

· 综述与进展 ·

西南天山变质俯冲杂岩带的内部结构

——来自木扎尔特剖面的启示

姜雪薇, 吕 增

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

摘要: 西南天山高压-超高压变质带是世界上少有的经历深俯冲的增生杂岩带, 是古天山洋向北俯冲的结果。针对该俯冲杂岩带内部结构的研究目前仍存在争论。本文以木扎尔特地区一条长约 4 km 的南北向剖面为例, 对西南天山高压-超高压变质带的野外特征、矿物学和变质演化研究进行了综述。目前的研究表明, 木扎尔特地区存在超高压和高压两类硬柱石榴辉岩, 但绝大部分都经历了强烈的退变质和变形改造, 被蓝片岩相或绿片岩相矿物组合取代。这些变基性岩在空间上构成北部和南部两个榴辉岩带, 二者为构造接触。木扎尔特超高压硬柱石榴辉岩与其围岩经历相似的峰期压力, 构成西南天山超高压带的西端。与东侧阿克牙孜地区超高压榴辉岩相比, 它们在变形特征、岩石组合和变质演化方面表现出一定的独特性, 很可能说明深俯冲板片在折返过程中沿构造带走向存在差异变质-变形演化。这些基础研究对全面认识冷俯冲增生杂岩带的变质演化及其俯冲和折返的地球动力学机制具有重要意义。

关键词: 超高压俯冲杂岩; 变质带温压结构; 硬柱石榴辉岩; 木扎尔特; 西南天山

中图分类号: P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)06-1181-08

Internal structure of deeply subducted accretionary complex in southwestern Tianshan: Implications from the Muzhaerte section

JIANG Xue-wei and LÜ Zeng

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

Abstract: The southwestern Tianshan high- and ultrahigh-pressure metamorphic belt is a rare example of metamorphosed accretionary mélangé exhumed from great depths, as a result of the closure of the paleo-Tianshan Ocean. The internal structure of the subduction complex is still controversial. Taking a ~4 km-long N-S cross section in the Muzhaerte area as an example, this paper summarizes the field occurrences, mineralogy and metamorphic evolution of the southwestern Tianshan high- and ultrahigh-pressure metamorphic belt. These studies suggest that there expose two types (i. e., UHP and HP) of lawsonite eclogites, but most of them were strongly retrogressed and deformed at blueschist- and greenschist-facies conditions. These metabasic rocks constitute two eclogite belts, including northern and southern, that are separated by a fault. The Muzhaerte UHP lawsonite eclogites and their host rocks experienced

收稿日期: 2021-03-19; 接受日期: 2021-09-19; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFA0708501); 国家自然科学基金项目(42072075)

作者简介: 姜雪薇(1995-), 女, 硕士研究生, 矿物学岩石学矿床学专业; 通讯作者: 吕增(1981-), 男, 副教授, 主要从事变质作用研究, E-mail: luzeng@pku.edu.cn.

网络首发时间: 2021-10-15; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20211014.2019.002.html>

similar peak metamorphism, constituting the western termination of the UHP metamorphic belt of southwestern Tianshan. Compared with the eastern Akeyazi UHP eclogites, they are different in terms of deformation features, rock assemblages and metamorphic experiences, probably indicating that deeply subducted slab occurred different metamorphic and transform evolution along-strike variations of tectonometamorphic processes during exhumation. These results are fundamental to unravel the metamorphic evolution of subducted accretionary mélange and related geodynamics during slab subduction and uplift.

Key words: UHP subducted mélange; metamorphic p - T structure; lawsonite eclogites; Muzhaerte; southwestern Tianshan

Fund support: National Key Research and Development Program of China (2019YFA0708501); National Natural Science Foundation of China (42072075)

俯冲带内部结构的确定是建立俯冲带演化及相关地球动力学模型的基础 (Guillot *et al.*, 2009)。俯冲带内部结构的解析一般从温压条件、年代学以及地球化学等多方面开展, 其中温压条件的准确厘定是变质作用研究的重点之一。西南天山造山带俯冲变质增生杂岩带, 又称西南天山高压-超高压变质带, 具有长期演化、多阶段折返、峰期地热梯度低以及流体活动记录丰富等特点, 受到国内外同行的广泛关注 (Bayet *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019), 其内部结构目前存在两种不同的认识: ① 变质带来自不同深度的岩石无序“混杂”而成 (Klemd *et al.*, 2011); ② 变质带由若干变质程度不同的较大规模地质体拼贴而成 (Lü *et al.*, 2012)。详细的剖面岩石学比较研究有助于解析古俯冲带内部的精细结构, 对于揭示陆缘增生楔沿较低地温梯度的深俯冲行为及其折返动力学机制具有重要意义。本文对西南天山变质俯冲杂岩带西端木扎尔特地区的剖面研究情况, 包括野外关系、岩相学、矿物学和热力学模拟等进行了综述, 并与其它剖面进行对比, 提出了当前研究存在的问题并对未来的发展方向进行了展望。

1 地质背景及研究概况

南天山造山带近东西向延伸约 2 500 km, 其位于中国新疆伊犁地区的部分通常被称为西(南)天山造山带 (图 1a), 一般认为是塔里木板块向伊犁-中天山板块之下长期俯冲并最终于石炭纪碰撞形成的 (Han *et al.*, 2011)。以中天山南缘断裂带为界, 以北的变质岩石属于低压相系, 包括绿片岩、角闪岩和麻粒岩相岩石, 其中绿片岩-角闪岩相岩石广泛分布, 麻粒岩相岩石 (包括富铝和基性麻粒岩) 主要出

露于木扎尔特地区 (李强等, 2004)。断裂带以南的高压相系岩石呈楔形展布, 近东西向延伸约 200 km, 南北向最宽处接近 20 km。该高压变质带主要呈“基质”夹“岩块” (block-in-matrix) 的构造特征, “岩块”主要由透镜状变基性岩和少量超基性岩组成。变基性岩包括蓝片岩及退变程度不一的榴辉岩。超基性岩透镜体数量较少, 但往往以孤立的大型构造岩块产出, 与其密切伴生的岩石类型有 (退变) 榴辉岩、异剥钙榴岩以及少量石英-菱镁岩。基质主要由泥质-钙质-长英质片岩以及大理岩组成。

高压-超高压变质带在木扎尔特主河道东侧的南北向剖面 (以下简称木扎尔特剖面) 出露约 4 km (图 1b), 是贯穿该变质带的最短剖面, 其北部边界为长阿吾子断裂, 南部边界为图拉苏断裂 (王宝瑜等, 1994)。木扎尔特河是连接天山南北的交通要道 (又称夏塔古道), 其沿岸剖面上的蓝片岩自 20 世纪 70 年代开始逐渐进入人们的视野 (中国科学院登山科学考察队, 1985), 但早期文献更多强调的是木扎尔特蓝片岩和超基性岩 (已充分蛇纹岩化) 这一岩石组合在限定板块缝合带构造位置方面的作用。Gao 等 (1999) 研究了木扎尔特剖面的蓝片岩, 但未报道榴辉岩的相关数据。李旭平等 (2003) 首次报道了长阿吾子沟南坡的残余榴辉岩相矿物组合和矿物成分数据, 表明这一地区的岩石曾经达到榴辉岩相变质条件。Zhang 等 (2003) 的研究表明木扎尔特的泥质片岩达到了榴辉岩相的压力范围。近年来, 在木扎尔特地区高压岩石的主要工作集中于长阿吾子沟的蛇纹岩及其伴生岩石的形成及演化研究 (Li *et al.*, 2007; Shen *et al.*, 2015)。虽然前人对木扎尔特剖面进行了剖面绘制和描述 (王作勋等, 1990; 王宝瑜等, 1994) 以及零星的矿物学和变形研究 (Gao *et al.*, 1999; Scheltens *et al.*, 2015), 但是缺少系统

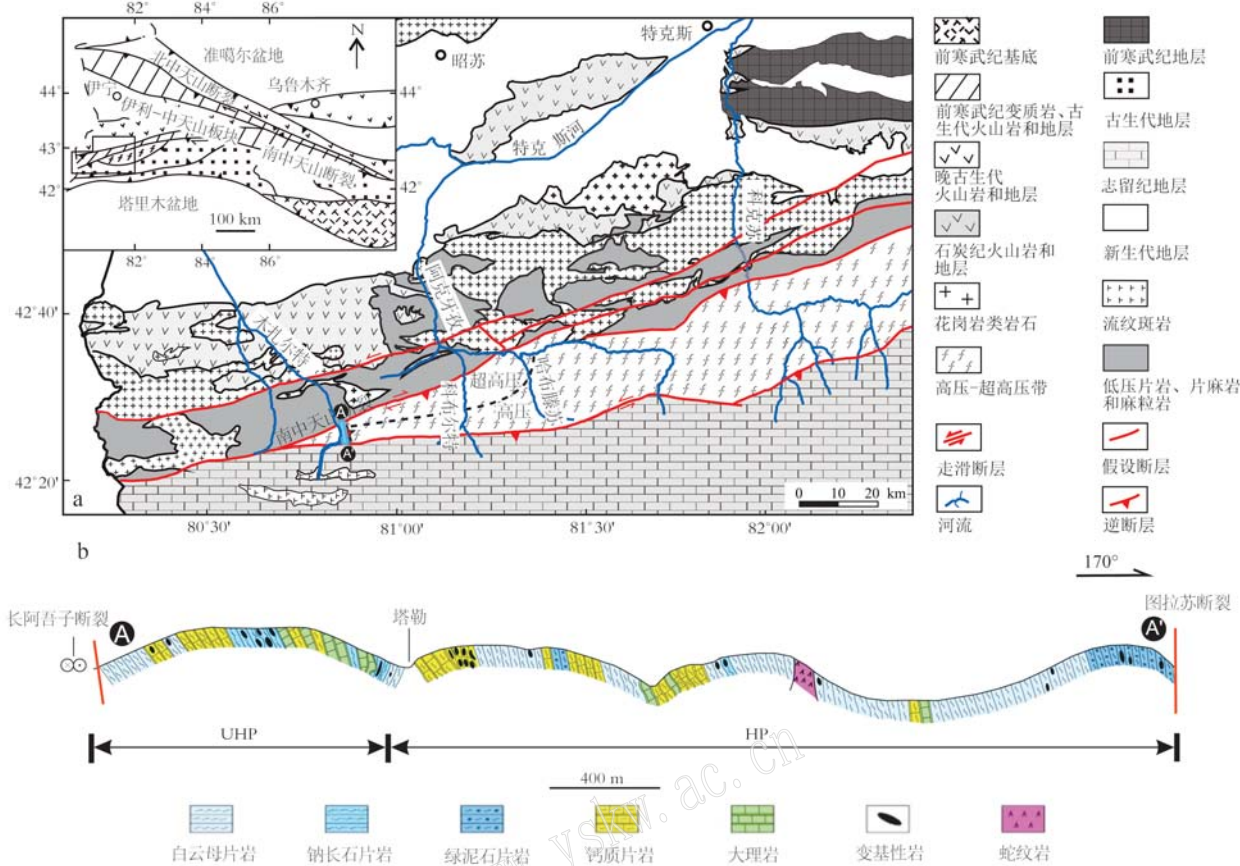


图1 西南天山高压-超高压变质带木扎尔特区域地质图(a)和木扎尔特剖面图(b) (改自 Lü *et al.*, 2019b)

Fig. 1 Simplified geological map of the HP-UHP metamorphic belt of southwestern Tianshan (a) and the Muzhaerte section (b) (modified after Lü *et al.*, 2019b)

的岩石学研究，人们对其变质演化历史及其地球动力学过程并不清楚。

2 木扎尔特剖面概况

与世界上典型的高压变质带一样，木扎尔特的超高压岩石也由基性岩块和变沉积岩系岩石组成(图2)。变基性岩以规模不等的透镜体产出，大部分情况下它们零星分布于剖面上，而在个别地段则成群出现。大部分变基性岩具有绿片岩的特点，外观呈灰绿色，少数因富含蓝闪石而呈蓝色。一些变基性岩中不均匀分布着由草绿色基质绿辉石和暗红色石榴子石组成的斑块，代表残余的榴辉岩(图3a)。它们受到次生碳酸盐化作用改造和绿片岩相叠加，可见大量细小的碳酸盐脉和钠长石脉穿插其中。变沉积岩系岩石以泥质片岩(白云母片岩)、钙质片岩、大理岩和钠长片岩为主，少数为蓝闪片岩(图3b~3d)。除钠长片岩外，这类岩石绝大部分变形强烈，

产状近直立，其白云母定向形成的面理与区域上由中天山南缘断裂带走滑活动形成的面理平行。钠长片岩富含钠长石，定向较弱，团块状，可见大量粗粒它形钠长石变斑晶，主要分布于剖面北段的塔勒一带，往往与变基性岩伴生。大理岩分布无规律，大部分以薄层状夹于钙质片岩和白云母片岩中，只有剖面的北段可见厚层-巨厚层大理岩。白云母片岩分布范围极广，靠近长阿吾子沟的白云母片岩与土黄色的钙质片岩伴生，二者风化破碎极其严重。绿泥石片岩主要产于剖面南端(图1b)，在其它位置有零星出露；它们的绿泥石含量一般大于5%，呈浅灰绿色，包括绿泥蓝闪片岩和绿泥白云母片岩两种类型，与相邻的灰白色白云母片岩区别明显。

3 变沉积岩系岩石(变质火山碎屑岩)的超高压标志

目前所报道的西南天山超高压变沉积岩主要来自阿克牙孜河流域(Lü *et al.*, 2019a)，在这类岩石

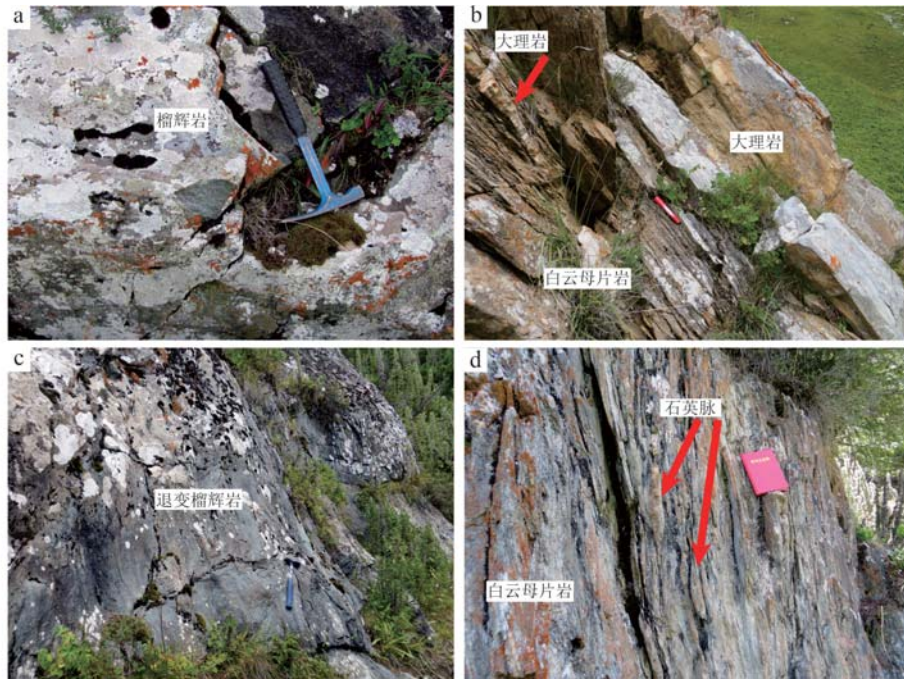


图2 木扎尔特剖面代表性岩石的野外产状

Fig. 2 Field occurrences of representative rock types of the Muzhaerte section

a—透镜状新鲜榴辉岩(超高压单元); b—互层状白云母片岩和大理岩(超高压单元); c—灰绿色退变质榴辉岩(高压单元); d—近直立的含石英条带白云母片岩(高压单元)
 a—lens-shaped fresh eclogite (UHP unit); b—interlayered phengite schist and marble (UHP unit); c—greenish retrograde eclogite (HP unit); d—vertical and strongly sheared phengite schist with quartz bands (HP unit)

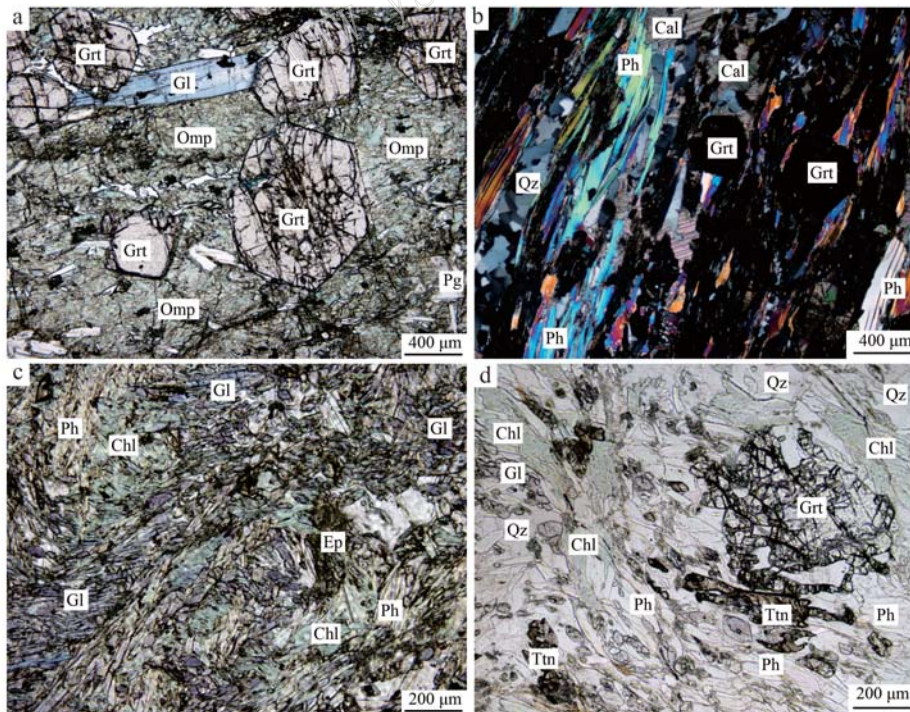


图3 木扎尔特剖面保存较好的岩石类型的典型结构

Fig. 3 Typical textures of relatively fresh samples from the Muzhaerte section

a—榴辉岩(单偏光, 超高压单元); b—钙质片岩(正交偏光, 超高压单元); c—蓝闪片岩(单偏光, 高压单元); d—云母片岩(单偏光, 高压单元); Grt—石榴子石; Omp—绿辉石; Gl—蓝闪石; Ph—多硅白云母; Pg—钠云母; Cal—方解石; Chl—绿泥石; Qz—石英; Ttn—榍石; Ep—绿帘石
 a—eclogite (plane-polarized light, UHP unit); b—calcschist (crossed polarizer, UHP unit); c—glaucophane schist (plane-polarized light, HP unit); d—phengite schist (plane-polarized light, HP unit); Grt—garnet; Omp—omphacite; Gl—glaucophane; Ph—phengite; Pg—paragonite; Cal—calcite; Chl—chlorite; Qz—quartz; Ttn—titanite; Ep—epidote

中超高压标志矿物—柯石英均直接或间接包裹于石榴子石中。虽然一些早期的研究认为木扎尔特地区的泥质片岩也达到超高压条件 (Zhang *et al.*, 2003), 但是缺少直接的超高压矿物学证据。作为最具代表性的岩石类型, 木扎尔特地区变沉积岩系岩石的石榴子石中有无柯石英包体将是解决西南天山超高压变质带空间尺度问题的关键。与阿克牙孜地区相似的是, 木扎尔特剖面的含石榴子石的高压变质沉积岩以泥质片岩和长英质片岩为主。新鲜的泥质片岩富含白云母和石英, 次要矿物为钠长石、石榴子石、帘石、碳酸盐矿物、角闪石(包括钠质闪石和钠钙质闪石)、石墨、金红石和榍石。与泥质片岩不同的是, 长英质片岩(又称钠长片岩)的主要矿物是钠长石和石英, 钠长石多为变斑晶, 其包裹有定向排列的白云母和角闪石, 这种特点表明这些钠长石均形成于退变质阶段, 很可能由硬玉转变而来。这类长英质岩石的石榴子石含量较低, 其包体以石英和金红石为主。Lü 等(2019a)借助拉曼光谱仪识别出木扎尔特长英质片岩的石榴子石变斑晶中的微粒柯石英, 这表明西南天山超高压变质带向西延伸到了木扎尔特地区。这些柯石英包体分布于石榴子石的核部及幔部, 其粒径不超过 50 μm , 光性均匀且不发育放射状裂纹。那些具有放射状裂纹的较大的二氧化硅包体均由多边形镶嵌状多晶石英构成。这些结构特征表明, 粒径越小的柯石英越容易得以保存, 这很可能是由于颗粒越小其减压膨胀产生的力较难使石榴子石发生破裂而增大其保存概率。目前, 仅在变沉积岩系的长英质片岩中发现柯石英, 可能的原因在于, 和泥质片岩相比, 这类由火山碎屑变质而来的岩石以粒状矿物为主, 其力学特征使它们能够相对有效地抵抗中天山南缘断裂的强烈剪切作用, 进而使作为压力容器 (pressure vessel) 的石榴子石免遭或遭受很弱的破坏。

4 两类硬柱石榴辉岩的识别及其差异演化

如上所述, 虽然木扎尔特的大部分变基性岩的基质矿物与绿片岩无异, 但是通过详细的显微结构分析, 发现石榴子石、角闪石和绿帘石等变斑晶中均含有绿辉石包体, 这说明这些变基性岩均达到了榴辉岩相, 只是经历了不同程度的绿片岩相退变质改造作用 (Lü *et al.*, 2019b)。虽然一些石榴子石也遭受局部绿泥石化, 但残余石榴子石中包裹的矿物

种类最为丰富, 以硬柱石和绿辉石为代表, 表明这些岩石来自冷俯冲高压变质带。根据包体矿物的总体特征, 明显可以将这些榴辉岩划分为两类, 即超高压和高压硬柱石榴辉岩, 它们的石榴子石成分具有明显不同的变化范围(图4), 前者较富镁而低钙, 后者低镁而高钙, 它们的峰期矿物组合分别为石榴子石+绿辉石±硬玉+硬柱石+蓝闪石+柯石英+金红石和石榴子石+绿辉石±透辉石+硬柱石±阳起石+蓝闪石+石英+榍石。在 THERMOCALC 软件算得的 p - T 视剖面基础上, 结合实际观察的矿物组合和石榴子石成分等值线温压计, 最终确定二者的峰期变质条件分别为 2.8~3.2 GPa、480~590 $^{\circ}\text{C}$ 和 1.3~1.85 GPa、390~500 $^{\circ}\text{C}$ (Lü *et al.*, 2019b)。在空间分布上, 前者仅出露于剖面的北段(塔勒沟以北, 即北带), 后者则位于剖面的南段(塔勒沟以南, 即南带)。这种空间关系表明二者来源于两个深度不同的变质单元, 与东部的阿克牙孜地区研究结果一致。结合变沉积岩系中柯石英的空间分布, 确定木扎尔特剖面超高压带的宽度约为 1 km。另外, 前人在木扎尔特地区报道的一些变基性岩石中石榴子石

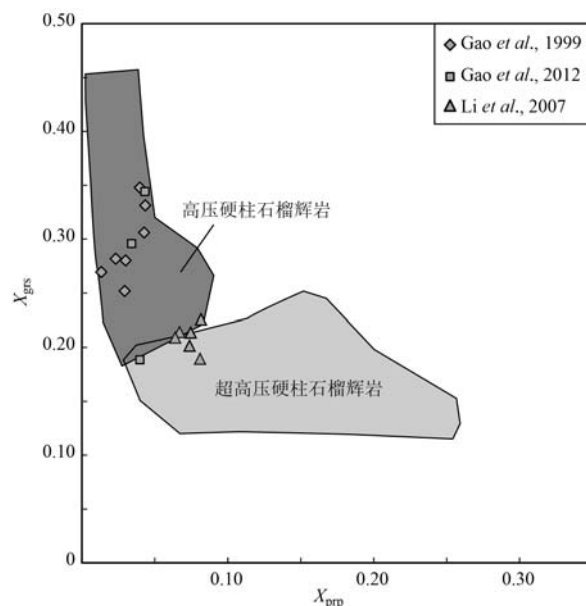


图4 木扎尔特剖面两类榴辉岩的石榴子石成分统计图
(改自 Lü *et al.*, 2019b)

Fig. 4 Compositional variations diagram of garnet from two types of eclogites of the Muzhaerte section (modified after Lü *et al.*, 2019b)

X_{pp} —镁铝榴石组分; X_{gs} —钙铝榴石组分

X_{pp} —molar fraction of pyrope component; X_{gs} —molar fraction of grossular component

具有低钙的特点(图4, Gao *et al.*, 1999, 2012), 它们应当来自高压单元, 其个别石榴子石核部因极富锰而导致钙含量偏低, 落入超高压单元的石榴子石范围。与长阿吾子沟超高压蛇纹岩伴生的榴辉岩的石榴子石成分投在高压和超高压过渡区域(图4)(Li *et al.*, 2007; Shen *et al.*, 2015), 根据野外关系, 笔者认为这些与蛇纹岩伴生的榴辉岩峰期达到了超高压条件, 其石榴子石钙含量偏高可能暗示原岩受到含钙流体的交代作用(例如异剥钙榴岩化)。

5 木扎尔特高压-超高压变质岩的独特性

木扎尔特地区在构造位置上是西南天山高压变质带的西延部分, 但其与东侧的阿克牙孜地区在构造变形、岩石组合和变质演化等方面具有明显的不同。在构造变形方面, 木扎尔特的高压岩石产状近直立, 其面理近北东东走向, 明显受到中天山南缘断裂带更强的剪切作用控制。而在阿克牙孜地区, 产状变化较大, 很多剖面向西倾, 只有在靠近中天山南缘断裂带的位置才表现出北东东走向。在岩石组合方面, 木扎尔特地区出露有较大规模的蛇纹岩, 阿克牙孜地区目前未发现这一岩石类型。和变沉积岩相比, 蛇纹岩具有较低的粘滞系数, 容易发生剪切滑动, 更有利于超高压榴辉岩的折返(Guillot *et al.*, 2009)。岩石组合的差异可能意味着这两个地区的超高压榴辉岩在折返机制和折返速率等方面存在差异。在矿物学方面, 阿克牙孜地区的许多超高压榴辉岩的石榴子石变斑晶具有明显的生长环带, 与核部相比, 边部具有高钙和高镁的成分特点。但是在木扎尔特剖面上, 超高压榴辉岩的石榴子石虽然在边部镁升高, 但是钙的变化并不明显。造成这种东、西差异的地球动力学机制并不明确, 有待进一步深入研究。尽管如此, 两个地区的超高压和高压变质带的空间配置特征是相同的, 即超高压带在高压带的北侧, 超高压带以中天山南缘的深大断裂为界, 这种空间关系很可能都是受到古天山洋自南向北的俯冲极性控制。

石榴子石的成分环带往往记录了温压条件的变化, 可以用来恢复变质作用 p - T 轨迹。相平衡模拟表明, 木扎尔特的超高压硬柱石榴辉岩的石榴子石核部和边部均生长于超高压条件下(Lü *et al.*, 2019b), 与大别造山带和西阿尔卑斯造山带的超高压硬柱石榴辉岩均不同(Groppo *et al.*, 2009; Wei

et al., 2013)。这两个造山带的超高压榴辉岩中只有石榴子石的边部记录了超高压条件, 其核部形成于蓝片岩相或角闪岩相条件(Groppo *et al.*, 2009; Wei *et al.*, 2013)。和这两个地区的同类岩石相比, 木扎尔特超高压硬柱石榴辉岩的石榴子石具有较低的钙含量, 但镁含量变化较大, X_{Mg} 可以低至 0.05。这些成分特点很可能表明, 木扎尔特超高压硬柱石榴辉岩的峰期变质温度要比其它变质带低得多。美国科罗拉多高原火山通道中的超高压硬柱石榴辉岩捕虏体记录了洋壳的冷俯冲作用(Usui *et al.*, 2006), 它们的全岩成分和石榴子石成分均与木扎尔特的超高压硬柱石榴辉岩具有较大的相似度, 这说明虽然二者的折返机制不同, 但它们在俯冲阶段很可能具有相似的动力学环境。

6 展望

对高压变质带内部结构的解析是建立俯冲带地球动力学模型的基础。Guillot 等(2009)对地表出露的高压-超高压变质带进行统计, 并把它们划分为3种类型, 即大陆型、蛇纹岩型和增生楔型。目前报道的绝大部分超高压变质带都属于大陆型俯冲带。越来越多的研究表明大陆型俯冲带的超高压榴辉岩和围岩经历了相同的变质演化历史(Rolfo *et al.*, 2004; Brueckner, 2018), 少部分岩石因反应动力学原因未记录超高压条件(Young & Kylander-Clark, 2015)。深俯冲洋壳由于整体密度较大而通常难以折返(Agard *et al.*, 2009), 因此在地表极少出露且规模较小, 如西阿尔卑斯 Zermatt-Saas 带(Groppo *et al.*, 2009)。地表较常见的高压变质洋壳岩石多被裹挟于蛇纹岩和活动陆缘增生杂岩中, 分别被称为蛇纹岩型和增生楔型高压带(Guillot *et al.*, 2009)。与大陆型和蛇纹岩型不同的是, 增生楔型高压带的主体为陆缘增生碎屑沉积岩, 它们以叠瓦状岩片形式产于造山带中, 峰期压力一般不超过 2.5 GPa, 未达到超高压条件(Guillot *et al.*, 2009)。大量的实验岩石学和地球化学研究表明, 增生楔杂岩可以沿冷俯冲带俯冲至更大深度, 再通过底辟作用进入地幔楔并发生部分熔融形成大规模岛弧岩浆(Nielsen & Marschall, 2017)。西南天山变质带是世界上唯一的经历超高压变质的增生楔杂岩带, 虽然目前开展了大量的工作(Zhang *et al.*, 2019), 但对其内部结构以及折返过程中发生的流体交代、元素迁移和折返

动力学过程仍然缺乏深入了解。西南天山木扎尔特的高压和超高压岩石产状均接近直立,分别具有明确的地质边界,这些特点很可能说明西南天山的超高压变质增生杂岩带的折返动力学机制与其它增生楔型高压变质带类似,都是在大型逆冲推覆构造作用下与较浅部高压变质带发生了构造并置。木扎尔特高压-超高压变质带虽然后期受到中天山南缘断裂带韧性剪切的改造,可能在南北方向发生挤压缩短,但仍然保持了空间连续性和内部一致性。一些研究表明,走滑断裂产生的局部拉张环境有助于超高压岩片的折返(Boutelier & Chemenda, 2008)。西南天山超高压增生楔北侧紧邻中天山南缘大型走滑断裂,是否属于这一机制则有待进一步深入研究。古天山洋从形成到闭合持续了数亿年,大量物质可能沿洋盆北侧俯冲带进入地幔。西南天山变质带不仅包含洋壳物质,也包含不成熟的弧火山物质(Bayet *et al.*, 2018),详细研究不同单元物质来源及其差异演化将对认识洋壳俯冲过程中的物质循环方式和效率以及岛弧岩浆的形成和演化具有重要意义。

7 结论

西南天山造山带木扎尔特地区的高压变质带表现出“基质”夹“岩块”的构造特征,作为“岩块”的变基性岩零星分布于变泥质岩为主的“基质”中。在南北向的木扎尔特高压剖面上出露两类变基性岩,它们分别是受到不同程度退变质改造的超高压和高压硬柱石榴辉岩,相平衡计算的峰期温压条件与岩相学所观测到的石榴子石包体矿物组合一致。这两类岩石分别位于剖面的北部和南部,代表了两个不同的变质单元。超高压硬柱石榴辉岩与其围岩均含有柯石英,具有共同的变质演化历史,属于同一个构造单元。虽然受到不同程度的造山挤压以及剪切变形改造,但是这些俯冲带岩石在折返和剥露过程中保持了内部结构的相对完整性。这些研究表明,来自不同深度的俯冲岩片在造山带中各自具有一定的空间规模,它们与相邻的地质单元之间具有明确的构造界线。后续对于该剖面不同变质单元的物质来源和变质作用差异性方面的进一步研究,有助于加深对冷俯冲物质循环机制和相关动力学过程的认识。

致谢 感谢匿名审稿人对本文提出的建设性修改意见!

References

- Agard P, Yamato P, Jolivet L, *et al.* 2009. Exhumation of oceanic blueschists and eclogites in subduction zones: Timing and mechanisms [J]. *Earth-Science Reviews*, 92(1~2): 53~79.
- Bayet L, John T, Agard P, *et al.* 2018. Massive sediment accretion at ~80 km depth along the subduction interface: Evidence from the southern Chinese Tianshan [J]. *Geology*, 46(6): 495~498.
- Boutelier D A & Chemenda A I. 2008. Exhumation of UHP/LT rocks due to the local reduction of the interplate pressure: Thermo-mechanical physical modelling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1~4): 226~232.
- Brueckner H K. 2018. The great eclogite debate of the western gneiss region, norwegian caledonides: The in situ crustal versus exotic mantle origin controversy [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 36(5): 517~527.
- Gao J, Klemd R, Zhang L F, *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(6): 621~636.
- Gao J, Klemd R, Qian Q, *et al.* 2012. The collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altai: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan orogen [J]. *Tectonophysics*, 499(1): 118~131.
- Groppo C, Beltrando M and Compagnoni R. 2009. The *p-T* path of the ultra-high pressure Lago di Cignana and adjoining high-pressure metamorphic units: Insights into the evolution of the subducting Tethyan slab [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(3): 207~231.
- Guillot S, Hattori K, Agard P, *et al.* 2009. Exhumation processes in oceanic and continental subduction contexts: A review [A]. Lallemand S and Funicello F. *Subduction Zone Geodynamics* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 175~205.
- Han B F, He G Q, Wang X C, *et al.* 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the south Tianshan orogen, central Asia, and implications for the northern Xinjiang, western China [J]. *Earth Science Reviews*, 109(3~4): 74~93.

- Klemd R, John T, Scherer E E, *et al.* 2011. Changes in dip of subducted slabs at depth: Petrological and geochronological evidence from HP-UHP rocks (Tianshan, NW-China) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(1~2): 9~20.
- Li Qiang and Zhang Lifei. 2004. The p - T path and geological significance of low-pressure granulite-facies metamorphism in Muzhaerta, southwest Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 583~594 (in Chinese with English abstract).
- Li Xuping, Zhang Lifei and Ai Yongliang. 2003. Discovery and geological significance of eclogite-associated rodingite in Changawuzi ophiolitic melange, Western Tianshan, Xinjiang [J]. *Progress in Natural Science*, 13(7): 754~760 (in Chinese).
- Li X P, Zhang L F, Wei C J, *et al.* 2007. Petrology of rodingite derived from eclogite in western Tianshan, China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(3): 363~382.
- Lü Z, Bucher K, Zhang L, *et al.* 2012. The Habutengsu metapelites and metagreywackes in western Tianshan, China; Metamorphic evolution and tectonic implications [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(9): 907~926.
- Lü Z, Zhang L and Yue J. 2019a. Coesite in metasediments from the Muzhaerte valley, southwestern Tianshan [J]. *Science Bulletin*, 64(2): 78~80.
- Lü Z, Zhang L F, Yue J, *et al.* 2019b. Ultrahigh-pressure and high-P lawsonite eclogites in Muzhaerte, Chinese western Tianshan [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 37(5): 717~743.
- Mountaineering Expedition of Chinese Academy of Sciences. 1985. *Geology and Paleontology of Tomur Peak Area, Tianshan Mountains* [M]. Ürümqi: Xinjiang People's Publishing House, 1~160 (in Chinese).
- Nielsen S G & Marschall H R. 2017. Geochemical evidence for mélangé melting in global arcs [J]. *Science Advances*, 3(4): e1602402.
- Rolfo F, Compagnoni R, Wu W, *et al.* 2004. A coherent lithostratigraphic unit in the coesite-eclogite complex of Dabie Shan, China; Geological and petrologic evidence [J]. *Lithos*, 73(1~2): 71~94.
- Scheltens M, Zhang L, Xiao W, *et al.* 2015. Northward subduction-related orogenesis of the southern Altai; Constraints from structural and metamorphic analysis of the HP/UHP accretionary complex in Chinese southwestern Tianshan, NW China [J]. *Geoscience Frontiers*, 6(2): 191~209.
- Shen T, Hermann J, Zhang L, *et al.* 2015. UHP metamorphism documented in Ti-chondrodite- and Ti-clinohumite-bearing serpentinized ultramafic rocks from Chinese southwestern Tianshan [J]. *Journal of Petrology*, 56(7): 1425~1458.
- Usui T, Eizo N, Herwart H, *et al.* 2006. Petrology and geochemistry of eclogite xenoliths from the Colorado plateau: Implications for the evolution of subducted oceanic crust [J]. *Journal of Petrology*, 47(5): 929~964.
- Wang Baoyu, Lang Zhijun, Li Xiangdong, *et al.* 1994. *Comprehensive Study on the Geological Section of the Western Tianshan Mountains in China* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wang Zuoxun, Wu Jiyi, Lü Xichao, *et al.* 1990. *Multicycle Tectonic Evolution and Mineralization in Tianshan Mountains* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wei C J, Qian J H and Tian Z L. 2013. Metamorphic evolution of medium-temperature ultra-high pressure (MT-UHP) eclogites from the South Dabie orogen, Central China: An insight from phase equilibria modelling [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(7): 755~774.
- Young D J & Kylander-Clark A R C. 2015. Does continental crust transform during eclogite facies metamorphism? [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(4): 331~357.
- Zhang L F, Ellis D J, Arculus R J, *et al.* 2003. 'Forbidden zone' subduction of sediments to 150 km depth-The reaction of dolomite to magnesite+aragonite in the UHPM metapelites from western Tianshan, China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(6): 523~529.
- Zhang L, Wang Y, Zhang L, *et al.* 2019. Ultrahigh pressure metamorphism and tectonic evolution of southwestern Tianshan orogenic belt, China: A comprehensive review [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 474(1): 133~152.

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.
- 李旭平, 张立飞, 艾永亮. 2003. 新疆西天山长阿吾子蛇绿混杂岩中与榴辉岩伴生的异剥钙榴岩的发现及其地质意义 [J]. *自然科学进展*, 13(7): 754~760.
- 中国科学院登山科学考察队. 1985. 天山托木尔峰地区的地质与古生物 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1~160.
- 王宝瑜, 郎智军, 李向东, 等. 1994. 中国天山西段地质剖面综合研究 [M]. 北京: 科学出版社.
- 王作勋, 郭继易, 吕喜朝, 等. 1990. 天山多旋回构造演化及成矿 [M]. 北京: 科学出版社.