

新疆西南天山含柯石英泥质片岩的岩石学特征 及变质作用 p - T 轨迹

田作林^{1,2}, 魏春景², 张泽明¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 新疆西南天山高压-超高压变质带主要由泥质-长英质片岩组成, 其中包裹榴辉岩、蓝片岩和超基性岩等透镜体。含柯石英泥质片岩具斑状/筛状变晶结构, 片状构造, 矿物组合为石榴石、多硅白云母、钠长石、钠云母、蓝闪石、冻蓝闪石、石英以及少量褐帘石、金红石和榍石, 柯石英包裹在石榴石变斑晶内。根据岩石学特征和相平衡模拟的结果, 识别出含柯石英泥质片岩经历了3期变质演化阶段: 压力峰期之前的进变质阶段(I), 由石榴石核部到含柯石英区域的环带确定, 特征为温度和压力同时升高, 所限定的压力峰期条件为500℃、2.9 GPa, 模拟的矿物组合为石榴石+蓝闪石+硬玉+纤柱石+硬柱石+金红石+多硅白云母+柯石英, 与含柯石英的事实相符; 压力峰期之后的升温降压至温度峰期阶段(II), 由石榴石含柯石英区域到边部的环带确定, 特征为温度升高压力降低, 所限定的温度峰期条件为560℃、2.35 GPa, 模拟的矿物组合为石榴石+蓝闪石+硬玉+硬柱石+金红石+多硅白云母+石英, 发生连续脱水反应蓝闪石+纤柱石+硬柱石=石榴石+硬玉+水, 释放出岩石中约45%的水, 导致柯石英转变为石英, 纤柱石消失; 温度峰期之后的近等温降压阶段(III), 由晚期矿物组合钠云母+钠长石+冻蓝闪石+榍石+石英的稳定温压条件确定(495~550℃、1.0~1.15 GPa), 减压抬升过程中, 在约2.1 GPa处, 发生脱水反应硬玉+硬柱石=蓝闪石+钠云母+水, 导致硬柱石消失, 钠云母出现, 在约1.1~1.25 GPa处, 榍石取代金红石, 绿辉石消失, 钠长石和冻蓝闪石出现。阶段II强烈的连续脱水过程十分利于矿物组合的再平衡, 导致绝大多数压力峰期的柯石英转变为石英, 仅有极少数因包裹在刚性石榴石中而得以保存。含柯石英泥质片岩及其榴辉岩透镜体经历了完全相同的俯冲折返过程。

关键词: 柯石英; 超高压; 泥质片岩; 相平衡; 西南天山

中图分类号: P588.34⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)02-0265-11

Petrology and metamorphic p - T path of coesite-bearing pelitic schist from southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang

TIAN Zuo-lin^{1,2}, WEI Chun-jing² and ZHANG Ze-ming¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The high pressure(HP)-ultrahigh(UHP)metamorphic belt of southwestern Tianshan Mountains in Xinjiang mainly consists of pelitic-felsic schist that encloses lenses of eclogite, blueschist and ultramafic rock. The coesite-bearing pelitic schist shows porphyroblastic/diablastic texture and schistose structure, and its mineral assemblage consists mainly of garnet, phengite, albite, paragonite, glaucophane, barroisite and quartz together with minor allanite, rutile and titanite. Coesite is included in garnet. The petrology and phase equilibrium modeling indicate that the coesite-bearing pelitic schist has experienced three metamorphic stages. Stage I is the prograde

收稿日期: 2016-01-05; 接受日期: 2016-02-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41502060); 中国博士后科学基金(2015M571085)

作者简介: 田作林(1986-), 男, 汉族, 博士, 从事变质岩石学和相平衡模拟研究工作, E-mail: zuolin.tian@gmail.com。

to pressure peak stage characterized by increase in both pressure and temperature, which is constrained by garnet zoning from core to coesite-bearing domain. The p - T condition and mineral assemblage of the pressure peak are estimated to be 500°C, 2.9 GPa and garnet + glaucophane + jadeite + carpholite + lawsonite + rutile + phengite + coesite, which is comparable with the occurrence of coesite. Stage II is the post pressure peak decompression and heating to the temperature peak, which is constrained by garnet zoning from coesite-bearing domain to rim. The p - T condition and mineral assemblage of the temperature peak are estimated to be 560°C, 2.35 GPa and garnet + glaucophane + jadeite + lawsonite + rutile + phengite + quartz. The dehydration reaction glaucophane + carpholite + lawsonite = garnet + jadeite + H₂O releases ~45% of water bound in the rock and leads to coesite transforming into quartz and carpholite disappearance. Stage III is the post temperature peak isothermal decompression stage, which is constrained by the p - T condition of equilibrium assemblage albite + paragonite + barrosite + titanite (495~550°C, 1.0~1.15 GPa). During the decompression, the dehydration reaction jadeite + lawsonite = glaucophane + paragonite + H₂O occurs at ~2.1 GPa, resulting in lawsonite decomposition and paragonite appearance. At ~1.1~1.25 GPa, rutile is replaced by titanite, accompanied by omphacite disappearance as well as the formation of albite and barrosite. The strong continuous dehydration during stage II is in great favor of re-equilibrium of mineral assemblage, which leads to most coesite at pressure peak transforming into quartz. Only minor coesite is survived in garnet. The coesite-bearing pelitic schist and its enclosing eclogite lens have experienced the same subduction and exhumation.

Key words: coesite; ultrahigh pressure; pelitic schist; phase equilibrium; southwestern Tianshan Mountains

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41502060); China Postdoctoral Science Foundation Grant (2015M571085)

自西南天山地区发现榴辉岩及后续发现超高压指示性矿物柯石英(高俊, 1997; Lü *et al.*, 2008)以来, 西南天山高压-超高压变质带的演化已经成为全世界地质学家关注的热点, 其中高压-超高压岩石变质作用演化是研究的重点和难点。近来, 详细的岩相学和相平衡模拟研究已经基本确定研究区内榴辉岩都经历了相似的变质演化过程, 即先升温升压至压力峰期再升温降压至温度峰期, 此后呈现近等温降压的顺时针 p - T 演化轨迹, 超高压榴辉岩比高压榴辉岩经历了压力更高的峰期变质作用(Lü *et al.*, 2009; Tian and Wei, 2013, 2014; Du *et al.*, 2014c)。相比而言, 超高压榴辉岩的围岩泥质-长英质片岩的变质作用研究还相对薄弱, 其所限定的 p - T 演化轨迹也不尽相同, 如 Du 等(2014c)报道的超高压泥质片岩的 p - T 演化轨迹与上述超高压榴辉岩相似, 而另一些学者则认为超高压泥质片岩经历了先升温升压至压力峰期、此后近等温降压的 p - T 演化过程(Wei *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2013)。此外, 超高压指示性矿物柯石英只保存在极少数榴辉岩或片岩的石榴石内(Lü *et al.*, 2008, 2009, 2014; Lü and Zhang, 2012; Yang *et al.*, 2013), 其保存机制是否与其寄主岩石的变质演化过程密切相关也非

常值得探讨。因此, 本文对西南天山一块含柯石英泥质片岩进行了详细的岩石学和相平衡模拟研究, 确立了其变质演化 p - T 轨迹以及变质作用演化过程和流体行为, 并探讨了柯石英的保存机制以及研究区内超高压岩石的构造演化过程。

1 地质背景

天山造山带横亘于中亚, 近东西向绵延约1 500 km, 在晚古生代由塔里木板块和准噶尔板块构造拼贴形成(Coleman, 1989; Gao *et al.*, 1998)。中国境内的天山造山带分为南北两支(图1), 北支向西延伸至哈萨克斯坦境内博尔塔拉河断裂, 南支向西延伸至吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦高压变质带。西南天山高压-超高压变质带呈豆荚状分布在伊犁-中天山微板块南缘, 东西向延展约200 km(图1), 主要由泥质-长英质片岩组成, 包裹榴辉岩、蓝片岩、超基性岩和大理岩透镜体。不同的定年方法基本确定高压-超高压榴辉岩和泥质片岩的峰期变质时代约为320~310 Ma(Su *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011; Klemm *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2014a)。该变质带的北侧为一套高温低压变质岩

带,麻粒岩相变质作用发生在 ~ 400 Ma 和 $290\sim 270$ Ma(李强等, 2004; 苟龙龙等, 2009; Xia *et al.*, 2014),与高压-超高压变质带可以构成广义上的变质双带(Brown, 2009);其南侧为一套以奥陶纪灰岩为主的早古生代沉积岩层。

近来,Lü 等(2012a)将高压-超高压变质带划分为北侧的超高压单元和南侧的高压单元,迄今为止已在多处发现含柯石英的榴辉岩和泥质片岩(Lü *et al.*, 2008, 2009, 2012b, 2014; Lü and Zhang, 2012; Yang *et al.*, 2013),均位于超高压单元内(图1)。本文报道的含柯石英泥质片岩位于科布尔特河支流阿坦塔义河的上游,包裹共生的榴辉岩和蓝片

岩透镜体,相平衡模拟表明这些基性岩透镜体曾经历过超高压变质作用(Tian and Wei, 2014)。

2 分析方法

矿物电子探针分析和背散射图像在北京大学教育部造山带与地壳演化重点实验室完成,电子探针型号为 JXA-8100,实验条件为加速电压 15 kV,束流 10 nA,云母类矿物束斑为 $5\ \mu\text{m}$,其他矿物束斑为 $1\ \mu\text{m}$ 。采用 PRZ 方法修正,标准样品为美国 SPI 公司的 53 种矿物。

全岩主量元素采用美国利曼公司 ICP-OES 测试,

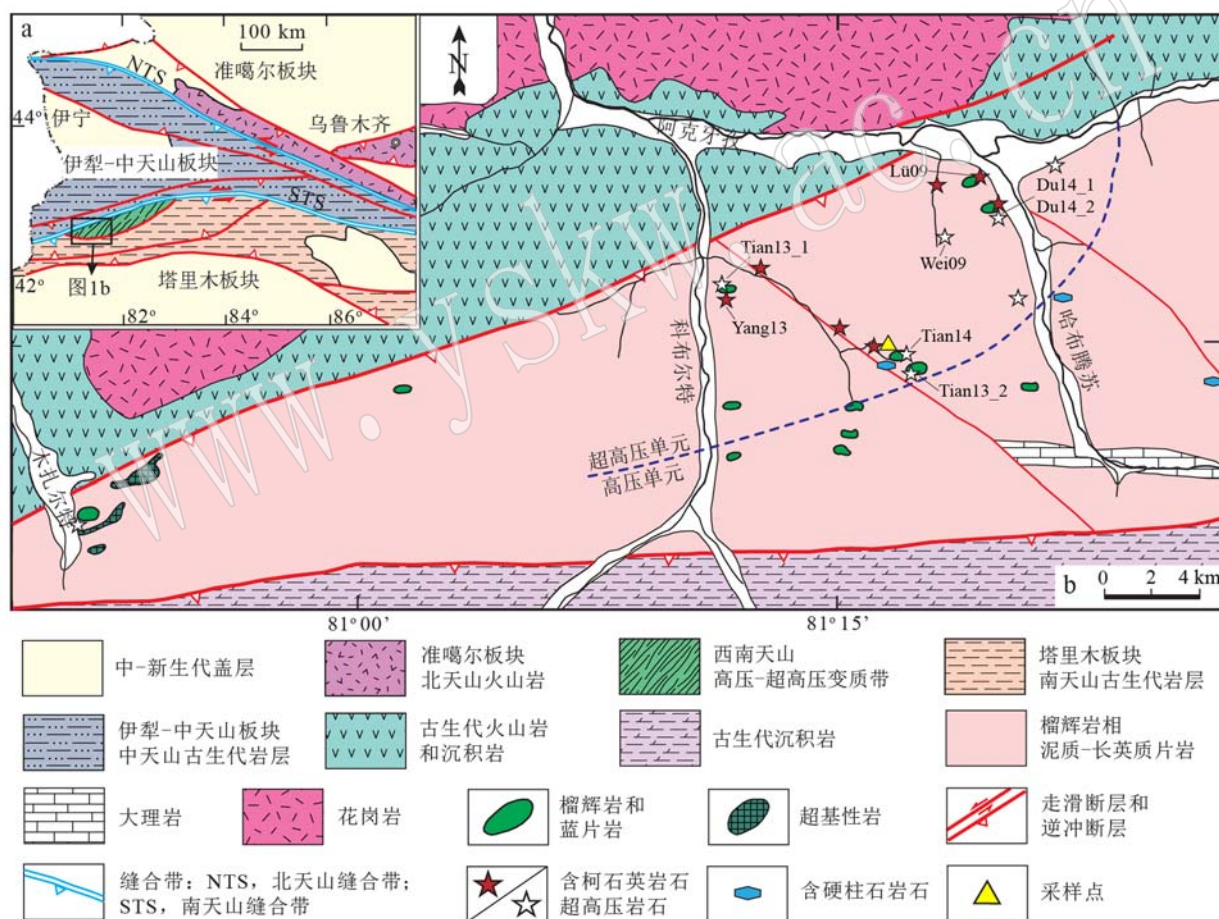


图1 中国天山造山带西段构造格架简图(a)和新疆西南天山高压-超高压变质带地质简图(b)(修改自 Tian and Wei, 2014)

Fig. 1 Tectonic framework of the western part of the Chinese Tianshan Mountains(a) and schematic geological map of the southwestern Tianshan HP-UHP belt, showing the distribution of sampling localities (b) (modified after Tian and Wei, 2014). 高压与超高压单元界限引自 Lü 等(2012a); 超高压岩石的位置: Lü09—Lü 等(2009), Wei09—Wei 等(2009), Yang13—Yang 等(2013), Tian13-1 和 Tian13-2—Tian and Wei(2013), Tian14—Tian and Wei(2014), Du14-1 和 Du14-2—Du 等(2014c); 含硬柱石岩石的位置引自 Du 等(2011, 2014b)和 Li 等(2013)

The boundary of the HP and UHP units is cited from Lü *et al.* (2012a); The localities of UHP rocks: Lü09—Lü *et al.* (2009), Wei09—Wei *et al.* (2009), Yang13—Yang *et al.* (2013), Tian13-1 and Tian13-2—Tian and Wei(2013); Tian14—Tian and Wei (2014); Du14-1 and Du14-2—Du *et al.* (2014c); The localities of lawsonite-bearing rocks are cited from Du *et al.* (2011, 2014b) and Li *et al.* (2013)

实验在中国地质大学(北京)完成,烧失量是通过对 1 g 左右已烘干的粉末样品加热到 1 000℃ 并持续数小时后重新称重样品,样品在加热前后的差值即为烧失量。标样为美国地质调查局标准岩石样品 BSR-1 和 AGV-2 以及中国国家标准物质岩石样品 GSR-3。

柯石英的原位拉曼光谱学分析在北京大学造山带与地壳演化重点实验室完成。拉曼光谱仪型号为 Reinshaw-RM1000,光源为 Ar^+ 等离子激光,波长 514.5 nm,强度 25 mW,光谱分辨率为 $\pm 1 \text{ cm}^{-1}$ 。激光束斑为 1~2 μm ,信号采集时间为 5~10 s,用单晶硅片进行校正。

3 岩石学

含柯石英泥质片岩具斑状/筛状变晶结构,片状构造,矿物组合为石榴石(13%,体积分数,下同)、多硅白云母(20%)、钠长石(22%)、钠云母(5%)、蓝闪石(6%)、冻蓝闪石(1%)、石英(30%)和少量褐帘石、金红石和榍石。石榴石变斑晶多为半自形-它形(图 2a),包裹微粒柯石英、石英和金红石包体。柯石英包体位于石榴石核部,呈长柱状或粒状,正高突起,发育少量放射状裂纹,但其边部没有退变为石英(图 2b、2c),拉曼光谱显示其具有典型的柯石英谱峰(图 2g、2h),表明岩石曾经历过超高压变质作用。图 2a 中石榴石内的石英包体与一条较宽的裂隙相连,推测其可能是由于流体渗入从柯石英转变而来。此外,部分石榴石还包裹箱状多相包裹体绿帘石+钠云母+石英,推测其为硬柱石假像(图 2f)。细粒多硅白云母和蓝闪石构成主期片理,其中蓝闪石边部退变为冻蓝闪石(图 2e),中粒钠云母在局部切割片理(图 2d),表明其为后期生长。筛状变晶钠长石内包裹大量细粒多硅白云母和蓝闪石,该蓝闪石不发育冻蓝闪石退变边,并且包裹体呈现的片理化方向与基质一致,表明钠长石应为后期生长(图 2d)。榍石只生长在基质中(图 2d),并偶见残余金红石生长在榍石核部,而金红石仅保存在石榴石内,表明榍石的生长期次晚于金红石,应为金红石的退变产物。因此,含柯石英泥质片岩至少包含两期矿物组合:早期石榴石+多硅白云母+蓝闪石+金红石+柯石英,晚期钠云母+钠长石+冻蓝闪石+榍石+石英。

石榴石发育显著的成分环带,从核部到边部,钙铝榴石组分逐渐升高,镁铝榴石组分逐渐升高至最

边部陡然降低,表明最边部的镁铝榴石组分可能受到退变质改造;铁铝榴石和锰铝榴石组分从核部到边部都逐渐降低,其中锰铝榴石组分呈现典型的“钟形”环带特征,表明石榴石记录了生长环带(图 3)。多硅白云母中基于 11 个 O 的 Si 含量为 3.42~3.56,钠云母成分接近于端员组分。基质和包裹于钠长石中的蓝闪石成分一致,均接近于端员组分,基质中蓝闪石边部的角闪石成分上属于冻蓝闪石(Leake *et al.*, 1997)。钠长石的成分亦接近端员组分(表 1)。

4 相平衡模拟

根据上文描述的矿物组合和矿物化学成分,选择在 NCKMnFMASHTO [$\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O} - \text{MnO} - \text{FeO}_{\text{total}} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{TiO}_2 - \text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$] 体系下对含柯石英泥质片岩进行了相平衡模拟。石英/柯石英设为过量。流体相假设为纯水并设为过量。应计算视剖面图需要,将 ICP-OES 测试的全岩化学成分标准化为 NCKMnFMASHTO 体系下的摩尔分数 [$\text{SiO}_2 = 72.31\%$, $\text{TiO}_2 = 0.66\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 9.75\%$, $\text{FeO}_{\text{total}} = 5.40\%$, $\text{MnO} = 0.10\%$, $\text{MgO} = 4.39\%$, $\text{CaO} = 2.42\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 3.17\%$, $\text{K}_2\text{O} = 1.77\%$, $\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 0.01\%$], 其中 P_2O_5 按照磷灰石 $(\text{CaO})_5 (\text{P}_2\text{O}_5)_{1.5} (\text{H}_2\text{O})_{0.5}$ 扣除相应组分; $\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 组分通过加和相关矿物的 Fe^{3+} 所得, Fe^{3+} 为电价平衡法计算得到。视剖面图的计算使用 THERMOCALC 3.33 程序 (Powell *et al.*, 1998; 2009 年 7 月更新) 以及配套的内部一致性热力学数据库 (tcds55.txt, Holland and Powell, 1998, 2003 年 11 月更新版)。相关的矿物固溶体活度模型为多硅白云母和钠云母 (Smye *et al.*, 2010)、石榴石 (Wei *et al.*, 2004)、角闪石和单斜辉石 (Diener and Powell, 2012)、钠长石 (Holland and Powell, 1996) 以及纤柱石 (Smye *et al.*, 2010)。硬柱石、石英和柯石英为纯端员相。模拟结果见图 4。图 4 中三变域到七变域以蓝色填充,其颜色逐渐加深;实测石榴石成分以圆圈表示,带有箭头的曲线代表模拟的 p - T 轨迹;图 4a 中 Grs15 和 Prp12 分别代表钙铝榴石和镁铝榴石成分等值线;图 4b 中 si3.4 代表多硅白云母中 Si 含量等值线, h2.0 指相应矿物组合中饱和水含量 ($w_B/\%$)。

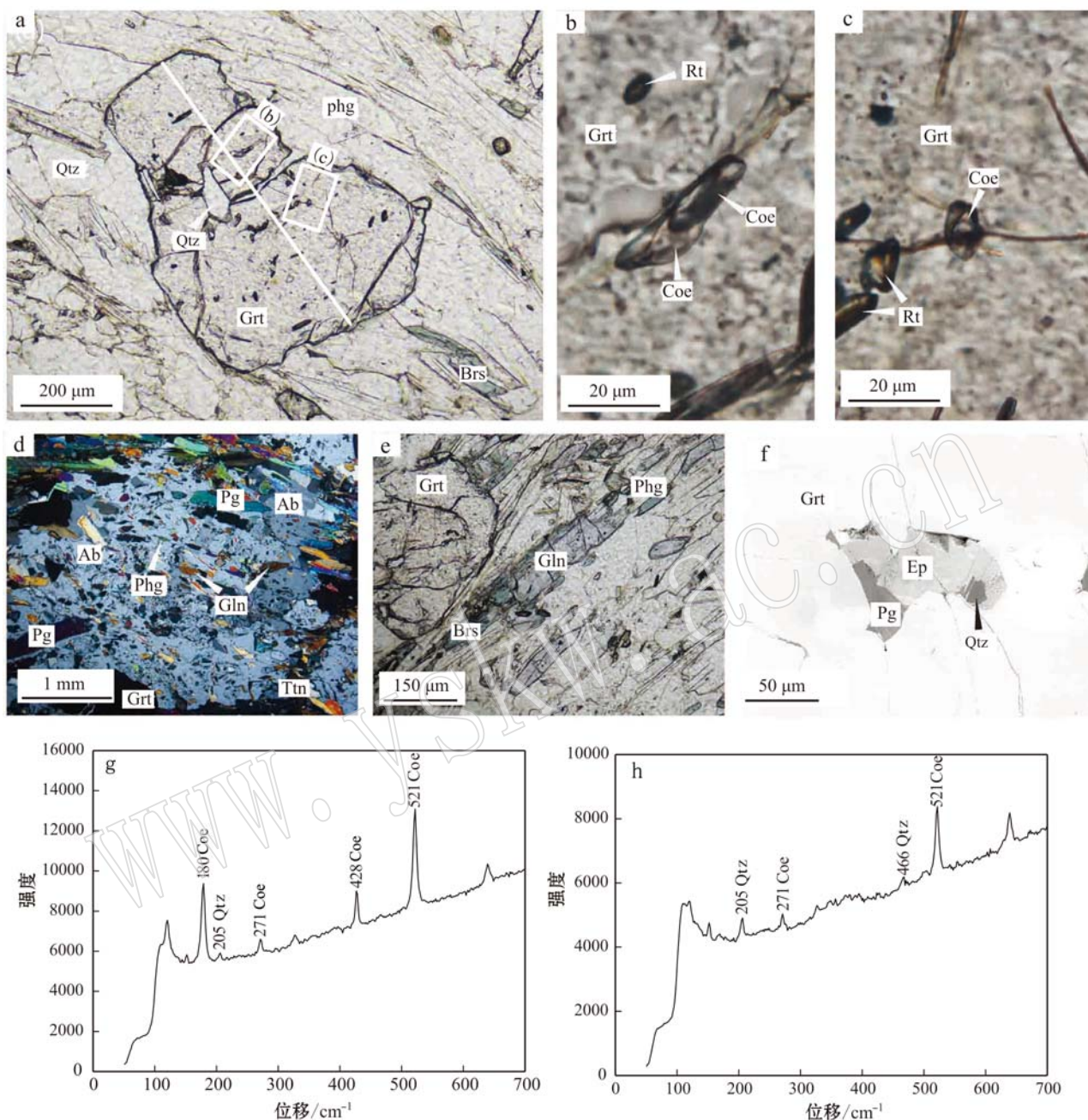
图2 含柯石英泥质片岩的显微镜下照片和拉曼光谱图^①

Fig. 2 Microphotographs and Raman spectra of coesite-bearing pelitic schist

a—石榴石变斑晶包裹柯石英和石英包体, 基质为多硅白云母、角闪石和石英, 直线为图3石榴石成分环带位置; b、c—包裹在石榴石内的柯石英及金红石包体; d—筛状变晶的钠长石包裹细粒多硅白云母和蓝闪石包体, 包体定向与基质中片理化方向一致, 中粒钠云母切割片理; e—蓝闪石边部退变为冻蓝闪石; f—包裹在石榴石内的箱状多相包裹体绿帘石+钠云母+石英, 推测为硬柱石假像; g、h—b和c中柯石英的拉曼光谱谱峰

a—garnet porphyroblast with inclusions of coesite and quartz in a matrix dominated by phengite, amphibole and quartz, the dark line representing the position of analyzed compositional zoning shown in Fig. 3; b and c—coesite and rutile inclusions in garnet; d—diablastic albite with inclusions of fine-grained phengite and glaucophane defining foliation in accordance with that defined by matrix minerals; medium-grained paragonite crosscutting the foliation; e—glaucophane with the rim replaced by Na-Ca hornblende; f—box-shaped multi-phase inclusions of epidote + paragonite + quartz in garnet, interpreted as lawsonite pseudomorph; g and h—Raman spectra for coesite inclusions in garnet

① 本文矿物代号引自沈其韩(2009): Grt—石榴石; Gln—蓝闪石; Phg—多硅白云母; Qtz—石英; Rt—金红石; Brs—冻蓝闪石; Ttn—榍石; Pg—钠云母; Ab—钠长石; Ep—绿帘石; Lws—硬柱石; Coe—柯石英; Jd—硬玉; Cph—纤柱石; Omp—绿辉石。

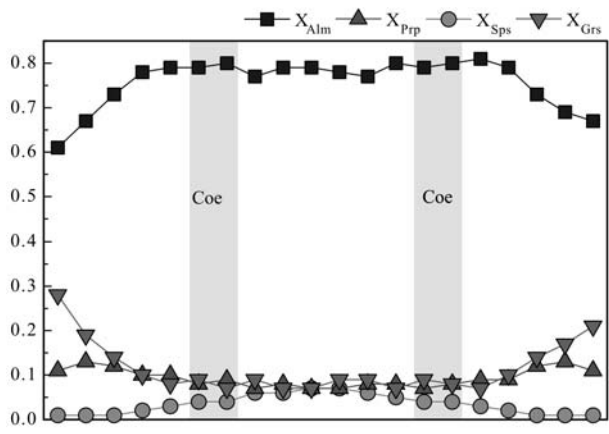


图 3 含柯石英泥质片岩中石榴石的成分环带特征
Fig. 3 Zoning profiles of garnet from the coesite-bearing pelitic schist

Prp—镁铝榴石; Grs—钙铝榴石; Sps—锰铝榴石; Alm—铁铝榴石
Prp—pyrope; Grs—grossular; Sps—spessartine; Alm—almandine

如图 4a 所示,含柯石英泥质片岩的 p - T 视剖面图以四变域和五变域组合为主,部分为三变域、六变域或七变域组合。纤柱石稳定在低温高压区域(压力大于 2.1 GPa, 温度低于 550℃);硬柱石同样稳定

在低温高压区域,但其稳定域大于纤柱石的稳定域;钠云母出现在压力小于 2.1 GPa 的区域;硬玉在 1.5~2.0 GPa 的压力条件下被绿辉石取代,而后者在 1.0~1.5 GPa 的压力条件下被钠长石取代;冻蓝闪石同样在 1.0~1.5 GPa 处取代蓝闪石;榴石稳定在低温低压区域(压力小于 1.5 GPa, 温度低于 550℃);石榴石和多硅白云母在整个温压空间内稳定存在。此外,如图 4a 所示,在含硬柱石矿物组合内,石榴石钙铝榴石组分等值线斜率平缓,与温度轴近平行,其含量随压力升高而降低;镁铝榴石组分等值线则具较陡的负斜率,其含量随温度升高而升高。在含钠云母矿物组合内,石榴石钙铝榴石和镁铝榴石组分等值线都具中等负斜率,随着温度和压力的升高,钙铝榴石组分含量降低,镁铝榴石组分含量升高。如图 4b 所示,饱和水含量等值线在含硬柱石矿物组合内斜率很陡,水含量主要随温度升高而降低;然而,在含钠云母矿物组合内水含量等值线具中等负斜率,水含量随温度和压力的升高而降低;多硅白云母中 Si 含量等值线在大多数矿物组合内均具中等正斜率, Si 含量随压力升高而升高。

表 1 西南天山含柯石英泥质片岩主要矿物的电子探针成分

$w_B/\%$

Table 1 Selected microprobe analyses for coesite-bearing pelitic schist from southwestern Tianshan Mountains

	Grt-R	Grt-NC	Grt-C	Grt-NC	Grt-R	Phg	Phg	Gln	Hbl	Ab	Pg
SiO ₂	37.77	36.96	37.14	36.98	37.55	51.39	53.10	56.54	51.38	68.72	47.67
TiO ₂	0.02	0.04	0.02	0.00	0.05	0.23	0.12	0.07	0.17	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	21.70	21.47	21.10	21.58	20.72	27.57	24.28	12.03	9.13	18.97	39.28
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.09	0.10	0.01	0.00	0.02	0.02
FeO	30.24	34.89	34.28	35.19	31.92	1.77	2.21	12.94	12.90	0.05	0.23
MnO	0.34	1.90	2.94	1.32	0.40	0.00	0.02	0.08	0.06	0.02	0.05
MgO	3.15	2.08	1.79	2.17	3.15	3.16	3.87	7.34	11.55	0.02	0.13
CaO	6.77	2.25	2.45	2.51	6.03	0.12	0.03	0.73	8.53	0.12	0.29
Na ₂ O	0.04	0.03	0.08	0.07	0.05	0.74	0.28	6.80	3.41	11.70	7.47
K ₂ O	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	10.06	10.71	0.05	0.20	0.00	0.54
O	12	12	12	12	12	11	11	23	23	8	11
Si	2.99	2.99	3.01	2.99	2.99	3.42	3.56	7.94	7.40	3.01	3.03
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00
Al	2.03	2.05	2.02	2.05	1.95	2.16	1.92	1.99	1.55	0.98	2.94
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	2.00	2.36	2.32	2.38	2.07	0.10	0.12	1.52	1.55	0.00	0.01
Mn	0.02	0.13	0.20	0.09	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Mg	0.37	0.25	0.22	0.26	0.37	0.31	0.39	1.54	2.48	0.00	0.01
Ca	0.57	0.20	0.21	0.22	0.52	0.01	0.00	0.11	1.32	0.01	0.02
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.10	0.04	1.85	0.95	0.99	0.92
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.92	0.01	0.04	0.00	0.04
X _{Prp}	0.13	0.09	0.07	0.09	0.13						
X _{Grs}	0.19	0.07	0.07	0.07	0.17						

R—边部; NC—靠近柯石英; C—核部。

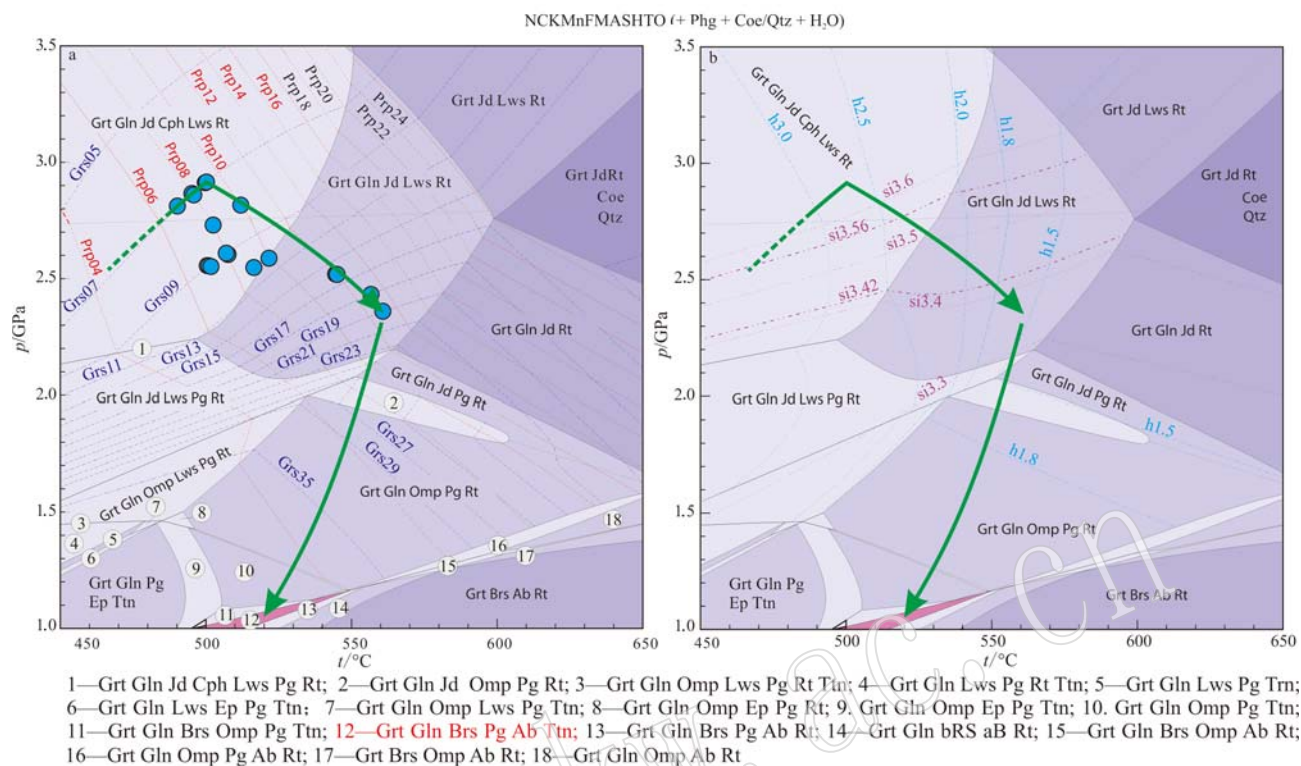


图4 含柯石英泥质片岩在 NCKMnFMASHTO (+ Phg + Coe/Qtz + H₂O)体系下的 p - T 视剖面图

Fig. 4 p - T pseudosection for coesite-bearing pelitic schist calculated in the NCKMnFMASHTO system (+ Phg + Coe/Qtz + H₂O)

如图4a所示,如果含柯石英泥质片岩的矿物组合石榴石、多硅白云母、钠长石、钠云母、蓝闪石、冻蓝闪石、石英和榴石是平衡共生的矿物组合,那么该组合在 p - T 视剖面图中会构成四变域组合(组合12),限定的温压条件为495~550℃和1.0~1.15 GPa。然而,石榴石内包裹的微粒柯石英表明岩石曾经历过超高压变质作用,并且实测的石榴石和多硅白云母的成分在 p - T 视剖面图上的投点也指示了更高的压力条件(大于2.2 GPa),因此泥质片岩中保存的上述矿物组合并非平衡共生关系,前文的岩相学特征也证明了这一结论。

若将实测的石榴石钙铝榴石和镁铝榴石组分环带投影在 p - T 视剖面图上,两个组分的全部交点都落在硬柱石稳定域内,从核部到边部的环带限定了一条进变质的 p - T 演化轨迹,该轨迹可被划分为两个阶段。阶段Ⅰ由核部到含柯石英区域的石榴石环带限定,表现为从490℃、2.8 GPa升温升压至500℃、2.9 GPa,压力峰期矿物组合为Grt + Gln + Jd + Cph + Lws + Rt + Phg + Coe。压力峰期的压力条件与含柯石英的事实相符。阶段Ⅱ由含柯石英区域

到边部的石榴石环带限定,表现为从压力峰期升温降压至温度峰期560℃、2.35 GPa,矿物组合为Grt + Gln + Jd + Lws + Rt + Phg + Qtz,柯石英转变为石英,纤柱石消失。最边部镁铝榴石组分含量陡然降低的石榴石成分在 p - T 视剖面图上无法获得投点,其成分可能是在后期退变质过程中被改造,因此本文所限定的温度峰期的温压条件可能略低于岩石的真实峰期温压条件。在石榴石成分所限定的温度范围内(490~560℃),多硅白云母中Si含量(3.42~3.56)所限定的压力条件为2.4~2.9 GPa,表明高Si的多硅白云母记录了超高压变质作用,而含有较低Si含量的多硅白云母可能是在压力峰期后的升温降压过程中其成分发生再次平衡时形成。

温度峰期之后的抬升轨迹依据泥质片岩晚期矿物组合Pg + Ab + Hbl + Ttn + Qtz稳定的温压条件(495~550℃、1.0~1.15 GPa)确定。岩石若沿此 p - T 轨迹抬升,其首先在五变域组合Grt + Gln + Jd + Lws + Rt + Phg + Qtz + H₂O中演化, p - T 轨迹与饱和水含量等值线近平行,不利于矿物组合演化,但利于温度峰期矿物组合的保存(Guiraud *et al.*,

2001)。但是,当 p - T 轨迹穿过四边域组合 $\text{Grt} + \text{Gln} + \text{Jd} + \text{Lws} + \text{Pg} + \text{Rt} + \text{Phg} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$ 时,发生脱水反应 $\text{Jd} + \text{Lws} = \text{Gln} + \text{Pg} + \text{H}_2\text{O}$,所有的硬柱石都被消耗掉,钠云母出现。此后,岩石继续在矿物组合 $\text{Grt} + \text{Gln} + \text{Jd}/\text{Omp} + \text{Pg} + \text{Rt} + \text{Phg} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$ 中减压抬升, p - T 轨迹切割水含量升高等值线,岩石处在水缺失状态,利于该温压条件下矿物组合的保存。当压力降低到 1.25 GPa 时,金红石被榍石取代;到约 1.1 GPa 时,绿辉石消失,钠长石和冻蓝闪石出现。

5 讨论与结论

5.1 变质作用 p - T 轨迹

根据岩石学特征和相平衡模拟的结果,含柯石英英泥质片岩的变质演化过程可划分为 3 个阶段:压力峰期之前的进变质阶段(I)、压力峰期之后的升温降压至温度峰期阶段(II)和温度峰期之后的近等温降压阶段(III)(图 4、图 5)。

(1) 压力峰期之前的进变质阶段(I)由石榴石核部到含柯石英区域的环带所确定,其变质 p - T 轨迹特征为温度和压力同时升高,所限定的压力峰期条件为 500℃、2.9 GPa,矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Gln} + \text{Jd} + \text{Cph} + \text{Lws} + \text{Rt} + \text{Phg} + \text{Coe}$,与含柯石英的事实相符。本文模拟的压力峰期矿物组合与前人模拟的西南天山超高压泥质片岩的峰期矿物组合一致(Wei *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2014c),但压力峰期条件略低于前人所限定的峰期温压条件(510~570℃、2.9~3.2 GPa, Wei *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2014c)。相比而言,本文所限定的压力峰期与西南天山超高压榴辉岩的压力峰期具有比较一致的温压条件(图 5, Lü *et al.*, 2009; Tian and Wei, 2013, 2014)。此外,前人和本文所限定的超高压岩石的进变质 p - T 轨迹均定义了一个冷的地温梯度~5.5℃/km,与古老洋壳俯冲的地温梯度相似(Peacock, 1993)。

(2) 压力峰期之后的升温降压至温度峰期阶段(II)由石榴石含柯石英区域到边部的环带所确定,其变质 p - T 轨迹特征为温度升高压力降低,所限定的温度峰期条件为 560℃、2.35 GPa,矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Gln} + \text{Jd} + \text{Lws} + \text{Rt} + \text{Phg} + \text{Qtz}$,发生连续脱水反应 $\text{Gln} + \text{Cph} + \text{Lws} = \text{Grt} + \text{Jd} + \text{H}_2\text{O}$,释放出岩石中约 45% 的水,导致柯石英转变为石英,纤柱石消

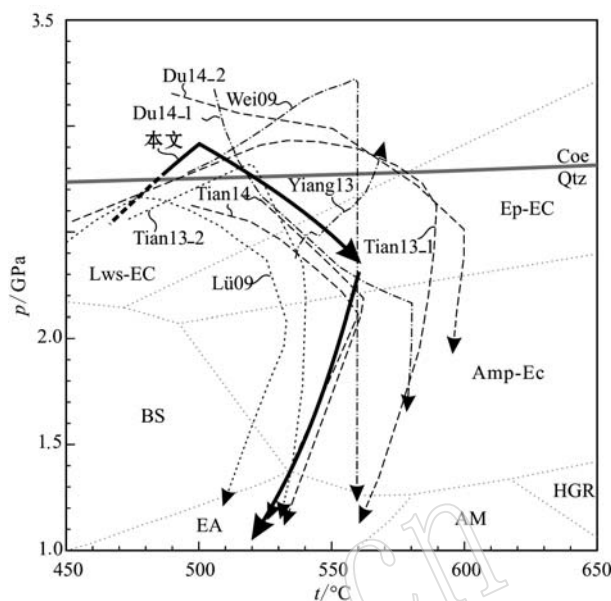


图 5 西南天山超高压榴辉岩和泥质-长英质片岩 p - T 演化轨迹对比图

Fig. 5 A comparison of the p - T paths between UHP eclogite and pelitic-felsic schist in the southwestern Tianshan Mountains

图中虚线和点虚线分别代表超高压榴辉岩和泥质片岩的 p - T 演化轨迹, p - T 轨迹的标注与图 1 相同;变质相之间的界限引自 Liou 等(2004),其中柯石英/石英转变界线为 THERMOCALC 计算;Lws-EC: 硬柱石榴辉岩相;Ep-EC: 绿帘石榴辉岩相;Amp-EC: 角闪石榴辉岩相;BS: 蓝片岩相;EA: 绿帘角闪岩相;AM: 角闪岩相;HGR: 高压麻粒岩相

The dashed and dot-dashed lines represent the p - T paths of UHP eclogites and pelitic schists, respectively. The labels of p - T paths are the same as those in Fig. 1. The metamorphic facies' boundaries are cited from Liou *et al.* (2004) except for the transition line between coesite and quartz that is calculated by THERMOCALC. Lws-EC: lawsonite-eclogite facies; Ep-EC: epidote-eclogite facies; Amp-EC: amphibole-eclogite facies; BS: blueschist facies; EA: epidote-amphibolite facies; AM: amphibolite facies; HGR: high-pressure granulite facies

失,硬柱石含量大幅度降低,压力峰期的多硅白云母成分可能在该阶段被重新调整,即使实测的最高 Si 含量也没有记录压力峰期条件。压力峰期之后的升温降压 p - T 轨迹在西南天山超高压榴辉岩中已有广泛报道(图 5; Lü *et al.*, 2009; Tian and Wei, 2013, 2014; Du *et al.*, 2014c),但只有 Du 等(2014c)报道的超高压泥质片岩 p - T 演化轨迹记录了这一过程,其他学者报道的超高压泥质片岩并未记录这一变质演化阶段(图 5, Wei *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2013)。相比而言,本文所限定的温度峰期与多数超高压榴辉岩的温度峰期一致(图 5 中 Lü09、Tian13_

2、Tian14 和 Du14_2), 其温度条件低于部分超高压榴辉岩和泥质片岩的温度峰期(图 5 中 Tian13_1 和 Du14_1), 但与其他超高压泥质片岩的峰期温度一致(图 5 中 Wei09 和 Yang13)。

(3) 温度峰期之后的近等温降压阶段(Ⅲ)由岩相学判定的晚期矿物组合 $\text{Pg} + \text{Ab} + \text{Hbl} + \text{Ttn} + \text{Qtz}$ 的稳定温压条件确定。该变质演化阶段以 3 次矿物的分解与生长为特征: 第 1 次发生在约 2.1 GPa 处, 发生脱水反应 $\text{Jd} + \text{Lws} = \text{Gln} + \text{Pg} + \text{H}_2\text{O}$, 导致硬柱石消失, 钠云母出现, 但只释放出岩石中很少量的水 ($<1\%$); 第 2 次发生在约 1.25 GPa 处, 榎石取代金红石; 第 3 次发生在约 1.1 GPa 处, 绿辉石消失, 钠长石和冻蓝闪石出现。这一近等温降压轨迹与超高压榴辉岩的抬升轨迹基本一致(图 5, Lü *et al.*, 2009; Tian and Wei, 2013, 2014)。

5.2 柯石英的保存

自上世纪 80 年代柯石英首次在自然岩石中被发现以来(Chopin *et al.*, 1984; Smith *et al.*, 1984), 柯石英的保存机制就受到了广泛关注。前人主要提出了 4 种保存机制(Mosenfelder *et al.*, 2005): ① 柯石英包裹在刚性矿物中, 如石榴石和锆石, 这些寄主矿物对它形成了有效保护, 使其在低温低压条件下也不会发生退变; ② 含柯石英的超高压岩石经历了快速抬升过程; ③ 含柯石英的超高压岩石在抬升过程中经历了持续冷却过程; ④ 没有流体渗入到含柯石英的刚性矿物中。

如前文所述, 西南天山大多数超高压岩石在压力峰期之后都经历了一段升温降压过程, 表明这些岩石在俯冲到最大深度后的初期折返阶段并未经历快速抬升过程, 并且这一阶段的变质作用以强烈的连续脱水反应为特征(Tian and Wei, 2013, 2014; 本文), 十分利于矿物组合的演化以及再平衡。这一过程会导致绝大多数柯石英转变为石英, 仅有极少数包裹在刚性石榴石中的柯石英得以保存。温度峰期之后的近等温降压过程是一个典型的快速抬升过程, 对于包裹在石榴石中柯石英的保存起到了一定作用, 并且这一变质演化阶段多处在流体缺失状态, 同样利于柯石英的保存。然而, 在后期退变质过程中, 西南天山的超高压岩石发生了强烈的面理重置(Lü and Zhang, 2012), 导致石榴石发生破裂, 所形成的裂纹构成流体通道, 使得大部分包裹在石榴石中得以幸存的柯石英也在该阶段转变为石英(图 2a)。因此, 西南天山超高压岩石独特的变质 p - T 轨

迹和构造演化过程更加不利于柯石英的保存, 这可能是研究区内未广泛发现柯石英的主要原因。

5.3 构造意义

如图 1 和图 5 所示, 位于超高压单元北侧的超高压岩石(Wei09、Yang13、Tian13_1、Du14_1 和 Du14_2)通常记录了较高的压力峰期温压条件(2.9~3.2 GPa, 510~570℃), 然而 Lü 等(2009)报道的超高压榴辉岩(Lü09)的压力峰期低于其他北侧超高压岩石。最近的相平衡模拟研究表明这一含柯石英超高压榴辉岩的压力峰期温压条件被低估, 其可能的压力峰期温压条件为 3.1 GPa、520℃(Tian and Wei, 2013), 与其他北侧超高压岩石的压力峰期一致。相比而言, 位于超高压单元南侧的超高压岩石(本文、Tian13_2 和 Tian14)则记录了较低的压力峰期温压条件(2.6~2.9 GPa, 500~520℃)。此外, 在压力峰期之后, 位于南侧的超高压榴辉岩和泥质片岩经历了完全相同的升温降压变质演化过程(本文、Tian13_2 和 Tian14), 而位于北侧的两类超高压岩石却呈现出迥异的变质演化过程, 如超高压榴辉岩和部分泥质片岩经历了升温降压的变质演化过程(Lü09、Tian13_1、Du14_1 和 Du14_2), 而另一部分泥质片岩则直接等温降压抬升(Wei09 和 Yang13), 温度峰期之后所有超高压岩石都经历了近等温减压抬升过程。因此, 我们推测西南天山超高压岩石都经历了相同的俯冲过程, 但北侧比南侧俯冲到了更深的位置, 可与 Lü 等(2012a)识别出的高压单元构成由南向北的递进变质带, 加之高压-超高压带北侧出露一套高温低压变质带(李强等, 2004; 苟龙龙等, 2009; Xia *et al.*, 2014), 再次证实了南天山洋由南向北俯冲的观点(Zhang *et al.*, 2007; Lü *et al.*, 2012a)。此后, 南侧超高压榴辉岩及其围岩泥质片岩经历了完全相同的折返过程, 二者在整个俯冲折返过程中一直相互伴生, 而北侧的两类超高压岩石却呈现出差异折返过程(图 5), 泥质片岩可能直到中上地壳位置才包裹榴辉岩并一起折返到地表。不过西南天山高压-超高压变质带俯冲折返侵位的动力学过程仍需详细的年代学以及数值模拟的研究工作。

References

- Brown M. 2009. Metamorphic patterns in orogenic systems and the geological record[J]. Geological Society, London, Special Publications, 318(1): 37~74.

- Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a 1st record and some consequences[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(2): 107~118.
- Coleman R G. 1989. Continental Growth of Northwest China[J]. *Tectonics*, 8(3): 621~635.
- Diener J F A and Powell R. 2012. Revised activity-composition models for clinopyroxene and amphibole[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(2): 131~142.
- Du J X, Zhang L F, Bader T, *et al.* 2014b. Metamorphic evolution of relict lawsonite-bearing eclogites from the (U) HP metamorphic belt in the Chinese southwestern Tianshan[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(6): 575~598.
- Du J X, Zhang L F, Bader T, *et al.* 2014c. Metamorphic evolution of ultrahigh-pressure rocks from Chinese southwestern Tianshan and a possible indicator of UHP metamorphism using garnet composition in low-T eclogites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91(1): 69~88.
- Du J X, Zhang L F, Lü Z, *et al.* 2011. Lawsonite-bearing chloritoid-glaucophane schist from SW Tianshan, China: Phase equilibria and *p-T* path[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(4): 684~693.
- Du J X, Zhang L F, Shen X J, *et al.* 2014a. A new *P-T-t* path of eclogites from Chinese southwestern Tianshan: constraints from *P-T* pseudosections and Sm-Nd isochron dating[J]. *Lithos*, 200~201(1): 258~272.
- Gao Jun. 1997. Discovery and tectonic significance of the eclogite from southwestern Tianshan[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(7): 737~739(in Chinese).
- Gao J, Li M S, Xiao X C, *et al.* 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 287(1~4): 213~231.
- Gou Longlong and Zhang Lifei. 2009. Petrology and U-Th-Pb chemical monazite dating of the low-*P* metapelitic granulites at the region of Muzhaerte River in southwestern Tianshan, NW China, and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2 271~2 280(in Chinese with English abstract).
- Guiraud M, Powell R and Rebay G. 2001. H₂O in metamorphism and unexpected behaviour in the preservation of metamorphic mineral assemblages[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 19(4): 445~454.
- Holland T J B and Powell R. 1996. Thermodynamics of order-disorder in minerals: I, Symmetric formalism applied to minerals of fixed composition[J]. *American Mineralogist*, 81(11~12): 1 413~1 424.
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309~343.
- 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 J L, Gao J, John T, *et al.* 2013. Fluid-mediated metal transport in subduction zones and its link to arc-related giant ore deposits: Constraints from a sulfide-bearing HP vein in lawsonite eclogite (Tianshan, China)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 120(1): 326~362.
- Li J L, Klemd R, Gao J, *et al.* 2015. A common high-pressure metamorphic evolution of interlayered eclogites and metasediments from the 'ultrahigh-pressure unit' of the Tianshan metamorphic belt in China[J]. *Lithos*, 226(1): 169~182.
- Li Q, Lin W, Su W, *et al.* 2011. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China [J]. *Lithos*, 122(1~2): 76~86.
- 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, Tsujimori T, Zhang R Y, *et al.* 2004. Global UHP Metamorphism and continental subduction/collision: The Himalayan model[J]. *International Geology Review*, 46(1): 1~27.
- Lü Z, Bucher K, Zhang L, *et al.* 2012a. 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 and Zhang L. 2012. Coesite in the eclogite and schist of the Atantay Valley, southwestern Tianshan, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(13): 1 467~1 472.
- Lü Z, Zhang L and Chen Z. 2014. Jadeite- and dolomite-bearing coesite eclogite from western Tianshan, NW China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 26(2): 245~256.
- 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(11~12): 1 845~1 850.
- Lü Z, Zhang L, Du J, *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(9): 773~787.
- Lü Z, Zhang L, Du J, *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*, 136~139(1): 168~186.
- Mosenfelder J L. 2005. Factors in the preservation of coesite: The importance of fluid infiltration[J]. *American Mineralogist*, 90(5~6): 779~789.
- Peacock S M. 1993. The importance of blueschist-eclogite dehydration reactions in subducting oceanic-crust [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 105(5): 684~694.
- Powell R, Holland T and Worley B. 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(4): 577~588.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500(in Chinese with English abstract).
- Smith D C. 1984. Coesite in Clinopyroxene in the Caledonides and Its Implications for Geodynamics[J]. *Nature*, 310(5979): 641~644.
- Smye A J, Greenwood L V and Holland T J B. 2010. Garnet-chloritoid-kyanite assemblages: eclogite facies indicators of subduction constraints in orogenic belts[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(7): 753~768.
- 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(4): 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(3): 281~300.
- Tian Z L and Wei C J. 2014. Coexistence of garnet blueschist and eclogite in South Tianshan, NW China: dependence of P - T evolution and bulk-rock composition[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(1): 743~764.
- Wei C J, Powell R and Clarke G L. 2004. Calculated phase equilibria for low- and medium-pressure metapelites in the KFMASH and KMnF-MASH systems[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 22(5): 495~508.
- 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(10): 1973~1991.
- Xia B, Zhang L and Bader T. 2014. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic analyses of migmatite from the 'paired metamorphic belt' in Chinese SW Tianshan: Constraints on partial melting associated with orogeny[J]. *Lithos*, 192~195: 158~179.
- Yang X, Zhang L, Tian Z, *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(1): 295~307.
- Zhang L, Ai Y and Song S. 2007. A Brief Review of UHP Meta-ophiolitic Rocks, Southwestern Tianshan, Western China[J]. *International Geology Review*, 49(1): 811~823.

附中文参考文献

- 高俊. 1997. 西南天山榴辉岩的发现及其大地构造意义[J]. *科学通报*, 42(7): 737~739.
- 苟龙龙, 张立飞. 2009. 新疆西南天山木扎尔特河一带低压泥质麻粒岩岩石学特征、独居石 U-Th-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(9): 2271~2280.
- 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.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495~500.