

# 南阿尔金—柴北缘高压-超高压变质带研究进展、 问题及挑战

张建新<sup>1</sup>, 孟繁聪<sup>1</sup>, C. G. Mattinson<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037;

2. Department of Geological & Environmental Sciences, Stanford University, Stanford CA 94305-2115 U S A.)

**摘要:** 南阿尔金—柴北缘高压-超高压 (HP/UHP) 变质带为近10年来所新厘定, 它分布在青藏高原北缘, 延伸近1 000 km, 被阿尔金断裂分成南阿尔金和柴北缘两部分, 以含少量榴辉岩、石榴橄榄岩和含柯石英的片麻岩为特征。根据野外地质观察、岩石组合分析及其岩石学特征, 可把南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带划分为6个HP/UHP变质单元, 从西向东分别是: 江孜勒萨依榴辉岩-片麻岩单元 (JSU); 巴什瓦克石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元 (BWU); 鱼卡-落凤坡榴辉岩-片麻岩 (片岩) 单元 (YLU); 绿梁山石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元 (LLU); 锡铁山榴辉岩-片麻岩单元 (XTU); 都兰榴辉岩-片麻岩单元 (DLU)。研究显示, 6个HP/UHP变质单元在岩石组合、形成的温度压力条件及变质演化历史等方面存在明显差异; 榴辉岩相变质时代变化在420~500 Ma之间, 可能反映了早古生代沿南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带的多阶段或穿时性的俯冲作用。

**关键词:** 南阿尔金—柴北缘; HP/UHP变质带; HP/UHP变质单元; 多阶段俯冲

**中图分类号:** P 588.34

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7493 (2007) 03-0526-20

## 1 前言

高压-超高压 (HP/UHP) 变质带是确定古俯冲带存在的主要标志之一, 广泛发育在全球不同时期 (以显生宙为主) 的造山带中。虽然HP/UHP变质岩在造山带中仅占很小的比例, 然而它包含有造山带形成和演化的重要信息, 是了解板块俯冲、碰撞, 造山带的缩短、加厚, 及山根的形成机制等造山过程和动力学必不可少的研究对象。根据HP/UHP变质岩的特征及性质, 前人曾将造山带中的HP/UHP变质带划分成两种类型。一种是以蓝片岩和共生的低温榴辉岩 (“C”类榴辉岩) 为特征, 在空间上与蛇绿岩密切伴生, 其形成与洋壳的俯冲作用有关, 我国的西天山和北祁连高压/低温变质带属于这种类型。这类蓝片岩-榴辉岩是在高压/低温变质条件下形成, 一般认为其峰期变质条件为 $p < 15$  kb,  $T < 550$  °C (Ernst & Liou, 1995; Maruyama et al, 1996), 但近年的

研究显示这类榴辉岩形成的压力条件可达20 kb以上, 甚至UHP条件下 (Reinecke, 1998; Tagiri et al, 1995; Zhang et al, 2002; Zhang et al, 2007)。另一种类型的HP/UHP变质带以榴辉岩与长英质片麻岩 (正片麻岩、副片麻岩) 及大理岩等陆壳性质的岩石相伴生为特征, 榴辉岩常呈透镜状分布在典型陆壳岩石中。这类榴辉岩以含柯石英、金刚石等典型超高压矿物 ( $p > 27$  kb,  $T > 700$  °C) 为特征 (Chopin, 2003)。目前报道的UHP变质岩带主要属于这种类型, 认为其形成主要与陆壳的深俯冲作用有关 (Ernst & Liou, 1995), 但不排除早期洋壳俯冲的可能 (Song et al, 2006)。中国东部的大别-苏鲁HP/UHP变质带和本文所要讨论的南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带就属于这种类型。

中国西部的南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带为近10年来所新厘定, 它以发育榴辉岩、石榴橄榄岩和相关的片麻岩为特征 (杨建军等, 1994; 杨经绥等, 1998, 2000; 刘良等, 1996; 张建新

收稿日期: 2007-06-03; 修回日期: 2007-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40472102, 40272095); 中国地质调查局地质调查项目 (1212010611811); 国土资源部百名优秀青年人才计划资助

作者简介: 张建新, 1966年生, 男, 博士, 研究员, 从事造山带的变质与变形研究。E-mail: zjx66@yeah.net

等, 1999)。与世界上典型的HP/UHP变质带一样, 榴辉岩和石榴橄榄岩呈透镜状分布在长英质片麻岩中。近年来在柴北缘的少量榴辉岩、石榴橄榄和片麻岩中发现有超高压变质作用的标志(杨经绥等, 2001; 宋述光等, 2001; Yang et al, 2002, 2005; Song et al, 2003a, b, 2004, 2005a, b, 2006), 特别是在柴北缘都兰地区的榴辉岩的片麻岩围岩锆石包体中柯石英和绿梁山石榴橄榄岩锆石中金刚石的发现, 毫无疑问地证实了柴北缘UHP变质作用的存在(杨经绥等, 2001; Yang et al, 2002; Song et al, 2003b, 2005b)。在相邻的南阿尔金榴辉岩及石榴橄榄岩中, 同样发现有超高压变质作用证据(Zhang et al, 2001; 张建新等, 2002; 刘良等, 2002, 2003, 2005), 联系到它们均具有早古生代的形成年龄, 因此, 阿尔金—柴北缘地区可能是继大别—苏鲁之后, 在中国发现的又一条被巨型走滑断裂所切割的高压—超高压变质带。然而, 相对大别—苏鲁HP/UHP变质带, 南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带的研究程度要低的多, 仍有许多关键地质问题尚待解决。本文将将近10年来南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质岩带研究的进展、特别是近年我们所取得的新成果进行

概述, 在此基础上, 对目前研究过程中存在的问题以及进一步研究所面临的挑战进行探讨。

## 2 阿尔金—祁连—柴北缘地质背景

阿尔金—祁连—柴北缘地处青藏高原的东北缘, 明显被阿尔金断裂分成两部分, 阿尔金断裂以东为祁连—柴北缘地区, 呈NWW—SEE走向, 北侧为河西走廊, 南侧为柴达木盆地, 东接秦岭造山带。阿尔金断裂以西为阿尔金山的主体, 北邻塔里木盆地, 其山体主要呈NEE—SWW展布, 但其内部地质体的构造线主要显示近EW向展布的特征。近年的研究表明, 阿尔金山的主要古构造单元及特别是早古生代的HP/UHP变质带及蛇绿岩带可与祁连山—柴北缘的类似地质体进行对比(图1)(许志琴等, 1999; Zhang et al, 2001; Yang et al, 2001; Zhang et al, 2005a, b), 表明了阿尔金山与祁连山—柴北缘原为同一早古生代造山带, 后被阿尔金断裂所错开。如果把阿尔金山和祁连山—柴北缘作为一个整体考虑, 其主体和相邻地区的岩石构造单元有5个。

1) 阿拉善—敦煌地块: 主要由前寒武纪变质基底所组成。在阿拉善地区的变质基底被称之为龙

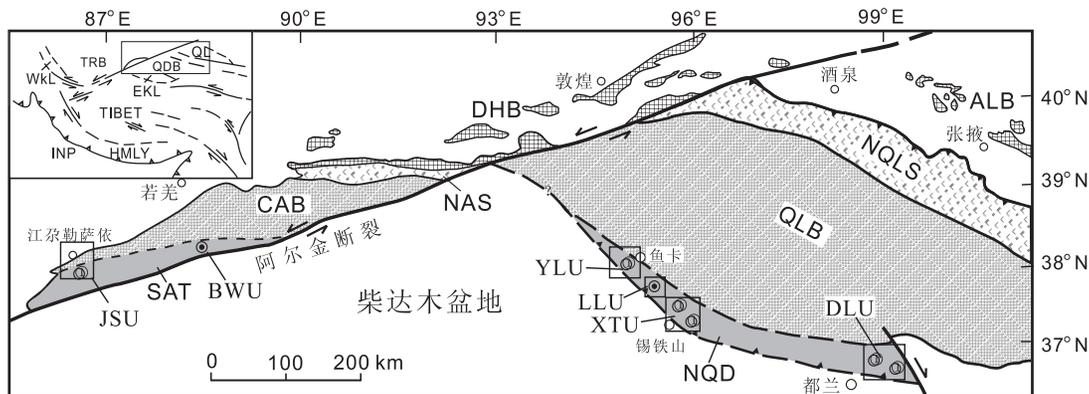


图1 阿尔金山—祁连山—柴北缘地质背景和构造岩石单元

ALB: 阿拉善地块; DHB: 敦煌地块; NQLS: 北祁连俯冲杂岩带; NAS: 北阿尔金俯冲杂岩带; QLB: 祁连地块; CAB: 中阿尔金地块; NQDS: 柴北缘俯冲碰撞杂岩带; SAS: 南阿尔金俯冲碰撞杂岩带; JSU: 江孜勒萨依榴辉岩—片麻岩单元; BWU: 巴什瓦克石榴橄榄岩—高压麻粒岩单元; YLU: 落凤坡榴辉岩—片麻岩(片岩)单元; LLU: 绿梁山石榴橄榄岩—高压麻粒岩单元; XTU: 锡铁山榴辉岩—片麻岩单元; DLU: 都兰榴辉岩—片麻岩单元

ALB: Alashan block; DHB: Dunhuang block; NQLS: north Qilian subduction-accretion complex belt; NAS: north Altyn Tagh subduction complex belt; QLB: Qilian block; CAB: central Altyn Tagh block; NQDS: North Qaidam subduction-collision zone; SAS: south Altyn Tagh subduction-collision complex zone; JSU: Jianglesayi eclogite-gneiss unit; BWU: Bashiwake garnet peridotite-HP granulite unit; YLU: Yuka eclogite-gneiss unit, LLU: Luliangshan garnet peridotite-HP granulite unit; XTU: Xitieshan eclogite-gneiss units; DLU: Dulan eclogite-gneiss units

Fig.1 Geological setting and lithotectonic units in the Altyn Tagh-Qilian-North Qaidam region

首山群或阿拉善群,在敦煌地区和阿尔金北缘(塔里木南缘)被称之为敦煌群和米兰群,其主要岩石为TTG花岗质岩石和大量表壳岩石所组成,变质程度以角闪岩相为主,局部达到麻粒岩相。已有的年代学资料表明其主要形成时代为古元古代—新太古代(董国安等,2007;梅华林等,1998;新疆地矿局,1993;车自成等,1996),局部地区具有古太古代的年龄信息(李惠民等,2001)。

2) 北祁连—北阿尔金俯冲增生杂岩带:分布在阿拉善—敦煌地块和祁连—阿尔金地块之间。以发育早古生代的蛇绿混杂岩带、高压/低温变质带及弧火山(成)岩带为特征。蛇绿岩混杂岩主要由超基性岩、基性岩(辉长岩及辉绿岩)、基性火山岩及深海和半深海相的碎屑岩(硅质岩、泥质岩等)等组成,在北祁连地区以玉石沟蛇绿岩最为典型,其中堆晶辉长岩中锆石的SHRIMP年龄为时代533~568 Ma(史仁灯等,2004a)。HP/LT变质带以蓝片岩和榴辉岩为特征,其中北祁连蓝片岩和榴辉岩的形成时代为440~489 Ma(Wu et al, 1993; 张建新等, 1997; 宋述光等, 2004; Zhang et al, 2007); 而北阿尔金蓝片岩和榴辉岩还没有可靠的年代学资料,榴辉岩和蓝片岩中多硅白云母和钠云母的Ar-Ar年龄(491~513 Ma)是否代表高压变质时代还需进一步工作来验证(张建新等,2007a)。

3) 祁连—阿尔金地块:主要由前寒武纪变质基底和浅变质或没变质的新元古代以来的沉积岩(夹少量火山岩)为特征,变质基底主要由角闪岩相的副片麻岩、大理岩、少量斜长角闪岩和花岗质片麻岩所组成,花岗质片麻岩的岩浆结晶时代为9~10亿年,并认为代表了变质基底的固结时代(郭进京等,1999;于海峰等,2002;Wan et al, 2001, 2006),在祁连地块南侧,还覆盖有厚度不等的早古生代海相沉积岩和火山岩。

4) 南阿尔金—柴北缘俯冲碰撞杂岩带:分布在祁连—阿尔金地块以南、阿尔金断裂和柴达木盆地以北,由高压/超高压变质带、少量蛇绿岩(?)、具有岛弧性质的火山岩及与俯冲和碰撞作用有关的花岗岩等所组成。其中的HP/UHP变质带是本文的主题,将在下面详细阐述。南阿尔金较明确的蛇绿岩出露在茫崖地区,其Sm-Nd等

时线年龄为481 Ma(刘良等,1998)。柴北缘蛇绿岩还存在很大争议,在柴北缘地区,发育许多基性超基性岩,有人认为它们是蛇绿岩(如赖绍聪等,1996),也有人认为蛇绿岩的证据不够充分(张旗等,2001)。最近,杨经绥等在柴北缘绿梁山厘定出一套为古洋壳蛇绿岩组合,其Rb-Sr和Sm-Nd等时线年龄值768~780 Ma(杨经绥等,2004),并认为其可与HP/UHP带中榴辉岩的800~750 Ma原岩年龄对比(Zhang et al, 2005b, 2006)。此外,在柴北缘地区还出露有与俯冲和碰撞有关的早古生代I型和S型花岗岩(吴才来等,2001)及与洋壳俯冲作用有关的早古生代岛弧火山岩(史仁灯等,2004b;袁桂邦等,2002),它们在空间上与HP/UHP变质带伴生。

5) 柴达木—东昆仑地块:虽然大部分被新生代柴达木盆地的沉积物所覆盖,但地球物理等资料显示柴达木盆地的基岩主要由变质基底所组成,与柴南缘(东昆仑北带)所出露的变质岩石类似。柴南缘的变质基底为金水口群,被认为是柴达木变质基底的出露部分。主要分布在柴达木盆地南缘(东昆仑造山带北缘)那棱格勒—格尔木—金水口一带,主要由高角闪岩相—麻粒岩相的变质花岗质岩石和表壳岩石所组成,夹有变质基性岩(斜长角闪岩和基性麻粒岩)。这套局部达到麻粒岩相变质程度的高级变质岩系长期以来被认为是太古宙—古元古代的柴达木地块变质基底(青海省地质局,1991),但我们对柴南缘东段金水口地区原定为金水口群的花岗质岩石和副片麻岩中锆石SHRIMP测定显示,金水口群经历了早古生代与麻粒岩相变质和深熔作用有关的构造热事件(张建新等,2003a),说明柴达木地块前寒武纪变质基底明显在早古生代造山作用过程中发生了活化。

### 3 南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带研究进展

南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带分布在祁连—阿尔金地块和柴达木地块(盆地)之间(图1),从西向东主要出露于南阿尔金的江尕勒萨依、巴什瓦克以及柴北缘的鱼卡—落凤坡、绿梁山、锡铁山和都兰6个地区,目前已有的研究资料

显示,这6个地区的岩石组合、变质演化历史特别在折返过程中的变质历史具有明显差异,因此,我们把南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带划分成6个构造岩石单元(图1),其中在南阿尔金可分为江孜勒萨依榴辉岩-片麻岩单元和巴什瓦克石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元,在柴北缘地区,从西向东分为鱼卡—落凤坡榴辉岩-片麻岩(片岩)单元、绿梁山石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元、锡铁山榴辉岩-片麻岩单元、都兰榴辉岩-片麻岩单元,其中都兰地区可进一步划分出都兰北带和都兰南带两个亚单元(杨经绥等,2000; Song et al, 2003a)。

### 3.1 江孜勒萨依榴辉岩-片麻岩单元

江孜勒萨依榴辉岩-片麻岩单元分布在阿尔金西南段且末东的江孜勒萨依—玉石矿沟一带(图2), (刘良等, 1996; 张建新等, 1999, 2002; Zhang et al, 2001)。由于研究程度的差异,此单元的分布范围尚不清楚。在江格勒萨依剖面中,主要由含夕线石和石榴石的副片麻岩和花岗质片麻岩所组成,含有少量的大理岩和变质基性岩。榴辉岩呈透镜状块体分布在夕线石榴黑云片麻岩和大理岩中和花岗片麻岩中(图2),与片麻岩接

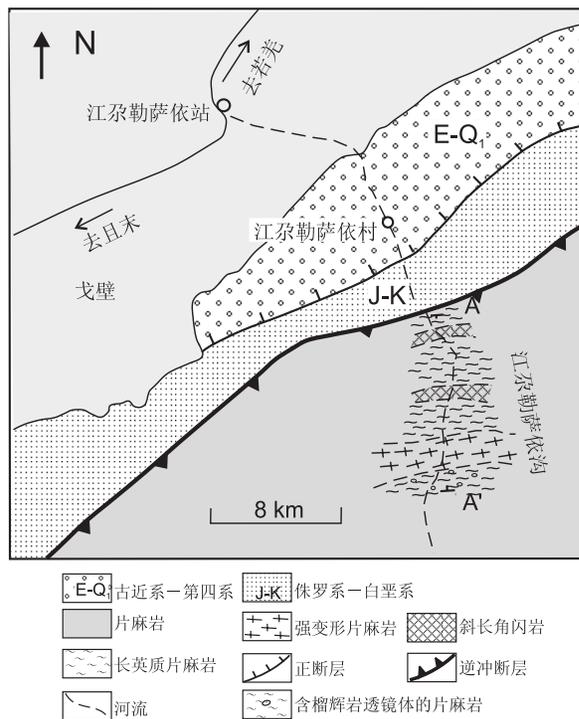


图2 江格勒萨依榴辉岩-片麻岩单元的地质简图  
(据Zhang et al, 2001)

Fig.2 Simplified geological map of the Jianggelesayi eclogite-gneiss unit

触部位已变为石榴角闪片麻岩。榴辉岩的面理与围岩的片麻岩方向一致。通过对江孜勒萨依剖面的研究显示,含榴辉岩的单元与由斜长角闪岩、角闪片麻岩、长英质片麻岩及变质钙硅酸盐岩所组成的上部单元之间为强变形的滑脱带,滑脱带由强变形长英质片麻岩所组成,片麻岩走向近EW向,变形组构显示出S-L构造岩特征,拉伸线理近水平或缓向北东倾斜,运动学标志显示从E向W的剪切方向。

榴辉岩的副片麻岩围岩矿物组合为Grt + Sil + Bt + Kf + Pl + Qtz (除标注外,矿物的英文缩写据Kretz, 1983),具有高角闪岩相矿物组合为特征,局部可能达到麻粒岩相,但没有发现高压矿物组合存在。榴辉岩的主要矿物组合为Grt + Omp + Rt ± Phe + Qtz ± Zo,榴辉岩的峰期变质条件为 $p = (28 \sim 30) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 730 \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$  (Zhang et al, 2001),这与榴辉岩中发现柯石英假像的特征一致(张建新等, 2002),并在折返过程中经历了麻粒岩-角闪岩相的改造(Zhang et al, 2001)。通过榴辉岩中锆石U-Pb TIMS和Sm/Nd内部等时线获得榴辉岩相变质时代为500 ~ 504 Ma (张建新等, 1999; Zhang et al, 2001) (见表1)。最近刘良等(2007)通过LA ICPMS 锆石U-Pb测定获得榴辉岩的变质年龄为 $493 \pm 4 \text{ Ma}$ ,围岩片麻岩的变质年龄为 $499 \pm 27 \text{ Ma}$ ,这些新的年龄数据在误差范围内与榴辉岩中锆石TIMS和Sm-Nd等时线年龄一致。通过对含夕线石富片麻岩锆石的SHRIMP测定,还获得450 ~ 470 Ma的变质年龄(张建新等,未出版资料,见表2),可能代表榴辉岩相变质作用之后角闪岩-麻粒岩相变质作用叠加的时代。

### 3.2 巴什瓦克石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元

巴什瓦克石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元分布在阿尔金中段的若羌南英吉利萨依—巴什瓦克一带,长英质高压麻粒岩、高压基性麻粒岩和超基性岩构成了一个大约5 km宽的构造岩石单元,其南北分别为韧性剪切带与角闪岩相的片麻岩接触,而东西方向的野外分布关系不清楚(图3)。基性麻粒岩和石榴橄榄岩呈透镜状、条带状或似层状分布在长英质麻粒岩中,其透镜体的长轴平行于长英质麻粒岩的片麻理,部分条带状基性麻粒岩表现为无根褶皱。基性麻粒岩可分为两种类

表1 南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质岩石的变质条件及温压估算

Table 1 Metamorphic conditions and  $p$ - $T$  estimates for HP/UHP metamorphic rocks in different units along the South Altyn Tagh-North Qaidam

样品号	取样位置	岩石类型	$p$ (10 <sup>8</sup> Pa)	$T$ (°C)	矿物组合	解释	参考文献
南阿尔金江格勒萨依榴辉岩—片麻岩单元							
97A12-1	江格勒萨依沟	榴辉岩	>15	731~811	Grt-Omp-Qtz	最小压力	Zhang et al, 2001
97A12-1	江格勒萨依沟	榴辉岩	28~30	820~850	Grt-Omp-Phe	峰期阶段	Zhang et al, 2001
97A12-5	江格勒萨依沟	榴辉岩	>15	665~880	Grt-Omp-Qtz	最小压力	Zhang et al, 2001
97A12-5	江格勒萨依沟	榴辉岩	28	730	Grt-Omp-Phe-Qtz	峰期阶段	Zhang et al, 2002
97A12-1	江格勒萨依沟	榴辉岩	11~14	670~800	Grt-Cpx-Pl-Qtz	麻粒岩相退变阶段	Zhang et al, 2001
97A21a	江格勒萨依沟	退变榴辉岩	6.3~7.6	730	Grt-Amp-Pl-Qtz	角闪岩相退变阶段	Zhang et al, 2001
97A14c	江格勒萨依沟	退变榴辉岩	7.8~9.5	638~738	Grt-Amp-Pl-Qtz	角闪岩相退变阶段	Zhang et al, 2001
南阿尔金巴什瓦克石榴橄榄岩—高压麻粒岩单元							
A761	N38° 22.16', E88° 37.31'	含蓝晶石长英质麻粒岩	20~24.5	930~995	Grt-Ky-Fsp-Qtz	峰期阶段	Zhang et al, 2005a
A711	N38° 22.16', E88° 37.31'	基性麻粒岩	18.5~22.5	940~1005	Grt-Cpx-Fsp-Qtz	峰期阶段	Zhang et al, 2005a
A853	N38° 21.75', E88° 36.57'	基性麻粒岩	19.2~24	952~1012	Grt-Cpx-Pl-Qtz	峰期阶段	Zhang et al, 2005a
A851	N38° 21.58', E88° 37.06'	石榴橄榄岩	18.5~27.3	870~1050	Grt-Cpx-Opx-Ol	峰期阶段	Zhang et al, 2005a
无报道	无详细报道	石榴橄榄岩	38~51	880~970	Grt-Cpx-Opx	峰期压力阶段	Liu et al, 2002
无报道	无详细报道	石榴橄榄岩	22~30	710~800	Grt-Cpx-Opx	峰期压力阶段	Liu et al, 2002
无报道	无详细报道	石榴橄榄岩	20~28	780~840	Grt-Cpx-Opx	峰期后阶段	Liu et al, 2002
A761	N38° 22.16', E88° 37.31'	含蓝晶石长英质麻粒岩	9.3~10.6	802~830	Grt-Bt-Ky-Spl-Pl	退变质阶段	Zhang et al, 2005a
A711	N38° 22.16', E88° 37.31'	基性麻粒岩	9.6~12	782~819	Grt-Cpx-Pl-Qtz	退变质阶段	Zhang et al, 2005a
A853	N38° 21.75', E88° 36.57'	基性麻粒岩	9.4~12.2	802~822	Grt-Cpx-Opx-Pl-Qtz	退变质阶段	Zhang et al, 2005a
柴北缘鱼卡—落凤坡榴辉岩—片麻岩(片岩)单元							
97A25-1	N38° 01.51', E94° 52.71'	榴辉岩	10~14.6	567~644	Grt-Amp-Pl-Ep-Qtz	进变质阶段	Zhang et al, 2005b
97A25-1	N38° 01.51', E94° 52.71'	榴辉岩	23~28	570~730	Grt-Omp-Phe	峰期阶段	Zhang et al, 2005b
97A26	N38° 01.51', E94° 52.71'	榴辉岩	9.7~12.8	586~674	Grt-Amp-Pl-Qtz	角闪岩相退变质阶段	Zhang et al, 2005b
QZ16-3-1	N37° 53.08', E94° 57.32'	榴辉岩	21.3~27.3	519~621	Grt-Omp-Phe-Qtz	峰期阶段	Zhang et al, 2005b
ZM-8	N37° 58.54', E94° 55.03'	变泥质岩	10.7 ± 3.1	564 ± 22	Grt-Chl-Cld-Phe-St-Qtz	进变质阶段	Zhang et al, 2004a
ZM-8	N37° 58.54', E94° 55.03'	变泥质岩	23~31	615~700	Grt-Ky-Cld-Phe-Qtz	峰期阶段	Zhang et al, 2004a
ZM-8	N37° 58.54', E94° 55.03'	变泥质岩	12.2 ± 2.6	581 ± 20	Grt-Chl-Cld-Phe-St-Qtz	退变质阶段	Zhang et al, 2004a
绿梁山石榴橄榄岩—片麻岩单元							
LH101a	无详细报道	石榴橄榄岩	25 ± 3	850 ± 60	Grt-Cpx-Opx-Spl		杨建军等, 1994
2C42	无详细报道	石榴橄榄岩	50~65	960~1040	Grt-Opx-Ol	峰期变质阶段	Song et al, 2004
2C28	无详细报道	石榴纯橄岩	46~53	980~1130	Grt-Opx-Ol	峰期变质阶段	Song et al, 2004
2C38 (?)	无详细报道	石榴辉石岩	30~35	850~950	Grt-Cpx-Opx	折返阶段	Song et al, 2004
2C42, 2C44, C305	无详细报道	石榴橄榄岩	50~65	960~1040	Grt-Opx-Ol	峰期变质阶段	Song et al, 2005
?	无详细报道	石榴辉石岩	25~30	800~900	Grt-Cpx-Opx		Song et al, 2005
C305	无详细报道	石榴橄榄岩	>40		锆石中金刚石包体		Song et al, 2005
Y614	无详细报道	石榴橄榄岩	35~45	780~850	Grt-Cpx-Opx		Zhang et al, 2004

续表 1

样品号	取样位置	岩石类型	$p$ (10 <sup>3</sup> Pa)	$T$ (°C)	矿物组合	解释	参考文献
绿梁山石榴橄榄岩-片麻岩单元							
AQ20-11, Q05-18e	N37° 39.12', E95° 20.83' N37° 41.25', E95° 18.63'	基性麻粒岩	>15	685~753	Grt-Omp (包体)-Qtz	早期榴辉岩相最小压力	张建新等, 2007
同上	同上	同上	9.6~13.5	730~870	Grt-Cpx-Pl-Qtz	高压麻粒岩相阶段	张建新等, 2007
同上	同上	同上	6.2~8.5	720~860	Grt-Opx-Pl-Qtz	中低压麻粒岩相阶段	张建新等, 2007
ZM10-5.2 ZM5-5.5	N37° 40.05', E95° 21.29' N37° 39.54', E95° 20.23'	麻粒岩相副片麻岩	10~13	~800	Grt-Ky-Kf-Pl-Qtz	高压麻粒岩相阶段	Zhang et al, in press
同上	同上	同上	6~8	740~830	Grt-Sil-Kf-Pl-Bt-Qtz	中低压麻粒岩相阶段	Zhang et al, in press
柴北缘锡铁山榴辉岩-片麻岩单元							
QZ19-9	N37° 22.90', E95° 32.87'	榴辉岩	>14	730~830	Grt-Omp-Qtz	最小榴辉岩相压力	Zhang et al, 2005b
QZ19-2	N37° 24.51', E95° 30.72'	榴辉岩	10~14	750~865	Grt-Cpx-Pl-Qtz	退变质阶段	Zhang et al, 2005b
XTS-1, XT-36	N37° 24.10', E95° 30.95' N37° 16.08', E95° 40.32'	含夕线石副片麻岩	6.7~8.6	705~800	Grt-Sil-Pl-Bt-Qtz	麻粒岩相叠加变质	Zhang et al, in press
都兰(北带)榴辉岩-片麻岩单元							
99Y308	无详细位置报道	榴辉岩	31.7	687	Grt-Omp-Phe	峰期阶段	Song et al, 2003b
00Y104	无详细位置报道	榴辉岩	28.7	631	Grt-Omp-Phe	峰期阶段	Song et al, 2003b
00Y108	无详细位置报道	榴辉岩	29.6	665	Grt-Omp-Phe	峰期阶段	Song et al, 2003b
00Y219	无详细位置报道	副片麻岩	>27		锆石中柯石英包体		Song et al, 2003b
都兰(南带)榴辉岩-片麻岩单元							
99Y80	无详细位置报道	榴辉岩	28.6~32.6	729~768	Grt-Omp-Phe-Ky-Coe	峰期阶段	Song et al, 2003b
99Y81	无详细位置报道	榴辉岩	>16	820~930	Grt-Cpx-Pl	麻粒岩相退变质阶段	Song et al, 2003b
99Y201, 99Y213	无详细位置报道	榴辉岩	18.6~19.8	874~948	Grt-Cpx-Pl-Qtz	麻粒岩相退变质阶段	Song et al, 2003b
?	无详细位置报道	榴辉岩	7~9	660~695	Grt-Amp-Ep-Bt-Pl-Qtz	角闪岩相退变质阶段	Song et al, 2003b

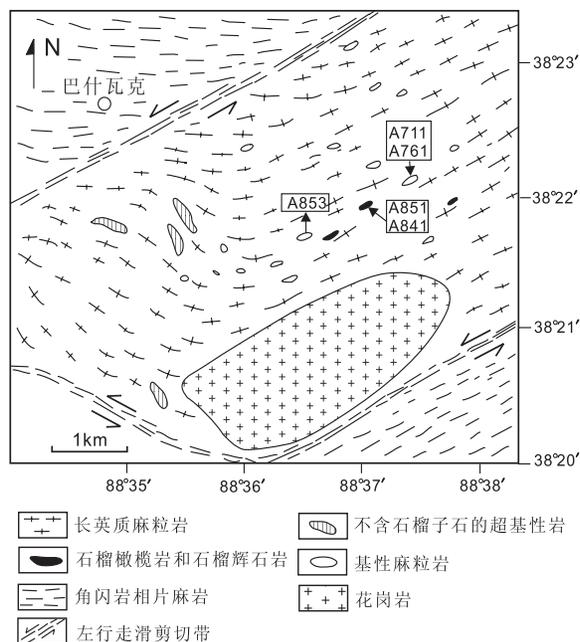


图3 巴什瓦克石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元地质简图(据Zhang et al, 2005a)

Fig.3 Simplified geological map of the Bashiwake garnet peridotite-HP granulite unit

型, 一种含有石英, 它直接分布在长英质麻粒岩中; 另一种不含石英, 呈层状分布在石榴橄榄岩中。石榴橄榄岩透镜体的宽度小于50 m, 而不含石榴子石的强蛇纹石化超基性岩宽度超过500 m。在此单元中, 还没有发现榴辉岩出露。

石榴橄榄岩的主要矿物组合为: Grt + Ol + Cpx + Opx, 基性麻粒岩的峰期矿物组合为Grt+Cpx+Tf (三元长石, 已转变为条纹长石) ± Ky ± Qtz+Rt, 而在退变质组合中有假蓝宝石、尖晶石、斜方辉石、钾长石和斜长石等矿物形成; 长英质麻粒岩的峰期矿物组合为Grt + Ky + Tf + Qtz + Rt, 退变质组合有刚玉、尖晶石、斜长石、钾长石和黑云母等。通过石榴橄榄岩及相关岩石中的一些出熔结构, 刘良等认为这些岩石可能经历了UHP变质作用(刘良等, 2002, 2003), 甚至可能形成于7GPa以上的压力条件下(刘良等, 2005), 而我们的研究显示: 这些岩石的显著特征是它们遭受了典型的HP/HT (UHT) 麻粒岩相的变质作用(张建新和孟繁聪, 2005; Zhang et al,

表2 南阿尔金-柴北缘 HP/UHP 变质带不同单元岩石的年代学数据  
Table 2 Geochronological data for HP/UHP metamorphic rocks in different units along the South Altyn Tagh-North Qaidam

样品号	取样位置	测定岩石	方法及测定矿物	年龄值(Ma)	年龄解释	参考文献及出处
南阿尔金-柴北缘 HP/UHP 变质带不同单元岩石的年代学数据						
97A12-1	江格勒萨依沟	榴辉岩	U-Pb TIMS (锆石)	504 ± 5	榴辉岩相变质年龄	张建新, 1999; Zhang et al., 2001
97A12-1	江格勒萨依沟	榴辉岩	Sm-Nd 等时线 (Wt-Grt-Omp)	500 ± 10	榴辉岩相变质年龄	张建新, 1999; Zhang et al., 2001
97A21-3	江格勒萨依沟	副片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	457 ~ 473	榴辉岩相后角闪岩-麻粒岩相变质叠加时代	张建新等, 未发表数据
02A35	无详细报道	榴辉岩	U-Pb LA-ICPMS (锆石)	493 ± 4	榴辉岩相变质年龄	刘良等, 2007
同上	同上	榴辉岩	U-Pb LA-ICPMS (锆石)	754 ± 9	原岩岩相结晶年龄	刘良等, 2007
02A17	无详细报道	副片麻岩	U-Pb LA-ICPMS (锆石)	499 ± 27	榴辉岩相变质年龄(?)	刘良等, 2007
南阿尔金-柴北缘高压麻粒岩-石榴辉岩单元						
A851	N38°21.58', E88°37.06'	石榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	501 ± 16	HP/HT 变质作用时代	Zhang et al., 2005a
A841	N38°21.58', E88°37.06'	含假蓝宝石 HP 基性麻粒岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	497 ± 11	HP/HT 变质作用时代	Zhang et al., 2005a
同上	同上	同上	Sm-Nd 等时线 (Wt-Grt-Cpx)	493 ± 24	HP/HT 变质作用时代	张建新等, 未发表数据
A761	N38°22.16', E88°37.31'	HP 长英质麻粒岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	493 ± 7	HP/HT 变质作用时代	Zhang et al., 2005a
A812	N38°21.59', E88°35.00'	HP 基性麻粒岩	Ar-Ar (角闪石)	474 ± 5	冷却或角闪岩相叠加时代	张建新等, 未发表数据
同上	无详细报道	花岗质片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	487 ± 10; 885 ± 21	变质作用时代; 原岩结晶年龄	张安达等, 2004
柴北缘鱼卡-落凤坡榴辉岩-片麻岩(片岩)单元						
97A25-1	N38°01.51', E94°52.71'	榴辉岩	U-Pb TIMS (锆石)	495 ± 7	榴辉岩相变质年龄	张建新等, 2000
同上	同上	榴辉岩	Ar-Ar (角闪石)	478 ± 8	冷却年龄	Zhang et al., 2005b
同上	同上	榴辉岩	Ar-Ar (多硅白云母)	466 ± 1	冷却年龄	Zhang et al., 2005b
QZ16-3-1	N37°53.08', E94°57.32'	榴辉岩	U-Pb TIMS (锆石)	488 ± 6	榴辉岩相变质年龄	Zhang et al., 2005b
?	鱼卡河	榴辉岩	LA ICPMS (锆石)	436 ± 3, 431 ± 4	榴辉岩相变质年龄	陈丹玲, 2006
97A6-7	鱼卡河	花岗片麻岩	U-Pb TIMS(锆石)	1020 ± 40	原岩年龄	Wan et al., 2001
97A5-5	鱼卡河	花岗片麻岩	Ar-Ar (白云母)	476 ± 6	冷却年龄	张建新等, 2000
?	鱼卡河	片麻岩	LA ICPMS (锆石)	431 ± 3, 432 ± 19	榴辉岩相变质年龄	陈丹玲等, 2007
A03-14-1.9	N37°58.54', E94°55.03'	含蓝晶石 HP 变质泥质岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	~900	新元古代变质事件	张建新等, 未发表数据
同上	同上	同上	Ar-Ar (多硅白云母)	476 ± 4	冷却年龄	张建新等, 未发表数据
绿梁山石榴辉岩-片麻岩单元						
?	无详细报道	石榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	436 ~ 487	变质作用时代	Yang et al., 2002
C305	无详细报道	石榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	457 ± 22	岩浆结晶时代	Song et al., 2005
C305	无详细报道	石榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	423 ± 5	UHP 变质时代	Song et al., 2005
2C39	无详细报道	石榴纯橄岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	420 ± 5	UHP 变质时代	Song et al., 2005
2C12	无详细报道	石榴辉石岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	397 ± 13	UHP 后热事件	Song et al., 2005
2C78	无详细报道	石榴辉石岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	400 ± 12	UHP 后热事件	Song et al., 2005
AQ20-11	N37°39.12', E95°20.83'	HP 基性麻粒岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	447 ± 3	HP 麻粒岩相变质年龄	张建新等, 2007
同上	同上	HP 基性麻粒岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	421 ± 5	MP-LP 麻粒岩相叠加变质年龄	张建新等, 2007
ZM5-5.5	N37°39.54', E95°20.23'	麻粒岩副片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	454 ± 6	HP 麻粒岩相变质年龄	Zhang et al., in press
同上	同上	同上	U-Pb SHRIMP(锆石)	427 ± 3	HP 麻粒岩相变质年龄	Zhang et al., in press
ZM10-5.2	N37°40.05', E95°21.29'	麻粒岩副片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	443 ± 4	HP 麻粒岩相变质年龄	Zhang et al., in press
同上	同上	副片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	425 ± 4	HP 麻粒岩相变质年龄	Zhang et al., in press

续表 2

样品号	取样位置	测定岩石	方法及测定矿物	年龄值(Ma)	年龄解释	参考文献及出处
ZM5-5.4	绿梁山石榴橄榄岩 - 片麻岩单元 N37° 39.55', E95° 20.28'	花岗岩正片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	449 ± 8	麻粒岩相变质增生	Zhang et al., in press
同上	同上	花岗岩正片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	891 ± 31	原岩结晶年龄	Zhang et al., in press
QZ19-9	锡铁山榴辉岩 - 片麻岩单元 N37° 22.90', E95° 32.87'	榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	725 ~ 803	原岩结晶年龄	Zhang et al., 2005b
同上	同上	榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	480 ± 16	榴辉岩相变质年龄	Zhang et al., 2005b
同上	同上	榴辉岩	Sm-Nd Wt-Crt-Omp	436 ± 49	冷却或后期热事件叠榴辉岩加	Zhang et al., 2005b
QZ19-2	N37° 24.51', E95° 30.72'	榴辉岩	U-Pb TMS (锆石)	486 ± 2	榴辉岩相变质年龄	Zhang et al., 2005b
QZ19-2			Ar-Ar (角闪石)	409 ± 1	冷却年龄	Zhang et al., 2005b
XTS-1	N37° 24.10', E95° 30.95'	副片麻岩	U-Pb SHRIMP (锆石)	890 ± 14	新元古代变质年龄	Zhang et al., in press
XTS-1		副片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	437 ± 14	早古生代变质叠加年龄	Zhang et al., press
XT-36	N37° 16.08', E95° 40.32'	副片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	437 ± 6		孟繁聪等, 2005
QZ19-3-1	N37° 4.15', E95° 30.90'	正片麻岩	U-Pb TMS (锆石)	952 ± 13(上交点)	原岩结晶年龄	张建新等, 2003
同上	同上	正片麻岩	U-Pb TMS (锆石)	478 ± 44(下交点)	早古生代变质年龄	张建新等, 2003
Z01-17-1	N37° 18.35', E95° 40.82'	侵入片麻岩中的花岗岩	U-Pb TMS (锆石)	428 ± 1(一致年龄)	HP/UHP后构造热事件	孟繁聪等, 2005
都兰 (北带) 榴辉岩 - 片麻岩单元						
99Y115	无详细报道	榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	443 ~ 495	榴辉岩相变质年龄	Yang et al., 2002
99Y115	无详细报道	榴辉岩	Sm-Nd Wt-Crt-Omp	458 ± 10, 459 ± 3	榴辉岩相变质年龄	Song et al., 2003a
99Y313		榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	457 ± 7	榴辉岩相变质年龄	Song et al., 2006
2D155	N36° 35.40', E98° 25.03'	榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	426 ± 24	锆石边, 退变质年龄?	Yang et al., 2005
01Y132	无详细报道	含柯石英片麻岩	U-Pb SIMS (锆石)	452 ± 14	UHP变质年龄	Yang et al., 2005
01Y132		含柯石英片麻岩	U-Pb SIMS (锆石)	419 ± 14	锆石边部, 退变质年龄	Yang et al., 2005
01Y469	无详细报道	含柯石英片麻岩	U-Pb SIMS (锆石)	434 ± 7	UHP变质年龄	Yang et al., 2005
2D132	N36° 36.75', E98° 26.33'	含柯石英片麻岩	U-Pb SHRIMP (锆石)	423 ± 6	UHP变质年龄	Song et al., 2006
9Y117	N36° 35.40', E98° 25.05'	花岗岩片麻岩	U-Pb SHRIMP (锆石)	403 ± 9	锆石边部, 退变质年龄	Song et al., 2006
D3F	N36° 36.35', E98° 26.24'	榴辉岩	Ar-Ar (白云母)	402 ± 2	退变质或冷却年龄	Song et al., 2006
D5A	N36° 36.39', E98° 26.33'	榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	422 ± 4.3	榴辉岩相变质年龄	Mattinson et al., 2006a
同上	同上	同上	U-Pb SHRIMP(锆石)	433~474	锆石核, 前榴辉岩相进变质年龄	Mattinson et al., 2006a
D5B	N36° 36.39', E98° 26.33'	榴辉岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	449 ± 2	榴辉岩相变质年龄	Mattinson et al., 2006a
同上	同上	同上	U-Pb SHRIMP(锆石)	442 ± 4	早期榴辉岩相变质年龄	Mattinson et al., 2006a
D7B	N36° 31.09', E98° 36.75'	正片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	433 ± 5	晚期榴辉岩相变质年龄	Mattinson et al., 2006a
D15D	N36° 35.94', E98° 28.45'	正片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	927 ± 7	正片麻岩原岩结晶年龄	Mattinson et al., 2006b
ZD21G	N36° 36.25', E98° 28.44'	副片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	921 ± 7	正片麻岩原岩结晶年龄	Mattinson et al., 2006b
D12H	N36° 36.56', E98° 27.36'	副片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	1265 ~ 2465	锆石碎屑核Pb-Pb年龄	Mattinson et al., 未发表数据
ZD22A	N36° 36.06', E98° 28.76'	副片麻岩	U-Pb SHRIMP(锆石)	1916 ~ 2425	锆石碎屑核Pb-Pb年龄	Mattinson et al., 未发表数据
			U-Pb SHRIMP(锆石)	1452 ~ 2554	锆石碎屑核Pb-Pb年龄	Mattinson et al., 未发表数据
都兰 (南带) 榴辉岩 - 片麻岩单元						
99Y205	无详细报道	榴辉岩	U-Pb TMS (锆石)	484 ± 3	榴辉岩相年龄	郝国杰等, 2001
	无详细报道	榴辉岩	Sm-Nd Wt-Crt-Omp	497 ± 87	榴辉岩相变质年龄	Song et al., 2003a

2005a), 所估算的峰期变质条件为  $p = (18.5 \sim 27.3) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 870 \sim 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ , 退变质作用的条件为  $p = (9 \sim 11) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 780 \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$  (表1) (Zhang et al, 2005a)。

对这一单元不同岩石中锆石SHRIMP测定显示其峰期变质时代为500 Ma左右(见表2)(Zhang et al, 2005a), 与张安达等(2004)在同一地区花岗片麻岩的变质增生边  $487 \pm 10 \text{ Ma}$  在误差范围内一致。新获得高压基性麻粒岩中角闪石的Ar-Ar坪年龄为  $474 \pm 5 \text{ Ma}$  (张建新等, 未出版数据), 应代表冷却年龄或角闪岩相叠加的年龄。对正片麻岩中锆石的SHRIMP测定还获得  $\sim 900 \text{ Ma}$ , 代表了其原岩岩浆作用时代(张安达等, 2004; 见表2)。

### 3.3 柴北缘鱼卡—落凤坡榴辉岩—片麻岩(片岩)单元

柴北缘鱼卡—落凤坡榴辉岩—片麻岩单元分布在大柴旦西约40 km, 其北侧和西侧为第四系所覆盖, 东侧和南侧以断层与奥陶纪火山岩接触(图4)。此单元为主要由榴辉岩、高压变质泥质岩(含蓝晶石、硬绿泥石白云母石英片岩)、花岗质片麻岩及少量大理岩所组成(张建新等, 2004)。榴辉岩主要由1 m到数十米大小不等的榴辉岩块体呈透镜状或似层状分布于变质泥质岩和花岗片麻岩中, 大部分榴辉岩较新鲜, 但部分榴辉岩块体的边部已变成石榴角闪岩或斜长角闪岩, 且边部显示了强烈的剪切变形, 具有与相邻围岩一致的面理。

榴辉岩的围岩主要为(含石榴石)白云母花岗片麻岩和变泥质岩两类, 前者主要由长石(35%)、石英(40%)、白云母(10%~15%)等矿物组成, 含有少量的石榴石(<2%)、斜黝帘石、榍石、磷灰石及锆石, 石榴石仅仅呈残晶出现。矿物组合显示花岗片麻岩受到角闪岩相的变质作用, 但局部发现有高钙石榴子石(钙铝榴石分子的摩尔分数达62%)和多硅白云母(Si = 3.4 p.f.u)等高压变质矿物的残留。变质泥质岩常围绕透镜状的榴辉岩分布, 局部可见与似层状的榴辉岩互层, 其典型矿物组合为Grt + Ky + Cld + Phe + Qtz + Rt, 显示变质泥质岩经历了HP变质作用(张建新等, 2004)。榴辉岩的典型矿物组合Grt + Omp + Phe + Qtz + Rt  $\pm$  Ky  $\pm$  Zo。温压估

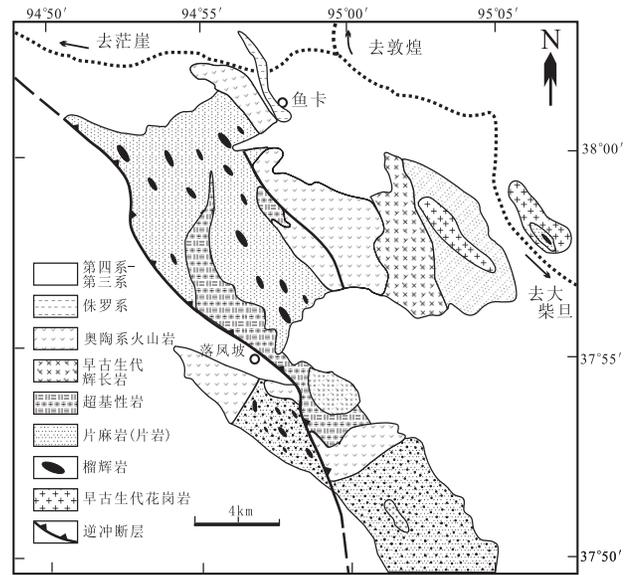


图4 鱼卡—落凤坡榴辉岩—片麻岩(片岩)单元地质简图(据Zhang et al, 2005b)

Fig. 4 Simplified geological map of the Yuka-Luofengpo eclogite-gneiss (schist) unit

算显示榴辉岩峰期变质条件为  $p = (23 \sim 28) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 600 \sim 730 \text{ }^\circ\text{C}$  (Zhang et al, 2005b); 高压变质泥质岩的峰期变质条件为  $p = (23 \sim 31) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 615 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$  (张建新等, 2004), 并且榴辉岩和变质泥质岩具有一致的进变质和退变质演化历史(张建新等, 2005, 看表1)。

对榴辉岩中锆石的U-Pb TIMS方法测定, 获得榴辉岩的变质年龄为488~495 Ma(锆石U-Pb TIMS方法)(张建新等, 2000; Zhang et al, 2005b)。角闪石和多硅白云母的Ar-Ar测定显示这些HP/UHP岩石折返到相对浅的构造层次的年龄为466~477 Ma。最近, 陈丹玲等(2007)通过榴辉岩和围岩的锆石LA-ICPMS U-Pb测定, 获得 $\sim 430 \text{ Ma}$ 的年龄, 并认为其代表了榴辉岩相的变质年龄, 这一年龄值明显小于TIMS方法所获得的年龄值, 也小于榴辉岩中角闪石和多硅白云母的Ar-Ar测定所得到的年龄值, 对不同方法所获得的年龄差异的合理解释将是进一步工作所必须解决的问题(看讨论部分)。

### 3.4 绿梁山石榴橄榄岩—高压麻粒岩单元

绿梁山石榴橄榄岩—高压麻粒岩单元分布在大柴旦南20 km, 其西侧被志留纪花岗岩( $428 \pm 10 \text{ Ma}$ , 锆石U-Pb SHRIMP, 孟繁聪等, 未出版资料; 见表2)所侵入, 其他侧为第四系所覆盖。此

单元以含夕线石(蓝晶石)的副片麻岩和花岗质片麻岩为主,并以包含石榴二辉橄榄岩、纯橄岩和石榴辉石岩所组成的超基性杂岩体为特征(杨建军等,1994; Song et al, 2004, 2005),含石榴子石的超基性杂岩体呈不规则透镜体分布在片麻岩中,长约700 m,宽约250 m(图5)。此外,片麻岩中还夹有少量基性麻粒岩透镜体,其大小从几十厘米到几米不等(图5)。

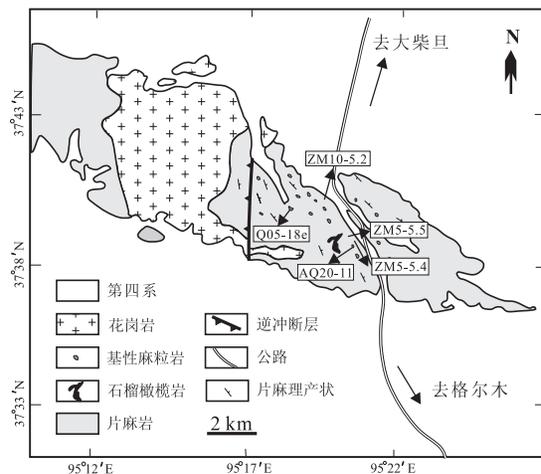


图5 绿梁山石榴橄榄岩-高压麻粒岩地质简图  
(据张建新和孟繁聪, 2007)

Fig.5 Simplified geological map of the Lvliangshan garnet peridotite-HP granulite unit

石榴橄榄岩的主要矿物组合为Grt + Ol + Cpx + Opx, 杨建军等(1994)估算出石榴橄榄岩形成温压条件为  $p = (25 \pm 3) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 850 \pm 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。Song et al (2004, 2005)估算的温压条件为  $p = (50 \sim 65) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 960 \sim 1040 \text{ }^\circ\text{C}$ ,并结合石榴橄榄岩中的一些出熔结构,认为这些岩石可能来源200 km以下。片麻岩中的基性麻粒岩的矿物组合为: Grt + Cpx + Pl + Qtz  $\pm$  Rt,形成的温压条件为  $p = (9.6 \sim 13.5) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 730 \sim 870 \text{ }^\circ\text{C}$ 。其中石榴子石中保留的少量绿辉石( $x(\text{Jd}) = 31\%$ ),显示基性麻粒岩早期可能经历了榴辉岩相变质作用( $p > 15 \times 10^8 \text{ Pa}$ );降压阶段形成矿物的斜方辉石、角闪石、黑云母和钛铁矿等,所反映的温压条件为  $p = (6.2 \sim 8.5) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 720 \sim 860 \text{ }^\circ\text{C}$ (张建新等, 2007b)。副片麻岩的矿物组合为Grt + Ky + Kf + Pl + Qtz + Rt,代表早期高压麻粒岩相阶段组合;晚期形成夕线石、黑云母等矿物,为中低压麻粒岩相阶段的产物(Zhang

et al, in press; Yang et al, 2002)获得石榴橄榄岩中锆石440 ~ 490 Ma的数据,并解释为石榴橄榄岩的峰期变质年龄。最近, Song et al (2005b)通过对石榴橄榄岩及相关的纯橄岩和石榴辉石岩的SHRIMP测定,获得 $457 \pm 22 \text{ Ma}$ 、 $423 \pm 5 \text{ Ma}$ 和 $397 \pm 6 \text{ Ma}$ 三组年龄数据,并分别解释为原岩岩浆结晶年龄, UHP变质年龄和后期热事件叠加年龄。我们对此单元的基性麻粒岩和麻粒岩相片麻岩的SHRIMP测定,获得的麻粒岩相变质年龄为421 ~ 454 Ma(张建新等, 2007b; Zhang et al, in press)。在正片麻岩还获得~900 Ma的年龄,代表了新元古代的岩浆作用时代(Zhang et al, in press)。

### 3.5 锡铁山榴辉岩-片麻岩单元

锡铁山榴辉岩-片麻岩单元分布在柴北缘中段的锡铁山-铅石山(阿莫尼克山)一带,在东南部阿莫尼克山一带被泥盆系沉积岩不整合覆盖(图6南),西侧逆冲到奥陶纪火山岩之上,北侧和东侧为第四系所盖,中东部被志留纪花岗岩所侵入( $428 \pm 1 \text{ Ma}$ , 孟繁聪等, 2005)。此单元主要由含夕线石、石榴子石的副片麻岩、花岗质片麻岩所组成,含有少量大理岩和变质基性岩。榴辉岩呈数米到近百米的透镜状块体分布在夕线石榴黑云片麻岩(副片麻岩)和花岗片麻岩中,透镜体的长轴方向与围岩片麻理走向一致。与柴北缘其他地区的榴辉岩不同,锡铁山榴辉岩已大多变为石榴麻粒岩和石榴角闪岩,仅仅在较大的透镜体(>50 m)的中心保存有较新鲜的榴辉岩露头。在这些大的榴辉岩透镜体的中心和边缘之间,可见从榴辉岩到石榴麻粒岩(石榴子石+单斜辉石+斜长石+钛铁矿)、石榴角闪岩(石榴子石+角闪石+斜长石+榍石),最后到斜长角闪岩的连续转变。在榴辉岩的边部主要以退变质作用形成的单斜辉石、角闪石和斜长石等矿物的定向分布为特征,组成的面理和拉伸线理等变形构造与围岩一致(图6),反映榴辉岩和围岩经历了共同的后榴辉岩相(与榴辉岩折返有关?)的变形作用。

新鲜榴辉岩的矿物组合为Grt+Omp+Rt  $\pm$  Qtz,具有少量退变质作用形成的单斜辉石、角闪石和斜长石。由于矿物组合单一,其确切的峰期压力条件无法估算,根据Grt-Cpx温度计和绿辉石中

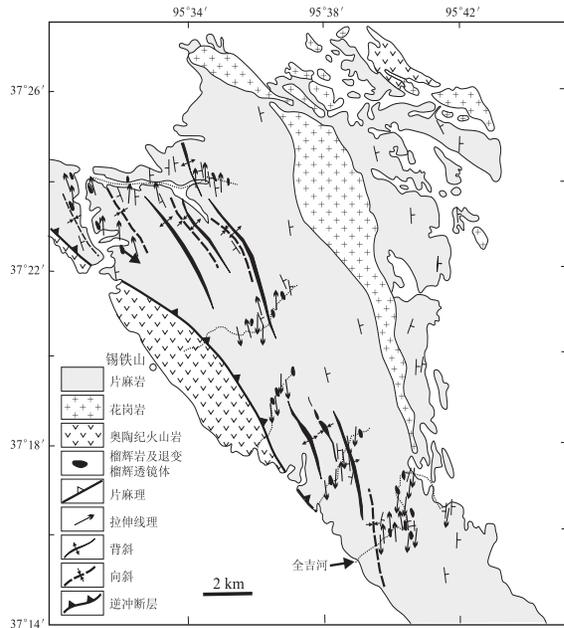


图6 锡铁山榴辉岩-片麻岩单元地质简图  
(据Zhang et al, 2005b)

Fig. 6 Simplified geological map of the Xitianshan eclogite-gneiss unit

硬玉分子含量得到的峰期变质作用的压力下限为  $p > 14 \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 770 \sim 830 \text{ }^\circ\text{C}$ , 在榴辉岩后遭受了高压麻粒岩相的叠加, 根据  $\text{Grt} + \text{Cpx} + \text{Pl} + \text{Qtz}$  的组合, 获得其变质条件为  $p = (10 \sim 14) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 750 \sim 865 \text{ }^\circ\text{C}$  (Zhang et al, 2005b)。副片麻岩的主要矿物组合为  $\text{Grt} + \text{Sil} + \text{Bt} + \text{Kf} + \text{Pl} + \text{Qtz}$ , 形成的温压条件  $p = (6.7 \sim 8.6) \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 705 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  (Zhang et al, in press)。少量蓝晶石呈残晶或在石榴子石中呈包体出现, 可能代表早期高压变质条件下的产物。

锆石U-Pb TIMS 和SHRIMP测定获得榴辉岩的峰期变质时代为480~486 Ma (Zhang et al, 2005b), 原岩年龄为750~800 Ma; 相邻的含夕线石副片麻岩的SHRIMP测定得到的变质年龄为437~441 Ma, 代表麻粒岩相叠加的时代 (孟繁聪等, 2005, Zhang et al, in press)。TIMS方法获得花岗质片麻岩的上交点年龄为  $952 \text{ Ma} \pm 13 \text{ Ma}$ , 下交点年龄为  $478 \text{ Ma} \pm 44 \text{ Ma}$ , 前者被解释为正片麻岩原岩岩浆结晶的年龄, 后者则反映了早古生代的变质年龄 (张建新等, 2003b; Zhang et al, 2006)。退变榴辉岩中角闪石的Ar-Ar年龄为  $409 \pm 1 \text{ Ma}$ , 被解释为冷却年龄 (Zhang et al, 2005b)。此外, 在副片麻岩中还获得~900 Ma的

变质年龄, 认为其代表了新元古代早期的构造热事件 (Zhang et al, in press)。

### 3.6 都兰榴辉岩-片麻岩单元

都兰榴辉岩-片麻岩单元分布在柴北缘东端的野马滩-沙柳河一带 (图7), 被~400 Ma的野马滩花岗岩所侵入 (吴才来等, 2004)。此单元主要由花岗质片麻岩、副片麻岩 (片岩)、少量大理岩、呈透镜状产在片麻岩中的榴辉岩和蛇纹石化超基性岩所组成。片麻岩普遍具有角闪岩相的叶理, 其走向为北西到近东西向, 没有变形的野马滩花岗岩体切割了片麻岩的叶理。并根据岩石组合和形成的温压力条件等进一步分为北亚带和南亚带 (杨经绥等, 2000; Song et al, 2003a), 两者之间被韧性剪切带所分隔 (Xu et al, 2006)。

北带的榴辉岩保存较好, 由  $\text{Grt} + \text{Omp} + \text{Rt} + \text{Qtz} \pm \text{Phe}$ , 石榴子石和绿辉石中保存有少量柯石英假象, 绿辉石中具有石英棒状出溶结构 (宋述光等, 2001; Song et al, 2003b), 榴辉岩峰期变质条件为  $p > 28 \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $T = 600 \sim 750 \text{ }^\circ\text{C}$  (Song et al, 2003b); 副片麻岩中锆石中柯石英的存在反映了围岩也经历了UHP变质作用 (杨经绥等, 2001; Yang et al, 2002; Song et al, 2003b)。南带的榴辉岩保存较差, 以含蓝晶石为特征, 其矿物组合为  $\text{Grt} + \text{Omp} + \text{Ky} \pm \text{Phe} \pm \text{Qtz} \pm \text{Rt}$ , 所估算的榴辉岩相的变质条件为  $T = 610 \sim 680 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 26 \times 10^8 \text{ Pa}$ , 并可能经历了麻粒岩相变质作用的叠加 (Song et al, 2003b; 也看表1)。另外, Mattinson et al (2007, in press) 在都兰北带的超基性岩中还发现残留的  $\text{Grt} + \text{Ol} + \text{Opx} + \text{Cpx}$  组合, 表明部分超基性岩也经历了UHP变质作用。

先前的Sm-Nd和锆石U-Pb同位素年代学给出南北两带榴辉岩的变质年龄大致在444~496 Ma (Yang et al, 2002, Song et al, 2003a), 最近Song et al (2006) 一些更详细的锆石SHRIMP年代学测定获得北亚带榴辉岩的变质年龄为  $457 \pm 10 \text{ Ma}$ , 而片麻岩含柯石英的锆石年龄为  $423 \pm 6 \text{ Ma}$ ; Mattinson (2006a) 在详细的锆石矿物包体研究和锆石微区成分分析的基础上, 通过SHRIMP测定, 获得都兰北带榴辉岩的年龄变化在422~450 Ma之间, 并认为榴辉岩相变质作用可持续20~30 Ma。对都兰南带榴辉岩和相关岩石的年代学资料很

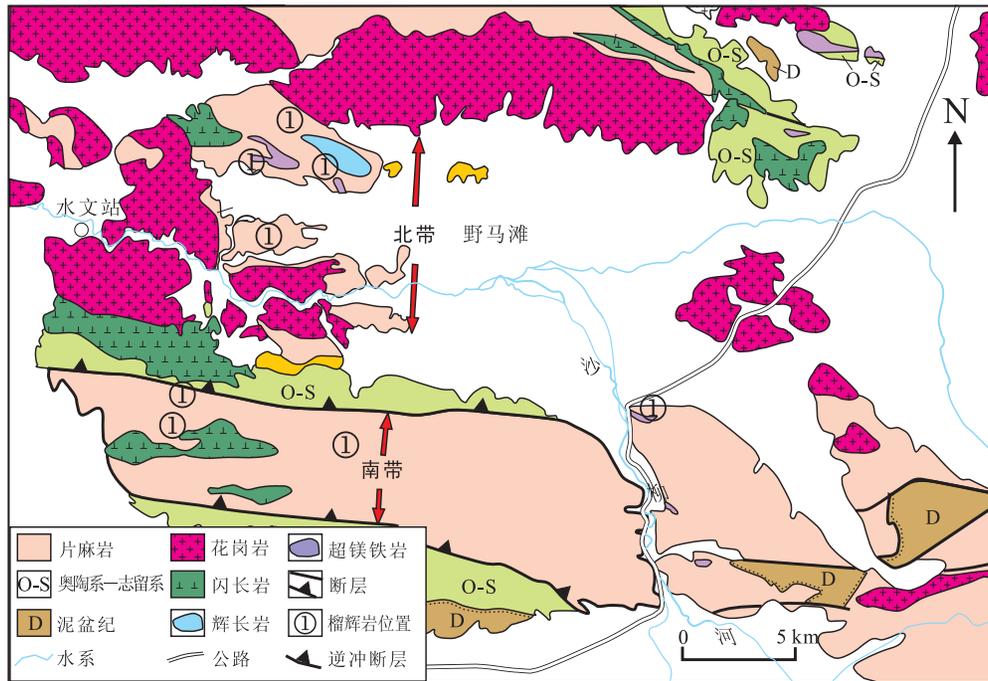


图7 都兰榴辉岩-片麻岩单元地质简图 (据杨经绥等, 2000)

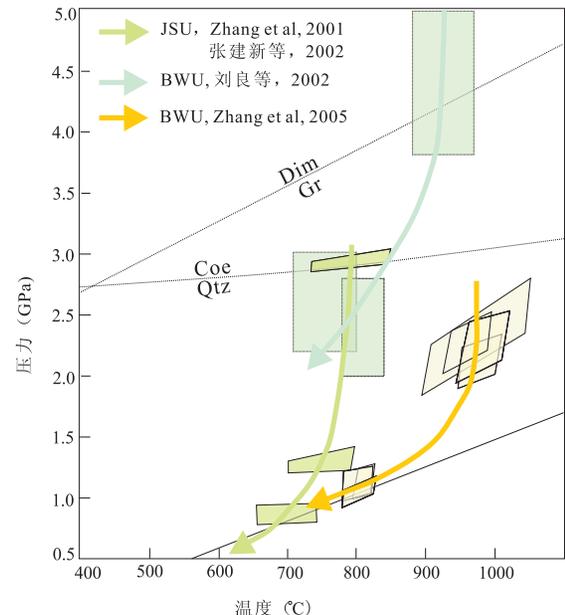
Fig. 7 Simplified geological map of the Dulan eclogite-gneiss unit

少, 郝国杰等 (2001) 对都兰南带沙柳河含蓝晶石榴辉岩的TIMS测定, 得到的年龄为 $484 \pm 4$  Ma。Song et al (2003a) 获得榴辉岩的Sm-Nd等时线 (Wr-Grt-Omp) 年龄为 $497 \pm 87$  Ma, 误差较大。

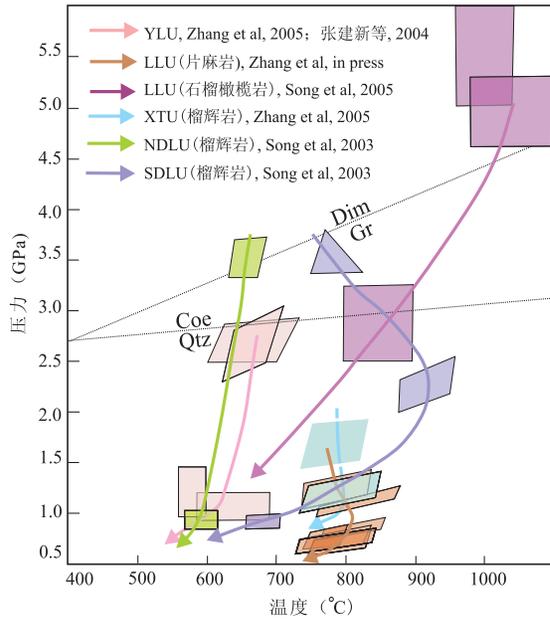
#### 4 讨论: 存在问题及挑战

##### 4.1 南阿尔金-柴北缘 HP/UHP变质带为不同性质、经历不同构造热历史的构造岩石单元的拼合体

从以上对现有的南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带的概述显示, 不同HP/UHP单元虽然均经历了HP/UHP变质作用, 但它们在岩石组合, HP/UHP岩石的保存状态、峰期变质条件特别在后榴辉岩相阶段 (折返阶段) 的变质历史具有明显差异 (图8, 图9)。在目前确定的6个单元中, 4个单元以含榴辉岩和相关的片麻岩 (片岩) 为特征, 而其它两个单元以石榴橄榄岩-高压麻粒岩的岩石组合为特征, 目前还没有发现有榴辉岩的出露。在4个含榴辉岩的单元中, 柴北缘的鱼卡—落凤坡单元和都兰北带榴辉岩保存较好, 研究程度也相对较高。这两个单元主要由榴辉岩、含石榴子石和含蓝晶石的云母片岩 (泥质片岩)、大理岩及花岗岩质片麻岩所组成, 榴辉岩和围岩中石榴子石具有明显的生长环带保存, 其退变质温度压力轨迹

图8 南阿尔金不同HP/UHP变质单元的温度压力轨迹  
Fig. 8  $p$ - $T$  paths of different HP/UHP metamorphic units along the south Altyn Tagh

具有降温降压或近等温降压的特点。在鱼卡—落凤坡单元的泥质片岩中具有典型的HP变泥质岩石组合, 并具有与榴辉岩相似的温度压力演化历史 (张建新等, 2004); 而在都兰北带的泥质片岩的锆石中保存有柯石英 (杨经绥等, 2001; Song et al, 2003b), 这些特征反映了这两个单元没有明显



NDLU: 都兰北带; SDLU: 都兰南带

图9 柴北缘不同HP/UHP变质单元的温度压力轨迹  
Fig. 9  $p$ - $T$  paths of different HP/UHP metamorphic units along the North Qaidam

的后期高温热事件的叠加。而在锡铁山单元、都兰南带和南阿尔金的江杂勒萨依单元，榴辉岩的保存相对较差，岩石明显经历了后榴辉岩相高温变质作用（麻粒岩相）的叠加（Song et al, 2003; Zhang et al, 2005b），围岩中以高温变质组合为特征，并具有部分熔融作用现象，目前在围岩中还没有发现任何HP/UHP变质证据（包括在锆石中的矿物包体），反映了在折返过程中高温热事件的影响。这些含榴辉岩单元在岩石组合及构造热历史的差异可能说明一些HP/UHP岩石可能经历了快速的俯冲和折返历史，而另一些岩石在俯冲到深部后，没有立即折返到浅部，而是增生到造山带的中下地壳，并遭受了后期高温变质事件的叠加。当然，这些推断还需要对不同单元更精细的温度压力演化及构造热历史的重塑来验证。

柴北缘的绿梁山单元和南阿尔金的巴什瓦克单元，目前还没有发现有典型的榴辉岩出露，而主要由石榴橄榄岩、石榴辉石岩和高压麻粒岩（基性麻粒岩和长英质麻粒岩）组成（Yang 1994; 杨建军等, 1994; Song et al, 2004; 刘良等, 2002; 张建新等, 2005a, 2007; Zhang et al, 2005a, in press），虽然已有一些出熔结构显示其可能经历了UHP变质作用（刘良等, 2002, 2003; Song et

al, 2004），但这些单元的显著特征是它们遭受了典型的HP/HT麻粒岩相的变质作用，在巴什瓦克单元还具有UHT（超高温， $>900^{\circ}\text{C}$ ）变质作用的证据（张建新等, 2005; Zhang et al, 2005a），这些特征与欧洲华力西造山带Bohemian地块中HP/HT（UHT）麻粒岩单元（也含有石榴橄榄岩）十分相似（O'Brien et al, 2003及相关参考文献）。对含石榴橄榄岩的HP/HT变质单元的形成虽然也多大陆深俯冲的模式来解释（刘良等, 2002, 2003; Song et al, 2005; Zhang et al, 2005a），但也有学者提出这种含石榴橄榄岩的HP/HT变质单元可能形成于造山带根部增厚的下地壳环境（Tajcmanova et al, 2006）或俯冲带上部（Spursubduction Setting）陆缘弧的根部带（Matte, 1998），后者更好地解释了HP/HT变质单元形成时相对高的地热梯度和变质温度。如现代的喜马拉雅造山带和南美安第斯造山带山根的下地壳底部深度可达70 km，其温压条件与HP/HT麻粒岩的形成条件相符。然而，这样的形成深度却与在这些HP/HT变质单元中所发现的部分岩石可能形成于更深条件下（可达200 km以下）的证据相矛盾，如在南阿尔金的巴什瓦克石榴橄榄岩和长英质高压麻粒岩以及柴北缘绿梁山石榴橄榄岩的中均发现其形成深度可能达200 km以下的出溶结构的证据（刘良等, 2002, 2003, 2005; Song et al, 2004, 2005a），尽管一些出熔结构是否能作为UHP变质作用证据还有争议（Hermann et al, 2005），但在绿梁山的石榴橄榄岩中还报道含有UHP变质作用成因的金刚石（Song et al, 2005b）。与此情况类似，在华力西造山带的Bohemian地块Ergebirge的高压麻粒岩中也发现有金刚石，所包裹的石榴橄榄岩也具有形成在UHP条件下的证据（Nasdala and Massonne, 2000）。因此，不管世界上其它地区的典型石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元还是南阿尔金-柴北缘的巴什瓦克和绿梁山单元，关于其形成的变质条件、构造环境及热历史均存在很大争议。

#### 4.2 单一俯冲还是多期、穿时的俯冲动力学过程

从以上对南阿尔金-柴北缘HP/UHP变质带不同构造岩石单元的概述及表2可以看出，根据目前所获得的同位素年代学资料，南阿尔金-柴北缘HP/UHP变质带早古生代的变质时代变化

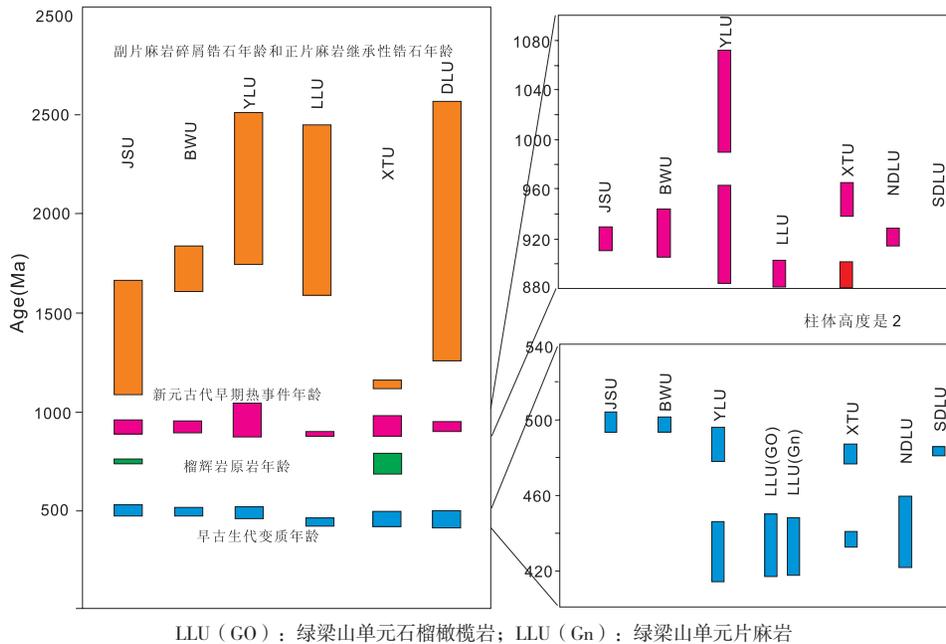


图10 南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带不同单元年代学数据分布特征(资料来源见表2)

Fig. 10 Summary of zircon U-Pb geochronology for different units along the SAT-NQD HP/UHP metamorphic belt

在420~500 Ma之间(表2,图10),这显然与大别—苏鲁UHP变质时代变化在一个较窄的范围不同,而与欧洲阿尔卑斯、华力西造山带及斯堪的那维亚加里东造山带的HP/UHP变质带相似。造成这种变质年代差异可能有3个原因。

1) 不同构造岩石单元经历的HP/UHP变质时代不同,经历的俯冲作用的时间存在明显差异,即多阶段、穿时的俯冲作用模式。目前对阿尔卑斯、斯堪的那维亚加里东造山带HP/UHP变质时代差异多采用这种解释(Rubatto et al, 2003; Hacker and Gans, 2005; Bruecker and Roermund, 2004)。如在阿尔卑斯造山带,不同HP/UHP单元的HP/UHP变质作用时代变化范围超过55 Ma:东阿尔卑斯Pohorje山地区榴辉岩的UHP变质作用时代为白垩纪(~91 Ma)(Miller et al, 2005),中阿尔卑斯Sesia-Lanzo带榴辉岩的变质作用为~65 Ma(Rubatto et al, 1999),西阿尔卑斯Dora Maria地块的~35 Ma的UHP变质作用(Gebauer et al, 1997)。用现今喜马拉雅造山带的情形更容易理解,喜马拉雅造山带西段含柯石英的UHP变质岩的时代46~55 Ma(Kaneko et al, 2003),而在现今的喜马拉雅造山带深部,由于印度板块仍在向亚洲大陆俯冲,可能正在形成新的UHP变质岩。就南阿尔金—柴北缘而言,分布在西段的南阿尔金

江格勒萨依榴辉岩相变质时代为~500 Ma,而分布在最东端的都兰北带榴辉岩和含柯石英片麻岩的HP/UHP变质年龄(420~460 Ma),相差40~80 Ma,当阿尔金榴辉岩已折返到地壳层次,都兰地区的榴辉岩及相关HP/UHP岩石正在发生深俯冲作用和经历HP/UHP变质作用。因此,就目前的年代学数据,似乎用多阶段、穿时的俯冲动力学模式来解释南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带的形成更为合理。

2) 由于后期构造热事件叠加的影响,一些年龄数据并不代表HP/UHP变质作用时代。如我们对柴北缘锡铁山含夕线石片麻岩的SHRIMP测定,获得437 Ma的年龄(孟繁聪等, 2005; Zhang et al, in press)(表2),考虑岩石本身具有高温麻粒岩相的变质组合及锆石不含高压变质矿物包体的特征,这一年龄应代表后榴辉岩相高温热事件的年龄,而不代表高压变质时代。锡铁山单元中~428 Ma的无变形的花岗岩侵入也说明了这一点(孟繁聪等, 2005)。

3) HP/UHP变质作用可持续相当一段时间(>30 Ma)。例如,在同一构造岩石单元,没有明显构造界线的HP/UHP岩石在变质峰期时代却存在明显差异,如在柴北缘都兰北带, Song et al (2006)获得榴辉岩和含柯石英片麻岩的峰期变

质具有>30 Ma的时间差,他们解释为先洋壳俯冲形成榴辉岩,后陆壳俯冲形成含柯石英片麻岩,这就要求榴辉岩和片麻岩必须是构造接触。然而,根据目前我们掌握的野外关系资料,榴辉岩和片麻岩似乎没有明显的构造接触关系,并且一些榴辉岩还显示在片麻岩中呈夹层关系。最近, Mattinson et al (2006a) 对同一单元榴辉岩的锆石SHRIMP测定,获得榴辉岩相的变质时代可变化在422~450 Ma之间,与Song等(2006)得到的榴辉岩和含柯石英片麻岩的峰期变质时代的变化范围接近一致,他们解释榴辉岩相变质作用可在近30 Ma间持续发生。同样,持续的榴辉岩相变质作用(prolonged eclogite-facies metamorphism)也报道出现在世界其它HP/UHP变质带中(McClelland et al, 2006)。当然,对这种情况显然不能用快速的俯冲和折返来解释,相对慢的俯冲作用加上相邻冷的俯冲板片的继续俯冲可能是目前对这种情况的最好解释,“冷”的俯冲板片的“冷冻”作用(refrigeration)可以使HP/UHP作用在深部持续一段时间而不发生热松弛。

另外一个值得注意的问题是:不同研究者对同一HP/UHP变质单元中岩石的年代学测定结果存在明显差异(表2)。例如:通过U-Pb TIMS方法获得鱼卡榴辉岩的变质年龄为488~495 Ma(Zhang et al, 2005b),而最近陈丹玲等(2007)通过U-Pb LA-ICPMS获得鱼卡榴辉岩的变质年龄为430 Ma左右,明显低于前者,也低于榴辉岩中角闪石和多硅白云母的Ar-Ar年龄。虽然TIMS方法有获得混合年龄的可能性,Ar-Ar数据也存在过剩Ar的可能,但由于这些数据均是多个样品测定的结果,这就要求TIMS锆石U-Pb测定过程中多个样品中锆石具有同等程度的混合特征,而Ar-Ar测定过程中要具有同样程度的过剩Ar,这种情况存在的可能性显然很小。假如上述两组数据都代表榴辉岩相形成时代,这是否意味着鱼卡—落凤坡单元可能经历了两期榴辉岩相变质作用?当然,这也需要进一步详细的工作来澄清这些疑惑。

#### 4.3 UHP变质作用是广泛还是局部存在

对于整个南阿尔金—柴北缘地区,经历过超高压变质作用证据的岩石仍然很少,这些证据有:都兰北带片麻岩中锆石的柯石英包体及榴辉

岩石榴子石中柯石英假象(杨经绥等, 2001; 宋述光和杨经绥, 2001; Yang et al, 2002; Song et al, 2003b; 2006), 绿梁山石榴橄榄岩中锆石的金刚石包体(仅1粒)和出溶结构(Song et al, 2004, 2005b); 锡铁山榴辉岩中绿辉石的出溶结构(Zhang et al, 2005b, 2006); 南阿尔金巴什瓦克石榴橄榄岩和片麻岩的出溶结构(刘良等, 2002, 2003); 南阿尔金江格勒萨依榴辉岩中石榴子石的柯石英假象(张建新等, 2002)。考虑到一些出溶结构是否能作为UHP变质作用的证据还存在较大争议(Hermann et al, 2005; Page et al, 2005)以及柯石英假象的不确定性,在南阿尔金—柴北缘HP/UHP变质带中,真正具有确切的UHP变质作用证据的岩石更少。除都兰北带外,在片麻岩中还未发现任何可靠的超高压变质作用证据(包括锆石中的包体矿物证据)。因此,除研究程度不够的因素外,另外的一种可能是南阿尔金—柴北缘地区并不象大别—苏鲁那样存在巨量物质的深俯冲,仅仅少量的岩石经历过UHP变质作用,而大部分岩石仅仅经历过HP变质作用。假如如此,UHP变质岩石和HP变质岩石是怎样的关系?

#### 4.4 榴辉岩、石榴橄榄岩与围岩的关系

榴辉岩和围岩之间关系的“原地”(in situ)(或“原地变质”, in situ metamorphism)和“外来”(foreign)(或构造侵位, tectonic emplacement)模式长期以来是HP/UHP变质带研究争论的焦点问题之一。近年来,由于锆石微区矿物学及年代学研究所取得的一系列进展,在大别—苏鲁UHP变质带及挪威加里东UHP变质带等研究程度较高的地区,榴辉岩与围岩的关系已没有太大的争议(Ye et al, 2000; Liu 2001, 2004; Wain et al, 1997)。而对于南阿尔金—柴北缘地区,榴辉岩和围岩的关系问题仍然是一个尚未解决的基本问题,主要的因素有:

1) 榴辉岩(石榴橄榄岩)的片麻岩围岩中缺乏UHP甚至HP变质作用证据,除都兰地区榴辉岩的围岩片麻岩锆石中发现有柯石英包体、鱼卡—落凤坡榴辉岩的围岩保留有高压变质作用组合(张建新等, 2004)外,南阿尔金和柴北缘其他地区榴辉岩(石榴橄榄岩)的片麻岩围岩还没有发现经历过高压/超高压变质作用的可靠证据,因

此, 对于南阿尔金—柴北缘大多数单元来说, 榴辉岩(石榴橄榄岩)与片麻岩围岩是否经历过同样的HP/UHP变质作用尚不清楚;

2) 正如前面已提到的那样, 在都兰北带, 虽然片麻岩中具有UHP变质作用证据, 但Song et al (2006)认为含柯石英片麻岩的压力峰期时代( $\sim 423$  Ma)明显小于榴辉岩的峰期变质时代( $\sim 457$  Ma), 即它们并不是同时俯冲到UHP变质作用所达到的深度, 这意味着目前榴辉岩和片麻岩空间上相邻的关系一定为后期构造接触关系。最近, Mattinson et al (2006a)对都兰北带的榴辉岩的锆石SHRIMP测定, 获得榴辉岩相的变质时代变化在422~450 Ma之间(Mattinson et al, 2006), 认为在近30 Ma的间隔内, 榴辉岩可发生持续的榴辉岩相变质作用(prolonged eclogite-facies metamorphism), 也同时否认了榴辉岩和围岩构造侵位关系的可能, 并认为连续俯冲板片的“冷冻”作用(refrigeration)可以使HP/UHP作用在深部持续一段时间而没有发生热松弛。

石榴橄榄岩和围岩的关系问题也存在明显的争议。如在绿梁岩单元中, Song et al (2004, 2005a)根据石榴橄榄岩中不同矿物的出溶结构, 它可能形成于200 km以下的条件。尽管我们的研究显示石榴橄榄岩的围岩(长英质片麻岩)经历过高压麻粒岩相变质阶段历史(Zhang et al, in press), 所包裹的基性麻粒岩还有代表早期榴辉岩相阶段的绿辉石残留(张建新等, 2007), 然而, 在长英质片麻岩中还没有发现任何UHP变质作用信息(包括锆石中的包体), 这究竟是这些长英质片麻岩在早期曾经历过UHP变质作用, 但在UHP过程中长英质矿物保持亚稳定状态(metastability), 或UHP矿物形成在后期构造热事件中被完全改造, 还是长英质片麻岩从来没有达到过UHP变质条件, 它们与石榴橄榄岩为地壳某一深度因构造因素被联系到一起? 目前的资料还无法回答这一问题。另外, 如前所述, Song et al (2005b)对榴橄榄岩及相关的纯橄岩和石榴辉石岩的SHRIMP测定, 获得 $457 \pm 22$  Ma,  $423 \pm 5$  Ma和 $397 \pm 6$  Ma三组年龄数据, 并分别解释为原岩岩浆结晶年龄, UHP变质年龄和后期热事件叠加年龄。而我们对此单元的长英质片麻岩和基性麻粒

岩的SHRIMP测定, 获得高压麻粒岩相变质年龄为443~454 Ma, 中压麻粒岩相变质时代为421~428 Ma(张建新等, 2007; Zhang et al, in press; 表2)。如果这两种结果都是正确的话, 那么石榴橄榄岩的原岩结晶时代和UHP变质时代就分别与围岩(长英质片麻岩和基性麻粒岩)的高压麻粒岩阶段和中低压麻粒岩时代相近, 这至少说明在420 Ma以前, 石榴橄榄岩和其相邻的长英质片麻岩没有经历共同的构造热历史。然而, 它们在同一时间内, 所处的构造背景为什么有如此大的差异, 怎样与区域动力学背景相联系? 就目前的岩石学还是年代学资料, 都无法对石榴橄榄岩和围岩关系给出确切的回答, 进一步详细的研究必不可少。

谨以此文祝贺董申保院士九十寿辰, 并向董先生在中国变质地质学研究领域的开拓性工作致敬。

## 参考文献 [References]:

- Brueckner H K, Van Roermund H L M. 2004. Dunk tectonics: A multiple subduction/eduction model for the evolution of the Scandinavian Caledonides. *Tectonics*, 23, TC2004, doi: 10.1029/2003TC001502.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社, 28-62.
- [Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province (BGMQ), 1991. Regional Geology of Qinghai Province. Geological Publishing House, Beijing, China. 28-62. (in Chinese)]
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区地质志. 北京: 地质出版社, 315-318.
- [Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing, Geological Publishing House, 315-318. (in Chinese)].
- 车自成, 孙勇. 1996. 阿尔金麻粒岩相杂岩的时代及塔里木盆地的基底. *中国区域地质*, 15 (1): 51-57.
- [Che Zicheng, Sun Yong. 1996. The age of the Altun granulite facies complex and the basement of the Tarim Basin. *Regional Geology of China*, 56: 51-57. (in Chinese with English abstract)]
- 陈丹玲, 孙勇, 刘良. 2007. 柴北缘鱼卡河榴辉岩围岩的变质时代及其地质意义. *地学前缘*, 14: 108-116.
- [Chen Danling, Sun Yong, Liu Liang. 2007. Metamorphic age and its geological implication for country rocks of eclogites in the Yuka of the north Qaidam Mountains. *Earth Science Frontiers*, 14: 108-116. (in Chinese with English abstract)]
- Chopin C. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 212: 1-14.
- 董国安, 杨宏仪, 刘敦一, 等. 2007. 阿拉善地块“龙首山岩群”碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义. *科学通报*, 52: 688-697.

- [Dong Guoan, Yang Hounyi, Liu Dunyi, et al. 2007. SHRIMP U-Pb geochronology of the detrital zircons from "Longshoushan Group" in the Alashan block and its tectonic significance. *Chinese Science Bulletin*, 52: 1414–1425.]
- Ernst W G, Liou J G. 1995. Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling–Dabie–Sulu and Franciscan metamorphics. *Geology*, 23(4): 353–356.
- Gebauer D, Schertl H P, Brix M, et al. 1997. 35 Ma old ultrahigh-pressure metamorphism and evidence for very rapid exhumation in the Dora-Maira Massif, Western Alps. *Lithos*, 41: 5–24.
- 郭进京, 赵凤清, 李怀坤, 等. 1999. 中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩. *地球学报*, 20 (1): 10–15.
- [Guo Jinjing, Zhao Fengqing, Li Huaikun, et al. 1999. Jinning period collision-type granite in the eastern segment of the central Qilian Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 20 (1): 10–15. (in Chinese with English abstract)]
- Hacker B R, Gans P H. 2005. Continental collisions and the creation of ultrahigh-pressure terranes: Petrology and thermochronology of nappes in the central Scandinavian Caledonides. *Geological Society of America Bulletin*, 117: 117–134.
- Hermann J, O'Neill H S C, Berry A J. 2005. Titanium solubility in olivine in the system TiO<sub>2</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub>: no evidence for an ultra-deep origin of Ti-bearing olivine. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148: 746–760
- 郝国杰, 陆松年, 李怀坤, 等. 2001. 柴北缘沙柳河榴辉岩岩石学及年代学初步研究. *前寒武纪研究进展*, 24: 154–162.
- [Hao Guojie, Lu Songnian, Li Huaikun. 2001. Determination and significance of eclogite on Shaliuhe, in the north margin of Qaidam Basin. *Progress in Precambrian Research*, 24(3): 154–162. (in Chinese with English abstract)]
- Kaneko Y, Katayama I, Yamamoto H, et al. 2003. Timing of Himalayan ultrahigh-pressure metamorphism: sinking rate and subduction angle of the Indian continental crust beneath Asia: *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 589–599.
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68: 277–279.
- 赖少聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 柴北缘奥陶纪火山作用及构造背景. *西安地质学院学报*, 18(3): 8–14.
- [Lai Shaocong, Deng Jinfu, Zhao Hailing. 1996. Volcanism and tectonic setting during Ordovician period on north margin of Qaidam. *Journal of Xi'an College of Geology*, 18(3): 8–14. (in Chinese with English abstract)]
- 李惠民, 陆松年, 郑建康, 等. 2001. 阿尔金东段花岗岩片麻岩中3.6Ga 锆石的地质意义. *岩石矿物地球化学通讯*, 20: 259–262.
- [Li Huimin, Lu Songnian, Zheng Jiankang, et al. 2001. 3.6 Ga zircon in granitic gneiss from the eastern Altyn Tagh and its geological implication. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20: 259–262. (in Chinese with English abstract)]
- Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, et al. 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, south-western Sulu terrane, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 22: 315–326.
- Liu J B, Ye K, Maruyama S, et al. 2001. Mineral inclusions in zircon from gneisses in the ultrahigh-pressure zone of the Dabie Mountains, China. *The Journal of Geology*, 109: 523–535.
- 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 1996. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及地质意义. *科学通报*, 41 (14): 1485–1488.
- [Liu Liang, Che Zicheng, Luo Jinhai, et al. 1996. Identification of the eclogite at the west part of Altyn Tagh Mountains and its geological implications: *Chinese Science Bulletin*, 41: 1485–1488 (in Chinese)].
- 刘良, 孙勇, 校培喜, 等. 2002. 阿尔金发现超高压(>3.8 Ga)石榴二辉橄榄岩. *科学通报*, 47(9): 657–662.
- [Liu Liang, Sun Yong, Xiao Peixi, et al. 2002. Discovery of ultrahigh pressure magnesite-bearing garnet lherzolite (3.8 Gpa) in the Altyn Tagh, Northwest China. *Chinese Science Bulletin*, 47: 881–885.]
- 刘良, 孙勇, 罗金海, 等. 2003. 阿尔金英格利萨依花岗岩片麻岩超高压变质. *中国科学(D辑)*, 33.: 1184–1192.
- [Liu Liang, Sun Yong, Luo Jinhai, et al. 2003. Ultra-high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area, Altun Mountains, NW China. *Science in China (Series D)*, 33: 1184–1192. (in Chinese)]
- 刘良, 陈丹玲, 张安达, 等. 2005. 阿尔金超高压(>7G Pa)片麻状(含)钾长石辉石岩—石榴子石出熔单斜辉石的证据. *中国科学(D辑)*, 35: 105–114.
- [Liu Liang, Chen Danling, Zhang Anda, et al. 2005. UHP (>7 GPa) gneissic K-feldspar pyroxenite—evidence from clinopyroxene exsolutions in garnet. *Science in China (Series D)*, 35: 105–114. (in Chinese)]
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 2007. 阿尔金江杂勒萨依榴辉岩和围岩锆石LA-ICP-MS微区原位定年及其地质意义. *地学前缘*, 14: 98–107.
- [Liu Liang, Zhang Anda, Chen Danling, et al. 2007. Implications based on LA-ICPMS zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 98–107. (in Chinese with English abstract)]
- Maruyama S, Liou J G, Terabayashi M. 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geological Review*, 38: 490–596.
- Matte P. 1998. Continental subduction and exhumation of HP rocks in Paleozoic orogenic belts: Uralides and Variscides, GEF, 120: 209–222.
- Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, et al. 2006a. Age and Duration of Eclogite-facies Metamorphism, North Qaidam HP/UHP Terrane, Western China. *American Journal of Science*, 306: 683–711.
- Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, et al. 2006b. Geochronology and tectonic significance of Middle Proterozoic granitic orthogneiss, North Qaidam HP/UHP terrane, Western China: *Mineralogy and Petrology*, 88: 227–241
- Mattinson C G, Menold C A, Zhang J X, et al. 2007. High and ultrahigh-pressure metamorphism in the North Qaidam and South Altyn terranes, Western China: *International Geology Review*, in press.
- McClelland W C, Power S E, Gilotti J A, et al. 2006. U-Pb SHRIMP geochronology and trace element geochemistry of coesite-bearing zircons, North-East Greenland Caledonides. // Hacker B R, McClelland B and Liou J G, eds. Geological Society of America Special Paper, Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction, *Geological Society of America Special Paper*, 403: 23–43.
- 梅华林, 于海峰, 陆松年, 等. 1998. 甘肃敦煌太古宙英云闪长岩: 单颗粒锆石U-Pb年龄和Nd同位素. *前寒武纪研究进展*, 21: 41–45.
- [Mei Hualing, Yu Haifeng, Lu Songnian, et al. 1998. Archean tonalite in the Dunhuang, Gansu Province: age from the U-Pb single zircon and Nd isotope. *Progress in Precambrian Research*, 21: 41–45. (in

- Chinese with English abstract)]
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥, 2005. 柴北缘锡铁山早古生代HP/UHP变质作用后的构造热事件——花岗岩和片麻岩的同位素与岩石地球化学证据. *岩石学报*, 21(1): 45–56.
- [Meng Fancong, Zhang Jianxin, Yang Jingsui. 2005. Tectono-thermal event of post-HP/UHP metamorphism in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, Western China: isotopic and geochemical evidence of granite and gneiss. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 45–56. (in Chinese with English Abstract)]
- Miller C, Mundil R, Thoni M, et al. 2005. Refining the timing of eclogite metamorphism: a geochemical, petrological, Sm-Nd and U-Pb case study from the Pohorje Mountains, Slovenia (Eastern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150: 70–84.
- Nasdala L, Massonne H J. 2000. Microdiamonds from the Saxonian Erzgebirge Germany: in situ micro-Raman characterization. *European Journal of Mineralogy*, 12: 495–498.
- O'Brien P J, Rötzler J. 2003. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 3–20.
- Page F Z, Essene E J, Mukasa S B. 2005. Quartz exsolution in clinopyroxene is not proof of ultrahigh pressures: evidence in the eclogites from the Eastern Blue Ridge, Southern Appalachians, USA. *American Mineralogist*, 90: 1092–1099.
- Reinecke T. 1998. Prograde high to ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation of oceanic sediments at Lago di Cignana, Zermatt-Sea zone, western Alps. *Lithos*, 42: 147–189.
- Rubatto D, Gebauer D, Compagnoni R. 1999. Dating of eclogite-facies zircons: the age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 167: 141–158.
- Rubatto D, Liati A, Gebauer D. 2003. Dating UHP metamorphism. *EMU Notes in Mineralogy*, 5: 341–361.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 2004a. 北祁连山玉沟蛇绿岩形成于晚震旦世的SHRIMP年龄证据. *地质学报*, 78(5): 649–657.
- [Shi Rendeng, Yang Jingsui, Wu Cailai, et al. 2004a. Late Sinian Yushigou ophiolite in the north Qilian Mountains: evidences from SHRIMP dating. *Acta Geologica Sinica*, 78: 649–657. (in Chinese with English abstract)]
- 史仁灯, 吴才来, 杨经绥, 等. 2004b. 柴北缘超高压变质带中的岛弧火山岩. *地质学报*, 78(1): 53–64.
- [Shi Rendeng, Wu Cailai, Yang Jingsui, et al. 2004b. Island arc volcanic rocks in the UHP metamorphic belt in the North Qaidam Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 78: 53–64. (in Chinese with English abstract)]
- 宋述光, 杨经绥. 2001. 柴北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体: 超高压变质作用的证据. *地质学报*, 75(2): 180–185.
- [Song Shuguang, Yang Jingsui. 2001. Sanidine + quartz inclusions in Dulan eclogites: evidences for UHP metamorphism on the north margin of the Qaidam basin, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75: 180–185. (in Chinese with English abstract)]
- 宋述光, 张立飞, Niu Y, 等. 2004. 北祁连山榴辉岩SHRIMP定年及其构造意义. *科学通报*, 49(6): 592–595.
- [Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Y, et al. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP ages of eclogites in the North Qilian Mountains and their tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 49, 592–595. (in Chinese)]
- Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. 2003a. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM terrane, the north Qaidam, NW China. *Lithos*, 70: 195–211.
- Song S G, Yang J, Xu Z, et al. 2003b. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the north Qaidam, northern Tibet, NW China. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 631–644.
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L. 2004. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. *American Mineralogist*, 89: 1330–1336.
- Song S G, Zhang L F, Chen J. 2005a. Sodic amphibole exsolutions in garnet from garnet-peridotite, North Qaidam UHPM belt, NW China: implications for ultradeep-origin and hydroxyl defects in mantle garnets. *American Mineralogist*, 90: 814–820.
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. 2005b. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, Northern Tibetan Plateau: A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 234: 99–118.
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data. *Journal of Petrology*, 47: 435–455.
- Tagiri M, Bakirov A, Nakajima T, et al. 1995. Mineral parageneses and metamorphic *p-T* paths of ultrahigh-pressure eclogites from Kyrgyzstan Tainshan. *The Island Arc*, 4: 280–292.
- Tajmanova L, Konopasek J, Schulmann K. 2006. Thermal evolution of the orogenic lower crust during exhumation within a thickened Moldanubian root of the Variscan belt of central European. *Journal of Metamorphic Geology*, 24: 119–134.
- Wain A. 1997. New evidence for coesite in eclogites and gneisses: defining an ultrahigh-pressure eclogite transition in the Western Gneiss Region, Norway. *Geology*, 25: 927–930.
- Wan Y, Xu Z, Yang J, et al. 2001. Ages and compositions of the Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and its adjacent areas. *Acta Geologica Sinica*, 75: 375–384.
- Wan Y S, Zhang J X, Yang J S, et al. 2006. Geochemistry of high-grade metamorphic rocks of the North Qaidam Mountains and their geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 174–184.
- 吴才来, 杨经绥, Wooden J, 等. 2001. 柴达木山花岗岩锆石SHRIMP定年. *科学通报*, 46(20): 1743–1747.
- [Wu Cailai, Yang Jingsui, Wooden J L, et al. 2001. Zircon SHRIMP dating of granite from Qaidamshan, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 46(20): 1743–1747. (in Chinese)]
- 吴才来, 杨经绥, Wooden J L, 等. 2004. 柴达木北缘都兰野马滩花岗岩锆石SHRIMP定年. *科学通报*, 49(16): 1667–1672.
- [Wu Cailai, Yang Jingsui, Wooden J L, et al. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP dating of the Yematan Batholith in Dulan, north Qaidam, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1736–1740.]
- Wu H Q, Feng Y M, Song S G. 1993. Metamorphic and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 523–536.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. *地质学报*, 73(3): 193–205.
- [Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, et al. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73: 193–205. (in Chinese with English abstract)]

- Xu Z Q, Yang J S, Wu C L, et al. 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the northern Qaidam Ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 160–173.
- Ye K, Yao Y, Katayama I, et al. 2000. A real extent of Ultra-high pressure metamorphism in the Sulu terrane of east China: evidence from coesite inclusions in zircon from country rock granitic gneiss. *Lithos*, 52: 157–164.
- 于海峰, 陆松年, 刘永顺, 等. 2002. “阿尔金山岩群”的组成及其构造意义. *地质通报*, 21 (12): 835–841.
- [Yu Haifeng, Lu Songnian, Xiu Qunye, et al. 2002. Composing of the Altyn Tagh formation-complex and its tectonic signification. *Geological Bulletin of China*, 21(12): 834–840.
- 袁桂邦, 王懋功, 李惠民, 等. 2002. 柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石 U-Pb年龄及意义. *前寒武纪研究进展*, 25(1): 36–40.
- [Yuan Guibang, Wang Maogong, Li Huimin, et al. 2002. Zircon U-Pb age of gabbro from Luiangshan area, North Qaidam Mountains and its implication. *Progress in Precambrian Research*, 25(1): 36–40. (in Chinese with English abstract)]
- 杨建军, 朱红, 邓晋福, 等. 1994. 柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义. *岩石矿物学杂志*, 13 (2): 97–104.
- [Yang Jianjun, Zhu Hong, Deng Jinfu, et al. 1994. The discovery of garnet peridotite in Northern Qaidam Mountains, and its significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13: 97–104. (in Chinese with English abstract)]
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 2001. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带发现典型超高压矿物—柯石英. *地质学报*, 75 (2): 175–179.
- [Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, et al. 2001. Discovery of coesite in the north Qaidam Early Paleozoic ultrahigh-pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175–179. (in Chinese with English abstract)]
- 杨经绥, 许志琴, 宋述光, 等. 2000. 青海都兰地区榴辉岩的发现及对中央造山带高压-超高压变质带研究的意义. *地质学报*, 74 (2): 156–168.
- [Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Song Shuguang, et al. 2000. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai Province and significance for the HP-UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China. *Acta Geologica Sinica*, 70(2): 156–168. (in Chinese with English abstract)]
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 1998. 柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义. *科学通报*, 43 (14): 1544–1549.
- [Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Haibin, et al. 1998. The discovery of eclogite in the northern margin of Qaidam basin, China. *Chinese Science Bulletin*, 43: 1755–1760.]
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等. 2004. 柴北缘盆地北缘新元古代蛇绿岩的厘定. *地质通报*, 23 (9–10): 892–898.
- [Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, et al. 2004. Neoproterozoic ophiolites in the North Qaidam. *Geological Bulletin of China*, 23: 892–898. (in Chinese with English abstract)]
- Yang J S, Xu Z Q, Zhang J, et al. 2001. Tectonic significance of early Paleozoic high-pressure rocks in Altun-Qaidam-Qilian Mountains, northern China. *Geological Society of America, Memoir*, 194: 151–170.
- Yang J S, Xu Z Q, Zhang J, et al. 2002. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. *Terra Nova*, 14(5): 397–404.
- Yang J S, Liu F, Wu C L, et al. 2005. Two ultrahigh-pressure metamorphic events recognized in the central orogenic Belt of China: Evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons. *International Geology Review*, 47: 327–343.
- 张安达, 刘良, 孙勇, 等. 2004. 阿尔金超高压花岗岩片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. *科学通报*, 49: 2335–2341.
- [Zhang Anda, Liu Liang, Sun Yong, et al. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb dating for UHP granitic gneiss in the Altyn Tagh and its implication. *Chinese Science Bulletin*, 49: 2335–2341. (in Chinese)]
- Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. *Lithos*, 56: 189–208.
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. 2005a. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China: *p-t* history and U-Pb geochronology. *Journal of Metamorphic Geology*, 23: 491–510.
- Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, et al. 2005b. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: petrological and isotopic constraints. *Lithos*, 84: 51–76.
- Zhang J X, Yang J S, Meng F C, et al. 2006. U-Pb isotopic studies of eclogites and their host gneisses in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China: New evidence for an early Paleozoic HP-UHP metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 143–150.
- Zhang J X, Meng F C, Wan Y S. 2007. A cold Early Paleozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: petrological and U-Pb geochronological constraints. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 285–304.
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. 2007. Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the North Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, Western China: evidence from zircon U-Pb geochronology. *Geological Society of America Bulletin*, in press.
- 张建新, 许志琴, 徐惠芬, 等. 1997. 北祁连中段俯冲杂岩、火山弧的时代探讨. *岩石矿物学杂志*, 16: 112–119.
- [Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Xu Huifen, et al. 1997. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16: 112–119. (in Chinese with English abstract)]
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 2000. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄:来自U-Pb及Ar-Ar同位素测定的证据. *地球化学*, 29(3): 217–222.
- [Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. 2000. Peak and retrograde age of eclogites at the northern margin of Qaidam basin, northwestern China: evidence from U-Pb and Ar-Ar dates. *Geochimica*, 29(3): 217–222. (in Chinese with English abstract)]
- 张建新, 张泽明, 许志琴, 等. 1999. 阿尔金构造带西段榴辉岩的Sm-Nd及U-Pb年龄——阿尔金中加里东期山根存在的证据. *科学通报*, 44: 1109–1112.
- [Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, et al. 1999. The age of U-Pb and Sm-Nd for eclogite from the western segment of Altyn Tagh tectonic belt. *Chinese Science Bulletin*, 44: 2256–2259.]
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 2002. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据. *科学通报*, 47: 231–234.
- [Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. 2002. Evidence for UHP metamorphism of eclogite from the Altun Mountains, *Chinese Science Bulletin*, 47: 751–755.]
- 张建新, 孟繁聪, 万渝生, 等. 2003a. 柴达木盆地南缘金水口群的早

- 古生代构造热事件: 锆石U-Pb SHRIMP年龄证据. 地质通报, 22 (6): 397-404.
- [Zhang Jianxin, Meng Fancong, Wan Yusheng, et al. **2003a**. Early Paleozoic tectono-thermal event of the Jinshuikou Group on the southern margin of Qaidam: Zircon U-Pb SHRIMP age evidence. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 397-404. (in Chinese with English abstract)]
- 张建新, 万渝生, 孟繁聪, 等. 2003b. 柴北缘夹榴辉岩的片麻岩 (片岩) 地球化学、Sm-Nd和U-Pb同位素研究——深俯冲的前寒武纪变质基底? 岩石学报, 19: 443-451.
- [Zhang Jianxin, Wan Yusheng, Meng Fancong, et al. **2003b**. Geochemistry, Sm-Nd and U-Pb isotope study of gneisses (schists) enclosed in the North Qaidam Mountains—deeply subducted Precambrian metamorphic basement? *Acta Petrologica Sinica*, 19: 443-451. (in Chinese with English abstract)].
- 张建新, 孟繁聪, 杨经绥. 2004. 柴北缘西段榴辉岩相的变质泥质岩: 榴辉岩与围岩“原地”关系的证据. 中国科学(D), 34 (9): 825-834.
- [Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yang Jingsui. **2004**. Eclogitic metapelites in the western segment of the north Qaidam Mountains: evidence on “in situ” relationship between eclogite and its country rock: *Science in China (Ser. D)*, 47: 1102-1112].
- 张建新, 孟繁聪. 2005. 南阿尔金含假蓝宝石高压基性麻粒岩及其意义. 科学通报, 50: 167-171.
- [Zhang Jianxin, Meng Fancong. **2005**. Sapphirine-bearing high pressure mafic granulite and its implications in the South Altyn Tagh. *Chinese Science Bulletin*, 50: 265-269.]
- 张建新, 孟繁聪, 杨经绥. 2005. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的PT演化历史. 岩石矿物学杂志, 24 (4): 245-254.
- [Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yang Jingsui. **2005**. PT evolution of the Yuka eclogite in the northern Qaidam Mountains, *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4): 245-254. (in Chinese with English abstract)]
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等. 2007a. 阿尔金HP/LT蓝片岩和榴辉岩的Ar-Ar年代学及其区域构造意义. 中国地质, 出版中.
- [Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao, et al. **2007a**.  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  geochronology of the eclogite and blueschist from the North Altyn Tagh and their geological implication. *Geology in China*, in press. (in Chinese with English abstract)]
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等. 2007b. 柴北缘绿梁山高压基性麻粒岩的变质演化历史: 岩石学及锆石SHRIMP年代学证据. 地学前缘, 14: 85-97.
- [Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao, et al. **2007b**. Metamorphic history recorded in high pressure mafic granulites in Luliangshan, North Qaidam Mountains: evidence from Petrology: *Earth Science Frontiers*, 14: 85-97. (in Chinese with English abstract)]
- Zhang L, Ellis D J, Jiang W. **2002**. 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 eclogite. *American Mineralogist*, 87: 853-860.
- 张旗, 周国庆, 2001. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 60-66.
- [Zhang Qi, Zhou Guoqing. 2001. Ophiolites of China. Beijing: Science Press, 60-66. (in Chinese)]

## Progress, Controversies and Challenge of Studies on South Altyn Tagh–North Qaidam HP/UHP Metamorphic Belt

ZHANG Jian-xin<sup>1</sup>, MENG Fan-cong<sup>1</sup>, Mattinson C G<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China;

2. Department of Geological and Environmental Sciences, Stanford University, Stanford, CA 94305-2115, U S A )

**Abstract:** The South Altyn Tagh (SAT)–North Qaidam (NQD) HP/UHP metamorphic belt extends approximately 1000 km along the northern margin of the Tibetan Plateau, and is truncated by the Altyn Tagh sinistral strike-slip fault and splitted into two parts: the South Altyn Tagh region and the North Qaidam region. Based on rock associations, petrologic criteria and the field relationships, six HP/UHP metamorphic units can be distinguished in the South Altyn Tagh (SAT)–North Qaidam (NQD) region (Fig. 1A). From west to east, they are: the Jianggalesayi eclogite-gneiss unit (JSU), the Bashiwake garnet peridotite-high pressure granulite unit (BWU), the Yuka eclogite-gneiss (schist) unit (YLU), the Luliangshan garnet peridotite-gneiss unit (LLU), the Xitieshan eclogite-gneiss unit (XTU) and the Dulan eclogite-gneiss unit (DLU). The geological relationship, petrology and geochronology indicate that these six HP/UHP metamorphic units have different rock associations, and underwent different  $p$ - $T$  conditions and metamorphic histories. Geochronological dating for these eclogite-facies metamorphics yields ages between 500 and 420 Ma. This implies that a possible multiple or disachronous subduction took place along the SAT–NQD HP/UHP metamorphic belt.

**Key words:** South Altyn Tagh–North Qaidam; HP/UHP metamorphic belt; HP/UHP metamorphic units; multiple subduction