

柴北缘都兰高压麻粒岩的锆石 U-Pb 定年 及其地质意义

于胜尧, 张建新, 李金平, 孟繁聪

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 在柴北缘高压-超高压变质带的东端都兰地区, 高压麻粒岩以透镜体的形式存在于石榴白云母片岩、花岗质片麻岩以及斜长角闪岩中。高压麻粒岩的主体为基性麻粒岩, 并含少量中酸性麻粒岩。基性麻粒岩主要由石榴子石、单斜辉石、斜长石和石英等组成, 而中酸性麻粒岩峰期矿物组合为: 石榴子石 + 斜长石 + 钾长石 + 蓝晶石 + 石英 ± 单斜辉石。根据显微构造和反应结构特征, 主要识别出 3 期变质作用: ① 峰期高压麻粒岩相阶段 (M_1); ② 退变质高角闪岩相阶段 (M_2); ③ 绿片岩相/低角闪岩相阶段 (M_3)。选取典型的中酸性麻粒岩样品进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 原位定年分析, 获得加权平均年龄为 446.9 ± 6.5 Ma, 且 CL 图像显示锆石内部发育石榴子石、单斜辉石、斜长石等矿物包体, 反映锆石可能形成在峰期高压麻粒岩相变质条件下。岩石学和年代学结果显示都兰高压麻粒岩和邻近的榴辉岩同时形成于同一俯冲带的不同热构造环境, 高压麻粒岩并非榴辉岩热松弛作用形成的, 两者具有各自独立的变质演化历史。

关键词: 都兰, 高压麻粒岩, 锆石 U-Pb 年龄

中图分类号: P588.3; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)02-0139-12

Zircon U-Pb geochronology of high-pressure granulite and its tectonic implications in the Dulan area, North Qaidam Mountains, western China

YU Sheng-yao, ZHANG Jian-xin, LI Jin-ping and MENG Fan-cong

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: High-pressure granulite occurs as lenses in muscovite schist, granitic gneiss and amphibolite of Dulan area at the eastern end of North Qaidam HP-UHP metamorphism terrane, Northwest China. The high-pressure granulite could mainly be divided into two types: mafic granulite and acid-intermediate granulite. The dominant mafic granulite is composed of garnet, clinopyroxene, plagioclase and quartz, whereas the peak assemblage of intermediate-acid granulite is composed of garnet, plagioclase, K-feldspar, clinopyroxene, kyanite and quartz. Based on microstructure and reaction textures, the authors have recognized three main metamorphic stages from the high-pressure granulite: ① the estimated $p-t$ conditions for the metamorphic peak stage of high-pressure granulite facies (M_1) were 1.4~1.85 GPa and 800~925°C; ② retrogression began at the high amphibolite facies stage (M_2) with $p-t$ conditions of 0.8~1.05 GPa and 580~695°C; ③ subsequent retrogression occurred at the green-schist/high-amphibolite facies stage (M_3). Combined with cathodoluminescence patterns and mineral inclusions (garnet, clinopyroxene and plagioclase inclusions in zircon), U-Pb dating of zircons revealed that the peak metamorphism age of the high-pressure granulite-facies is 466.9 ± 6.5 Ma. Petrological and chronological

收稿日期: 2009-07-20; 修订日期: 2009-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772138, 40472102); 中国地质科学院地质研究所所长基金(J0804); 中国地质科学院院长基金(JB0903); 中国地质调查局地质调查资助项目(1212010611811, 1212010711816)

作者简介: 于胜尧(1981-), 男, 在读博士生, 构造地质学专业, E-mail: yushengyao1211@tom.com

studies suggest that the granulite and adjacent eclogite were formed in different thermal environments of the same subduction zone, i. e., the eclogite was formed in the subduction zone while the high-pressure granulite was formed at the root of the thickened crust above the seduction zone. The high-pressure granulite experienced its unique metamorphic history, and was not associated with the action of thermal relaxation after the eclogite-facies metamorphism recorded in adjacent eclogites.

Key words: Dulan; high-pressure granulite; U-Pb age of zircons

高压麻粒岩广泛出露于从太古宙(中国的恒山)到新生代(喜马拉雅造山带)的俯冲/碰撞造山带增厚的下地壳环境(Liu and Zhong, 1997; O'Brien and Rotzler, 2003)。高压麻粒岩的研究不仅对于认识深层次地壳内的构造作用、陆壳底部物质组成具有重要意义,也为了解古板块汇聚及大陆碰撞造山机制提供了重要依据(Carswell and O'Brien, 1993; Rotzler et al., 2001; O'Brien and Rotzler, 2003; O'Brien, 2006)。

柴北缘高压-超高压(HP-UHP)变质带以发育榴辉岩、石榴橄榄岩和相关片麻岩为特征。近年来,随着研究程度的不断提高,大量超高压变质作用的标志在榴辉岩、石榴橄榄岩和片麻岩中被先后发现(如都兰榴辉岩的石榴子石和单斜辉石中的柯石英,副片麻岩锆石包体中的柯石英,绿梁山石榴橄榄岩锆石中的金刚石,这些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., 2003a, 2005; Zhang J X et al., 2009a; Zhang G B et al., 2009)。然而,相对于大别-苏鲁超高压变质带而言,柴北缘 HP/UHP 变质带研究程度还较低,还有很多关键地质问题有待解决:如俯冲/碰撞造山作用(HP/UHP 变质作用)的时代, UHP 变质作用的分布范围等。到目前为止,本区研究的重点主要集中在榴辉岩、石榴石榴橄榄岩和片麻岩等经历过超高压变质作用的岩石上,而对于主要形成于汇聚板块边缘、且为限定板块俯冲/碰撞过程同样具有重要指示意义的高压麻粒岩研究还涉及很少。

在柴北缘 HP-UHP 变质带中,高压麻粒岩已先后报道于绿梁山和都兰地区,已有的资料显示绿梁山高压麻粒岩属于榴辉岩叠加型(张建新等, 2007)。而关于都兰麻粒岩的成因类型则有较大分歧:一种观点认为是含蓝晶石榴辉岩在降压过程中热叠加作用的结果(Song et al., 2003b);而另一种观点则认为高压麻粒岩具有不同于榴辉岩的独立的变质演化历史,可能形成于俯冲带上盘增厚的陆壳根部环境(张建新等, 2009; 于胜尧等, 2009),亦即都兰地区高压麻粒岩和榴辉岩的关系还没有一致的认识,而年

代学的研究对解决上述问题起着至关重要的作用。因此,对比都兰榴辉岩和高压麻粒岩在形成时代方面的异同,对深入研究柴北缘 HP-UHP 变质带的形成与演化以及探讨它们与南阿尔金 HP/UHP 变质带的构造关系具有重要意义。已有的资料显示都兰榴辉岩峰期变质作用时代为 420~450 Ma(Song et al., 2006; Mattinson et al., 2006; Zhang G et al., 2008),而高压麻粒岩至今仍缺乏准确可靠的同位素年代学研究。基于这一点,本文在岩相学、矿物化学分析的基础上,结合锆石阴极发光显微结构分析和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 原位定年方法,来确定高压麻粒岩的变质时代,并与榴辉岩形成时代对比,进而探讨其形成的动力学背景和区域构造意义。

1 地质背景

柴北缘 HP-UHP 变质带分布在祁连地块和柴达木盆地(地块)之间,西起鱼卡地区,东至都兰沙柳河地区。根据野外关系、岩石组合及变质演化历史等特征的明显差异,可进一步把柴北缘 HP/UHP 变质带划分成 4 个 HP/UHP 变质单元:鱼卡-落凤坡榴辉岩-片麻岩单元(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)和都兰榴辉岩-片麻岩单元(DLU)(Zhang J X et al., 2008)。

都兰榴辉岩-片麻岩分布在柴北缘东端野马滩-沙柳河一带,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组成。片麻岩普遍具有角闪岩相叶理,其走向为北西到近东西向,未变形的野马滩花岗岩体切割了片麻岩的叶理。已有的年代学资料显示都兰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(如 Mattinson et al., 2006)。

高压麻粒岩分布在阿尔茨托山西侧,与花岗质片麻岩和石榴角闪岩组成一个小的超高压麻粒岩次级单元,与之相邻的含榴辉岩单元可能为断层接触(图 1)。

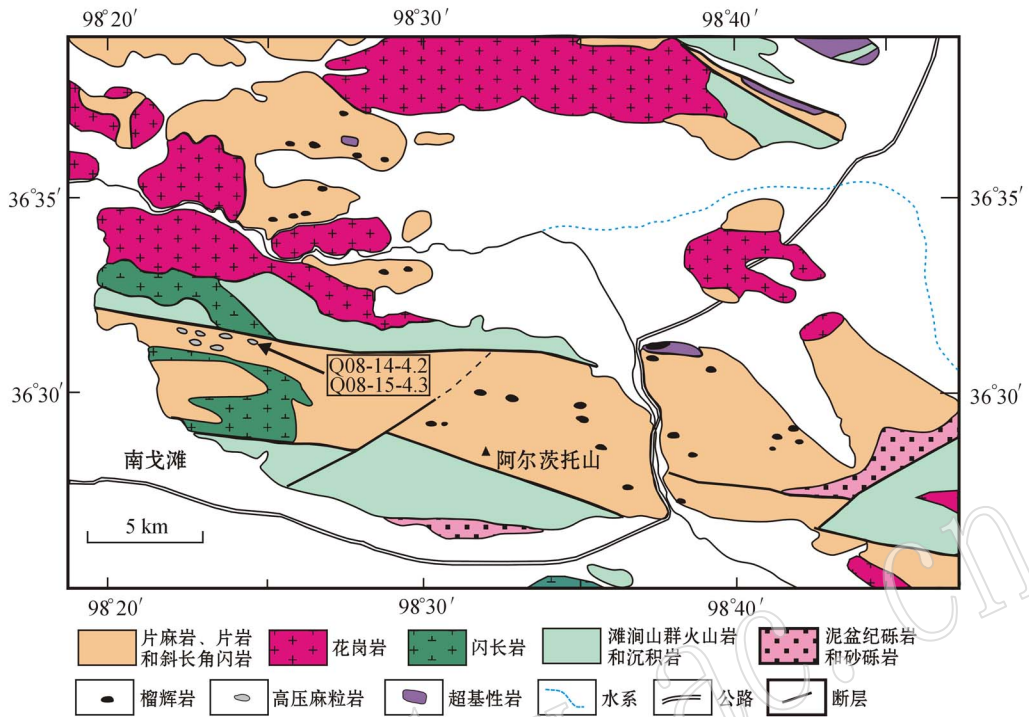


图 1 柴北缘都兰地区区域地质简图(据于胜尧等, 2009)

Fig. 1 Geological map of Dulan area on the northern margin of Qaidam Basin (after Yu Shengyao *et al.*, 2009)

高压麻粒岩以透镜体的形式存在于含石榴子石的白云母片岩中, 其外围为含石榴子石的斜长角闪岩和花岗质片麻岩。高压麻粒岩以富含石榴子石和斜长石为特征, 成分可以从基性变化到中酸性, 其中以基性成分为主体, 野外关系显示浅色的中酸性麻粒岩可能为基性麻粒岩部分熔融作用的产物(于胜尧等, 2009)。

2 岩石学特征及变质阶段划分

对都兰地区 30 多个基性、中酸性高压麻粒岩样品进行了详细的岩石学、矿物化学分析, 并从中选取两个典型样品进行描述: 基性麻粒岩 Q08-15-4.3 和中酸性麻粒岩 Q08-14-4.2。矿物的电子探针成分分析在核工业北京地质研究院 JXA-8100 型电子探针上完成, 分析条件: 加速电压 15 kV, 电子束流 20 nA。电子束斑为 5 μm 和 1 μm , 代表性的矿物成分列在表 1 中, 矿物缩写据沈其韩(2009)。

2.1 岩石学及矿物化学

2.1.1 基性麻粒岩(Q08-15-4.3)

基性麻粒岩是高压麻粒岩体的主体组成成分, 主要由石榴子石(40%~45%, 体积分数, 下同)、单斜辉石(30%~35%)、斜长石(5%~10%)和石英

(<5%)组成(图 2a、图 2b), 根据全岩组分的不同, 还可含有不等量的黝帘石/斜黝帘石、金红石、蓝晶石、方柱石、黑云母和角闪石等矿物, 副矿物主要有锆石和磷灰石。石榴子石(Grt I)一般以半自形-自形、粗粒(直径 2~5 mm)变斑晶形式存在, 其内部发育石英、斜长石、黝帘石/斜黝帘石和少量的角闪石、白云母等矿物包裹体。石榴子石(Grt I)内部成分不均匀, 核部端员组分为 $\text{Alm}_{46\sim60}\text{Grs}_{15\sim21}\text{Prp}_{21\sim33}\text{And}_{1\sim5}\text{Sps}_{1\sim4}$, 边部端员组分为 $\text{Alm}_{38\sim48}\text{Grs}_{17\sim28}\text{Prp}_{30\sim36}\text{And}_{1\sim5}\text{Sps}_{1\sim7}$ (图 3), 即从石榴子石核部到边部, 镁铝榴石明显增加, 而铁铝榴石逐渐减少, 具典型生长环带特征(O'Brien, 1997)。少数细粒石榴子石(Grt II)以集合体的形式在粗粒石榴子石(Grt I)周围富集(图 2c), 内部未见任何包裹体矿物, 端员组分为 $\text{Alm}_{36\sim38}\text{Grs}_{25\sim28}\text{Prp}_{31\sim35}\text{And}_{2\sim5}\text{Sps}_{0\sim1}$, 与 Grt I 边部成分基本一致, 可能是在变质峰期新形成的颗粒。粗粒石榴子石边部多呈港湾状, 并被角闪石+斜长石组成的冠状体围绕(图 2d), 代表了后期角闪岩相的退变质作用, 可能的反应为: $\text{Grt} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Am} + \text{Pl}$ 。单斜辉石主要有两种结构类型: 一种(Cpx I)以基质的形式与石榴子石、斜长石、石英等平衡共生, 代表了高压麻粒岩相峰

w_B/%

表 1 高压麻粒岩代表性矿物成分

Table 1 Representative compositions of high-pressure granulites

样号	Q08-15-4.3										Q08-14-1.2									
	Grt-c	Grt-f	Grt-r	Grt-r	Grt-r	Cpx I	Cpx I	Cpx I	Cpx II	Pl	Pl	Pl	Grt-c	Grt-r	Grt-r	Grt-r	Pl	Pl	Pl	Amp
SiO ₂	38.53	39.06	38.77	38.52	39.21	49.83	50.46	51.11	61.34	60.75	60.75	38.06	39.36	38.43	61.59	62.19	61.25	61.25	61.25	43.86
TiO ₂	0.04	0.06	0.04	0.05	0.00	0.51	0.54	0.46	0.00	0.00	0.00	0.03	0.08	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.68
Al ₂ O ₃	22.14	22.56	22.69	22.52	22.08	9.86	9.64	6.59	24.18	23.31	23.31	21.75	21.85	21.84	23.53	23.51	23.66	23.66	23.66	15.08
FeO ^t	22.90	18.05	18.73	19.23	19.90	7.20	7.23	6.61	0.00	0.00	0.00	24.94	20.45	22.62	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	7.80
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
MnO	0.96	0.25	0.33	0.39	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.37	0.28	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00
MgO	7.75	9.11	8.91	8.95	9.18	9.54	9.75	12.24	0.02	0.00	0.00	6.60	9.27	9.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.62
CaO	7.10	10.43	10.20	9.42	9.17	18.83	18.27	21.11	5.88	5.84	5.84	7.35	8.12	7.45	5.24	5.21	5.37	5.37	5.37	10.99
Na ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	3.26	3.10	1.37	8.35	9.92	9.92	0.00	0.00	0.00	0.00	8.44	8.62	8.62	8.62	2.63
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00	0.13	0.21	0.18	0.18	0.18	1.08
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.42	99.54	99.67	99.08	99.97	99.07	99.02	99.55	99.85	99.94	99.94	99.16	99.50	99.80	99.24	99.62	99.29	99.29	99.29	96.75
O	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	6.00	6.00	6.00	8.00	8.00	8.00	12.00	12.00	12.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	23.00
Si	2.970	2.950	2.940	2.940	2.980	1.854	1.862	1.923	2.753	2.740	2.740	2.970	3.000	2.970	2.752	2.757	2.740	2.740	2.740	6.338
Al	2.010	2.010	2.030	2.020	1.980	0.432	0.419	0.248	1.252	1.230	1.230	1.990	1.960	1.990	1.239	1.246	1.248	1.248	1.248	2.564
Fe ²⁺	1.440	1.070	1.090	1.130	1.330	0.160	0.180	0.180	0.000	0.000	0.000	1.570	1.270	1.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.747
Fe ³⁺	0.040	0.070	0.100	0.090	0.070	0.065	0.047	0.000	0.001	0.000	0.000	0.060	0.030	0.060	0.001	0.000	0.007	0.007	0.168	
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.015	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.076	
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	
Mg	0.890	1.030	1.010	1.020	1.040	0.529	0.536	0.687	0.010	0.000	0.000	0.770	1.050	0.940	0.010	0.000	0.000	0.000	3.153	
Mn	0.060	0.020	0.020	0.030	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.020	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Ca	0.590	0.850	0.830	0.770	0.580	0.711	0.722	0.851	0.222	0.230	0.230	0.610	0.660	0.620	0.251	0.248	0.257	0.257	1.706	
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.235	0.222	0.100	0.769	0.750	0.750	0.000	0.000	0.000	0.754	0.746	0.748	0.748	0.727	
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.020	0.020	0.000	0.000	0.000	0.008	0.012	0.010	0.010	0.200	
Sum	8.000	8.000	8.020	8.000	8.010	4.001	4.004	4.003	5.019	4.970	4.970	8.000	8.000	8.000	5.017	5.009	5.010	5.010	15.680	

注: Grt-c—石榴子石核; Grt-f—石榴子石边; Grt-r—细粒石榴子石; Cpx I—早期单斜辉石; Cpx II—后成合晶中的单斜辉石。

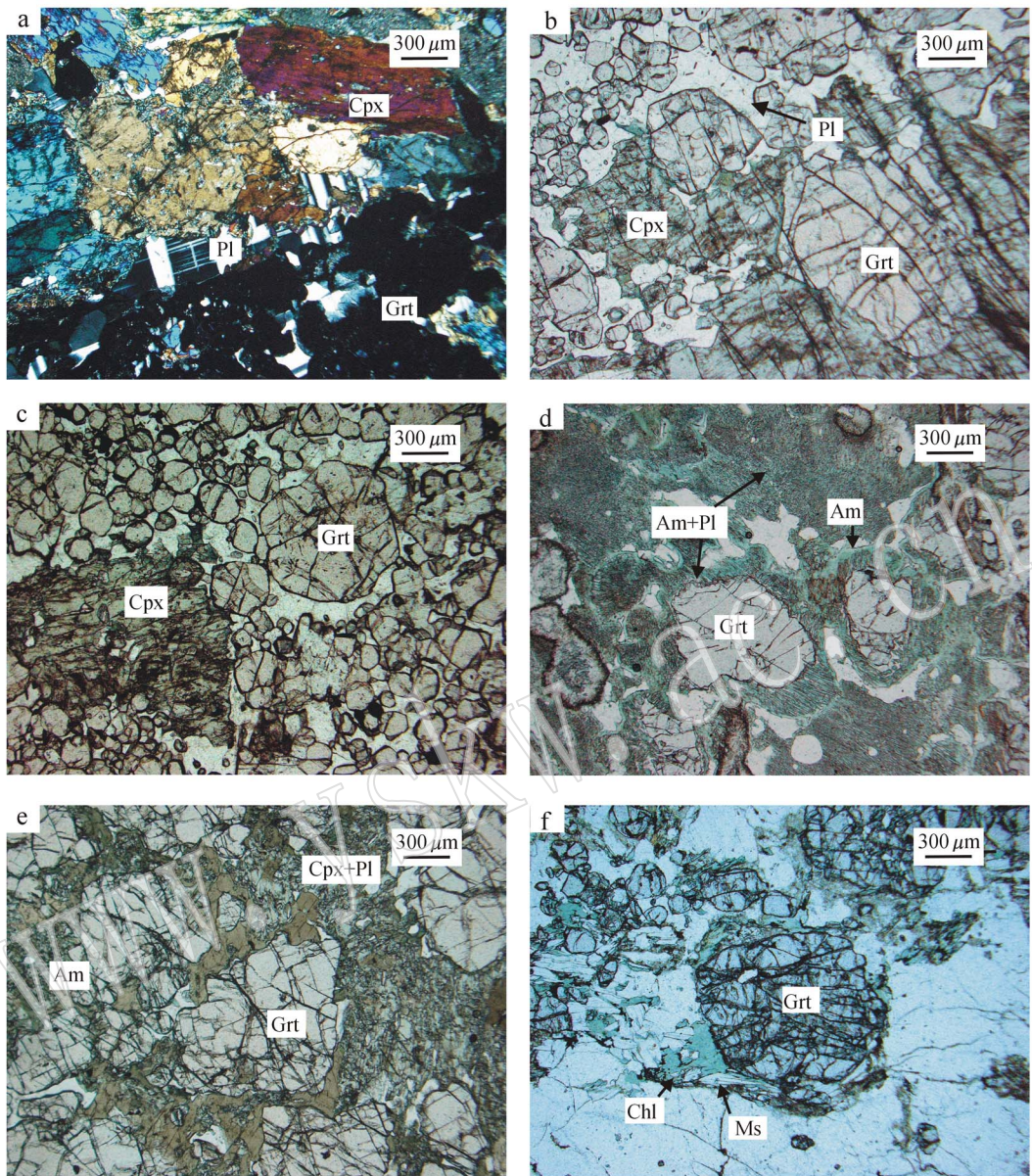


图2 基性麻粒岩的典型显微结构特征

Fig.2 Representative microphotographs of mafic granulite

a—石榴子石、单斜辉石(Cpx)、斜长石和石英在峰期条件下平衡共生(正交偏光); b—典型的峰期矿物组合:石榴子石+单斜辉石+斜长石+石英(单偏光); c—早期粗粒石榴子石被后期变形作用形成的细粒石榴子石包围(单偏光); d—在强退变区域,石榴子石被角闪石+斜长石后成合晶包围,而单斜辉石已完全转变为蠕虫状的后成合晶(单偏光); e—后期的角闪石生长在石榴子石周围,代表了高角闪岩相的退变质作用(单偏光); f—石榴子石周围发育的绿泥石、白云母显示了绿片岩相的矿物组合特征(单偏光)

a—equilibrium assemblages containing garnet, clinopyroxene, plagioclase and quartz (crossed polarized light); b—typical peak assemblage: garnet + clinopyroxene + plagioclase + quartz (plain light); c—former coarse-grained garnet surrounded by fine-grained garnets related to deformation (plain light); d—in retrograded intensely domain, garnet surrounded by symplectite of amphibole + plagioclase, and clinopyroxene completely replaced by vermicular symplectite (plain light); e—garnet surrounded by laterite amphibole, indicating high amphibolite facies metamorphism (plain light); f— assemblage of green-schist facies: garnet + muscovite + chlorite (plain light)

期矿物组合,电子探针分析显示其硬玉分子含量为14%~27%(摩尔分数),且从核到边部,硬玉分子含量减少,而 WEF (Wo + En + Fs)含量逐渐增加;另

一种单斜辉石(Cpx II)与斜长石组成后成合晶分布在粗粒单斜辉石(Cpx I)颗粒之间,相对于Cpx I而言,Cpx II的硬玉分子含量明显降低(5%~10%, mol),而

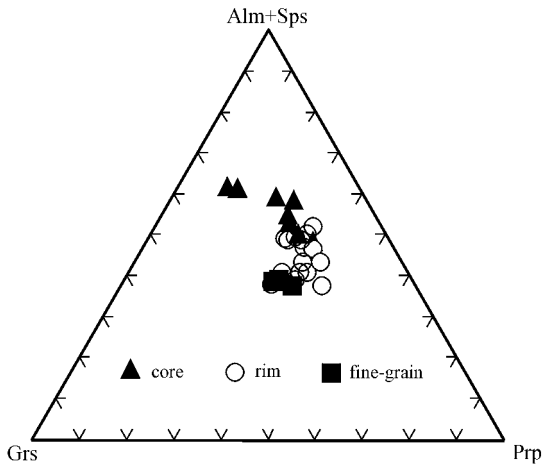


图 3 石榴子石的 (Alm + Sps) - Grs - Prp 三元成分判别图
Fig. 3 (Alm + Sps) - Grs - Prp triangular plot showing the compositional trend of garnets

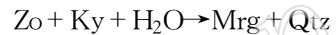
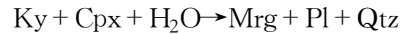
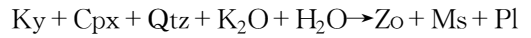
WEF 含量相应增加 (90% ~ 95% mol), 为后期减压过程的产物, 可能的反应为 $\text{Cpx I} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Pl} + \text{Cpx II}$ 。角闪石为主要的退变质产物, 在岩石中的含量随着退变质程度的加强而增加。角闪石主要以 3 种形式存在: ①以包裹体形式存在于石榴子石和单斜辉石等矿物中; ②以后成合晶的形式与斜长石分布在石榴子石和单斜辉石周围; ③部分退变强烈的样品中可见到与绿泥石和钠长石共生的阳起石, 代表岩石在折返到浅部地壳环境发生了绿片岩相变质作用。斜长石主要分布在基质中, 与单斜辉石和石榴子石交互共生。也见少量斜长石以包体形式分布在石榴子石中, 或与角闪石、单斜辉石 (Cpx II) 组成后成合晶。在成分上, 基质中大颗粒斜长石的 A_n 含量相对较高 ($A_n = 25 \sim 37$), 而以后成合晶形式存在的斜长石几乎全部为钠长石 ($A_n = 0 \sim 1$)。黝帘石或以变斑晶形式存在, 或以冠状体形式分布在蓝晶石周围。

2.1.2 中酸性麻粒岩 (Q08-14-4.2)

在野外露头 and 手标本上, 高压中酸性麻粒岩中可见石榴子石和暗色矿物 (单斜辉石、角闪石) 富集而成的带状构造。显微尺度上, 中酸性麻粒岩主要呈花岗变晶状结构。峰期高压麻粒岩相的矿物组合为石榴子石 + 斜长石 + 钾长石 + 石英 + 蓝晶石 ± 单斜辉石 ± 黝帘石/斜黝帘石 ± 方柱石 (图 4a), 并具有少量退变质作用形成的角闪石、黑云母、白云母, 副矿物为锆石和磷灰石, 且长石 + 石英含量大于 50%。

石榴子石主要有两种结构类型: ①中-细粒石榴子石 (Grt I) 以变斑晶形式存在, 内部包裹有黝帘石/

斜黝帘石、石英、长石等矿物包体; ②另一种石榴子石 (Grt II) 呈冠状体状生长在蓝晶石周围 (图 4b), 并被斜长石所围绕。蓝晶石或以变斑晶的形式与石榴子石、斜长石等平衡共生, 或以包裹体形式存在于石榴子石中。基质中的蓝晶石常被冠状体的黝帘石、石榴子石或斜长石 (图 4c) 所围绕, 这种显微结构反映了斜长石在高温/高压条件下的分解过程 (Puelles *et al.*, 2005)。在强烈的退变域内, 蓝晶石常被由白云母 + 珍珠云母 + 石英组成的后成合晶替代 (图 4d), 可能的反应如下:



2.2 变质阶段的划分

根据显微结构特征的差异, 都兰高压麻粒岩主要识别出 3 期变质演化阶段: ①峰期高压麻粒岩相阶段 (M_1); ②高角闪岩相阶段 (M_2); ③绿片岩相/低角闪岩相阶段 (M_3)。

2.2.1 高压麻粒岩相阶段

基性岩石典型的峰期矿物组合为单斜辉石 + 石榴子石 + 斜长石 + 石英 ± 蓝晶石 (图 2a、图 2b), 而中酸性岩石的峰期矿物组合为石榴子石 + 蓝晶石 + 斜长石 + 钾长石 + 石英 ± 单斜辉石 (图 4a)。两种因素可能阻碍峰期温压条件的精确确定: ①进变质作用 (生长环带) 和/或后期扩散过程而形成的化学成分环带会影响平衡矿物组合的确定; ②不同温压计缺乏共同的校正标准 (Zhao *et al.*, 2001)。为了排除或降低上述因素的影响, 选取 X_{Mg} 含量最高的石榴子石边缘 (最外边缘除外) 单斜辉石核部和与 Cpx I 共生的斜长石成分来进行温压估算, 获得峰期温压条件为 1.4 ~ 1.85 GPa 和 800 ~ 925°C (于胜尧等, 2009)。

2.2.2 高角闪岩相阶段

峰期后初始减压退变质过程 (M_2) 以单斜辉石和石榴子石变斑晶周围生长的斜长石 + 角闪石 ± 单斜辉石后成合晶或冠状体为特征 (图 2d、图 2e)。其中后成合晶结构主要为在石榴子石和单斜辉石附近交互生长的蠕虫状的角闪石 + 斜长石; 局部也可见单斜辉石 (Cpx II) + 斜长石集合体发育在早期大颗粒单斜辉石 (Cpx I) 之间, 这种结构形成于峰期后初始折返阶段, 并逐渐被后期的角闪石 + 斜长石取代, 显示从高压/高温麻粒岩相阶段到高角闪岩相阶段连续的温压变化过程 (Mengel and Rivers, 1991; Kumar and Chacko, 1991; Zhao *et al.*, 2001)。在强退

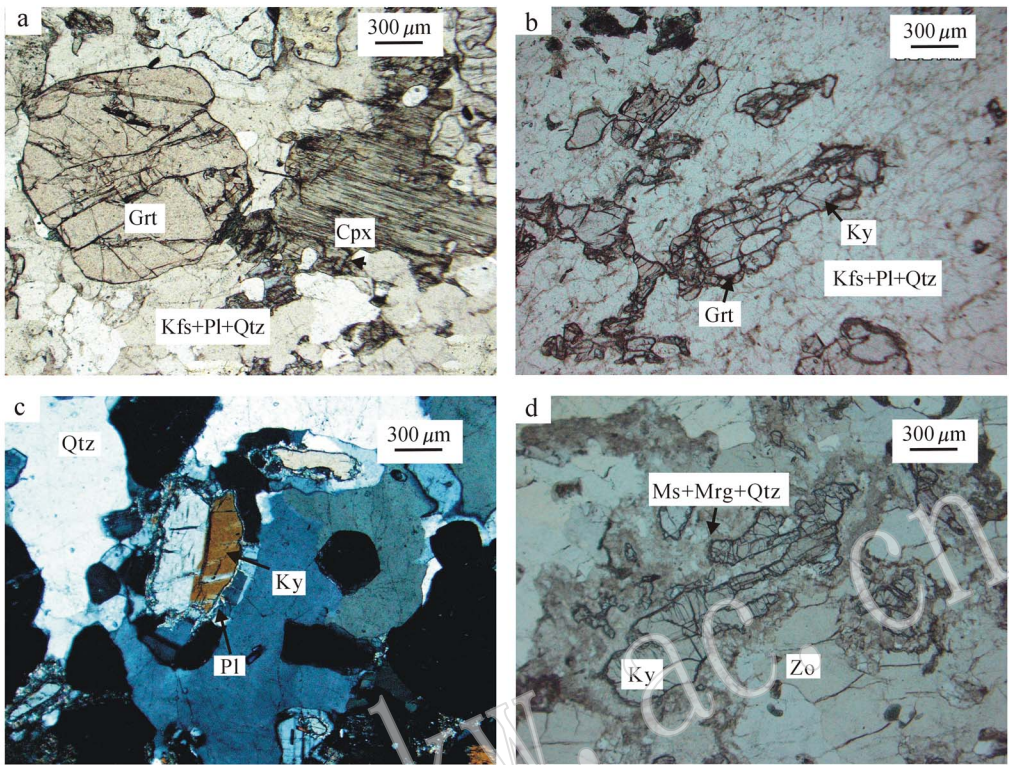


图4 中酸性麻粒岩的显微结构特征

Fig. 4 Microphotographs of intermediate-acid granulite

a—中酸性麻粒岩的峰期矿物组合: 石榴子石 + 单斜辉石 + 斜长石 + 钾长石 + 石英(单偏光); b—后期石榴子石以冠状体形式生长在蓝晶石周围(单偏光); c—蓝晶石被冠状斜长石包围(正交偏光); d—蓝晶石被白云母 + 珍珠云母 + 石英集合体替代(单偏光)

a—peak assemblage of intermediate-acid granulite: garnet + clinopyroxene + plagioclase + K-feldspar + quartz (plainlight); b—coronal garnet growing around kyanite (plainlight); c—kyanite surrounded by coronal plagioclase (crossed polarized light); d—kyanite replaced by symplectite of muscovite + margarite + quartz (plainlight)

变域内, 单斜辉石完全转变为角闪石 + 斜长石集合体, 仅保留单斜辉石假像。冠状体结构主要表现为石榴子石周围发育的双层结构: 内层为拉长的角闪石 + 斜长石集合体, 外层为角闪石。温压估算显示该阶段变质条件为 0.8~1.05 GPa 和 580~695°C (于胜尧等, 2009)。

2.2.3 绿片岩相/低角闪岩相

绿片岩相/低角闪岩相退变质阶段(M_3)主要特征表现为阳起石、绿泥石、白云母和钠长石等矿物的形成。石榴子石边部被阳起石、绿泥石和白云母等矿物取代(图 2f), 而单斜辉石完全退变为阳起石和钠长石。在强退变域内, 石榴子石完全被绿泥石替代仅保留假像, 蓝晶石则几乎全部转变为白云母 + 珍珠云母 + 石英组成的后成合晶。

3 锆石 U-Pb 定年

3.1 测定方法及流程

锆石的分选在河北廊坊区域地质调查研究院进行, 首先对样品进行人工重砂、重液、电磁仪等多种方法分离, 然后在双目镜下选择透明、无裂隙、无包裹体且有代表性的锆石颗粒, 将待测的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶, 磨至锆石颗粒中心部位后抛光, 样品抛光后进行 CL 显微结构观察, 在此基础上选择合适的锆石颗粒进行 U-Pb 年龄测定。锆石的 CL 图像分析在北京离子探针中心进行。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 原位定年在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 所使用的 ICP-MS 型号为 Elan 6100DRC, 激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司的 Geolas 200M 深紫外(DUV)

193 nm ArF 准分子(excimer)激光剥蚀仪。分析中采用的激光斑束直径为 30 μm ,以 ^{29}Si 作为外标,哈佛大学标准锆石 91500 作为外标校正。同位素比值数据处理采用 GLITTER(4.0 版)软件平滑方法进行,年龄计算采用 ISOPLOT(3.00 版)软件进行。具体分析方法见 Yuan 等(2004)的描述。

3.2 测定结果

锆石多数呈不规则状,少数为混圆状和短柱状,无色透明,粒径变化在 100~300 μm 之间,锆石内部发育石榴子石、单斜辉石、斜长石等矿物包裹体(图 5)。锆石 CL 图像显示,大部分锆石内部结构不均匀,呈斑杂状或云雾状,属典型的变质成因锆石;

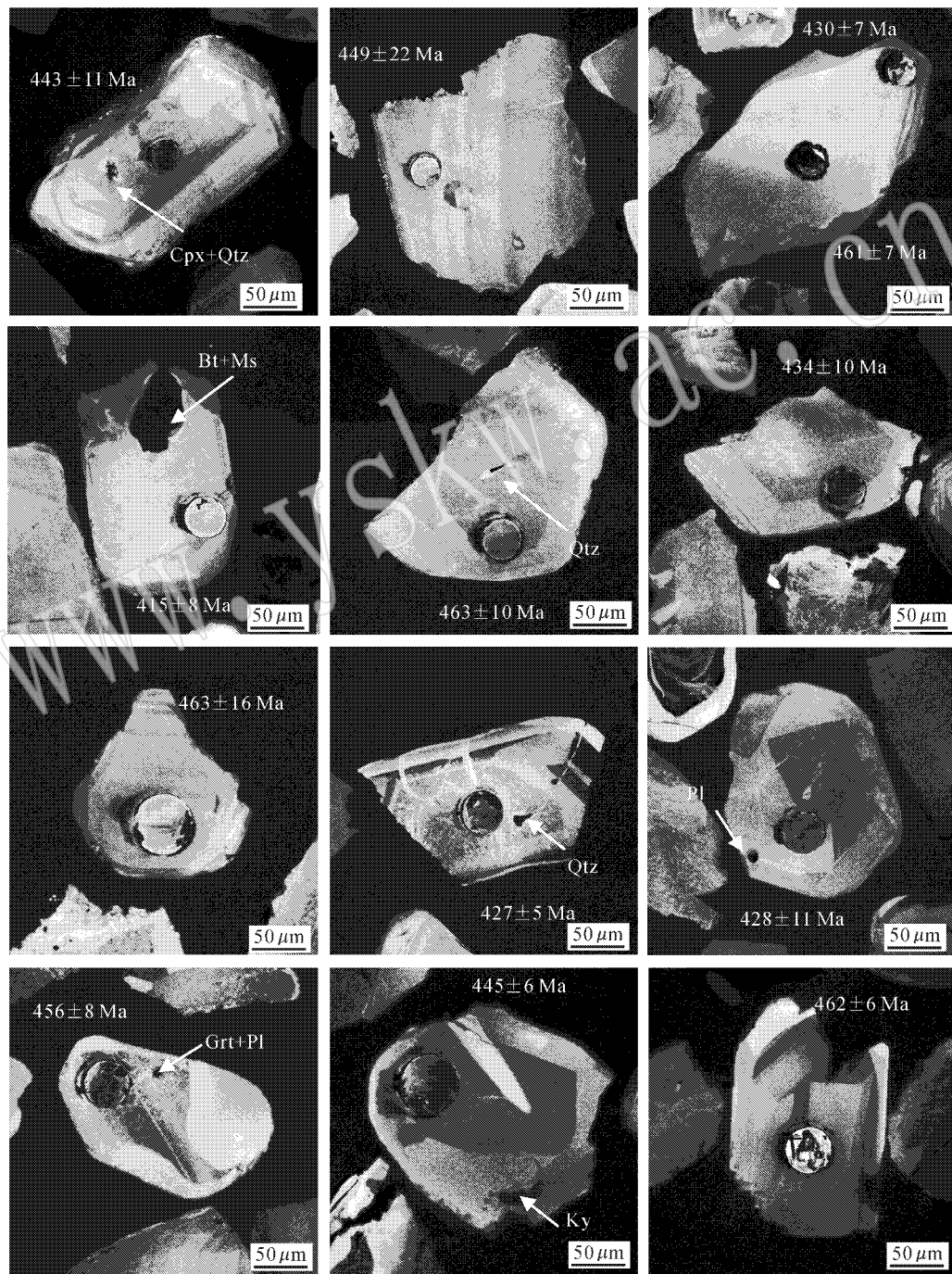


图 5 中酸性麻粒岩 Q08-14-4.2 中代表性锆石的 CL 图像

Fig. 5 Representative CL images of zircons from sample Q08-14-4.2

而少数锆石具有明显的振荡环带,显示与岩浆成因锆石类似的特征,可能为深熔作用的产物(Andersson *et al.*, 2002)。锆石 U-Pb 定年结果见表 2,在总共 39 个测点中,3 个数据点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄明显偏低(407~422 Ma),可能与晚期构造热事件或铅丢失有关,因而没有参与加权平均年龄的计算,另外测点 31 由于误差较大也未包括在平均年龄据算中。其余 35 个测点给出的谐和年龄分布在 428~484 Ma 之间(图 6),加权平均值为 $446.9 \pm 6.5 \text{ Ma}$ (MSWD=3.9)。

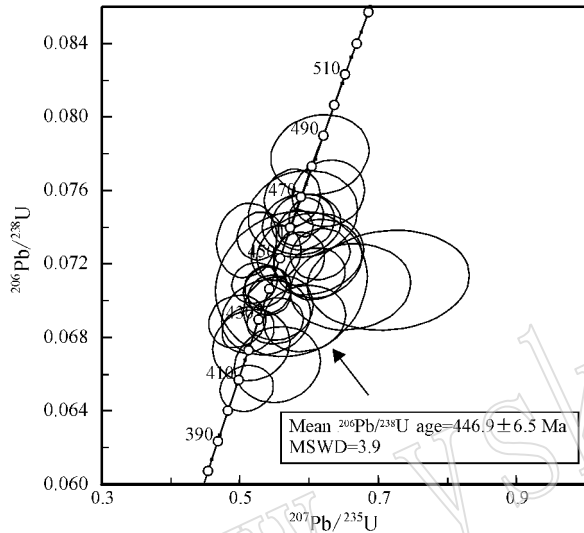


图 6 中酸性麻粒岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams of zircons from intermediate-acid granulite

4 讨论与结论

4.1 年代学结果探讨

锆石成因的确定是锆石定年的基础。越来越多的研究表明,深变质岩石中锆石的成因常常是非常复杂的,必须根据锆石的 CL 图像及其包体种类等特征综合分析判断。CL 图像结果显示,都兰高压麻粒岩中既有典型变质成因的锆石,又有类似于岩浆锆石特征的锆石,且部分锆石 Th/U 比值较高,指示其在形成过程中可能出现部分熔融导致褐帘石这类富集 Th 和 HREE 矿物的分解(Hermann, 2002; Bingen *et al.*, 2004),结合此岩石具有明显的深熔作用特征,推测部分具有岩浆振荡环带的锆石是在熔体熔融过程中生长的锆石。众所周知,锆石中的包裹体矿物成分研究不但可以很好地指示寄主岩石的演化历史(Tabata *et al.*, 1998; Ye *et al.*, 2000;

Liu F *et al.*, 2001; Liu J *et al.*, 2001), 同时还可以直接有效地制约锆石的形成环境(Gebauer *et al.*, 1997; Hermann *et al.*, 2001)。不同环境中形成的锆石具有与之对应的包裹体矿物组成(吴元保等, 2004)。而锆石中显微包裹体主要有以下 3 种成因机制:①锆石在生长时捕获同时形成的包裹体矿物(原生包裹体);②包裹体矿物沿着锆石的微裂隙进入原来存在的锆石中(次生包裹体);③寄主锆石中原来的包裹体矿物发生相变形成新的包裹体矿物(Gebauer *et al.*, 1997; Liu J *et al.*, 2001)。而只有第一类显微包裹体对于限定锆石形成环境有重要指示意义。样品 Q08-14-4.2 中锆石内部主要有石榴子石、单斜辉石、斜长石、石英、黑云母+白云母等显微包裹体,在阴极发光图像下,除少数白云母+黑云母包裹体位于锆石边部,且有裂隙与之相连,应为次生包裹体,而其他石榴子石、单斜辉石、斜长石、石英等包裹体矿物周围未见裂隙或斑杂状的扰动结构,判定其应为原生包裹体,可以用来有效地限定锆石的形成环境。

综上所述,高压麻粒岩样品(Q08-14-4.2)中锆石内部发育石榴子石、单斜辉石、斜长石和石英等矿物包裹体,这与薄片下观察的高压麻粒岩组合一致,反映锆石可能形成在峰期高压麻粒岩相变质条件下。因此笔者认为都兰中酸性高压麻粒岩发生高压麻粒岩相变质作用时代为 $446.9 \pm 6.5 \text{ Ma}$ 。

4.2 构造意义

Zhang G 等(2008)对沙柳河附近含蓝晶石榴辉岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年,并认为 445 Ma 代表了榴辉岩相变质作用时代,这与笔者所获得的高压麻粒岩相变质时代基本一致。同时代的榴辉岩和高压麻粒岩共同存在于同一碰撞造山带中,在世界上其他地区也有报道,如在欧洲华力西造山带东部的 Bohemian 地块(Konopasek and Karel, 2005)和华力西造山带西部的 Iberian 地块(Puelles *et al.*, 2005)也可见类似现象。Konopasek 和 Karel(2005)从岩石学、地质年代学等方面对 Bohemian 地块的 HP 变质岩进行了详细研究,并认为峰期变质条件不同、变质时代相同且空间上共存的榴辉岩和高压麻粒岩可能形成于不同但相关的构造单元,即榴辉岩形成于俯冲带中,而高压麻粒岩形成于俯冲带之上的增厚下地壳的根部环境,相对于榴辉岩而言,高压麻粒岩具有更高的地温梯度(图 7)。在都兰地区,温压估算显示榴辉岩形成的地温梯度为 $6.7 \sim 8.5^\circ\text{C}$

表 2 中酸性麻粒岩 Q08-14-4.2 的锆石 LA-ICP-MS 定年结果

Table 2 LA-ICP-MS analytical results of zircons of sample Q08-14-4.2

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	$\frac{w_B/10^{-6}}{Pb^*}$	$^{207}Pb/^{206}Pb \pm \%$		$^{207}Pb/^{235}U \pm \%$		$^{206}Pb/^{238}U \pm \%$		年龄/Ma		包裹体
	Th	U			$^{206}Pb/^{238}U$	\pm	$^{206}Pb/^{238}U$	\pm	$^{206}Pb/^{238}U$	\pm			
1	0.39	13.80	0.03	1.12	0.030 3	0.0	0.317 5	0.8	0.072 8	0.2	453	10.7	
2	0.51	3.95	0.13	0.39	0.252 3	4.8	1.646 8	16.5	0.075 1	0.3	467	17.9	
3	1.84	11.90	0.15	1.02	0.074 1	0.8	0.715 2	7.7	0.071 1	0.2	443	10.8	Cpx, Qtz
4	0.70	4.21	0.17	0.41	0.214 8	2.7	1.466 3	12.7	0.072 1	0.4	449	21.7	Ep
5	30.60	72.00	0.42	6.17	0.051 9	0.2	0.495 8	2.7	0.068 9	0.1	429	5.68	
6	0.48	22.90	0.02	1.95	0.058 5	0.4	0.616 0	4.7	0.077 9	0.1	484	8.65	Qtz
7	8.77	81.10	0.11	6.83	0.057 8	0.3	0.588 9	3.8	0.074 2	0.1	461	6.56	
8	6.45	28.60	0.23	2.34	0.062 7	0.4	0.593 4	4.0	0.069 0	0.1	430	7.23	Pl
9	1.46	26.00	0.06	2.02	0.067 1	0.6	0.659 5	5.8	0.070 8	0.2	441	9.31	
10	260.00	503.00	0.52	47.30	0.056 8	0.1	0.580 8	1.7	0.074 0	0.1	460	3.89	
11	27.50	104.40	0.26	8.95	0.059 1	0.2	0.585 5	2.4	0.072 3	0.1	450	5.75	
12	20.20	32.10	0.63	2.82	0.060 5	0.4	0.554 1	4.1	0.066 5	0.1	415	8.26	Bt, Ms
13	1.76	8.42	0.21	0.83	0.120 2	1.1	1.172 5	10.6	0.074 3	0.3	462	16.5	
14	59.80	320.00	0.19	27.85	0.057 9	0.1	0.595 9	1.6	0.074 5	0.1	463	4.12	
15	4.12	21.30	0.19	1.85	0.067 3	0.5	0.663 3	4.6	0.074 5	0.2	463	9.8	Pl
16	1.59	8.45	0.19	0.75	0.104 5	1.2	0.893 4	8.2	0.075 9	0.3	472	16.3	
17	73.20	143.00	0.51	13.11	0.055 1	0.2	0.552 0	2.4	0.072 6	0.1	452	5.94	
18	10.70	93.00	0.12	7.15	0.055 3	0.4	0.516 1	3.7	0.067 6	0.1	422	7.79	Bt
19	2.27	19.80	0.11	1.65	0.063 0	0.4	0.612 7	4.2	0.072 3	0.1	450	8.51	
20	0.79	8.55	0.09	0.73	0.120 2	1.1	1.172 3	10.6	0.074 5	0.3	463	16.1	
21	45.00	82.70	0.54	7.21	0.058 0	0.2	0.551 4	2.7	0.068 9	0.1	429	4.97	
22	8.97	25.00	0.36	2.17	0.061 9	0.5	0.601 6	5.1	0.072 5	0.1	451	8.82	Grt, Cpx, Pl
23	1.36	9.40	0.14	0.76	0.064 0	0.8	0.574 7	7.2	0.070 9	0.3	442	15.60	Qtz
24	8.97	87.10	0.10	7.10	0.053 1	0.2	0.521 1	2.2	0.071 0	0.1	442	4.40	Qtz
25	66.10	135.00	0.49	12.01	0.054 9	0.2	0.537 3	2.0	0.070 8	0.1	441	4.42	Qtz
26	27.60	104.60	0.26	8.97	0.059 3	0.2	0.585 6	2.4	0.072 4	0.1	450	5.77	
27	126.00	208.00	0.61	18.98	0.055 8	0.2	0.543 0	2.1	0.070 3	0.1	438	4.34	
28	7.81	21.10	0.37	1.88	0.096 5	0.8	0.925 6	8.8	0.068 7	0.2	428	10.9	Rt
29	20.70	106.00	0.19	9.08	0.052 5	0.2	0.528 2	2.1	0.073 5	0.1	457	5.17	Rt
30	2.49	19.10	0.13	1.65	0.059 2	0.5	0.591 5	5.2	0.074 7	0.2	465	9.41	
31	30 429	20 232	1.50	80 636.00	1.239 2	16.3	95.863 6	1 292.8	0.491 8	4.1	2 578	178	
32	1.17	7.16	0.16	0.60	0.104 6	1.2	0.950 3	10.7	0.076 2	0.3	473	17.2	
33	13.00	54.80	0.24	4.65	0.062 1	0.3	0.616 1	2.8	0.072 5	0.1	451	5.50	
34	28.70	106.00	0.27	8.75	0.055 5	0.2	0.539 6	2.3	0.070 6	0.1	440	5.08	
35	24.60	67.30	0.37	5.89	0.0621	0.3	0.608 6	2.9	0.071 5	0.1	445	5.62	Ky, Ep
36	15.90	54.70	0.29	4.66	0.051 3	0.3	0.509 5	2.9	0.073 3	0.1	456	8.04	Grt, Pl
37	1.20	23.40	0.05	1.78	0.058 4	0.4	0.537 8	4.3	0.069 1	0.1	431	8.10	
38	50.30	89.70	0.56	7.36	0.057 0	0.3	0.509 3	2.6	0.065 2	0.1	407	4.986	
39	22.00	62.10	0.35	5.65	0.058 3	0.3	0.591 2	3.0	0.074 3	0.1	462	6.02	Ky, Pl

/km, 而邻近的高压麻粒岩形成的地温梯度为 11.5 ~ 18°C/km, 二者明显不同的地温梯度显示它们形成于不同的热动力学环境(张建新等, 2009)。于胜尧等(2009)从岩石学、矿物化学等方面探讨了都兰榴辉岩和高压麻粒岩之间的关系, 并认为都兰高压麻粒岩不是榴辉岩改造型麻粒岩, 其主要证据为: ①高压麻粒岩中石榴子石、单斜辉石、斜长石、石英和蓝晶石平衡共生, 且部分样品斜长石可达 30%, 如

此高含量的矿物不可能是早期绿辉石或其他矿物分解产生的(Medaris *et al.*, 2006); ②都兰高压麻粒岩中石榴子石保存了典型的生长环带的特征, 且石榴子石的包体显示岩石可能经历了角闪岩相进变质直接到高压麻粒岩相, 没有经历过榴辉岩相阶段, 而生长环带的保留也显示高压麻粒岩在峰期条件下滞留时间较短且经历了一个快速的折返过程(Spear *et al.*, 1984), 与榴辉岩相后的热松弛作用不符; ③如果

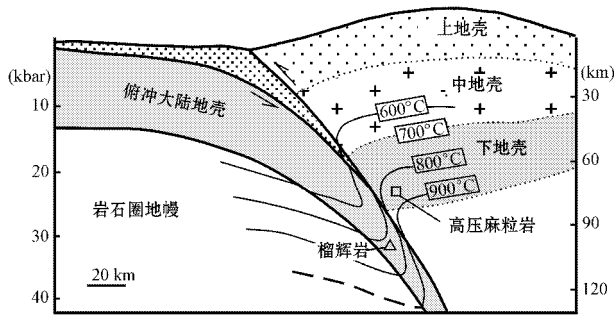


图 7 高压麻粒岩和榴辉岩形成构造动力学背景模式图
(据张建新等 2009)

Fig. 7 Model showing geodynamic setting for the formation of high-pressure granulites and associated eclogites (after Zhang Jianxin *et al.*, 2009)

高压麻粒岩经历了榴辉岩相峰期后的热松弛作用，常在降压增温过程产生典型高温矿物组合，如单斜辉石分解形成斜方辉石，蓝晶石分解形成假蓝宝石、刚玉等 (Möller, 1988; Kalt *et al.*, 1994; Godard and Mabit, 1998)，而本文的样品中并没有发现这些高温矿物；④最近的研究显示，相邻的榴辉岩在减压折返过程中直接退变到角闪岩相，中间未经过麻粒岩相叠加 (Zhang G B *et al.*, 2009)，也就是说榴辉岩经历了等温降压或略降温降压的快速折返过程，而未发生热松弛作用，这也从侧面证实了本区高压麻粒岩并非榴辉岩退变质作用的产物。本文所获得的年代学资料进一步证实了高压麻粒岩并非榴辉岩退变质作用而形成的，二者有着不同的变质演化历史。因此，笔者认为都兰榴辉岩和高压麻粒岩在早古生代中期同时形成于俯冲带和俯冲带之上的增厚地壳根部环境，明显不同的热构造环境注定了各自独立的变质演化历史，然而鉴于本文有关高压麻粒岩变质作用年代学数据资料有限，关于它们的折返过程和动力学机制还需要进一步探讨。

References

Andersson J, Möller C and Johansson L. 2002. Zircon geochronology of migmatite gneisses along the Mylonite Zone (S Sweden): A major Sveconorwegian terrane boundary in the Baltic Shield [J]. *Precambrian Research*, 114: 121~147.

Bingen B, Austrheim H, Whitehouse M J, *et al.* 2004. Trace element signature and U-Pb geochronology of eclogite-facies zircon, Bergen Arcs, Caledonides of W Norway [J]. *Contribution to Mineral and Petrology*, 147: 671~683.

Carswell D A and O'Brien P J. 1993. Thermobarometry and geotectonic

significance of high-pressure granulites: examples from the Moldanubian zone of the Bohemian massif in lower Austria [J]. *Journal of Petrology*, 34: 427~459.

Gebauer D, Schertl H P, Brix M, *et al.* 1997. 35 Ma old ultra-high-pressure metamorphism and evidence for very rapid exhumation in the Dora Maira Massif, Western Alps [J]. *Lithos*, 41: 5~24.

Godard G and Mabit J L. 1998. Peraluminous sapphirine formed during retrogression of a kyanite-bearing eclogite from Pays de Le'on, Armorican Massif, France [J]. *Lithos*, 43: 15~59.

Hermann J, Rubatto D and Korsakov A. 2001. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan) [J]. *Contribution to Mineral and Petrology*, 141: 66~82.

Hermann J. 2002. Allanite: thorium and light rare earth element carrier in subducted crust [J]. *Chemical Geology*, 192: 289~306.

Kalt A, Hanel M, Schelicher H, *et al.* 1994. Petrology and geochronology of eclogites from the Variscan Schwarzwald (F. R. G.) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115: 287~302.

Konopasek and Karel Schulmann. 2005. Contrasting Early Carboniferous field geotherms: evidence for accretion of a thickened orogenic root and subducted Saxothuringian crust (Central European Variscides) [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 162: 463~470.

Kumar G R R and Chacko T. 1991. Geothermobarometry of mafic granulites and metapelite from the Palghat Gap, South India: petrological evidence for isothermal uplift and rapid cooling [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 12: 479~492.

Liu F, Xu Z and Katayama I. 2001. Mineral inclusions in zircons of para and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. *Lithos*, 59: 199~215.

Liu J, Ye K and Maruyama S. 2001. Mineral inclusions in zircon from gneisses in the Ultrahigh-pressure zone of the Dabie Mountains, China [J]. *Journal of Geology*, 109: 523~535.

Liu Y and Zhong D. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 451~466.

Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, *et al.* 2006. Geochronology and tectonic significance of Middle Proterozoic granitic orthogneiss, North Qaidam HP/UHP terrane, Western China [J]. *Mineralogy and Petrology*, 88: 227~241.

Medaris Jr E D, Ghent H F, Wang J H, *et al.* 2006. The Spacie eclogite: constraint on the P-T-t history of the Gföhl granulite terrane, Moldanubian Zone, Bohemian Massif [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 86: 203~220.

Mengel F and Rivers T. 1991. Decompression reactions and P-T conditions in high-grade rocks, Northern Labrador: P-T-t paths from individual samples and implications for Early Proterozoic tectonic evolution [J]. *Journal of Petrology*, 32: 139~167.

Möller C. 1988. Decompressed eclogites in the Sveconorwegian (Grenvillian) orogen of SW Sweden: Petrology and Tectonic implications [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 641~656.

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

- O'Brien P J. 2006. Type-locality granulites: high-pressure rocks formed at eclogite-facies conditions[J]. *Mineralogy and Petrology*, 86: 161~175.
- O'Brien P J and Rotzler J. 2003. High-Pressure granulites: Formation, recovery of peak conditions and implication for tectonics[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 3~20.
- Puelles B A, Balos J and Gil Iburguchi. 2005. Metamorphic evolution and thermobaric structure of the subduction related Bacariza high-pressure granulite formation(Cabo Ortegal Complex, NW Spain) [J]. *Lithos*, 84: 125~149.
- Rotzler, Rolf L and Romer. 2001. P-T-t evolution of ultrahigh-temperature granulites from the Saxon Granulite Massif, Germany. Part I: Petrology[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 1995~2013.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica and Mineralogica*, 28(5): 495~500(in Chinese with English abstract).
- Song S G, Zhang L F and Chen J. 2005. Sodid amphibole exsolutions in garnet from garnet-peridotite, North Qaidam UHPM belt, NW China: implications for ultradeep-origin and hydroxyl defects in mantle garnets[J]. *American Mineralogist*, 90: 814~820.
- 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 [J]. *Journal of Petrology* 47: 435~455.
- Song S, Yang J, Liou J G, et al. 2003a. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM terrane, the north Qaidam, NW China[J]. *Lithos*, 70: 195~211.
- Song S, Yang J, Xu Z, et al. 2003b. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the north Qaidam, northern Tibet, NW China[J]. *Journal of metamorphic Geology*, 21: 631~644.
- Spear F S, Selverstone J, Hickmott D, et al. 1984. PT paths from garnet zoning: a new technique for deciphering tectonic processes in crystalline terranes[J]. *Geology*, 12: 87~90.
- Tabata H, Yamauchi K and Maruyama S. 1998. Tracing the extent of a UHP metamorphic terrane: Mineral-inclusion study of zircons in gneisses from the Dabie Shan[A]. Hacker B and Liou J. *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultra-high-pressure Rocks*[C]. Kluwer: Dordrecht, 261~274.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554~1569.
- Yang J S, Song S G, Xu Z Q, et al. 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Paleozoic ultrahigh pressure metamorphic belt, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175~179(in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, et al. 2002. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction mode[J]. *Terra Nova*, 14(5): 397~404.
- Ye K, Yao Y and Katayama I. 2000. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: New implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss[J]. *Lithos*, 52: 157~164.
- Yu Shengyao, Zhang Jianxin and Li Jinping. 2009. Metamorphism history and dynamics of high-pressure granulites in the Dulan area of the North Qaidam Mountains, northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2224~2234(in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. 2004. Accurate U-Pb age trace element determination of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Geostand. News*, 28: 353~370.
- Zhang G, Song S, Zhang L, et al. 2008. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: evidence from petrology, geochemistry and geochronology[J]. *Lithos*, 104: 99~118.
- Zhang G B, Zhang L F and Song S G. 2009. UHP metamorphic evolution and SHRIMP geochronology of a meta-ophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China[J]. *J. Asian Earth Sci*(in press).
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. 2008. Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the North Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, Western China: evidence from zircon U-Pb geochronology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 12: 732~749.
- Zhang J X, Meng F C, Li J P, et al. 2009a. Coesite in eclogite from the North Qaidam and its implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 1105~1110.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao, et al. 2007. Metamorphic history recorded in high pressure mafic granulites in the Luliangshan Mountains to the north of Qaidam Basin, northwest China: evidence from petrology and zircon SHRIMP geochronology [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 85~97(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Meng Fancong, et al. 2009b. Paired high pressure granulite and eclogite in collision orogens and their geodynamic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2050~2066(in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. 2001. High-pressure granulites(retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and tectonic implications[J]. *Journal of Petrology*, 42: 1141~1170.

附中文参考文献

- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495~500.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释和制约[J]. *科学通报* 49(16): 1589~1604.
- 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[J]. *地质学报*, 75(2): 175~179.
- 于胜尧, 张建新, 李金平. 2009. 柴北缘都兰高压麻粒岩的变质演化及形成的动力学背景[J]. *岩石学报*, 25(9): 2224~2234.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧. 2007. 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[J]. *地学前缘*, 14: 85~97.
- 张建新, 于胜尧, 孟繁聪, 等. 2009. 造山带中成对出现的高压麻粒岩与榴辉岩及其地球动力学意义[J]. *岩石学报*, 25(9): 2050~2066.