

•专题研究•

## 柴北缘鱼卡榴辉岩的 $pT$ 演化历史

张建新, 孟繁聪, 杨经绥

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

**摘要:** 鱼卡榴辉岩位于柴北缘 HP/UHP 变质带的西段, 榴辉岩呈透镜状或似层状分布在变质泥质岩、花岗质片麻岩及少量大理岩中, 主要由石榴石和绿辉石组成, 具有含量不等的多硅白云母、角闪石、黝帘石(斜黝帘石或绿帘石)、金红石和石英等。岩相学和矿物化学研究显示榴辉岩经历了3期与俯冲和折返作用有关的变质演化阶段:(1)前榴辉岩相进变质阶段, 榴辉岩矿物组合为石榴石(核)+绿帘石+斜长石+角闪石, 以包体的形式保存于具有生长环带的石榴石核部, 形成的温压条件为  $p = 1.06 \sim 1.11$  GPa,  $t = 560 \sim 577$  °C; (2)榴辉岩相变质阶段, 以绿辉石、多硅白云母等矿物围绕石榴石定向分布为特征, 其矿物组合为石榴石(边)+绿辉石+多硅白云母±黝帘石, 温压估算获得榴辉岩相的变质条件为  $p = 2.35 \sim 2.52$  GPa,  $t = 610 \sim 680$  °C; (3)后榴辉岩相变质阶段, 矿物组合为石榴石+角闪石+斜长石, 主要存在于围绕榴辉岩透镜体分布的退变榴辉岩(角闪石化榴辉岩)中, 形成的温压条件为  $p = 1.09 \pm 0.12$  GPa,  $t = 635 \pm 44$  °C。研究结果显示榴辉岩的  $pT$  轨迹具有“发卡”型特点, 表明鱼卡榴辉岩经历了快速俯冲和折返的演化历史。

**关键词:** 柴北缘; 鱼卡; 榴辉岩;  $pT$  演化; 矿物化学

**中图分类号:** P588.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2005)04-0245-10

### $pT$ evolution of the Yuqia eclogite in northern Qaidam Mountains

ZHANG Jian\_xin, MENG Fan\_cong and YANG Jing\_sui

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

**Abstract:** In the Yuqia area within the western segment of northern Qaidam Mountains, eclogite lenses and interlayers are enclosed within metapelites, granitic gneisses and small amounts of marbles. Eclogite is composed of garnet and omphacite with varying amounts of amphibole, phengite, zoisite (clinozoisite or epidote), rutile and quartz. Petrography, mineral chemistry indicate that the eclogites record a three-stage evolution connected to Early Paleozoic burial and subsequent exhumation: (1) The prograde stage is composed of garnet cores and large amounts of mineral inclusions including amphibole, epidote and plagioclase.  $pT$  estimates give metamorphic conditions of 1.06~1.11 GPa and 560~577 °C. (2) The eclogite facies stage is characterized by the assemblages of oriented omphacite, phengite, barroisite and zoisite around garnet porphyroblasts. The assemblages record peak conditions of 2.35~2.51 GPa and 610~680 °C. (3) Retrograde assemblages are recognized in amphibolitized eclogite along the eclogite boudin margin. The assemblages of garnet, amphibole and plagioclase record retrograde conditions of 1.09±0.12 GPa and 630±44 °C. It is inferred that there existed a hairpin-shaped  $pT$  path, and all this suggests that the Yuqia eclogites underwent an evolutionary history of rapid burial and uplift.

**Key words:** northern Qaidam Mountains; Yuqia; eclogite;  $pT$  evolution; mineral chemistry

收稿日期: 2005-01-31; 修订日期: 2005-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40272095, 40472102); 中国地质调查局地质调查资助项目(200413000031, 200313000058); 国土资源部百名优秀青年科技人才计划资助

作者简介: 张建新(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要从事造山带的变质变形作用研究, E-mail: zjx66@yeah.net.

近10年来,对中国西部阿尔金山和柴北缘 HP/UHP 变质岩的研究取得一系列重要进展,先后在阿尔金山断裂两侧的柴北缘和南阿尔金山地区发现有分布在长英质片麻岩中的榴辉岩和石榴橄榄岩(杨建军等,1994;杨经绥等,1998,2000;刘良等,1996,2002;张建新等,1999,2000)。通过对这两处的榴辉岩和石榴橄榄岩的野外产状、围岩特征、岩石及矿物组合、形成的温压条件、地球化学、原岩特征及其形成时代的对比研究,发现它们具有非常相似的特征(许志琴等,1999; Zhang *et al.*, 2001; 杨经绥等,2001)。最近在南阿尔金山和柴北缘地区均发现有超高压变质作用的标志(杨经绥等,2001;张建新等,2002a;刘良等,2003),因此,阿尔金山-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。

柴北缘榴辉岩由西至东主要分布在鱼卡-落凤坡、锡铁山和都兰北3个地区。本文研究的鱼卡榴辉岩分布在柴北缘西段,对它已有一些岩石学、年代学及地球化学等方面的研究(杨经绥等,1998;张建新等,2000,2002b),但对榴辉岩的温压演化,特别是进变质的温压历史还缺乏详细的报道。本文以柴北缘西段鱼卡地区包在变质泥质岩中的榴辉岩为例,通过岩相学研究、矿物化学及温压估算来确定榴辉岩的温压演化历史,并简要探讨其构造意义。

## 1 区域地质背景及榴辉岩的野外产状

柴北缘 HP/UHP 变质带分布在祁连地块和柴达木地块之间,西起鱼卡地区,东至都兰沙柳河地区。根据野外关系及岩石组合,可进一步把柴北缘 HP/UHP 变质带划分成4个 HP/UHP 变质单元(图1):鱼卡-落凤坡榴辉岩-高压泥质岩单元(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)。鱼卡-落凤坡 HP/UHP(?) 变质单元主要由榴辉岩、高压变质泥质岩、花岗质片麻岩及少量大理岩组成(图2)。榴辉岩主要为1 m 到数十米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,且边部具强烈的剪切变形,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,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石(钙铝石榴石分子达62 mol%)和多硅白云母(Si=3.4 p. f. u)

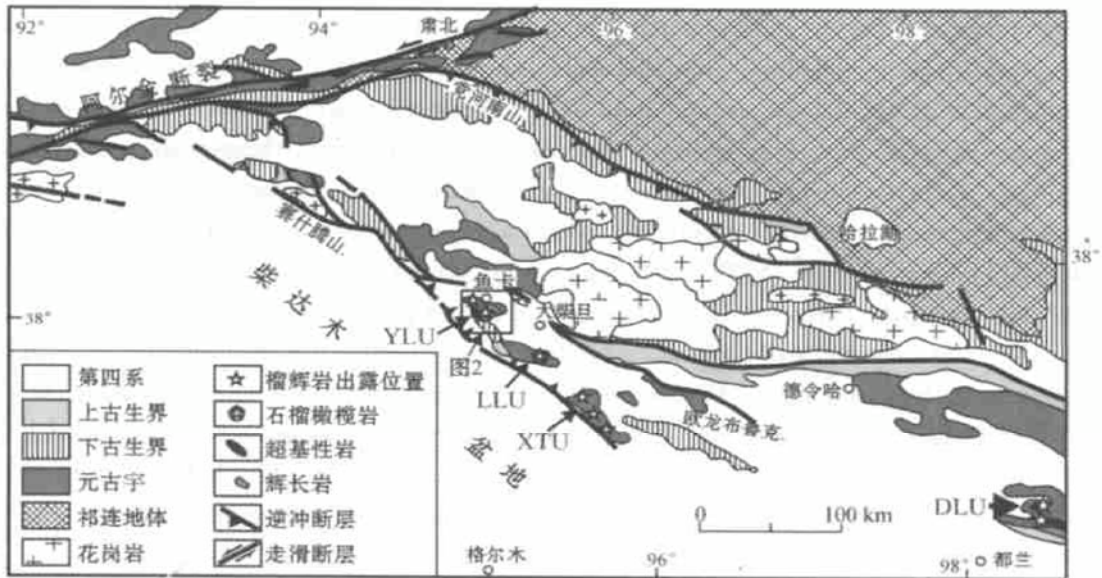


图1 柴北缘 HP/UHP 变质带的分布简图

Fig. 1 Geological sketch map showing the distribution of the HP/UHP metamorphic belt in northern Qaidam Mountains

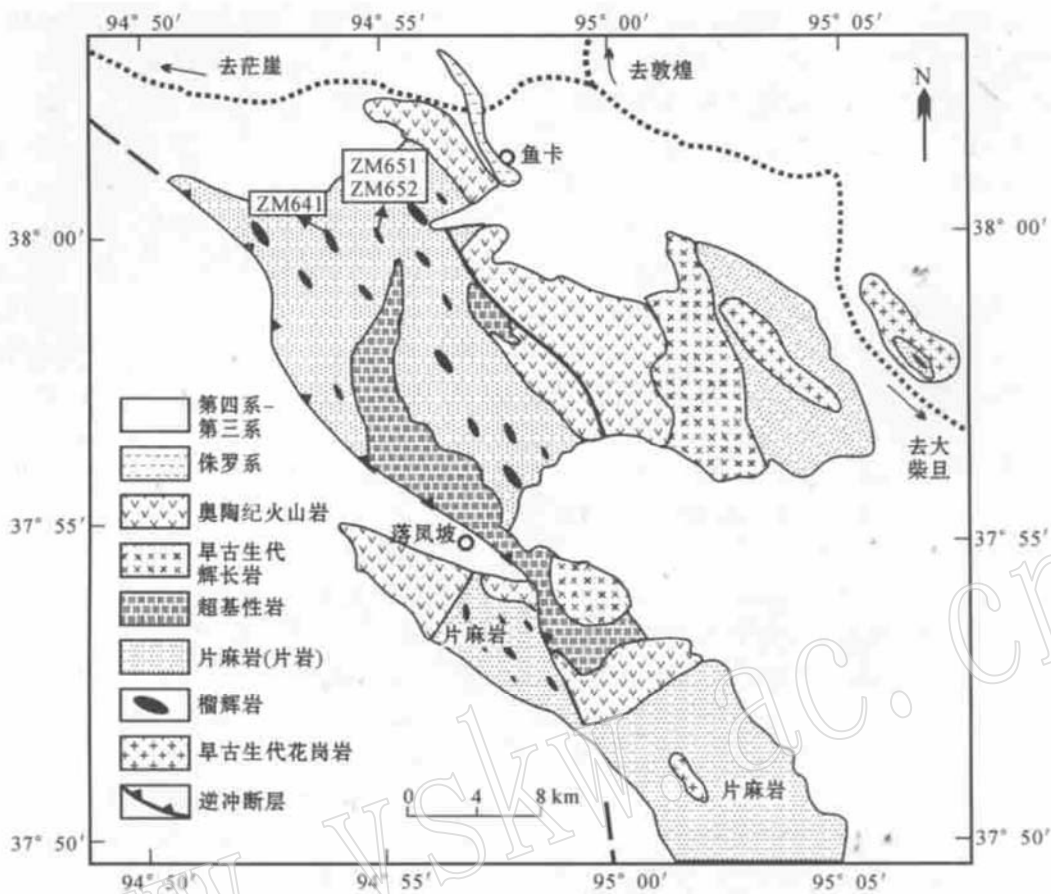


图2 鱼卡榴辉岩分布及地质背景图[据1: 20万南八仙幅、大柴旦幅和王惠初等(2001)等改编]

Fig. 2 Distribution and geological setting of Yuqia eclogite (modified from 1: 200 000 geological map of Nanbaxian and Da Qaidam area, and Wang Huichu *et al.*, 2001)

等高压变质矿物的残留。变质泥质岩的典型矿物组合为石榴石+ 蓝晶石+ 硬绿泥石+ 多硅白云母+ 石英+ 金红石, 常围绕透镜状榴辉岩分布, 局部可见与似层状的榴辉岩互层。已有研究表明, 变质泥质岩经历了高压变质作用(张建新等, 2004)。本文所研究的榴辉岩样品的围岩为变质泥质岩, 样品位置见图2。

## 2 岩相学及矿物化学

在近50个榴辉岩样品的岩相学观察的基础上, 本文选择两个代表性的榴辉岩样品(ZM641和ZM651)和1个退变榴辉岩样品(ZM652)进行详细描述。电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成, 所用探针型号为JXA8800, 加速电压为20 kV, 电流为 $2 \times 10^{-8}$  A, 电子束斑为5  $\mu$ m。除标注外, 本文的矿物缩写据Kretz(1983), 角闪石分类据

Leake等(1997)。

### 2.1 岩相学

榴辉岩主要由石榴石和绿辉石组成, 具有含量不等的多硅白云母、角闪石、黝帘石(斜黝帘石、绿帘石)、金红石和石英等。石榴石多为自形晶, 被绿辉石、多硅白云母、黝帘石等矿物所围绕, 构成榴辉岩的叶理和拉伸线理。一些大的石榴石晶体(> 3 mm)的核部具有大量的包体, 主要有角闪石、绿帘石、斜长石和石英等(图3a、3c、3f), 这些包体矿物局部在石榴石中定向分布, 并显示出“S”型, 代表了前榴辉岩相阶段的叶理。石榴石边部包体较少(图3e), 主要为绿辉石、多硅白云母、黝帘石/斜黝帘石、金红石和石英, 与基质的矿物组合相同(图3b)。榴辉岩的退变质(减压)结构主要表现为绿辉石分解成细粒或隐晶质的后成合晶(Cpx + Pl或Amp + Pl)(图3d), 并可见石榴石有角闪石和斜长石的冠状边。在一些榴辉岩透镜体的边部, 榴辉岩相的组构可完

全被定向分布的角闪石、斜长石和黑云母等所代替, 这些矿物所构成的叶理和拉伸线理与周围的片麻岩(片岩)一致。在榴辉岩和退变榴辉岩中, 可识别出3种结构类型的角闪石: 第1种角闪石(Amp I)作为包体分布在石榴石核部, 与绿帘石和斜长石等矿物共生; 第2种角闪石(Amp II)主要分布在榴辉岩的基质中, 与绿辉石、黝帘石和多硅白云母一起定向分布; 第3种角闪石(Amp III)主要存在于退变榴辉岩中, 常与斜长石构成后成合晶。

根据以上岩相学特征, 可划分出榴辉岩3阶段矿物组合:

(1) Grt(核) + Ep + Amp I + Pl + Qtz, 呈包体分布在具有进变质成分环带的石榴石核部, 代表前榴辉岩相的矿物组合;

(2) Grt(边) + Omp + Phe + Rt ± Zo ± Amp II + Qtz, 呈包体分布在具有进变质成分环带的石榴石边部或榴辉岩的基质中, 为榴辉岩相矿物组合;

(3) Grt + Amp III + Pl ± Bt + Qtz, 保存在退变质榴辉岩中, 其中石榴石经过退变质条件下的再平衡, 代表退变质阶段的矿物组合。

## 2.2 矿物化学

榴辉岩中的石榴石成分变化较大, 其端员组分为  $\text{Alm}_{45-54}\text{Grs}_{23-32}\text{Prp}_{8-29}\text{Sps}_{0.9-9}$ 。一些石榴石具有明显的生长环带, 成分面扫描图像显示生长环带具有平行于晶体表面生长的特征(图4), 线扫描成分剖面显示锰铝榴石分子具有典型进变质生长环带特征的“钟形”剖面特征, 而镁铝榴石、铁铝榴石和钙铝榴石在核部相对较均匀, 向边部, 镁铝榴石突然增加, 而铁铝榴石和钙铝榴石急剧减少(图5)。这种成分环带特征被解释为石榴石早期生长在相对低温低压的环境下, 然后第2期高温高压条件下生长的石榴石增生在其边部(O'Brien, 2000)。成分剖面显示出的钙铝榴石分子具有反向变化特征(图5), 这可能与变质反应矿物组合的变化有关; 它的峰值分布在核和边过渡部位, 反映了变质反应过程中绿帘石的消耗。面扫描成分图还显示, 在石榴石的外带靠近多硅白云母包体(图4石榴石左上角)或无包体的线性区域(图4中石榴石右侧, 可延伸到石榴石边界), Fe/Ca突然减少, 而Mg突然增加(图4), 这种特征被认为是岩石在向榴辉岩相转化过程中流体介入的结果(Engvik & Anderson, 2000)。退变榴辉岩中的石榴石成分相对均匀, 其端员组分为  $\text{Prp}_{11-12}\text{Alm}_{57-58}\text{Grs}_{27-28}\text{Sps}_{1.5-2.0}$ 。

榴辉岩中绿辉石的硬玉分子变化范围为25~42 mol%, 且基质中绿辉石的硬玉分子(34~42 mol%)高于包在石榴石边部绿辉石包体的硬玉分子含量(25~30 mol%)(表1)。多硅白云母的硅含量为3.36~3.42 Si p. f. u. (表1)。Amp I 富Al( $\text{Al}_2\text{O}_3=17\% \sim 19\%$ ), 贫Si( $\text{SiO}_2=37\% \sim 39\%$ ); Amp II为相对贫铝和富硅的钠钙闪石(冻蓝闪石); Amp III具有浅闪石或非闪石的成分特征。榴辉岩中石榴石核部斜长石包体的  $A_n=10 \sim 20$ , 而退变榴辉岩中斜长石的  $A_n=20 \sim 30$ 。

## 3 温压估算及温压演化

石榴石中的包体矿物为确定榴辉岩的早期演化历史提供了重要信息。结合石榴石的成分环带, 这些包体可以用于重建石榴石生长过程的温压条件。当然, 其前提条件是石榴石和这些被包裹的矿物代表了原来的平衡组合, 在被包裹后没有改变其成分(Elvevold and Gilotti, 2000)。面扫描成分图(图4)显示石榴石核部与相邻的包体矿物没有明显的Fe或Mg环带, 应代表了原来的平衡状态。根据具有生长环带的石榴石核部的包体组合 Amp I + Pl + Ep + Qtz, 运用 THERMOCALC 软件(V3.1)进行平均温压计算, 两个样品(ZM641和ZM651)获得的温压条件分别是:  $p=1.06 \pm 0.16$  GPa,  $t=560 \pm 45$  °C 和  $p=1.11 \pm 0.26$  GPa,  $t=577 \pm 75$  °C ( $a_{\text{H}_2\text{O}}=1.0$ )(表2)。如假定  $a_{\text{H}_2\text{O}}=0.5$ , 所估算的温度将降低20~23 °C, 压力降低0.04~0.05 GPa(表2)。

峰期榴辉岩相的温压条件可运用 Ravna(2000)的石榴石-单斜辉石  $\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}$  交换温度计和 Ravna & Terry(2001)的 Grt-Cpx-Phe 压力计来估算, 其中假定单斜辉石的  $\text{Fe}^{3+}=\text{Na}-(\text{Al}+\text{Cr})$ , 石榴石的全Fe被作为  $\text{Fe}^{2+}$ 。石榴石边部成分和相邻的绿辉石和多硅白云母成分被用于估算峰期榴辉岩相条件, 两个样品得到的温压条件为  $t=610 \sim 680$  °C,  $p=2.35 \sim 2.52$  GPa(图6)。同时, THERMOCALC v3.1的平均温压估算也获得类似的结果:  $p=2.31 \pm 0.24$  GPa 和  $t=641 \pm 53$  °C(ZM641),  $p=2.36 \pm 0.24$  GPa 和  $t=622 \pm 51$  °C(ZM651)(假定  $a_{\text{H}_2\text{O}}=1$ , 表2)。

利用围绕榴辉岩(ZM651)分布的退变榴辉岩(ZM652)中局部平衡组合: Grt + Amp + Pl + Qtz, 通过 THERMOCALC 程序的平均稳压计算, 获得退变

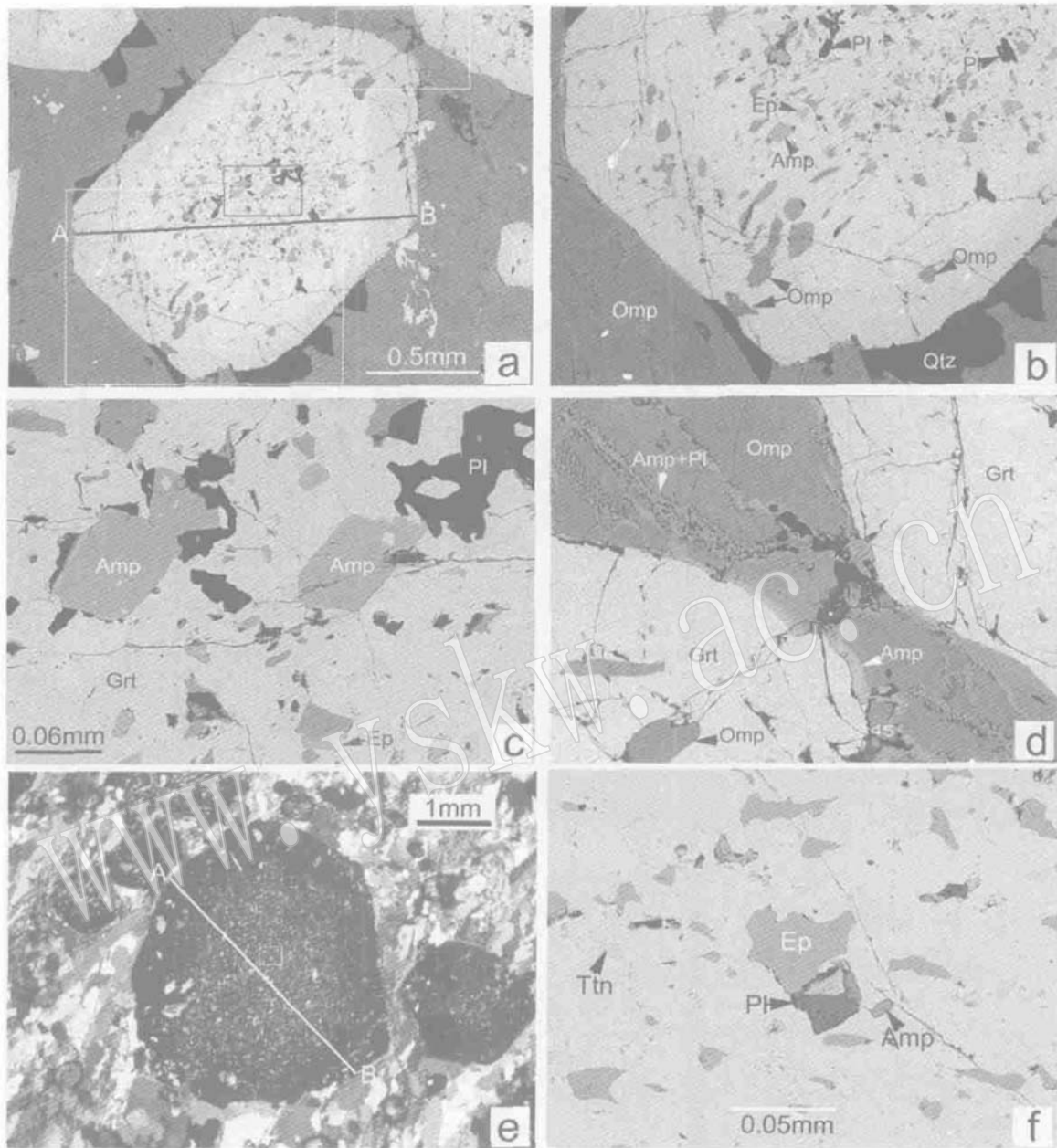


图3 榴辉岩的显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of eclogites in Yuqia area

a—样品 ZM 641, 角闪石、绿帘石和斜长石包体分布在石榴石变斑晶核部, 边部有绿辉石包体, 基质矿物主要为绿辉石 (背散射电子图像); b—a 的局部放大, 显示石榴石核和边的包体矿物 (背散射电子图像); c—a 的局部放大, 显示石榴石核中角闪石、绿帘石和斜长石包体 (背散射电子图像); d—样品 ZM 641, 绿辉石边部具有细粒的角闪石+斜长石后成合晶 (背散射电子图像); e—样品 ZM 651, 石榴石变斑晶核部具有大量包体矿物, 边部具有少量绿辉石和多硅白云母包体 (正交偏光照片); f—e 的局部放大, 显示石榴石核部的角闪石、绿帘石、榍石和斜长石包体 (背散射电子图像)

a—Sample ZM 641, garnet porphyroblast with inclusions of amphibole, epidote, plagioclase concentrated in the core of crystal, the rim of the garnet contains inclusions of omphacite and is surrounded by omphacite (BSE image); b—Detail of a exhibiting the inclusions in garnet core and rim (BSE image); c—Detail of a exhibiting inclusions of amphibole, epidote and plagioclase in garnet core (BSE image); d—Sample ZM 641, omphacite is partially replaced by very fine symplectites of Amp + Pl (BSE image); e—Sample ZM 651, garnet porphyroblast with large amounts of inclusions in the core of the crystal, the garnet rim contains a few inclusions of phengite and omphacite (cross polarized light); f—Detail of e exhibiting the inclusions of amphibole, epidote, sphene and plagioclase in the garnet core (BSE image)

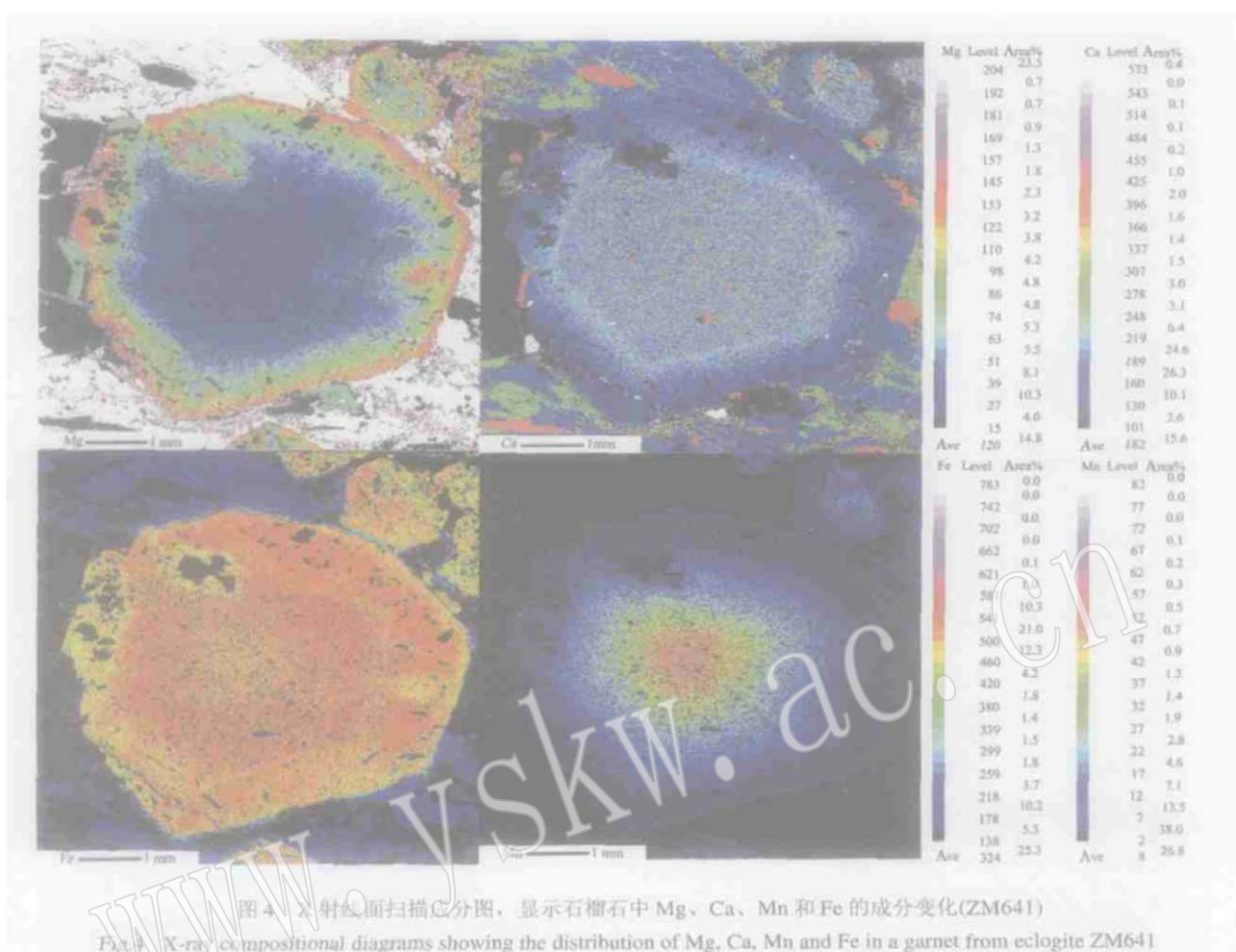


图4 X射线面扫描成分图, 显示石榴石中 Mg、Ca、Mn 和 Fe 的成分变化(ZM641)

Fig.4 X-ray compositional diagrams showing the distribution of Mg, Ca, Mn and Fe in a garnet from eclogite ZM641

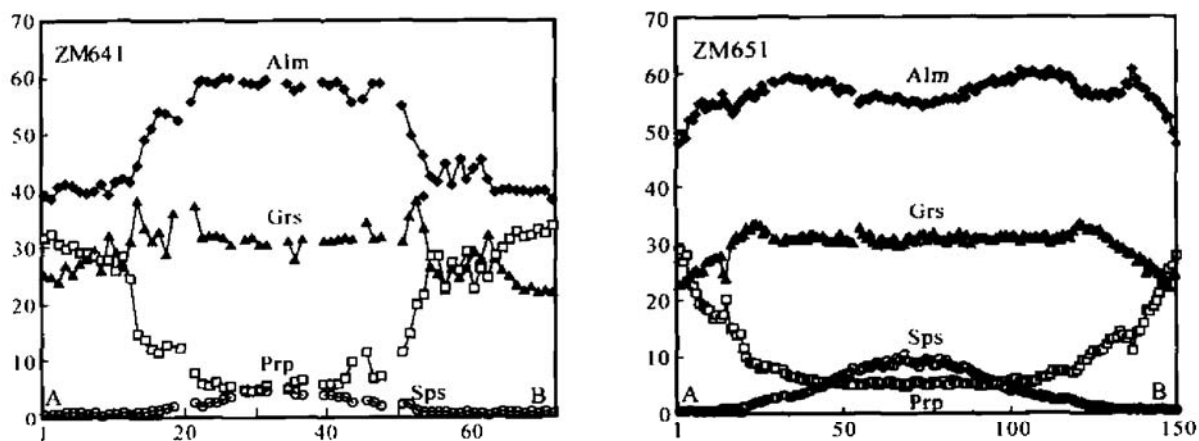


图5 石榴石的成分剖面

Fig. 5 Zoning profiles of garnets from eclogite  
剖面位置分别示于图 3a 和 3e

The location of the profile is shown in Fig.3a and 3e

表 1 榴辉岩和退变榴辉岩中代表性矿物成分

Table 1 Representative mineral compositions of eclogites

矿物	ZM641										ZM651										ZM652				
	Grt-c	Grt-r	Omp	Phe	Amp	Czo	Ep-In	Amp-In	Pl-In	Grt-c	Grt-r	Omp	Phe	Czo	Amp-In	Ep-In	Pl-In	Grt	Amp	Pl	$w_B/\%$				
SiO <sub>2</sub>	37.70	39.09	55.43	49.72	47.78	38.06	38.27	37.70	65.14	37.83	39.37	55.62	49.50	39.79	39.50	38.46	65.77	39.24	49.50	64.40					
TiO <sub>2</sub>	0.20	0.00	0.02	0.43	0.38	0.09	0.13	0.02	0.02	0.15	0.00	0.03	0.49	0.03	0.02	0.25	0.03	0.12	0.12	0.00					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.93	21.96	8.90	27.00	11.28	31.09	26.96	18.38	21.43	20.88	21.99	9.15	27.36	31.87	17.75	27.37	20.86	22.21	8.26	19.73					
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03	0.03	0.06	0.02	0.04	0.01	0.08	0.07	0.04	0.05	0.35	0.00	0.02	0.01	0.00					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.81	1.06	1.04	0.00	1.78	2.40	8.88	4.19	0.36	0.25	0.30	2.00	0.00	0.00	3.27	7.49	0.32	0.00	0.00	0.00					
FeO	24.73	22.01	3.25	2.00	8.96	0.02	0.08	19.73	0.00	24.85	22.40	2.64	1.89	1.27	22.66	0.13	0.00	26.36	12.24	0.56					
MnO	3.68	0.27	0.00	0.02	0.08	0.01	0.13	0.08	0.03	4.67	0.25	0.00	0.01	0.01	0.10	0.08	0.01	0.74	0.09	0.00					
MgO	1.35	7.53	9.98	3.45	13.66	0.02	0.03	4.37	0.00	1.21	7.63	9.77	3.39	0.02	2.18	0.05	0.00	2.91	11.95	0.74					
CaO	11.16	8.54	15.31	0.00	9.66	23.50	22.86	10.07	2.55	10.53	8.34	15.11	0.00	24.73	9.45	22.86	2.16	9.68	12.80	4.85					
Ni <sub>2</sub> O	0.02	0.02	5.53	0.65	3.13	0.04	0.00	3.05	10.08	0.03	0.03	5.85	0.66	0.00	2.67	0.00	10.73	0.03	2.35	9.52					
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	10.09	0.43	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	10.29	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.15	0.03					
Totals	100.62	100.54	99.52	93.38	97.18	95.26	97.39	97.65	99.69	100.45	100.32	100.26	93.67	97.78	97.75	97.05	99.91	101.31	97.67	99.83					
氧原子	12	12	6	11	23	12.5	12.5	23	8	12	12	6	11	12.5	23	12.5	8	12	23	8					
Si	2.99	2.98	1.99	3.38	6.88	2.98	3.01	5.80	2.88	3.01	3.00	1.98	3.36	3.04	6.09	3.02	2.90	3.03	7.36	2.87					
Ti	0.01	0.00	0.00	0.02	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00					
Al	1.95	1.98	0.38	2.16	1.92	2.88	2.50	3.33	1.12	1.95	1.98	0.38	2.19	2.87	3.23	2.53	1.08	2.02	1.45	1.03					
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00					
Fe <sup>3+</sup>	0.05	0.06	0.03	0.00	0.19	0.14	0.52	0.49	0.01	0.02	0.02	0.05	0.00	0.00	0.38	0.44	0.01	0.00	0.00	0.02					
Fe <sup>2+</sup>	1.64	1.40	0.10	0.11	1.08	0.00	0.01	2.54	0.00	1.65	1.43	0.08	0.11	0.08	2.92	0.01	0.00	1.70	1.52	0.00					
Mn	0.25	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.31	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.05	0.01	0.00					
Mg	0.16	0.86	0.53	0.35	2.93	0.00	0.00	1.00	0.00	0.14	0.87	0.53	0.34	0.00	0.50	0.01	0.00	0.34	2.65	0.05					
Ca	0.95	0.70	0.58	0.00	1.49	1.98	1.93	1.66	0.12	0.90	0.68	0.58	0.00	2.03	1.56	1.92	0.10	0.80	2.04	0.23					
Na	0.00	0.00	0.39	0.09	0.87	0.01	0.00	0.91	0.86	0.01	0.00	0.40	0.09	0.00	0.80	0.00	0.92	0.00	0.68	0.82					
K	0.00	0.00	0.00	0.88	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00					
Sum	8.00	8.00	4.00	6.99	15.50	8.00	7.99	15.75	4.99	8.00	8.00	4.00	7.01	8.02	15.50	7.98	5.01	7.95	15.75	5.02					

注:Grt-c—石榴石核部;Grt-r—石榴石边部;Ep-In—石榴石中绿帘石包体;Amp-In—石榴石中斜长石包体;Pl-In—石榴石中斜长石包体。

表2 THERMOCALC程序所计算的平均温压条件

Table 2 Average  $p$ - $T$  according to THERMOCALC programme

样品	$t/^\circ\text{C}$	$p/\text{GPa}$	$a_{\text{H}_2\text{O}}$	成分系统	端员组分
ZM641(core)	$560 \pm 45$	$1.06 \pm 0.16$	1.0	NCFMASH	py gr alm cz ep fep fact ts parg gl an
	$542 \pm 45$	$1.02 \pm 0.16$	0.5		ab q H <sub>2</sub> O
ZM641	$641 \pm 53$	$2.31 \pm 0.24$	1.0	KNCFMASH	py gr alm di hed jd mu pa cel q H <sub>2</sub> O
ZM651(Core)	$577 \pm 75$	$1.11 \pm 0.26$	1.0	NCFMASH	py gr alm cz ep fep fact ts parg gl an
	$554 \pm 74$	$1.06 \pm 0.27$	0.5		ab q H <sub>2</sub> O
ZM651	$622 \pm 51$	$2.36 \pm 0.24$	1.0	KNCFMASH	py gr alm di hed jd mu pa cel q H <sub>2</sub> O
ZM652	$635 \pm 44$	$1.09 \pm 0.12$	1.0	NCFMASH	py gr alm tr fact ts gl an ab q H <sub>2</sub> O
	$594 \pm 40$	$1.02 \pm 0.11$	0.5		

端员组分缩写和热力学数据据 Holland & Powell (1998); 矿物端员的活度通过 THERMOCALC 的 ax 程序计算, 假定石英为过剩组分。

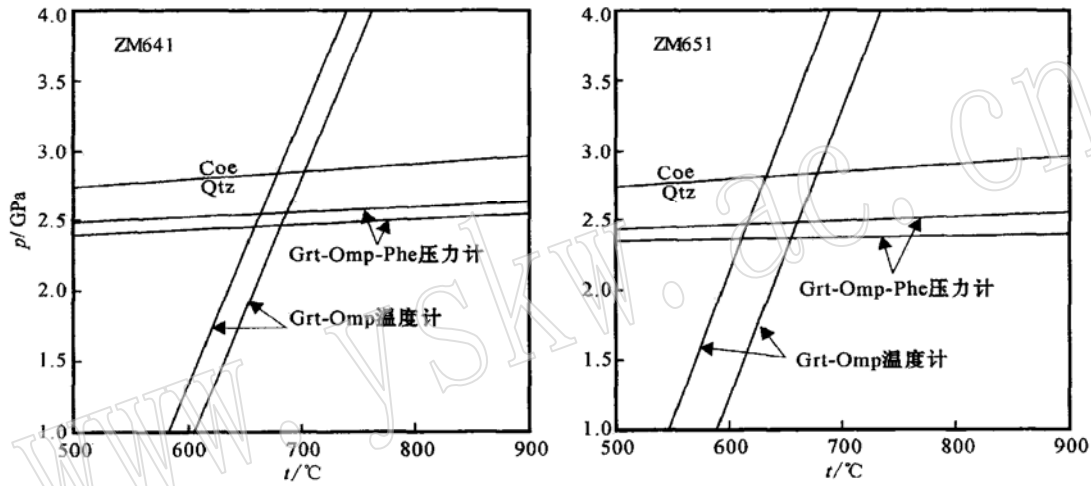


图6 榴辉岩峰期温压计算结果

Fig. 6  $p$ - $T$  estimates of eclogites

质阶段的温压条件为  $p = 1.09 \pm 0.12 \text{ GPa}$ ,  $t = 635 \pm 44^\circ\text{C}$  (假定  $a_{\text{H}_2\text{O}} = 1$ , 表2)。如假定  $a_{\text{H}_2\text{O}} = 0.5$ , 所估算的温度将降低  $40 \sim 50^\circ\text{C}$ , 压力降低  $0.06 \sim 0.07 \text{ GPa}$  (表2)。

结合3个阶段的温压估算结果, 获得如图7所示的  $p$ - $T$  轨迹。

#### 4 讨论及结论

以上研究结果显示, 鱼卡-落凤坡榴辉岩的  $p$ - $T$  轨迹具有顺时针的“发卡”型特征, 其压力峰期和温度峰期同时达到, 反映了榴辉岩的进变质和退变质阶段均具有较低的地温梯度。这说明榴辉岩的形成经历了快速俯冲和折返的动力学过程, 榴辉岩中进变质矿物组合和生长环带的很好保存从另一角度证明了这一点。这也与已有的同位素年代学资料所获

得的鱼卡榴辉岩具有快速冷却速率的结果一致(张建新等, 2000)。同时, 榴辉岩的峰期变质条件和  $p$ - $T$  轨迹与相邻的变泥质岩类似(张建新等, 2004)。这些特征表明榴辉岩与相邻的变泥质岩具有相似的变质历史, 即它们经历过共同的深俯冲和折返作用。结合在鱼卡-落凤坡地区正片麻岩和大理岩中高压残留矿物的确定(张建新等, 2004), 鱼卡地区的榴辉岩和相关的变质泥质岩、花岗片麻岩及大理岩等一起, 构成了一个完整的HP/UHP(?)变质地体。榴辉岩与围岩关系应是“原地”关系, 而不是“构造侵位”关系。

已有的研究资料显示, 鱼卡HP/UHP变质单元中的榴辉岩与相邻的锡铁山HP/UHP单元中的榴辉岩具有不同的温压演化历史。锡铁山榴辉岩形成的温度较高, 具有明显的后榴辉岩相阶段的麻粒岩相叠加,  $p$ - $T$  轨迹显示压力峰期早于温度峰期(张建新



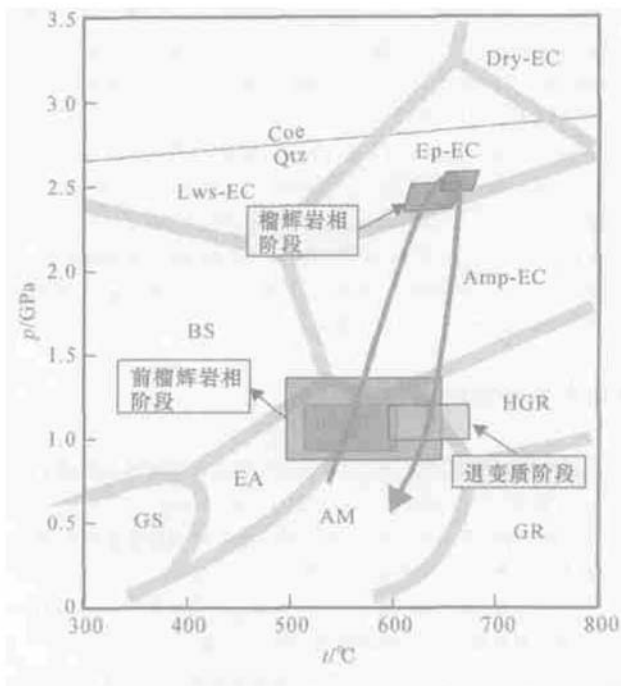


图7 鱼卡榴辉岩的  $pT$  轨迹

Fig. 7  $pT$  path of Yuqia eclogite

变质相关系据 Liou 等 (1998); GS—绿片岩相; EA—绿帘角闪岩相; BS—蓝片岩相; AM—角闪岩相; GR—麻粒岩相; HGR—高压麻粒岩相; Amp\_EC—角闪石榴辉岩相; Lws\_EC—硬柱石榴辉岩相; Ep\_EC—绿帘石榴辉岩相; Dry\_EC—干榴辉岩相  
Metamorphic facies boundaries from Liou *et al.* (1998); GS—greenschist facies; EA—epidote amphibolite facies; BS—blueschist facies; AM—amphibolite facies; GR—granulite facies; HGR—high pressure granulite facies; Amp\_EC—amphibole eclogite facies; Lws\_EC—lawsonite eclogite facies; Ep\_EC—epidote eclogite facies; Dry\_EC—dry eclogite facies

新等, 2002b)。同时, 柴北缘都兰榴辉岩的南北两带的变质历史也明显不同(Song *et al.*, 2003), 其中北带榴辉岩与鱼卡-落凤坡地区榴辉岩的温压条件和  $pT$  轨迹相似, 而南带则与锡铁山榴辉岩的变质历史类似, 但后榴辉岩相的增温过程更明显。这些特征反映柴北缘 HP/UHP 变质带中不同单元的榴辉岩在形成过程, 特别是在折返过程中经历了不同的构造热历史。它们之间的关系及其构造意义有待于进一步探讨。

本文获得的鱼卡榴辉岩峰期温压条件估算在柯石英稳定线之下, 这与这一地区没有发现可靠的 UHP 变质作用证据一致。总体上来看, 相对于世界上一些典型 UHP 变质带(如大别-苏鲁 UHP 变质带), 笔者所获得的柴北缘榴辉岩及相关岩石的 UHP 变质作用证据明显少得多, 除了在都兰北带副

片麻岩(榴辉岩的围岩)的锆石中找到典型的 UHP 变质作用证据柯石英(杨经绥等, 2001)外, 其他只是通过岩相学(如单斜辉石中石英棒的出熔)和温压估算得到的间接的 UHP 变质作用证据(张建新等, 2002a; Song *et al.*, 2003)。究其原因, 可能是柴北缘地区早古生代超高压变质作用之后受多期构造热事件的改造, 使超高压变质作用证据很难保存, 也可能是一些榴辉岩从来没有达到过 UHP 变质作用条件。

**致谢** 石榴石面扫描成分图为张泽明研究员在德国哥廷根大学完成, 特此感谢。本文为国家自然科学基金项目(40272095, 40472102)和中国地质调查局地质调查项目(200313000058)资助成果。

## References

- Elvevold S and Gilotti J A. 2000. Pressure-temperature evolution of retrogressed kyanite eclogites, Weinschenk Island, North-East Greenland Caledonides[J]. *Lithos*, 53: 127~147.
- Engvik A K and Anderson T B. 2000. Evolution of Caledonian deformation fabrics under eclogite and amphibole facies at Vårdalsneset, Western Gneiss Region, Norway[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 241~257.
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 309~343.
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals[J]. *American Mineralogist*, 68: 277~279.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. *American Mineralogist*, 82: 1019~1037.
- Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G, *et al.* 1998. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks[J]. *Review in Mineralogy*, 37: 33~96.
- Liu L, Che Z, Luo J, Wang Y, *et al.* 1997. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42: 931~934.
- Liu L, Sun Y, Luo J H, *et al.* 2003. Ultra-high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area, Altun Mountains, NW China[J]. *Science in China (Series D)*, 33: 1184~1192.
- Liu L, Sun Y, Xiao P, *et al.* 2002. Discovery of ultrahigh pressure magnesite-bearing garnet ilmenite (3.8 GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47: 881~885.
- O'Brien P J and Sachan H K. 2000. Diffusion modeling in garnet from Tsomorari eclogite and implications for exhumation model[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(Suppl): 25~27.

- Ravna E K. 2000. The garnet-clinopyroxene  $Fe^{2+}$ -Mg geothermometer: an updated calibration[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 211~219.
- Ravna E J K and Terry M P. 2001. Geothermobarometry of phengite-kyanite-quartz/coesite eclogites[A]. Eleventh Annual V. M. Goldschmidt Conference, abstract[C], 3 145.
- Song S G, Yang J S, Xu Z Q, *et al.* 2003. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, North Tibet, NW China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 631~644.
- Wang Huichu, Yuan Guibang, Xin Houtian, *et al.* 2001. Occurrence of eclogite and its significance in the Luliangshan area, North Qaidam mountains[J]. *Chinese Geology*, 28 (7): 22~28 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui and Zhang Jianxin. 1999. Comparison of the tectonic units in two sides of the Altyn Tagh fault and lithospheric shearing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 73: 193~205 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianjun, Zhu Hong, Deng Jinfu, *et al.* 1994. The discovery of garnet peridotite in Northern Qaidam Mountains, and its significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13: 97~104 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175~179 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu Z Q, Li H B, *et al.* 1998. The discovery of eclogite in the northern margin of Qaidam basin, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43: 1755~1760.
- 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[J]. *Acta Geologica Sinica*, 70: 156~168 (in Chinese with English abstract).
- Yang J, Xu Z, Zhang J, *et al.* 2001. Tectonic significance of early Paleozoic high-pressure rocks in Altun-Qaidam-Qilian Mountains, northern China[J]. *Geological Society of America, Memoir*, 194: 151~170.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong and Qi Xuexiang. 2002b. Comparison of garnet zoning between eclogites in the Da Qaidam and Xitieshan on the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 21: 123~129 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yang Jingsui, *et al.*, 2004. Eclogitic metapelites in the western segment of the north Qaidam Mountains: evidence on "in situ" relationship between eclogite and its country rock[J]. *Science in China (Ser. D Earth Sciences)*, 47: 1102~1112.
- Zhang J X, Yang J S, Xu Z Q, *et al.* 2000. U-Pb and Ar-Ar ages of eclogites from the northern margin of the Qaidam basin, northwestern China[J]. *Journal of the Geological Society of China*, 43: 161~169.
- Zhang J X, Yang J S, Xu Z Q, *et al.* 2002a. Evidence for UHP metamorphism of eclogite from the Altun Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47: 751~755.
- 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[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44: 2256~2259.
- Zhang J, Zhang Z, Xu Z, *et al.* 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China[J]. *Lithos*, 56: 187~206.

### 附中文参考文献

- 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[J]. *科学通报*, 41(14): 1485~1488.
- 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[J]. *中国科学(D 辑)*, 12: 1184~1192.
- 刘良, 孙勇, 肖培喜, 等. 2002. 阿尔金发现超高压(> 3.8 Ga)石榴二辉橄榄岩[J]. *科学通报*, 47(9): 657~662.
- 王惠初, 袁桂邦, 辛后田, 等. 2001. 柴北缘绿梁山地区榴辉岩的产状及其成因意义初探[J]. *中国地质*, 28(7): 22~28.
- 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如及岩石圈剪切机制[J]. *地质学报*, 73(3): 193~205.
- 杨建军, 朱红, 邓晋福, 等. 1994. 柴达木北缘石榴子石橄榄岩的发现及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 13(2): 97~104.
- 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.
- 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[J]. *科学通报*, 43(14): 1544~1549.
- 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国中央造山带高压-超高压变质带研究的意义[J]. *地质学报*, 74(2): 156~168.
- 张建新, 孟繁聪, 威学祥. 2002b. 柴达木盆地北缘大柴旦和锡铁山榴辉岩中石榴子石环带对比及其地质意义[J]. *地质通报*, 21(3): 123~129.
- 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[J]. *中国科学 D*, 34(9): 825~834.
- 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[J]. *地球化学*, 29(3): 217~222.
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 2002a. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据[J]. *科学通报*, 47(3): 231~234.
- 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[J]. *科学通报*, 44(10): 1109~1112.