

西南天山造山带超高压变质作用研究新进展

吕增, 张立飞

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 低温超高压变质岩具有极低的地热梯度, 其变质演化对于认识板块间相互作用的动力学过程以及弧地壳的生长机制具有重要意义。西南天山造山带发育了世界上少有的经历过深俯冲作用且具有洋壳属性的典型低温超高压变质地质体。近几年来对该造山带中的超高压变质岩开展了大量深入细致的岩石学研究, 取得了一系列新进展。变基性岩和变沉积岩系岩石中柯石英的普遍发现, 直接证明西南天山变质蛇绿混杂岩曾经俯冲到上地幔深度, 且具有极低的地热梯度, 与热力学模拟结果一致。柯石英的稀少以及大量不同类型柯石英假像的存在, 说明在折返过程中发生了强烈的退变质叠加, 只有刚性较大且没有经历碎裂-愈合作用的矿物(如石榴石)才有可能保存柯石英。综合岩相学证据和相平衡计算结果, 确定西南天山造山带北部的高压地质体(即哈布腾苏-科布尔特单元)整体经历过超高压变质作用, 南部的高压地质体峰期压力未达到柯石英稳定域。超高压和高压变质地体的空间分布特点指示了古天山洋由南向北的俯冲极性。这些基础岩石学研究工作的开展对于揭示冷俯冲带的深部物理化学过程以及建立中亚南山造山带演化的精细模型具有重要意义。

关键词: 西南天山, 俯冲杂岩, 柯石英, 低温-超高压变质作用, 超高压单元, 热力学模拟

中图分类号: P588.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)04-0770-09

New progress in the study of UHP metamorphism of China's southwestern Tianshan orogenic belt

LÜ Zeng and ZHANG Li-fei

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Though geophysical observation and numerical modeling suggest that the oceanic crust have been subducted along convergent continental margins into the deep Earth, the exhumed UHP metamorphic terranes of oceanic affinity are rarely exposed. The UHP metamorphic belt of China's southwestern Tianshan was inherited from the ophiolitic complex as a result of the northward subduction of the paleo-Tianshan ocean beneath the Yili-Central Tianshan plate. With the in-depth investigations of many aspects in recent years, the UHP metamorphism of China's southwestern Tianshan has been better understood. In this paper, the authors focused the discussion on the progress in petrological studies of UHP rocks from this orogenic belt. The ubiquitous discovery of coesite in meta-basaltic and meta-sedimentary rocks indicates that the meta-ophiolitic belt of China's southwestern Tianshan have reached the mantle depths with extremely low geotherms, which is consistent with thermodynamic forward modeling. The rarity of coesite and the development of various coesite pseudomorphs suggest the intensive retrograde overprint at low temperatures. Only in the unfractured domain of porphyroblastic garnet could coesite be preserved. On the basis of detailed petrographical observation and phase diagram model, the UHP metamorphism in the north of the metamorphic belt of China's southwestern Tianshan is confirmed and a coherent

收稿日期: 2014-02-28; 修订日期: 2014-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372004, 41121062, 40821002)

作者简介: 吕增(1981-), 男, 汉族, 讲师, 主要从事变质作用研究, E-mail: luzeng@pku.edu.cn

UHP unit (referred to as Kebuerte-Habutengsu UHP unit) is proposed. To the south of this unit, no UHP evidence has been identified in eclogite or pelitic-felsic schist. The imbricate sequence relation between HP and UHP units points to the northward subduction polarity of the paleo-Tianshan ocean. The progress in the study of petrology is fundamental for further unraveling the physiochemical processes of cold oceanic crust subducted to great depths and for constructing a more reasonable tectonic model of the South Tianshan orogenic belt in Central Asia.

Key words: China's southwestern Tianshan; subducted complex; coesite; LT-UHP metamorphism; UHP unit; thermodynamic model

低温-超高压变质岩记录了冷俯冲带(主要是大洋型俯冲带)的深部岩石学特征,是了解汇聚型板块边缘深部地质过程的重要窗口。目前为止,全球范围内所发现的超高压变质岩多是由大陆表壳岩变质而来,俯冲洋壳形成的超高压变质岩最早发现于西阿尔卑斯造山带的 Zermatt-Saas 带,那里发育被肢解的蛇绿岩岩石组合,包括蛇纹岩和榴辉岩化的玄武岩、辉长岩等(Bucher *et al.*, 2005; Bucher and Grapes, 2009)。柯石英最早发现于那里的变质洋底沉积物——石英岩中(Reinecke, 1991)。以此为平台,洋壳俯冲过程中的物质循环和深部流体演化规律研究得以有效开展(King *et al.*, 2004; Frezzotti *et al.*, 2011; Bebout *et al.*, 2013)。西南天山造山带以发育蓝片岩和低温榴辉岩著称,它们也具有洋壳岩石的地球化学特征(Gao and Klemd, 2003; Ai *et al.*, 2006)并且广泛发育流体活动的证据——高压脉体。和 Zermatt-Saas 变质带(阿尔卑斯型俯冲带)不同的是,西南天山超高压变质带的北部有大量的俯冲带脱水形成的大陆弧岩浆带(朱永峰等, 2005; 龙灵利等, 2007),发育低压高温变质带(李强等, 2004),具有太平洋型俯冲带的特点(Liou *et al.*, 2009),从岩石学深入研究该变质带对于了解全球弧地壳的增生规律及其地球化学特征的形成机制具有重要意义。自 Zhang 等(2002a, 2002b)报道西南天山造山带存在超高压变质岩以来,引起了国内外学者的广泛关注,早期的研究综述见于 Zhang 等(2007a)。近几年在超高压岩石学研究方面取得的主要进展有:①不同岩石类型(如泥质片岩、长英质片岩和榴辉岩)中柯石英的普遍发现(图1);②相平衡模拟获得超高压峰期变质条件,支持一般不含柯石英的岩石的超高压变质历史;③超高压变质岩在区域上具有一定的分布规模,在变质带北部构成超高压变质单元,其内部的差异演化是由局部物理化学条件变化引起的。本文对西南天山超高压变质作

用相关的研究进展进行综述,但超高压变质岩退变过程、高压变质岩(如南部的蓝片岩和榴辉岩)等研究内容不包括在内。

1 柯石英的产出

柯石英是超高压变质岩的标志矿物,多见于地热梯度较高的大陆俯冲-碰撞带中(如大别-苏鲁造山带和挪威加里东造山带)(Smith, 1984; Liou *et al.*, 2009)。西南天山造山带发育的高压变质带具有较低的峰期地热梯度,发育蓝片岩和低温榴辉岩,早期的研究工作是根据矿物对温压计以及柯石英假像推算出部分榴辉岩达到超高压变质条件(Zhang *et al.*, 2002a, 2002b)。由于没有柯石英存在的确凿证据,西南天山超高压变质作用引起一些学者的质疑和争论(Klemd, 2003; Zhang *et al.*, 2003)。2008年以来,柯石英陆续在不同岩石类型中被发现(图2),从而结束了这场争论(Lü *et al.*, 2008, 2009, 2012a, 2012b, 2013, 2014; Yang *et al.*, 2013)。与其它造山带一样(Smith, 1984),西南天山造山带柯石英的识别也是基于以下两点:与其石英增生边存在光性差异,二者突起不同,且一般会在寄主矿物中形成放射状裂纹(图2a、2b、2c);柯石英具有特征拉曼光谱,如 $521 \sim 523 \text{ cm}^{-1}$ 强峰和 428、271、178、151 和 118 cm^{-1} 等较弱峰。强峰的微弱正向漂移显示刚性的寄主矿物对柯石英包体还有一定的剩余压力(residual pressure)。

薄片尺度的柯石英首次发现于含绿辉石云母片岩中(Lü *et al.*, 2008)。稍后,在基性榴辉岩中也发现了柯石英(Lü *et al.*, 2009),这表明西南天山的榴辉岩和围岩一起经历了超高压变质作用。目前所发现的 SiO_2 复合包体(残余状柯石英+镶边状石英)的粒径一般都在 $100 \mu\text{m}$ 以下,它们直接或间接地被包裹在粗大的石榴石变斑晶中(Lü *et al.*, 2014),目

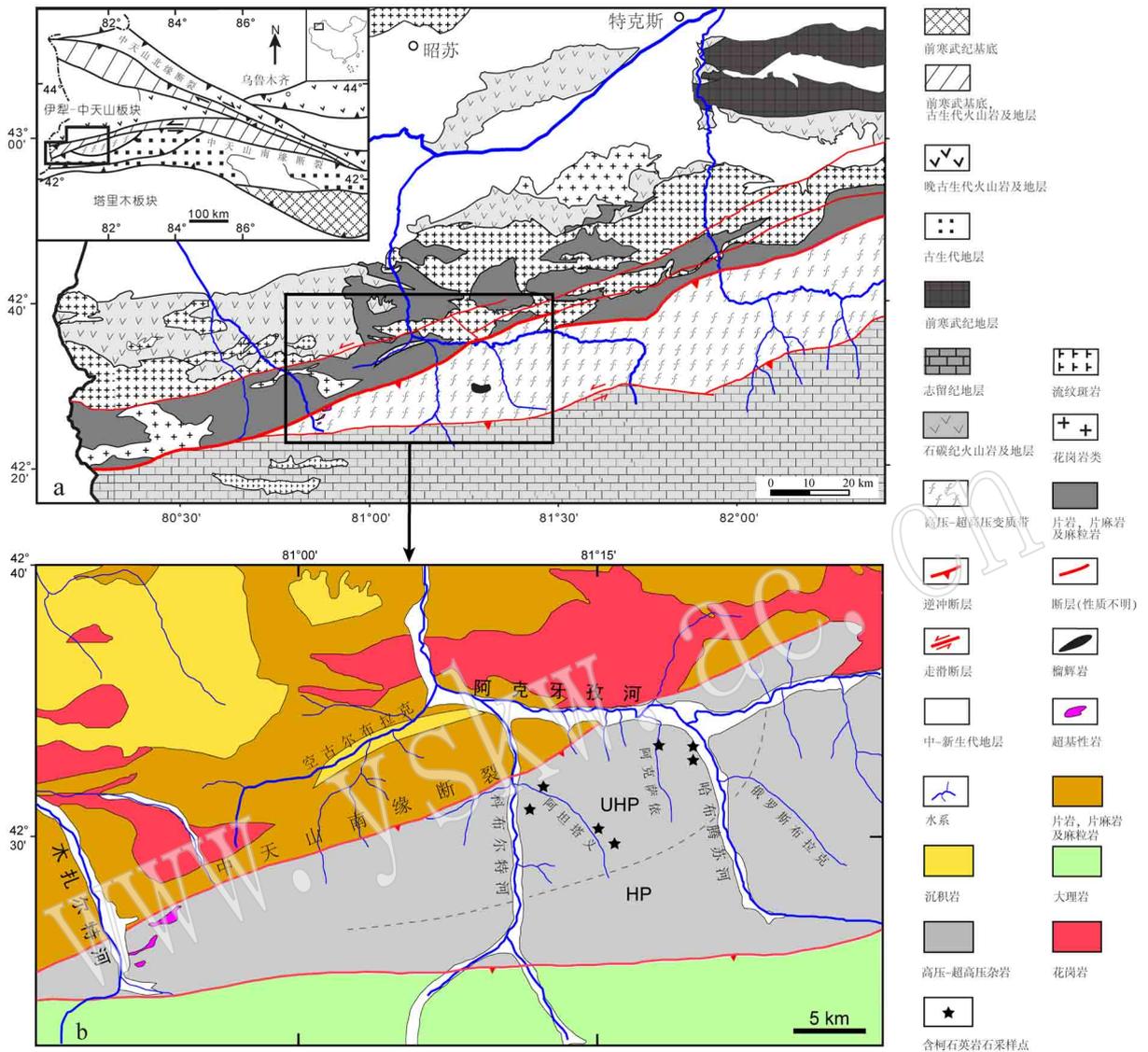


图 1 西南天山高压-超高压变质带及邻区地质简图(a)和西南天山含柯石英岩石的分布(b)

Fig. 1 Simplified geological map of the HP-UHP metamorphic belt and adjacent areas in southwestern Tianshan (a) and spatial distribution of reported coesite-bearing rocks of southwestern Tianshan (b)

前尚未在其它矿物(如锆石)中发现柯石英。多数含柯石英的 SiO_2 复合包体呈它形粒状,但也有个别呈长柱状,显示柯石英的结晶习性有别于石英(Lü and Zhang, 2012)。多数情况下,柯石英呈残余状或星点状被多晶石英环绕,需用光学方法和拉曼光谱才能鉴别其是否为柯石英。

极少数情况下,柯石英包体完全没有退变,没有发育石英退变边和放射状裂纹,只有借助拉曼光谱仪才能鉴别出来(Lü *et al.*, 2008)。CL 图像揭示一些柯石英经历了两期退变(Lü *et al.*, 2009):第 1 期形成的栅状石英紧贴寄主石榴石形成薄的镶边;第 2 期形成的玉髓呈网脉状贯入柯石英中,明显交代早

期的柯石英。这两期退变很可能分别对应了减压初期的无水阶段和随后的饱水阶段(Wain *et al.*, 2000)。BSE 图像显示一些柯石英与其石英退变质边具有不同的灰度(图 2d),很可能指示柯石英与石英的微量元素含量存在差别。

柯石英的形成与保存机制研究对于西南天山造山带演化以及低温-超高压变质过程具有重要意义。要形成柯石英,岩石中要存在自由的 SiO_2 ,而且这些 SiO_2 被石榴石或其它刚性较大的矿物包裹才有可能得以保存。另外,作为最主要的刚性矿物石榴石,它如果在退变质过程中不被机械破坏(破裂),则有可能完好地保存峰期包体矿物。西南天山一般的石榴

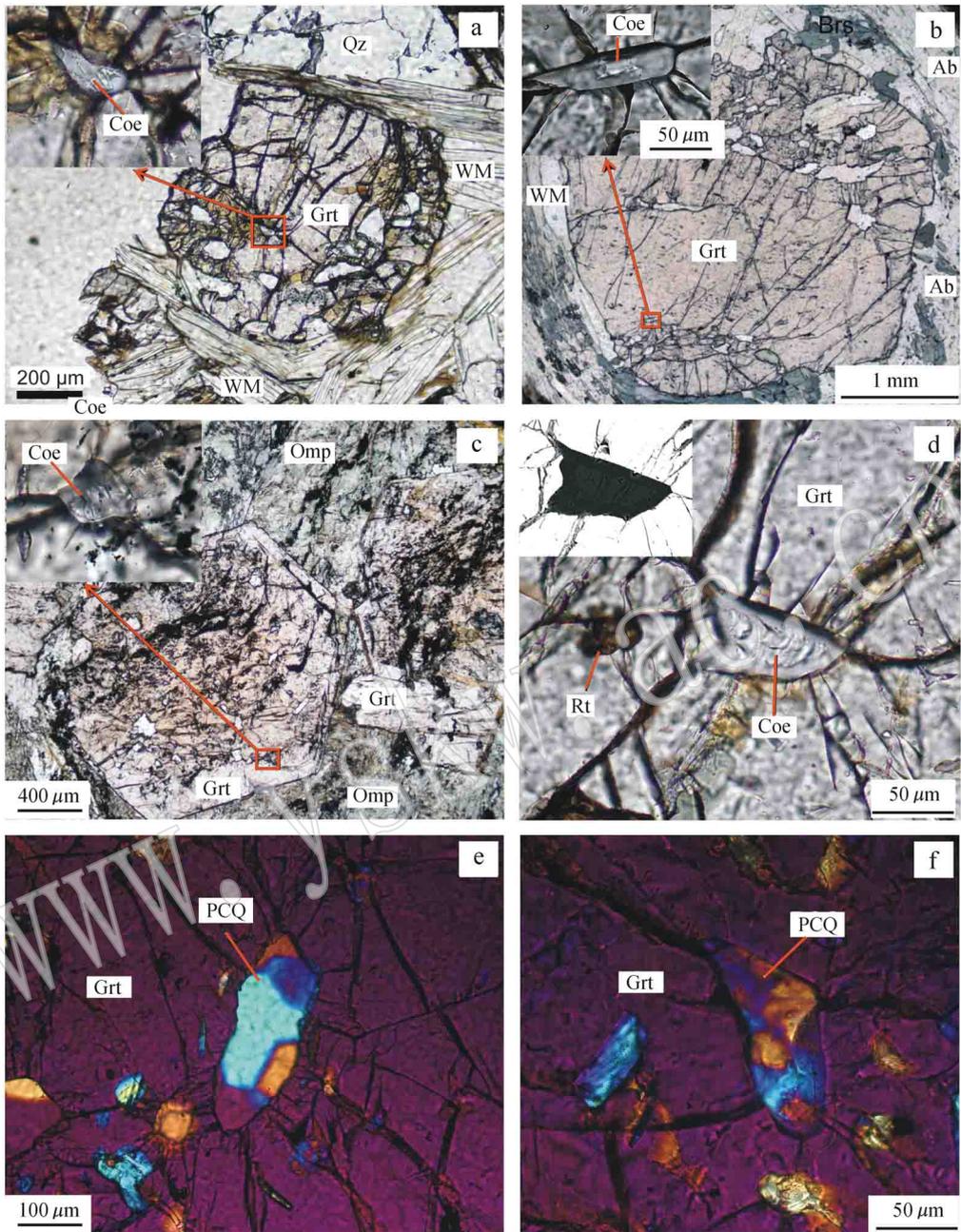


图2 西南天山不同类型的含柯石英岩石的显微结构

Fig. 2 Photomicrographs of coesite-bearing rocks with different protoliths from southwestern Tianshan

a—泥质片岩(单偏光); b—长英质片岩(单偏光); c—榴辉岩(单偏光); d—柯石英单偏光与背散射图像(左上)特征对比; e—多边形镶嵌状多晶石英(正交偏光,加石膏试板); f—齿状镶嵌状多晶石英(正交偏光,加石膏试板); Ab—钠长石; Coe—柯石英; Grt—石榴石; Omp—辉石; Qz—石英; PCQ—多晶石英; Rt—金红石; WM—白色云母

a—pelitic schist(plane polarized light, PPL); b—felsic schist(PPL); c—eclogite(PPL); d—comparison of PPL and back-scattered electron image (upper left) of coesite in eclogite; e—polycrystalline quartz with polygonal mosaic texture(cross polarized light, gypsum plate inserted); f—polycrystalline quartz with sutured mosaic texture(cross polarized light, gypsum plate inserted); Ab—albite; Coe—coesite; Grt—garnet; Omp—omphacite; Qz—quartz; PCQ—polycrystalline quartz; Rt—rutile; WM—white mica

石变斑晶都发育不规则裂隙(筛状变晶石榴石更明显), BSE 图像显示一些石榴石经历了破裂-愈合生长过程(Lü *et al.*, 2009)。有的单晶石英与柯石英包裹在石榴石的同一成分域,这说明石榴石在折返

过程中一部分包体并不是被完全封闭的,经历的开放程度也不同,在这期间可以发生物质(包括流体)的带入-带出,使 SiO_2 包体经历不同程度的减压重结晶作用。实验研究表明,水的加入(需要包体体系

开放)是造成柯石英包体退变的重要原因(Mosenfelder *et al.*, 2005),可以造成柯石英±栅状石英、多边形镶嵌状多晶石英(图2e)、齿状镶嵌状多晶石英(图2f)和单晶石英共处于一颗石榴石内的情形。这些具有不同结构的SiO₂相代表了柯石英的不同退变重结晶程度(Wain *et al.*, 2000),以至于有些样品只含有放射状裂纹发育的单晶石英,与普通的低压岩石在岩相学上没有什么不同(Wendt *et al.*, 1993; Klemm, 2003)。另外,包体体系开放最具代表性的证据是石榴石内发育板状硬柱石假像(黝帘石+钠云母),这种假像也见于包裹柯石英的石榴石域内(Lü and Zhang, 2012)。根据质量平衡原理,硬柱石假像的形成需要包体体系与外部连通来完成水分子的析出以及钠、铝、硅等阳离子(高压流体的主要组分; Manning, 2004)的进入。结合笔者多年的观察,由于西南天山造山带退变质作用强烈,作为柯石英较初级的退变产物,放射状裂纹发育的多晶石英包体可以作为超高压变质的证据之一,并且在含多晶石英包体的粗大石榴石变斑晶中找到柯石英的概率要大得多。在仅有单晶石英包体存在时需要借助热力学模拟来判断岩石是否经历过超高压变质作用。

2 超高压峰期条件的定量模拟

对于世界上许多超高压变质带的榴辉岩来说,用共生矿物对元素交换温压计一般都将峰期条件计算到超高压范围内(Carswell *et al.*, 1997; Ravna and Terry, 2004)。对于西南天山超高压变质带的很多榴辉岩来说,使用Grt-Cpx-Phn温压计仅得到2.0 GPa左右的峰期压力条件(吕增等, 2007; Su *et al.*, 2010)。然而根据同一区域内大量柯石英的发现推断这些榴辉岩的峰期压力不应低于2.7 GPa。不同温压计计算结果存在较大差异的情况也出现于南乌拉尔含金刚石榴辉岩(Bostick *et al.*, 2003)。西南天山和南乌拉尔的超高压榴辉岩均为低温成因,这很可能说明上述硅酸盐矿物对温压计不太适用于低温-超高压条件下的变质作用研究。探索更准确合理的温压计算方法对西南天山超高压变质带研究至关重要。

除了传统矿物对温压计,早期对西南天山榴辉岩峰期条件的限定是通过视剖面温压计(Powell and Holland, 2008),即模拟矿物组合或矿物含量来实现

的(Klemm *et al.*, 2002; Wei *et al.*, 2003; 吕增等, 2007)。由于相平衡计算模拟的 p - T 视剖面上一些矿物组合稳定的温压范围很大,用单纯模拟矿物组合的方法限定的峰期条件较为宽泛。另外,由于后期变质作用的叠加,现今观察到的矿物组合及模式含量与峰期的真实状况也会存在不同程度的偏差。由于低温条件下矿物间的化学平衡域较小,很难完全合理地评价退变前的峰期矿物结构、含量以及成分特征。Wei等(2009)用THERMOCALC软件对西南天山的副片岩开展相平衡模拟,首次把片岩的峰期压力限定在超高压的范围内。Lü等(2009)用Domino/Theriak软件第一次把西南天山的榴辉岩峰期条件限定在超高压范围内,其与柯石英包体所指示的压力吻合。上述峰期条件的模拟是通过在 p - T 视剖面上对石榴石成分进行等值线投图来实现的,这种方法被称为石榴石成分等值线温压计(Evans, 2004; Wei *et al.*, 2009)。用此方法对吕增等(2007)一文中的哈布腾苏基性榴辉岩样品(H504-10)重新计算了 p - T 轨迹(未发表数据),结果显示石榴石核部形成于柯石英稳定域,边部是在减压时期生长的,支持西南天山超高压变质岩的原位成因,与Lü等(2012a)的研究结论一致。这一温压计在西南天山的成功应用表明,在多期变质作用叠加情况下石榴石最有可能完整记录不同阶段的变质温压条件信息。结合石榴石中不同位置的包体矿物组合,可以得到相对完整的 p - T 轨迹(Stipska and Powell, 2005; Wei *et al.*, 2009; Tian and Wei, 2013)。西南天山超高压榴辉岩的石榴石成分环带明显,表明其生长经历了3个阶段:第1阶段形成的石榴石低镁中钙高锰;第2阶段形成的石榴石中镁低钙中锰;第3阶段形成的石榴石高镁高钙低锰。根据石榴石成分等值线温压计也算出石榴石幔部形成于柯石英稳定域,与这类岩石的石榴石幔部含有柯石英包体的岩相学观察结果一致(Lü *et al.*, 2009)。目前所发现的多数超高压片岩(泥质-长英质为主)中的石榴石核-边成分差异显著,核部低钙,边部高钙,镁含量变化不大。有些片岩中石榴石从核到边钙含量不变,不发育或微弱发育高钙的边部。柯石英仅见于石榴石的低钙成分域,一般对应于石榴石的核部或核-边交接部位(Lü *et al.*, 2008; Lü and Zhang, 2012)。石榴石成分等值线温压计算的这类石榴石的低钙成分域都十分接近或高于柯石英-石英转变压力(Wei *et al.*, 2009; Lü *et al.*, 2012a)。根据以

上观察和模拟,可以发现不管是基性榴辉岩还是泥质-长英质片岩,只要是超高压阶段条件下生长的石榴石,一般具有较为稳定的成分变化范围,据此今后可以用石榴石成分的特征对西南天山相关类型的变质岩峰期条件进行定性或半定量的评估,粗略判断其是否属于超高压的范畴。

根据相平衡模拟的结果再反观低温榴辉岩的岩相学特征就会注意到,实际观察到的低温榴辉岩中的一些矿物虽然在结构上达到平衡,但这很可能是后期变质叠加的结果,它们可以形成于不同的阶段。例如自形的钠钙质闪石(冻蓝闪石)与自形的石榴石结构上达到平衡,并不表现出反应关系,但细致观察就可以发现钠钙质闪石为退变质成因,取代了早期的钠质闪石(蓝闪石)。对于和超高压岩石处于同一剖面上而不含任何超高压矿物学标志的高压变质岩,通过对石榴石生长过程的热力学模拟,完全可以恢复其超高压变质历史(Lü *et al.*, 2012a),在此框架下进而用热力学知识理顺各种高压矿物的共生或替代关系,可以弥补岩相学观察的不足。

3 超高压地质体的空间展布和俯冲带的极性

西南天山变质带的绝大多数片岩中不含柯石英或其它明确指示变质程度的矿物或矿物组合,是长期被忽视的一种岩石类型。在西南天山变质带的各种岩石类型中,片岩(变沉积岩)所占的比重最大,因此深入剖析片岩的变质演化规律对建立整个西南天山变质带的岩石大地构造格架意义重大。西南天山典型的片岩主要由白色云母(多硅白云母+钠云母)、钠长石、石榴石、绿泥石和石英组成,其它较常见但含量较低的矿物有蓝闪石、冻蓝闪石、金红石和石墨。根据白色云母和钠长石的含量可将片岩分为泥质和长英质两大类,它们大多经历了较强的退变质改造。在早期的研究中(Gao *et al.*, 1999),如果这些片岩中含有蓝闪石便将其归为蓝片岩相,若无蓝闪石则归为绿片岩相,造成蓝片岩和绿片岩“混杂”的现象。事实上,蓝闪石的存在与否除了跟全岩成分有关外,还与退变质叠加程度有关。在钠长石含量较高的片岩中,蓝闪石较为常见。强烈面理化的云母片岩中角闪石以长柱状冻蓝闪石为主,蓝闪石只见于个别钠长石变斑晶中。

通过细致观察发现,哈布腾苏-科布尔特流域不

同位置的片岩均含有柯石英(Lü *et al.*, 2008; Lü and Zhang, 2012)。对该地区广泛分布的不含柯石英的若干片岩开展的相平衡模拟(石榴石成分等值线温压计)结果显示,其峰期条件均与附近的含柯石英片岩十分接近(Lü *et al.*, 2012a)。通过统计那些具有超高压峰期条件的片岩的空间分布特点(峰期变质程度填图),确定西南天山的超高压变质岩具有面状分布的特征,构成具有一定规模的超高压单元(Lü *et al.*, 2012a)。其空间范围至少跨越了科布尔特和哈布腾苏河两条河流(哈布腾苏-科布尔特超高压单元),北部以中天山南缘断裂为界,南部为高压地质体。由于野外交通条件的限制,超高压和高压地体的野外接触关系目前为止并不明确。哈布腾苏-科布尔特超高压单元主要由变基性岩和变沉积岩系岩石构成。变基性岩多呈透镜状,为退变程度不一的榴辉岩。一些石榴角闪岩的石榴石中含有绿辉石包体,表明它们是从榴辉岩退变而来。变沉积岩除上文提到的泥质-长英质片岩外,还有零星分布的基性片岩、夹层状榴辉岩、钙质片岩和大理岩。基性片岩中绿辉石常见,呈纤维状集合体,与白色云母构成面理。夹层状榴辉岩通常含有较高的多硅白云母和碳酸盐矿物含量,并且强烈面理化,易破碎,与透镜状玄武质榴辉岩差别明显,而且与泥质片岩、钙质岩石呈互层状渐变过渡,这很可能指示这类榴辉岩的原岩为陆源碎屑岩,不同于致密团块状的玄武质榴辉岩。大理岩呈不规则夹层状产于片岩中,最主要的矿物是方解石,偶见绿辉石包体,证明其至少经历了榴辉岩相变质作用。协调的野外关系、残余的柯石英包体以及相平衡模拟表明这一岩石组合整体经历了超高压变质作用(Lü *et al.*, 2009, 2013, 2014)。

在哈布腾苏-科布尔特单元的南部和东部,变基性岩由榴辉岩和蓝片岩组成,变沉积岩也主要是泥质-长英质片岩。目前为止尚未在这一带的任何岩石中发现柯石英和多晶石英包体。结合相平衡模拟,认为这一地区变质岩的峰期压力没有达到超高压范围(Lü *et al.*, 2012a)。根据Ernst (1971, 2010)俯冲极性的观点,来自不同深度的折返岩片的拼贴方式受俯冲方向的控制,靠近仰冲板块一侧变质程度较高,靠近俯冲板块一侧变质程度较低。反过来,变质程度递增的方向指示了俯冲板块的俯冲方向。因此,根据西南天山变质带自南向北变质压力增加的特点,可以得出古南天山洋在晚古生代由南向北俯冲的结论(Lü *et al.*, 2012a)。

由于西南天山造山带存在多期复杂的变形-变质作用叠加,只通过造山带的变形构造分析容易得到相反的构造演化模式(Wang *et al.*, 2010; Xiao *et al.*, 2010)。根据1:20万区域地质资料(却响幅^①),西南天山变质带被断层分割成若干块体,不同位置片岩的产状变化也很大。据笔者的野外调查和岩石学分析,很多断裂两侧的地体在变质程度上并无差别,说明这些变形并不代表这些块体在地壳深部的边界,只是抬升到地壳浅部时经历了构造变形。变质作用热力学模拟表明,这些在地表被切割的产状不一的块体在俯冲带深部时经历了相同的物理化学过程,整体经历了深俯冲作用,该方法为恢复西南天山造山带深部演化历史提供了一个重要的途径(Lü *et al.*, 2012a)。

4 结语

虽然超高压变质作用在过去20多年已取得了大量的研究成果,极大提高了人们对地球深部物质循环和板块间相互作用的动力学过程的认识水平,但由于交通条件限制,和世界其它超高压变质带相比,西南天山变质带的区域调查程度偏低,导致长期以来不能很好地分辨其内部构造及其与周围地质体的关系。即使到现在为止,我们也只是通过对很有限的几个可以通行的剖面开展实地地质考察,来推断整个变质带的演化历史。由于西南天山变质带的超高压变质证据稀少,用传统的矿物对温压计恢复其超高压变质历史存在较大困难,从而造成其仅经历高压变质的“假像”。一些文献的研究对象虽然是西南天山变质带的高压岩石,但其研究的样品很可能经历了超高压变质作用(Gao and Klemd, 2003; Su *et al.*, 2010; Lü and Zhang, 2012)。西南天山超高压变质岩峰期标志矿物或组合保存较差的最主要原因是多阶段退变质叠加作用,这是由复杂的退变质流体活动引起的,相关流体活动的形式及其性质见吕增等(2013)。在开展俯冲带深部物质循环研究时,相关变质事件发生的温压条件需要准备厘定,这是因为高压和超高压变质作用具有不同的地热梯度,物理化学条件差异导致流体的地球化学行为存在差异,进而导致变质矿物的生长规律,微量元素的迁移-再分配规律以及对同位素体系的扰动程度都

存在较大差别。西南天山变质带的高压脉体是深入揭示俯冲带流体-岩石相互作用过程中元素迁移规律的重要平台(Lü *et al.*, 2012b)。已有的研究表明,超高压变质带内流体(脉体)成因复杂,既可形成于进变质阶段也可形成于退变质阶段,且多期变质作用相互叠加(Wu *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2011),因此在下一步开展西南天山低温-超高压俯冲带化学地球动力学研究时,首先要从岩石学上下足功夫,务必恢复不同流体(脉体)的来源深度和变质历史。另外,还需要综合运用地质和地球物理等多种手段,从南天山巨型造山带的大地构造背景着眼,从西南天山大洋型俯冲带的每一个地质细节入手,只有这样才能更准确地揭示冷俯冲地壳在地幔深处的物理化学变化规律,为探讨俯冲带岩浆作用与变质作用的耦合关系及板块间相互作用的地球动力学过程奠定坚实的基础。

虽然有一些构造地质学或地球化学证据支持古南天山洋的洋壳物质卷入该俯冲带,但是一些陆源碎屑物质明显也参与了俯冲过程。例如超高压变质带的主体岩石是富钾的云母片岩,一般认为它们属于处于大陆增生楔位置的陆源物质。这些变沉积岩系中的夹层状榴辉岩(或榴辉岩质岩石)从矿物成分和野外产状上都与玄武质透镜状榴辉岩区别明显,很可能说明其原岩为具有基性成分的陆源碎屑沉积岩。深入剖析整个超高压变质带的物质属性和结构需要综合野外证据、变质岩石学、热力学和地球化学等多方面知识和手段。对变质岩进行地球化学示踪时需要考虑整个变质过程对元素活动性的影响,合理评价各种可能的影响因素,选择最合适的样品开展地球化学的分析测试结果,只有这样才能真实地恢复西南天山超高压变质带的物质演化历史。

变质年代学的问题需要放在清晰的岩石学框架下解决。西南天山超高压变质带由于其变质温度很低,矿物粒度细小,发育多期生长(如环带),单矿物提纯难度大,开展冷俯冲带变质作用年代学研究受到严重制约,得到的定年结果也有诸多争论(Zhang *et al.*, 2007b; Su *et al.*, 2010)。随着研究的深入,西南天山超高压变质岩的 $p-T$ 演化模型日渐完善,原位分析测试技术的进步以及新的测年方法的建立,西南天山超高压变质岩演化的时间序列问题有望全面解决。

① 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1982. 1:20万却响幅区域地质报告.

References

- Ai Y L, Zhang L F, Li X P, *et al.* 2006. Geochemical characteristics and tectonic implications of HP-UHP eclogites and blueschists in southwestern Tianshan, China [J]. *Progress in Natural Science*, 16 : 624~632.
- Bebout G E, Agard P, Kobayashi K, *et al.* 2013. Devolatilization history and trace element mobility in deeply subducted sedimentary rocks: Evidence from western Alps HP/UHP suites [J]. *Chemical Geology*, 342 : 1~20.
- Bostick B C, Jones R E, Ernst W G, *et al.* 2003. Low-temperature microdiamond aggregates in the Maksyutov Metamorphic Complex, South Ural Mountains, Russia [J]. *American Mineralogist*, 88 : 1709~1717.
- Bucher K, Fazis Y, de Capitani C, *et al.* 2005. Blueschists, eclogites, and decompression assemblages of the Zermatt-Saas ophiolite: High-pressure metamorphism of subducted Tethys lithosphere [J]. *American Mineralogist*, 90 : 821~835.
- Bucher K and Grapes R. 2009. The eclogite-facies Allalin gabbro of the Zermatt-Saas ophiolite, western Alps: a record of subduction zone hydration [J]. *Journal of Petrology*, 50 : 1405~1442.
- Carswell D A, O'Brien P J, Wilson R N, *et al.* 1997. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in Dabie Mountains of central China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15 : 239~252.
- Ernst W G. 1971. Metamorphic zonation on presumably subducted lithospheric plates from Japan, California and Alps [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 34 : 43~59.
- Ernst W G. 2010. Subduction zone metamorphism—pioneering contributions from the Alps [J]. *International Geology Review*, 52 : 1021~1039.
- Evans T P. 2004. A method for calculating effective bulk composition modification due to crystal fractionation in garnet-bearing schist: implications for isopleth thermobarometry [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 22 : 547~557.
- Frezzotti M L, Selverstone J, Sharp Z D, *et al.* 2011. Carbonate dissolution during subduction revealed by diamond-bearing rocks from the Alps [J]. *Nature Geosciences*, 4 : 703~706.
- Gao J and Klemd R. 2003. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age constraints [J]. *Lithos*, 66 : 1~22.
- Gao J, Klemd R, Zhang L, *et al.* 1999. *P-T* path of high-pressure/low-temperature rocks and tectonic implications in the western Tianshan Mountains, NW China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 17 : 621~636.
- John T, Gussone N, Podladchikov Y Y, *et al.* 2012. Volcanic arcs fed by rapid pulsed fluid flow through subducting slabs [J]. *Nature Geosciences*, 5 : 489~492.
- King R L, Bebout G E, Kobayashi K, *et al.* 2004. Ultrahigh-pressure metabasaltic garnets as probes into deep subduction zone chemical cycling [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5 : Q12J14.
- Klemd R. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism in eclogites from the western Tianshan high-pressure belt (Xinjiang, western China)—Commen [J]. *American Mineralogist*, 88 : 1153~1156.
- Klemd R, Schroter F C, Will T M, *et al.* 2002. *P-T* evolution of glaucophane-omphacite bearing HP-LT rocks in the western Tianshan Orogen, NW China: new evidence for 'Alpine-type' tectonics [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 20 : 239~254.
- Li Qiang and Zhang Lifei. 2004. The *P-T* path and geological significance of low-pressure granulite-facies metamorphism in Muzhaerte, southwest Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3) : 583~594 (in Chinese with English abstract).
- Liou J G, Ernst W G, Song S G, *et al.* 2009. Tectonics and HP-UHP metamorphism of northern Tibet—Preface [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35 : 191~198.
- Long Lingli, Gao Jun, Xiong Xianming, *et al.* 2007. Geochemistry and geochronology of granitoids in Bikai region, southern Central-Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4) : 719~732 (in Chinese with English abstract).
- Lü Z, Bucher K and Zhang L F. 2013. Omphacite-bearing calcite marble and associated coesite-bearing pelitic schist from the meta-ophiolitic belt of Chinese western Tianshan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76 : 37~47.
- Lü Z, Bucher K, Zhang L F, *et al.* 2012a. The Habutengsu metapelites and metagreywackes in western Tianshan, China: Metamorphic evolution and tectonic implications [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30 : 907~926.
- Lü Z and Zhang L F. 2012. Coesite in schist and eclogite of the Atantayi valley, Southwestern Tianshan [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 : 1467~1472.
- Lü Z, Zhang L F and Chen Z Y. 2014. Jadeite- and dolomite-bearing coesite eclogite from western Tianshan, NW China [J]. *European Journal of Mineralogy*, 26 : 245~256.
- Lü Zeng, Zhang Lifei, Chen Zhenyu, *et al.* 2013. Evidence of fluid activities during the exhumation of the HP-UHP metamorphic belt of western Tianshan: high-pressure veins and rodingite [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(22) : 2175~2179 (in Chinese).
- Lü Z, Zhang L F, Du J X, *et al.* 2008. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, northwest China: Convincing proof of UHP metamorphism [J]. *American Mineralogist*, 93 : 1845~1850.
- Lü Z, Zhang L F, Du J X, *et al.* 2009. Petrology of coesite-bearing eclogite from Habutengsu Valley, western Tianshan, NW China and its tectonometamorphic implication [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27 : 773~787.
- Lü Z, Zhang L F, Du J X, *et al.* 2012b. Petrology of HP metamorphic veins in coesite-bearing eclogite from western Tianshan, China: Fluid processes and elemental mobility during exhumation in a cold subduction zone [J]. *Lithos*, 136 : 168~186.
- Lü Zeng, Zhang Lifei, Qu Junfeng, *et al.* 2007. Petrology and metamorphic *P-T* path of eclogites from Habutengsu, southwestern Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7) : 1617~1626 (in Chinese with English abstract).
- Manning C E. 2004. The chemistry of subduction-zone fluids [J]. *Earth*

- and Planetary Science Letters, 223 : 1~16.
- Mosenfelder J L, Schertl H P, Smyth J R, *et al.* 2005. Factors in the preservation of coesite: The importance of fluid infiltration [J]. American Mineralogist, 90 : 779~789.
- Powell R and Holland T J B. 2008. On thermobarometry [J]. Journal of Metamorphic Geology, 26 : 155~179.
- Ravna E J K and Terry M P. 2004. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists—an evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz [J]. Journal of Metamorphic Geology, 22 : 579~592.
- Reinecke T. 1991. Very-high-pressure metamorphism and uplift of coesite-bearing metasediments from the Zermatt-Saas zone, Western Alps [J]. European Journal of Mineralogy, 3 : 7~17.
- Smith D C. 1984. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics [J]. Nature, 310 : 641~644.
- Stipksa P, Powell R. 2005. Constraining the P-T path of a MORB-type eclogite using pseudosections, garnet zoning and garnet-clinopyroxene thermometry: an example from the Bohemian Massif [J]. Journal of Metamorphic Geology, 23 : 725~743.
- Su W, Gao J, Klemd R, *et al.* 2010. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaids [J]. European Journal of Mineralogy, 22 : 473~478.
- Tian Z L and Wei C J. 2013. Metamorphism of ultrahigh-pressure eclogites from the Kebuerte Valley, South Tianshan, NW China: phase equilibria and P-T path [J]. Journal of Metamorphic Geology, 31 : 281~300.
- Wain A, Waters D, Jephcoat A, *et al.* 2000. The high-pressure to ultrahigh-pressure eclogite transition in the Western Gneiss Region, Norway [J]. European Journal of Mineralogy, 12 : 667~687.
- Wang B, Faure M, Shu L S, *et al.* 2010. Structural and Geochronological Study of High-Pressure Metamorphic Rocks in the Kekesu Section (Northwestern China): Implications for the Late Paleozoic Tectonics of the Southern Tianshan [J]. Journal of Geology, 118 : 59~77.
- Wei C J, Powell R and Zhang L F. 2003. Eclogites from the south Tianshan, NW China: petrological characteristic and calculated mineral equilibria in the Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system [J]. Journal of Metamorphic Geology, 21 : 163~179.
- Wei C J, Wang W, Clarke G L, *et al.* 2009. Metamorphism of high/ultrahigh-pressure pelitic-felsic schist in the South Tianshan orogen, NW China: phase equilibria and p-T path [J]. Journal of Petrology, 50 : 1 973~1 991.
- Wendt A S, D'Arco P, Goffe B, *et al.* 1993. Radial cracks around al-p-ha-quartz inclusions in almandine: constraints on the metamorphic history of the Oman mountains [J]. Earth and Planetary Science Letters, 114 : 449~461.
- Wu Y B, Gao S, Zhang H F, *et al.* 2009. U-Pb age, trace-element, and Hf-isotope compositions of zircon in a quartz vein from eclogite in the western Dabie Mountains: Constraints on fluid flow during early exhumation of ultra-high-pressure rocks [J]. American Mineralogist, 94 : 303~312.
- Xiao W J, Huang B C, Han C M, *et al.* 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens [J]. Gondwana Research, 18 : 253~273.
- Yang X, Zhang L F, Tian Z L, *et al.* 2013. Petrology and U-Pb zircon dating of coesite-bearing metapelite from the Kebuerte Valley, western Tianshan, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 70~71 : 295~307.
- Zhang L F, Ai Y L, Li X P, *et al.* 2007b. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks [J]. Lithos, 96 : 266~280.
- Zhang L F, Ai Y L, Song S G, *et al.* 2007a. A brief review of UHP meta-ophiolitic rocks, southwestern Tianshan, western China [J]. International Geology Review, 49 : 811~823.
- Zhang L F, Ellis D J and Jiang W B. 2002a. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China: Part I. Evidence from inclusions of coesite pseudomorphs in garnet and from quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites [J]. American Mineralogist, 87 : 853~860.
- Zhang L F, Ellis D J, Williams S, *et al.* 2002b. Ultra-high pressure metamorphism in western Tianshan, China: Part II. Evidence from magnetite in eclogite [J]. American Mineralogist, 87 : 861~866.
- Zhang L F, Ellis D J, Williams S, *et al.* 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism in eclogites from the western Tianshan, China-Reply [J]. American Mineralogist, 88 : 1 157~1 160.
- Zhang Z M, Shen K, Liou J G, *et al.* 2011. Fluid-rock interactions during UHP metamorphism: A review of the Dabie-Sulu orogen, east-central China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 42 : 316~329.
- Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, *et al.* 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 50(19): 2 201~2 212.

附中文参考文献

- 李强, 张立飞. 2004. 新疆西南天山木扎尔特一带低压麻粒岩相变质作用 P-T 轨迹及其地质意义 [J]. 岩石学报, 20(3): 583~594.
- 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等. 2007. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究 [J]. 岩石学报, 23(4): 719~732.
- 吕增, 张立飞, 曲军峰, 等. 2007. 新疆西南天山哈布腾苏一带榴辉岩的岩石学特征及变质作用 p-T 轨迹 [J]. 岩石学报, 23(7): 1 617~1 626.
- 吕增, 张立飞, 陈振宇, 等. 2013. 西天山高压-超高压变质带折返过程中的流体活动证据: 高压脉体和异剥榴辉岩 [J]. 科学通报, 58(22): 2 175~2 179.
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究 [J]. 科学通报, 50 : 2 004~2 014.