

威海地区榴辉岩及其变质作用

崔书学 孙宗锋 张胜祥

(山东省第六地质矿产勘查院)

摘要 威海地区榴辉岩位于秦岭-大别-苏北-胶南巨型榴辉岩带的北东段。榴辉岩体大小悬殊,呈透镜状、不规则状、脉状及似层状等赋存在早元古代荆山岩群变质层状岩系、尖晶石橄榄透闪片岩及晚元古代片麻状花岗闪长岩、片麻状二长花岗岩中,并与围岩一起经受了后期的构造变形改造。榴辉岩退变分带的核部为榴辉岩,次外边为榴闪岩,最外边为斜长角闪岩或石榴斜长角闪岩。三个变质作用阶段的特征是:前榴辉岩阶段为中压相系绿帘角闪岩相;榴辉岩相阶段为高压相系;榴辉岩退变质阶段相当于中压相系的角闪麻粒岩相-角闪岩相。变质作用 PTt 轨迹呈顺时针方向。榴辉岩形成于 900Ma 左右。

关键词 榴辉岩 岩相 变质作用 演化阶段 PTt 轨迹 山东省 威海

威海地区榴辉岩位于秦岭-大别-苏北-胶南巨型榴辉岩带的北东段,是胶东地区榴辉岩较发育的地段。本文以 1:5 万威海等九幅区域地质调查成果为基础,重点阐述这一地区榴辉岩的变质作用特征。

1 榴辉岩的地质特征

本区榴辉岩集中分布在威海市温泉镇附近及荣成市西南一带,分布区地质概况如图 1 所示。区内榴辉岩体呈分散的独立岩块,无根,规模大小悬殊,一般长、宽各数米,所见岩块最大者面积 $200 \times 300\text{m}^2$,最小者长、宽不足 1m。其形态多呈透镜状或不规则状,在荆山岩群中则呈脉状或似层状。其围岩大致分为三类。

1.1 尖晶石橄榄透闪片岩

尖晶石橄榄透闪片岩中的榴辉岩一般呈似层状、条带状、透镜状产出,包体长轴方向与片理一致,围岩片理环绕包体展布,两者界线清楚。

1.2 荆山岩群

区内荆山岩群为变质层状岩系。与榴辉岩接触的围岩绝大多数为该岩系中各种大理岩和钙镁硅酸盐岩。榴辉岩体呈透镜状、似层状、结核状等形态产在这些岩石中,其长轴方向多与围岩片麻理一致,表明榴辉岩体与围岩一起经受变形作用的改造。榴辉岩退变分带现象十分明显,其核部为榴辉岩,次外边为榴闪岩,最外边为斜长角闪岩或石榴斜长角闪岩。

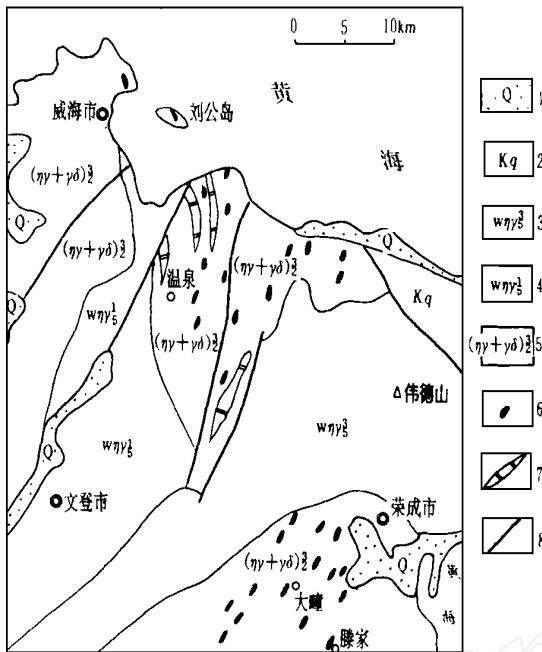


图1 威海地区榴辉岩分布图

Fig. 1 Eclogite distribution in Weihai area

- 1—第四系; 2—青山群; 3—伟德山超单元; 4—文登超单元;
5—片麻状二长花岗岩及花岗闪长岩; 6—榴辉岩;
7—荆山岩群包体; 8—断裂

1.3 片麻状二长花岗岩及花岗闪长岩

威海地区片麻状二长花岗岩及花岗闪长岩为古老的变质变形深成侵入体,即荣成超单元。区内60%~70%的榴辉岩块体呈透镜状、浑圆状、扁豆状及不规则块状等分布于这些侵入体中,二者界线清楚。榴辉岩块体被围岩片麻理环绕,发育有同心环状退变边,其核部的片麻理与围岩片麻理呈平行至大角度斜交。这些特征反映二者一起经受后期的构造变形改造,且表现为榴辉岩包体的退变。

2 榴辉岩的岩相学及演化

2.1 岩相学特征

区内榴辉岩类主要岩石类型为粒状榴辉岩和退变榴辉岩,此外尚有石榴角闪岩、石榴二辉石岩等。

粒状榴辉岩在区内分布较少,岩石呈灰绿色或微红的翠绿色,细粒—

中细粒粒状变晶结构,块状—片麻状构造,主要矿物为石榴子石(55%~95%),绿辉石(15%~45%),次要矿物有金红石(2%±)、石英(0%~5%),副矿物有磷灰石等。石榴子石呈粒状或拉长的条带状,粒度0.25~1.75mm,内部矿物包体较少,有的含有自形的绿辉石及少量石英(周围有似放射状裂纹)包体。绿辉石粒状—短柱状,粒度0.5~2.5mm,与石榴子石平衡共生。主要组成矿物基本没有退变质现象,仍保留原始矿物共生结构形态。

区内90%以上的榴辉岩块体则为退变榴辉岩,野外常见其中心为榴辉岩,向外逐渐变成榴闪岩和斜长角闪岩。榴辉岩退变作用可分为三个阶段:

(1) 第一阶段退变作用发生在静态无水条件下,绿辉石边缘或裂隙被蠕虫状钠质单斜辉石+斜长石所取代,极少有完整的颗粒残留,而石榴子石、金红石等则基本没有发生变化。这一阶段退变作用主要表现在榴辉岩体的残留中心部位。岩相学特征表明,残留核心的岩性已不是原生意义上的榴辉岩,而是呈榴辉岩假象的含次生斜长石榴辉石岩。

(2) 第二阶段退变作用主要表现为低温水化作用,出现大量含水矿物,主要为角闪石,另有极少量黑云母,其特征是残余绿辉石或前一阶段形成的单斜辉石+斜长石进一步被蓝绿色角闪石+斜长石所取代,石榴子石周围生成蠕虫状蓝绿色角闪石+斜长石±磁铁矿(±黑云母),次变边角闪石+斜长石的合晶一般垂直于石榴子石颗粒生长,呈栉状。本

阶段辉石矿物首先被角闪石取代, 而不易转变的石榴子石则残留下来, 这就形成了习称的“榴闪岩”。

第三阶段退变作用的特征是榴辉岩相矿物全部消失, 所有次生矿物结晶颗粒变粗, 呈较特征的布丁状变嵌晶结构, 有时尚残存有单斜辉石+斜长石后成合晶体的假象。这一矿物组合特点是角闪岩相变质条件的标志。

2.2 榴辉岩的演化

区内榴辉岩块体仅极少数尚保留原始矿物组成及结构形态, 绝大多数都发生不同程度的后期退变质作用, 且退变质特征相似, 与围岩性质无关。从前述地质及岩相学特征可以看出, 榴辉岩块体退变环状圈层的残核, 为最初退变质阶段的产物, 由此向外退变质作用渐强, 先是原生绿辉石不稳定, 逐渐被钠质单斜辉石+斜长石取代, 矿物含量减少; 然后石榴子石开始不稳定, 与绿辉石或单斜辉石+斜长石后成合晶被含水矿物角闪石取代。随着退变质作用加强, 石榴子石渐少甚至消失, 最后形成斜长角闪岩的外壳。

综合研究表明, 本区榴辉岩退变质演化可划分为三个主要阶段, 其矿物组合及可能的变质反应如下:

原生矿物组合: $Gt(\text{石榴子石}) + Om(\text{绿辉石}) + Ru(\text{金红石}) \pm Q(\text{石英})$ 。

退变质演化第一阶段的矿物组合为 $Gt + Cpx(\text{单斜辉石}) + Pl_1(\text{斜长石}) + Rt \pm Q$, 变质反应为 $Om \pm Q = Cpx + Pl_1$, 其结果绿辉石被单斜辉石+斜长石取代而消失。

退变质演化第二阶段的矿物组合为 $Gt + Hb_1(\text{角闪石}) + Pl_2 + Mt(\text{磁铁矿}) + Cpx$, 变质反应为 $Gt + Cpx + Pl_1 + H_2O = Hb_1 + Pl_2 + Mt$ (石榴子石与单斜辉石+斜长石反应, 出现绿色角闪石及磁铁矿、斜长石等); 或为 $Gt + Om + Q + H_2O = Hb_1 + Pl_2 + Mt$ (石榴子石与绿辉石之间出现带状绿色角闪石与斜长石合晶及磁铁矿, 石榴子石减少但没有消失)。为榴闪岩阶段。

退变质作用第三阶段的矿物组合为 $Hb_2 + Pl_3 + Mt \pm Q \pm Sp(\text{尖晶石})$, 变质反应为 $Gt + Q + H_2O = Hb_2 + Pl_3 + Mt \pm Sp$, 其结果石榴子石消失, 角闪石与斜长石粒度变粗, 多具嵌晶结构特征。

综上所述, 原生矿物组合代表高压榴辉岩相的变质条件; 退变质演化第一、二阶段的矿物组合反映中压相系麻粒岩相(或角闪麻粒岩相)的变质条件; 第三阶段的矿物组合反映中压相系角闪岩相的变质条件。

3 榴辉岩岩石化学和地球化学特征

3.1 岩石化学特征

本区榴辉岩岩石化学分析结果见表 1, 其中 SiO_2 的含量比较稳定, 为 38.5% ~ 50.92%, 平均含量 47.51%; MgO 含量变化较大, 为 4.86% ~ 10.56%; CaO 含量为 8.76% ~ 13.10%, 多集中在 10% 左右; FeO 含量除个别偏低或偏高外, 其它多集中在 9.19% ~ 13.84%; $Na_2O + K_2O$ 含量为 1.6% ~ 4.23%, 多集中在 3.0% 左右, 且 $Na_2O > K_2O$ 。上述特点显示其为基性岩成分, 相当于 Coleman 的 B 类和 C 类。在 $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$ 图上(图 2), 本区榴辉岩的原岩为亚碱性系列。而在 AFM 图解上(图 3),

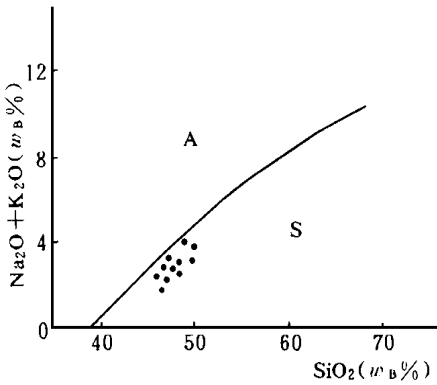


图 2 威海地区榴辉岩 $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$ 图解
(据 T.N. Irvine, 1971)

Fig 2 $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$ diagram of eclogite in Weihai area
S—亚碱性系列; A—碱性系列

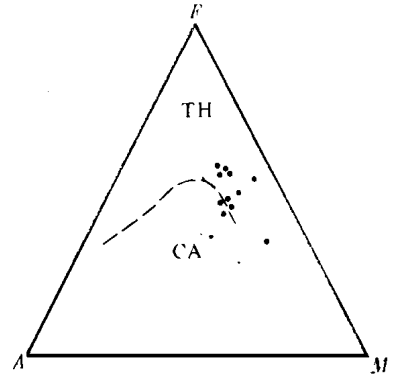


图 3 威海地区榴辉岩 A-F-M 图解
(据 T.N. Irvine, 1971)

Fig 3 A-F-M diagram of eclogites in Weihai area
CA—铝碱性火山岩系; TH—拉斑玄武岩系

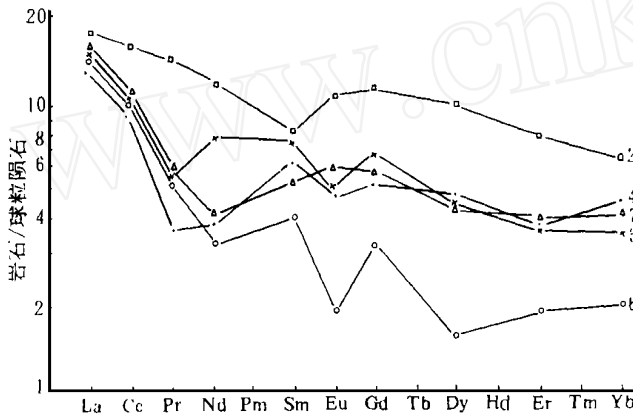


图 4 威海地区与大理岩共生的榴辉岩稀土配分模式
(球粒陨石据 W. V. Boynton, 1984; 图中曲线标号同表 2 序号)

Fig 4 Rare earth distribution pattern of eclogites paragenenerated with marble in Weihai area

则显示原岩为拉斑玄武岩系列, 位于大洋中脊辉长岩的组成范围。

3.2 地球化学特征

本区榴辉岩的稀土元素分析结果及有关参数见表 2。岩石稀土总量 ΣREE 为 $18.39 \times 10^{-6} \sim 53.83 \times 10^{-6}$, 含量低, 且变化大。稀土元素配分模式有两组不同特征: 其一为与大理岩共生的榴辉岩, 其轻稀土 (LREE) 具有较明显分馏, 重稀土 (HREE) 较平坦, 而且 LREE 富集 (图 4), $(La/Yb)_N$ 值为 3.11~

7.13, 具有较明显的铕负异常, $\delta Eu = 0.6 \sim 0.89$, $(La/Sm)_N = 2.20 \sim 5.45$, 稀土配分曲线右倾, 稍有分馏, 类似洋壳基性火成岩的稀土特征; 另一为与花岗质片麻岩共生的榴辉岩, LREE/HREE 在 1.48~2.87 之间, $(La/Yb)_N = 1.07 \sim 2.43$, $\delta Eu = 1.25 \sim 2.10$, $(La/Sm)_N = 0.98 \sim 1.53$, 稀土配分型式总体呈平坦型 (图 5), 基本没有分馏, 具较明显的铕正异常。该模式与层状辉长岩的稀土配分型式相似, 据稀土总量低, $(La/Sm)_N$ 值较小等特征分析, 其原生岩浆为玄武质成分。

4 变质作用条件及 $P-T-t$ 趋势

4.1 前榴辉岩相阶段

本区没有发现确切的前榴辉岩相矿物组合,但与相似地区(大别山)的前榴辉岩相矿物组合类比,可推断本区前榴辉岩相变质条件为:温度大于 500 ,压力为 0.8 ~ 1.0GPa,属绿帘角闪岩相。平均地热梯度 19.5 / km,属中压相系。

4.2 榴辉岩相阶段

此阶段 $P-T$ 条件的确定主要根据对标志矿物或变质矿物组合的实验以及参考 $Gt-Cpx$ 温度计和单斜辉石压力计。

本区南邻大疃、滕家一带榴辉岩中多处发现有柯石英,这为探讨榴辉岩形成提供了较可靠的超高压标志。根据 Mercier (1976) 采用单斜辉石计算地质温度压力的方法,求得本区榴辉岩形成温度在 334 ~ 563 ,压力在 1.1~ 8GPa,平均 3.4GPa,平均地热梯度 9.7 / km,属高压相系。而邻区榴辉岩中亦有柯石英资料,故采用两个压力下限值,即 $P > 2.0GPa$ 和 $P > 2.8GPa$,按 $Gt-Cpx$ 温度计分别计算榴辉岩形成的温度如表 3。

表 3 威海地区榴辉岩变质作用阶段 $P-T$ 条件计算结果

Table 3 $P-T$ condition calculated in eclogites metamorphic stage in Weihai area, Shandong

序号	样号	$P > 2.0GPa$		$P > 2.8GPa$		地热梯度(/ km)	
		TR ()	TE ()	TR ()	TE ()	$P > 2.0GPa$	$P > 2.8GPa$
1	4487- 2	613	675	660	694	11	8
2	4465- 2	784	863	841	889	12	10
3	4476	935	864	1000	893	14	12
4	93- 224	711	1307	764	1334	11	9.2
5	IV- 3- 1	800	1032	858	1058	13	10
6	4465- 2	672	729	722	749	10	9

计算结果表明:当压力大于 2.0GPa,平均温度 753 ,平均地热梯度 11.8 / km;当压力大于 2.8GPa,平均温度 807 ,平均地热梯度 9.7 / km。同属高压相系。

4.3 退变质阶段

榴辉岩的退变质作用处于升温或近等温减压过程,当压力降至榴辉岩相边界压力之下时,其矿物组合将发生转化。根据这一特征,分别测试了不同阶段的矿物成分,采用矿物对地质温度计包括 $Gt-Am$ (Perchuk, 1967)、 $Cpx-Am$ (Perchuk, 1969)、 $Am-Pl$ (Perchuk, 1966) 确定变质温度,变质压力主要使用角闪石中

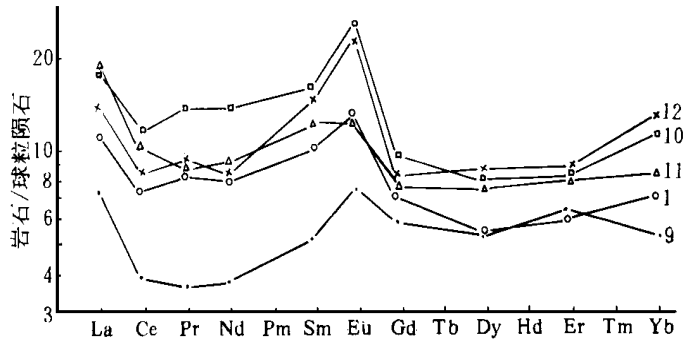


图 5 威海地区与花岗质片麻岩共生的榴辉岩稀土配分模式 (球粒陨石据 W. V. Boynton, 1984; 图中曲线标号同表 2 序号)

Fig 5 Rare earth distribution pattern of eclogites paragenenerated with granite-gneiss in Weihai area

表 4 威海地区榴辉岩退变质阶段 $P-T$ 条件计算结果

Table 4 $P-T$ condition measurements in eclogites retrograde metamorphic stage in Weihai area, Shandong

序号	样号	Gt-Am		Cpx-Am		Am-Pl	
		$T(^{\circ})$	$P(\text{GPa})$	$T(^{\circ})$	$P(\text{GPa})$	$T(^{\circ})$	$P(\text{GPa})$
1	93-15	630	0.68	900	0.72	600	0.56
2	4490-1	650	0.67	750	0.72	700	0.55
3	4490-4	680	0.81	640	0.87	700	0.67
4	4490-5	630	0.63	780	0.67	600	0.51
5	4490-6	780	0.73 1.05	640	0.78 1.14	600	0.60 0.87

全铝含量与压力的关系式来确定(表4)。计算结果表明, Cpx-Am 矿物对温度较高, 在 640 ~ 900 , 平均 768 ; Am-Pl 矿物对温度较低, 在 600 ~ 700 , 平均 640 ; 而 Gt-Am 矿物对温度介于两者之间, 为 630 ~ 780 , 平均 674 。退变质阶段平均温度

694 , 平均压力 0.74GPa, 地热梯度 24 /km, 相当于中压相系角闪岩麻粒岩相一角闪岩相的变质条件。

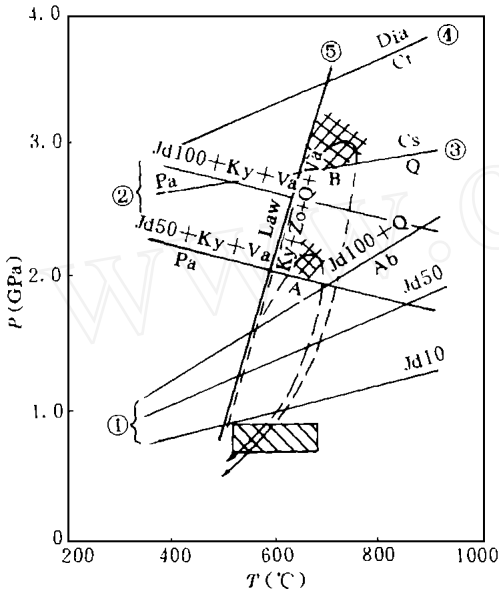


图 6 威海地区榴辉岩的 PTt 轨迹

Fig 6 PTt trend of eclogites in Weihai area

图中曲线: 据 Banno (1986); 据 Newton (1986); 据 Bohlen and Boettcher (1982); 据 Kenney et al (1976); 据 Chatterjee et al (1984)

网格阴影: 榴辉岩相 $P-T$ 区间; 斜线阴影: 退变质角闪岩麻粒岩相一角闪岩相 $P-T$ 区间

A—本区榴辉岩 PTt 轨迹; B—邻区榴辉岩 PTt 轨迹

4.4 PTt 轨迹

根据榴辉岩主要变质阶段的 $P-T$ 条件, 结合晚元古代地质事件, 可得到本区榴辉岩演化的 PTt 趋势(图 6)。其特点是: 整个 PTt 轨迹呈顺时针方向旋转的拉长曲线环; 进变质过程具缓升温且显著增压的特点, 变质温度和压力峰同时达到; 峰值过后显示降温减压或近等热减压的特点, 没有出现热松弛现象。这些特征与正常大陆造山带变质作用 PTt 轨迹明显不同, 后者的变质温度、压力峰值并非同时到达, 而是先到达压力峰值, 之后出现热松弛现象, 经历温度增高、压力降低的过程才达到温度峰期 (England and Thompson, 1984)。

胶东半岛地块中, 榴辉岩变质温度、压力峰值是同时达到的, 与南部邻区大疃、滕家等地的峰期变质条件并不一致, 从南向北变质温度、压力具不明显的降低趋势, 说明不同地区的榴辉岩可形成于不同的深度和地热梯度环境。按静压力计算, 本区与南部

邻区榴辉岩形成的深度及平均地热梯度为:

地区	形成深度(km)	地热梯度(/km)	压力(GPa)
威海地区	> 64	10~ 14	> 2.0
南部邻区	> 83	8~ 12	> 2.8

可见两个地区地热梯度均较低, 这是俯冲带所特有的环境条件 (Ernst, 1973; Sehrey-

er, 1988)。变质温度和压力的正相关变化反映了一种正常的递增变质作用趋势,表明榴辉岩形成深度由北向南逐渐加深。区内榴辉岩相岩石形成于挤压条件下,其变质作用 PTt 轨迹呈顺时针方向;其围岩荆山群(麻粒岩相岩石)则形成于拉伸机制下,变质作用 PTt 轨迹呈逆时针方向。两种不同构造环境形成的岩石之所以能共存在一起,这是后期的碰撞造山运动使其相互混杂所致^[1-4]。

5 榴辉岩的形成时代

区内榴辉岩岩块在片麻状、花岗质岩石中呈包体出现,其长轴与围岩片麻理方向一致,围岩片麻理环绕榴辉岩岩块通过,榴辉岩块体内部的面理与围岩片麻理有一定的交角,说明其形成早于片麻状花岗质岩石,在其中呈捕虏体产出。片麻状花岗质岩石的锆石 $Pb-Pb$ 同位素年龄为 $752 \sim 896 \text{ Ma}$,而本次区调所测榴辉岩中锆石 $U-Pb$ 同位素年龄为 $900 \pm 20 \text{ Ma}$ 。这说明榴辉岩形成于花岗质片麻岩以前,同属晚元古代的产物。

本文是在第六地质队与长春地质学院合作完成的 1:5 万威海等九幅区域地质调查报告的基础上写成的,长春地质学院郑常青老师是该报告榴辉岩部分的主要编写人。谨此说明。

参考文献

- [1] 张希道等. 日照岚山头榴辉岩的成因及演化的 PTt 轨迹. 山东地质, 1997, 13(1): 23—37
- [2] 韩宗珠等. 鲁东榴辉岩的成因与演化. 地质找矿论丛, 1992, 7(4): 13—22
- [3] 杨建军. 苏鲁榴辉岩及有关超基性岩. 北京: 地质出版社, 1991. 26—27
- [4] 王来明. 鲁东碰撞带的初步研究. 山东地质, 1994, 10(1): 100—107

ECLOGITE AND ITS METAMORPHISM IN WEIHAI AREA

Cui Shuxue, Sun Zhongfeng and Zhang Shengxiang

(*Na 6 Exploration Institute of Geology and Minerals of Shandong*)

Abstract

Eclogites in Weihai area distributes in the northeast section of Dabie-Subei-Jiaonan huge eclogite belt, and its bodies varies from small size to large one. It occurred spinel olivine tremolite schist of Jingshan group (Paleoproterozoic) which is metamorphic layered rocks and gneissoid granodiorite and gneissoid monzonitic granite with lens, irregular, vein and stratooid shapes. Eclogite bodies and its country rocks were together deformed by tectonization. The regressive metamorphism zoning of eclogite can be divided into three parts: the core part is eclogite, the one around it is the eclogite amphibolite, and the outer part is plagioclase amphibolite or garnet plagioclase amphibolite by the study of petrology. The characteristics of three metamorphic stages are as follows: before the eclogite-facies stage which is middle-pressure epidote amphibolite facies; the eclogite facies stage which is high-pressure facies; and the retrograde metamorphism stage which is equal to middle-pressure hornblende granulite facies-granulite facies. The trend of PTt is clockwise and the eclogite was formed in about 900 Ma .

Key words: eclogite, rock facies, metamorphism, evolution stage, PTt trend, Weihai, Shandong province