2007 年 9 月，第 13 卷，第 3 期，515–525页
September 2007，Vol. 13， No.3， p. 515–525

高 校 地 质 学 报
Geological Journal of China Universities

榴辉岩的两种变质演化轨迹和俯冲大陆地壳的差异折返——以柴北缘都兰超高压地体为例

宋述光[1]，Niu Yaoling[2]，张立飞[1]

（1. 北京大学 造山带和地壳演化教育部重点实验室，地质学系，北京 100871
2. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK）

摘要：都兰榴辉岩地体位于柴北缘—南阿尔金超高压变质带的东端，是唯一确定含柯石英的超高压变质地体，约700 km，其特点是含有两个特征不同的变质亚带，并经历了不同的折返过程。柯石英假像和温压计算表明两带榴辉岩峰期变质的压力都在柯石英的稳定域（2.8~3.3 GPa），但它们退化变质的*p–T*轨迹具有明显不同的特征。北带榴辉岩经历了两个阶段的折返：早期从地幔深度快速折返到中部地壳层次，伴随岩石的等温降压，并发生角闪岩相退化变质；晚期抬升到地壳浅部。都兰南带榴辉岩折返过程中经历了高压麻粒岩相变质的改造，高压麻粒岩阶段的*p–T*条件为p = 1.9~2.0 GPa，T = 873~948℃, 并进一步经历了角闪岩相退化变质，说明都兰南带榴辉岩折返速率较慢，发生了壳幔过渡带（或加厚的深部地壳）层次的强烈热松弛。这种热松弛发生在许多大陆俯冲带的超高压岩石的折返过程中，并且是榴辉岩发生深熔作用的主要机制。都兰两个变质带不同的变质演化轨迹反映了俯冲的大陆地壳具有差异折返的特征。

关键词：榴辉岩；超高压变质；*p–T*轨迹；差异折返；都兰；柴北缘
中图分类号：P588.346　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006–7493（2007）03–0515–11

高压–超高压变质带是古板块汇聚边界及古大洋俯冲和大陆碰撞造山的重要标志，记录了地壳物质从俯冲到折返的完整动力学过程（Smith，1988；Ernst and Liou，1995；Wang and Cong，1996；Maruyama et al，1996；Ernst，2001；Song et al，2006）。虽然经历了长期的研究和讨论，俯冲的大陆地壳的折返机制和过程并不是十分清楚。一般认为，部分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（Breakoff）后大陆地壳物质由于浮力而折返回地表。根据世界上不同地区的研究，超高压变质岩石的折返速率和*p–T–t*轨迹有明显的差异。岩石的结构和矿物学的观察表明，大部分超高压变质带的超高压变质岩石具有较快的折返速率，如柯石英包裹体、尤其是粒间柯石英（叶凯等，1996）的发现。同位素年代学研究表明，阿尔卑斯超高压变质岩石的折返速率可达 3.4 cm/a，与俯冲的速度基本一致（Rubatto，2001），说明该地区俯冲和折返的*p–T*路径相同。这种快速折返的*p–T*轨迹在其它超高压变质带的岩石中都有记录，如大别—苏鲁（Zhang and Liou，1998）、Kokchetav 超高压地体（Katayama et al，2001）、柴北缘都兰北带（Song et al，2003a）。

然而，深入的岩石学研究揭示，一些榴辉岩在退化变质过程中首先经历高压麻粒岩相的叠加，再经受角闪岩相的改造（Yao et al，2000；Banno et al，2000；Song et al，2003；Zhang et al，2005），反映部分超高压岩片在折返过程中或折返之前在上地幔或下地壳层次经历了热松弛作用（Thermal Relaxation）。因此，在同一超高压变质

收稿日期：2007–05–30；**修回日期**：2007–06–19
基金项目：国家自然科学基金项目（40372031；40228003），国家优秀博士论文作者基金（200503）以及英国皇家学会（The Royal Society international fellowship provided by KC Wang）资助
作者简介：宋述光，男，1963年生，副教授，从事岩石学和板块动力学研究；E-mail: sgsong@pku.edu.cn

带中，超高压变质岩石的*p-T-t* 轨迹的不同反映它们折返的路径有明显的差异，是超高压变质带不同构造单元差异折返的表现。

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。该变质带自东向西断续出露都兰榴辉岩地体、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（Yang et al，1998；Xu et al，1999；Zhang et al，2001）。带内岩石类型包括花岗质片麻岩和副片麻岩，榴辉岩和橄榄岩呈大小不等的岩块分布在两种片麻岩中。副片麻岩锆石中柯石英包裹体（宋述光，2001；Yang et al，2001，2002；Song et al，2003a，b）、榴辉岩中柯石英假象（Song et al，2003a）、石榴橄榄岩锆石中金刚石包裹体（Song et al，2005b）及石榴石中出溶片晶（Song et al，2004，2005a）等变质岩石组合的发现，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。

1 区域地质背景

祁连山—北柴达木山系位于青藏高原的北部，大地构造上属阿拉善地块与柴达木地块之间的巨型复合造山带。如图1所示，青藏高原北缘由北向南可以划分为5个构造单元：（1）阿拉善地块；（2）北祁连山加里东期大洋型俯冲带（缝合带）；（3）祁连地块；（4）柴北缘超高压变质带；（5）柴达木地块。这些构造单元在西部被NEE向的阿尔金左行走滑断裂所切，而两条高压–超高压变质带可以延伸到阿尔金巨型走滑断裂的西侧。阿拉善地块是中朝克拉通的一部分，主要由早前寒武纪基底和早古生代台型沉积盖层组成。

北祁连山缝合带是一典型的环太平洋型俯冲带，呈NW方向分布在北侧的阿拉善地块与南侧的祁连地块之间。带内由早古生代蛇绿岩组合、岛弧杂岩及俯冲杂岩（包括蛇绿混杂岩和低温高压蓝片岩和榴辉岩）组成，岩石组合特征反映北祁连山是一典型的环太平洋型或B型俯冲带，是两个大陆之间的缝合线（Wu et al，1993；Song，1996）。

祁连地块位于北祁连早古生代缝合带与柴北缘超高压变质带之间，包括传统定义的中祁连地块和南祁连冒地槽褶皱带。其基底岩石主要由早–中元古代长英质片麻岩、大理岩、斜长角闪岩和麻粒岩组成，祁连地块的南部（南祁连）发育有

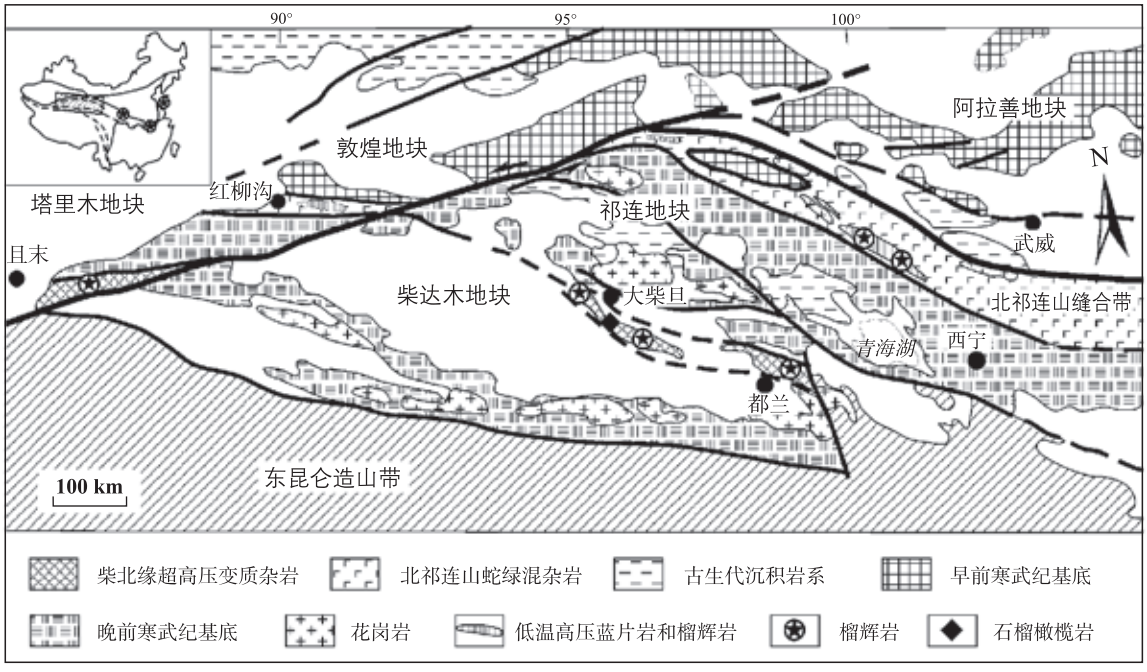


图1 青藏高原北缘柴达木—祁连山及邻区地质简图（据Song et al，2006）

Fig. 1 Geological Map of the North Qaidam–Altun eclogite belt in the northern Tibet

厚层的早古生代沉积岩系（图1）。910~940 Ma形成的片麻状花岗岩（或花岗片麻岩）广泛分布于祁连地块之中（郭进京等，1999；Wan et al，2001；Xu et al，2007），与柴北缘超高压变质带中花岗片麻岩的形成年龄一致（陆松年，2002）。

柴达木地块是一中生代沉积盆地。张建新等（2003）报道地块南部金水口群变质片麻岩的继承碎屑锆石SHRIMP年龄主要集中在1 600~1 800 Ma范围内，并认为柴达木地块的前寒武纪基底与扬子克拉通有明显的亲缘性。陈能松等（2006）报道了侵入到金水口群中的花岗岩年龄为904 Ma，与柴北缘和祁连地体中的花岗片麻岩年龄相同。

2　都兰超高压变质地体的分带及岩石学

都兰超高压地体是迄今为止柴北缘（包括南阿尔金）唯一发现柯石英包裹体的超高压地体。根据岩石学、矿物学及地球化学的特征，Song et al（2003）将都兰超高压变质地体划分为南、北两带（图2），岩石组合主要由榴辉岩、石榴角闪岩（退变榴辉岩）、正片麻岩和副片麻岩，以及少量大理岩和超基性岩等组成，其中花岗质片麻岩占整个变质地体的70%~80%。

2.1　榴辉岩

柴北缘超高压变质带榴辉岩都是呈大小不等的岩块或透镜体产于富铝质和花岗质片麻岩中。最大的榴辉岩岩块位于都兰北带，宽为300 m，长达800 m，两侧围岩均为石榴石蓝晶石云母片岩，片岩锆石中发现有柯石英包裹体（宋述光，2001；杨经绥等，2001），证明该泥质片岩经历过超高压变质作用。

北带榴辉岩的典型矿物组合为：Grt + Omp + Phn + Rt 和 Grt + Omp + Ep + Ttn + Cal（Arg），石榴石和绿辉石中柯石英假象、透长石 + 石英包裹体（图3）的发现表明，都兰榴辉岩峰期变质条件位于柯石英的稳定域，榴辉岩经历了超高压变质作用。大部分榴辉岩岩块具有不同程度的退化变质改造，有的已经完全退化变质为石榴斜长角闪岩。

南带榴辉岩一般为中粗粒变晶结构，根据矿物之间的反应结构，可以识别出3个主要变质阶段：（1）峰期榴辉岩相变质阶段，其矿物共生组合为 Grt + Omp + Ky + Rt ± Phn + Qtz（柯石英假象）；（2）麻粒岩相阶段，矿物共生组合为Grt + CpxII + Pl ± Scp；（3）角闪岩相退化变质阶段，矿

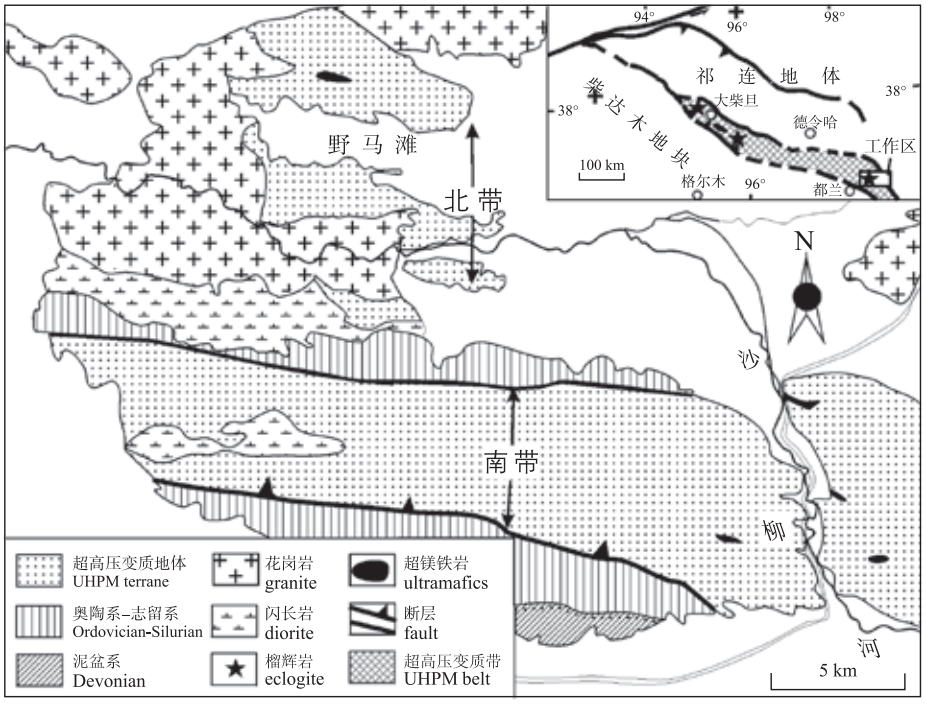
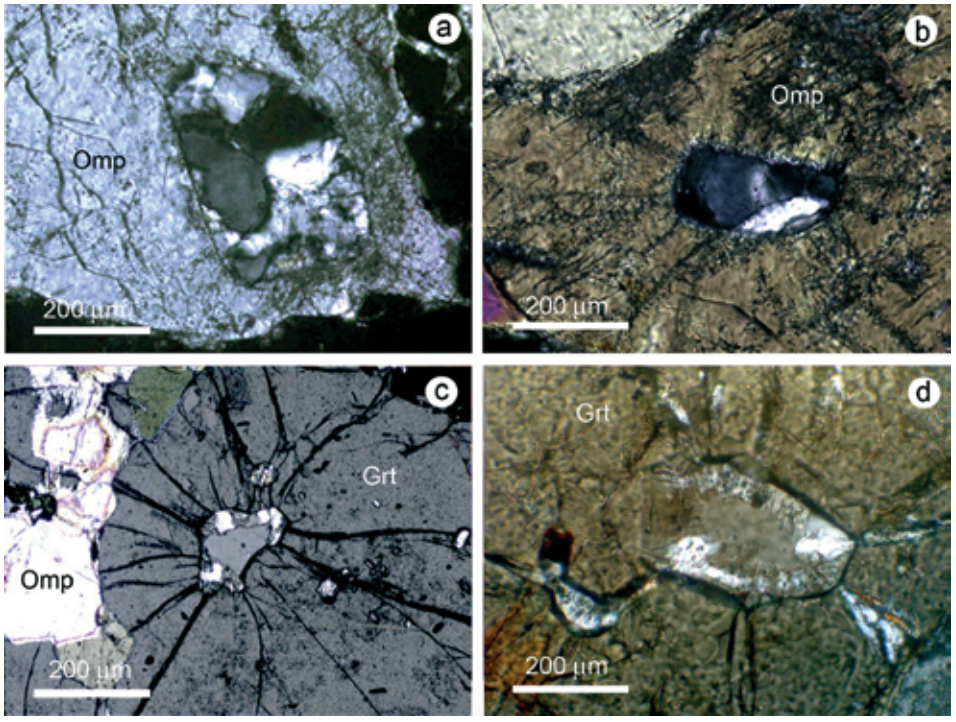


图2　都兰超高压变质地体地质简图

Fig. 2　Geological map of Dulan UHP metamorphic terrane



（a）和（b）为绿辉石和柯石英假象（正交偏光）；（c）和（d）为石榴石的柯石英假象（斜交偏光）

图3 都兰北带榴辉岩绿辉石（Omp）和石榴石（Grt）中柯石英假象（Song et al，2003）

Fig. 3 Photomicrographs of coesite pseudomorphs in garnet and omphacite in eclogite from the North Dulan belt

物组合为Hbl + Czo + Bt + Ab。

2.2 片麻岩

作为榴辉岩围岩的长英质片麻岩是超高压变质带的主要组分，其出露面积占总面积的80%以上。都兰北带可以划分为两种片麻岩：花岗质片麻岩（正片麻岩）和泥质沉积岩变质的富铝质片麻岩（副片麻岩）。它们都是榴辉岩的直接围岩。

花岗质片麻岩在野外呈白色或淡灰色，中粗粒花岗结构，岩石以石英和两种长石为主，暗色矿物较少，主要为两种云母，有时可见电气石，石榴石在极少数样品中出现。岩石中两种云母具有较明显的定向，有的样品中后期的剪切叶理发育。

富铝质沉积岩变质的片岩和片麻岩在野外露头上主要呈灰色，与花岗质片麻岩有较大差别；为中粒–细粒变晶结构，浅色矿物以石英和斜长石为主，暗色矿物含量比花岗质片麻岩明显增高，石榴石粒度为1~2 mm，呈变斑晶均匀分布于基质中；云母类矿物主要为白云母，并具有明显的定向性，片理极为发育。岩石包括石榴石蓝晶石白云母片岩、二云母片岩和少量云母石英片岩。一些大的榴辉岩块体常常与这些变质泥质片岩共生。

3 矿物学特征

3.1 石榴石

都兰超高压变质地体南北两带榴辉岩原岩的化学成分有很大差别，表现在两带榴辉岩中石榴石的矿物成分显著不同。

都兰北带：在不同的榴辉岩岩块中，石榴石的形态、产状、在岩石中的含量以及矿物成分都有所变化。从形态和产状上，石榴石可分为粗粒和中细粒，粗粒石榴石在岩石中呈变斑晶，自型程度好，粒度为2~3 mm，单斜辉石分布于石榴石的粒间。中细粒结构的石榴石与辉石的大小相当，二者间为平衡的三边结构，部分细粒榴辉岩的石榴石和单斜辉石一起发生同构造变形，并沿叶理方向拉长定向，部分岩石中石榴石和单斜辉石分别集中成条带状，与榴辉岩峰期变质时同构造分异有关。

由于受岩石化学成分的影响，都兰北带榴辉岩中石榴石的化学成分总体上以富铁低镁为特征，铁铝榴石分子（Alm）的摩尔分数为41%~60

%，镁铝榴石（Pyr）的摩尔分数为10%~27%，钙铝榴石（Gross）的摩尔分数为13%~38%。其中FeO含量随MgO的升高而降低。在Coleman（1965）石榴石分类图解中，北带石榴石主要分布于C类榴辉岩的范围。

大部分细粒结构、定向拉长的石榴石内部比较均匀，成分环带不明显。而大部分粗粒结构的石榴石变斑晶具有明显的成分环带，对比内部的矿物包裹体的种类和分带性以及电子探针对矿物成分分析和背散射图像研究，石榴石的成分环带主要有以下特点。

（1）从中心到边缘石榴石的FeO和MnO摩尔系数逐渐降低，而SiO_2和MgO却稳定升高，CaO也具升高趋势，但与SiO_2, MgO相比并不很明显，Al_2O_3的变化无明显的规律性。这些特征反映较为典型的进化变质作用的生长环带（O'Brien，1997）。

（2）石榴石中矿物包裹体的分布具有较明显的规律性：核部以角闪石、石英和帘石等矿物为主，多硅白云母和具有放射状裂纹的柯石英假象主要分布于石榴石的幔部，而SiO_2，MgO摩尔系数较高的边缘一般不出现包裹体，这种规律性变化是俯冲过程中压力急速升高所造成的结果。

都兰南带：都兰南带榴辉岩的石榴石大部分呈粗粒结构，粒度为2~3 mm，个别可达5 mm，以自形的变斑晶分布于其它矿物之中，有的石榴石已发生旋转和变形。南带石榴石的矿物成分与北带相比有较明显的差别，主要以富镁低铁为特征，摩尔分数分别为：镁铝榴石27.9~50.5%，铁铝榴石32.0~49.5%，钙铝榴石16.8~24.3%，在Coleman（1965）石榴石成分分类图解中主要分布于B类榴辉岩区（图4A）。

3.2　单斜辉石

都兰北带榴辉岩的绿辉石在岩石中所占的体积分数为30%~50%，与石榴石、绿帘石/黝帘石、金红石和少量多硅白云母共生。绿辉石中硬玉的摩尔分数为27%~42%（图4B）。大部分绿辉石的颗粒边缘具有低钠单斜辉石 + 钠长石构成的后生合晶，部分绿辉石完全被斜长石和角闪石交代。

SiO_2出溶片晶在都兰超高压变质地体南北两带榴辉岩的绿辉石质单斜辉石中广为发育。如图5所

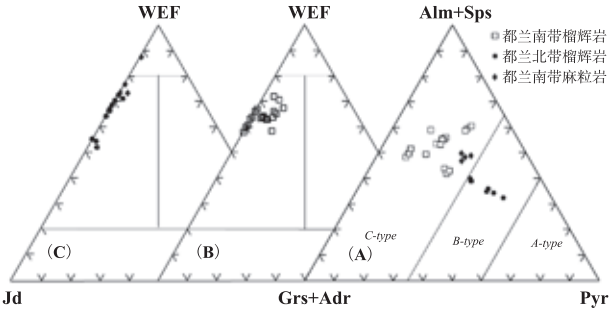


图4　都兰超高压变质地体南北两带榴辉岩石榴石和绿辉石的分类图解（数据据Song et al，2003a；图A据Coleman，1965）

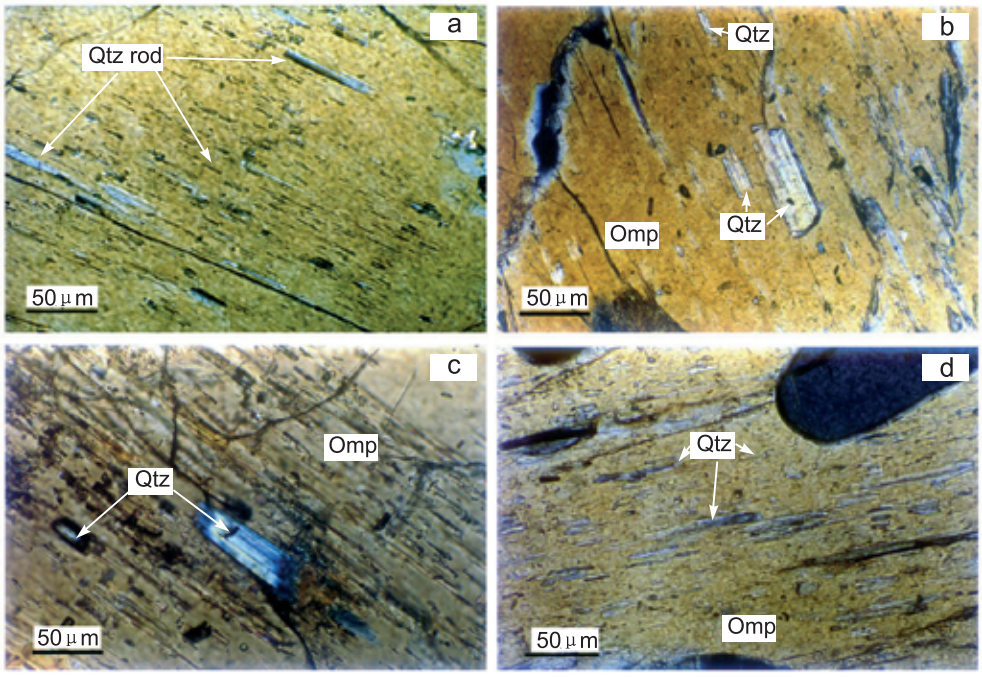
Fig. 4 Diagrams showing compositional variation of garnet (a) and clinopyroxene (b and c) from Dulan UHP terrane

示，石英片晶在辉石中完全定向，沿辉石的c轴平行排列，二者具有良好的拓扑关系。形态上，石英片晶为针状或杆状，直径为2~10 μm，最大可达20 μm，长度为10~200 μm。电子探针分析表明其化学成分为纯SiO_2，激光拉曼谱图显示了普通石英464.5的主峰位，而无超高压相柯石英的谱峰，说明这些片晶不是超高压变质阶段出溶的产物。

这些定向排列的杆状石英晶体主要分布于绿辉石质单斜辉石的核部，反映出单斜辉石从中心到边缘成分的分带。目前大部分学者认为辉石中SiO_2杆状体或片晶（lamellae）是先前无定量的超硅单斜辉石（non-stoichiometric supersilicic clinopyroxene）出溶的产物。超硅单斜辉石是 Smith and Cheeney（1980）定义的，其成分特征是（Si + Ti）>（Ca + Mg + Fe^{2+} + Mn + Ni − 2Na），是超高压条件下稳定的含过量Si的一种辉石。Katayama et al,（2000）在研究Kokchetav 超高压地体中榴辉岩和含金刚石石榴黑云母片麻岩锆石内Na-Ca 质单斜辉石以及榴辉岩基质中单斜辉石的成分时发现，锆石中保持未受后期退化变质影响的超高压辉石中含有很高的Ca-Eskola 端元组分（$Ca_{0.5}AlSi_2O_6$），而具有大量石英出溶片晶的基质单斜辉石的Ca-Eskola 端元组分则很低，因此认为SiO_2片晶是超高压形成的单斜辉石Ca-Eskola 端元组分在退化变质过程中分解的产物，其退化反应式为：

$$2Ca_{0.5}AlSi_2O_6 \rightarrow CaAl_2SiO_6 + 3\ SiO_2$$

基于实验结果和大部分超高压变质地体中的自然产出状态，石英片晶在榴辉岩的Na-Ca质单斜辉石中拓扑生长（topotaxial growth）的最合理解释是在退化变质过程中先前稳定于超高压条件下的



Omp–绿辉石；Otz–石英（照片均为单偏光）

图5 都兰北带榴辉岩绿辉石（Omp）中石英（Qtz）出溶片晶

Fig. 5 Orientated quartz exsolution lamellae in eclogitic omphacite from the North Dulan belt

超硅单斜辉石由于压力降低所引发的SiO_2出溶。因此，都兰地区榴辉岩中绿辉石内部定向排列的石英片晶的大量出现是岩石经历超高压变质的重要标志。

都兰南带榴辉岩的钠质单斜辉石可以划分为两个阶段，其矿物成分见图4C。峰期阶段的绿辉石与富镁石榴石、蓝晶石、金红石和少量多硅白云母共生（图6A），另外作为包裹体产于麻粒岩相改造岩石的蓝晶石中（图6B），这些绿辉石具有高硬玉含量和低铁的特征（$Jd_{30\text{-}47}Aug_{51\text{-}70}Acm_{0\text{-}3.6}$）。麻粒岩相改造阶段的单斜辉石（$Cpx^{II}$）硬玉分子的摩尔分数明显降低（< 20%），并与斜长石（An的摩尔分数约为25%）、方柱石和角闪石等共生（图6C，D），单斜辉石中可见到大量的钠质斜长石，系绿辉石分解的产物。

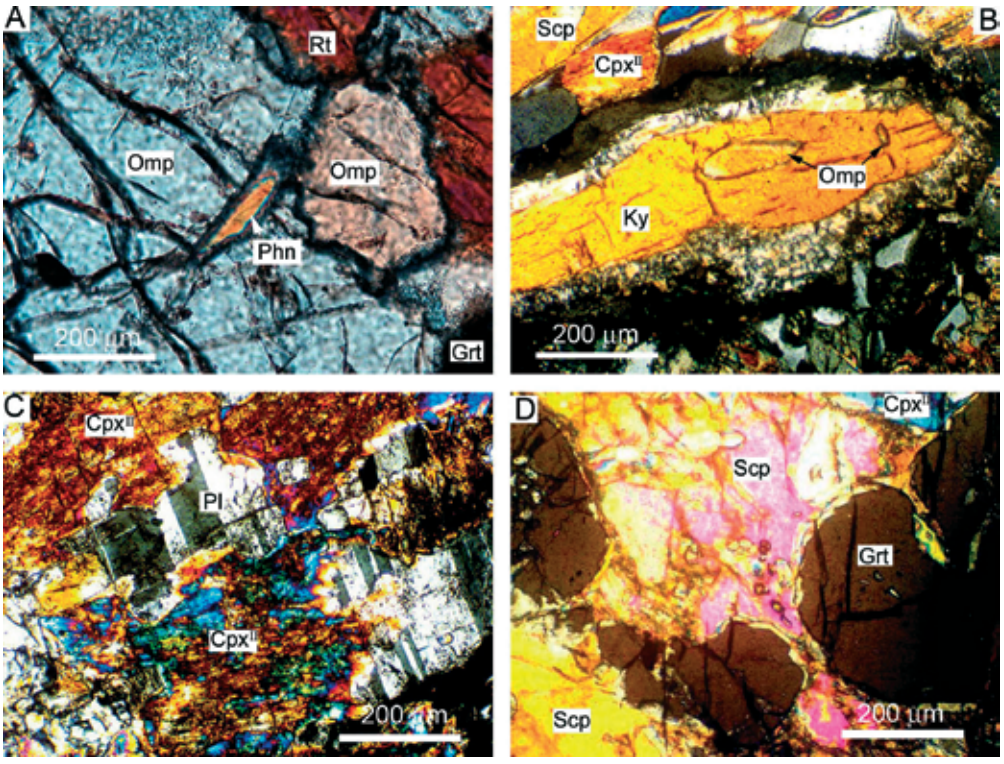
3.3 多硅白云母

都兰超高压变质地体的榴辉岩中多硅白云母的含量很低，所有样品中的含量皆小于1%。都兰北带榴辉岩中多硅白云母可以在基质中与绿辉石和石榴石等平衡共生，也可以以矿物包裹体出现在石榴石和绿辉石之中，在石榴石中可见由多硅白云母包裹体组成的环带分布于石榴石的幔部。多硅白云母中SiO_2质量分数大部分在49%~53%，每单位晶胞（p.f.u.）Si 原子数为3.28~3.53。

3.4 绿帘石／黝帘石及其成分环带

绿帘石／黝帘石可以稳定存在于较大的温压范围之内，是超高压岩石中极为普通的矿物，它们呈细粒包裹体或粗粒变斑晶出现于超高压变质的期前、同期和期后等不同阶段，并且也是退化变质所形成的常见矿物。同超高压变质的绿帘石/黝帘石与蓝晶石、滑石、绿辉石、石榴石等共生，并发现有柯石英及其假象呈包裹体产出（Zhang et al，1995），说明在超高压条件下绿帘石/黝帘石是稳定的。

榴辉岩中，峰期变质前的帘石一般呈包裹体出现于石榴石的核部，与角闪石等矿物共生；而峰期变质之后的退化变质帘石与石榴石、绿辉石和蓝晶石等具有明显的反应关系，后期的帘石矿物在石榴石及蓝晶石的周围形成反应边。这种帘石大部分是以黝帘石为主。峰期超高压变质同期形成的帘石主要见于都兰北带榴辉岩块体中，并以绿帘石为主。超高压峰期变质绿帘石与绿辉石和石榴石等矿物呈典型的平衡共生关系，其粒度与绿辉石大致相当。在部分榴辉岩中，绿帘石的含量可达20 %，



（A）都兰南带榴辉岩峰期组合：绿辉石(Omp) + 石榴石(Grt) + 金红石(Rt) + 多硅白云母(Phn)；（B）麻粒岩相改造的榴辉岩中高硬玉(Jd)的绿辉石(Omp)呈包裹体产于蓝晶石(Ky)中，其基质由低钠单斜辉石(Cpx) + 方柱石(Scp) + 斜长石(Pl) + 石榴石(Grt)组成；（C）低钠单斜辉石 Cpx^{II} + Pl组合；（D）方柱石(Scp)与单斜辉石(Cpx^{II})和石榴石(Grt)共生

(A) Peak assemblage Grt+Omp+Phn+Rt of the SDB eclogite sample 9Y80. (B) High Jd-containing omphacite inclusions in kyanite; low Jd-containing clinopyroxene (Cpx^{II}) coexists with scapolite, SDB granulite. (C) Cpx^{II} + Pl in the SDB granulitized eclogite. (D) Scapolite coexisting with garnet and clinopyroxene (Cpx^{II}) in granulitized eclogite in the SDB eclogite

图6　都兰南带榴辉岩及其麻粒岩相改造的显微结构特征

Fig. 6　Microphotographs of mineral textures of the SDB eclogite

因此我们将其称之为绿帘石榴辉岩。

本区榴辉岩中峰期变质形成的绿帘石大部分发育明显的成分环带，在电子背散射图像中，这种成分环带也很清楚，且从中心到边缘由暗变亮。电子探针分析结果表明，从中心到边缘，SiO_2、MgO和P_2O_5明显降低，FeO^t有升高趋势，Al_2O_3的起伏较大，而CaO的变化不明显。这种有规律的成分变化说明绿帘石在很大程度上受到了变质温压条件的影响，尤其是SiO_2、MgO含量与压力成正相关，FeOt与压力成负相关。

3.5　蓝晶石

蓝晶石是压力范围较宽的铝硅酸盐矿物，在高压和超高压（柯石英和金刚石的稳定范围）条件下都可稳定存在。蓝晶石在本区出现于南带的大部分榴辉岩中，这与南带榴辉岩原岩富铝的特征相吻合。从南带榴辉岩的结构和矿物的相互关系上，蓝晶石明显是榴辉岩相峰期变质的产物，与石榴石、绿辉石等构成平衡共生组合。后期退化变质过程中，蓝晶石与辉石和石榴石反应形成斜长石、黝帘石和珍珠云母，并使其呈残晶或假象分布于帘石之中。

3.6　方柱石

方柱石是重要的麻粒岩相变质矿物，出现在都兰南带的麻粒岩相改造的榴辉岩中，呈无色、自形—半自形颗粒与单斜辉石（Cpx^{II}）和斜长石等共生（图6D）。能谱分析表明方柱石是含硫的Ab-An-$CaSO_4$-$CaCO_3$ 体系，但$CaSO_4$ 与 $CaCO_3$ 的比值不清楚，其X_{Me}［= Ca /（Na + Ca + K）］的范围很窄（0.63 ~ 0.66）。实验表明方柱石为典型的高温矿物（Goldsmith and Newton，1977；Baker and Newton，1994）；广泛出现在下地壳麻粒岩、造山带中高压麻粒岩和金伯利岩的麻粒岩包体中

（Dawson，1971；Goldsmith，1976）。Lovering and White（1964，1969）认为富硫的方柱石是麻粒岩相变质的标志性矿物，而Goldsmith and Newton（1977）指出具有高含量硫酸根的方柱石与高压成因有关。

4 变质温压条件及变质演化

4.1 都兰北带榴辉岩的温压条件和变质演化

都兰北带榴辉岩峰期变质矿物组合为：（1）Grt + Omp + Phe + Rut ± Coe，（2）Grt + Omp + Ep + Arg。*p*–*T*估算基于 Krogh-Ravna（2000）石榴石–绿辉石Fe^{2+}-Mg交换温度计和Ravna and Terry（2004）Grt-Omp-Phn-Ky 压力计，计算获得都兰北带榴辉岩峰期变质温度范围为631 ~ 687℃，压力为2.87 ~ 3.17 GPa，位于柯石英的稳定域之上。

所有的峰期变质矿物都在不同程度上受到后期退化变质的改造，退化变质反应包括: 一些超高压变质标志矿物如柯石英、文石以及超硅单斜辉石等在此减压过程中变的不稳定，柯石英和文石分别转变为多晶石英和方解石，而超硅单斜辉石中SiO_2发生出溶而形成平行排列的针状和棒状出溶片晶。绿辉石形成Cpx + Ab和Hbl + Ab后生合晶反应边，等等。该时期代表性的退化反应为：

绿辉石 → 普通辉石 + 钠更长石（Ab的摩尔分数>75%）

绿辉石 + H_2O → 角闪石 + 钠长石

Omp + Grt + H_2O → Amp + Pl

围绕绿辉石的Cpx + Ab 后生合晶显示了绿辉石在“干”的条件下发生的减压分解的过程。较晚期的退变组合 Hbl + Pl + Qtz ± Bi ± Ttn 反应榴辉岩经历了角闪岩相退化变质，变质温压条件大致为600℃和 < 1.0 GPa.

都兰北带榴辉岩中斜发沸石+方解石出现表明其经历了上部地壳低温（<300℃）热液的改造（Song et al，2003a）。都兰北带榴辉岩的*p*–*T*轨迹见图。

4.2 都兰南带榴辉岩的温压条件和变质演化

4.2.1 峰期榴辉岩阶段

虽然在薄片中没有见到柯石英，但柯石英假像证明南带榴辉岩的峰期变质条件也在柯石英的稳定域。根据Krogh-Ravna and Terry（2004）的温压计计算，南带榴辉岩的峰期变质温压条件为*p* = 2.86 ~ 3.26 GPa，*T* = 729 ~ 768℃。

4.2.2 麻粒岩相改造阶段

麻粒岩相的变质阶段是以斜长石、低硬玉组分的单斜辉石（Cpx^{II}）以及含SO_4方柱石为特征，实验表明钙柱石（$3CaAl_2Si_2O_8 \cdot CaCO_3$）一般只能稳定于875℃以上，而含硫酸根的方柱石的稳定温度和压力更高（Goldsmith and Newton，1977），并被作为麻粒岩相组合的标志性矿物相（Lovering and White，1964，1969）。

利用两个石榴石–单斜辉石Fe^{2+}-Mg交换地质温度计, 获得麻粒岩相改造阶段的变质温度在2.0 GPa时分别为874 ~ 947℃（Krogh-Ravna，2000）和882 ~ 948℃（Powell，1985），高于峰期榴辉岩相变质的最大温度。利用 GADS 压力计（Newton and Perkins，1982；Eckert et al，1991），并根据平衡反应2Grs + Prp + 3Qtz = 3An + 3Di，获得麻粒岩相变质的压力 *p* = 1.86 ~ 1.98 GPa。

4.2.3 角闪岩相退化变质阶段

角闪岩相退化变质阶段的矿物组合为 Hbl + Ep/Czo + Pl + Bi + Qtz，利用 Graham and Powell（1984）Grt-Hbl 温度计和 Kohn and Spear（1990）的Grt-Hbl-Pl-Qtz 压力计获得角闪岩相变质温度为660 ~ 695℃，压力为 0.7 ~ 0.9 GPa。

5 讨论和结论

到目前为止，都兰榴辉岩地体是约700 km长的柴北缘—南阿尔金超高压变质带中唯一确定含柯石英的超高压变质地体，而该地体的重要特征是含有两个变质特征不同的变质亚带，并经历了不同的折返过程。

如图7所示，都兰南北两带峰期变质的压力都在柯石英的稳定域（2.8~3.3 GPa），但退化变质*p*–*T*轨迹具有明显的不同。对于北带榴辉岩而言，绿辉石分解为低钠单斜辉石+钠质斜长石并进一步形成角闪石+斜长石显示两个阶段的近等温减压过程。早期阶段的Cpx + Ab 蠕虫状后生合晶是*T* < 650℃以及相对干的条件下减压的产物并只能产生于很短的时间内（O’Brien and Vrána，1995），而不是麻粒岩相变质的结果。因此，*p*–*T*轨迹显示都兰北带榴辉岩经历了两个阶段的折返：早期从

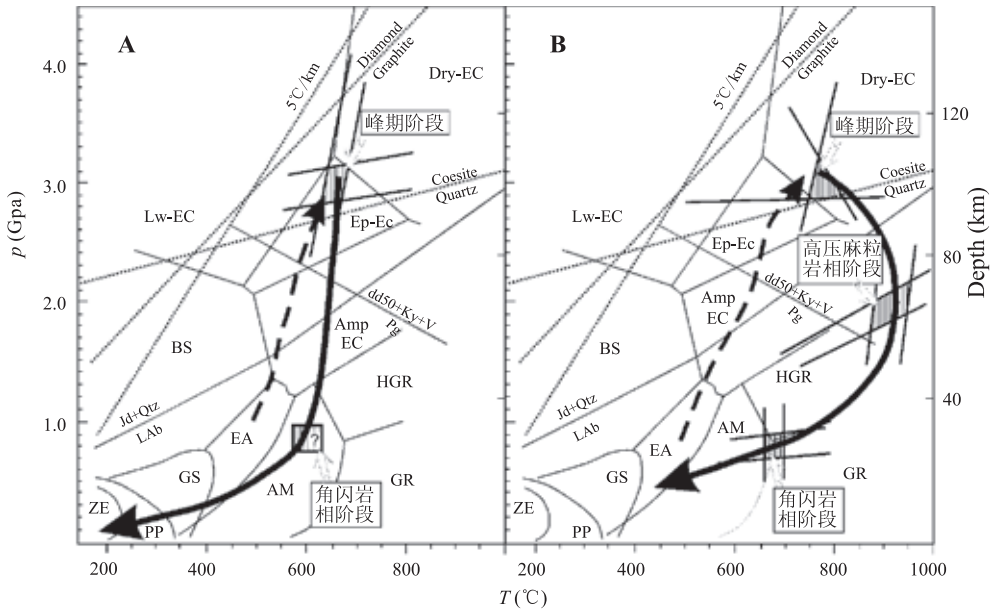


图7　都兰超高压变质地体北带（A）和南带（B）榴辉岩的温度压力图解（据Song et al，2003a）

Fig. 7　*p–T* paths of the NDB eclogites (A) and the SDB eclogites (B)

地幔深度快速折返到中部地壳层次，伴随岩石的等温降压，并发生角闪岩相退化变质；晚期抬升到地壳浅部。

部分都兰南带榴辉岩经历了高压麻粒岩相变质的改造，其典型矿物组合为Cpx（Jd < 30）+ Pl + Scp + Hbl。早期榴辉岩相绿辉石作为包裹体保存在蓝晶石晶体中。高压麻粒岩阶段的*p–T*条件为*p*=1.9 ~ 2.0 GPa，*T* = 873 ~ 948℃, 温度远远高于榴辉岩相变质（*T* = 729 ~ 768℃）的温度条件。其*p–T*轨迹显示了温度随压力降低而升高、从超高压榴辉岩到高压麻粒岩的过程，并进一步降低到角闪岩相（图7B），说明都兰南带榴辉岩折返速率较慢，发生了壳幔过渡带（或加厚的深部地壳）层次的强烈热松弛，与周围发生较为充分的热交换，同时反映了都兰超高压变质地体两个变质带差异折返的特征。许多大陆俯冲形成的超高压岩石经历了类似的折返过程，是榴辉岩发生深熔作用的主要机制。

谨以此文祝贺我国变质岩岩石学泰斗董申保先生九十华诞。

参考文献［References］：

Bakar J, Newton R C. **1994**. Standard thermodynamic properties of meionite, $Ca_4Al_6Si_6O_{24}CO_3$, from experimental phase equilibrium data. ***American Mineralogist***, 79: 478–484.

Banno S, Enami M, Hirajima T, et al. **2000**. Decompression *p–T* path of coesite eclogite to granulite from Weihai, eastern China. ***Lithos***, 52: 97–108.

陈能松, 李晓彦, 王新宇, 等. 2006. 柴达木地块南缘昆北单元变质新元古代花岗岩锆石SHRIMP U–Pb年龄. 地质通报, 25: 1311–1314.

[Chen Nengsong, Li Xiaoyan, Wang Xinyu, et al. **2006**. Zircon SHRIMP U-Pb age of Neoproterozoic metagranite in the North Kunlun unit on the southern margin of the Qaidam block in China. ***Geological Bulletin of China***, 25: 1311–1314. (in Chinese with English abstract)]

Colemam R G, Lee L D, Beaty L B, et al. **1965**. Eclogites and eclogites: their differences and similarities. ***Geol. Soc. Amer. Bull.***, 76: 483–508.

Dawson J B. **1971**. Advances in kimberlite geology. ***Earth Science Reviews***, 7, 187–214.

Eckert O J, Newton R C, Kleppa O J. **1991**. The ΔH of reaction and recalibration of garnet-pyroxene-plagioclase-quartz geobarometers in the CMAS system by solution calorimetry. ***American Mineralogist***, 76, 148–160.

Ernst W G. **2001**. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices-implications for arcs and continental growth. ***Physics of the Earth and Planetary Interiors***, 127: 253–275.

Ernst W G and Liou J G. **1995**. Contrasting plate-tectonic styles of the Quiling-Dabie-Sulu (Alpine-type) and Franciscan (Pacific-type) metamorphic belts. ***Geology***, 23: 353–356.

Goldsmith J R, Newton R C. **1977**. Scapolite-plagioclase stability relations at high pressure and temperature in the system $NaAlSi_3O_8$–$CaAl_2Si_2O_8$–$CaCO_3$–$CaSO_4$. ***American Mineralogist***, 62: 1063-1081.

Goldsmith J R. **1976**. Scapolites, granulite, and volatiles in the lower crust. ***Bulletin of Geological Society of America***, 87: 161–168.

Graham C M, Powell R. **1984**. A garnet-hornblende geothermometer and application to the Pelona schists, southern California. ***Journal of Metamorphic Geology***, 2: 13–22.

郭进京, 赵风清, 李怀坤. 1999. 中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义. 地球学报, 1999, 20 (1): 10–15.

[Guo Jinjing, Zhao Fengqing, Li Haikun. **1999**. Jinningian collisional granite belt in the eastern sector of the Central Qilian massif and its implication. ***Acta Geoscientia Sinica***, 20 (1): 10–15. (in Chinese with English abstract)]

Katayama I, Maruyama S, Parkinson C D, et al. **2001**. Ion microprobe U-Pb zircon geochronology of peak and retrograde stages of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. ***Earth and Planetary Science Letters***, 188: 185–198.

Katayama I, Parkinson C D, Okamoto K, et al. **2000**. Supersilicic clinopyroxene and silica exsolution in UHPM eclogite and pelitic gneiss from the Kokchetav massif, Kazakhstan. ***American Mineralogist***, 85: 1368–1374.

Kohn M J, Spear F S. **1990**. Two new barometeters for garnet amphibolites with applications to southeastern Vermont. ***American Mineralogist***, 75: 89–96.

Krogh Ravna E. **2000**. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+}-Mg geothermometer: an updated calibration. ***Journal of Metamorphic Geology***, 18: 211–220.

Lovering J F, White A J R. **1964**. The significance of primary scapolite in granulitic inclusions from deep-seated pipes. ***Journal of Petrology***, 5: 195–218.

Lovering J F, White A J R. **1969**. Granulitic and eclogitic inclusions from basic pipes at Delegate, Australia. ***Contributions to Mineralogy and Petrology***, 21: 9–52.

陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社, 1–125.

[Lu Songnian. **2002**. Primitive Researches on Precambrian Geology in the Northern Tibetan Plateau. Beijing: Geological Publishing House, pp. 1–125. (in Chinese)]

Maruyama S, Liou J G, Terabayashi M. **1996**. Blueschicts and eclogites of the world and their exhumation. ***International Geology Review***, 38: 485–594.

Newton R C, Perkins D. **1982**. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene-(clinopyroxene)-quartz. ***American Mineralogist***, 67: 203–222.

O'Brien P J. **1997**. Garnet zoning and reaction textures in overprinted eclogites, Bohemian Massif, European Variscides: A record of their thermal history during exhumation. ***Lithos***, 41: 119–133.

O'Brien P J, Vrána S S. **1995**. Eclogites with a short-lived granulite facies overprint in the Moldanubian zone, Czech Republic: petrology, geochemistry and diffusion modeling of garnet zoning. ***Geologische Rundschau***, 84: 473–488.

Powell R. **1985**. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer / geobarometer calibration: the garnet-clinopyrocene geothermometer revisited. ***Journal of Metamorphic Geology***, 3: 231–243.

Rubatto D, Hermann J. **2001**. Exhumation as fast as subduction? ***Geology,*** 29: 3–6.

Smith D C and Cheeney R F. **1980**. Oriented needles of quartz in clinopyroxene: evidence for exsolution of SiO_2 from a non-stoichiometric supersilicic "clinopyroxene". 26th IGC, Paris, France, pp. 145.

Smith D C. **1988**. A review of the peculiar mineralogy of the Norwegian coesite-eclogite province, with crystal-chemical, petrological, geochemical and geodynamical notes and an extensive bibliography. // Eclogites and Eclogite Facies Rocks, Smith D C ed. pp. 1–206. Amsterdam: Elsevier.

Song S G. **1996**. Metamorphic Geology of Blueschists, Eclogites and Ophiolites in the North Qilian Mountains. 30th IGC Field Trip Guide T392, Geological Publishing House, Beijing. 40p.

宋述光. 2001. 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 [博士论文]. 北京: 中国地质科学院, 96p.

[Song Shuguang. **2001**. Petrology, Mineralogy and Metamorphic Evolution of the Dulan UHP Terrane in the North Qaidam, NW China and Its Tectonic Implications. Doctoral Thesis. Beijing: Chinese Academy of Geological Science. (in Chinese with English abstract)]

Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. **2003a**. Metamorphic evolution of coesite-bearing UHP terrane in the North Qaidam, northern Tibet, NW China. ***Journal of Metamorphic Geology***, 21: 631–644.

Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. **2003b**. Petrology, Geochemistry and isotopic ages of eclogites in the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. ***Lithos***, 70 (3-4): 195–211.

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, **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, Niu Y, et al. **2005b**. 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. ***Earth and Planetary Science Letters***, 234: 99–118.

Song S G, Zhang L F, Niu Y, et al. **2006**. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data. ***Journal of Petrology***, 47: 435–455.

Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S, 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.

Wang Q and Cong B L. **1996**. Tectonic implication of UHP rocks from the Dabie Mountains. ***Science in China (Series D)***, 39: 311–318.

Wu H Q, Feng Y M, Song S G. **1993**. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China. ***Journal of Metamorphic Geology***, 11: 523–536.

Xu W C, Zhang H F, Liu X M. **2007**. U-Pb zircon dating constraints on formation time of Qilian high-grade metamorphic rock and its tectonic implications. ***Chinese Science Bulletin***, 52: 531–538.

Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X, et al. **1999**. A comparsion between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. ***Acta Geol. Sin.,*** 73: 193–205.

Yang J S, Xu Z Q, Li H B, et al. **1998**. Discovery of eclogite at northern margin of Qaidam Basin, NW China. ***Chinese Science Bulletin***, 43: 1755–1760.

杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 2001. 柴北缘早古生代高压–超高压变质带中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, China. ***Acta Geol. Sin.,*** 75 (2): 175–179.]

Yang J S, Xu Z Q, Song S G, et al. **2002**. 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. ***Acta Geologica Sinica***, 76: 63–68.

Yao Y P, Ye K, Liu J B, et al. **2000**. A transitional eclogite-to high pressure granulite-facies overprint on coesite-eclogite at Taohang in the Sulu ultrahigh–pressure terrane, Eastern China. ***Lithos***, 52: 109–120.

叶凯, 平岛崇男, 石渡明, 等. 1996. 青岛仰口榴辉岩中粒间柯石英的发现及其意义. 科学通报, 15: 65–66.

[Ye Kei, Hirajima T, Ishiwatari A, et al. **1996**. Significance of interstitial coesite in eclogite from Yangkou, Qingdao city, eastern Shandong province. ***Chin. Sci. Bull.***, 41: 1047–1048. (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: 187–206.

张建新, 孟繁聪, 万渝生, 等. 2003. 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: 397–404.

[Zhang Jianxin, Meng Fancong, Wan Yusheng, et al. **2003**. Early Paleozoic tectono-thermal event of the Jinshuikou Group on the South margin of Qaidam: zircon U-Pb SHRIMP age evidence. ***Geological Bulletin of China***, 22: 397–404. (in Chinese with English abstract)]

Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, et al. **2005**. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints. ***Lithos***, 84: 51–76.

Zhang R Y, Liou J G, Ernst W G. **1998**. Ultrahigh–pressure metamorphism and decompressional P-T paths of eclogites and country rocks from Weihai, eastern China: Reply. ***Island Arc***, 7 (1-2): 250–252.

Zhang R Y, Hirugima T, Banno S, et al. **1995**. Petrology of ultrahigh–pressure rocks from the southern Sulu region, eastern China. ***Journal of Metamorphic Geology***, 13: 659–675.

Two Different Metamorphic Paths of Eclogites and Differential Exhumation of Subducted Continental Crust: A Case Study of the Dulan UHP Terrane in the North Qaidam UHP Belt

SONG Shu-guang[1], NIU Yao-ling[2], ZHANG Li-fei[1]

(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 Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK)*

Abstract: The Dulan eclogite-bearing terrane is the only coesite-bearing ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic terrane so far recognized in the 700 km-long North Qaidam–Altun eclogite belt. The key feature of the Dulan terrane is that it consists of two sub-belts, the north Dulan belt (NDB) and the south Dulan belt (SDB) with different exhumation processes and histories. Coesite pseudomorphs in garnet and omphacite, together with p–T calculation, suggest that the peak metamorphic stage of eclogite in both belts is well within the stability field of coesite (p=2.8–3.3 GPa). The retrograde p–T paths are much different between the north and the south belts. The p–T path of the NDB eclogites suggests that the NDB eclogites underwent two stages of exhumation, an earlier rapid exhumation from a mantle depth to a middle crust level with a near-isothermal decompression, and a later uplift to the Earth's surface. The SDB eclogites, on the other hand, were strongly overprinted by a high-pressure granulite-facies metamorphism under conditions of p=1.9~2.0 GPa and T=873~948℃, followed by temperature and pressure decrease to the amphibolite-facies. The process of temperature increase with decreasing pressure from UHP eclogite to high-pressure granulite suggests that the SDB eclogites exhumed at low speed and underwent strong thermal relaxation at a level of crust-mantle transition or thickened lower crust. This thermal relaxation may occur in most UHP metamorphic terranes and may be the major mechanism for eclogite anatexis. The different metamorphic evolutional paths of the two sub-belts signify the differential exhumation histories of the subducted continental crust.

Key words: eclogite; ultrahigh-pressure metamorphism; p–T path; differential exhumation; Dulan; North Qaidam