

# 胶南造山带变质作用及其演化

宋明春 王来明

(山东省地质调查研究院)

**摘要** 胶南造山带曾经历过五期变质作用:早中元古代麻粒岩相变质作用,以出现紫苏辉石为标志,其变质条件为  $P=1.35\text{ GPa}$ 、 $T=787.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,属中高压相系、区域中高温变质作用;晋宁期榴辉岩相变质作用,以发育榴辉岩为标志,其变质条件  $P\geq 2.8\text{ GPa}$ 、 $T=601\sim 1375\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,属超高压变质作用,榴辉岩围岩的变质条件为  $P=1.1\sim 1.6\text{ GPa}$ 、 $T=560\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;晋宁—震旦期的角闪岩相变质作用是胶南造山带最重要的一次热动力事件,其形成条件早期为  $P=0.311\sim 0.314\text{ GPa}$ 、 $T=564.5\sim 603.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,中期为  $P=0.25\sim 0.644\text{ GPa}$ 、 $T\leq 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,晚期为  $P=0.545\sim 0.644\text{ GPa}$ 、 $T=600.7\sim 670.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,角闪岩相变质作用的  $P-T$  演化趋势线呈顺时针方向的半环状,这种  $P-T$  趋势与该区的岩浆活动有关;加里东期的中高压绿片岩相变质作用,以广泛分布的3T型多硅白云母为标志,其形成条件为  $P=0.70\sim 0.85\text{ GPa}$ 、 $T=450\sim 510\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,属高温低压变质作用;印支期的低绿片岩相变质作用是区内最晚期的低温动力变质作用,呈带状产出,与韧性或脆韧性剪切带相伴分布,其形成温度为  $350\sim 447\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

胶南造山带由于受到华北板块与扬子板块碰撞作用的影响,因而经历了多期次的变质作用。其变质作用特点与我国古老变质岩区的变质作用规律一致:在空间上和时间上彼此重叠,且分布范围和方向相互交错;在平面上不能划出有规律的递进变质带或变质相序列。该造山带的变质作用以角闪岩相为主,局部可见麻粒岩相及榴辉岩相,晚期经历了强烈的绿片岩相退变质作用叠加。

## 1 典型变质矿物共生组合

胶南造山带主要由大量变质花岗质深成岩及少量变质基性岩、变质地层(荆山群)组成。根据岩相学观察,这些岩石分别经受了五种不同变质作用的影响,各变质相的典型矿物共生组合列于表1。

## 2 变质相系特征

### 2.1 麻粒岩相变质作用

作为岩石经受麻粒岩相变质的重要标志,是区内发现了紫苏辉石。麻粒岩相岩石一般呈透镜状,长几米至几十米,宽几十厘米至几米,主要呈孤岛状分布于角闪岩相变质岩中。

本文1997-01-29收到,1997-04-15改回。

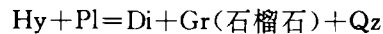
表 1 胶南造山带典型变质矿物共生组合

Table 1 Paragenetic association of representative metamorphic minerals in the Jiaonan orogenic belt

矿物组合 变质相系	岩石类型	基性岩类	变质花岗岩类(包括少量长英质变质地层)	泥质岩类	钙质岩类
		中 低 压 相 系	麻粒岩相 角闪岩相 低绿片岩相	Hy+Di+Alm+Pl+Qz Di+Gr+Qz+Mt  Pl+Hb±Qz Pl+Hb+Gr±Qz  Act+Ab+Ep+Chl	Di+Pl+Qz+Gr±Hb  Bi+Mi+Pl+Qz+Gr Pl+Kf+Hb±Gr Hb+Pl+Mi+Qz
高 压 相 系	榴辉岩相 高压绿片岩相	Om+Pry±Cs Clm+Ru+Kf±Gr+Pl  Hb+Ab+Ep+Phe±Alm Mr+Ep+Mi+Ab+Qz	Phe+Gr+Kf+Ab+Qz Ky+Ru+Ab+Qz  Phe+Ab+Ep+Qz±Sph±Alm±Bi	  Phe+Qz+Zo+Ab	Di+Kf+Ab+Qz Di+Tc+Cc  Tl+Phl+Cc+Di

注:Ab—钠长石;Act—阳起石;Alm—铁铝榴石;Bi—黑云母;Cc—方解石;Chl—绿泥石;Clm—暗硬玉;Cord—堇青石;Cpx—单斜辉石;Cs—柯石英;Di—透辉石;Dol—白云石;Ep—绿帘石;Fo—镁橄榄石;Gph—石墨;Gr—石榴石;Hb—角闪石;Hy—紫苏辉石;Ky—蓝晶石;Kf—钾长石;Mr—镁钠闪石;Mt—磁铁矿;Mi—微斜长石;Om—绿辉石;Phe—多硅白云母;Phl—金云母;Pl—斜长石;Pry—铁铝榴石;Qz—石英;Ru—金红石;Ser—绢云母;Serp—蛇纹石;Sil—夕线石;Sph—榍石;Tl—透闪石。

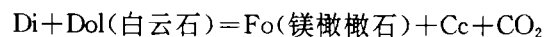
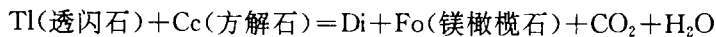
含紫苏辉石的麻粒岩主要见于胶南造山带东段的文(登)威(海)地区,西段的胶南—日照地区尚未发现有确切的紫苏辉石。在荆山群麻粒岩中Hy(紫苏辉石)+Di(透辉石)+Alm(铁铝榴石)+Pl(斜长石)+Qz(石英)五相矿物共存,说明存在如下变质反应:



Green 和 Ringwood(1967)通过实验证明在 700℃ 和 0.8~1.0 GPa 时,上述五相矿物共存。

威海南港一带荆山群含堇青石榴黑云片岩中出现 Cord(堇青石)+Am 组合。Winkler(1975)认为,这一组合仅限于高级变质中区域紫苏辉石带(麻粒岩相)的一个特殊的 P-T 范围内。

在胶南造山带荆山群透辉石镁橄榄石大理岩中的矿物组合可能由以下二反应生成:



Metz(1982)的实验研究证明,上述二反应形成于 0.5 GPa 和 700 ℃ 以上。

对胶南王台含石榴透辉变粒岩中共生的石榴石、透辉石作电子探针成分分析(表 2),根据 Gr-Cpx(石榴石-单斜辉石)矿物对计算温压条件,求得  $P=1.35$  GPa,  $T=787.7$  ℃ (表 3)。

表 2 用于计算变质条件的矿物化学成分(ω<sub>n</sub>%)

Table 2 Chemical compositions of minerals used for the calculation of metamorphic conditions

矿物	Gr		Cpx		Hb					Pl				Kf	
	D <sub>055</sub> b <sub>2</sub>	D <sub>055</sub> b <sub>2</sub>	P <sub>12</sub> b <sub>3</sub>	P <sub>22</sub> b <sub>11</sub>	P <sub>25</sub> b <sub>11</sub>	P <sub>29</sub> b <sub>84</sub>	D <sub>1127</sub> b <sub>2</sub>	P <sub>29</sub> b <sub>4</sub>	D <sub>1127</sub> b <sub>2</sub>	P <sub>21</sub> b <sub>15</sub>	P <sub>25</sub> B <sub>1</sub>	P <sub>21</sub> b <sub>15</sub>	P <sub>25</sub> B <sub>1</sub>		
SiO <sub>2</sub>	36.63	50.40	47.70	39.99	43.80	42.41	37.18	64.44	68.74	67.89	66.83	63.00	63.21		
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.46	0.89	0.41	1.91	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.71	1.13	8.11	10.20	11.31	11.17	10.93	22.06	19.68	19.77	20.54	18.51	18.38		
(FeO)	9.82	12.90	16.34	26.24	19.05	19.74	33.54	<0.16	<0.16	0.00	0.00	0.00	0.00		
MnO	18.08	1.23	0.55	1.29	0.30	0.18	0.76	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
MgO	0.66	8.56	11.32	5.38	9.14	8.42	1.40	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.24		
CaO	13.54	22.70	11.81	10.98	10.35	10.83	9.26	2.82	0.12	0.14	1.20	0.14	0.14		
Na <sub>2</sub> O	0.00	2.17	0.71	1.54	2.40	2.38	2.00	9.66	11.42	11.50	10.87	0.58	1.31		
K <sub>2</sub> O	0.00	0.16	0.72	1.51	1.20	1.35	2.66	0.00	0.11	0.16	0.13	17.64	16.18		
Sum	99.44	99.25	97.72	97.99	97.95	98.39	98.20	99.20	100.07	99.46	99.73	99.87	99.76		
氧原子数	12	6	23	23	23	23	23	8	8	8	8	8	8		
Si	2.929	1.906	7.032	6.248	6.572	6.418	6.171	2.857	2.996	2.982	2.936	2.953	2.949		
Ti	0.000	0.00	0.051	0.105	0.046	0.217	0.057	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011		
Al	1.952	0.050	1.409	1.878	2.000	1.992	2.138	1.153	1.011	1.023	1.063	1.022	1.011		
Fe <sup>3+</sup>	0.189	0.353	0.232	0.824	0.324	0.170	0.578	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Fe <sup>2+</sup>	0.467	0.057	1.783	2.604	2.066	2.328	4.078	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Mn	1.224	0.039	2.488	1.246	2.045	1.90	0.035	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Mg	0.079	0.482	0.009	0.160	0.038	0.023	0.107	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.017		
Ca	1.160	0.920	1.865	1.838	1.664	1.756	1.647	0.134	0.006	0.007	0.056	0.007	0.007		
Na	0.000	0.159	0.293	0.467	0.698	0.698	0.644	0.830	0.965	0.979	0.926	0.053	0.119		
K	0.000	0.008	0.135	0.301	0.230	0.261	0.563	0.000	0.006	0.009	0.007	1.055	0.963		

注:①样品名称:D<sub>055</sub>b<sub>2</sub>—含石榴透辉变粒岩,P<sub>12</sub>b<sub>3</sub>—斜长角闪岩,P<sub>22</sub>b<sub>11</sub>—变二长花岗岩,P<sub>25</sub>b<sub>11</sub>—角闪黑云片岩,P<sub>29</sub>b<sub>4</sub>—变角闪辉长岩,D<sub>1127</sub>b<sub>2</sub>—变石英二长岩,P<sub>21</sub>b<sub>15</sub>、P<sub>25</sub>B<sub>1</sub>—片麻状变二长花岗岩;(2)(FeO)为电子探针分析的全铁含量,Sum为氧化物总量;(3)分析数据由中国地质大学电子探针室测试。

根据上述分析综合判断:本区麻粒岩相的形成条件是  $P=0.5\sim 1.35$  GPa,  $T=700\sim 800$  ℃。据矿物对温压测定结果计算地热梯度为 17.7 ℃/km,说明本区麻粒岩相属中压相系。

表 3 胶南造山带变质作用温压条件估算结果表

Table 3 Estimated  $P-T$  conditions of metamorphism in the Jiaonan orogenic belt

变质相	麻粒岩相	角闪岩相		绿片岩相		
估算方法	Cpx - Gr 温度计 (Ellis & Green, 1979) 单斜辉石 Jd 单变 线求压力(坂野, 1986)	赫兹(1972)角闪石温度计 (图解法) $P_1 = 5.03Al - 3.92$ (Hammar Stron & Zm, 1986) $P_2 = 5.64Al - 4.76$ (Hollister al, 1987)		Hb - Pl 温压计 (Plyunsina, 1982)		Si - $P \cdot T$ 图解 (Massone, 1991)
样品号	D <sub>055</sub>	P <sub>22</sub> b <sub>11</sub>	P <sub>25</sub> b <sub>11</sub>	P <sub>29</sub> b <sub>4</sub>	D <sub>1127</sub> b <sub>1</sub>	
估算参数	$X_{D_1} = 0.68$ $K_D = 21.05$			Capl = 0.134 $\Sigma Al = 1.985$	Capl = 0.006 $\Sigma Al = 2.063$	Si = 3.287*
温度(T)	787.7℃	670.8℃	600.7℃	510℃	450℃	假定 450~510℃
压力(P)	1.35GPa	0.545~ 0.577GPa	0.605~ 0.644GPa	0.7GPa	0.85GPa	0.7~0.85GPa

\* 据 1:5 万胶南、王台幅区域地质调查报告。

## 2.2 榴辉岩相变质作用

本区是秦岭-大别-胶南榴辉岩带的一部分,发育较多的榴辉岩,它们多呈透镜状产出。近年来的研究证实,榴辉岩的部分围岩也经历过榴辉岩相变质作用。榴辉岩的变质条件为  $T = 601 \sim 1375 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P \geq 2.8 \text{ GPa}^{[1]}$ 。其它榴辉岩相岩石(榴辉岩的围岩)的变质条件为  $T = 560 \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 1.1 \sim 1.6 \text{ GPa}^{[2]}$ 。

## 2.3 角闪岩相变质作用

角闪岩相变质作用是胶南造山带最重要的一次热动力事件,它不仅促使大面积分布的晋宁期深成岩发生变质,同时也影响了先期麻粒岩相、榴辉岩相岩石。

由于本区角闪岩相变质作用没有典型的可供确定温压条件的变质反应,因此变质条件的确定主要依据矿物温压计算结果。

根据角闪石矿物化学成分估算的温压条件为  $T = 600.7 \sim 670.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.545 \sim 0.644 \text{ GPa}$ (表 3),地势梯度为  $28 \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ ,属低压相系角闪岩相。这一温压条件代表了区内大量花岗质深成岩侵入后的变质条件(角闪岩相变质作用的晚期阶段)。根据矿物共生组合并结合矿物温压计算可知:区内角闪岩相早期的温压条件是  $T = 564.5 \sim 606.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.311 \sim 0.314 \text{ GPa}$ ;角闪岩相中期阶段的温压条件是  $T \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.25 \sim 0.644 \text{ GPa}^{[1]}$ 。据此可建立角闪岩相变质作用的  $P-T$  演化趋势(图 1),其总体呈逆时针演化形式,早期升温速率大于升压速率,首先温度达到峰值,稍后压力达到峰值,峰后开始近等压降温;晚期冷却速率大于降压速率。该演化趋势类似于大陆岛弧区或大陆边缘造山带的变质作用  $P-T-t$  轨迹。根据 Wells(1980)研究,这种  $P-T-t$  轨迹起因于地壳底部的岩浆垫托作用,即岩浆侵入地壳内部并穿过地壳运移。这种演化形式与区内发育大量晚元古代

① 山东省地质调查研究院,1996,1:5 万胶南、王台幅区域地质调查报告。

变质深成岩的地质记录是吻合的。

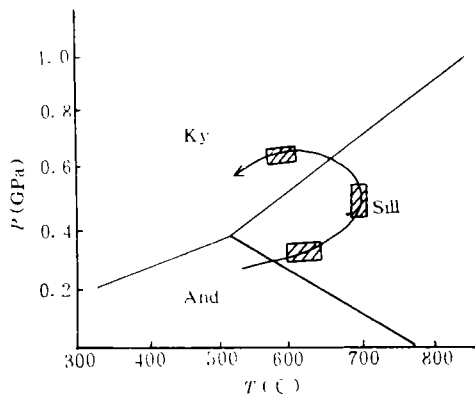


图1 角闪岩相变质作用  $P-T$  趋势

Fig. 1  $P-T$  trend of amphibolite facies metamorphism

Ky—蓝晶石; Sill—夕线石; And—红柱石

区内角闪岩相变质作用逆时针方向的  $P-T$  演化趋势与榴辉岩顺时针方向的  $P-T-t$  轨迹<sup>[1]</sup> 明显不同, 说明二者形成的构造环境及经历的变质路径不同。榴辉岩的进变质阶段是地壳逐渐增厚的过程, 故表现为缓慢升温且显著增压的特征; 退变质阶段榴辉岩被迅速构造抬升, 因此表现为近等温降压特征, 形成顺时针方向的  $P-T-t$  轨迹。而角闪岩相岩石处于相对稳定的地壳环境中, 压力变化不大, 早期受岩浆热流影响温度升高, 岩浆穿过后压力增高; 晚期随着岩浆的冷却温度降低, 因此形成逆时针方向的  $P-T$  演化线。

#### 2.4 中高压绿片岩相变质作用

区内绿片岩相变质作用是伴随大规模韧性剪切变形作用而发生的退变质作用, 它将大多数角闪岩相岩石改造成为以绿片岩相矿物组合为主或绿片岩相与角闪岩相矿物组合共存的岩石。区内广泛分布的 3T 型多硅白云母即为中高压绿片岩相的标志性矿物。

根据绿片岩相岩石中共存的钠长石-角闪石矿物对(表 2)估算温压条件为  $P=0.7\sim 0.85$  GPa,  $T=450\sim 510$  °C(表 3)。利用多硅白云母的  $Si-T \cdot P$  图解(图 2)确定白云母的形成压力为  $0.7\sim 0.85$  GPa, 据此计算地热梯度是  $16\sim 22$  °C/km, 属中高压相系。

#### 2.5 低绿片岩相

低绿片岩相岩石多呈带状产出, 与韧性或脆韧性剪切带相伴分布, 岩石的变质与构造变形密切相关, 为区内最晚期的一种低温动力变质作用, 一般叠加于各早期变质作用之后。

根据 Stormer(1975)的二长石温度计(表 2 中  $P_{21}b_{15}$ 、 $P_{25}B_1$  号样品), 计算低绿片岩相的形成温度为  $350\sim 447$  °C。

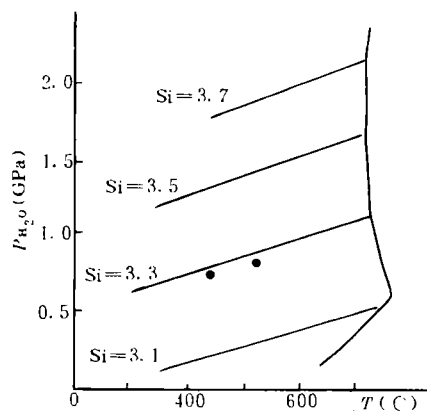


图2 多硅白云母 Si 值等斜度与形成的温压关系图解

Fig. 2 Isoclinal degree of Si values of phengite vs. formation  $P$

### 3 变质作用演化

根据上述变质作用特征结合同位素年龄、区域地质事件序列,胶南造山带变质作用演化可分为四个阶段。

#### 3.1 早、中元古代变质阶段

区内荆山群形成后,大致在早元古代末发生了麻粒岩相变质作用,王台地区荆山群含石墨黑云变粒岩中的单锆石 Pb-Pb 年龄 1 744.8 Ma 可代表该期变质作用的年龄。根据董中堡对区域变质作用类型的划分原则,这一阶段的变质作用属区域中高温变质作用。

#### 3.2 晋宁—震旦期变质阶段

近年来的同位素年代学研究表明,700~900 Ma 这一大致相当于晋宁—震旦期的同位素年龄值在胶南造山带中具有非常重要的地位<sup>[3]</sup>。即晋宁—震旦期变质作用为区内最重要的变质作用,其它再造和改造与该期变质作用相比则是次要的。

大致在 900 Ma 发生的晋宁运动,伴随着华北板块与扬子板块的对接碰撞,引起了榴辉岩相变质作用,这是一期超高压变质作用。

在 700~870 Ma,伴随区内大规模晋宁—震旦期花岗岩类侵位而发生的角闪岩相变质作用,为继超高压变质作用之后的一次区域动力热流变质作用。

#### 3.3 加里东变质阶段

胶南造山带中榴辉岩的 Sm-Nd 同位素年龄在 418~496 Ma 之间有一个峰值,表明加里东运动对该区有重要影响。发生在这一阶段的中高压绿片岩相变质作用,是一种高压低温变质作用。

#### 3.4 印支期变质阶段

这一阶段的变质作用属区域低温动力变质作用。榴辉岩同位素年龄的另一个峰值 270~390 Ma 可代表这一阶段变质作用的形成时代,这是胶南造山带隆升过程中发生的一期动力退变质作用。

### 参 考 文 献

- 1 王来明,宋明春,刘贵章等. 鲁东榴辉岩的形成与演化. 见:山东地质矿产研究文集. 济南:山东科学技术出版社, 1996. 39-49.
- 2 苏尚国,王仁民,顾德林,赖兴运. 山东诸城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.
- 3 宋明春,王来明,张京信等. 胶南-文威碰撞造山带及其演化过程. 见:山东地质矿产研究文集. 济南:山东科学技术出版社,1996. 54-61.

## METAMORPHISM AND EVOLUTION IN THE JIAONAN OROGENIC BELT

Song Mingchun and Wang Laiming  
(*Shandong Geological Survey Institute*)

### Abstract

Jiaonan orogenic belt has experienced five - stages of metamorphism: (1) granulite facies metamorphism, which is marked by the occurrence of hypersthene with the metamorphic conditions as  $P = 1.35\text{GPa}$ ,  $T = 787^\circ\text{C}$ , belonging to medium high pressure facies and regional high - temperature metamorphism; (2) eclogite - facies metamorphism, which is symbolized by the occurrence of eclogites with the metamorphic conditions as  $P \geq 2.8\text{GPa}$ ,  $T = 601 \sim 1375^\circ\text{C}$ , belonging to ultrahigh - pressure metamorphism while the metamorphic conditions of the country rocks of eclogites are  $P = 1.1 \sim 1.6\text{GPa}$  and  $T = 560 \sim 650^\circ\text{C}$ ; (3) amphibolite - facies metamorphism is the most important thermal - dynamic event in the Jiaonan orogenic belt; in the early stage, the metamorphic conditions are  $T = 564.5 \sim 606.3^\circ\text{C}$  and  $P = 0.311 \sim 0.314\text{GPa}$ , respectively; in the middle stage,  $T \leq 700^\circ\text{C}$  and  $P = 0.25 \sim 0.644\text{GPa}$ , respectively, and the  $P - T$  evolution path of the amphibolite - facies metamorphism is a clockwise half circle and is related to the magmatic activities in the area; widely spreading 3T - type phengite is the indication of medium to high - pressure greenschist facies metamorphism, the conditions are  $P = 0.70 \sim 0.85\text{GPa}$  and  $T = 450 \sim 510^\circ\text{C}$ , respectively, belonging to high - temperature and low - pressure metamorphism; (4) low greenschist - facies metamorphism is the latest low -  $T$  dynamic metamorphism, which has affected rocks occurred in band, and accompanied with ductile of brittle - ductile shear zones, the metamorphic temperatures being  $350 \sim 447^\circ\text{C}$ . The granulite - facies metamorphism took place in  $1744.8\text{Ma}$  of the Neo - Meso proterozoic period; the eclogite - facies metamorphism took place in  $900\text{Ma}$  or so of the Jinning period, and has a genetic connection with the plate collision; amphibolite - facies metamorphism took place in  $700 \sim 870\text{Ma}$  of the Jinning - Sinian period; the medium to high - pressure greenschist - facies metamorphism took place in  $418 \sim 496\text{Ma}$  of the caledonian orogeny; the low greenschist - facies metamorphism took place in  $270 \sim 390\text{Ma}$  of the Indosian movement.