

# 大陆板块俯冲和折返过程中的流体活动： 稳定同位素证据

郑永飞

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室 中国科学技术大学  
地球和空间科学学院 安徽 合肥 230026

**摘 要** 对大别-苏鲁造山带超高压变质岩矿物稳定同位素的系统研究发现,超高压变质过程中存在少量含水流体,但是流体的活动性很小,在不同岩相界面之间缺乏明显的流体渗透。超高压榴辉岩中的石英脉是峰期变质后含水矿物降压分解和羟基出溶引起的流体流动结果,不是板块俯冲过程中进变质作用的产物。超高压变质岩经历了广泛的角闪岩相退变质作用,退变质流体主要来源于板块折返过程中超高压矿物中溶解羟基的降压出溶。

**关键词** 超高压变质 流体活动 结构羟基 稳定同位素

## Stable Isotope Evidence for Fluid Activity During Subduction and Exhumation of the Continental Crust

ZHENG Yongfei

*School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026*

**Abstract** Systematic studies involving stable isotopes, fluid inclusions and petrological phase relationships were conducted in the past few years with respect to the mobility and amounts of metamorphic fluids in UHP metamorphic rocks of the Dabie-Sulu orogenic belt. The results demonstrate that the fluid activity during the exhumation of deep-subducted continental crust has the following effects: ① amphibolite-facies retrogression due to pervasive fluid flow; ② formation of HP quartz veins within eclogites due to channelized fluid flow; ③ partial melting of overlying crustal rocks due to focused fluid flow, producing syn-exhumation magmatism within the orogenic belt.

**Key words** ultrahigh pressure metamorphism fluid activity structural hydroxyl stable isotope

在大洋板块俯冲过程中,蚀变的洋壳玄武岩及其上覆沉积物随着俯冲带温度和压力的升高,能够释放出大量的富水流体,不仅引起了大规模的同俯冲岛弧岩浆作用,而且在高压和超高压变质岩内部形成了丰富的同俯冲石英脉和变质矿床。与此相反,大陆板块由古老的结晶基底及其上覆沉积岩本身含水较少,在大陆板块俯冲过程中由于俯冲速率较快,少量的含水流体以结构羟基(OH)的形式进入在超高压变质条件下依然稳定的含水矿物(例如多硅白云母、黝帘石、钠闪石和硬柱石)和名义上的无水矿物(例如绿辉石、石榴石、金红石)中,因此难以释放出充分的流体交代上覆地幔楔形成岛弧岩浆岩。不过,在超高压板片折返过程中,由于压力突然降低,含水( $H_2O$ 和OH)的各种矿物会发生分解或

羟基出溶,能够引起角闪岩相退变质、形成榴辉岩内部石英脉甚至同折返岩浆岩等重要现象。本文根据大别-苏鲁造山带超高压变质岩矿物的稳定同位素分析,讨论了陆壳俯冲和折返过程中的流体活动性质及其地球化学效应。

### 1 退变质作用

大别-苏鲁造山带中的一些超高压榴辉岩矿物与退变质流体之间存在差异性氢和氧同位素交换。众所周知,含羟基矿物之间的氢同位素交换速率比同一体系下的氧同位素交换速率快得多。这表现为榴辉岩中多硅白云母与黝帘石之间的氢同位素不平衡,以及榴辉岩中绿辉石与石榴石之间的氧同位素不平衡。在中大别UHP/MT带双河地区的两类片

麻岩中,还发现了黑云母与绿帘石之间的氢同位素不平衡。超高压变质过程中流体流动的尺度基本上没有越过不同的岩相界限。

在大别-苏鲁造山带的一些超高压岩石样品中,依然能够观察到石英与其他矿物之间存在氧同位素平衡。这表明,从未经历过强烈退化变质蚀变的榴辉岩中,能够找到达到并保存氧同位素平衡分馏的矿物。在经历过角闪岩相叠加的退变质榴辉岩中,没有发现显著的氧同位素漂移现象。即使有外来流体参与退变质作用,它也与榴辉岩矿物达到或者接近同位素平衡。换句话说,退变质流体在氧同位素组成上已被内部缓冲,局域同位素组成取决于原岩组成,总体上继承了变质前原岩受大气降水高温热液蚀变的性质。

由于氢在绿帘石中的扩散速率比在云母中要快得多,因此绿帘石与云母之间的氢同位素不平衡是由氢扩散速率的差异引起的。而绿辉石与石榴石之间的氧同位素不平衡可由以下过程引起:①榴辉岩化过程中岩浆矿物的继承,例如由辉长岩转变成榴辉岩;②在绿辉石和/或石榴石中存在副矿物包裹体(例如金红石);③退化蚀变作用,例如绿辉石的后合成晶替代,并与退变流体发生不同程度的同位素交换。如果榴辉岩中发育角闪石和/或黑云母,氧同位素不平衡明显是由于退变质反应引起的,例如角闪石后成合晶替换绿辉石,黑云母替换多硅白云母,以及浅闪石/韭闪石的形成。

绿辉石与石榴石之间氧同位素分馏的不平衡程度随着石榴石( $\delta^{18}\text{O}$ 值的增加而稍微增大。这可能指示 $^{18}\text{O}$ 亏损程度越小,退变质反应程度越大,特别是那些具有类似地幔 $\delta^{18}\text{O}$ 特征的榴辉岩。在一些露头中,发现角闪岩/副片麻岩与榴辉岩夹层之间的接触带存在矿物学梯度,表明退变质反应发生在折返过程中,是由于沿着断层带或岩层的外来流体渗滤而导致榴辉岩变成角闪岩/副片麻岩的。不过,退变质流体在氧同位素组成上是内部缓冲的(即岩石缓冲体系),因此可能是源自先前存在的超高压含水相的出溶。因此,将大别造山带榴辉岩中石榴石的负 $\delta^{18}\text{O}$ 值归因于榴辉岩受到外来流体蚀变是成问题的。退变质反应不可能引起大别-苏鲁造山带中石榴石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现从 $-10\text{‰}$ ~ $+10\text{‰}$ 的巨大变化。

## 2 石英脉

结合石英脉和寄主岩石的结构和岩石学特征,同位素研究结果显示,石英脉在时间序列上可分为

以下3组:①同变质脉,不仅脉石英与围岩榴辉岩的氧同位素组成接近,而且脉中矿物对氧同位素温度与榴辉岩相峰变质温度一致,因此成脉流体源自寄主榴辉岩,形成于超高压榴辉岩从地幔深度折返到地壳深度过程中的高压榴辉岩相重结晶之前;②早期退变质脉,形成于高压榴辉岩相重结晶之后的板块折返第二阶段,成脉流体仍然与寄主榴辉岩有关;③晚期退变质脉,形成于榴辉岩从深部地壳到浅部地壳的晚期折返阶段,脉体石英与寄主榴辉岩之间的氧同位素分馏偏离平衡值,并且成脉流体主要来自榴辉岩的围岩花岗质正片麻岩。

根据大别-苏鲁造山带中石英脉和寄主榴辉岩(或片麻岩)的单矿物氧同位素分析,发现脉体石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值从 $-5.3\text{‰}$ 变化到 $+13.9\text{‰}$ ,对应地寄主岩石的全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现同步变化为 $-7\text{‰}$ ~ $+9.3\text{‰}$ 。大多数样品中脉体石英与寄主岩石之间存在氧同位素平衡分馏。不仅在大多数露头中石英脉的石英-矿物对氧同位素温度与寄主榴辉岩的重结晶温度一致,而且大多数脉体石英与寄主榴辉岩之间基本处于氧同位素平衡。脉体石英与寄主岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间可观察到明显的正相关趋势,指示二者之间具有成因联系。因此,大多数石英脉明显是从原地寄主岩石的内部缓冲流体中沉淀出来的。

高压变质石英脉与寄主榴辉岩之间已经达到或者接近氧同位素交换平衡。石英脉和附近的榴辉岩具有相似的矿物共生组合,指示石英脉形成于高压榴辉岩相重结晶作用之前的降压过程中,即板块从地幔深度折返到中地壳的过程中。在这种情况下,板块折返早期阶段的压力梯度比温度梯度更为显著,因此高压榴辉岩相重结晶之前的流体流动可能主要沿着压力梯度出现。高压石英脉的氧同位素数据进一步证明,大别-苏鲁造山带超高压变质作用期间流体流动以隧道式为特征,并且高压变质流体是由在板块俯冲之前原岩经历过大气降水热液蚀变的超高压榴辉岩和片麻岩中衍生而来的。流体在氧同位素组成上是不均一的,具体取决于寄主榴辉岩的特征。由于在进变质、峰期变质和退变质作用过程中矿物都存在结构水,因此不能排除流体的流动存在于峰期变质阶段,不过流体的流量是很小的。

## 3 退变质流体的来源

在榴辉岩折返过程中,硬柱石分解成蓝晶石+黝帘石/斜黝帘石+石英/柯石英,或者硬柱石+钠长石/硬玉分解成钠云母+黝帘石/斜黝帘石+石英/柯石英,这些过程也会释放出可观数量的水。硬

柱石是一种重要的含水矿物,可保存 11.2‰的水并且在超高压条件下稳定。尽管硬柱石尚未在大别-苏鲁超高压岩石中直接发现,但是已经在南大别黄镇地区含柯石英假象榴辉岩中发现其分解产物蓝晶石+黝帘石+石英组合,指示了降压过程中含水流体的释放。在黄镇和青龙山低  $\delta^{18}\text{O}$  值(分别是 -4‰和 -10‰)榴辉岩中,黝帘石及其包裹的石英依然保存有原生低盐度流体包裹体,并且这些低盐度流体包裹体中偶尔含有金红石、锆石、磷灰石和方解石等矿物,因此是超高压岩石折返早期硬柱石分解过程中黝帘石形成期间所捕获的含水流体,在本质上类似于变质前古大气降水的残余。这也为高压榴辉岩相成脉作用和角闪岩相叠加蚀变提供了退变质流体的来源。

赋存有  $\text{H}_2\text{O}$  和/或  $\text{OH}$  的深部地壳和地幔矿物,可以从冰到含水矿物到名义上不含水的矿物。蓝闪石、亚蓝闪石、角闪石、白云母和黑云母都是榴辉岩形成之前矿物集合体中的重要含水相。然而,它们在典型的深俯冲带条件下会发生脱水反应,超高压条件下只有多硅白云母能够稳定存在。不过,以往在大别-苏鲁造山带的一些含柯石英的岩石中发现作为基质相或矿物包裹体产出的多硅白云母、钠闪石(蓝闪石/nyboeite)、绿帘石/黝帘石、滑石、Ti-斜硅镁石以及羟基型黄玉,表明这些含  $\text{OH}$  矿物在超高压条件下依然稳定,因此可在上地幔深度仍然保存来自变质前原岩中的大量  $\text{H}_2\text{O}$ 。业已表明,在地幔压力条件下,榴辉岩中的辉石、石榴石和金红石能够保存一定量的  $\text{H}_2\text{O}$  (从几十  $\times 10^{-6}$  到几百  $\times 10^{-6}$  甚至到几千  $\times 10^{-6}$ ),这些水以晶格内部的结构羟基形式存在。

对大别造山带碧溪岭和双河榴辉岩的分析得到,绿辉石含  $(115 \sim 200) \times 10^{-6} \text{H}_2\text{O}$ ,金红石中含  $(4300 \sim 9600) \times 10^{-6} \text{H}_2\text{O}$ 。对碧溪岭榴辉岩的进一步分析发现,其中石榴石结构羟基的含量变化范围较大,为  $(164 \sim 2034) \times 10^{-6} \text{H}_2\text{O}$ ,其中多数在  $500 \times 10^{-6}$  以上。对大别造山带硬玉石英岩中硬玉的分析表明,其核部羟基含量较高  $[(1200 \sim 3894) \times 10^{-6} \text{H}_2\text{O}]$ ,而幔部和壳部较低  $[(212 \sim 1422) \times 10^{-6} \text{H}_2\text{O}]$ 。对苏鲁造山带毛北榴辉岩分析得到,绿辉石含  $(1000 \sim 1300) \times 10^{-6} \text{H}_2\text{O}$ ,金红石中含  $(6000 \sim 8000) \times 10^{-6} \text{H}_2\text{O}$ 。大量的实验研究证明,名义上无水矿物中羟基的溶解度一般随着压力的降低而减小。对哈萨克斯坦 Kokchetav 超高压榴辉岩的 FTIR 分析表明,单斜辉石中  $\text{OH}$  的含量随着压力的增加而增加,例如含石英榴辉岩中为

$(1110 \sim 1030) \times 10^{-6}$ ,含柯石英榴辉岩中为  $(2430 \sim 1690) \times 10^{-6}$ ,含金石榴辉岩中达  $3020 \times 10^{-6}$ 。可以预料,在超高压板片折返初期,随着压力突然降低,名义上无水矿物中羟基的溶解度会迅速减小,从而释放出可观的含水流体。因此上述水量只是对地幔深度矿物溶解羟基的最小估计,因为在榴辉岩折返过程中的压力降低会使大量的羟基从超高压矿物中释放出来。由这些释放羟基所形成的含水流体能够形成弥散式或隧道式流体流动,并且由于羟基本身不含盐而则以低盐度为特征。

对大别山双河地区两种不同  $\delta^{18}\text{O}$  值榴辉岩的流体包裹体研究发现,低  $\delta^{18}\text{O}$  值( $< 2\text{‰}$ )榴辉岩以富含高盐度流体包裹体为特征,而高  $\delta^{18}\text{O}$  值( $> 5.5\text{‰}$ )榴辉岩相对富含低盐度流体包裹体。对这些高  $\delta^{18}\text{O}$  值榴辉岩及其围岩榴闪岩和片麻岩的岩石学研究表明,二者之间为退变质成因关系,即超高压榴辉岩通过角闪岩相退变质原地转化成榴闪岩和片麻岩。超高压岩石折返过程中羟基的降压出溶提供了这种弥散式角闪岩相退变质所需要的含水流体,高  $\delta^{18}\text{O}$  值榴辉岩中低盐度流体包裹体的产出就是这种含水流体相对聚集的见证。

当板块俯冲进入地幔深度时,水不仅以羟基的形式进入到无水矿物(如绿辉石、石榴石和金红石)和含羟基矿物(如多硅白云母、黝帘石与蓝闪石中),而且作为流体包裹体存在于各种超高压矿物中。在超高压变质过程中,无水物和含羟基矿物中以羟基形式存在的水是不活动的。一旦出现由板块抬升引起的压力降低,无水矿物中的羟基就会释放出来并与寄主矿物发生反应,导致其溶解和重结晶。由于羟基比含羟基矿物中的无水硅酸盐显著亏损  $^{18}\text{O}$ ,因此可以合理地假定名义上无水矿物中的结构羟基相对于寄主矿物亏损  $^{18}\text{O}$ 。在这种情况下,重结晶矿物(后成合晶)和羟基化矿物(如角闪石、黑云母与黝帘石)与原来的矿物相比较就亏损  $^{18}\text{O}$ 。所以,这不仅导致经历退变质反应的榴辉岩矿物之间出现存在氢氧同位素不平衡,而且导致同一产地的榴闪岩和与其共生的榴辉岩之间出现小的  $\delta^{18}\text{O}$  差异。

#### 4 大陆板块折返过程中的流体效应

由于在地幔深度大量的结构羟基能够溶解进入名义上的无水矿物中,含水流体在超高压板片折返初期阶段会随着压力的降低通过羟基出溶作用而释放出来。在峰期超高压相到高压榴辉岩相的退变质过程中,在压力和时间上均存在巨大差异,这就使在折返初期从降压板块中脱水释放大量含水流体成为

可能。因此,羟基能够成为退变质作用中一个重要的流体催化剂。加上来自先前存在的流体包裹体和含羟基矿物的流体,一起构成了退变质流体的重要来源。在多种地球化学过程中,含羟基的名义上无水矿物在同位素行为上与含羟基矿物相似。因此,可以预料羟基与实际无水硅酸盐之间存在显著的氧同位素分馏,从而导致绿辉石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现不同程度的降低。同样,在出溶的羟基与含羟基矿物之间会出现氢同位素退化交换,引起榴辉岩中片麻岩中云母与绿帘石之间的不平衡分馏。

同样地,榴辉岩内形成高压变质石英脉的流体主要来自板块抬升初期由于压力突然降低而出溶的羟基。脉体石英与寄主榴辉岩之间的氧同位素不平衡分馏或者说明流体在大于露头尺度上流动,或者反映由于脉体石英和寄主榴辉岩显著的退变质效应引起的不同温度下的脉体内多相流体流动。无论在哪一种情况下,板块折返过程中退变质流体或多或少与岩石系列一起发生再循环。高压和超高压变质岩在折返过程中会出现水化作用或者脱水作用,具体取决于包括退变质 $P$ - $T$ 轨迹、岩石的全成分和先前的地质历史在内的一些因素。

前人曾经将南大别 HP/LT 带北缘低温榴辉岩中的石英脉解释为板块俯冲的进变质过程中脱水反应所形成。这是基于这样一个常见假设,即高流体压力引起的拉张作用导致同变质石英脉的形成。然而,在大别-苏鲁造山带的超高压变质过程中,快速俯冲并不有利于去挥发份反应,因此不可能在峰期超高压变质之前形成同变质石英脉。进一步,在超高压变质的进变质阶段,当压力尚处于金刚石稳定域之下时,岩石已经达到最高温度。因此,在折返初期,榴辉岩沿着近似等温降压的轨迹,而对麻粒岩来说则沿着升温降压的轨迹。高的流体压力能够由折返初期的降压和/或升温过程中的退变质脱水反应产生,从而形成超高压岩石中的水动力学裂隙。这些退变质反应会通过含水矿物的分解和名义上无水矿物中结构羟基的出溶而产生和释放出变质流体。

这些流体会在变质剖面中主要沿着压力梯度向上运移。流体流动的速率与压力变化速率相比是快速的。这样,深部释放的流体不仅能在不同的地壳深度沉淀出脉体物质,而且能在下到中地壳深度叠加超高压矿物。

此外,俯冲板块断离后,从深部折返板块中释放的流体可以水化上覆板块和邻近的地幔。这可出现在促进板块断离之后的软流圈地幔上涌过程中,由于上覆地幔和折返板块自身的部分熔融,导致同折返花岗岩的形成。事实上,麻粒岩相变质是以脱水作用为特征,因此与花岗岩浆的形成是有关联的。已经在北大别 HP/HT 带角闪岩相正片麻岩中发现以包体形式产出的麻粒岩相岩石,在苏鲁地体 UHP/HT 带则以含柯石英榴辉岩相叠加的形式存在。大别-苏鲁造山带麻粒岩相叠加的 $P$ - $T$ 轨迹明显落在能够使镁铁质和长英质岩石熔融的深熔区域。这意味着麻粒岩相变质可能以晶体-液体过程为主,而不是固态转变为主。因此,花岗质部分熔体在晚三叠世的形成可以是与折返板块脱水作用有关的麻粒岩形成的多种反应的结果。

折返板块的脱水作用和麻粒岩相退变质作用能够为上覆地壳和地幔岩石提供充足的流体引起部分熔融。不过,这些部分熔体的数量、动力学性质和化学组成取决于源岩的化学特征、熔融反应的性质、流体相存在与否(及其组成),以及温度和压力。实验岩石学研究表明,俯冲板块中的变玄武岩即使在流体缺乏的条件下也能够出现部分熔融,少量硅质熔体可以通过斜黝帘石的脱水熔融产生,而少量钾质熔体则可以通过多硅白云母的脱水熔融形成。后者可能是秦岭-大别-苏鲁造山带晚三叠世相对富钾花岗岩形成的机制,对应于同折返岩浆作用,而不是同俯冲岩浆作用。然而,目前尚不清楚这种同折返岩浆是怎样从地壳深部源区穿过 10~40 km 的上覆折返板块向上运移并侵入到造山带中高压或超高压岩石附近的。