

青藏高原羌塘中部榴辉岩岩石学研究进展

王晓赛, 杜瑾雪, 王根厚

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:羌塘中部低温高压变质带是青藏高原内部延伸规模最大的高压变质带, 是了解青藏高原早期形成与演化的重要窗口。该高压变质带沿龙木错—双湖缝合带出露, 主要由多硅白云母片岩、蓝片岩和榴辉岩等组成, 其中榴辉岩在片石山、果干加年山、戈木及冈玛错等地区出露。羌塘中部榴辉岩以透镜体状、块状和互层状产于多硅白云母片岩或变沉积岩中。现有资料表明, 榴辉岩变质作用峰期阶段矿物组合为石榴石+绿辉石+多硅白云母+金红石±蓝闪石±石英; 部分地区榴辉岩石榴石中发现的盒子状绿帘石+钠云母两相包裹体和传统地质温压计结果均表明, 榴辉岩变质作用峰期可能达到了硬柱石榴辉岩相。尽管部分榴辉岩中保留了绿辉石出溶叶片状石英, 石榴石出溶金红石、石英、角闪石针状体和磷灰石出溶金红石等疑似超高压变质作用证据, 但迄今为止, 榴辉岩中还未发现柯石英、金刚石等典型超高压指示矿物, 并且石榴石成分“超高压指针”以及传统地质温压计重新计算均表明羌塘中部榴辉岩并未经历超高压变质作用。榴辉岩折返 $P-T$ 轨迹具有近等温降压的特点, 经历了多期退变质作用。

关键词:岩石学; 榴辉岩; 高压变质作用; 地质温压计; $P-T$ 轨迹; 龙木错—双湖缝合带; 羌塘中部; 青藏高原

中图分类号: P588.3

文献标志码: A

Review on Petrology of Eclogites in Central Qiangtang of Qinghai-Tibet Plateau

WANG Xiao-sai, DU Jin-xue, WANG Gen-hou

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The low-temperature high-pressure (LT-HP) metamorphic belt in central Qiangtang is the largest high-pressure metamorphic belt occurring in Qinghai-Tibet Plateau, and is an important window for understanding the early formation and evolution of Qinghai-Tibet Plateau. The high-pressure metamorphic belt is mainly exposed along Longmu Co-Shuanghu suture zone, and is composed of phengite schists, blueschists, eclogites and so on. Among these high-pressure rocks, the eclogites in central Qiangtang are found in Pianshishan, Guoganjianian Mt., Gemu and Gangma Co, and occur as lenses, blocks and layers in phengite schists or metasediments. Based on the available data, the mineral assemblage of the peak eclogite-facies stage of eclogites in central Qiangtang is garnet + omphacite + phengite + rutile ± glaucophane ± quartz. The pseudomorphs of box-shape epidote + paragonite found in garnet and $P-T$ results from traditional geothermobarometers indicate that they have reached the lawsonite eclogite-facies metamorphism.

收稿日期: 2017-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502059); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2652015041); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160026)

作者简介: 王晓赛(1992-), 男, 河北石家庄人, 工学硕士研究生, E-mail: xiaosaiw@gmail.com。

通讯作者: 杜瑾雪(1985-), 男, 四川南充人, 讲师, 理学博士, E-mail: jxdu@cugb.edu.cn。

Although some eclogites preserve the evidence of suspected ultra-high pressure metamorphism, such as the quartz lamellae exsolves from omphacite, the rutile, quartz or amphibole exsolve from garnet, and the rutile exsolves from apatite, there is no typical ultra-high pressure indicator mineral (such as coesite, diamond, etc.) in the eclogites. “The ultra-high pressure indicator” from garnet compositions and P - T recalculation using traditional geothermobarometers indicate that the eclogites in central Qiangtang do not undergo the ultrahigh-pressure metamorphism. The eclogites in central Qiangtang have a retrograde P - T path characterized by the isothermal decompression, and experience several stages of retrograde metamorphism.

Key words: petrology; eclogite; high-pressure metamorphism; geothermobarometer; P - T path; Longmu Co-Shuanghu suture zone; central Qiangtang; Qinghai-Tibet Plateau

0 引言

(超)高压变质岩石是板块汇聚时构造热事件的最重要见证者,获得俯冲和造山事件准确的压力(P)-温度(T)-时间(t)轨迹对于揭示板块构造的发生发展过程、(超)高压变质地体地质演化历史以及造山带形成演化及其动力学机制具有关键作用^[1];同时,(超)高压变质岩石是表壳岩石俯冲至地壳或地幔深处并折返回地表的岩石,因此,它对于揭示地幔动力学、地幔-地壳的相互作用以及地球深部物质的循环等具有重要意义^[2]。代表洋壳俯冲产物的低温高压变质岩(如蓝片岩和榴辉岩)作为古生代造山带边界的重要记录者,因其独特的地质意义引起地学界广泛关注^[3-5]。

羌塘盆地位于青藏高原中北部,地处冈瓦纳大陆与欧亚大陆的交汇部位,记录了青藏高原早期生长和特提斯洋演化的重要信息^[6-8],是研究古特提斯洋俯冲消减与两大陆碰撞造山过程的关键地区。盆地中央出露了一条近EW向展布的低温高压变质带,即龙木错—双湖缝合带。该高压变质带是青藏高原内部延伸规模最大的高压变质带,是了解青藏高原早期形成与演化的重要窗口。带内出露的榴辉岩对于揭示该缝合带的分布范围、形成、演化及其动力学机制具有重要作用,同时为进一步探讨青藏高原的构造格局、地质演化以及特提斯构造域的大陆动力学特征提供一定的约束^[9]。本文系统总结了羌塘中部榴辉岩岩石学研究的最新进展,并探讨其中存在的问题。文中矿物缩写参考文献^[10]。

1 区域地质概况

青藏高原羌塘盆地位于班公湖—怒江缝合带和金沙江缝合带之间,盆地中央出露的龙木错—双湖缝合带将羌塘盆地分为北侧羌北—昌都板块和南侧

羌南—宝山板块^[11-12]。自北向南,羌塘中部构造格架主要分为北羌塘上古生界—侏罗系沉积区、羌塘中部增生杂岩区/变质带(CQAC/CQMB)、二叠系沉积区和南羌塘上三叠统一侏罗系沉积区等几个主要部分(图1^[13])。区内发育的岩浆活动主要表现为北羌塘南缘的那底岗日火山岩、冈塘错花岗岩以及断续分布的裂谷型基性岩墙群。依布茶卡逆冲断层将二叠系沉积物推覆至上三叠统一侏罗系沉积物之上,同时发育区域性走滑断层。作为古洋壳残片的蛇绿混杂岩主要出露在角木日、果干加年山及桃形湖—冈玛错地区^[14]。区内发育的高压变质岩(如榴辉岩、蓝片岩)主要沿龙木错—双湖缝合带分布,同时这也是识别该变质带边界的重要依据。

有关羌塘中部地区高压变质岩的报道始于1915年^[15],20世纪90年代开始,前人进行了一系列的岩石学、地球化学、同位素年代学等方面的研究,获得了大量的研究成果^[8-9,13,16-24]。现有资料表明,龙木错—双湖缝合带近EW向展布(图1),西起红脊山,经冈玛错、果干加年山、片石山、蓝岭至东端双湖地区,长度超过500 km,面积约20 000 km²。带内出露多种高压变质岩,主要有榴辉岩、蓝片岩、石榴石多硅白云母片岩和蓝闪石大理岩等^[9,16,19-20,25-29]。多硅白云母、金红石、蓝闪石、硬玉、硬柱石等常见的高压矿物在这条高压变质带中都有出现^[30-31],但目前尚未发现柯石英、金刚石等超高压指示矿物。这些岩石组合和矿物学特点表明,龙木错—双湖缝合带为一条低温高压变质带。同位素年代学研究表明,羌塘中部高压变质带的峰期变质时代为230~243 Ma(锆石U-Pb定年^[24]及石榴石Lu-Hf定年^[32]),通过白色云母或角闪石Ar-Ar定年测定获得了其折返时间在213~227 Ma之间^[18,20,33-36],因此,羌塘中部高压变质带的主体时代为中晚三叠世。地球化学研究表明,该地区榴辉岩

榴辉岩相变沉积岩石榴石中残留有绿泥石、硬绿泥石等包裹体^[41]。

绿辉石主要以3种形式产出:①在基质中呈保存较好的矿物变晶,与石榴石共生,并可见三连点结构,受后期退变质作用影响较小;②受后期退变质作用影响,被角闪石(蓝闪石、冻蓝闪石、阳起石)环绕或包裹;③呈细小包裹体产于石榴石中^[24,43]。受全岩化学成分控制和退变质作用程度的影响,绿辉石体积分数亦发生较明显的变化(20%~40%^[9,24,43-44]);在一些发生强烈退变质作用的榴辉岩(例如冈玛错地区榴辉岩)中,绿辉石体积分数很少或没有,其边缘完全退变成纤维状阳起石和钠长石^[24];果干加年山地区榴辉岩较新鲜,其绿辉石体积分数为65%~70%^[38]。

角闪石体积分数较大,且在榴辉岩不同部位也不一致,一般在20%~40%之间。角闪石呈半自形—他形板柱状、粒状,粒度多在0.5~1.0 mm之间,大者可达3.0 mm。角闪石主要有3种产状:①包裹于石榴石中,成分上主要为蓝闪石和冻蓝闪石^[24];②在基质中呈他形颗粒分布于绿辉石和多硅白云母周围,成分上主要为蓝闪石、青铝闪石、铁透蓝闪石、冻蓝闪石等^[9,24,44];③在后成合晶中呈他形或纤维状晶体,成分主要为阳起石^[24,43]。基质中角闪石多为绿辉石退变而成,片石山地区榴辉岩中同一绿辉石颗粒上可见绿辉石→蓝闪石→冻蓝闪石的转变过程^[24,44]。

榴辉岩中多硅白云母体积分数一般小于5%,通常呈细小板条状、鳞片状,长0.01~0.10 mm,局

部大者可达0.20 mm,多与绿辉石和石榴石平衡共生^[38,43]。钠云母或生长于多硅白云母边部,或包裹于石榴石中与绿帘石共生构成硬柱石假象^[43]。

绿帘石/黝帘石也多为退变质作用过程中形成的,其产状有3种:①少量包裹于石榴石中,与钠云母构成盒子状、柱状硬柱石假象^[43];②生长在石榴石边部(Outer Rim),为石榴石退变而成,部分与黑云母构成石榴石假象^[37];③分布于基质中,呈细粒状,局部可见绿帘石脉体^[43]。

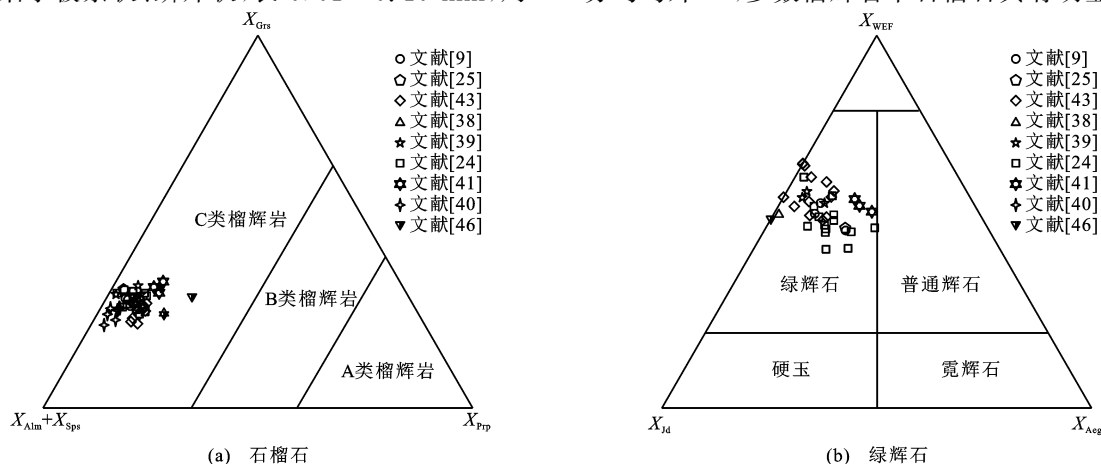
石英呈包裹体状产出于石榴石中或其交界处。值得注意的是,在绿辉石中见有疑似超高压变质作用的叶片状石英出溶^[25,41]。钛铁矿和榍石为金红石退变质作用的产物^[9,37]。

3 矿物化学特征

3.1 石榴石

羌塘中部榴辉岩石榴石成分以铁铝榴石组分(Alm)为主(摩尔分数(X_{Alm})为53.34%~69.48%),冈玛错地区榴辉岩石榴石核部铁铝榴石组分低至46.29%^[24],其次是钙铝榴石组分(摩尔分数(X_{Grs})为22.26%~33.90%) and 镁铝榴石组分(摩尔分数(X_{Prp})为1.65%~11.56%^[9,24-25,38-41,43,46])。在不同地区不同岩块及块体的不同部位,石榴石成分有所变化,但均相当于Coleman等分类中的C类(低温)榴辉岩石榴石[图2(a)]^[47]。

石榴石X-射线衍射成分图像和成分剖面探针分析表明,除戈木地区少数榴辉岩样品中石榴石成分均匀外^[25],多数榴辉岩中石榴石具有明显的成分



图(a)底图引自文献[47],图(b)底图引自文献[48]; X_{WEF} 为钙-镁-铁辉石组分摩尔分数, X_{Jd} 为硬玉组分摩尔分数, X_{Aeg} 为霓辉石组分摩尔分数;文献[9]和[43]为片石山地区,文献[38]为果干加年山地区,文献[39]和[40]为冈玛错地区,文献[25]、[41]和[46]为戈木地区,文献[24]为片石山地区和冈玛错地区

图2 羌塘中部榴辉岩中石榴石和绿辉石成分图解

Fig. 2 Compositional Variations of Garnet and Omphacite of Eclogites in Central Qiangtang

环带:由核部到边部,铁铝榴石和镁铝榴石组分摩尔分数逐渐增加,冈玛错地区部分样品中镁铝榴石组分摩尔分数高达 15.28%^[40],钙铝榴石和锰铝榴石组分(Sps)摩尔分数逐渐减少^[24,39][图 3(a)、(b)],冈玛错地区部分样品中锰铝榴石组分摩尔分数(X_{Sps})甚至从约 20%降低至 0%^[24],属于典型的生长环带,说明石榴石为进变质作用过程中形成的;也有部分样品钙铝榴石组分显示出一个小的但不规则的变化,整体表现为钙铝榴石在靠近边部时出现局部最高点,之后又逐渐降低^[24][图 3(c)]。

3.2 绿辉石

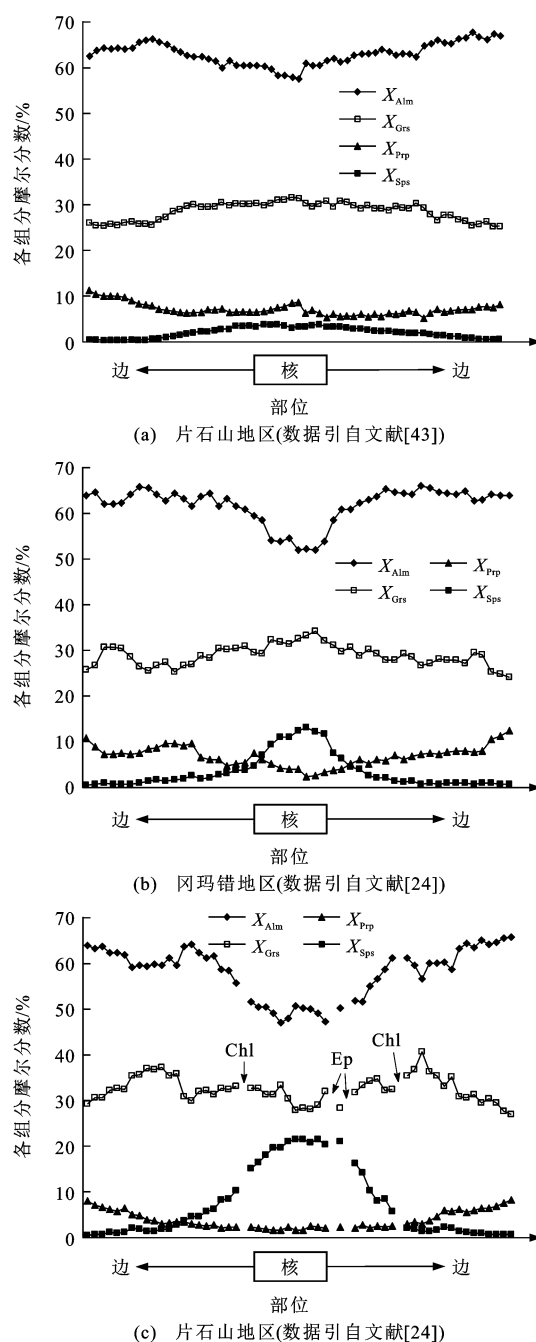
羌塘中部榴辉岩单斜辉石在辉石分类图解[图 2(b)]中均投影于绿辉石区域。绿辉石硬玉(Jd)组分摩尔分数介于 30.81%~46.60%之间^[9,24,38-39,43,46],榴辉岩相变沉积岩中绿辉石硬玉组分含量较少,为 24.78%~27.07%^[41]。虽然遭受不同程度的退变质作用,片石山和冈玛错地区未蚀变和强烈退变质的榴辉岩中绿辉石成分都较为均匀,硬玉组分摩尔分数为 31.81%~41.68%,并且锆石和石榴石中的绿辉石包裹体成分相似,硬玉组分摩尔分数为 26.25%~37.54%^[24]。

3.3 多硅白云母

多硅白云母 SiO_2 含量(质量分数,下同)在 49.25%~54.68%之间,每单位晶胞(pfu)Si 原子数在 3.33~3.58 之间(以 11 个 O 原子计算),属典型的多硅白云母,也是典型的高压变质矿物^[9,24-25,38-39,41,43]。

3.4 角闪石

羌塘中部榴辉岩中角闪石主要为钠钙质角闪石和钙质角闪石类(如冻蓝闪石、镁红闪石、镁角闪石、阳起石、浅闪石和含铁韭闪石等),少量为钠质角闪石(如蓝闪石、青铝闪石)。钠钙质角闪石类 Na_2O 含量多在 3.15%~5.27%之间,钙质角闪石类 Na_2O 含量在 2.25%~3.89%之间^[43],钠质角闪石类 Na_2O 含量在 5.60%~7.08%之间。榴辉岩中角闪石主要为退变质作用过程中的产物,电子探针分析结果显示退变质作用早期为蓝闪石,个别落入青铝闪石区,之后出现冻蓝闪石以及阳起石^[9,37,44]。值得注意的是,在片石山及冈玛错地区部分退变榴辉岩石榴石中包裹体蓝闪石可能为进变质作用过程的残余,其 Na_B 值(单位分子 B 位置 Na 原子数)(1.51~1.72 pfu)整体比基质中蓝闪石 Na_B 值(1.73~1.82 pfu)及蓝片岩中蓝闪石 Na_B 值(1.77~1.78 pfu)低,说明包裹体蓝闪石可能与基质中的蓝闪石不是同期矿物^[24]。



图(c)中绿泥石(Chl)和绿帘石(Ep)所指位置表示这两种包裹体在石榴石中的产出位置

图 3 羌塘中部榴辉岩中石榴石环带特征

Fig. 3 Compositional Profiles of Garnet of Eclogites in Central Qiangtang

4 讨论

4.1 榴辉岩是否经历过超高压变质作用?

羌塘中部高压变质带中发现了一些可能指示高压/超高压变质作用的证据。Zhang 等在戈木地区发现榴辉岩绿辉石中出溶叶片状石英^[25];武海等在冈玛错地区发现榴辉岩石榴石中出溶金红石、石英、

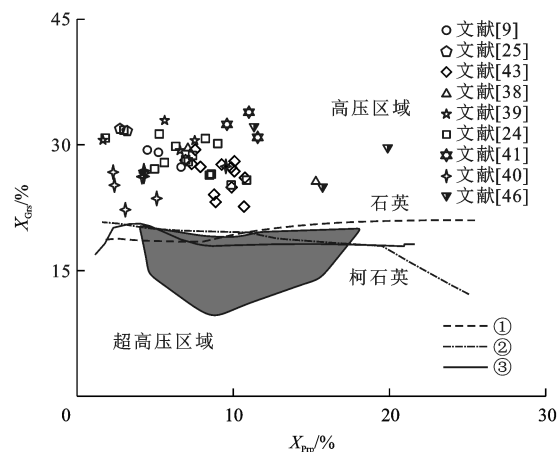
角闪石针状体以及磷灰石中出溶金红石等^[40]。基于这些矿物出溶现象,羌塘中部榴辉岩可能经历了超高压变质作用。Tang 等采用石榴石-单斜辉石矿物对以及绿辉石中硬玉组分压力计获得了 509 °C ~ 576 °C、27 kbar 的变质温压条件^[41]。但是,Zhai 等根据石榴石-单斜辉石-多硅白云母温压计计算得到榴辉岩的峰期压力为 20~25 kbar,并且未发现柯石英、金刚石等超高压特征变质矿物,因而认为羌塘中部榴辉岩并未经历过超高压变质作用^[24]。

那么,羌塘中部出露的榴辉岩到底有没有经历过超高压变质作用呢?绿辉石中石英的出溶依赖于单斜辉石中 Ca-Eskol 分子的分解($2\text{Ca}_{0.5}\square_{0.5}\text{Al-Si}_2\text{O}_6 \rightarrow \text{CaAl}_2\text{SiO}_6 + 3\text{SiO}_2$),Ca-Eskol 分子在低压时极不稳定,利用单斜辉石中 Ca-Eskol 分子溶解度精确计算榴辉岩的压力仍有一些争议和不确定性^[49],并且绿辉石中的石英也有可能是“正常”生长的^[50]。Zhang 等计算获得的戈木地区榴辉岩绿辉石中 Ca-Eskol 分子摩尔分数约为 7%^[25];而 Page 等的研究表明 Ca-Eskol 分子摩尔分数在 5%~10% 范围内,单斜辉石中针状石英出溶体的形成并不一定需要超高压条件^[51]。另外,笔者采用 Ravna 等所标定的石榴石-单斜辉石-多硅白云母温压计^[52]对文献^[41]中榴辉岩的峰期温压条件进行了重新估算,结果表明其峰期温压条件为 516 °C ~ 581 °C、20.5 ~ 22.0 kbar,并未达到超高压变质条件。

Hwang 等针对石榴石中定向针状金红石的出溶成因提出了 3 种可能模式^[53]:①从早期矿物继承来的;②溶解和再沉淀的;③石榴石发生裂开和裂开缝合过程伴随着金红石的沉淀。但这 3 种模式并不能完美解释石榴石与定向针状金红石的关系。经历了超高压变质作用的石榴石中通常可观察到 3、4 组各自相互平行定向的针状金红石,其定向受石榴石晶格的控制^[54],一般平行于石榴石的<111>方向,也有部分金红石的[001]方向与石榴石<111>方向存在 27.6°的夹角^[55]。而冈玛错地区榴辉岩石榴石中仅“出溶”一组金红石^[40],其形态特征与文献^[55]、^[56]所提到的典型超高压出溶体形态并无较好的相关性,因而羌塘中部榴辉岩石榴石中金红石并不是典型的出溶体,而是普通矿物包裹体,并不能反映超高压变质条件。

Du 等基于对新疆西南天山榴辉岩石榴石成分的研究,认为绘有石英-柯石英转变线的 Grs-Prp 图解可以用于有效辨别榴辉岩是否经历了超高压变质作用^[57]。笔者将羌塘中部榴辉岩石榴石成分数据

投入该图解(图 4)中,发现榴辉岩石榴石成分均投影于石英所在的高压区域,而非柯石英所在的超高压区域,Zhang 等在戈木地区发现的“超”高压榴辉岩^[25]及武海等在冈玛错地区发现的“超”高压榴辉岩^[40]石榴石成分亦未进入柯石英稳定域。



图中阴影部分为新疆西南天山超高压榴辉岩石榴石成分^[57];①号线表示 MORB 成分下石英-柯石英转变线^[58];②号线表示新疆西南天山含柯石英假象榴辉岩石英-柯石英转变线;③号线表示新疆西南天山含柯石英榴辉岩石英-柯石英转变线^[59]

图 4 羌塘中部榴辉岩中石榴石 Grs-Prp 图解

Fig. 4 Grs-Prp Diagram of Garnet of Eclogites in Central Qiangtang

综上所述,羌塘中部榴辉岩中尽管存在多种疑似超高压变质作用的证据,但榴辉岩未见柯石英和金刚石等超高压指示矿物,榴辉岩石榴石-单斜辉石-多硅白云母温压计计算结果和石榴石成分 Grs-Prp 图解也表明其峰期温压条件未达到超高压变质条件。因此,就已有证据来看,羌塘中部榴辉岩并未经历过超高压变质作用。

4.2 榴辉岩是否经历了硬柱石榴辉岩相变质作用?

实验岩石学及相平衡模拟均显示硬柱石榴辉岩通常产于洋壳冷俯冲变质带中^[60-61]。前人运用多种矿物温压计获得羌塘中部榴辉岩的峰期温压为 410 °C ~ 535 °C、15.6 ~ 27.0 kbar^[24],个别温度可到 625 °C^[25](表 2)。利用石榴石-单斜辉石-多硅白云母温压计计算的峰期温压条件变化范围如此之大的可能原因有^[60]:①绿辉石中 Fe³⁺ 含量的不确定性;②不同公式间校准方式的不同;③降压过程中石榴石与单斜辉石间的不平衡。这些计算出的温压范围部分不属于榴辉岩相(图 5)。李才等计算出的压力范围为 15.6 ~ 23.5 kbar(部分位于蓝片岩相)^[35],与岩相学的观察不一致。另外,Zhang 等根据文献^[62]中石榴石-单斜辉石温度计计算的温度

表 2 羌塘中部榴辉岩温压条件
Tab. 2 *P-T* Conditions of Eclogites in Central Qiangtang

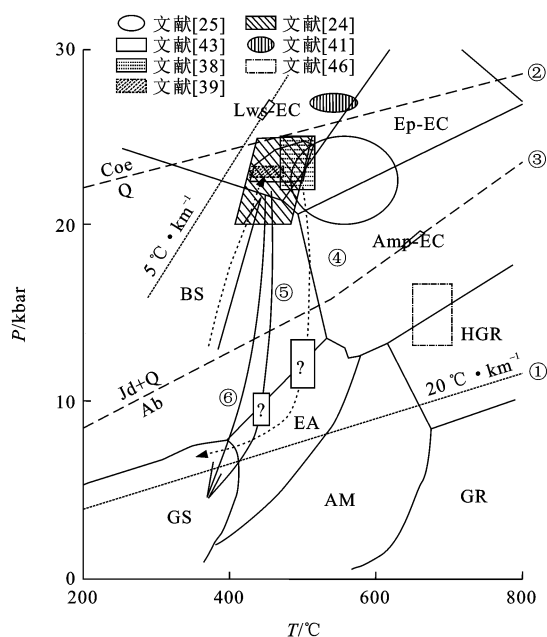
采样位置	峰期榴辉岩相 温压条件	蓝片岩相 温压条件	绿帘角闪岩相 温压条件	绿片岩相 温压条件	计算峰期温压所采用的方法	参考文献
片石山	低于 500 ℃、15.6~23.5 kbar				石榴石+单斜辉石+ 多硅白云母温压计	[9]
片石山	约 500 ℃、约 23 kbar		约 450 ℃、 低于 10 kbar	低于 400 ℃、 低于 5 kbar	石榴石+单斜辉石温度计和 石榴石+单斜辉石+多硅 白云母压力计的平均结果	[43]
冈玛错	410 ℃~460 ℃、 20~25 kbar				石榴石+单斜辉石+ 多硅白云母温压计	[24]
片石山						
果干加年山	470 ℃~520 ℃、22.1~25.1 kbar				石榴石+单斜辉石+ 多硅白云母温压计	[38]
冈玛错	427 ℃~472 ℃、23 kbar				石榴石+单斜辉石+ 多硅白云母温压计	[39]
戈木	(535±40)℃、约 27 kbar		约 650 ℃	(472±30)℃、 9 kbar	石榴石+单斜辉石、石榴石+ 多硅白云母温度计,绿辉石中 硬玉组分压力计	[41]
戈木日	482 ℃~625 ℃、 >20~25 kbar	10~12 kbar、460 ℃~600 ℃ (角闪岩相)			石榴石+单斜辉石温度计、绿辉石 中石英出溶条纹及石榴石+单斜 辉石+多硅白云母压力计	[25]
戈木	695 ℃、16.6 kbar				热力学相平衡模拟及金红石 锆石含量温度计	[46]

范围较大(482 ℃~625 ℃)^[25],该版本的温度计考虑的成分参数较为简单且未考虑 Ca-Mg 之间的畸形占位对平衡常数(K_D)的影响,因此,应用线性方程求解的温度范围不甚合理。综上所述,羌塘中部榴辉岩仍属于典型的低温榴辉岩,温压范围为 410 ℃~472 ℃、20~25 kbar^[24,39],且其峰期温压条件多位于硬柱石榴辉岩相区域(图 5)。片石山地区榴辉岩具有 E-MORB 和 OIB 地球化学特征,与三江地区蛇绿岩相似,形成于洋中脊和热点叠加的构造环境^[23,45],果干加年山地区榴辉岩原岩为亚碱性玄武岩,具有较低的稀土元素总含量($(51.19\sim59.43)\times10^{-6}$)和轻稀土元素亏损($w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N=0.59\sim0.70$)的特征,不具有 Nb、Ta、Ti 亏损的特征,这与 N-MORB 特征一致,同样表明其原岩形成于洋中脊环境^[27]。因此,该地区榴辉岩为典型的洋壳冷俯冲作用的产物。

笔者统计了目前已发表的羌塘中部榴辉岩石榴石成分数据,发现其镁铝榴石组分摩尔分数普遍小于 15%,钙铝榴石组分在 22%~34%之间。将这些石榴石成分投入 Wei 等所计算的 MORB 成分 *P-T*

视剖面图^[60]中,发现羌塘中部榴辉岩峰期温压条件为 440 ℃~560 ℃、20~25 kbar,主要集中在 485 ℃~535 ℃、20~23 kbar 范围内,位于蓝闪石硬柱石榴辉岩相稳定域。这也与翟庆国等在片石山地区榴辉岩石榴石中发现的盒子状钠云母+绿帘石组合包裹体(硬柱石假象^[43])和 Zhai 等在片石山地区榴辉岩石榴石中发现的蓝闪石包裹体等岩相学现象一致^[24]。但是,尽管羌塘中部一些地区(例如红脊山地区)蓝片岩中发现了保存完好的硬柱石^[30,63],然而到目前为止,榴辉岩中还未发现保存完好的硬柱石。

苑婷婷等报道了戈木日地区的榴辉岩,采用相平衡模拟及金红石锆含量温度计的方法获得榴辉岩相峰期变质温压为 695 ℃、16.6 kbar,因而认为该榴辉岩为中温榴辉岩,而非硬柱石榴辉岩^[46]。该榴辉岩石榴石由核部至边部镁铝榴石组分摩尔分数先升高后降低,幔部摩尔分数高达 19.88%,而钙铝榴石组分逐渐降低,其摩尔分数在 24.84%~32.04%之间。笔者认为 *P-T* 视剖面图中石榴石镁铝榴石组分摩尔分数等值线、钙铝榴石组分摩尔分数等值



底图引自文献[2],有所修改;GR为麻粒岩相,HGR为高压麻粒岩相,AM为角闪岩相,EA为绿帘角闪岩相,BS为蓝片岩相,GS为绿片岩相,EC为榴辉岩相(包括硬柱石榴辉岩相(Lws-EC)、绿帘榴辉岩相(Ep-EC)、角闪榴辉岩相(Amp-EC));①为地温梯度线;②为柯石英(Coe)-石英(Q)转变线;③为钠长石(Ab)-硬玉+石英转变线;④为片石山地区榴辉岩所经历的 $P-T$ 轨迹[43];⑤为冈玛错地区榴辉岩所经历的 $P-T$ 轨迹[24];⑥为片石山地区榴辉岩所经历的 $P-T$ 轨迹[24]

图5 羌塘中部榴辉岩温压条件及 $P-T$ 轨迹

Fig. 5 $P-T$ Conditions and $P-T$ Paths of Eclogites in Central Qiangtang

线以及铁铝榴石组分摩尔分数等值线近乎平行,并用于确定变质温压条件存在较大的误差;同样将该成分投入 Wei 等所计算的 MORB 成分 $P-T$ 视剖面图[60]中,发现温度大于 600 °C 时石榴石镁铝榴石组分摩尔分数等值线与钙铝榴石组分摩尔分数等值线也近乎平行;假如该榴辉岩的确为中温榴辉岩,石榴石镁铝榴石组分摩尔分数等值线和钙铝榴石组分摩尔分数等值线又会受到全岩成分的影响[64],因此,该峰期温压条件(695 °C、16.6 kbar)可能并不合适。并且,该石榴石成分依然可以投到 Coleman 等提出的榴辉岩分类图解[47]中的 C 类(低温)榴辉岩区域(图 2)。Zack 等标定的金红石锆石含量温度计均未考虑压力的影响,获得的温度分别为 654 °C ~ 723 °C[65]、599 °C ~ 642 °C[66],因此,笔者认为利用考虑了压力影响的 Tomkins 等的温度计[67]进行计算更合适,得到的温度为 580 °C ~ 600 °C。综上所述,苑婷媛等报道的戈木地区榴辉岩[46]可能并非中温榴辉岩,其是否含硬柱石及是否经历了硬柱石榴辉岩相仍有待深入研究。

因此,查明羌塘中部榴辉岩中硬柱石的形成和保存机制能为揭示洋壳是否为冷俯冲以及榴辉岩、蓝片岩折返机制提供有力依据[68]。

4.3 变质作用 $P-T$ 轨迹

羌塘中部榴辉岩普遍经历了峰期硬柱石榴辉岩相变质作用,峰期温压条件为 410 °C ~ 472 °C、20 ~ 25 kbar[24,39]。根据榴辉岩石榴石中的蓝闪石、冻蓝闪石、多硅白云母包裹体,推测其经历了蓝片岩相进变质作用过程[24,43],因此,羌塘中部榴辉岩俯冲过程具有升温升压型的 $P-T$ 轨迹(图 5)。但榴辉岩折返过程的 $P-T$ 轨迹却存在较大争议:Zhai 等获得的折返 $P-T$ 轨迹具有早期等温降压的特点[24,43],而 Tang 等获得的 $P-T$ 轨迹具有早期升温降压的特点[41]。

Zhai 等的研究认为,羌塘中部榴辉岩早期退变质作用阶段,蓝闪石、冻蓝闪石和钠长石取代绿辉石或形成绿辉石的退变质边[24,44],在同一绿辉石矿物颗粒上可以见到绿辉石→蓝闪石→冻蓝闪石的连续转变,暗示退变质早期可能经历了蓝片岩相变质作用,冻蓝闪石的出现可能暗示在减压过程中达到绿帘角闪岩相变质作用[69]。榴辉岩基质中的绿帘石或绿帘石脉以及毛发状阳起石等矿物生长于前期矿物的边缘或裂隙中,表明其可能经历了绿片岩相退变质作用[24,43]。

Tang 等所研究的榴辉岩相变沉积岩的 $P-T$ 轨迹具有以下几个阶段[41]:采用石榴石-单斜辉石地质温度计以及绿辉石中硬玉组分压力计获得了 509 °C ~ 576 °C、27 kbar 的峰期温压条件;利用石榴石中的角闪石包裹体与石榴石组成的石榴石-角闪石地质温度计获得了超过 650 °C 的早期抬升阶段角闪岩相变质温度条件;利用石榴石中硬绿泥石和绿泥石包裹体所构成的 Fe^{2+} -Mg 交换温度计计算出(472 ± 30) °C 以及多硅白云母 Si 等值线,获得了(535 ± 40) °C、6 ~ 9 kbar 的绿片岩相退变质温压条件。

采用矿物对温压计计算变质作用各阶段温压条件的先决条件是矿物对达到热力学平衡。Tang 等分别采用石榴石-单斜辉石、石榴石-角闪石地质温度计计算了变质作用峰期和折返早期角闪岩相的温压条件[41],这表明作者假设石榴石与单斜辉石、角闪石都达到平衡,因此,由同一共生矿物组合获得变质作用两个不同阶段的温压条件是否合理需要仔细斟酌。另外,用于计算榴辉岩绿片岩相退变质作用温压条件的硬绿泥石和绿泥石包裹于石榴石中,可能是进变质作用残余而非退变质作用产物,因而计

算出的 $(472 \pm 30)^\circ\text{C}$ 也有可能是进变质作用某一阶段的温度条件。

综上所述,羌塘中部榴辉岩可能经历了进变质阶段蓝片岩相、峰期硬柱石榴辉岩相、退变质阶段蓝片岩相、绿帘角闪岩相和绿片岩相变质作用,变质作用 P - T 轨迹具有俯冲升温升压和早期折返等温降压的特点。

5 结 语

尽管学者们很早就开展了对青藏高原羌塘中部榴辉岩的地球化学、同位素年代学和矿物学等多方面的研究,在片石山、果干加年山、冈玛错、戈木日等地区发现了榴辉岩,但是对榴辉岩岩石学的研究却不够深入,这也可能是造成对该高压变质带(龙木错—双湖缝合带)具有不同认识的一个重要原因。例如,多数学者认同榴辉岩经历了峰期硬柱石榴辉岩相变质作用,峰期阶段矿物组合为石榴石+绿辉石+多硅白云母+金红石+硬柱石(假象)±蓝闪石±石英,但应用传统地质温压计获得的榴辉岩峰期变质温压条件范围较大,并且不同学者获得的结果也差异巨大。羌塘中部自然环境恶劣,野外工作较难开展,榴辉岩的野外分布和产状等还未进行详细调查,因而,尽管从目前已有资料来看,羌塘中部榴辉岩可能并未经历超高压变质作用,但区内是否还有未被发现或未出露的超高压榴辉岩还需进一步调查。

另外,目前对羌塘中部榴辉岩 P - T 轨迹的刻画还停留在采用传统地质温压计的研究阶段,而本文所用的 Prp-Grs 图解也仅仅是识别超高压变质作用的一个定性方法,因此,对羌塘中部榴辉岩的岩石学研究急需方法上的突破。随着计算机技术的进步,近 20 年来通过热力学相平衡模拟估算变质作用温压条件(所谓的“视剖面图温压计”^[70])越来越受到重视,利用石榴石成分环带在视剖面图中投点能得到石榴石生长各阶段的温压条件,进而获得整条 P - T 轨迹(例如文献^[71])。该方法优越性在于:①更善于挖掘石榴石等矿物成分所蕴含的温压条件信息;②直观地展现岩石矿物组合随温压条件变化而发生的变化;③通过绘制 $P(T)$ - X 等图解(X 为全岩成分变量),能更清楚地了解全岩成分对变质作用过程中矿物组合演化的影响^[72-77]。因此,将热力学相平衡模拟方法引入羌塘中部榴辉岩的研究,能更全面、准确地掌握羌塘中部低温高压变质岩的变质作用演化信息,从而为羌塘中部古特提斯洋盆的

构造演化及洋壳的俯冲折返机制等方面提供更为充分的依据。

参 考 文 献 :

References :

- [1] DU J X, ZHANG L F, SHEN X J, et al. A New P - T - t Path of Eclogites from Chinese Southwestern Tianshan: Constraints from P - T Pseudosections and Sm-Nd Isochron Dating[J]. Lithos, 2014, 200/201: 258-272.
- [2] LIOU J G, ERNST W G, ZHANG R Y, et al. Ultra-high-pressure Minerals and Metamorphic Terranes: The View from China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(3/4): 199-231.
- [3] SONG S G, ZHANG L F, NIU Y, et al. Eclogite and Carpholite-bearing Metasedimentary Rocks in the North Qilian Suture Zone, NW China: Implications for Early Palaeozoic Cold Oceanic Subduction and Water Transport into Mantle[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25(5): 547-563.
- [4] ERNST W G. Tectonic Contact Between the Franciscan Melange and the Great Valley Sequence: Crustal Expression of a Late Mesozoic Benioff Zone[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(5): 886-901.
- [5] MARUYAMA S, LIOU J G, TERABAYASHI M. Blueschists and Eclogites of the World and Their Exhumation[J]. International Geology Review, 1996, 38(6): 485-594.
- [6] YIN A, HARRISON T M. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28: 211-280.
- [7] PAN G T, WANG L Q, LI R S, et al. Tectonic Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 53(2): 3-14.
- [8] 张开均, 唐显春. 青藏高原腹地榴辉岩研究进展及其地球动力学意义[J]. 科学通报, 2009, 54(13): 1804-1814.
ZHANG Kai-jun, TANG Xian-chun. Eclogites in the Interior of the Tibetan Plateau and Their Geodynamic Implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(13): 1804-1814.
- [9] 李 才, 翟庆国, 董永胜, 等. 青藏高原羌塘中部榴辉岩的发现及其意义[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 70-74.
LI Cai, ZHAI Qing-guo, DONG Yong-sheng, et al. Discovery of Eclogite and Its Geological Significance in Qiangtang Area, Central Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(1): 70-74.
- [10] 沈其韩. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学

- 杂志,2009,28(5):495-500.
- SHEN Qi-han. The Recommendation of a Systematic List of Mineral Abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*,2009,28(5):495-500.
- [11] 李 才,董永胜,翟庆国,等. 青藏高原羌塘高压变质带的特征及其构造意义[J]. *地质通报*,2008,27(1):27-35.
- LI Cai, DONG Yong-sheng, ZHAI Qing-guo, et al. High-pressure Metamorphic Belt in Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, and Its Tectonic Significance[J]. *Geological Bulletin of China*,2008,27(1):27-35.
- [12] 李 才. 龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. *长春地质学院学报*,1987,17(2):155-166.
- LI Cai. The Longmucuo-Shuanghu-Lancangjiang Plate Suture and the North Boundary of Distribution of Gondwana Facies Permo-Carboniferous System in Northern Xizang, China [J]. *Journal of Changchun College of Geology*,1987,17(2):155-166.
- [13] LIANG X, WANG G H, YANG B, et al. Stepwise Exhumation of the Triassic Lanling High-pressure Metamorphic Belt in Central Qiangtang, Tibet: Insights from a Coupled Study of Metamorphism, Deformation, and Geochronology[J]. *Tectonics*,2017,36(4):652-670.
- [14] 吴彦旺,李 才,徐梦婧,等. 藏北羌塘中部果干加年山石炭纪蛇绿岩地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质通报*,2014,33(11):1682-1689.
- WU Yan-wang, LI Cai, XU Meng-jing, et al. Geochemical Characteristics and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of Guoganjianian Carboniferous Ophiolite in Central Qiangtang, the Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*,2014,33(11):1682-1689.
- [15] HENNIG A. Zur Petrographie Und Geologie Von Südwest Tibet[Z].
- [16] 胡 克,李 才,程立人,等. 西藏羌塘中部冈玛错—双湖蓝片岩带及其构造意义[J]. *长春地质学院学报*,1995,25(3):268-274.
- HU Ke, LI Cai, CHENG Li-ren, et al. Gangmacuo-Shuanghu Blueschist Belt in Central Qiangtang Area of Tibet and Its Geological Significance[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*,1995,25(3):268-274.
- [17] 李 才,程立人,胡 克,等. 西藏龙木错—双湖古特提斯缝合带研究[M]. 北京:地质出版社,1995.
- LI Cai, CHENG Li-ren, HU Ke, et al. The Study on the Tethys Suture Zone of Longmu Co-Shuanghu in Tibet[M]. Beijing:Geological Publishing House,1995.
- [18] 鲍佩声,肖序常,王 军,等. 西藏中北部双湖地区蓝片岩带及其构造涵义[J]. *地质学报*,1999,73(4):302-314.
- BAO Pei-sheng, XIAO Xu-chang, WANG Jun, et al. The Blueschist Belt in the Shuanghu Region, Central-northern Tibet and Its Tectonic Implications[J]. *Acta Geologica Sinica*,1999,73(4):302-314.
- [19] KAPP P, YIN A, MANNING C E, et al. Blueschist-bearing Metamorphic Core Complexes in the Qiangtang Block Reveal Deep Crustal Structure of Northern Tibet[J]. *Geology*,2000,28(1):19-22.
- [20] KAPP P, YIN A, MANNING C E, et al. Tectonic Evolution of the Early Mesozoic Blueschist-bearing Qiangtang Metamorphic Belt, Central Tibet[J]. *Tectonics*,2003,22(4):11-17.
- [21] ZHANG K J, ZHANG Y X, LI B, et al. The Blueschist-bearing Qiangtang Metamorphic Belt (Northern Tibet, China) as an In-situ Suture Zone: Evidence from Geochemical Comparison with the Jinsa Suture[J]. *Geology*,2006,34(6):493-496.
- [22] 李 才,翟刚毅,王立全,等. 认识青藏高原的重要窗口:羌塘地区近年来研究进展评述(代序)[J]. *地质通报*,2009,28(9):1169-1177.
- LI Cai, ZHAI Gang-yi, WANG Li-quan, et al. An Important Window for Understanding the Qinghai-Tibet Plateau: A Review on Research Progress in Recent Years of Qiangtang Area, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*,2009,28(9):1169-1177.
- [23] ZHAI Q G, JAHN B M, ZHANG R Y, et al. Triassic Subduction of the Paleo-Tethys in Northern Tibet, China: Evidence from the Geochemical and Isotopic Characteristics of Eclogites and Blueschists of the Qiangtang Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*,2011,42(6):1356-1370.
- [24] ZHAI Q G, ZHANG R Y, JAHN B M, et al. Triassic Eclogites from Central Qiangtang, Northern Tibet, China: Petrology, Geochronology and Metamorphic *P-T* Path[J]. *Lithos*,2011,125(1/2):173-189.
- [25] ZHANG K J, CAI J X, ZHANG Y X, et al. Eclogites from Central Qiangtang, Northern Tibet (China) and Tectonic Implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,2006,245(3/4):722-729.
- [26] 翟庆国,李 才,黄小鹏. 西藏羌塘中部古特提斯洋残片:来自果干加年山变质基性岩地球化学证据[J]. *中国科学: D 辑,地球科学*,2007,37(7):866-872.
- ZHAI Qing-guo, LI Cai, HUANG Xiao-peng. The Fragment of Paleo-Tethys Ophiolite from Central Qiang-

- tang, Tibet: Geochemical Evidence of Metabasites in Guogangjiaianian[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2007, 37(7): 866-872.
- [27] 张修政, 董永胜, 李 才, 等. 从洋壳俯冲到陆壳俯冲和碰撞: 来自羌塘中西部地区榴辉岩和蓝片岩地球化学的证据[J]. 岩石学报, 2014, 30(10): 2821-2834.
- ZHANG Xiu-zheng, DONG Yong-sheng, LI Cai, et al. A Record of Complex Histories from Oceanic Lithosphere Subduction to Continental Subduction and Collision: Constraints on Geochemistry of Eclogite and Blueschist in Central Qiangtang, Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(10): 2821-2834.
- [28] 张修政. 羌塘地区早古生代构造演化新认识[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- ZHANG Xiu-zheng. Constraints on a New Tectonic Model for the Early Paleozoic Evolution of Qiangtang [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [29] TANG X C, ZHANG K J. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology and Tectonic Implication of the Blueschist from Northwestern Qiangtang, Northern Tibet, Western China [J]. Acta Geological Sinica: English Edition, 2012, 86(6): 1471-1478.
- [30] TANG X C, ZHANG K J. Lawsonite and Glaucofan-bearing Blueschists from NW Qiangtang, Northern Tibet, China: Mineralogy, Geochemistry, Geochronology, and Tectonic Implications[J]. International Geology Review, 2014, 56(2): 150-166.
- [31] 张修政, 董永胜, 施建荣, 等. 羌塘中部龙木错—双湖缝合带中硬玉石榴石二云母片岩的成因及意义[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 93-103.
- ZHANG Xiu-zheng, DONG Yong-sheng, SHI Jian-rong, et al. Formation and Significance of Jadeite-garnet-mica Schist Newly Discovered in Longmu Co-Shuanghu Suture Zone, Central Qiangtang[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 93-103.
- [32] PULLEN A, KAPP P, GEHRELS G E, et al. Triassic Continental Subduction in Central Tibet and Mediterranean-style Closure of the Paleo-Tethys Ocean[J]. Geology, 2008, 36(5): 351.
- [33] 李 才. 西藏羌塘中部蓝片岩青铝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 1997, 42(4): 448.
- LI Cai. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age and Its Significance of the Crossite from the Blueschists in the Mid-Qiangtang Area, Tibet [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(4): 448.
- [34] 翟庆国, 李 才, 王 军, 等. 藏北羌塘中部绒玛地区蓝片岩岩石学、矿物学和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学[J]. 岩石学报, 2009, 25(9): 2281-2288.
- ZHAI Qing-guo, LI Cai, WANG Jun, et al. Petrology, Mineralogy and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Chronology for Rongma Blueschist from Central Qiangtang, Northern Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(9): 2281-2288.
- [35] 李 才, 翟庆国, 陈 文, 等. 青藏高原羌塘中部榴辉岩 Ar-Ar 定年[J]. 岩石学报, 2006, 22(12): 2843-2849.
- LI Cai, ZHAI Qing-guo, CHEN Wen, et al. Ar-Ar Chronometry of the Eclogite from Central Qiangtang Area, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(12): 2843-2849.
- [36] 张修政, 董永胜, 李 才, 等. 青藏高原羌塘中部不同时代榴辉岩的识别及其意义: 来自榴辉岩及其围岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学的证据[J]. 地质通报, 2010, 29(12): 1815-1824.
- ZHANG Xiu-zheng, DONG Yong-sheng, LI Cai, et al. Identification of the Eclogites with Different Ages and Their Tectonic Significance in Central Qiangtang, Tibetan Plateau: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(12): 1815-1824.
- [37] 施建荣. 藏北羌塘中部戈木日地区变质岩及变质作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- SHI Jian-rong. Research of Metamorphic Rocks and Metamorphism in the Gemuri Area, from Central Qiangtang, Northern Tibet, China[D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [38] 董永胜, 李 才. 藏北羌塘中部果干加年山地区发现榴辉岩[J]. 地质通报, 2009, 28(9): 1197-1200.
- DONG Yong-sheng, LI Cai. Discovery of Eclogite in the Guogangjiaianian Mountain, Central Qiangtang Area, Northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(9): 1197-1200.
- [39] 翟庆国, 王 军, 王 永. 西藏改则县冈玛错地区发现榴辉岩[J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1720-1724.
- ZHAI Qing-guo, WANG Jun, WANG Yong. Discovery of Eclogite at Gangmacuo Area from Gerze County, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(12): 1720-1724.
- [40] 武 海, 董亚林, 许瑞梅, 等. 羌塘地区榴辉岩中矿物出溶体及其成因机制探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(5): 975-985.
- WU Hai, DONG Ya-lin, XU Rui-mei, et al. Mineral Exsolution and Its Genetic Significance of the Songduo-Qiangtang Eclogite in Qinghai-Tibet[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(5): 975-985.
- [41] TANG X C, ZHANG Y X. Eclogitic Metasediments from Central Qiangtang, Northern Tibet: Evidence for

- Continental Subduction During the Eastern and Western Qiangtang Collision[J]. *Journal of Geological Society of India*, 2012, 80(6): 836-844.
- [42] 翟庆国. 藏北羌塘中部榴辉岩岩石学、地球化学特征及构造演化过程[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
- ZHAI Qing-guo. Petrology, Geochemistry and Tectonic Evolution of the Eclogite from Central Qiangtang Area, Northern Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008.
- [43] 翟庆国, 李才, 王军. 藏北羌塘中部戈木日榴辉岩的岩石学、矿物学及变质作用 P - T - t 轨迹[J]. *地质通报*, 2009, 28(9): 1207-1220.
- ZHAI Qing-guo, LI Cai, WANG Jun. Petrology, Mineralogy and P - T - t Path for the Eclogite from Central Qiangtang, Northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(9): 1207-1220.
- [44] 董永胜, 李才, 施建荣, 等. 羌塘中部高压变质带的退变质作用及其构造侵位[J]. *岩石学报*, 2009, 25(9): 2303-2309.
- DONG Yong-sheng, LI Cai, SHI Jian-rong, et al. Retrograde Metamorphism and Tectonic Emplacement of High Pressure Metamorphic Belt in Central Qiangtang Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(9): 2303-2309.
- [45] 张修政, 董永胜, 李才, 等. 青藏高原羌塘中部榴辉岩地球化学特征及其大地构造意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(12): 1804-1814.
- ZHANG Xiu-zheng, DONG Yong-sheng, LI Cai, et al. Geochemistry and Tectonic Significance of Eclogites in Central Qiangtang, Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(12): 1804-1814.
- [46] 苑婷媛, 赵中宝, 曾庆高, 等. 藏西北戈木日榴辉岩岩石学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2016, 32(12): 3729-3742.
- YUAN Ting-yuan, ZHAO Zhong-bao, ZENG Qing-gao, et al. Petrological Characteristics of the Eclogite from Gemuri Area, Northwestern Tibet, and Tectonic Implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(12): 3729-3742.
- [47] COLEMAN R G, LEE D E, BEATTY L B, et al. Eclogites and Eclogites: Their Differences and Similarities[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76(5): 483-508.
- [48] MORIMOTO N. Nomenclature of Pyroxenes[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1988, 39(1): 55-76.
- [49] KATAYAMA I, PARKINSON C D, O'KAMOTO K, et al. Supersilicic Clinopyroxene and Silica Exsolution in UHPM Eclogite and Pelitic Gneiss from the Kokchetav Massif, Kazakhstan[J]. *American Mineralogist*, 2000, 85(10): 1368-1374.
- [50] GAYK T, KLEINSCHRODT R, LANGOSCH A, et al. Quartz Exsolution in Clinopyroxene of High-pressure Granulite from the Munchberg Massif[J]. *European Journal of Mineralogy*, 1995, 7(5): 1217-1220.
- [51] PAGE F Z, ESSENE E J, MUKASA S B. Quartz Exsolution in Clinopyroxene Is Not Proof of Ultrahigh Pressures: Evidence from Eclogites from the Eastern Blue Ridge, Southern Appalachians, U. S. A. [J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(7): 1092-1099.
- [52] RAVNA E J K, TERRY M P. Geothermobarometry of UHP and HP Eclogites and Schists: An Evaluation of Equilibria Among Garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2004, 22(6): 579-592.
- [53] HWANG S L, YUI T F, CHU H T, et al. On the Origin of Oriented Rutile Needles in Garnet from UHP Eclogites[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25(3): 349-362.
- [54] AGUE J J, ECKERT J O. Precipitation of Rutile and Ilmenite Needles in Garnet: Implications for Extreme Metamorphic Conditions in the Acadian Orogen, U. S. A. [J]. *American Mineralogist*, 2012, 97(5/6): 840-855.
- [55] PROYER A, HABLER G, ABART R, et al. TiO_2 Exsolution from Garnet by Open-system Precipitation: Evidence from Crystallographic and Shape Preferred Orientation of Rutile Inclusions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, 166(1): 211-234.
- [56] AXLER J A, AGUE J J. Exsolution of Rutile or Apatite Precipitates Surrounding Ruptured Inclusions in Garnet from UHT and UHP Rocks[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2015, 33(8): 829-848.
- [57] DU J X, ZHANG L F, THOMAS B, et al. 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*, 2014, 91(3): 69-88.
- [58] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [59] LU Z, ZHANG L F, DU J, et al. Petrology of Coesite-bearing Eclogite from Habutengsu Valley, Western Tianshan, NW China and Its Tectonometamorphic Implication[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2009, 27

- (9):773-787.
- [60] WEI C J, CLARKE G L. Calculated Phase Equilibria for MORB Compositions: A Reappraisal of the Metamorphic Evolution of Lawsonite Eclogite[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29(9):939-952.
- [61] OKAMOTO K, MARUYAMA S. The High-pressure Synthesis of Lawsonite in the MORB+H₂O System[J]. *American Mineralogist*, 1999, 84(3):362-373.
- [62] ELLIS D J, GREEN D H. An Experimental Study of the Effect of Ca upon Garnet-clinopyroxene Fe-Mg Exchange Equilibria[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 71(1):13-22.
- [63] 陆济璞, 张能, 黄位鸿, 等. 藏北羌塘中北部红脊山地区蓝闪石+硬柱石变质矿物组合的特征及其意义[J]. *地质通报*, 2006, 25(1/2):70-75.
LU Ji-pu, ZHANG Neng, HUANG Wei-hong, et al. Characteristics and Significance of the Metamorphic Minerals Glaucophane-lawsonite Assemblage in the Hongjishan Area, North-central Qiangtang, Northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1/2):70-75.
- [64] WEI C J, QIAN J H, TIAN Z L. 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*, 2013, 31(7):755-774.
- [65] ZACK T, MORAES R, KRONZ A. Temperature Dependence of Zr in Rutile: Empirical Calibration of a Rutile Thermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 148(4):471-488.
- [66] WATSON E B, WARK D A, THOMAS J B. Crystalization Thermometers for Zircon and Rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151(4):413-433.
- [67] TOMKINS H S, POWELL R, ELLIS D J. The Pressure Dependence of the Zirconium-in-rutile Thermometer[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25(6):703-713.
- [68] 杜瑾雪, 张立飞. 硬柱石榴辉岩岩石学研究进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(1):174-184.
DU Jin-xue, ZHANG Li-fei. Progress in Petrologic Study of Lawsonite-bearing Eclogites[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2014, 33(1):174-184.
- [69] MATSUMOTO M, WALLIS S, AOYA M, et al. Petrological Constraints on the Formation Conditions and Retrograde *P-T* Path of the Kotsu Eclogite Unit, Central Shikoku[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21(4):363-376.
- [70] POWELL R, HOLLAND T J B. On Thermobarometry[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2008, 26(2):155-179.
- [71] WEI C J, YANG Y, SU X L, et al. Metamorphic Evolution of Low-*T* Eclogite from the North Qilian Orogen, NW China: Evidence from Petrology and Calculated Phase Equilibria in the System NCKFMASHO[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2009, 27(1):55-70.
- [72] 魏春景, 苏香丽, 姜玉行, 等. 榴辉岩中传统地质温压计新解: 来自 *P-T* 视剖面图的证据[J]. *岩石学报*, 2009, 25(9):2078-2088.
WEI Chun-jing, SU Xiang-li, LOU Yu-xing, et al. A New Interpretation of the Conventional Thermobarometry in Eclogite: Evidence from the Calculated *P-T* Pseudosections[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(9):2078-2088.
- [73] 吴佳林, 翟明国, 张红, 等. 视剖面图温压计研究进展评述[J]. *岩石学报*, 2015, 31(6):1711-1721.
WU Jia-lin, ZHAI Ming-guo, ZHANG Hong, et al. A Brief Review of the Advance of Pseudosection Thermobarometry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(6):1711-1721.
- [74] WEI C J, TIAN Z L. Modelling of the Phase Relations in High-pressure and Ultrahigh-pressure Eclogites[J]. *Island Arc*, 2014, 23:254-262.
- [75] 田作林, 魏春景, 张泽明. 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[J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(2):265-275.
TIAN Zuo-lin, WEI Chun-jing, ZHANG Ze-ming. Petrology and Metamorphic *P-T* Path of Coesite-bearing Pelitic Schist from Southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35(2):265-275.
- [76] LIU F L, ZHANG L F, LI X L, et al. The Metamorphic Evolution of Paleoproterozoic Eclogites in Kuruvaara, Northern Belomorian Province, Russia: Constraints from *P-T* Pseudosections and Zircon Dating[J]. *Precambrian Research*, 2017, 31(17):289.
- [77] WANG Y H, ZHANG L F, ZHANG J J, et al. The Youngest Eclogite in Central Himalaya: *P-T* Path, U-Pb Zircon Age and Its Tectonic Implication[J]. *Gondwana Research*, 2015, 41:188-206.