



西南天山阿坦塔义一带片岩和榴辉岩中的柯石英

吕增, 张立飞*

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

* 联系人, E-mail: lfzhang@pku.edu.cn

2011-11-28 收稿, 2012-01-09 接受

国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(40821002)、国家自然科学基金(40730314, 41002019)、国家重点基础研究发展计划(2009CB825007)和中国博士后科学基金资助

摘要 柯石英是超高压变质作用发生的标志矿物。西南天山造山带阿坦塔义地区的高压变质岩中迄今未发现柯石英, 其变质峰期条件颇具争议。对这一地区的主体岩石类型——片岩和榴辉岩开展了详细的岩相学和显微拉曼光谱分析, 识别出阿坦塔义河沿岸 3 处露头的岩石含有柯石英。含柯石英的片岩主要由钠长石、石榴石、钠钙质角闪石、石英和白云母构成; 含柯石英的榴辉岩主要由绿辉石和石榴石构成。柯石英的发现表明这一地区的榴辉岩及其围岩整体经历了超高压变质作用, 西南天山超高压地质体的南北宽可达 10 km, 其东西长可达 60~80 km。

关键词

西南天山造山带
柯石英包体
超高压变质作用

柯石英是超高压变质作用发生的标志矿物^[1]。在全球范围内已经确立的超高压变质带内, 柯石英通常保存在刚性较强的矿物如石榴石或锆石中。越来越多的石榴石成分等值线温压计的应用表明, 石榴石的成分环带能够记录较丰富的变质温度和压力信息^[2]。在超高压变质作用研究领域, 石榴石中柯石英包体的产出特征对于划分石榴石的变质生长期次十分重要, 再结合石榴石等值线温压计, 超高压岩石的 *P-T* 轨迹就能得到更加精准的刻画。西南天山造山带哈布腾苏河一带柯石英的发现^[3,4]初步平息了西南天山变质带的超高压变质作用是否存在的争论^[5~8], 但是目前为止, 争论发生地区——阿坦塔义一带的高压岩石中尚未发现薄片尺度的柯石英^[5,9]。调查这一地区的柯石英的存在对认识西南天山超高压变质带的空间分布及其演化特征有重要意义。最近我们对西南天山阿坦塔义河沿岸不同类型的变质岩进行了系统的采集, 开展了细致的岩相学观察, 并利用激光拉曼光谱仪对石榴石的显微包体矿物组合进行了鉴定, 为精确确定西南天山高压-超高压变质带的演化规律提供了基础资料。

1 区域地质背景

西南天山高压-超高压变质带是中亚南天山造山带的重要组成部分, 由古天山洋向伊犁-中天山板块俯冲时形成。该变质带呈楔形, 近北东-南西向西延伸(图 1(a)), 在中国境内长约 200 km, 最宽处达 20 km^[10,11]。其北部与中天山地块被中天山南缘断裂隔开, 南部与早古生代浅变质碳酸盐地层相接。该变质带由榴辉岩、蓝片岩、片岩和大理岩构成。片岩为主体岩石, 其组成矿物的模式含量在区域上变化较大, 可大致分为泥质、长英质、钙质以及基性片岩等 4 种。榴辉岩和蓝片岩呈团块状、透镜状或层状零星产于片岩中。阿克牙孜河流域是西南天山造山带中目前所知的榴辉岩和蓝片岩出露规模最大的地区。阿坦塔义河是阿克牙孜河的二级支流, 最早高压和超高压变质作用研究都开展于此^[10,5], 沿岸出露的岩石类型丰富, 包括榴辉岩、蓝片岩和泥质-长英质片岩。阿坦塔义河下游出露小规模的榴辉岩透镜体, 局部可见层状榴辉岩与片岩密切伴生, 上游可见规模巨大的榴辉岩体。

英文版见: Lü Z, Zhang L F. Coesite in the eclogite and schist of the Atantayi Valley, southwestern Tianshan, China. Chin Sci Bull, 2012, 57: 1467–1472, doi: 10.1007/s11434-012-4979-4

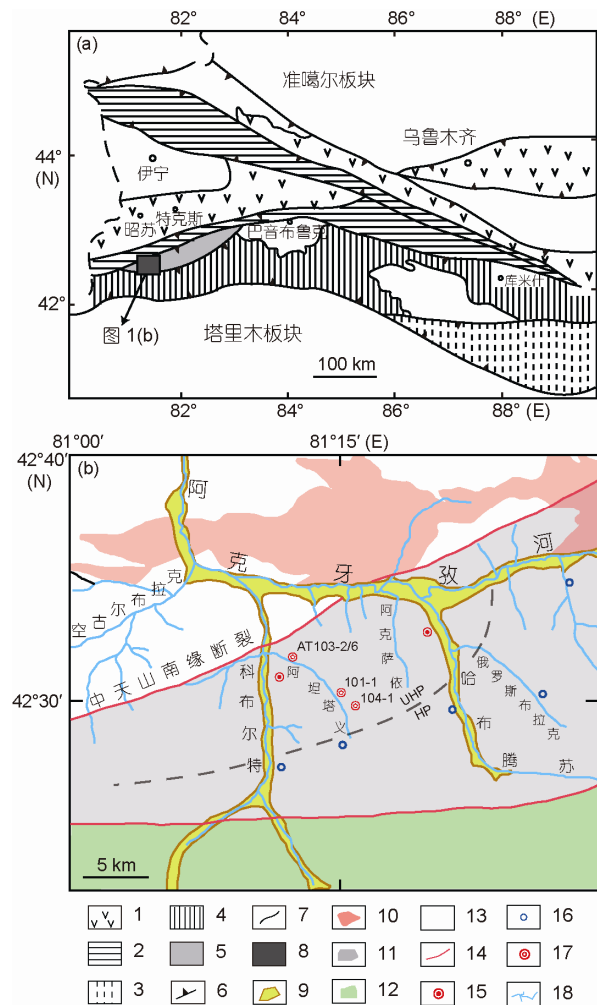


图1 西南天山阿克牙孜河一带地质简图及采样位置

1, 晚古生代火山岩及火山碎屑岩; 2, 前寒武纪基底, 古生代花岗岩及地层(未分); 3, 前寒武纪角闪岩相变质岩; 4, 古生代地层; 5, 高压-超高压变质带; 6, 逆断层; 7, 断层; 8, 研究区; 9, 第四纪冲积物; 10, 花岗岩; 11, 高压-超高压变质带; 12, 早古生代地层; 13, 前寒武纪基底, 古生代地层及火山岩(未分); 14, 断层; 15, 超高压岩石^[3,4,12]; 16, 蓝片岩; 17, 采样点; 18, 水系。虚线代表推测的高压地体(南)和超高压地体(北)的界线。据文献[11]和新疆维吾尔自治区地质矿产局 1:20 万却响幅区域地质图(1982)修改

2 样品采集及描述

考察了阿坦塔义河右岸 3 个冲沟沟口附近的露头(含转石)(图 1(b)), 收集样品约 40 块, 包括泥质-长英质片岩和基性榴辉岩。虽然石榴石变斑晶大多发育裂纹, 局部为次生的绿泥石、黑云母或方解石充填, 我们仍然细致确认了被石榴石所包裹的相对新鲜的包体矿物组合。除了柯石英和石英(详见下文), 其余包体有白色云母、帘石、绿辉石、金红石、冻蓝闪石和硬绿泥石(表 1)。板状的帘石和白色云母集合体在这里被视为硬柱石假象(图 2(d))。在绝大多数样品的石榴石中含有单晶石英包体, 它们一般呈卵圆形, 且周围发育放射状裂纹。在其中 4 个较新鲜的样品中石榴石中发现柯石英和多晶石英, 分别为 104-1 (钠长片岩; GPS: 42°30'03"N, 81°16'01"E), 101-1 (钠长片岩; GPS: 42°30'23"N, 81°14'50"E), AT103-2 (榴辉岩; GPS: 42°31'54.6"N, 81°12'28.6"E), 和 AT103-6 (钠长片岩; GPS 与 AT103-2 相同)。这些钠长片岩呈块状-片状, 最主要的矿物组成为钠长石、石榴石、白色云母、绿色角闪石(冻蓝闪石)和石英(图 2(a), (b), 表 1)。定向分布的白色云母和角闪石构成片理, 它形钠长石变斑晶中含有大量包体, 主要为自形细粒冻蓝闪石、残余状白色云母和石英。石榴石多为自形, 少数呈浑圆状。在同一样品内石榴石粒度相对均一, 但不同样品间石榴石的平均粒度差别较大。蓝色角闪石(蓝闪石)自形到它形, 多发育宽度不一的冻角闪石增生边。基性榴辉岩主要由绿辉石和石榴石构成(图 2(c)), 呈斑状变晶结构, 石榴石为斑晶, 其边缘偶见由石英集合体构成的压力影, 绿辉石为强烈定向的细粒基质。其余矿物为金红石、斜黝帘石、冻蓝闪石、白色云母、钠长石和方解石。

表 1 样品的类型及矿物构成^{a)}

样品编号	岩石类型	主要矿物组成(按含量高低排序)	石榴石包体矿物
104-1	钠长片岩	Ab + Grt + Brs + Qtz + Wm + Cb + Gln + Ttn + Ep + Chl	Coe + PCQ + Qtz + Lws-p + Rt
101-1	钠长片岩	Ab + Grt + Brs + Qtz + Wm + Ep + Ttn + Chl + Gln + Rt	Coe + PCQ + Qtz + Ctd + Lws-p + Rt
AT103-2	榴辉岩	Omp + Grt + Cb + Rt + Qtz + Ep + Brs + Wm	Coe + Qtz + Lws-p + Omp + Brs + Ab + Rt
AT103-6	钠长片岩	Ab + Brs + Grt + Qtz + Gln + Wm + Rt + Ttn	PCQ + Qtz + Lws-p + Rt

a) Ab, 钠长石; Grt, 石榴石; Brs, 冻蓝闪石; Qtz, 石英; Wm, 白色云母(多硅白云母和钠云母未分); Ep, 绿帘石(含斜黝帘石); Ttn, 榍石; Gln, 蓝闪石; Cb, 碳酸盐矿物; Rt, 金红石; Omp, 绿辉石; Chl, 绿泥石; Coe, 柯石英; PCQ, 多晶石英; Ctd, 硬绿泥石; Lws-p, 硬柱石假象(被绿帘石和钠云母取代)

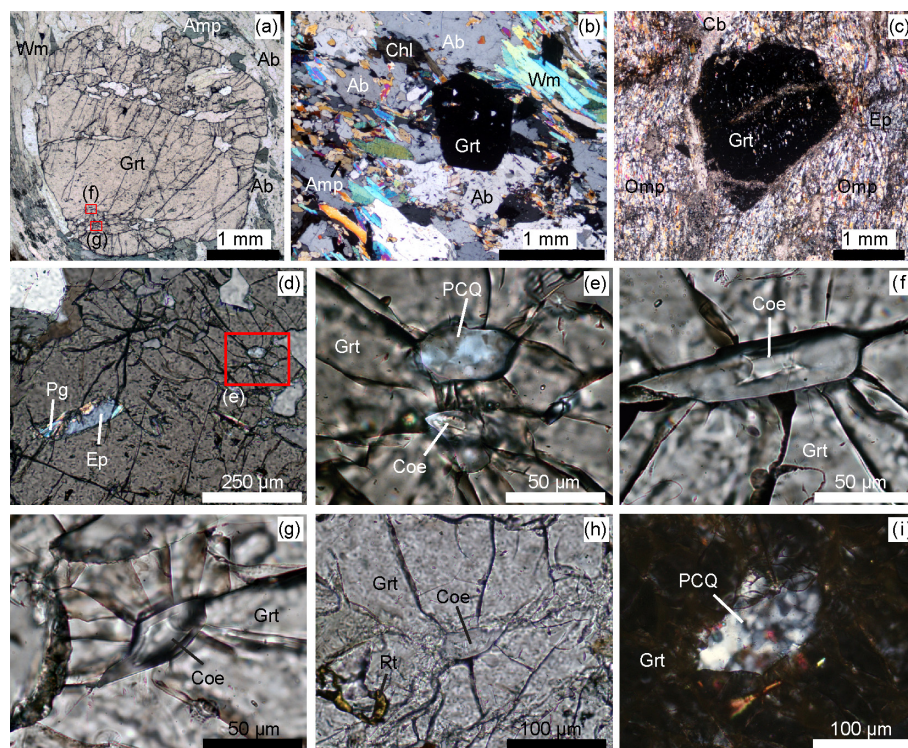


图2 含柯石英岩石的显微结构

(a) 101-1 样品中含柯石英的石榴石变斑晶(单偏光); (b) 104-1 样品的显微结构(正交偏光); (c) AT103-2 样品的显微结构(正交偏光), 其中绿辉石为定向排列的细粒集合体, 碳酸盐矿物呈脉状穿插于石榴石或绿辉石间; (d)和(e) 104-1 样品中的硬柱石假象(EP+Pg), 柯石英(Coe)和多晶石英(PCQ) (不完全的正交偏光); (f)和(g) 101-1 样品中的柯石英(单偏光); (h) AT103-2 样品中的柯石英(单偏光); (i) AT103-6 中的多晶石英(正交偏光)

3 柯石英特征

为了确认柯石英及其特征结构, 将上述样品制成 0.03 mm 厚的双面抛光的切片, 在光学显微镜初步观察的基础上开展原位拉曼光谱学分析. 拉曼分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成. 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.

在 104-1, 101-1 和 AT103-2 这 3 个样品的粗粒石榴石中含有柯石英包体(图 2(e)~(h)). 柯石英周围均发育明显的放射状裂纹, 并且相对于周边的石英具有较高的突起, 柯石英占整个二氧化硅包体体积的 20%~60% 不等. 柯石英均呈残余状, 其石英退变边厚度不一. 较窄的石英退变边发育栅状结构, 而较宽的则由发育缝合线结构的亚颗粒石英构成. 在 104-1 和 AT103-6 样品中可见多晶石英包体(图 2(e),

(i)). 所有光学显微镜下的“疑似”柯石英颗粒都表现出显著的柯石英拉曼特征谱线(图 3): 除了最具标志的 521 cm^{-1} , 其他柯石英特征峰, 如 $428\sim 426$, 326 , $271\sim 270$, $178\sim 176$, $151\sim 150$, $121\sim 118 \text{ cm}^{-1}$ 等, 也都有表现. 这些谱峰在不同颗粒间略有漂移, 幅度为 $1\sim 3 \text{ cm}^{-1}$. 不同的柯石英颗粒虽然均在 $464\sim 468 \text{ cm}^{-1}$ 位置出现谱峰, 但强度变化较大, 表明柯石英转变为石英的程度存在差异.

4 讨论

与世界上其他超高压变质带相比^[1,13], 西南天山造山带的超高压证据相当稀少. 目前为止, 在西南天山所报道的薄片尺度的柯石英都保存在石榴石中, 虽然它们数量极少, 而且不同程度地退变为多晶石英, 但至少说明在榴辉岩和片岩的组成矿物中, 石榴石最有效地保存超高压变质作用的证据. 在榴辉岩中, 石榴石和其他矿物虽然在局部可以达到结构上的平衡, 但事实上, 它们即可能是退变质期间形成

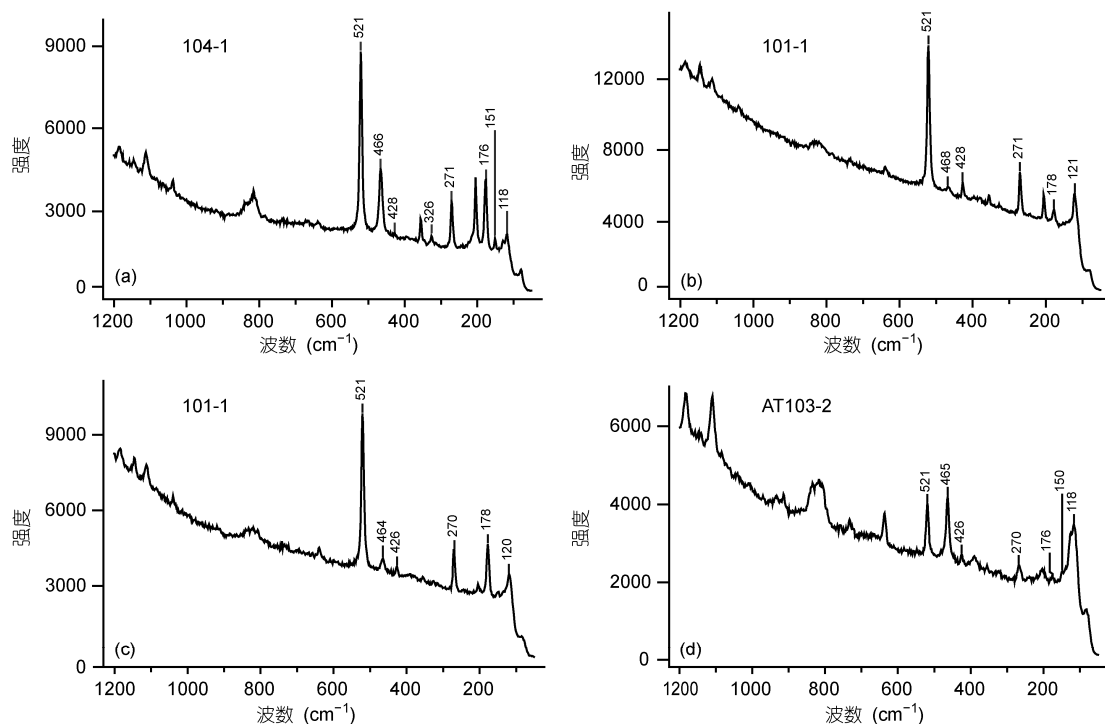


图3 柯石英包体的拉曼光谱

(a) 样品 104-1; (b)和(c) 样品 101-1; (d) 样品 AT103-2. 仅对几个显著的柯石英特征峰和1个最强的石英特征峰(464~468 cm^{-1})做了标注

的(比如冻角闪石和钠云母, 它们一般包裹有残余状的石榴石和绿辉石), 也可能是退变质过程中经历了重结晶作用(比如组成基质的纤状绿辉石集合体). 在矿物组成相对简单的片岩中, 石榴石或为钠长石完全包裹, 或为定向的白色云母, 角闪石或帘石所环绕, 这种结构表明, 只能在保存较完整的石榴石内探寻峰期条件下形成的矿物种类. 除了石榴石, 变质锆石在保存超高压矿物方面也有突出表现^[14~16]. 在西南天山造山带, 很可能由于峰期变质温度较低, 除少数锆石的增生边能达到原位定年所需的宽度外^[17,18], 大多数锆石的变质边极窄($< 10 \mu\text{m}$)^[19]. 这些锆石即使形成于超高压条件下, 也很难将超高压包体矿物完好保存下来. 详细调查西南天山超高压变质锆石的包体组合及其形成时限是一项值得深入的工作.

本次所发现的石榴石中的柯石英包体也不同程度的转变为石英. 退变较弱的柯石英周围的石英增生边表现出栅状结构, 虽然多数情况下由于粒度过小在光学显微镜下已不能分辨出这种结构. 一般认为栅状石英的形成早于它周围的放射状裂纹^[20]. 退变较强的柯石英只在包体核部保留少许残余(小于包体总体积的 20%), 直接包裹它的是具有缝合状不规

则镶嵌结构的多晶石英. 在柯石英彻底退变质时, 在石榴石中形成多晶石英, 周围发育放射状裂纹. 这种不含柯石英残余的多晶石英包体可大致分为两类: (1) 缝合状镶嵌结构(sutured mosaic texture)和(2) 多边形镶嵌结构(polygonal mosaic texture). 构成第一类多晶石英的石英颗粒大小不一且发育波状消光, 颗粒边界呈缝合线状(图 2(e)). 第二类多晶石英的石英颗粒边界相对平直, 粒度较均匀(图 2(i)), 但颗粒数目变化较大. 随着重结晶程度的增加, 多晶石英最终转变为单晶石英, 这时即使在它周围有放射状裂纹, 也不宜与超高压变质作用相关联^[21]. 石榴石变斑晶的同一生长域可以包裹柯石英, 多晶石英和单晶石英等不同类型的二氧化硅包体, 这只是反映了柯石英在石榴石中保存程度的差异^[20]. 包体的保存程度取决于寄主矿物对它的有效封闭程度, 相关因素有包体和寄主的相对粒度, 刚性差异以及寄主退变质显微裂隙的发育程度. 薄片观察显示, 西南天山的超高压岩石在退变质过程中发生了强烈的面理重置, 石榴石多数裂纹很可能形成于这一阶段, 它们构成退变流体的通道, 使柯石英等峰期包体矿物难以保存^[22]. 虽然很多粗大的石榴石变斑晶保持自形, 实际上却是

由若干石榴石“碎块”镶嵌而成,即石榴石变斑晶在退变质过程中经历了碎裂-愈合生长过程^[4]。在这期间总有一些相对较大的石榴石“碎块”可以有效阻止裂隙流体的渗透,且强度足以承受细粒柯石英的减压膨胀所产生的压力。例如,在基性榴辉岩中发现的柯石英就保存在成分均匀的石榴石“碎块”中^[4]。

超高压岩石的形成与演化是现代板块构造理论体系中一个极具挑战性的课题,而调查超高压地体的大小及其与周围地体的构造接触关系则是展开这一课题的基础性工作。在西南天山造山带哈布腾苏河地区含柯石英岩石的发现证实了超高压变质作用的发生^[3,4]。然而,由于目前为止正式报道到的柯石英只有这一处,不同的研究者对这一地区的超高压地体规模存在不同看法^[23,24],这涉及到西南天山超

高压榴辉岩的就位机制,即“原位”还是“外来”成因。西南天山的高压榴辉岩受到了不同程度的外来退变质流体的渗透,局部退变成蓝片岩^[25]。类似的流体如果作用于超高压榴辉岩,不仅可以抹掉全部柯石英,而且同样可以形成退变质蓝片岩,并有可能形成脉体^[26]。西南天山造山带不同岩石类型在退变质过程中伴随着明显的变形作用,这加剧了退变质作用发生的程度。如此以来,需要通过细致的工作去辨别西南天山造山带的超高压岩石与“高压”岩石的伴生应归因于差异退变质作用,还是构造混合作用。本次在该造山带的阿坦塔义河一带不同类型含柯石英岩石的发现,表明这一地区的主体岩石均经历了超高压变质作用,超高压地体南北向宽度可达 10 km。结合以前的研究工作,其东西长可达 60~80 km。

参考文献

- 1 Carswell D A, Compagnoni R. Introduction with review of the definition, distribution and geotectonic significance of ultrahigh pressure metamorphism. *EMU Notes Mineral*, 2003, 5: 3–9
- 2 Wei C J, Wang W, Clarke G L, et al. Metamorphism of high/ultrahigh-pressure pelitic-felsic schist in the South Tianshan orogen, NW China: Phase equilibria and P-T path. *J Petrol*, 2009, 50: 1973–1991
- 3 Lü Z, Zhang L F, Du J X, et al. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, northwest China: Convincing proof of UHP metamorphism. *Am Mineral*, 2008, 93: 1845–1850
- 4 Lü Z, Zhang L, Du J, et al. Petrology of coesite-bearing eclogite from Habutengsu Valley, western Tianshan, NW China and its tectonometamorphic implication. *J Metamorph Geol*, 2009, 27: 773–787
- 5 Zhang L F, Ellis D J, Jiang W B. 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. *Am Mineral*, 2002, 87: 853–860
- 6 Zhang L F, Ellis D J, Williams S, et al. Ultra-high pressure metamorphism in western Tianshan, China: Part II. Evidence from magnesite in eclogite. *Am Mineral*, 2002, 87: 861–866
- 7 Klemd R. Ultrahigh-pressure metamorphism in eclogites from the western Tianshan high-pressure belt (Xinjiang, western China)—Comment. *Am Mineral*, 2003, 88: 1153–1156
- 8 Zhang L F, Ellis D, Williams S, et al. Ultrahigh-pressure metamorphism in eclogites from the western Tianshan, China—Reply. *Am Mineral*, 2003, 88: 1157–1160
- 9 Zhang L F, Song S G, Liou J G, et al. Relict coesite exsolution in omphacite from Western Tianshan eclogites, China. *Am Mineral*, 2005, 90: 181–186
- 10 高俊. 西南天山榴辉岩的发现及其大地构造意义. *科学通报*, 1997, 42: 737–740
- 11 Gao J, Klemd R, Zhang L, et al. P-T path of high-pressure/low-temperature rocks and tectonic implications in the western Tianshan Mountains, NW China. *J Metamorph Geol*, 1999, 17: 621–636
- 12 杨鑫, 张立飞. 新疆西天山含柯石英、电气石石榴多硅白云母片岩的岩石学研究. 全国岩石学与地球动力学研讨会摘要集, 2010
- 13 Zhang R Y, Liou J G, Ernst W G. The Dabie-Sulu continental collision zone: A comprehensive review. *Gondwana Res*, 2009, 16: 1–26
- 14 Liu J B, Ye K, Cong B L, et al. Coesite inclusions in zircon from gneisses identified by laser Raman microspectrometer in ultra-high pressure zone of Dabie Mountains, China. *Chin Sci Bull*, 2001, 46: 1912–1916
- 15 Ye K, Yao Y P, Katayama I, et al. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: New implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, 2000, 52: 157–164
- 16 Liu F L, Liou J G. Zircon as the best mineral for P-T-time history of UHP metamorphism: A review on mineral inclusions and U-Pb SHRIMP ages of zircons from the Dabie-Sulu UHP rocks. *J Asian Earth Sci*, 2011, 40: 1–39
- 17 Zhang L F, Ai Y L, Li X P, et al. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks. *Lithos*, 2007, 96: 266–280

- 18 Su W, Gao J, Klemm R, et al. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: Implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaids. *Eur J Mineral*, 2010, 22: 473–478
- 19 艾永亮. 新疆西南天山超高压榴辉岩及蓝片岩地球化学研究及其大地构造意义. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2005. 70–82
- 20 Wain A, Waters D, Jephcoat A, et al. The high-pressure to ultrahigh-pressure eclogite transition in the Western Gneiss Region, Norway. *Eur J Mineral*, 2000, 12: 667–687
- 21 Wendt A S, Darco P, Goffe B, et al. Radial cracks around alpha-quartz inclusions in Almandine — Constraints on the metamorphic history of the Oman mountains. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 114: 449–461
- 22 Mosenfelder J L, Schertl H P, Smyth J R, et al. Factors in the preservation of coesite: The importance of fluid infiltration. *Am Mineral*, 2005, 90: 779–789
- 23 John T, Klemm R, Klemme S, et al. Nb-Ta fractionation by partial melting at the titanite-rutile transition. *Contrib Mineral Petrol*, 2011, 161: 35–45
- 24 吕增. 中国西南天山哈布腾苏一带的高压-超高压变质作用研究. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2009. 19–52
- 25 van der Straaten F, Schenk V, John T, et al. Blueschist-facies rehydration of eclogites (Tian Shan, NW-China): Implications for fluid-rock interaction in the subduction channel. *Chem Geol*, 2008, 255: 195–219
- 26 Lü Z, Zhang L F, Du J X, et al. Petrology of HP veins in the UHP eclogites of western Tianshan, China: Fluid processes and element mobility during the exhumation in the cold subduction zone, *Lithos*, 2011, doi: 10.1016/j.lithos.2011.10.011