

# 大陆碰撞造山带的两类橄榄岩——以柴北缘超高压变质带为例

宋述光<sup>1</sup>, 张立飞<sup>1</sup>, 牛耀龄<sup>2</sup>, 张贵宾<sup>1</sup>

1. 北京大学 造山带和地壳演化教育部重点实验室, 地球与空间科学学院, 北京 100871

2. Department of Earth Science, Durham University, Durham, DH1 3LE, UK

Song Shuguang<sup>1</sup>, Zhang Lifei<sup>1</sup>, Niu Yaoling<sup>2</sup>, Zhang Guibin<sup>1</sup>

1. MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. Department of Earth Science, Durham University, Durham, DH1 3LE, UK

**Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, et al. Two types of peridotite in continental orogenic belts—a case study from the North Qaidam UHP metamorphic belt. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(2): 129-138**

**Abstract:** This paper gives a brief review of the characteristics and petrogenesis of mantle peridotite in continental subduction and collision belts, and then discusses in more detail the petrogenesis of peridotites in the North Qaidam ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt. There are two types of peridotites within this UHP belt. (1) Garnet peridotite consists of garnet lherzolite, garnet-bearing dunite, garnet-free dunite and garnet pyroxenite, which could be considered as one of the critical rock types in a continental-type subduction zone. Observations such as diamond inclusion in a zircon crystal and decompression exsolutions in garnet and olivine, together with geothermobarometric calculations, argue persuasively that this garnet peridotite must have derived from mantle depths greater than 200 km. Geochemical data reveal that the protolith of the garnet peridotite was of cumulate origin from high-Mg melts in a sub-arc mantle wedge environment. (2) Oceanic lithospheric mantle harzburgite occurs together with meta-cumulate complex (including garnet pyroxenite and kyanite-eclogite) and MORB-related eclogite; these represent blocks of oceanic lithosphere. The determination of these two types of peridotites allows us to better understand the nature and tectonic processes of the North Qaidam UHP belt.

**Key words:** peridotite; continental subduction and collision belt; ultrahigh-pressure metamorphism; North Qaidam

**摘要:** 论述了大陆俯冲碰撞带中地幔橄榄岩的基本特征和成岩类型, 并重点讨论柴北缘超高压变质带中不同性质的橄榄岩及其成因。根据岩石学特征, 我们确定柴北缘超高压带中发育有两种类型的橄榄岩: (1)石榴橄榄岩, 岩石类型包括石榴二辉橄榄岩、石榴方辉橄榄岩、纯橄榄岩和石榴辉石岩, 是大陆型俯冲带的标志性岩石。金刚石包裹体、石榴石和橄榄石的出溶结构、温压计算等均反映其来源深度大于 200 km。地球化学特征表明该橄榄岩的原岩是岛弧环境下高镁岩浆在地幔环境下堆晶的产物。(2)大洋蛇绿岩型地幔橄榄岩, 与变质的堆晶杂岩(包括石榴辉石岩、蓝晶石榴辉岩)和具有大洋玄武岩特征的榴辉岩构成典型的蛇绿岩剖面, 代表大洋岩石圈残片。这两类橄榄岩的确定对了解柴北缘超高压变质带的性质和构造演化过程有重要意义。

关键词:橄榄岩;大陆俯冲碰撞带;超高压变质;柴北缘

中图分类号:P588.12;P542.5 文献标识码:A 文章编号:1005-2321(2007)02-0129-10

大陆碰撞造山带是古板块运动和大陆拼合的产物。根据岩石组合、高压超高压变质特征,地球上发育的俯冲碰撞带可以划分为环太平洋型(或B型)和阿尔卑斯型(或A型)<sup>[1-2]</sup>。Song等(2006)<sup>[3]</sup>将俯冲碰撞带划分为大洋型(oceanic-type)和大陆型(continental-type)。人们所普遍接受的事实是,在大洋岩石圈俯冲消亡之后,大陆岩石圈在俯冲的大洋岩石圈拖曳力的作用下俯冲到另一大陆岩石圈之下,当大洋岩石圈与大陆岩石圈断离后,大陆地壳物质由于浮力而折返。新生代以来的喜马拉雅和阿尔卑斯造山带给我们展示了很好的例证。

高压超高压变质带是古板块汇聚边界及大陆碰撞造山的重要标志,它记录了地壳物质从俯冲到构造折返的一个完整的动力学过程<sup>[3-8]</sup>。大洋型俯冲带的岩石组合代表了大洋岩石圈俯冲过程中的产物,其岩石类型主要包括:大洋岩石圈残片构成的蛇绿混杂岩、低温高压变质形成的蓝片岩和榴辉岩(尤其是以含硬柱石的榴辉岩为特征——反映大洋冷俯冲过程)、岛弧岩浆杂岩以及相应的复理石和磨拉石建造,其中代表性的例子有环太平洋俯冲带、我国的北祁连山和西天山等古板块缝合带。大陆型俯冲碰撞带的岩石组合与大洋型明显不同,主要包括:具有大陆地壳成分的长英质片麻岩及其内部呈透镜体或构造块体产出的榴辉岩、大理岩、石榴辉石岩和石榴橄榄岩等,典型的地区包括我国的大别-苏鲁超高压变质带,挪威的Western Gneiss Region,哈萨克斯坦的Kokchetav超高压地体等。

橄榄岩在大陆型超高压变质带中所占比例很小,但它是大陆俯冲带中具有重要构造意义的组成部分。作为大陆型俯冲碰撞带标志的石榴橄榄岩在世界各典型的超高压变质地体中都有出露,如我国东部的大别-苏鲁<sup>[9-13]</sup>、西部的阿尔金榴辉岩地体<sup>[14-15]</sup>、欧洲的加里东带(挪威的WGR地体<sup>[16-18]</sup>)、华力西和阿尔卑斯造山带<sup>[19-20]</sup>、哈萨克斯坦的Kokchetav地体<sup>[21]</sup>、印度尼西亚的Sulawesi地体<sup>[22]</sup>以及我国西部柴北缘超高压变质带<sup>[23-27]</sup>。该类岩石记录了大陆俯冲、折返以及俯冲的大洋及后来的大陆板片与俯冲带之上地幔楔相互作用等方面的关键信息。因此,有关超高压带中石榴橄榄岩的研究,对于深入了解和探讨大陆俯冲的深度、俯冲和折返的

动力学机制,以及俯冲带与地幔楔的相互作用等方面都具有重要意义。随着对大陆俯冲带研究的深入,自20世纪90年代以来与大陆造山带有关的石榴橄榄岩成为地质科学的研究的前沿和热点。

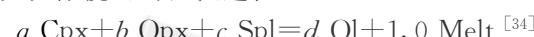
## 1 大陆造山带中橄榄岩的类型、成因和形成深度

### 1.1 大洋型俯冲带的地幔橄榄岩

大洋型俯冲带中橄榄岩的类型比较简单,主要是代表大洋或弧后扩张形成的岩石圈地幔橄榄岩,并常常与上覆的堆晶杂岩和枕状玄武岩以及远洋沉积物等紧密共生而构成蛇绿岩。部分呈独立的构造岩块分布于高压变质带中。由于洋中脊和俯冲带的蚀变,绝大部分橄榄岩已被强烈地蛇纹石化,只有少量个体较大的岩块保留有新鲜的橄榄岩,如雅鲁藏布缝合带中的部分橄榄岩体<sup>[28-29]</sup>、西昆仑的库地橄榄岩体<sup>[30]</sup>、阿尔卑斯的Lanzo岩体<sup>[31]</sup>和北祁连山的玉石沟橄榄岩体<sup>[32-33]</sup>。

不同时代缝合带地幔橄榄岩体在岩性上基本一致,主要为方辉橄榄岩(harzburgite)、少量二辉橄榄岩(lherzolite),它们是扩张脊(大洋或弧后盆地)之下软流圈物质部分熔融形成洋壳之后的残渣(residue),单斜辉石含量的变化反映地幔源区部分熔融的程度<sup>[34]</sup>。值得注意的是,纯橄岩并不是地幔岩部分熔融之后的残渣,因为在洋中脊的温度条件下软流圈物质要达到40%以上的熔融是不可能的。在蛇绿岩剖面中纯橄岩具有两种产出状态。

(1)呈脉体或异离体分布于方辉橄榄岩中,它们是作为岩浆萃取的通道,是通过熔体与方辉橄榄岩之间发生反应而形成的<sup>[35]</sup>,并可以用下面的反应式来反映橄榄石的沉淀过程:



(2)纯橄岩可以作为洋中脊之下岩浆房堆晶的产物分布于堆晶杂岩的底部,在Oman蛇绿岩剖面辉长岩与地幔方辉橄榄岩间纯橄岩厚约1 km,这些纯橄岩与下部方辉橄榄岩相比Ni和Mg<sup>#</sup>有明显降低,岩石中常有Cpx、Opx的填隙晶分布,因而被解释为下部洋壳堆晶辉长岩单元底部的超镁铁堆晶岩。有的学者通过岩石和矿物地球化学研究<sup>[36-38]</sup>认

为,这些纯橄榄岩层是幔源熔体上升至 Moho 面发生侧向有效流动,与地幔岩相互作用而形成的。

因此纯橄榄岩不是地幔部分熔融之后的残渣,即纯橄榄岩不是真正意义上的地幔橄榄岩,而是熔体沉淀或熔体与方辉橄榄岩反应的产物。另外,“纯橄榄岩岩浆”的概念也是错误的,而且在自然中并不存在。

## 1.2 大陆型超高压变质带中的橄榄岩及其成因

广泛出露于大陆造山带中的橄榄岩体曾被称之为“山根带”橄榄岩 (orogenic root-zone peridotite)<sup>[39]</sup> 或“阿尔卑斯型” (Alpine-type) 橄榄岩<sup>[40]</sup>, 这些橄榄岩体大部分是形成压力较低的尖晶石橄榄岩及其退化和蚀变的蛇纹岩。但这些定义比较笼统, 涵盖了可能是大洋蛇绿岩中地幔橄榄岩以及大陆型俯冲碰撞带中橄榄岩的成分。因此, 我们要谨慎使用这些概念。

在超高压变质带中, 石榴橄榄岩在造山带的产出极少, 仅局限于榴辉岩和其他高级变质的地壳岩石组成的超高压变质地体之中, 其产状与榴辉岩类似, 呈大小不等的透镜状岩块分布于长英质片麻岩中。其主要岩石类型包括石榴二辉橄榄岩、石榴方辉橄榄岩、纯橄榄岩和石榴辉石岩。O'Hara 和 Mercy<sup>[41]</sup> 报道挪威加里东带 Western Gneiss Region (WGR) 地体的石榴橄榄岩, 引起人们的关注并进行了较深入的研究工作<sup>[16, 18, 42-43]</sup>。早期的研究者普遍认为产于地壳岩石中所有石榴橄榄岩都来源于上地幔, 但主要的争论集中在岩石的侵位机制和石榴石的稳定条件方面。O'Hara 等<sup>[44]</sup> 的实验证明, 在正常地壳厚度的压力条件下, 石榴石在橄榄岩中是不稳定的矿物相, 因此, 石榴橄榄岩形成深度应该在地幔环境。根据岩石的成分, 有人将石榴橄榄岩划分为 Mg-Cr 型和 Fe-Ti 型两大类, 并提出两种与大陆板块碰撞有成因联系的假说来解释这些出现于地壳岩石系列中的石榴橄榄岩<sup>[17, 45]</sup>: (1) 直接来自于上地幔并构造侵位于加厚的大陆地壳之中; (2) 先期侵位于大陆地壳的尖晶石相橄榄岩或者蛇纹岩经递进的高压变质作用改造而成。根据近几年的研究, 对于 Fe-Ti 系列石榴橄榄岩成因的观点比较一致, 由于该类型石榴橄榄岩与石榴辉石岩和榴辉岩等构成较为完整的岩浆序列, 因此一般认为它们是先期侵入到大陆地壳中的堆晶杂岩后来经超高压变质的产物, 如大别山的碧溪岭<sup>[12]</sup>。目前比较公认的石榴橄榄岩形成的构造背景有三类<sup>[19-20]</sup>: (1) 来源于俯冲大洋岩石圈或大陆岩石圈地幔以及软流圈上涌, 如

欧洲华力西造山带 Bohemian 地体 (亏损的大洋地幔<sup>[46]</sup>)、挪威加里东带 West Gneiss Region (WGR) 地体 (古老的大陆地幔<sup>[46-47]</sup>); (2) 在俯冲过程中捕获俯冲之上地幔楔, 该类型石榴橄榄岩分布于上述各超高压地体中<sup>[13, 20, 48]</sup>; (3) 大陆地壳中基性超基性侵入体在俯冲过程中超高压变质的产物, 其中包括 Mg-Cr 系列橄榄岩 (如苏鲁的芝麻坊<sup>[11]</sup>) 和 Fe-Ti 系列基性层状杂岩体 (如大别山碧溪岭<sup>[12]</sup>)。

## 1.3 大陆型超高压变质带中石榴橄榄岩的形成深度

石榴橄榄岩的形成深度一直是研究者讨论的焦点问题之一。实验证明, 橄榄岩由尖晶石相转变为石榴石相的深度为 60~70 km。通过实验所获得的热力学数据, 针对石榴橄榄岩出现了一些可以用来计算岩石形成深度的矿物平衡温压计, 其中公认为最可靠的是 Brey 和 Kohler (1990)<sup>[49]</sup> 的石榴石与斜方辉石之间 Al 分配压力计以及 O'Neill 和 Wood (1979)<sup>[50]</sup> 的石榴石-橄榄石 Fe-Mg 交换温度计。利用这些温压计, Yang 等 (1993)<sup>[10]</sup> 对大别-苏鲁超高压变质带中石榴橄榄岩进行了详细计算, 认为苏鲁石榴橄榄岩的形成压力为 6 GPa (深度相当于 180 km), 该深度远远超过石墨-金刚石转变线 ( $t=1\,000^{\circ}\text{C}$  时,  $p=\sim 4.5 \text{ GPa}$ )。该计算结果引起了人们的广泛关注。Brenker 和 Brey<sup>[51]</sup> 也计算获得瑞士 Alpe Arami 石榴橄榄岩形成的最小深度为 160 km。

在超高压矿物学方面, 摩洛哥 Beni Bousera 和西班牙 Ronda 石榴橄榄岩中石墨八面体 (金刚石假象)<sup>[52-53]</sup>、挪威 WGR 地体石榴辉石岩的微粒金刚石<sup>[54]</sup> 以及柴北缘石榴橄榄岩锆石中金刚石包体<sup>[25]</sup> 说明它们的最小形成深度为 150 km。Dobrzhinetskaya 等<sup>[55]</sup> 通过橄榄石中高含量的  $\text{FeTiO}_3$  棒状出溶体认为产于瑞士阿尔卑斯 Alpe Arami 地区的部分石榴橄榄岩来自于  $\geq 300 \text{ km}$  深的地幔或者甚至  $410\sim 670 \text{ km}$  的地幔过渡带<sup>[56]</sup>, 此观点引起了对于石榴橄榄岩形成深度的激烈争论, 同时也对大陆俯冲现今的构造模式以及俯冲折返机制等提出了挑战。有些学者对上述岩石的形成深度提出质疑<sup>[57-59]</sup>, 但单斜辉石中高压型 C2/c 斜顽辉石 (在  $1\,000^{\circ}\text{C}$  时稳定的最小压力为  $7\sim 8 \text{ GPa}$ ) 出溶片晶<sup>[60]</sup> 以及橄榄石  $\text{TiO}_2$  含量与压力之间相互关系的高温高压实验<sup>[61]</sup>, 进一步证明了该岩体的来源深度至少  $250\sim 300 \text{ km}$ 。另一种对温度不敏感的超深标

志矿物为超硅石榴石 (super-silicic 或 majoritic garnet), 该矿物只稳定于压力  $> 5$  GPa 的环境<sup>[62-63]</sup>, 并在低压条件下 Si<sup>VI</sup> 不稳定而发生辉石出溶, 这种出溶结构分别在挪威 WGR<sup>[64-65]</sup>、阿尔金石榴橄榄岩<sup>[66]</sup>和片麻岩<sup>[14]</sup>、柴北缘的石榴橄榄岩<sup>[24]</sup>、苏鲁石榴橄榄岩和石榴辉石岩<sup>[67-68]</sup>和榴辉岩<sup>[69]</sup>以及希腊 Rhodope 片麻岩 (石榴石中石英出溶片晶<sup>[70]</sup>) 中都有报道, 证明这些地区的大陆俯冲深度大于 200 km, 甚至到 300 km<sup>[71]</sup>。

## 2 柴北缘超高压变质带的地质背景

柴北缘超高压变质带是 20 世纪 90 年代以来确立的一条含榴辉岩和石榴橄榄岩的大陆深俯冲带, 并引起世人的广泛关注。该超高压变质带自东向西断续出露有都兰榴辉岩地体、锡铁山榴辉岩地体、绿梁山石榴橄榄岩地体和鱼卡(大柴旦)榴辉岩地体, 延伸约 400 km, 向西与南阿尔金榴辉岩地体构成了中国西部早古生代大陆碰撞带<sup>[72-74]</sup>。带内岩石类型包括花岗质片麻岩和泥质片麻岩夹大小不等的榴辉岩岩块、含石榴石和不含石榴石的橄榄岩岩块。副片麻岩锆石中柯石英包裹体<sup>[75-77]</sup>、榴辉岩中柯石英假象<sup>[77]</sup>、石榴橄榄岩锆石中金刚石包裹体<sup>[25]</sup>及石榴石中出溶片晶<sup>[24,26]</sup>, 岩石组合和变质作用证明柴北缘是一典型的、由大陆岩石圈深俯冲形成的“大陆型”超高压变质带<sup>[3]</sup>。

## 3 柴北缘超高压变质带中蛇绿岩型橄榄岩

宋述光(2001)<sup>①</sup>证明柴北缘都兰超高压地体的榴辉岩具有 N-MORB 和 E-MORB 的地球化学特征, 而柴北缘其他地体榴辉岩的原岩也证明具有 N-MORB, E-MORB 或洋岛玄武岩 (OIB) 的特征<sup>[3,78-80]</sup>。Song 等(2003)<sup>[78]</sup>在进一步研究都兰北带榴辉岩注意到, 剖面中存在透镜状不含石榴石的蛇纹岩化橄榄岩岩块与石榴辉石岩和榴辉岩, 通过岩石学和地球化学研究初步认为它们分别来自于古大洋蛇绿岩套下部地幔橄榄岩、中部堆晶杂岩和上部玄武岩。

通过对都兰超高压变质地体东侧沙柳河剖面进行的详细岩石学解剖, 我们进一步发现了最典型的大洋蛇绿岩型地幔橄榄岩——蛇纹石化方辉橄榄

岩<sup>[81]</sup>。沙柳河剖面的北侧主要由条带状蓝晶石榴辉岩和蛇纹石化方辉橄榄岩组成, 条带状蓝晶石榴辉岩的岩石学和地球化学特征显示其原岩具有明显的堆晶辉长岩的特征。方辉橄榄岩的原始矿物组合为橄榄石+斜方辉石+铬铁矿。

在该蛇纹石化方辉橄榄岩中, 我们识别出两个世代的橄榄石, 第一世代橄榄石 (Ol<sup>1</sup>) 残晶发育扭折带, 其 Fo 值为 88~91, 化学成分与现代大洋地幔橄榄岩的橄榄石一致; 第二世代橄榄石 (Ol<sup>2</sup>) Fo 值高达 94~97, 其内部含有细小的流体包裹体, 是第一世代橄榄石蛇纹石化后再次变质的产物, 应该与榴辉岩超高压变质一致。斜方辉石残晶被滑石皇冠状体包围, 其矿物成分具有高 Al ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  的质量分数达 2.7%~4.4%) 特征, 与大洋地幔橄榄岩中斜方辉石的成分一致, 反映其形成压力远远低于柴北缘和苏鲁超高压石榴橄榄岩的形成压力。而斜方辉石中密集出现的单斜辉石出溶片晶反映其原始成分具有高的 CaO 含量, 反映其形成的温度  $t > 1100$  °C。温压条件的估算反映该橄榄岩体属于典型的尖晶石相方辉橄榄岩。其围岩是由堆晶辉长岩变质的条带状蓝晶石榴辉岩, 两者构成了大洋蛇绿岩套的下部层位, 并且与区内具有 N-MORB 和 OIB 性质的榴辉岩共生。

## 4 柴北缘超高压变质带的石榴橄榄岩——大陆深俯冲的证据

石榴橄榄岩是“大陆型”超高压变质带典型标志, 在柴北缘主要分布于青海省大柴旦镇以北的绿梁山一带, 以构造岩块产于花岗质片麻岩中。石榴二辉橄榄岩在岩体中占 70%~80% (体积分数), 与纯橄岩互层, 石榴辉石岩呈脉状产出。该石榴橄榄岩是大陆俯冲带超高压变质岩石的重要组成部分。

### 4.1 石榴橄榄岩形成深度 $> 200$ km 的证据

#### 4.1.1 石榴石中“辉石十金红石”出溶片晶

Song 等(2004)<sup>[24]</sup>首次报道了在柴北缘石榴二辉橄榄岩的石榴石和橄榄石中发现的大量出溶片晶。其中, 石榴石的出溶片晶包括高密度的金红石、斜方辉石、单斜辉石。金红石出溶片晶呈针状, 长度可达 500  $\mu\text{m}$ 。背散射图像显示石榴石中金红

<sup>①</sup> 宋述光. 柴北缘都兰超高压变质地体的岩石学、变质过程及构造意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2001: 96.

石出溶量局部可达 1.0% (体积分数)。

辉石出溶片晶与金红石片晶紧密共生,其形态在纵切面为长条形,在横切面上大部分呈六边形。电子探针分析显示斜方辉石片晶与基质的成分相近,但单斜辉石片晶明显富 Na ( $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数 > 3.0%)。背散射图像显示辉石出溶片晶在石榴石中体积百分比可达 4.5%,说明石榴石的原始成分具有超硅的特征,这种超硅石榴石只可在超过 150 km 深度条件下稳定存在<sup>[62-63,82]</sup>。石榴石中辉石的出溶说明柴北缘超高压变质带石榴橄榄岩曾存在超硅石榴石,而超硅石榴石被认为是大陆岩石圈俯冲到大于 180~200 km 地幔深度的至关重要的证据<sup>[65,69]</sup>。在超高压变质条件( $p>5 \text{ GPa}$ )下,石榴石开始发生 Al 离子缺乏而使其偏离正常的石榴石化学成分配比,在这种情况下,溶解到石榴石中的辉石使过量的 Si 进入到八面体的位置上替代  $\text{Al}^{3+}$  (+  $\text{Cr}^{3+}$ )<sup>[83],即  $\text{Mg}$  (或  $\text{Ca}$ )<sup>VI</sup> +  $\text{Si}^{\text{VI}}$  →  $2\text{Al}^{\text{VI}}$  和  $\text{Na}^{\text{VIII}}$  +  $\text{Si}^{\text{VI}}$  →  $\text{Ca}^{\text{VIII}}$  +  $\text{Al}^{\text{VI}}$ ,从而形成超硅石榴石。根据超硅石榴石 Ti 和 Si 的含量估算石榴橄榄岩的形成压力应大于 7 GPa<sup>[24]</sup>。</sup>

#### 4.1.2 石榴石中“钠质闪石+金红石”出溶片晶

Song 等(2005)<sup>[26]</sup>在柴北缘石榴橄榄岩的石榴石中又发现大量钠质闪石的出溶片晶与金红石等共生或连生。石榴石中闪石和金红石出溶片晶都严格沿石榴石主晶的 {111} 方向定向分布。电子探针成分分析表明角闪石出溶片晶有富 Ca 和贫 Ca 两种,二者都具有富 Na ( $\text{Na}_2\text{O}$  的质量分数为 4.0%~7.2%) 的成分特征。通过高分辨率透射电镜对其结构进行的深入研究表明,出溶片晶的晶格与石榴石主晶呈明显的拓扑关系,证明是石榴石在降压过程中出溶的产物。石榴石中富钠角闪石出溶在世界上尚属首次发现,其重要科学意义主要有两个方面:(1)原始石榴石中含有大量的  $\text{OH}^-$ ,根据闪石的出溶量估算  $\text{OH}^-$  的含量可达  $1\,000 \times 10^{-6}$ ,对于揭示地幔楔物质的含水性以及俯冲带中  $\text{H}_2\text{O}$  的赋存状态具重要意义;(2)原始石榴石中含有高含量的 Na, Ti, 和 Si, 在超高压条件下,  $\text{Na} + \text{Ti} (\text{Si}) \rightarrow \text{Ca} + \text{Al}$ 。计算获得石榴石的  $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数可达 0.3%,其形成压力  $p \geq 7 \text{ GPa}$ ,形成深度大于 200 km。

#### 4.1.3 石榴石中“钛铁矿+Al-铬铁矿”出溶片晶

Song 等(2004)<sup>[24]</sup>报道了柴北缘石榴橄榄岩的橄榄石中发育密集的钛铁矿 ( $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{TiO}_3$ ) 棒状出溶体,这些出溶片晶长 20~100  $\mu\text{m}$ ,宽 0.3~1.5

$\mu\text{m}$ ,严格按照橄榄石主晶的 [010] 分布。背散射图像显示出溶片晶最高含量可达 ~1.18%,说明原始橄榄石的  $\text{TiO}_2$  质量分数可达 0.69%。一般来说,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  在橄榄石中是不相容元素,在低压下很难进入到橄榄石的晶格中。Dobrzhinetskaya 等(1999) 通过实验证明,当温压条件从 5 GPa、1 400 K 增加到 8~12 GPa、1 400~1 700 K 时,橄榄石中  $\text{TiO}_2$  的质量分数可以从 0.4% 增加到 > 1.0%。因此,橄榄石中  $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{TiO}_3$  含量说明柴北缘石榴橄榄岩形成深度 > 7 GPa。钛铁矿出溶片晶中高含量的  $\text{MgTiO}_3$  说明了钛铁矿中 Mg 替代 Fe,也可能是与超高压有关<sup>[85]</sup>。

另外,橄榄石含有最高达 0.6% (体积分数) 的 Al-铬铁矿,说明部分橄榄石富 Al 和 Cr,橄榄石中 4 组方向出溶的 Al-铬铁矿暗示其原始结构可能具有类似尖晶石的结构特征( $\beta$ -相橄榄石 wadsleyite-type),橄榄石 →  $\beta$ -橄榄石转变实验证明,在高压条件下,三价离子如 Cr 和 Al 可以通过  $2\text{Cr} (+ \text{Al})$  替代  $\text{Mg} + \text{Si}$  而进入到  $\beta$ -橄榄石结构中<sup>[85]</sup>。在一些金刚石的橄榄石包体也发现 Al-铬铁矿出溶,被认为是  $\beta$ -橄榄石向橄榄石转化的过程中形成的<sup>[86]</sup>。因此,石榴石和橄榄石的出溶特征说明柴北缘石榴橄榄岩的形成深度大于 7 GPa。

#### 4.1.4 锆石中金刚石包裹体

通过对柴北缘石榴橄榄岩锆石中包裹体的激光拉曼研究,我们首次发现石榴石共生的微粒金刚石和石墨包裹体<sup>[25]</sup>,从而进一步证明了石榴橄榄岩的形成深度大于 150 km。这是世界范围内所有超高压变质带中石榴橄榄岩体内发现的第二颗,也是在柴北缘超高压变质带发现的首粒金刚石包裹体。

### 4.2 石榴橄榄岩的年龄:柴北缘超高压变质时代的确定

柴北缘超高压变质带的超高压变质时代一直是人们所关注的问题,虽然已有很多榴辉岩和片麻岩锆石 SHRIMP、Sm-Nd 以及 Ar-Ar 年龄的报道<sup>[78,80,87-88]</sup>,但所报道的数据差别较大,并且不确定是否经过了超高压变质,因此柴北缘的超高压变质年龄并不清楚。

为了确定柴北缘超高压变质的时代,Song 等(2005)<sup>[25]</sup>选择了绿梁山石榴橄榄岩块中的石榴二辉橄榄岩和含石榴石纯橄岩两个样品进行了锆石的分选和 SHRIMP 定年工作。阴极发光图像显示锆石具有明显的核-幔-边结构,其核部发育岩浆结

晶的振荡环带,说明其原岩是岩浆结晶的产物,而幔部和边部是变质过程中生长或流体改造。锆石 SHRIMP 定年结果显示石榴二辉橄榄岩中锆石主要由 4 组年龄:(a) 具岩浆结构的核部年龄为(457±22) Ma, 是与早期大洋俯冲有关的高镁熔体结晶的产物;(b) 锆石幔部具有石榴石、金刚石、辉石等包裹体,其 11 个测点的平均年龄为(423±5) Ma, 代表大陆碰撞过程中约 150~200 km 深度条件下超高压变质作用形成的;(c) 锆石边部平均年龄为(397±6) Ma;(d) 最外部的年龄为 349~368 Ma, 可能为流体改造的结果,可以解释为造山期后热事件的叠加。

形态学和阴极发光图像显示纯橄岩和石榴辉石岩的锆石是变质成因的,其内部结构非常均匀。部分锆石具有与石榴二辉橄榄岩锆石核部年龄一致的残核。纯橄岩锆石的加权平均年龄为(420±5) Ma, 与石榴二辉橄榄岩锆石的幔部年龄吻合,并与含柯石英的泥质片麻岩锆石的年龄相当,代表大陆俯冲到约 200 km 发生变质的年龄。所有的同位素年代学资料证明绿梁山石榴橄榄岩不是一个古岩石圈地幔的残片,而是与板块俯冲过程形成的,并经历了复杂演化历史,包括大陆深俯冲过程和造山作用的折返。

#### 4.3 石榴橄榄岩的成因

石榴橄榄岩是大陆型俯冲碰撞带的标志性岩石类型,从不出现在低温的大洋型俯冲带中,因此其形成过程与大陆深俯冲有密切的关系。

柴北缘胜利口石榴橄榄岩在宏观上具有很好的层状特征,局部可见由矿物(石榴石、橄榄石和辉石)含量变化形成的韵律条带,常量元素地球化学表明,岩石的原岩由辉石岩-橄榄辉石岩-二辉橄榄岩-方辉橄榄岩互层或渐变过渡,但稀土元素和微量元素的模式显示这种成层性并不受石榴石的含量变化所控制,反映是原始岩浆结晶条带,而不是变质分异条带<sup>[27]</sup>。也就是说,石榴石的形成明显晚于这些堆晶岩的侵入时间。大部分岩石具有高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 亏损,水溶性元素(Cs、U、Pb 等)强烈富集的特征,微量元素随 MgO 变化而变化的特征反映了岩浆房堆晶的过程,说明该石榴橄榄岩是岛弧环境下地幔楔部分熔融的岩浆堆晶的产物。

## 5 讨论和结论

(1) 柴北缘两类橄榄岩的构造意义。柴北缘超

高压带中发育有两种不同类型的橄榄岩:①石榴橄榄岩,岩石类型包括石榴二辉橄榄岩、石榴方辉橄榄岩、纯橄岩和石榴辉石岩),可与世界其他超高压带超深来源的石榴橄榄岩相对比,是大陆型俯冲带中重要的标志性岩石;②大洋蛇绿岩型地幔橄榄岩,与变质的堆晶杂岩(包括石榴辉石岩、蓝晶石榴辉岩)和具有大洋玄武岩特征的榴辉岩构成了典型的蛇绿岩剖面,代表大洋岩石圈残片<sup>[81]</sup>。两种类型橄榄岩的产出,使我们联想到已经持续了很久的关于大陆型超高压变质带中榴辉岩“原地”和“异地”的争论。大量研究表明,大别-苏鲁超高压变质带是大陆整体俯冲的产物<sup>[7-8]</sup>,即榴辉岩和大部分石榴橄榄岩的原岩是大陆地壳的成分,一般不存在外来成分的加入(但 Yang 2006<sup>[89]</sup>认为苏鲁超高压带的胡家岭石榴橄榄岩和辉石岩形成于岛弧环境,暗示该岩体可能不是原始大陆地壳的成分)。但是,柴北缘超高压变质带中,大洋型地幔橄榄岩、堆晶岩及其大洋玄武岩所构成蛇绿岩的发现证明,很多榴辉岩和橄榄岩是“异地”的,大陆俯冲过程中可以将先期存在的大洋俯冲带的成分卷入其中。因此,柴北缘超高压变质带的岩石学、地球化学和同位素年代学等方面均反映了大洋俯冲到大陆俯冲碰撞的完整过程。

(2) 石榴橄榄岩的形成深度。多种证据证明柴北缘胜利口石榴橄榄岩的形成深度约 200 km:①锆石中金刚石包裹体证明其形成深度大于 150 km;②石榴石中金红石+辉石的出溶片晶,说明在超高压条件下发生替代  $(\text{Si} + \text{Ti}) + \text{Ca} (\text{Mg}) = 2\text{Al}$ , 根据金红石和辉石出溶量的估计,其形成压力约为 7 GPa;③石榴石中发育有钠质角闪石的出溶<sup>[26]</sup>,说明部分石榴石在超高压条件下含有过量的 Na 以及超过  $1000 \times 10^{-6}$  的 OH<sup>-</sup>;④石榴石-斜方辉石的 Al 压力计和石榴石-橄榄石温度计计算获得柴北缘石榴橄榄岩的形成条件为:  $p = 5 \sim 6.5 \text{ GPa}$ ,  $t = 960 \sim 1040^\circ\text{C}$ 。

(3) 石榴橄榄岩的构造背景和形成模式。野外产状、岩石学和地球化学等资料说明绿梁山石榴橄榄岩是古俯冲带之上地幔楔部分熔融产生的高镁熔体堆晶的产物,并显示了岛弧岩浆的地球化学特征。根据其同位素年代学,我们进一步提出该石榴橄榄岩三个阶段的演化模式:第一阶段 ( $\geq 460 \text{ Ma}$ ):俯冲的大洋岩石圈在榴辉岩相变质过程中脱水导致地幔楔发生部分熔融并形成岛弧高镁岩浆,在上升过程中,这些熔体在岛弧之下尖晶石相橄榄岩稳定

的地幔深度范围内发生冷却结晶形成堆晶的岩石组合,其结晶时代大约在 460 Ma。第二阶段:俯冲的岩石圈板片导致岛弧之下地幔楔软流圈发生楔角流动 (corner flow) 将这些堆晶橄榄岩携带到地幔的深部。第三阶段:俯冲的大陆地壳捕获该橄榄岩体并在大约 423 Ma 俯冲到超过 200 km 的深度,在大约 400 Ma 与片麻岩等一起折返到中部地壳的位置。

感谢本专辑的两位特邀主编吴福元教授和徐义刚研究员的盛情约稿,同时感谢英国皇家学会国际基金、全国博士学位论文作者专项资金资助项目(200531)的资助。

## References:

- [1] Ernst W G, Liou J G. Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu (Alpine-type) and Franciscan (Pacific-type) metamorphic belts [J]. Geology, 1995, 23: 353-356.
- [2] Maruyama S, Liou J G, Terabayashi M. Blueschists and eclogites of the World and their exhumation[J]. International Geology Review, 1996, 38: 485-594.
- [3] Song S G, Zhang L F, Niu Y, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: a case study of the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. Journal of Petrology, 2006, 47: 435-455.
- [4] Smith D C. Eclogites and eclogite facies rocks[M]. Amsterdam: Elsevier, 1988: 534.
- [5] Ernst W G. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices-implications for arcs and continental growth[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2001, 127: 253-275.
- [6] Wang Q, Cong B L. Tectonic implication of UHP rocks from the Dabie Mountains[J]. Science in China: Series D, 1996, 39: 311-318.
- [7] Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime[J]. Earth Sci Rev, 2003, 62: 105-161.
- [8] Liou J G, Tsujimori T, Zhang R Y, et al. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: the Himalayan model[J]. Int Geol Rev, 2004, 46: 1-27.
- [9] Yang J J. Eclogite and ultramafic rocks in Su-Lu [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 99(in Chinese).
- [10] Yang J J, Godard G, Kienast J R, et al. Ultrahigh-pressure (60 kbar) magnesite-bearing garnet peridotites from northeastern Jiangsu, China[J]. J Geol, 1993, 101: 541-554.
- [11] Yang J J, Jahn B M. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP metamorphic terrane in China[J]. J Metamorph Geol, 2000, 18: 167-180.
- [12] Zhang R Y, Liou J G, Cong B L. Ultrahigh-pressure metamorphosed talc-, magnesite- and Ti-clinohumite-bearing mafic-ultramafic complex, Dabie Mountains, east central China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1995, 14: 319-333.
- [13] Zhang R Y, Liou J G, Yang J S. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrane, eastern-central China[J]. J Metamorph Geol, 2000, 18: 149-166.
- [14] Liu L, Sun Y, Xiao P X. Discovery of ultrahigh-pressure magnesite-bearing garnet lherzolite (>3.8 GPa) in the Altyn Tagh[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(1): 70-75.
- [15] Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China:  $p$ - $T$  history and U-Pb geochronology[J]. J Metamorphic Geol, 2005, 23: 491-510.
- [16] Medaris L G. Petrogenesis of the Lien peridotite and associated eclogite, Almklovdalen, western Norway [J]. Lithos, 1980, 13: 339-353.
- [17] Medaris L G, Carswell D A. The petrogenesis of Mg-Cr garnet peridotites in European metamorphic belts[M]//Carswell D A . Eclogite facies rocks. New York: Chapman and Hall, 1990: 260-290.
- [18] Medaris L G. A geothermobarometric investigation of garnet peridotites in the West Gneiss Region of Norway[J]. Contrib Petrol Mineral, 1984, 87: 72-86.
- [19] Medaris L G. Garnet peridotites in Eurasian high-pressure and ultrahigh-pressure terranes: a diversity of origins and thermal histories[J]. Int geol Rev, 1999, 41: 799-815.
- [20] Brueckner H K, Medaris L G. A general model for the intrusion and evolution of "mantle" garnet peridotites in high-pressure and ultra-high-pressure metamorphic terranes[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 123-133.
- [21] Zhang R Y, Liou J G, Coleman R G, et al. Metamorphic evolution of diamond-bearing and associated rocks from the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan[J]. J Metamorph Geol, 1997, 15: 479-496.
- [22] Kadarusman A, Parkinson C D. Petrology and  $p$ - $T$  evolution of garnet peridotites from central Sulawesi, Indonesia[J]. J Metamorph Geol, 2000, 18: 193-209.
- [23] Yang J J, Zhu H, Deng J F, et al. Discovery of garnet-peridotite at the northern margin of the Qaidam Basin and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1994, 13: 97-105 (in Chinese).
- [24] Song S G, Zhang L F, Niu Y L. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China[J]. American Mineralogist, 2004, 89: 1330-1336.
- [25] Song S G, Zhang L F, Niu Y, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet-peridotite in the North Qaidam UHPM belt, North Tibetan Plateau: a record of complex histories associated with continental collision[J]. Earth and

- Planetary Science Letters, 2005, 234: 99-118.
- [26] Song S G, Zhang L F, Chen J, et al. Sodic amphibole exsolution in garnet from garnet-peridotite, North Qaidam UHPM belt, NW China: implications for ultradeep-origin and hydroxyl defects in mantle garnets[J]. American Mineralogist, 2005, 90:814-820.
- [27] Song S G, Su L, Niu Y, et al. Petrological and geochemical constraints on the origin of garnet peridotite in the north Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, Northwestern China[J]. Lithos, 2006(in press).
- [28] Bao P S, Wang X B, Peng G Y. Chromite deposits in China [M]. Beijing: Science Press, 1999(in Chinese).
- [29] Bai W J, Zhou M F, Robinson P T, et al. Origins of podiform chromite, diamonds and their associated minerals at Luobusa, Tibet[M]. Beijing: Seismological Press, 2000: 98 (in Chinese).
- [30] Wang Z H, Sun S, Hou Q L. Effect of melt-rock interaction on geochemistry in the Kudi ophiolite (western Kunlun Mountains, northwestern China): implication for ophiolite origin[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 191: 33-48.
- [31] Bodinier J L. Geochemistry and petrogenesis of the Lanzo peridotite body, western Alps[J]. Tectonophysics, 1988, 149: 67-88.
- [32] Song S G, Su L. Rheological properties of mantle peridotites at Yushigou in the North Qilian Mountains and their implications for plate dynamics[J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72 (2): 131-141.
- [33] Su L, Song S G, Wang Z H. CH<sub>4</sub>-rich fluid inclusions in the Yushigou mantle peridotite and their implications, North Qilian Mountains, China[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (21):1992-1995.
- [34] Niu Y. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: evidence from abyssal peridotites[J]. J Petrol, 1997, 38:1047-1074.
- [35] Kelemen P B, Shimizu N, Salters V J M. Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels[J]. Nature, 1995, 375: 747-753.
- [36] Kelemen P B, Koga K, Shimizu N. Geochemistry of gabbro sills in the crust-mantle transition zone of the Oman ophiolite: implications for the origin of the oceanic lower crust[J]. Earth and Planetary Science Letter, 1997, 146: 457-488.
- [37] Suhr G. Melt migration under oceanic ridges: inferences from retransport modeling of upper mantle hosted dunites[J]. Journal of Petrology, 1999, 40: 575- 599.
- [38] Buchl A, Brugmann G, Batanova V G, et al. Melt percolation monitored by Os isotopes and HSE abundances: a case study from the mantle section of the Troodos Ophiolite[J]. Earth and Planetary Science Letter, 2002, 204: 385-402.
- [39] Den T E. Origin of ultramafic rocks, their tectonic setting and history: a contribution to the discussion of the paper “The origin of ultramafic and ultrabasic rocks” by P. J. Wyllie[J]. Tectonics, 1969, 7: 457-488.
- [40] Evans B W. Metamorphism of Alpine peridotite and serpentinite[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1977, 5: 397-447.
- [41] O’Hara M J, Mercy E L P. Petrology and petrogenesis of some garnetiferous peridotites[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1963, 65:251-314.
- [42] Carswell D A. Possible primary upper mantle peridotite in Norwegian basal gneiss[J]. Lithos, 1968, 1: 322-355.
- [43] Carswell D A. The metamorphic evolution of Mg-Cr type Norwegian garnet peridotites[J]. Lithos, 1986, 19: 279-297.
- [44] O’Hara M J, Richardson S W, Wilson G. Garnet peridotite stability and occurrence in crust and mantle[J]. Contrib Mineral Petrol, 1971, 32: 48-68.
- [45] Carswell D A, Harvey M A, Al-Samman A. The pretogenesis of contrasting Fe-Ti and Mg-Cr garnet peridotite types in the high grade gneiss complex of western Norway[J]. Bulletin of Mineralogy, 1983, 106: 727-750.
- [46] Brueckner H K, Medaris L G. A tale of two orogens—the contrasting *p-T-t* history and geochemical evolution of mantle in ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic terranes of the Norwegian Caledonides and the Czech Variscides[J]. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 1998, 78: 293-307.
- [47] Jamteit B, Carswell D A, Mearns E W. Chronology of the high-pressure metamorphism of Norwegian garnet peridotites/pyroxenites[J]. J Metamorph Geol, 1991, 9: 125-139.
- [48] Zhang R Y, Liou J G. Dual origin of garnet peridotites of Dabie-Sulu UHP terrane, east central China [J]. Episodes, 1998, 21: 229-234.
- [49] Brey G P, Köhler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites. Part II: new thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers[J]. Journal of Petrology, 1990, 31:1353-1378.
- [50] O’Neill H St C, Wood B J. An experimental study of Fe-Mg-partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1979, 70: 59-70.
- [51] Brenker F E, Brey G P. Reconstruction of the exhumation path of the Alpe Arami garnet peridotite body from depths exceeding 160 km[J]. J Metamorph Geol, 1997, 15:581-592.
- [52] Pearson D G, Davies R D, Nixon P H, et al. Graphitized diamonds from a peridotite massif in Morocco and implications for anomalous diamond occurrences[J]. Nature, 1989, 338: 60-62.
- [53] Davies R D, Nixon P H, Pearson D G, et al. Tectonic implications of graphitized diamonds from Ronda peridotite massif, southern Spain[J]. Geology, 1992, 21: 471-474.
- [54] van Roermund H L M, Carswell D A, Drury M R, et al. Microdiamonds in a megacrystic garnet websterite pod from Bar-

- dane on the island of Fjørtoft, western Norway: evidence for diamond formation in mantle rocks during deep continental subduction[J]. *Geology*, 2002, 30: 959-962.
- [55] Dobrzhinetskaya L, Green H W, Wang S. Alpe Arami: a peridotite massif from depths of more than 300 kilometers [J]. *Science*, 1996, 271: 1841-1846.
- [56] Green H W II, Dobrzhinetskaya L, Riggs E, et al. Alpe Arami: a peridotite massif from the mantle transition zone [J]? *Tectonophysics*, 1997, 279: 1-21.
- [57] Harker B R, Zhang R Y, Liou J G, et al. Determine the origin of ultrahigh-pressure lherzolite[J]. *Science*, 1997, 278: 702-704.
- [58] Pfiffner M, Trommsdorff V. The high-pressure ultramafic-mafic-carbonate suite of Cima Lunga-Adula, Central Alps: excursions to Cima di Gagnone and Alpe Arami[J]. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 1998, 78: 337-354.
- [59] Risold A C, Trommsdorff V, Grobety B. Genesis of ilmenite rods and palisades along humite-type defects in olivine from Alpe Arami[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 140: 619-628.
- [60] Bozhilov K N, Green H W II, Dobrzhinetskaya L. Clinoenstatite in Alpe Arami peridotite: additional evidence of very high pressure[J]. *Science*, 1999, 284: 128-132.
- [61] Dobrzhinetskaya L, Bozhilov K N, Green H W II. The solubility of TiO<sub>2</sub> in olivine: implications for the mantle wedge environment[J]. *Chem Geol*, 1999, 160: 357-370.
- [62] Akaogi M, Aaimoto S. Pyroxene-garnet solid solution equilibria in the systems Mg<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub>-Mg<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub> and Fe<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub>-Re<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub> at high pressures and temperatures[J]. *Phys Earth Planet Int*, 1977, 15: 90-106.
- [63] Irifune T. An experimental investigation of the pyroxene-garnet transformation in a pyrolite composition and its bearing on the constitution of the mantle[J]. *Phys Earth Planet Int*, 1987, 45: 324-336.
- [64] van Roermund H L M, Drury M R. Ultra-high pressure ( $p > 6$  GPa) garnet peridotites in Western Norway: exhumation of mantle rocks from  $> 185$  km depth[J]. *Terra Nova*, 1998, 10: 295-301.
- [65] van Roermund H L M, Drury M R, Barnhoorn A, et al. Relict majoritic garnet microstructures from ultra-deep orogenic peridotites in western Norway[J]. *J Petrol*, 2001, 42: 117-130.
- [66] Liu L, Sun Y, Xiao P X. Discovery of ultrahigh-pressure magnesite-bearing garnet lherzolite ( $> 3.8$  GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(11): 881-886.
- [67] Zhang R Y, Liou J G. Clinopyroxenite from the Sulu ultrahigh-pressure terrane, eastern China: origin and evolution of garnet exsolution in clinopyroxene[J]. *American Mineralogist*, 2003, 88: 1591-1600.
- [68] Zhang R Y, Zhai S M, Fei Y W, et al. Titanium solubility in coexisting garnet and clinopyroxene at very high pressure: the significance of exsolved rutile in garnet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 216: 591-601.
- [69] Ye K, Cong B, Ye D. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km[J]. *Nature*, 2000, 407: 734-736.
- [70] Mposkos E D, Kostopoulos D K. Diamond, former coesite and supersilicic garnet in metasedimentary rocks from the Greek Rhodope: a new ultrahigh-pressure metamorphic province established[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 192: 497-506.
- [71] Spengler D, van Roermund H L M, Drury M R, et al. Deep origin and hot melting of an Archaean orogenic peridotite massif in Norway[J]. *Nature*, 2006, 440: 913-917.
- [72] Yang J S, Xu Z Q, Li H B, et al. Discovery of eclogite at northern margin of Qaidam Basin, NW China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43: 1755-1760.
- [73] Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X, et al. A comparsion between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing [J]. *Acta Geol Sin*, 1999, 73: 193-205(in Chinese).
- [74] Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geo-chronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, Northwestern China[J]. *Lithos*, 2001, 56: 187-206.
- [75] Yang J S, Song S G, Xu Z Q, et al. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Paleozoic ultrahigh-pressure (UHP-HP) metamorphic belt, China[J]. *Acta Geol Sin*, 2001, 75: 175-179 (in Chinese).
- [76] Yang J S, Xu Z Q, Song S G, et al. Subduction of continental crust in the early Paleozoic North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphism belt, NW China: evidence from the discovery of coesite in the belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76: 63-68.
- [77] Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic evolution of coesite-bearing UHP terrane in the North Qaidam, northern Tibet, NW China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21: 631-644.
- [78] Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites in the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China[J]. *Lithos*, 2003, 70(3/4): 195-211.
- [79] Meng F C, Zhang J X, Yang J S, et al. Tectonic setting and geochemistry of amphibolites in the North Qaidam[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20: 1271-1282.
- [80] Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, et al. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: petrological and isotopic constraints [J]. *Lithos*, 2005, 84: 51-76.
- [81] Zhang G B, Song S G, Zhang L F, et al. Ophiolite-type man-

- tle peridotite from Shaliuhe, North Qaidam UHPM belt, NW China and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21:1049-1058.
- [82] Ringwood A E, Major A. Synthesis of majorite and other high pressure garnets and perovskites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1971, 12: 411-418.
- [83] Sobolev N V, Lavrent'ev G, Yu G. Isomorphic sodium admixture in garnets formed at high pressure[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1971, 31:1-12.
- [84] Bozhilov K N, Green H W II, Dobrzhinetskaya L. Quantitative 3D measurement of ilmenite abundance in Alpe Arami olivine by confocal microscopy: confirmation of high-pressure origin[J]. American Mineralogist, 2003, 86: 596-603.
- [85] Gudfinnsson G H, Wood B J. The effect of trace elements on the olivine-wadsleyite transformation[J]. American Mineralogist, 1998, 83: 1037-1044.
- [86] Brenker F E, Stachel T, Harris J W. Exhumation of lower mantle inclusions in diamond: ATEM investigation of retrograde phase transitions reactions and exsolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 198: 1-9.
- [87] Lu S N. Initial studies on Precambrian geology in northern Tibetan Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 125(in Chinese).
- [88] Zhang J X, Xu Z Q, Chen W, et al. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretion complex/volcanic arc in middle section of North Qilian Mountains[J]. Acta Petrol Mineral, 1997, 16:112-119(in Chinese).
- [89] Yang J J. Ca-rich garnet-clinopyroxene rocks at Hujalin in the Su-Lu Terrane (Eastern China): deeply subducted arc cumulates[J]? Journal of Petrology, 2006, 47: 965-990.

## 参考文献:

- [ 9 ] 杨建军. 苏鲁榴辉岩及有关超基性岩[M]. 北京: 地质出版社, 1991;99.
- [23] 杨建军, 朱红, 邓晋福, 等. 柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1994, 13 (2):97-105.
- [28] 鲍佩声, 王希斌, 彭根永, 等. 中国铬铁矿床[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [29] 白文吉, 周美夫, Robinson P T, 等. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿、金刚石及伴生矿物成因[M]. 北京: 地震出版社, 2000: 98.
- [72] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J]. 科学通报, 1998, 43:1544-1548.
- [75] 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英[J]. 地质学报, 2001, 75 (2): 175-179.
- [87] 陆松年. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[M]. 北京: 地质出版社, 2002:125.
- [88] 张建新,许志琴,陈文,等. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. 岩石矿物学杂志,1997,16:112-119.