

鲁东造山带榴辉岩变质作用特征 及其动力学机制*

凌贤长

(哈尔滨建筑大学, 哈尔滨 150090)

卢良兆 徐学纯

(长春科技大学, 长春 130026)

主题词 鲁东造山带 榴辉岩 动力学机制 板块俯冲碰撞

提要 岩相学研究表明,广泛发育于鲁东造山带中的榴辉岩可以划分为四种类型:第一类为含柯石英及其假象榴辉岩;第二类为含蓝晶石、黝帘石及多硅白云母等榴辉岩;第三类为石榴石-绿辉石-石英组合榴辉岩;第四类为(角闪石)石榴石-辉石岩及有关岩石(非典型“榴辉岩”)。这四类榴辉岩峰期前进变质矿物共生组合及 $P-T$ 条件估算结果均显示它们应属于高温与超高压-高压变质作用产物,其变质作用 PTt 轨迹表现为顺时针演化趋势,反映出板块俯冲碰撞动力学机制。

1 引言

鲁东造山带是指郯庐断裂以东、邵桑断裂以北、五莲桃村断裂以南山东东南部及江苏北部的狭长区域^[1,2](图1),其中广泛发育以榴辉岩为主的高压及超高压变质杂岩。绝大多数榴辉岩块体存在于新元古代变质中酸性侵入杂岩中^[2],少量产于古元古代层状变质岩系及超基性岩内。新近的研究表明,赋存于这些岩石中的榴辉岩常常具有多变的岩石学特征,无疑,这对复杂变质岩区传统榴辉岩分类方案的适用性提出了挑战。尽管以往的方案从不同角度反映了榴辉岩的原岩性质、形成条件、成因机制等方面的特征,但却由于缺少动态的背景描述而难以精确地表达复杂地质过程的制约。因此,依据由岩相学研究所确定的峰期变质矿物共生组合对鲁东造山带中榴辉岩进行分类,可以从榴辉岩形成演化的变质作用特征及其动力学机制角度提供量化的参考依据。本文即是这方面研究的一次有益的尝试。

2 榴辉岩分类及地质特征

2.1 分类概述

越来越多的研究表明,榴辉岩的矿物特征是其形成条件、演化过程以及原岩性质等的主要表征。根据详细的岩相学研究,可以将鲁东造山带中榴辉岩分为四种类型:第一类为含柯石英及其假象榴辉岩;第二类为含蓝晶石、黝帘石及多硅白云母等榴辉岩;第三类为石榴石-绿辉石-石英组合榴辉岩;第四类为(角闪石)石榴石-辉石岩及有关岩石(非典型“榴辉

* 本文得到“华北陆台早前寒武纪变质动力学及构造变形演化”项目(编号:8502205)资助。

第一作者简介 凌贤长,男,1963年出生,博士,副教授,从事变质岩岩石学研究。

收稿日期 1999-05-25, 改回日期 1999-12-10

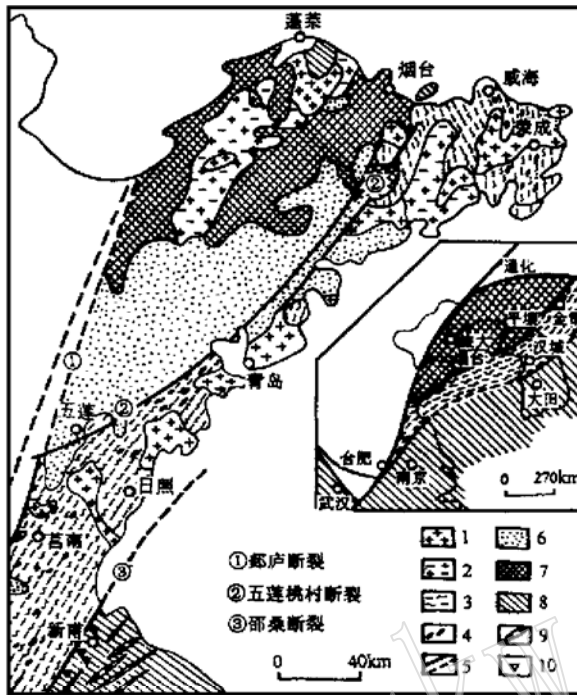


图 1 鲁东造山带区域地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Ludong Orogenic belt

- 1—印支及燕山期块状花岗岩; 2—新元古代末期块状花岗岩;
- 3—新元古代变质中酸性侵入杂岩; 4—榴辉岩集中分布区; 5—重要断裂; 6—白垩纪地层; 7—胶辽古陆早前寒武纪结晶基底;
- 8—扬子陆块北缘早前寒武纪结晶基底; 9—大型褶皱; 10—磷矿点

石榴石(无色、淡黄褐色或粉色)与绿辉石(淡绿色)平衡共生,常见它们形成稳定三边镶嵌结构(应变恢复作用的结果)。石榴石和绿辉石中均常见柯石英假象、金红石及石英包体,石榴石边部及裂隙中往往出现退变的蓝色角闪石,而绿辉石边部则被斜长石、蓝色角闪石及磁铁矿交代。柯石英假象表现为六边形的微粒状石英集合体,其周围的寄主矿物出现一些放射状裂纹。此外,在与榴辉岩伴生的(石榴)辉石橄榄岩(规模很小)中的透辉石内也偶见类似的柯石英假象,说明这两种岩石可能具有同生性质,均经历了超高压变质作用。

仙姑岭榴辉岩呈透镜状产于二长花岗岩中,边部已退变成榴闪岩,核部仍然为较典型的榴辉岩,主要由石榴石(45%+)及绿辉石(50%~55%)组成,含少量金红石,细粒结构为主,弱片麻状及条带状结构。石榴石(无色及淡黄色)沿着变形叶理方向分布,内部可见金红石及柯石英假象包体,边部有退变的斜长石和石英。绿辉石(绿色及淡绿色)内部可见金红石包体,与石榴石之间往往被退变的斜长石和石英隔开。值得提出的是,这种榴辉岩中还偶见与石榴石平衡共生的蓝晶石。此外在与榴辉岩共生的白云母(绢云母)蓝晶石石英片岩(夹于榴辉岩透镜体边部退变榴闪岩中)中的蓝晶石中也有柯石英假象。柯石英假象表现为棱角的或近似六边形的微粒状石英集合体,其周围的寄主矿物发育放射状裂纹。这种榴辉岩原岩也许是泥灰质沉积岩,且与伴生的白云母蓝晶石石英片岩共同经历了超高压变质作用。

岩”)。这种分类方案能够较好地反映区内榴辉岩的原岩性质及变质峰期矿物共生组合与形成的 $P-T$ 条件等。这里需明确的是,按照一般文献资料,典型榴辉岩是指主要由绿辉石和较富钙的镁铝-铁铝榴石组成的岩石,可以含有少量石英、蓝晶石及金红石等,但是无长石;此处非典型“榴辉岩”是指一种并非由绿辉石和富钙铝榴石组成的岩石,主要组成矿物为单斜辉石和石榴石,可以含有角闪石类矿物。区内这类非典型“榴辉岩”与典型榴辉岩宏观特征基本一致,暗示两者间存在着某种成因上的联系。

2.2 地质及岩相学特征

(1) 含柯石英及其假象榴辉岩

此类榴辉岩在区内广泛分布,典型实例有大兴榴辉岩和仙姑岭榴辉岩。

大兴榴辉岩呈透镜状产于二长花岗岩中,退变质作用比较弱,主要由石榴石(35%~40%)及绿辉石(50%~55%)组成,含少量金红石、磁铁矿及榴石等,细粒结构,块状构造为主,次为弱片麻状及条带状构造。石榴石(无色、淡

总之,此类榴辉岩分布很普遍,尤其是含柯石英假象榴辉岩十分丰富。无论是中酸性侵入杂岩中的榴辉岩,还是超基性岩及层状变质岩系中的榴辉岩均包括含柯石英及其假象榴辉岩,有时在与这类榴辉岩伴生的超基性岩及层状变质岩系中也可见柯石英及其假象,说明这类榴辉岩具有多种原岩类型,它们与共生的超基性岩及层状变质岩系为同变质,共同经历了超高压变质作用。值得提及的是,此类榴辉岩绝大多数为细粒结构,主要组成矿物均趋于粒状,往往形成三边镶嵌结构,定向组构不很发育,退变质作用一般比较弱。

(2) 含蓝晶石 黝帘石及多硅白云母等榴辉岩

该类榴辉岩在区内分布也相当普遍,属于此类榴辉岩的典型实例有房山榴辉岩。

房山榴辉岩呈透镜状及肠状等产于石榴黑云长英片麻岩、二云长石石英片岩及钙硅酸盐岩中。产于钙硅酸盐岩中的榴辉岩与直接的围岩之间一般表现为渐变过渡关系,而产于石榴黑云长英片麻岩及二云长石石英片岩中的榴辉岩与直接的围岩分界均清楚。这种榴辉岩已经历了一定程度的退变质作用,主要由蓝晶石(15%~20%)、石榴石(25%~30%)及绿辉石(40%~45%)组成,其次为少量多硅白云母(5%)和黝帘石(2%)、金红石、磁铁矿及石英等,以细粒结构为主,条带状、片状及弱片麻状结构。石榴石(无色及淡黄色)与绿辉石(绿色及淡绿色)平衡共生,并且被黑云母、角闪石及钠长石交代。蓝晶石和多硅白云母(3T型)均与石榴石平衡共生,并且被黑云母交代。有时可见黝帘石、石榴石及蓝晶石平衡共生。此外,蓝晶石与多硅白云母(3T型)及绿辉石也平衡共生。由于蓝晶石、多硅白云母(3T型)及黝帘石与石榴石、绿辉石之间均为平衡共生,说明它们均属于高压变质作用的产物。另外,不仅榴辉岩中含蓝晶石及多硅白云母(3T型),而且与榴辉岩共生的石榴黑云长英片麻岩、二云长石石英片岩及钙硅酸盐岩中也或多或少存在蓝晶石和多硅白云母(3T型),甚至可见黝帘石与石榴石平衡共生,说明它们与榴辉岩同变质,经历了高压变质作用。

该类榴辉岩主要赋存于层状变质岩系中(尤其是含蓝晶石榴辉岩),在中酸性侵入杂岩中也有发育,但后者中未见蓝晶石、黝帘石及多硅白云母等。在超基性岩中,一般仅存在含多硅白云母榴辉岩,而未见含蓝晶石、黝帘石榴辉岩。此外,在这类榴辉岩中还偶见柯石英及其假象,例如杨庄样品(92YB46)中石榴石和绿辉石内存在柯石英假象,属于超高压变质作用产物。由于产于层状变质岩系中的该类榴辉岩往往与直接的围岩之间呈互层或夹层关系,尤其是产于钙硅酸盐岩中的该类榴辉岩与围岩之间有时为渐变过渡关系,围岩中产有部分含蓝晶石、黝帘石和(或)多硅白云母的片岩或片麻岩(均属于层状变质岩系),例如含蓝晶石二云(有的为多硅白云母)长石石英片岩、含蓝晶石石榴黑云长英片麻岩、蓝晶石石英片岩及含多硅白云母蓝晶石长英片岩等,说明该类榴辉岩的原岩可能为泥灰质沉积岩,它们与直接的围岩为同一套表壳岩系,并且一同经历了高压变质作用。

(3) 石榴石-绿辉石-石英组合榴辉岩

第三类榴辉岩在区内分布最为广泛,迟家店榴辉岩和边边沟榴辉岩即属于此类榴辉岩。

迟家店榴辉岩主要呈透镜状产于石榴辉石橄榄岩中,与直接围岩分界清楚,主要由石榴石(40%~50%)和绿辉石(45%~50%)组成,含少量石英及金红石,细粒结构,条带状构造。石榴石(粉色、浅褐色及红褐色)与绿辉石(绿色)平衡共生,石榴石中存在石英和金红石包体,绿辉石中仅见金红石包体,石英往往充填于石榴石和绿辉石中的裂隙里。石榴石和绿辉石还分别集中定向排列而构成矿物链。这种榴辉岩属于典型榴辉岩,未发生退变质作用。

边边沟榴辉岩呈眼球状或透镜状产于花岗闪长岩中,已发生一定程度的退变质作用,主

要由石榴石(25%~30%)、绿辉石(40%~45%)及石英(15%)等组成,含少量金红石、磁铁矿、榍石、角闪石及斜长石,以细粒结构为主,条带状、片麻状及片状构造。石榴石沿变形叶理方向分布,与绿辉石平衡共生。有时,石榴石和绿辉石周围存在退变质的紫蓝色及蓝色角闪石冠状体,或间隙被退变质的微粒状及蠕虫状钠长石、浅绿色角闪石及石英后成合晶充填。石英和金红石有的存在于石榴石和绿辉石内部,有的出现于石榴石和绿辉石的间隙中。

该类榴辉岩主要存在于新元古代变质中酸性侵入杂岩中,次之产于超基性岩中,而层状变质岩系中则较少见。这类榴辉岩很少与第一类榴辉岩伴生,在各处产出的岩性特征相似或相同。

(4) (角闪石)石榴石-辉石岩及有关岩石

在区内层状变质岩系中,尤其是在大理岩及钙硅酸盐岩中,往往见有并非由典型绿辉石和富钙铝榴石所组成的非典型“榴辉岩”,即(角闪石)石榴石-辉石岩及有关岩石。在新元古代变质中酸性侵入杂岩及超基性岩中,有时也存在这类岩石。属于此类“榴辉岩”的典型实例有马草夙非典型“榴辉岩”。

马草夙非典型“榴辉岩”呈透镜状及似层状夹层形式产于石墨大理岩中,与直接的围岩分界清楚,主要由石榴石(30%~35%)、单斜辉石(45%~50%)及角闪石(10%)组成,含少量石英、黑云母、斜长石(退变矿物)、金红石、赤铁矿、磁铁矿及榍石等,以细粒结构为主,条带状及片麻状构造。石榴石(粉色及红棕色)与单斜辉石(无色透辉石)平衡共生,其内部常见金红石包体。角闪石以黄绿色或绿色普通角闪石为主,也有少数显蓝色(退变成因),与石榴石和单斜辉石之间并不存在交代反应现象,接触界线为较平滑的曲线或直线,说明角闪石、石榴石、单斜辉石应属于同期变质作用产物。这种非典型“榴辉岩”与石榴角闪石岩、石榴二辉石岩及典型榴辉岩等共生。

总的来看,(角闪石)石榴石-辉石岩及有关岩石貌似典型榴辉岩,经常与典型榴辉岩(甚至含柯石英及其假象榴辉岩)、辉石角闪石岩、石榴二辉石岩及榴英岩等共生于一体,有时构成复合透镜体,但是它们的矿物组合反映其形成压力明显低于典型榴辉岩,说明可能由于新元古代变质中酸性侵入杂岩侵位而将这类非典型“榴辉岩”与其它典型榴辉岩等混于一体。此外,(角闪石)石榴石-辉石岩与层状变质岩系(尤其是大理岩及钙硅酸盐岩)紧密共生,说明它们之间存在一定的亲缘关系。

3 榴辉岩变质作用特征

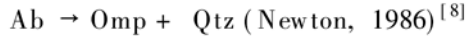
鲁东造山带中榴辉岩变质作用可以划分出三个演化阶段:峰期前进变质阶段、峰期变质阶段及峰期后退变质阶段^①。以上四类榴辉岩在各变质阶段所产生的典型矿物共生组合如表1所示。

3.1 峰期前进变质阶段

根据榴辉岩的岩相学研究所确立的峰期变质矿物石榴石、绿辉石及蓝晶石等中的先存矿物残留体,并且结合有关实验及榴辉岩原岩成分分析结果^[4~12,14~18],通过典型榴辉岩实例厘定峰期前进变质矿物共生组合。

^① 凌贤长. 鲁东造山带变形变质动力学研究. 长春科技大学博士学位论文, 1997.

腾家榴辉岩(L207, 样品号, 下同)、南城榴辉岩(L113, L082)及杨庄榴辉岩(92YB01)的绿辉石中存在许多钠长石残留体。实验研究证实, 在基性岩中, 当压力 $P > 1.0 \text{ GPa}$ 时, 钠长石分解为硬玉和石英, 硬玉进入绿辉石中。因此, 在榴辉岩化过程中应出现如下反应:



杨庄榴辉岩(92YB57, 92YB21)的石榴石和绿辉石中可见钠云母及石英残留体。Green等(1968)^[11-12]和Newton(1986)^[8]研究认为, 在高压条件下钠云母可以与石英及黝帘石反应形成绿辉石和硬玉。

孔家店榴辉岩(LX39)的石榴石和绿辉石中均含有绿色角闪石及钠长石残留体, 所以在榴辉岩化过程中, 角闪石可能与钠长石及石英等反应形成石榴石和绿辉石。

对区内多种榴辉岩进行详细薄片鉴定, 归纳出峰期前进变质矿物及其共生组合如下:

1. Ab + Hb(绿色)(LZ07, L113, L082, 92YB01)
2. Hb(绿色) + Ab + Qtz(LX39)
3. Pg + Zio + Qtz(92YB57, L078, L084, L003)
4. Pg + Qtz + (Pyp)(92YB57)

所确定的由榴辉岩峰期前进变质阶段到峰期变质阶段的典型临界变质反应如下:

1. $\text{Hb} + \text{Ab} + \text{Mt} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Gt} + \text{Omp} + \text{H}_2\text{O}$
2. $\text{Pg} + \text{Qtz} + \text{Pyp} \rightarrow \text{Ky} + \text{Phen} + \text{H}_2\text{O}$

以上峰期前进变质矿物及其共生组合反映中低级变质作用。由于在峰期变质矿物组合中蓝晶石与黝帘石平衡共生, 而在峰期前进变质矿物中不存在这种组合, 说明峰期前进变质压力上限应为 $P \leq 0.9 \text{ GPa}$ ^[10-12]。又因峰期前进变质矿物中存在角闪石, 而不含蓝晶石和硬柱石^[11], 故其温度应为 $550 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。Storre和Nith(1974)研究表明, 榴辉岩中的“Ky + Zio”组合在略高于 $620 \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度条件下^[10], 压力便超过 0.9 GPa , 由此推测峰期前进变质温度上限为 $T \leq 650 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由角闪石全铝(Al^T)含量与压力关系(Hammarstrom, 1986; Hollister, 1987; Tohno, 1988)^[11-13]估算的压力为 $P = 0.59 \sim 0.7 \text{ GPa}$ (LX39)。因此, 峰期前进变质阶段 $P-T$ 条件可以厘定为 $P = 0.59 \sim 0.9 \text{ GPa}$, $T = 550 \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 峰期变质阶段

(1) 峰期变质矿物共生组合

第一类榴辉岩峰期变质基本矿物共生组合为 $\text{Gt} + \text{Omp} + \text{Cos} + \text{Rt}$ 。柯石英(多数以微晶集合体形式存在)和金红石主要以包体形式存在于石榴石和绿辉石中, 偶见与石榴石和绿辉石平衡共生的蓝晶石及多硅白云母, 蓝晶石中也有柯石英及其假象。

第二类榴辉岩峰期变质基本矿物共生组合为 $\text{Gt} + \text{Omp} + \text{ky} + \text{Zio} + \text{Phen} + \text{Rt}$ 。石榴石与绿辉石往往形成稳定三边镶嵌结构, 金红石以包体形式存在于石榴石、绿辉石及蓝晶石中。蓝晶石含量一般较高(有的达25%), 黝帘石及多硅白云母含量较低(前者多数在10%以下, 后者有的达10%~15%)。

第三类榴辉岩峰期变质基本矿物共生组合为 $\text{Gt} + \text{Omp} + \text{Qtz} + \text{Rt}$ 。有时可见与石榴石及绿辉石平衡共生的多硅白云母及角闪石(L062, L077, LE09, BL13), 但是这两种矿物含量一般不超过5%。金红石以包体形式存在于石榴石、绿辉石及石英中。

第四类非典型“榴辉岩”峰期变质基本矿物共生组合比较复杂, 主要有 $\text{Gt} + \text{Di} + \text{Hb} \pm \text{Rt} + \text{Sph}$ 、 $\text{Gt} + \text{Cpx} + \text{Pl} \pm \text{Rt} + \text{Sph}$ 、 $\text{Gt} + \text{Hb} + \text{Pl} + \text{Sph}$ 及 $\text{Gt} + \text{Hb} + \text{Sph}$ 等。

表 1 榴辉岩变质矿物
Table 1 Metamorphic minerals of eclogites

岩石类型	岩体名称	样品号	峰期矿物共生组合及其含量[%]	峰期前进变质矿物	峰期后退变质矿物
第一类榴辉岩	大兴榴辉岩	LX	Gt(42.50)+Omp(53.14)+Cos(0.17)+Rt(0.5)	Ab 在 Gt 中	Di Hb Ab Pg Clin Qtz
		LZ04	Gt(45.0)+Omp(50.0)+Rt(1.0)	Ab+Qtz 在 Gt 及 Omp 中	Di Ab
	仙姑岭榴辉岩	LX49	Gt(38.19)+Omp(57.36)+Cos(0.11)+Ky(2.63)+Rt(1.25)		Ab Hb
	杨庄榴辉岩	92YB59	Gt(47.0)+Omp(51.5)+Cos(0.5)+phen(1.5)+Rt(1.0)	Ab 在 Gt 中	Hb Ab Qtz
		92YB57	Gt(41.5)+Omp(52.0)+Cos(0.5)+Ky(0.5)+phen(1.0)+Rt(1.0)	Pg+Qtz 在 Gt 及 Qmp 中 Pyp 在 Ky 边	Hb Ab Pg
		92YB07	Gt(51.0)+Omp(42.5)+Cos(0.2)+Ky(1.0)+phen(2.0)+Rt(1.5)		Di Ab Hb
		92YB01	Gt(40.13)+Omp(53.06)+Ky(1.54)+Cos(0.10)+Rt(3.47)	Ab 在 Omp 中	
	孔家店榴辉岩	LX11	Gt(53.45)+Omp(44.26)+Cos(0.11)+Rt(0.16)		Di Ab
	LX39	Gt(47.0)+Omp(50.0)+Cos(0.1)+Phen(1.5)+Rt(0.5)	Hb+Ab 在 Gt 及 Omp 中	Hb	
	唐家榴辉岩	LZ07	Gt(36.5)+Omp(55.0)+Cos(0.2)+Rt(1.0)	Ab 在 Omp 中	Hb Ab Clin Qtz
大疃榴辉岩	L009	Gt(47.5)+Omp(50.0)+Cos(0.1)+Rt(1.5)			
	L010 L019	Gt(46.23)+Omp(48.94)+Cos(0.14)+Rt(0.52) Gt(43.0)+Omp(54.5)+Cos(0.3)+Phen(1.5)+Rt(0.5)			
第二类榴辉岩	房山榴辉岩	L078	Gt(36.5)+Omp(41.0)+Ky(4.5)+Phen(5.5)+Zio(5.0)+Rt(0.5)	Pg+Qtz 在 Gt 及 Omp 中	
	演马榴辉岩	L048	Gt(44.0)+Omp(40.5)+Phen(7.5)+Zio(4.5)+Rt(1.5)		Hb Clin Qtz
		L049	Gt(40.51)+Omp(51.11)+Phen(6.32)+Rt(0.56)		Hb
	蜘蛛山榴辉岩	L084	Gt(46.0)+Omp(40.5)+Ky(5.5)+Phen(6.0)+Rt(0.5)	Pg+Qtz 在 Gt 中	Ab Qtz pg
	南城榴辉岩	L101	Gt(35.0)+Omp(49.5)+Phen(5.0)+Zio(2.0)+Rt(0.5)		Ab Qtz
		L104	Gt(47.5)+Omp(46.0)+Phen(5.0)+Rt(0.5)		
		L113	Gt(40.0)+Omp(44.5)+Phen(6.0)+Ky(5.5)+Rt(1.5)	Ab 在 Omp 中	Ab Qtz
	九岭庄榴辉岩	L096	Gt(45.0)+Omp(40.0)+Ky(3.0)+Phen(6.5)+Rt(0.5)		
		L098	Gt(40.5)+Omp(47.0)+Ky(4.5)+Phen(5.5)+Rt(1.0)	Qtz 在 Gt 中	Hb Ab
		L100	Gt(42.11)+Omp(50.52)+Phen(5.32)+Rt(1.13)		Ab Pg Qtz
杨庄榴辉岩	92YB21	Gt(46.5)+Omp(48.0)+Phen(3.0)+Rt(1.0)	Pg+Qtz 在 Gt 及 Omp 中	Hb Qtz	
	92YB46	Gt(40.5)+Omp(50.0)+Ky(3.5)+Phen(4.5)+Rt(0.5)	Pg+Qtz 在 Gt 及 Omp 中		
第三类榴辉岩	迟家店榴辉岩	Ly31	Gt(48.0)+Omp(44.5)+Qtz(5.0)+Rt(0.5)	Qtz 在 Gt 及 Omp 中	
	Ly17	Gt(42.5)+Omp(47.0)+Qtz(8.5)+Rt(1.0)	Qtz 在 Gt 中	Di Ab	
	边边沟榴辉岩	L062	Gt(35.0)+Omp(53.0)+Qtz(7.0)+Phen(1.0)+Rt(1.5)		Hb Ab Qtz
		L069	Gt(40.0)+Omp(45.0)+Qtz(9.5)+Hb(1.5)+Rt(0.5)		Ab Qtz
		L064	Gt(46.51)+Omp(48.36)+Qtz(3.24)+Phen(0.53)+Rt(0.31)		Hb Ab Qtz
		L065	Gt(47.0)+Omp(44.5)+Qtz(6.0)+Rt(0.5)		Hb Qtz
		L057	Gt(45.0)+Omp(42.5)+Qtz(10.0)+Rt(1.5)	Pg+Qtz 在 Omp 中	
	唐家榴辉岩	L077	Gt(37.5)+Omp(53.0)+Qtz(6.5)+Hb(1.0)+Rt(0.5)		Ab Qtz
		L058	Gt(52.0)+Omp(37.0)+Qtz(6.0)+Phen(1.5)+Rt(1.0)		Hb Ab
	南城榴辉岩	L209	Gt(39.5)+Omp(46.0)+Qtz(10.0)+Phen(2.0)+Rt(0.5)		
LZ18		Gt(38.26)+Omp(47.12)+Qtz(11.70)+Phen(1.76)+Rt(0.63)			
L082		Gt(36.54)+Omp(48.10)+Qtz(9.57)+Phen(2.32)+Rt(0.21)	Ab 在 Omp 中	Ab Qtz	
邱家榴辉岩	BL13	Gt(41.0)+Omp(48.0)+Qtz(9.5)+Rt(0.5)			
泊于榴辉岩	44087-2	Gt(43.5)+Omp(50.0)+Qtz(5.0)+Rt(0.5)	Qtz 在 Gt 及 Omp 中	Hb Ab Pg	
第四类非典型榴辉岩	马草岭石榴角闪辉石岩	LZ15	Gt(20.0)+Hb(23.5)+Cpx(Di.52)+Rt(0.5)+Gph(1.5)	Qtz 在 Gt 中	
	LZ13	Gt(17.53)+Di(48.94)+Hb(21.66)+Qtz(11.71)+Rt(0.41)			
	边边沟石榴角闪辉石岩	L072	Gt(15.5)+Hb(26.0)+Di(57.5)+Gph(1.0)		Hb Ab
	L066	Gt(18.0)+Hb(22.5)+Cpx(54.0)+Rt(0.5)	Qtz 在 Gt 及 Cpx 中	Hb Ab	
	蜘蛛山榴辉岩	L086	Gt(35.5)+Hb(53.0)+Di(3.5)+Qtz(5.0)+Rt(1.0)		
	南城石榴角闪辉石岩	L094	Gt(14.51)+Hb(30.26)+Cpx(53.68)+Gph(1.39)		Hb Mus Qtz
	大疃石榴斜长辉石岩	L003	Gt(16.5)+Pl(28.0)+Cpx(51.5)+Rt(1.5)	Pg+Qtz 在 Omp 中	Hb Pg Ab Qtz
	珠边榴辉岩	L061	Gt(31.5)+Hb(60.0)+Pl(4.0)+Gph(1.0)		
双龙石榴辉石角闪岩	L121	Gt(13.5)+Di(20.0)+Hb(63.0)+Gph(1.0)+Mt(0.5)	Qtz 在 Gt 中		

Ky—蓝晶石; Phen—(3T) 多硅白云母; Dim—金刚石; Cpx—单斜辉石; Phl—金云母; Pl—斜长石; Di—透辉石; Ap—磷灰石; Ab—钠长石; Jd—硬玉; Hb—角闪石; Zio—黝帘石; Clin—斜黝帘石; Qtz—石英; Rt—金红石; Gt—石榴石; Gph[Gr]—石墨; Sph—榍石; Bt—黑云母; Mt—磁铁矿; Mus—白云母; Sp—尖晶石; Cos—柯石英; Pg—钠云母; Omp—绿辉石; Pyp—叶腊石; Cc—方解石; Tc—滑石; Pyr—镁铝榴石; Gro—钙铝榴石。

角闪石、斜长石与石榴石及单斜辉石平衡共生。斜长石以更- 中长石为主。角闪石一般呈黄绿色, 部分退变角闪石显蓝色或深蓝色, 解理不清楚或较粗。

(2) 峰期变质 $P-T$ 条件

第一类榴辉岩, 由于含柯石英, 说明压力下限应为 $\text{Cos}-\text{Qtz}$ 相变界限, 即 $P \geq 2.6 \sim 2.8$ 或 $3.0 \text{ Gpa}^{[11-12]}$ 。又因为不含金刚石, 说明压力上限应为 $\text{Dim}-\text{Gr}$ 相变界限, 即 $P \leq 3.6 \sim 4.0 \text{ Gpa}$ 。利用 Ellis 和 Green (1979) 的石榴石- 单斜辉石地质温度计^[13], 两个代表性样品 (LX11, LZ07) 的石榴石- 单斜辉石矿物对化学成分探针分析结果见表 2, 按照四种压力估算出榴辉岩形成温度(表 3)。因为有的榴辉岩中含少量与石榴石及绿辉石平衡共生的蓝晶石, 说明其形成 $P-T$ 条件左界限应在 $\text{Pyr} + \text{Cos} - \text{ky} + \text{Tc}$ 临界反应线附近, 而温度下限应在变质作用极限地热梯度 ($5^\circ\text{C}/\text{km}$) 以上, 最终确定此类榴辉岩的形成 $P-T$ 条件(见图 2a)。结合以上讨论及温度估算结果, 应取 $P = 2.8 \sim 3.6 \text{ Gpa}$ 、 $T = 890 \sim 970^\circ\text{C}$ 较为合适。

表 2 榴辉岩变质矿物化学成分探针分析结果(%)

Table 2 Electron microprobe analyses of metamorphic minerals in eclogites

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Total	矿物	
LX11	37.72	0.07	23.09	21.45	0.30	7.68	9.54	0.00	0.00	0.03	99.89	石 榴 辉 岩 变 质 矿 物	
LZ07	38.24	0.02	22.74	23.15	0.20	7.26	7.43	0.00	0.00	0.01	99.05		
DQ01	39.26	0.00	21.15	19.33	0.30	10.95	6.61	0.00	0.10	0.23	98.58		
L015	40.42	0.02	22.56	13.58	0.47	8.99	14.7	0.10	0.04	0.03	100.89		
L082	38.79	0.06	21.30	26.53	0.33	4.84	6.92	0.00	0.01	0.01	98.79		
L062	37.53	0.02	21.33	22.38	0.58	6.72	10.52	0.01	0.00	0.00	98.99		
LZ09	39.41	0.03	21.75	22.65	0.53	8.76	6.51	0.03	0.03	0.06	99.68		
L086	39.40	0.11	22.26	22.38	0.83	3.27	12.43	0.03	0.03	0.05	100.79		
L094	41.03	0.09	22.04	17.21	0.81	14.9	4.09	0.02	0.00	0.03	100.22		
Ec71	40.96	0.05	22.70	13.58	0.38	14.9	8.18	0.04	0.01	0.44	100.13		
LX11	56.63	0.03	12.50	3.66	0.06	8.27	10.35	8.27	0.04	0.08	99.89		单 斜 辉 石 变 质 矿 物
LZ07	57.74	0.01	14.00	4.76	0.02	4.30	7.89	10.40	0.00	0.00	99.12		
DQ01	55.67	0.02	9.22	6.98	0.00	7.90	13.06	7.47	0.00	0.00	99.91		
L015	55.41	0.38	10.80	4.23	0.06	8.56	13.52	6.23	0.02	0.04	99.25		
L082	54.94	0.16	8.57	6.95	0.04	9.29	14.63	5.50	0.00	0.00	100.08		
L062	52.85	0.47	7.63	9.84	0.03	10.9	13.48	6.04	0.11	0.06	100.52		
LZ09	51.79	0.19	6.37	9.02	0.03	9.89	17.84	4.96	0.06	0.04	100.18		
L086	50.96	0.21	0.84	12.56	1.90	9.58	22.10	0.45	0.22	0.00	99.80		
L094	55.59	0.04	5.00	6.77	0.12	18.2	12.00	1.22	0.27	0.09	99.26		
Ec71	51.15	0.14	11.59	5.30	0.09	15.3	11.17	2.24	0.13	0.54	99.26		
L094	42.89	1.32	13.65	15.58	0.18	10.7	9.21	3.32	0.48	0.08	97.82	角 闪 石 变 质 矿 物	
L084	42.16	1.60	12.67	18.67	0.09	8.78	11.10	2.12	0.60	0.07	97.86		
L003	43.01	1.45	13.69	15.60	0.13	10.8	9.19	3.28	0.46	0.07	97.60		
L121	42.20	1.63	12.69	17.68	0.11	8.76	11.92	2.14	0.59	0.06	97.78		
LX	53.20	0.19	1.91	1.59	0.08	12.9	24.21	1.47	0.00	0.00	99.48	透 辉 石 变 质 矿 物	
LX11	52.01	0.06	1.78	1.63	0.22	17.64	25.11	0.46	0.08	0.00	99.99		
LY17	51.93	0.09	2.21	1.07	0.09	16.92	25.39	0.83	0.07	0.00	98.60		
LX	50.09	0.02	10.95	9.73	0.04	15.1	7.22	4.27	0.05	0.00	97.38		
92YB59	47.88	0.03	11.83	10.54	0.00	14.9	6.37	5.16	0.03	0.00	96.98		
92YB57	48.91	0.04	10.18	11.97	0.00	14.5	5.99	6.02	0.01	0.00	97.96		
92YB07	49.32	0.01	11.29	9.99	0.00	15.4	6.94	5.38	0.04	0.00	98.32		
L048	46.81	0.05	11.49	10.11	0.00	15.8	7.66	4.59	0.03	0.00	97.14		

第二类榴辉岩, 由于蓝晶石与黝帘石平衡共生, 说明压力应超过 0.9 Gpa (据文献[10]), 在泥质岩中, 当 $P > 0.9 \text{ Gpa}$ 时, 珍珠云母与石英反应形成 $\text{Zio} + \text{Ky} + \text{H}_2\text{O}$ 组合)。又因为多硅白云母中硅原子数 $\text{Si} = 3.42 \sim 3.45$, 说明至少形成于高压条件下, 尤其是 $\text{Si} = 3.45$ 已接近于柯石英形成压力, 所以虽然不含柯石英, 但是压力上限应为 $\text{Cos}-\text{Qtz}$ 相变界限^[10, 12], 即 $P \leq 2.6 \sim 2.8 \text{ Gpa}$ 。单斜辉石中硬玉分子含量为 $32.97\% \sim 48.97\%$, 在常温条件下所反映的

压力为 $P = 1 \sim 1.8 \text{ Gpa}$ 。在矿物组合中, 蓝晶石与绿辉石平衡共生, 所以压力下限应为 $\text{Omp} + \text{ky} - \text{Gt} + \text{Clin} + \text{Pg}$ 临界反应线^[10, 12], 即 $P \geq 1.4 \text{ Gpa}$ 。利用 Ellis 和 Green (1979) 的石榴石-单斜辉石地质温度计^[13], 两个代表性样品的石榴石-单斜辉石矿物对化学成分探针分析结果见表 2, 按照四种压力估算出榴辉岩形成温度(表 3)。由于此类榴辉岩的石榴石中富含镁铝榴石组分, 并且超过第一类榴辉岩的石榴石中镁铝榴石组分含量, 说明其形成温度高于第一类榴辉岩。最终确定出此类榴辉岩形成 $P-T$ 条件, 如图 2b 所示。结合以上讨论及温度估算结果, 应取 $P = 1.4 \sim 2.6 \text{ Gpa}$ 、 $T = 900 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 较为合适。

表 3 各类榴辉岩峰期变质温度估算结果

Table 3 Estimates of temperatures for peak stage metamorphism of various types of eclogites

样品号	$K_{\text{D}}^{\text{Fe-Mg}}$	$P(\text{Gpa})$	$T(^\circ\text{C})$	采样地	样品号	$K_{\text{D}}^{\text{Fe-Mg}}$	$P(\text{Gpa})$	$T(^\circ\text{C})$	采样地
LX11	4.5	2.6	937	孔家店	L062	3.55	2.6	1043	边边沟
		2.8	943				2.8	1055	
		3.0	950				3.0	1070	
		3.6	969				2.6	1073	
LZ07	4.6	2.6	893	腾家	LZ09	2.73	2.8	1091	腾家
		2.8	899				3.0	1100	
		3.0	906				0.6	900	
		3.6	925				0.8	910	
DQ01	3.52	1.4	925	青龙山	L086	3.45	1.3	950	蜘蛛山
		1.8	942				1.4	975	
		2.6	974				0.6	835	
		2.8	982				0.8	850	
L015	2.19	1.4	1038	大疃	L094	5.41	1.3	862	南城
		1.8	1052				1.4	870	
		2.6	1079				0.6	750	
		2.8	1086				0.8	755	
L082	7.02	2.6	870	南城	Ec71	5.62	1.3	770	大疃
		2.8	880				1.4	785	
		3.0	884						

第三类榴辉岩, 虽然不含柯石英, 但是有的含硅原子数 $\text{Si} = 3.31 \sim 3.49$ 的多硅白云母, 尤其是 $\text{Si} = 3.49$ 接近于柯石英形成压力, 说明压力上限应为 $\text{Cos} - \text{Qtz}$ 相变界限, 即 $P \leq 2.6 \sim 2.8$ 或 3.0 Gpa ^[10~12]。另外从矿物组合以及石榴石和绿辉石化学成分来看^①, 此类榴辉岩与第一类榴辉岩形成 $P-T$ 条件差别并不大。含柯石英的榴辉岩形成压力 $P \geq 2.8 \sim 3.0 \text{ Gpa}$, 而无柯石英的榴辉岩形成压力不见得一定小于这个值, 因为石英可以出现过稳定状态, 即使压力超过 $\text{Cos} - \text{Qtz}$ 相变界限, 也不一定产生柯石英^[12]。利用 Ellis 和 Green (1979) 提出的石榴石-单斜辉石地质温度计^[13], 三个代表性样品(L082, L062, LZ09)的石榴石-单斜辉石矿物对化学成分探针分析结果见表 2, 按照三种压力估算出榴辉岩形成温度(表 3)。最终确定出此类榴辉岩形成 $P-T$ 条件, 如图 2c 所示。结合以上讨论及表 3 的温度估算结果, 应取 $P = 2.6 \sim 3.0 \text{ Gpa}$ 、 $T = 800 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 较为合适。

第四类非典型“榴辉岩”, 峰期变质矿物主要有石榴石、单斜辉石、角闪石及斜长石等。根据四个代表性样品(L094, L084, L003, L121)的角闪石化学成分探针分析结果(表 2)。估算出此类“榴辉岩”形成压力(见表 4)。利用 Ellis 和 Green (1979) 提出的石榴石-单斜辉石地

① 凌贤长. 鲁东造山带变形变质动力学研究. 长春科技大学博士学位论文, 1997.

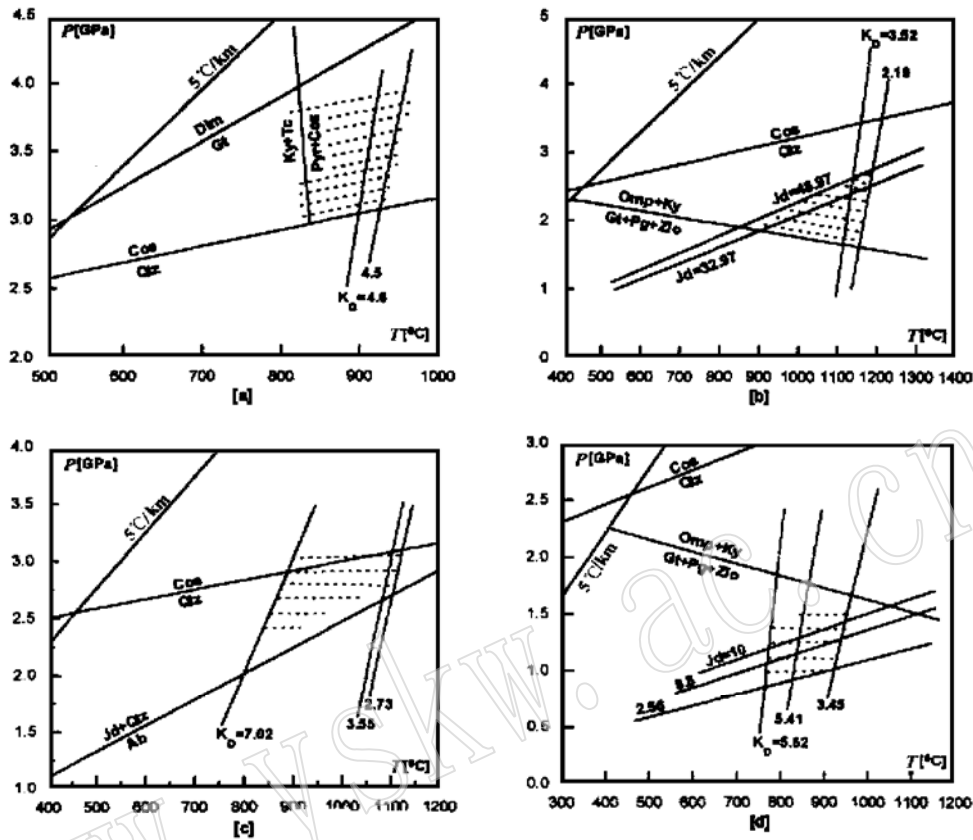


图2 榴辉岩形成 $P-T$ 条件(点线区)

Fig. 2 $P-T$ conditions for the formation of eclogites

Pyr + Cos - Ky + Tc 临界反应线据 Chopin 等, 1991; Dim - Gr 相变线据 Bohlen 等, 1982; Cos - Qtz 相变线据 Kennedy 等, 1976; Omp + Ky - Gr + Pg + Zio 临界反应线据 Barnicoat A C & Fry N, 1986; Jd + Qtz - Ab 临界反应线据 Evans, 1990, Jd = 10 为单斜辉石中硬玉分子含量, K_D 为石榴石与单斜辉石之间 $Fe^{2+} - Mg^{2+}$ 分配系数

质温度计, 选择三个代表性样品(L086, L094, Ec71), 其石榴石-单斜辉石矿物对化学成分探针分析结果见表2, 按照四种压力估算出此类“榴辉岩”形成温度(表3)。由于此类“榴辉岩”不含多硅白云母, 并且单斜辉石中硬玉分子含量不超过10%, 说明压力上限应为 $P \leq 1 \sim 1.5$ Gpa。又因为角闪石在 Ti- (Na+ K) 变异图上投点落入麻粒岩相及高角闪岩相区^①, 说明温度下限应为 $T \geq 640 \sim 700$ °C。最终确定出此类“榴辉岩”形成 $P-T$ 条件应取 $P = 0.8 \sim 1.4$ Gpa, $T = 750 \sim 850$ °C 较为合适(如图2d所示)。

3.3 峰期后退变质阶段

榴辉岩峰期后退变质作用主要是由减压引起的^①, 矿物变化比较简单, 以在峰期变质矿物石榴石及绿辉石等周围或裂隙中形成紫蓝色或淡绿色角闪石、钠长石及石英等冠状体、反应边、后成合晶为主要标志, 所产生的角闪石均为钠钙质闪石, 柯石英向微晶石英转变, 金红石被榍石取代, 多硅白云母分解成白云母(钠云母)和石英, 有的绿辉石完全或绝大部分转变

① 凌贤长. 鲁东造山带变形变质动力学研究. 长春科技大学博士学位论文, 1997.

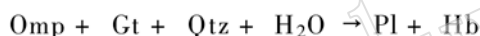
成透辉石。

表4 第四类非典型“榴辉岩”峰期变质压力(Gpa)估算结果

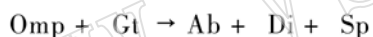
Table 4 Estimates of pressures for peak stage metamorphism of Type 4 nontypical “eclogites”

样品号	L094	L086	L003	L121
全铝[Al ³⁺]含量	3.3696	3.2367	2.3716	2.2372
$P=5.03Al^3-3.92$ (Hammarstrom, 1986)	1.30	1.24	0.80	0.73
$P=5.64Al^3-4.76$ (Hollister, 1987)	1.42	1.35	0.86	0.79
$P=4.28Al^3-3.54$ (Tohson, 1988)	1.09	1.03	0.66	0.60

杨庄榴辉岩(92YB57)、大兴榴辉岩(LX)及泊于榴辉岩(44087-2)等的石榴石周围常见紫蓝色或淡绿色角闪石及钠长石冠状体,有的被白云母及斜黦帘石交代,绿辉石周围也有紫蓝色角闪石反应边,并产生磁铁矿。退变矿物角闪石和钠长石有的形成微粒状后成合晶。应存在如下反应:



孔家店榴辉岩(LX11)及迟家店榴辉岩(LY17)等的绿辉石明显向透辉石转变,并且产生微粒状钠长石后成合晶或冠状钠长石(有的构成透辉石环边),少数绿辉石分解成细粒或微粒状透辉石与钠长石交生体,应存在如下反应:



在第二类榴辉岩中,例如样品L084、L100、L104等,常见石英交代多硅白云母,蓝晶石和黦帘石被钠长石(微粒状集合体)及白云母交代。

在第四类非典型“榴辉岩”中,例如洙边榴辉岩(L006)、大疃石榴斜长辉石岩(L003)及南城石榴角闪辉石岩(L094)等,石榴石和单斜辉石周围及裂隙中普遍出现退变的淡绿色角闪石及石英,石榴石有的被白云母交代,斜长石向钠长石转变,并产生磁铁矿和榍石,金红石分解成蠕虫状榍石集合体。

矿物化学成分研究表明^①,退变生成的角闪石属于冻蓝闪石及镁红闪石等,以Na₂O或Na₂O+K₂O含量较高为特征,主要是因为绿辉石在退变过程中析出的Na₂O进入角闪石所致。峰期后退变质矿物主要共生组合为:

1. Gt(Gro) + Di + Hb(紫蓝或淡绿色) + Qtz + Sph
2. Hb(淡绿色) + Ab ± Mus(Pg) ± Qtz + Sph
3. Di + Hb(紫蓝色) + Ab ± Cc + Mt

总的来看,区内榴辉岩峰期后退变质作用产生的透辉石的岩相学标志主要表现在:①由绿辉石分解成的细粒或微粒状透辉石与钠长石交生体沿着绿辉石主晶(残留体)周围分布,或者存在于较大的绿辉石晶体内部裂隙中(LX11, LY17);②新生的透辉石以冠状体或不规则反应边形式环绕绿辉石主晶(残留体)分布,并且这些透辉石冠状体和反应边均明显与退变成因的角闪石、钠长石及石英平衡共生(LX, 92YB07, LY17, LZ04, LX11);③退变成因的透辉石和钠长石共同组成冠状体和反应边寄生于绿辉石主晶(残留体)周围;④所有退变成因的透辉石均不具有变形特征,非定向分布,说明是在静态含水条件下产生的,如果透

辉石属于峰期变质矿物,那么将与绿辉石一样,经受同变质期构造变形的改造;⑤这种透辉石与绿辉石之间非平衡共生,也说明二者不是同一世代的矿物。从矿物化学成分来看,峰期后退变质成因的透辉石主要表现为 Na_2O 含量明显偏低, FeO^{T} 和 Al_2O_3 含量也很低,而 MgO 和 CaO 含量则偏高,如表 2 所示。

利用 Perchuk(1969) 提出的角闪石-单斜辉石地质温度计^[13],根据大兴榴辉岩(LX)中退变生成的透辉石-角闪石矿物对化学成分探针分析结果(表 2),估算出退变质温度为 820°C 。再选择五个具有代表性的退变生成的角闪石样品(LX, 92YB59, 92YB57, 92YB07, L048),化学成分探针分析结果见表 2,由角闪石全铝(Al^{T})含量与压力关系估算出退变质压力(表 5),取 $P = 0.37 \sim 0.64 \text{ Gpa}$ 。

表 5 榴辉岩峰期后退变质压力(Gpa)估算结果

Table 5 Estimates of pressures of postpeak retrogressive metamorphism of eclogites

样品号	LX	92YB59	92YB57	92YB07	L048
$P=5.03\text{Al}^{\text{T}}-3.92$	0.52	0.59	0.45	0.55	0.56
$P=5.4\text{Al}^{\text{T}}-4.76$	0.63	0.64	0.47	0.58	0.60
$P=4.28\text{Al}^{\text{T}}-3.54$	0.42	0.48	0.37	0.44	0.46

注:表中公式来源见表 4。

应当指出,由于这种退变质作用没有影响到新元古代变质中酸性侵入杂岩,所以应发生于其侵位之前。

4 榴辉岩 PTt 轨迹及其动力学机制

上述广泛发育于鲁东造山带的四类榴辉岩形成 PTt 轨迹均表现为顺时针演化趋势,如图 3 所示,具有板块俯冲碰撞作用 PTt 轨迹特征及其动力学过程。峰期前进变质阶段轨迹(I)显示快速增压 缓慢升温过程,说明地质体(洋壳夹陆壳)很快俯冲到岩石圈深部,致使

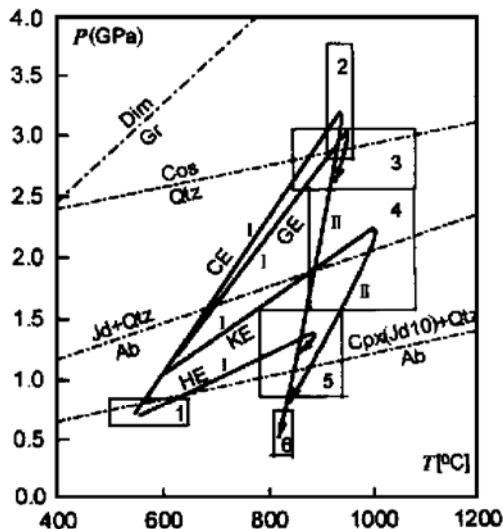


图 3 榴辉岩事件 PTt 轨迹

Fig. 3 PTt paths of eclogite events

1—峰期前进变质 $P-T$ 条件范围; 2—第一类榴辉岩峰期变质 $P-T$ 条件范围; 3—第三类榴辉岩峰期变质 $P-T$ 条件范围; 4—第二类榴辉岩峰期变质 $P-T$ 条件范围; 5—第四类非典型“榴辉岩”峰期变质 $P-T$ 条件范围; 6—峰期后退变质 $P-T$ 条件范围; CE—第一类榴辉岩 PTt 轨迹; KE—第二类榴辉岩 PTt 轨迹; GE—第三类榴辉岩 PTt 轨迹; HE—第四类非典型“榴辉岩” PTt 轨迹; I—峰期前进变质轨迹; II—峰期后退变质轨迹; $\text{Cpx}(\text{Jd}10) + \text{Qtz} - \text{Ab}$ 临界反应线据 Klemal 等, 1991; 其它临界反应线及相变线出处同图 2 说明

其迅速进入超高压- 高压状态而发生榴辉岩化。第一、三类榴辉岩峰期前进变质阶段轨迹反映增压快于升温尤其突出, 可能代表俯冲前峰。第四类非典型“榴辉岩”峰期前进变质阶段轨迹表现增压快于升温不很明显, 可能代表俯冲后缘或俯冲作用即将结束。峰期后退变质阶段轨迹(II) 标志近似等温减压过程, 温度变化幅度较小, 压力则由超高压- 高压很快降至中压状态而发生主要由减压引起的退变质作用, 说明榴辉岩由岩石圈深部在绝热条件下迅速折返, 回到中部地壳。

5 结论与总结

综上所述, 鲁东造山带所发育的四类榴辉岩既非原地变质成因, 也不是构造冷侵入所致, 而是洋壳夹陆壳快速俯冲到岩石圈深部经高温及高压- 超高压榴辉岩化作用的产物。四条 PTt 轨迹总体演化趋势基本一致, 说明区内四类榴辉岩可能形成于统一的大地构造环境中, 并且具有相同的成因及折返机制, 其变质作用 PTt 轨迹特征反映出板块俯冲碰撞动力学过程。当然, 这四类榴辉岩形成 $P-T$ 条件存在一定差异, 尤其是压力变化较为明显, 可能与它们所处的不同构造位置有关。

参 考 文 献

- 1 凌贤长, 刘春华, 徐学纯等. 论鲁东造山带成因. 长春地质学院学报, 1996, 26(3): 292~ 297.
- 2 凌贤长. 鲁东造山带基本特征及边界确定. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31(5): 116~ 121.
- 3 Coleman R G. Eclogites and eckgites: Their differences and smillarities. Bull. Geol. Soe. Am., 1965, 76: 483~ 508.
- 4 韩宗珠, 王来明, 张希道等. 威海地区高压岩石组合及其成因演化. 青岛海洋大学学报, 1993, 23(3): 69~ 79.
- 5 Wang X, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China. Geology, 1989, 17: 1085~ 1088.
- 6 韩宗珠. 鲁东联合地体构造单元划分 地层建造特征及其时空演化. 地质科技通报, 1992, (2): 18~ 21.
- 7 葛宁洁, 沈 洁, 李曙光. 苏北东海—胶南日照两种不同成因榴辉岩的 $P-T$ 轨迹及构造意义. 安徽地质, 1993, 3(1): 25~ 33.
- 8 张儒媛, 丛柏林, 刘忠光. 苏鲁超高压变质地体及其成因解释. 岩石学报, 1993, 9(3): 211~ 226.
- 9 苏尚国, 王仁民, 顾德林等. 山东诸诚地区胶南群榴辉岩围岩高压变质作用特征. 现代地质, 1994, 8(1): 65~ 71.
- 10 温克勒 H G F. 变质岩成因. 北京: 科学出版社, 1980, 67~ 142.
- 11 都城秋惠. 变质作用与变质带. 北京: 地质出版社, 1979, 23~ 198.
- 12 哈克 A. 变质作用——岩石转变的研究. 北京: 地质出版社, 1981, 72~ 169.
- 13 张儒媛, 丛柏林. 矿物温度计和矿物压力计. 北京: 地质出版社, 1983.
- 14 西马科夫 C K. 论地壳变质岩中金刚石形成问题. 国外地质科技, 1996, (3): 61~ 63.
- 15 Xu S, Okay A I, Sengor A M C, et al. Diamond from Dabie Shan eclogite and its implication for tectonic Setting. Science, 1992, (256): 80~ 82.
- 16 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清等. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1992, 16~ 227.
- 17 韩宗珠, 赵广涛. 胶东—苏北构造带特征及动力学演化. 地质科技通报, 1991, (5): 49~ 53.
- 18 韩宗珠, 袁启林, 赵广涛等. 胶东—鲁南早元古代双变质带及其地质意义. 山东地质, 1993, 9(1): 18~ 28.

(下转第 184 页) (to be continued on p. 184)

(上接第 151 页)(Continued from p. 151)

Characteristics and Dynamic Mechanism of Eclogite Metamorphism in Ludong (Eastern Shandong) Orogenic Belt

Ling Xianzhang

(Harbin University of Civil Engineering and Architecture, Harbin 150090)

Lu Liangzhao, Xu Xuechun

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130026)

Key words: Ludong orogenic belt; eclogite; dynamic mechanism; division and collision of tectonic plate

Abstract

Petrofacies studies show that eclogites widely distributed in Ludong orogenic belt can be divided into four types, i. e., (1) eclogites containing coesite and its fake, (2) eclogites containing kyanite zoisite, phengite etc., (3) eclogites of garnet- omphacite- quartz association, and (4) rocks of amphibole, garnet and pyroxene association. Mineral intergrowths and P - T conditions of peak metamorphism suggest that these four types of eclogites are products of metamorphism under dominated high temperature and high- superhigh pressure, and P - T paths of metamorphism show clockwise evolution, reflecting the dynamic mechanism of division and collision of tectonic plate.