辉岩样品 B552R399 氧同位素原位分析值

Fig.4 In-situ oxygen isotopic analyses of eclogite (Sample B552R399)

分析点 4、5、6 和 10 为石榴石, 9 为绿辉石, 1、8 和 13 为绿帘石, 2、7 和 13 为角闪石, 3 和 11 为石英, 图长边为 1.5 cm

Analytical points 4, 5, 6 and 10 are garnet, 9 omphacite, 1, 8 and 13 epidote, 2, 7 and 13 amphibole, and 3 and 11 quartz, side width of the diagram is 1.5 cm

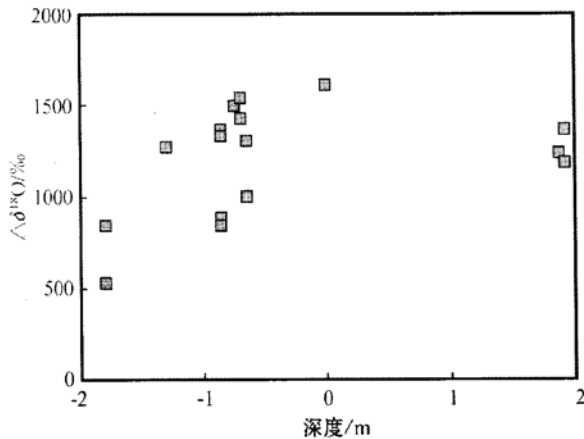


图5 榴辉岩中绿辉石与石榴石之间的 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ (‰) 与样品深度关系图

Fig. 5 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ (‰) between garnet and omphacite from eclogites in relation to sampling depths

强烈的水-岩交换作用; ②在厘米尺度内, 超高压变质矿物的氧同位素成分是均匀的, 并在超高压变质过程中达到了氧同位素平衡, 但局部的强烈超高压变形及变质分异、高压退变质可能是破坏超高压变质矿物氧同位素平衡的主要原因; ③高压退变质矿物基本上继承了原岩的氧同位素特征, 但由于局部的外来流体参与, 导致了厘米尺度内的氧同位素成分不均一; ④由于存在局部的氧同位素不平衡, 应该非常谨慎地使用氧同位素交换温度计获得的温度结果; ⑤东海地区的部分石榴石橄榄岩具正常的幔岩氧同位素组成, 它可能是构造运移到俯冲带之中的上覆地幔楔状体, 因此, 具有与变质表壳岩不同的前超高压变质演化历史。

致谢 本文是中国大陆科学钻探工程项目的部分研究成果, 得到了国家重点基础研究发展规划项目(973计划)(2003CB716501)、国家自然科学基金重大项目(40399142)和国土资源部项目(2002207)资助。笔者最诚挚地感谢许志琴院士、游振东教授、杨文采研究员、金振民教授、杨经绥研究员、刘福来研究员、J G Liou教授以及中国大陆科学钻探工程项目众多参加者的支持与帮助。

References

Baker J, Matthews A, Matthey D, *et al.* 1997. Fluid-rock interactions during ultra-high pressure metamorphism, Dabie Shan, China[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 1685~1696.

Cong B L, Zhang R Y, Liou J G, *et al.* 1996. Metamorphic evolution of UHPM rocks [A]. Cong B L. *Ultrahigh-Pressure Metamorphic*

Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China[C]. Beijing: Science Press, 128~160.

Fiebig J, Wiechert U, Rumble D, *et al.* 1999. High-precision in-situ oxygen isotope analysis of quartz using an ArF laser [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 687~702.

Franz L, Romer R L, Klemd R, *et al.* 2001. Eclogite-facies quartz veins within metabasites of the Dabie Shan (eastern China): pressure-temperature-time-deformation path, composition of the fluid phase and fluid flow during exhumation of high-pressure rocks [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141: 322~346.

Fu B, Touret J L R and Zheng Y F. 2001. Fluid inclusions in coesite-bearing eclogites and jadeite quartzite at Shuanghe, Dabie Shan (China) [J]. *J. Metamorph. Geol.*, 19: 529~545.

Fu B, Touret J L R and Zheng Y F. 2003. Remnants of premetamorphic fluid and oxygen isotopic signatures in eclogites and garnet clinopyroxenite from the Dabie-Sulu terranes, eastern China [J]. *J. Metamorph. Geol.*, 21: 561~578.

Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals [J]. *Am. Mineral.*, 68: 277~279.

Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, *et al.* 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent areal II. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 9~26 (in Chinese with an English abstract).

Rumble D and Yui T F. 1998. The Qinglongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu Province, China [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 3307~3321.

Rumble D, Giorgis D, Ireland T, *et al.* 2002. Low ^{18}O zircons, U-Pb dating, and the Qinglongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu Province, China [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66: 2299~2306.

Xiao Y L, Hoefs J, van den Kerkhof A M, *et al.* 2000. Fluid history of UHP Metamorphism in Dabie Shan, China: a fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 139: 1~16.

Xiao Y L, Hoefs J and van den Kerkhof Li S G. 2001. Geochemical constraints of the eclogite and granulite facies metamorphism as recognized in the Raobazhai complex from North Dabie Shan, China [J]. *J. Metamorph. Geol.*, 19: 3~19.

Yui T, Rumble D and Lo C. 1995. Unusually low $\delta^{18}\text{O}$ ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Su-Lu terrane China [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 2859~2864.

You Z D, Han Y J, Yang W R, *et al.* 1996. The High-pressure and Ultrahigh-pressure Metamorphic Belt in the East Qinling and Dabie Mountains, China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, China.

Zhang R Y, Liou J, Yang J, *et al.* 2000. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrane, eastern-central China [J]. *J. Metamorph. Geol.*, 18: 149~166.

Zhang Z M, Xu Z Q, Liu F L, *et al.* 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100~2050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 27~42 (in Chinese with an English abstract).

Zheng Y F. 1993a. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydrous silicate minerals [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 1079~1091.

Zheng Y F. 1993b. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 120: 247~263.

Zheng Y F, Fu B, Cong B, *et al.* 1996. Extreme ^{18}O depletion in eclogite from the Su-Lu terrane in east China [J]. *Eur. Mineral.*, 8: 317

~ 323.

Zheng Y F, Fu B, Li Y, *et al.* 1998. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ultrahigh pressure eclogites from the Dabie Mountains and the Sulu terrane [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 155: 113~ 129.

Zheng Y F, Fu B, Xiao Y L, *et al.* 1999. Hydrogen and oxygen isotope evidence for fluid-rock interactions in the stages of pre- and post-UHP metamorphism in the Dabie Mountains [J]. *Lithos*, 46: 677 ~ 693.

Zheng Y F, Fu B, Gong B, *et al.* 2003a. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime [J]. *Earth-Science Review*, 62: 105~ 161.

Zheng Y F, Yang J J, Gong B, *et al.* 2003b. Partial equilibrium of radiogenic and stable isotope system in garnet peridotite during ultrahigh pressure metamorphism [J]. *Am. Mineral.*, 88: 1 633~ 1 643.

附中文参考文献

刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别[J]. *岩石学报*, 20(1): 9~ 20.

张泽明, 许志琴, 刘福来, 等. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~ 2 050 m)榴辉岩岩石化学研究[J]. *岩石学报*, 20(1): 21 ~ 37.

中国矿物岩石地球化学学会环境矿物学专业委员会组成名单

| | | | |
|--------|-----|------|----------------------------|
| 主任委员: | 鲁安怀 | 教授 | 北京大学地球与空间科学学院 100871 |
| 副主任委员: | 曾荣树 | 研究员 | 中国科学院地质与地球物理研究所 100029 |
| | 王汝成 | 教授 | 南京大学地球科学系 210093 |
| | 朱立军 | 教授 | 贵州工业大学 550003 |
| | 王宁 | 研究员 | 中国科学院贵阳地球化学研究所 550002 |
| 委员: | 马鸿文 | 教授 | 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院 100083 |
| | 王长秋 | 副教授 | 北京大学地球与空间科学学院 100871 |
| | 王恩德 | 教授 | 东北大学资源与土木工程学院 110006 |
| | 孙振亚 | 教授 | 武汉理工大学材料研究与测试中心 430070 |
| | 朱杰勇 | 教授 | 昆明理工大学国土资源工程学院 650093 |
| | 刘羽 | 教授 | 武汉化工学院材料工程系 430073 |
| | 刘星 | 教授 | 昆明理工大学国土资源工程学院 650093 |
| | 许虹 | 副教授 | 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院 100083 |
| | 杨如增 | 教授 | 同济大学海洋与地球科学学院 200092 |
| | 吴大清 | 研究员 | 中国科学院广州地球化学研究所 510640 |
| | 何宏平 | 研究员 | 中国科学院广州地球化学研究所 510640 |
| | 陈天虎 | 教授 | 合肥工业大学资源与环境工程学院 230009 |
| | 邵龙义 | 教授 | 中国矿业大学北京校区资源与地球科学系 100083 |
| | 倪文 | 教授 | 北京科技大学土木与环境工程学院 100083 |
| | 秦善 | 教授 | 北京大学地球与空间科学学院 100871 |
| | 贾建业 | 研究员 | 广州地理研究所 510070 |
| | 温志坚 | 高工 | 核工业北京地质研究院 100029 |
| | 蒋引珊 | 教授 | 吉林大学材料科学与工程学院 130026 |
| | 葛学贵 | 教授 | 中国地质大学(武汉)材料化学学院 430074 |
| | 董发勤 | 教授 | 西南科技大学 621002 |
| | 蔡剑辉 | 副研究员 | 中国地质科学院矿产资源研究所 100037 |
| 秘书: | 王长秋 | (兼) | |