

文章编号 1004-5589(2003)03-252-06

## 超高压变质岩中柯石英→石英相变研究的进展

龙卧云 孟大维

中国地质大学, 武汉 30074

**摘要** 柯石英是石英的高压同质多相变体, 是超高压变质作用的产物, 它是识别超高压变质作用的重要标志矿物。柯石英的发现表明了近地表的岩石随板块运动曾被俯冲至地下大于 90 km 的深度并经历了超高压变质作用。研究柯石英→石英相变过程中的微结构变化, 对进一步研究超高压变质作用的机理及超高压变质岩折返过程的动力学机制具有重要意义。本文简述了近年来有关超高压变质岩中柯石英→石英相变研究的一些进展。

**关键词** 柯石英 超高压变质作用 退变质 放射状裂纹

**中图分类号** P571

**文献标识码** A

### Advance of Study on Coesite→Quartz Transition in Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks

Woyun Long, Dawei Meng

China University of Geosciences, Wuhan, 430074 China

**Abstract** Coesite is a polymorph of silica existed in high pressures. Coesite is the result of ultrahigh-pressure metamorphism. Coesite is an important mineral often used to judge the ultrahigh-pressure metamorphism. The discovery of coesite bearing rocks indicates that the rocks near the Earth's surface have been subducted to the depth of more than 90 km by plate movements, and experienced ultrahigh-pressure metamorphism there. Understanding the structural changes during the transition from coesite to quartz is very important for studying the mechanism of the ultrahigh-pressure metamorphism and the kinetic mechanism on how the ultrahigh-pressure metamorphic rocks exhumate to the Earth's surface. This paper reviews briefly some advances of the studies on the transition from coesite to quartz in ultrahigh pressure metamorphic rocks.

**Key words** coesite, ultrahigh-pressure metamorphism, retrogressive metamorphism, radial cracks

## 引言

超高压变质作用是在柯石英稳定条件下进行的榴辉岩相变质作用<sup>[1]</sup>, 一般认为岩石中是否含有柯石英是鉴别该岩石是否经历超高压变质作用最直接的标志。柯石英最初由 Coes(1953)在实验室人工合成, 随后 Chao(1960)在美国 Arizona, Meteor 陨石

坑中发现了天然的柯石英<sup>[2]</sup>。自 Chopin(1984)和 Smith(1984)分别在西阿尔卑斯的变质沉积岩和挪威西部片麻岩区高压榴辉岩中发现柯石英以来, 超高压变质作用的研究已成为固体地球科学的热点之一<sup>[3]</sup>。近年来地质学家们又相继在世界上很多地区的超高压变质岩中发现了柯石英或其假象, 到目前为止世界上已确证的超高压变质地体多达 14

收稿日期 2003-07-09; 改回日期 2003-09-03

作者简介 龙卧云(1977-), 男, 湖南隆回人, 硕士研究生, 从事材料物理研究。

个<sup>[1]</sup>。我国的苏鲁—大别地体则由于其出露规模大、保存程度好、岩性多样化等而成为世界上最著名的超高压变质带<sup>[3]</sup>。柯石英或其假象的发现,改变了人们以往对地壳岩石变质条件范围的认识,导致了超高压变质研究热潮在全球广泛兴起。

柯石英是石英的高压同质多形体,它是超高压变质作用的产物,常以包裹体的形式存在于超高压变质岩矿物中,如石榴石、绿辉石和锆石等。柯石英常因双重折射率低、表面高突起、电子束照射下发蓝光等特征而与石英相区别,但与石英最明显的区别是柯石英的特征拉曼最强谱峰位于  $521\text{ cm}^{-1}$ ,而石英相应的特征最强谱峰位于  $465\text{ cm}^{-1}$ 。

## 1 柯石英的形成及其结构特征

柯石英通常稳定在温度为  $700^{\circ}\text{C}$  左右,压力大于  $2.8\text{ GPa}$  的条件之下<sup>[4]</sup>。据此科学家们推断含柯石英的地壳岩石在出露地表之前曾被俯冲到地下深处而经受超高压变质作用,所以一般认为含柯石英的岩石是变质成因的。

柯石英的形成需要很高的压力( $P > 2.8\text{ GPa}$ ),在自然界中,除了陨石的巨大冲击作用外,只有在地下大于  $90\text{ km}$  深处的高压环境下才能形成柯石英。也有学者(吕古贤等,1998)认为,超高压变质岩可由构造超压而形成,因而认为超高压变质岩的形成不需要俯冲到大于  $90\text{ km}$  的深度,并估算出大别山柯石英榴辉岩的形成深度在  $32\text{ km}$  左右<sup>[5]</sup>。但据王清晨等(1999)的研究表明,构造超压的最高估计值为  $0.8\text{ GPa}$ ,据此推算出构造超压不可能造成超高压变质作用,因而认为有关超高压变质岩的形成深度在  $32\text{ km}$  左右的认识是不正确的<sup>[6]</sup>。

柯石英晶体属于单斜晶系,其空间群为  $C2/c$ ,常压下具有一个假六边形的晶胞尺寸( $\beta \approx 120^{\circ}$ ,  $a$ 、 $c$  轴长度近似相等)。尽管如此,却并不能将柯石英看成是假六方形矿物,Langenhorst 等(2002)认为这是因为其晶体结构中没有三或六元环或螺旋轴<sup>[7]</sup>。柯石英晶体的性质是各向异性的,当外压改变时,其  $a$  轴方向的变化量要大于  $c$  轴方向的变化量。柯石英晶体为二轴晶正光性,其密度和折射率的值均高于石英相应的值。

同石英一样,柯石英的构成单元也是  $[\text{SiO}_4]$  四面体,但组成柯石英的  $[\text{SiO}_4]$  四面体较组成石英的  $[\text{SiO}_4]$  四面体要难于变形,表明在相同的  $P-T$  条

件下柯石英的强度要大于石英的强度。Ingirn 等(1986)在用透射电镜观察西阿尔卑斯石英—柯石英包体时发现柯石英晶体表现出低位错密度,而石英却表现出高位错密度,这表明了柯石英粒子在包入寄主矿物的前后没有或只发生了轻微的塑性形变,而石英却发生了较大的塑性形变,从而可知在相同的  $P-T$  条件下,柯石英的强度要大于石英的强度<sup>[8]</sup>。Langenhorst 等(2002)对阿尔卑斯 Dora Maira 地块高压变质镁铝榴石石英岩中柯石英包体的透射电镜研究也得出了相同的结论<sup>[7]</sup>。赵中岩等(2002)也观察到在寄主矿物中柯石英大多已退变为石英聚体,但仍保持浑圆状颗粒形态,这表明其未发生明显的塑性形变<sup>[9]</sup>。

## 2 柯石英→石英的相转变

### 2.1 相变的原因和步骤

不少同质多相变体间的结构转变需要很高的能量,因而相转变通常只发生在高温或高压的条件下。研究发现石英、柯石英在一定条件下可相互转变,转变受地质温压条件的限制。李如璧(1997)参考 Stixrude 的 ORM 模式计算出了在常压( $0.1\text{ MPa}$ )条件下,石英的势能态值较柯石英的势能态值要低,即石英更稳定,故在低压条件下相变方向为柯石英→石英;而在高压( $6\text{ GPa}$ )条件下时,柯石英的势能态值较石英的势能态值要低,故在高压条件下相变的方向变为石英→柯石英<sup>[10]</sup>。由于柯石英在低压条件下是不稳定的,当其随寄主矿物从地球深处折返回地表的过程中,随围岩压力的逐步减小,柯石英便会发生退变质反应,退变为石英。正是由于柯石英在常压条件下的不稳定性,而使得在变质岩折返的过程中柯石英很少能保存下来,绝大部分都已退变为石英了。

由于表面的原子活性比较大,因而在柯石英包体表面上退变石英成核所需的能量要小于其在包体内部成核所需的能量,退变质反应应是从柯石英包体的边界开始的,并逐步向包体的中心进行。王道轩等(2001)观察到柯石英包体外层为较早世代的多晶石英,而内层为较晚世代的多晶石英<sup>[11]</sup>;Parkinson(2000)在观察石榴石中的柯石英包体时发现,包体核部的裂纹极小,而在包体的边缘区域却很明显<sup>[12]</sup>。这些实验都充分地说明了退变反应是从包体边界开始的。一般超高压变质岩中柯石英包体都

已或多或少地退变为石英集合体,中心的残余柯石英通常被一圈典型的辐射状多晶石英所包围<sup>[8]</sup>,有时甚至还可完全退变为石英。

在柯石英向石英退变的初始阶段,石英在柯石英包体的边界聚集成核,所形成的石英具有栅状结构,以柯石英残余为中心向外呈辐射状地排列在包体的周围。这种栅状结构通常是由极细晶粒的石英晶体辐射状地排列在柯石英周围而形成的<sup>[13]</sup>。一般将这种石英称之为聚晶石英,也称之为柯石英假象,而这种辐射状的细粒结构被认为是判断其是否由柯石英转变而来的依据<sup>[1,14]</sup>。这种早期生成的石英通常具有典型的拉长状,且其长轴垂直于柯石英颗粒与寄主矿物之间的边界<sup>[15]</sup>。类似的,Zhang等(2003)在观察天山西部榴辉岩中的多晶石英聚体时发现,这种具有栅状结构的细粒多晶石英聚体被辐射状裂隙所包围,而且细的石英晶粒被拉长而垂直于包体的中心<sup>[16]</sup>。随着退变质反应的进一步进行,栅状结构的石英粒子逐渐粗化成镶嵌状结构的石英粒子,形成多晶石英。王道轩等(2001)观察到,柯石英包体外层的多晶石英结晶良好、晶粒较大且其长轴方向垂直于包体的周边呈放射状排列;而内层较晚世代的多晶石英则结晶较差且晶粒细小,显示典型的柯石英假象结构<sup>[11]</sup>。多晶石英聚体还可

重新结晶形成颗粒较大、自形程度较好的石英单晶。Mosenfelder(1997)的实验研究表明,柯石英通过栅状石英聚体和石英镶嵌结构交互生长向单晶石英的连续转变依赖于退变的程度<sup>[15]</sup>。Hacker等(1997)的研究表明,部分退变的柯石英包体被上千个拉长的呈辐射状排列的石英颗粒所包围,随柯石英被消耗掉后,石英颗粒逐渐聚合变粗<sup>[17]</sup>。Langenhorst等(2002)在部分的柯石英中还发现有呈正交状的石英细脉存在<sup>[7]</sup>。

## 2.2 相变过程中的特征结构

由于柯石英的密度比石英的密度大,故在退变过程中,柯石英包体的体积会膨胀变大(约10%)。在寄主矿物有限的空间里,这种膨胀会使得包体承受一个较寄主矿物高的压力值,因而包体会对寄主矿物产生一个张应力的作用。当这个应力值超过了寄主矿物的最大承受值后,就会使寄主矿物发生胀裂,这样便会在寄主矿物中形成以柯石英包体为中心的特征辐射状裂纹,裂纹向外延伸逐渐变细可一直达到寄主矿物晶粒的边界,从而在寄主矿物中形成所谓的胀裂结构。由于刚性寄主矿物的良好脆性,故一般在高强度的刚性矿物中裂纹发育得比较明显,刚性矿物中典型的裂纹如图1所示。从图1可看出,柯石英包体的外部边界已退变为石英,残余

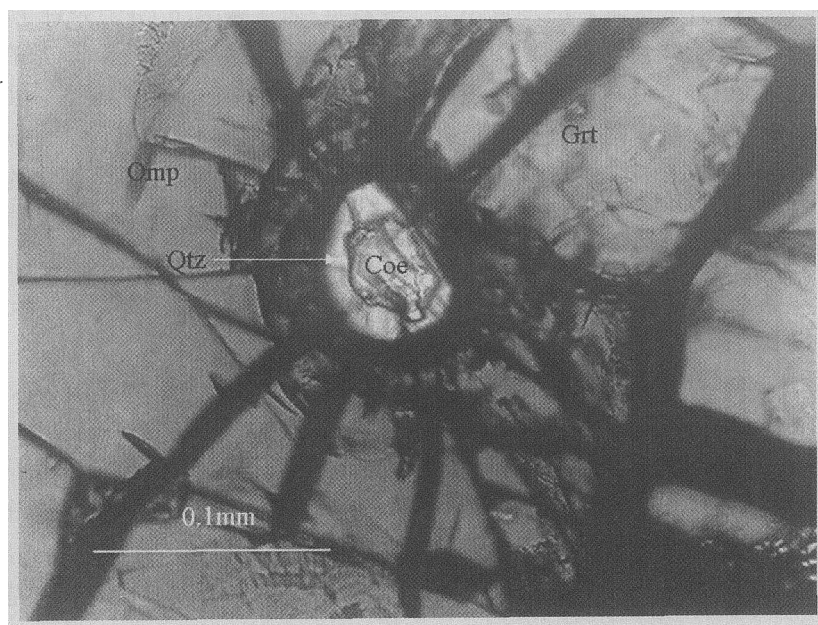


图1 大别山榴辉岩绿辉石中柯石英包体显微照片(Omp:绿辉石;Qtz:石英;Coe:柯石英;Grt:石榴石)

Fig.1 Micrograph of coesite inclusion in the eclogite omphacite from Dabie Mt.

(Omp:omphacite; Qtz:quartz; Coe:coesite; Grt: garnet)

的柯石英被一圈退变质石英所包围。与周围的石英相比,可以看出柯石英具有明显的高突起。另外,在柯石英包体周围发育有明显的特征辐射状裂纹,裂纹以包体为中心向外辐射,一直延伸到寄主矿物绿辉石的边界。由于体积的增大,使得与柯石英包体邻近的石榴石中也发育了明显的裂纹。寄主矿物中裂纹的产生,不仅为新生石英的聚集成核提供了场所,同时也使得柯石英包体所承受的高的压力得到释放,这又会促使退变反应的进一步进行。

赵中岩等(2002)的实验指出,柯石英包体中的裂纹并不切穿退变的石英反应边和寄主矿物,认为寄主矿物的破裂发生在柯石英的稳定域,而柯石英向石英的退变发生在破裂之后<sup>[9]</sup>。这与众多学者所认为的寄主矿物的破裂是由于柯石英退变过程中体积增大而引起的观点恰好相反,这或许是在退变之前由于寄主矿物受到高的静岩压力和高温下膨胀而致破裂。

柯石英包体周围的这种特征辐射状裂纹常可用来判断柯石英假象。一般认为在没有柯石英残余情况下,多晶石英和具有栅状结构的石英集合体被认为是柯石英的假象,是柯石英曾经存在的证据<sup>[1]</sup>,但仅用辐射状裂纹来判断包体周围的细小石英集合体是柯石英假象是不够的。周高志等(1996)认为,有时石榴石中的一些细小绿辉石、金红石周围也有辐射状裂纹出现;此外,石榴石在1 GPa以下的压力条件下也能产生辐射状裂纹<sup>[4]</sup>。

### 2.3 流体在相变过程中所起的作用

流体是影响变质作用的重要因素,Leech(2001)认为流体是变质反应的关键,指出干燥地壳中的岩石将无限期地处于亚稳态<sup>[18]</sup>。以前认为超高压变质作用是发生在“干燥”的条件下,但近来的研究表明超高压变质作用并不是干的<sup>[19]</sup>。很多地质和地球化学证据也表明,在变质作用过程中存在着广泛的流体活动<sup>[20]</sup>。

许多实验表明,在缺乏流体的情况下,柯石英向石英退变质反应的速度将是非常缓慢的,流体在反应中起着催化剂的作用,流体在退变反应中加速了成核的速率。柯石英以包体的形式而得以保存,表明在超高压变质作用中缺乏自由流体,否则流体会催化退变反应<sup>[19]</sup>。实验动力学资料表明,在有流体存在的情况下,柯石英不可能在折返过程中得到保存,这已经被野外观察所证实<sup>[17]</sup>。Mosenfelder

(2000)应用微-FITR(Fourier-transform infrared)对自然岩石的研究表明,取代柯石英的石英中含有不等量的水,这表明在退变过程中流体起到很重要的作用<sup>[21]</sup>。当寄主矿物中形成裂纹以后,则外部的流体就很容易进入。随着流体的进入,退变质反应将会被加速,从而使得柯石英迅速完全地退变为石英。

### 2.4 柯石英的保存

柯石英的保存条件十分苛刻,流体和退变质作用等因素均很容易使柯石英转变为石英<sup>[1]</sup>。另外,剪切应力的存在也能加速柯石英的退变反应<sup>[22]</sup>。以上这些因素使得在超高压变质岩折返的过程中,柯石英很难在寄主矿物中被保存下来。但另一方面,在刚性寄主矿物没有破裂之前,外部的流体不能进入,而且此时柯石英包体所承受的压力值较寄主矿物的压力值要高,因而这个高的压力可以阻止柯石英的进一步退变,从而使得柯石英得以保存下来。刚性的寄主矿物起到了很好的压力容器作用,使柯石英包体免受外部温压条件及流体变化的影响而得以保存下来,许多学者形象地称之为高压釜的作用<sup>[17]</sup>。

在含柯石英超高压变质岩折返的过程中,柯石英向石英退变时的体积变化能产生一个过压,使得柯石英包体在刚性寄主矿物中的保存变得可能。Gillet等(1984)提出了一个弹性模型,认为在减压过程中,柯石英会少量地向石英发生退变,退变而致的体积膨胀使得柯石英包体中的压力值增大,而这种过压会阻止退变的进一步进行,从而使柯石英得以保存下来<sup>[23]</sup>。然而,弹性模型并不能完全解释柯石英的保存。叶凯等(2001)在研究锆石中的柯石英包体时发现,柯石英的退变程度很不一致,有的已完全退变为石英,而有的却未发生任何退变<sup>[23]</sup>。这些未发生退变的柯石英包体理应不会受到过压的作用,但它却保存下来了。

Mosenfelder(2000)认为由包体膨胀而致的寄主矿物的破裂发生在400℃左右的相对高温下,然而现今一些暴露于地表岩石中的柯石英包体仍在经历着过压作用,而此时的温度显然要远低于400℃。尤其是粒间柯石英的发现,更说明了过压并不能阻止寄主矿物中柯石英向石英的退变,此时只能表明寄主矿物是在无流体参与的条件快速折返回地表的<sup>[3,20,23]</sup>。另外,弹性模型的应用还有一个前提,

那就是要求寄主矿物的强度足够大,能够承受高的应力作用,而有的寄主矿物并不具有那么高的强度,但柯石英却能在其内保存下来。应用弹性模型确实能解释一些刚性矿物中柯石英的保存,在寄主矿物未破裂之前,高强度的寄主矿物可起到很好的压力容器作用,通过给柯石英包体施加一个过压作用而使其得到保存;但随退变反应的进一步进行,反应变得复杂起来,这包括流体的进入、化学元素的迁移等等,此时就不宜用过压来解释了。

一般认为柯石英的保存主要依赖于以下一些因素:超高压变质带的折返速率、变质结晶作用的  $P-T$  条件和路径、退变过程中流体的多少及活性、原始柯石英粒子的大小、寄主矿物的强度等,而且一般认为流体是退化反应的关键。Lardeaux 等(2001)认为柯石英向石英退变的动力学强烈地依赖于温度和流体的存在<sup>[24]</sup>。柯石英的保存需要在较低温度条件下快的折返速率以及低的流体活性。王璐等(2003)的研究表明,柯石英包体在减压过程中能够承受很高的内压而保存下来,从而说明寄主矿物的折返速率很快,后期水的影响很小。如果水活度增加,则会加速柯石英的退变,从而使柯石英难以保存下来<sup>[25]</sup>。Wang 等(1993)通过研究表明,在适当的条件下,如以包体的形式存在于刚性矿物中,超高压矿物的残余能够很好地保存在经受相对低压(1 GPa)和高温( $>800^{\circ}\text{C}$ )变质作用的变质岩中<sup>[26]</sup>。

### 3 存在的问题

一般柯石英退变过程中的体积增大会使其寄主矿物显示出辐射状裂纹结构,但是并非所有含柯石英的寄主矿物都会显示出这种裂纹结构。Schertl 等(1994)观察我国大别山含柯石英白云石时发现,白云石中并没有发育明显的辐射状裂纹。他们认为这是由于白云石具有很好的解理性,柯石英退变过程中的体积增大很可能是沿白云石解理面的运动而被容纳了<sup>[13]</sup>。同时还应注意到,由于寄主矿物与包体矿物间热膨胀系数的差异,在不同的温压条件下也能在包体矿物周围形成裂纹。这就存在一个疑问,是否可以仅用包体矿物周围的辐射裂纹而判断出超高压变质作用?一般认为矿物中的具有特征结构的多晶石英包体是超高压变质作用的主要依据<sup>[1]</sup>,但也有学者(Hacker 等,1997)指出多晶石英集合体和从包体向外辐射的裂纹并不是超高压变质

作用的首要证据<sup>[17]</sup>。Klemd(2003)指出多晶石英聚体核周围缺乏柯石英残余和栅状石英时,石榴石中具有辐射裂隙的镶嵌结构石英包体并不一定表明超高压条件<sup>[27]</sup>。Wendt 等(1993)强调石英周围的辐射裂隙可能源自  $\alpha$ -石英的膨胀而非相转变<sup>[28]</sup>。而 Whitney 等(2000)指出石榴石中从石英包体发出的微裂隙主要是包体形状和大小的结果而不需要超高压条件来形成<sup>[29]</sup>。因此,在缺乏柯石英存在或其它有力证据的前提下,仅仅利用从寄主矿物中发出的辐射状裂纹来判断岩石是否经历超高压变质作用显然是不足取的。

尽管已经认识到超高压变质作用中有水的参与,但目前对超高压变质过程中水-岩反应和流体的作用的细节还是不清楚的<sup>[3]</sup>。另外,目前对于柯石英假象的正确判别、柯石英的保存模式等等方面,都还在一定的争论,缺乏让人满意的定量和定性的结论。

### 4 结 语

超高压变质作用的研究是当前地学研究中的一个热点,超高压变质作用的特征矿物——柯石英的发现,无疑对研究全球变质作用具有重要的意义。依据柯石英退变过程中所展示出来的特征结构,能获取到地史时期地球内部构造的一些信息,这对研究超高压变质岩的变质成因过程、折返过程及其动力学机制、 $P-T-t$  演化路径和地质构造环境分析具有重要的指示意义。另外,柯石英-石英的相变平衡曲线对高压研究也具有重要的意义,常可作为高压器械很好的压力标定曲线。

尽管目前有关超高压变质作用研究的新成果不断涌现,但同时还必须注意到上面所提及的一些问题,必须加强对柯石英 $\rightarrow$ 石英退变过程的一些细微结构变化的研究,以便捕捉到更多有用的信息,从而探讨出超高压变质作用的全部细节。

### 参考文献

- 1 张建新,扬经绥,许志琴等,2002. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据. 科学通报, 47(3):231-234
- 2 Chao E C T, Shoemaker E M, Madsen B M, 1960. First natural occurrence of coesite. *Science*, 132:220-221
- 3 从柏林,王清晨,1999. 大别山-苏鲁超高压变质带研究的最新进展. 科学通报, 44(11):1127-1141

- 4 周高志, Liu J G, 刘源骏等, 1996. 湖北北部高压、超高压变质带. 中国地质大学出版社, 114
- 5 吕古贤, 陈晶, 李晓波等, 1998. 构造附加静水压力研究与含柯石英榴辉岩成岩深度测算. 科学通报, **43**(24): 2590-2602
- 6 王清晨, 刘景波, 从柏林, 1999. 构造超压能引起超高压变质作用吗? 科学通报, **44**(21): 2346-2350
- 7 Langenhorst F, Poirier J P, 2002. Transmission electron microscopy of coesite inclusions in the Dora Maira high-pressure metamorphic pyrope-quartzite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **203**: 793-803
- 8 Ingrin J, Gillet Ph, 1986. TEM investigation of the crystal microstructures in a quartz-coesite assemblage of the Western Alps. *Phys. Chem. Minerals*, **13**: 325-330
- 9 赵中岩, 方爱民, 俞良军, 2002. 柯石英榴辉岩相变质构造岩: 超高压变质岩构造形迹. 科学通报, **47**(12): 946-950
- 10 李如璧, 1997. 高压变质二氧化硅矿物物理研究. 常州技术师范学院学报, **3**(4): 1-7
- 11 王道轩, 刘因, 李双应等, 2001. 大别超高压变质岩折返至地表的时间下限: 大别山北麓晚侏罗世砾岩中发现榴辉岩砾石. 科学通报, **46**(14): 1216-1220
- 12 Parkinson C D, 2000. Coesite inclusions and prograde compositional zonation of garnet in whiteschist of the HP-UHPM Kokchetav massif, Kazakhstan: a record of progressive UHP metamorphism. *Lithos.*, **52**: 215-233
- 13 Schertl H P, Okay A I, 1994. A coesite inclusion in dolomite in Dabie Shan, China: Petrological and rheological significance. *Eur. J. Mineral*, **6**: 995-1000
- 14 杨建军, 1998. 超高压变质岩—造山带深部过程的见证. 地学前缘, **5**: 267-274
- 15 Mosenfelder J L, Bohlen S R, 1997. Kinetics of the coesite to quartz transition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **153**: 133-147
- 16 Zhang L F, Ellis D, Williams S *et al.*, 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism in eclogite from the Western Tianshan, China—Reply. *Am. Mineral*, **88**: 1157-1160
- 17 Hacker B R, Peacock S M, 1997. 超高压变质岩石的产生、保存和剥露. 世界地质, **16**(4): 10-19
- 18 Leech M L, 2001. Arrested orogenic development: eclogitization, delamination, and tectonic collapse. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **185**: 149-159
- 19 Xiao Y L, 2000. Fluid history during HP and UHP metamorphism in Dabie Mt. China: constraints from trace elements fluid inclusions, and stable isotopes. 2003-05-23
- 20 倪怀玮, 郑永飞, 赵子福, 2003. 流体—岩石相互作用过程中氧同位素交换地球化学动力学评述. 高校地质学报, **9**(2): 252-267
- 21 Mosenfelder J L, 2000. Pressure dependence of hydroxyl solubility in coesite. *Phys. Chem. Minerals*, **27**: 610-617
- 22 Smyth J R, 1977. Quartz pseudomorphs after coesite. *Am. Mineral*, **62**: 828-830
- 23 叶凯, 2001. 大别山—苏鲁超高压变质带的矿物学和岩石学研究进展. 矿物岩石地球化学通报, **20**(3): 141-148
- 24 Lardeaux J M, Ledru P, Ledru I *et al.*, 2001. The Variscan french massif central—a new addition to the ultra-high pressure metamorphic ‘club’: exhumation process and geodynamic consequences. *Tectonophysics*, **332**: 143-167
- 25 王璐, 金振民, 何谋春, 2003. 榴辉岩中石英出溶体的拉曼光谱学研究及其构造意义. 地球科学, **28**(2): 143-150
- 26 Wang Q C, Ishiwatari A, Zhao Z G, 1993. Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *Eur. J. Mineral*, **5**: 141-152
- 27 Klemd R, 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism in eclogites from the western Tianshan high-pressure belt (Xinjiang, Western China)—comment. *Am. Mineral*, **88**: 1153-1156
- 28 Wendt A S, D’Arco P, Goffe B *et al.*, 1993. Radial cracks around alpha-quartz inclusions in almandine: constraints on the metamorphic history of the Oman mountains. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **114**: 449-461
- 29 Whitney D L, Cooke M L, Du Frane S A, 2000. Modeling of radial microcracks at corners of inclusions in garnet using fracture mechanics. *Journal of Geophysical Research*, **105**(2): 2843-2853