

山东省平度地区 下元古界荆山群变质作用特征

王德洪 林润生
(山东省地质矿产局第四地质队)

提要 胶北隆起新建荆山群,处于胶东群之上,暂置于粉子山群之下;为一套不稳定至半稳定型浅海相陆源碎屑(底部有少量火山碎屑)夹碳酸盐岩的类复理石建造,经过多期变质作用达到角闪麻粒岩相的变质沉积岩系。

变质矿物共生组合和各世代矿物的相互关系显示该套岩系经历了四期变质作用。单矿物化学成分及地质温压计等定量估算出各期变质作用的 $p-T$ 条件:

第一期变质作用相当于角闪麻粒岩相条件, $t=780\sim 817\text{ C}$, $p=0.5\text{ GPa}\pm$, $f_{\text{O}_2}=10^{-15.5}$ 。

第二期变质作用相当于高角闪岩相条件, $t=630\sim 690\text{ C}$, $p=0.4\text{ GPa}\pm$ 。

第三期变质大致为低角闪岩相, $t=525\text{ C}\pm$ 。

第四期变质相当于绿片岩相条件, $t<400\text{ C}$ 。

胶北隆起下元古界荆山群,主要分布在平度、莱西、莱阳、安丘等地。牟平、海阳也有零星出露(图1)。笔者通过平度地区1/5万区域地质调查工作,积累了较多岩石学和矿物学资料,想借此探讨平度一带荆山群变质作用特征,以提高新建荆山群的研究程度。

一、概 述

荆山群在平度地区仅出露上部两个组。地层构造线近东西向展布,由于多期次构造运动的改造和破坏,构造线发生局部变化。组成地层的主要岩石类型有片麻岩、变粒岩、长石英岩及浅粒岩、大理岩、透辉岩、斜长角闪岩和少量麻粒岩。混合岩化作用普遍,以注入为主,伴随一定的交代作用。原岩为一套不稳定至半稳定型浅海相陆源碎屑夹碳酸盐岩类复理石建造。底部夹少量火山碎屑沉积,中部为碳酸盐岩,上部以含碳富铝为特征(表1)。该套地层原划归粉子山群明村岩组和山张家岩组。近年来,四队、三队、区调队将其划为下元古代早期;以四队所测莱阳荆山地区剖面为标准剖面,建立荆山群。暂置于粉子山群之下,胶东群之上。它不仅在岩石组合、混合岩化程度、构造特征等方面与莱州、蓬莱和福山地区的粉子山群有明显不同,在变质作用特征上也有很大区别。

* 本文为祝贺曹国权高级工程师从事地质科技事业54周年的特约稿件,1989年12月收到,1990年4月改回。

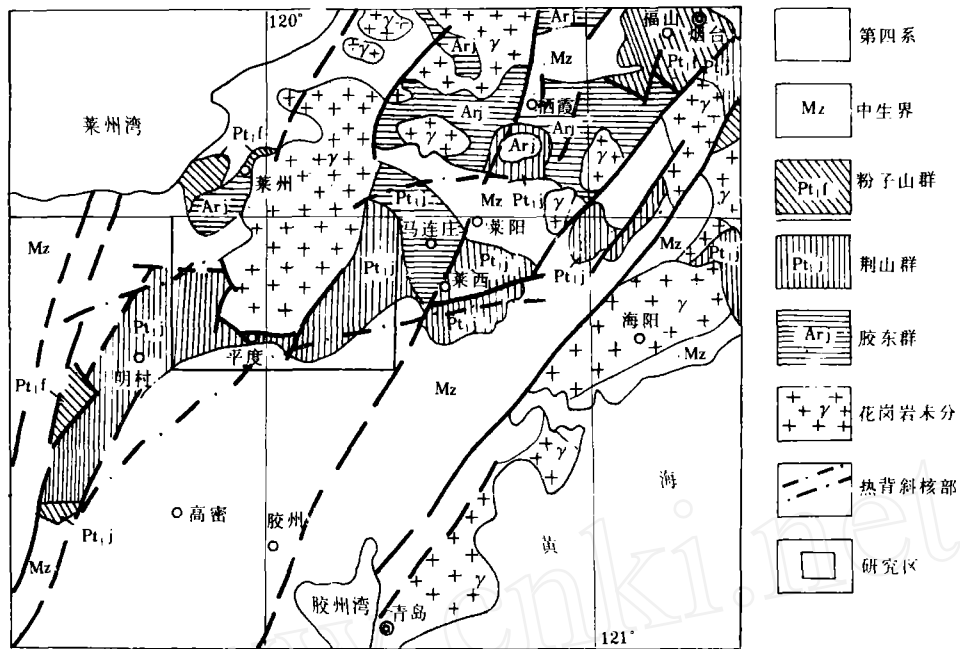


图1 荆山群分布及变质略图

表1 平度地区荆山群地层变质岩石组合及原岩建造一览表

组	段	变质岩石组合	原岩建造	层厚度 (m)
陡崖组	二段	以矽线石榴黑云斜长片麻岩为主, 夹黑云变粒岩及少量透辉岩薄层, 偶见纤闪石榴变粒岩。岩石中普遍含少量石墨	为一套含碳富铝粘土岩夹泥质砂岩、钙泥质砂岩及粉砂岩沉积	585.18
	一段	以石墨透辉变粒岩、石墨黑云变粒岩、石墨透辉岩为主, 夹石墨(透辉)石英岩、少量斜长角闪岩, 偶夹大理岩透镜体、斜长角闪麻粒岩	为一套富碳钙泥质粉砂岩、泥质粉砂岩夹泥灰岩、石英砂岩, 偶夹石灰岩薄层等细碎屑沉积	139.55
野头组	二段	以各种大理岩为主, 夹少量斜长角闪岩和透辉岩, 底部常夹有浅粒岩和石英岩	为浅海相碳酸盐岩夹白质泥灰岩, 底部常夹长石石英岩沉积	180.40
野头组	一段 上层	以长石石英岩夹极薄层黑云变粒岩为特征, 偶夹斜长角闪岩、斜长角闪麻粒岩	为一套滨海相长石石英砂岩夹泥砂岩, 伴有钙泥质或钙硅质碎屑沉积	79.16
	一段 下层	以方柱石透辉岩、黑云变粒岩、斜长透辉岩、斜长角闪岩、长石石英岩等形成韵律频繁的薄层互层, 夹大理岩薄层或透镜体, 偶见麻粒岩	为一套钙质泥岩、泥质砂岩夹泥砂岩, 伴有钙泥质或钙硅质碎屑沉积, 局部夹火山碎屑沉积	154.00

禄格庄组未见出露

二、岩石学特征

(一)片麻岩类

包括富铝片麻岩、斜长片麻岩和钾长(或二长)片麻岩。

1. 富铝片麻岩:指陡崖组上段的主体岩性——矽线石榴黑云斜长片麻岩(表 1)。岩石呈鳞片花岗变晶结构,片麻状构造,主要由石英、斜长石、黑云母、钾长石组成。以富含矽线石(10—15%)和石榴子石(2—25%)为特征,含有少量石墨。其中黑云母为黄褐色,局部与矽线石呈渐变关系。矽线石有绕石榴子石分布的现象。矽线石有两种,一种为细小柱状,另一种为针状、毛发状。后者交代穿插前者。石榴子石内含大量长英质包体,构成筛状变晶结构。其矿物共生组合为:*

Bi(黑云母)+Pl(斜长石)+Qz(石英)+Po(钾长石)+Ald(铁铝榴石)+Sil(矽线石)+Gph(石墨)

2. 斜长片麻岩:包括黑云角闪斜长片麻岩和含石墨黑云透闪斜长片麻岩等。为荆山群陡崖组次要岩石类型。岩石呈柱粒状变晶结构,片麻状构造;常含少部分因混合岩化作用加入的钾长石(0—15%)。普通角闪石一般为绿色,多次变为透闪石和绿鳞石。黑云母亦多次变褪色。其矿物共生组合为:

(1) Bi+Pl+Qz+Hb(普通角闪石)

(2) Bi+Pl+Qz+Di(透辉石)±Gph

(3) Bi+Pl+Qz+Ho(透闪石)

3. 碱性长石(或二长)片麻岩:为野头组一段上部的次要岩性。岩石由钾长石、斜长石(酸性)、石英、透辉石、透闪石及黑云母组成,有时含少量石墨。呈鳞片纤柱状花岗变晶结构,片麻状或块状构造。其中透闪石与透辉石存在转变关系,是透辉石褪变的产物。这类岩石可分两种情况,一是中酸性火成岩或长石质砂岩经区域变质作用变质而成;另一种是由各种片麻岩或变粒岩经混合岩化作用,长石、石英含量有所增加或矿物颗粒再长大而成,实质上是一种混合岩。亦或原斜长片麻岩在后期褪变质作用中斜长石牌号降低而成。其矿物共生组合为:

(1) Di+Qz+Alf(碱性长石)

(2) Bi+Pl+Po+Qz+Di±Gph

(3) Ho+Pl(酸性)+Qz

(二)变粒岩类

为本区荆山群主要岩石类型之一(表 1)。岩石种类繁多,包括黑云变粒岩、透辉变粒岩、角闪变粒岩、石榴变粒岩等。一般为细粒变晶结构,块状构造。片状矿物多具定向性。岩石中常含少量石墨,其中石墨透辉变粒岩是石墨矿的主要矿石类型。黑云母常见绿泥石化、闪石化、蛇纹石化;角闪石具纤闪石化。黑云变粒岩中黑云母含量 15—25%,多色性明

* 矿物共生组合均以矿物代号列出,仅第一次出现的代号注明矿物名称。本文所用矿物代号均以《1/5 万区域地质矿产调查图式图例》为依据,下同

显,褐或棕褐—黄色。碱性长石主要为反条纹长石。斜长石 An_{28—32}。所出现的矿物共生组合有:

- (1) Bi+Pl+Qz+Alf±Gph
- (2) Bi+Pl+Qz+Alf±Hb
- (3) Pl+Qz+Alf+Di
- (4) Pl+Qz+Alf+Di+Hb±Gph
- (5) Bi+Pl+Ho+Gr(石榴石)

(三)长英质岩石

包括浅粒岩、长石石英岩、石英岩三部分,分布情况参见表 1。岩石主要由长石、石英组成,含少量其它矿物,如黑云母、角闪石、透闪石、透辉石、石墨等。其共生矿物组合有:

- (1) Bi+Pl+Qz+Po±Hb
- (2) Qz+Di
- (3) Qz+Ho
- (4) Qz+Mt(磁铁矿)±Gph

(四)斜长角闪岩类

在野头组及陡崖组一段均有出现。岩石主要由角闪石和斜长石(An_{40—50})组成,常含透辉石和少量石英(5—10%)。副矿物为磷灰石、榍石、磁铁矿,偶见金红石。呈柱粒状变晶结构,块状构造。角闪石有两种,有时可在同一薄片中出现,一种角闪石(Hb₁)Ng 方向为红褐、绿褐色;另一种角闪石(Hb₂)Ng 方向为蓝绿、绿色。Hb₂ 交代 Hb₁ 和透辉石。这表明两种角闪石属于两个世代,代表不同的变质结晶条件。与 Hb₂ 共生的斜长石 An 含量较低,一般 28—35%。常见共生矿物组合如下:

- (1) Hb₂+Pl+Qz
- (2) Hb₁+Pl±Di±Qz±Gph

角闪石(Hb₁)有时褪成绿色或蓝绿色,而在其周围或裂缝中出现较多的不规则细粒状榍石。说明后期退变质作用中 TiO₂ 从晶格中析出,形成榍石,且角闪石变色。

(五)麻粒岩类

包括二辉斜长角闪麻粒岩和二辉麻粒岩。偶见于野头组一段和陡崖组一段。

1. 二辉斜长角闪麻粒岩:岩石主要由角闪石(深绿褐色,含量 30—35%)、斜长石(An_{45—50},含量 25—40%)和部分辉石(紫苏辉石和透辉石,共含 5—30%)、钾长石(10—25%)组成。副矿物为磁铁矿、榍石、磷灰石。呈柱粒状变晶结构,粒径 0.5—1.5mm,块状构造。角闪石中有辉石包粒,辉石中也有角闪石包粒(图 2)。二者呈三边镶嵌接触(图 3)。有的薄片见到角闪石被辉石交代,呈残晶状在辉石晶体中,有时见角闪石镜下为蓝绿色,但其周围或其裂隙中出现较多细粒榍石。角闪石常具纤闪石化、绿泥石化,透辉石亦多见绿鳞石化。斜长石普遍具绢云母化,还常见帘石化。

2. 二辉麻粒岩:岩石主要由紫苏辉石、透辉石、角闪石及黑云母(共 50—60%)和斜长石(40—50%)组成。有时含<10 的石英。呈粒状或柱粒状变晶结构,块状构造。黑云母为褐色,与二辉石均存在渐变关系。角闪石有两种,一种和二辉石平衡共生,含量较少;另一种为绿色,与紫苏辉石存在渐变关系,是其变化的产物。

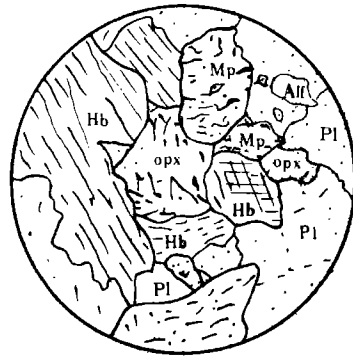


图 2 角闪石与辉石相互包裹现象 (d=2mm) 图 3 角闪石与辉石呈三边镶嵌结构 (d=2mm)

另据靳是琴等资料^[1]介绍,角闪二辉麻粒岩主要由斜方辉石(紫苏辉石和铁紫苏辉石,含量 7—15%)、单斜辉石(次透辉石,含量 15—20%)、角闪石(N_g 方向多色性为红褐—褐色,含量 25—30%)、斜长石(中长石 An_{40-50} ,含量 30—45%)和石英(0—10%)、方柱石(中柱石,含量 0—15%)组成。副矿物主要是金红石或榍石、磷灰石、磁铁矿。呈均粒变晶结构,粒径 0.5—1mm。角闪石与斜方辉石(或单斜辉石)呈三边镶嵌结构(图 4),有时也见二辉石交代角闪石(图 5),偶尔在同一标本上并存上述两种现象。其所述现象在我们工作中所取标本上也均能见到。

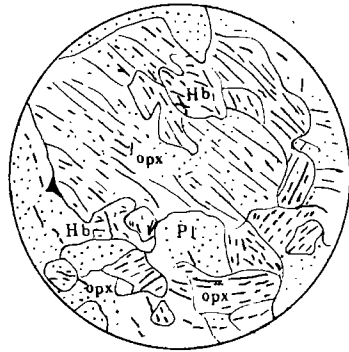


图 4 角闪石与辉石呈三边镶嵌结构 (d=2mm) 图 5 二辉石交代角闪石 (N=0.5, d=6mm)

上述两种岩石常见共生矿物组合为:

Opx(斜方辉石)+Mp+Hb+Pl±Bi±Qz±Sc(方柱石)

(六)透辉岩类

主要由透辉石、斜长石组成。含部分其它矿物,如石墨、金云母,有时含方柱石及次要矿物方解石、帘石类、透闪石、白云母等。呈柱粒状变晶结构,块状构造。常见岩石类型有金云透辉岩、含石墨斜长透辉岩、角闪透辉岩、方柱石透辉岩等。其共生矿物组合有:

- (1) Di+Phl(金云母)
- (2) Di+Gph+Pl±Qz
- (3) Di±Hb±Sc±Pl

(七)大理岩类

主要由方解石或白云石(一般>70%)组成。次要矿物比较复杂,有橄榄石、透辉石、金云母、尖晶石、方柱石、石墨及后期蚀变矿物蛇纹石等。副矿物有榍石、锆石、金红石、磷灰石、磁铁矿等。呈粒状或花岗变晶结构,块状构造。常见共生矿物组合有:

- (1) Cal(方解石)±Ol(橄榄石)±Di±Sc±Gph±Dol(白云石)
- (2) Cal+Di+Ol+Sp(尖晶石)+Phl±Dol

以上各岩类均呈层状、薄层状或透镜状产出,彼此间界线清楚,呈平直的互层或夹层关系,延长延伸稳定。因此,它们属于相同的变质环境所形成的一套沉积变质岩石组合。综上所述,本区荆山群地层遭受的主期变质作用所生成的共生矿物组合如下:

- (1) Di±Pl±Hb±Sc±Gph±Phl
- (2) Opx+Di+Hb+Pl±Bi±Qz±Sc
- (3) Hb+Pl±Di±Qz±Gph±Gr
- (4) Bi+Pl+Po+Qz+Ald
- (5) Bi+Sil+Ald+Pl+Po+Qz+Gph
- (6) Cal±Ol±Di±Sc±Gph±Dol±Sp±Phl

用ACF、A'KF表示其共生组合如图6。由此可以得出以下几点结论:

1. 矽线石与钾长石共生,无白云母存在,表明 $Ms(\text{白云母})+Qz=Po+Al_2SiO_5+H_2O$ 的反应已完成。当压力为0.35—1.0GPa时,此反应的温度在620—680℃之间^[2]。

2. 本区出现了麻粒岩相的特征矿物斜方辉石(紫苏辉石类),但它们与含水矿物角闪石等共生。表明 $Hb+Qz=Opx+Mp(\text{单斜辉石})+Pl+H_2O$ 的反应进行得不彻底,反应物与生成物处于滑动平衡过程中,其结晶温度应在此反应线上(700℃±)^[2]。

3. 本区出现了Gr+Pl+Mp+Hb+Qz的组合,未见Gr+Mp+Pl+Qz组合(无角闪石Hb时,该组合代表麻粒岩相的高压亚带^[2])。表明本区压力偏低,但已接近高压与低压界线(0.5GPa),尤其挤压带中或其附近。

4. 在麻粒岩中见方柱石与斜长石共生。据B. A. Жариков研究,共生的斜长石和方柱石的成分可作为形成深度的标志。本区方柱石和斜长石在 $N_{Mc}^{Si}/(1-N_{Mc}^{Si})$ 对 $N_{An}^{Pl}/(1-N_{An}^{Pl})$ 图上^[1]位于曲线V和VI之间,表明其形成深度大约为17km,相当0.49GPa。

5. 麻粒岩和斜长角闪岩中均含富钛矿物榍石或金红石。在只出现后期角闪石(Hb₂)的斜长角闪岩中,只出现榍石。这反应变质程度偏低。麻粒岩相主要出现金红石,角闪岩相及绿片岩相则出现榍石。这说明本区主期变质作用处于角闪岩相与麻粒岩相的过渡条件。

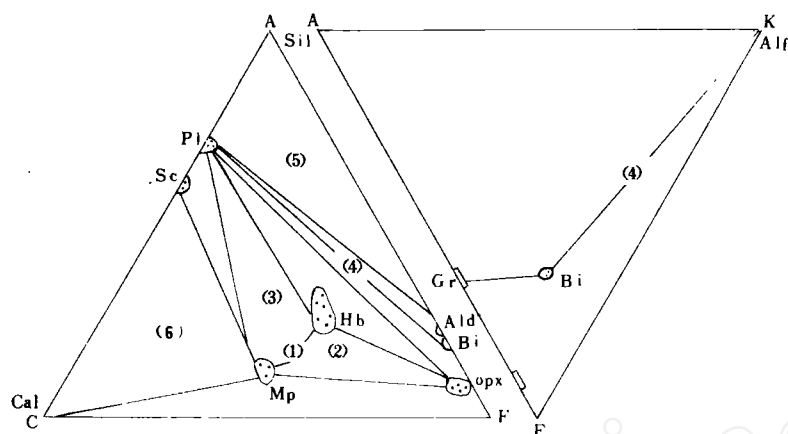


图 6 测区主期变质作用形成岩石的 ACF、A'KF 图解

(OPx, Mp, Sc, Hb 的 ACF 及 Bi 的 A'KF 值由单矿物化学分析或电子探针分析求得, 其它矿物用的理想化学式; Mp 即为单斜辉石)

三、矿物学特征

研究区内 30 个单矿物化学成分列于表 2。

斜方辉石存在于麻粒岩中, 为紫苏辉石和铁紫苏辉石。据多勃列佐夫(Н. Л. Добрецов)等统计认为, 斜方辉石的形成条件综合反映在成分上有以下判别式:

$$D(x) = -4282 + 683Si + 219Al^{VI} + 2181Fe^{3+} + 1440Fe^{2+} \\ + 1455Mn + 1442Mg + 1427Ca + 1770(Na + K)$$

当 $D(x) > 0$ 时, 属于高温的辉石麻粒岩亚相; 当 $D(x) < 0$ 时, 则为角闪麻粒岩亚相。

本区一个湿法分析斜方辉石 $D(x) = -49$, 应属于角闪麻粒岩亚相; 邻区两个斜方辉石的 $D(x)$ 分别为 -39 、 -33.7 , 亦属于角闪麻粒岩亚相。

单斜辉石均为次透辉石。含铁量变化在 9.42—13.867% 之间, Ca 离子数为 0.7798—0.963, 平均 0.844, 高于研究程度较高的密云(0.815)和千里山(0.811)^[3]地区。近代试验研究表明, 单斜辉石的含 Ca 量随温度的降低而增高。故本区单斜辉石的形成温度低于密云和千里山地区。Al₂O₃ 含量 1.11—3.32%, 平均为 2.245%, 低于密云(3.56%)和千里山(3.75%)。研究表明, 单斜辉石中 Al₂O₃ 含量受温度、压力及共生矿物组合等多方面因素影响, 而 Al^{VI} 则主要决定于压力。因此, 硬玉分子和钙契尔马克分子随压力增大而增加。经计算, 本区单斜辉石中硬玉分子和钙契尔马克分子总和(平均 6.54)低于千里山地区(10.4), 因此, 本区单斜辉石形成的压力也低于千里山。

角闪石, 前已述及有两个世代, 根据 Leake, B·E·分类, 应为三个世代。第一世代

表2 辉石、角闪石、黑云母、斜长石、方柱石、磁铁矿

样品号	N-04			N-05						N-07	N-08			
岩石名称	斜长角闪岩			斜长二辉麻粒岩						黑云 变粒岩	混合岩化角闪斜长辉石岩			
矿物代号	Hb ₁ *	Mt*	IL	Opx	Mp*	Hb ₂ *	Pl	Sc	Mt*	Bi*	Mp	Hb ₁	Hb ₃	Pl
SiO ₂	44.60	0.60		50.98	49.80	41.13	56.35	50.81	1.65	39.70	51.65	40.79	51.03	67.43
TiO ₂	1.40	9.30	45.86	0.06	0.28	2.28	0.02		0.05	4.28	0.08	1.12	0.12	0.02
Al ₂ O ₃	7.60	2.20		0.96	3.32	11.80	25.95	21.92	2.10	12.80	1.11	11.80	1.16	19.67
Cr ₂ O ₃	0.07	0.13			0.14	0.25	0.07		0.34	0.07	0.11			
Fe ₂ O ₃	5.94	61.18			3.30	7.54			65.37	3.83				
FeO	8.33	25.58			7.11	10.49			27.45	9.20				
(FeO)			50.71	22.81			0.04	0.09			10.38	14.85	8.90	0.09
MnO	0.22	0.17	0.56	0.76	0.03	0.21			0.06	0.13	0.25	0.22	0.22	
MgO	14.40	0.24	0.07	22.77	12.70	10.80	0.06	0.04	0.58	15.80	12.61	12.06	13.61	0.03
CaO	12.40	0.48		0.50	22.40	11.29	7.84	14.52	0.41	0.15	21.61	11.48	19.49	1.57
Na ₂ O	1.83	0.08		0.05	0.58	1.70	6.07	5.41	0.18	0.25	1.55	2.21	1.48	11.33
K ₂ O	0.73					1.10	0.14	0.34		9.40		0.80	0.01	0.26
H ₂ O ⁺	1.27	0.24				1.38			0.35	1.97				
Los	0.45					0.23				3.20				
总计	99.24	100.20	97.20	98.89	99.96	100.20	97.06	96.13	99.29	100.83	99.35	95.33	96.02	100.4
Si	6.701	0.022		1.916	1.873	61.97	2.635	7.61	0.062	3.032	1.932	6.153	7.532	2.953
Al ^{IV}	1.299			0.019	0.127	1.903	1.418	4.39		0.968	0.049	1.867	0.301	1.016
Al ^{VI}	0.048	0.094			0.020	0.194			0.105	0.184		0.241		
Cr	0.009	0.004			0.004	0.029	0.003		0.010	0.004	0.003			
Ti	0.158	0.252	0.896	0.002	0.008	0.258	0.001		0.014	0.246	0.002	0.125	0.027 0.014	0.001
Fe ³⁺	0.672	1.663	0.209	0.127	0.094	0.855			1.837	0.223	0.193	0.951	0.234	
Mg	3.224	0.013	0.003	1.276	0.712	2.425	0.004	0.009	0.032	1.798	0.703	2.699	3.083	0.002
Fe ²⁺	0.889 0.154	0.773	0.893	0.591	0.224	1.239 0.083	0.001	0.009	0.857	0.587	0.132	0.902	0.729	0.003
Mn	0.028	0.005		0.024	0.011	0.027			0.001	0.008	0.008	0.029	0.028	
Ca	1.815 0.156	0.019		0.020	0.903	1.800	0.389	2.299	0.016	0.012	0.866	0.052 1.796	0.926 2.000	0.74
Na	0.533	0.006		0.004	0.043	0.090 0.406	0.546	1.571		0.037	0.112	0.204 0.439	0.157 0.424	0.962
K	0.119					0.212	0.008	0.065		0.916		0.153	0.002	0.014
OH	1.178					1.387				1.004				

注:带*者为化学分析,其它均为电子探针分析,其中N-04,05,07,08,09为靳是琴等(1986年)在平度地区研究麻粒岩时采集测试。II为钛铁矿。JD8718、JD8719取自平度古观地区陡崖组一段中,JD8718'系JD8718的二次分析结果。

和钛铁矿的化学成分及离子数一览表

N-09					JD8718				JD8719				JD8718'		
角闪二辉麻粒岩					斜长角闪岩				斜长角闪岩				斜长角闪岩		
Opx [*]	Mp [*]	Hb ₁ [*]	Pl	Sc	Mp	Hb ₂	Mp	Hb ₂	Hb ₂	Pl	Hb ₂	Pl	Hb ₂	Mp	Hb ₂
54.00	52.93	42.20	56.91	50.63	51.45	42.42	49.35	43.35	43.22	56.62	43.04	56.15	43.22	49.85	43.82
0.12	0.24	2.16	0.01	0.03	0.09	1.45	0.31	1.41	1.78	0.00	1.57	0.00	1.51	0.31	1.37
2.08	2.00	11.80	27.09	25.48	1.61	10.14	3.05	10.28	10.79	27.72	10.76	27.88	10.22	3.05	10.81
0.15	0.10	0.20			0.01	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.05	0.06	0.09	0.03	0.29
1.44	2.38	4.26													
19.40	7.04	10.56													
			0.02	0.09	13.86	18.29	13.69	18.09	17.24	0.18	17.31	0.00	18.02	13.69	17.85
0.65	0.25	0.23			0.59	0.40	0.69	0.35	0.26	0.00	0.31	0.00	0.31	0.63	0
21.70	12.70	10.52	0.05	0.02	11.77	9.72	10.91	10.01	10.10	0.00	10.00	0.00	9.67	10.31	9.89
0.08	21.60	12.32	8.62	13.15	18.35	10.75	20.00	11.24	11.19	9.03	10.82	9.23	11.08	20.00	10.90
	0.88	1.80	6.19	4.87	0.39	1.16	0.50	11.39	1.40	6.38	1.16	6.28	1.41	0.50	1.45
		0.95	0.14	0.32	0.04	0.87	0.06	1.00	1.15	0.31	1.08	0.27	0.88	0.06	0.91
		1.49													
		0.52													
100.34	100.12	99.01	98.83	95.19	98.85	95.56	99.12	97.25	97.31	100.35	96.57	99.88	96.62	98.43	97.30
1.980	1.965	6.385	2.575	7.531	1.976	6.5673	1.9196	6.5867	6.5411	2.538	6.564	2.527	6.6125	1.9314	6.6241
0.020	0.035	1.615	1.445	4.469	0.0239	1.4326	0.0803	1.4132	1.4588	1.1619	1.4359	1.1729	1.3974	0.0685	1.3758
0.070	0.053	0.491			0.0489	0.413	0.0581	0.4281	0.4663	0.0029	0.4986	0.0063	0.4559	0.0707	0.5506
0.004	0.003	0.024				0.000									
17.003	0.007	0.246	0.0003	0.036	0.0025	0.1688	0.0089	0.1611	0.2026		0.18		0.1737	0.009	0.1557
0.040	0.067	0.486			0.000	0.000									
1.186	0.703	2.372	0.003	0.004	0.6736	2.2426	0.6261	2.2667	2.278		2.2728		2.2049	0.5953	2.228
0.595	0.219	1.337	0.001	0.011	0.4451	2.3681	0.4609	2.2987	2.1821	0.0067	2.2078		2.3051	0.4435	2.2566
0.020	0.008	0.028			0.0191	0.0524	0.0225	0.045	0.0333		0.04		0.0401	0.0206	
0.031	0.859	0.015 0.957	0.402	2.192	0.7798	1.7832	0.8252	1.8291	1.8146	0.4337	1.7681	0.4451	1.8164	0.8302	1.7655
	0.063	0.043 0.048	0.543	1.403	0.029	0.4382	0.0373	0.4095	0.4108	0.5545	0.4317	0.548	0.4182	0.0375	0.425
		0.184	0.008	0.061	0.0019	0.1718	0.0029	0.1938	0.222	0.0177	0.2101	0.0155	0.1717	0.0029	0.1755
		1.504													

(Hb₁)主要为镁绿钙角闪石类;第二世代(Hb₂)主要为亚铁角闪石类;第三世代(Hb₃)为浅闪石或阳起石类。在萨克路特金(В. В. Закрыткин)的 Al^{IV}对 Al^{VI}和 Ti对(Na+K)的变异图上(图7,图8),Hb₁的投影点主要落在麻粒岩相区,且靠近下部边界或落在界线上。这与前述角闪石分解为二辉石的反应未彻底及其形成于角闪岩相与麻粒岩相的过渡条件相吻合。Hb₂落在角闪岩相区,且多靠近上部边界(高角闪岩相)。Hb₃落在绿片岩相区或绿帘石角闪岩相下部区域。三个世代的角闪石 Al^{IV}/Al^{VI}含量均较低。雷斯(Rasse)和弗利特(Fleet)等人均提出以 0.5GPa 作为区分低压和高压的界线,Al^{IV}/Al^{VI}大于 2 为低压,小于 2 为高压。本区第一世代的角闪石 Al^{IV}/Al^{VI}为 2.5—27.06,平均 6.61,第二世代平均 2.6,第三世代更大,表明本区角闪石形成压力小于 0.5GPa。

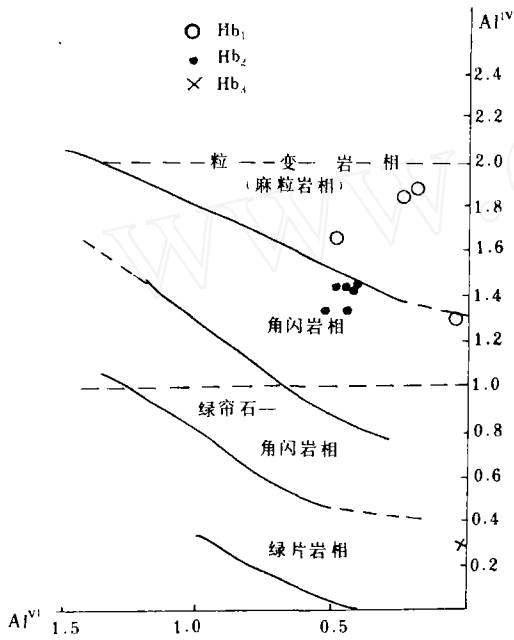


图7 角闪石中 Al^{IV}—Al^{VI}的变异图

(Закрыткин, 1968, 转引自靳是琴等)

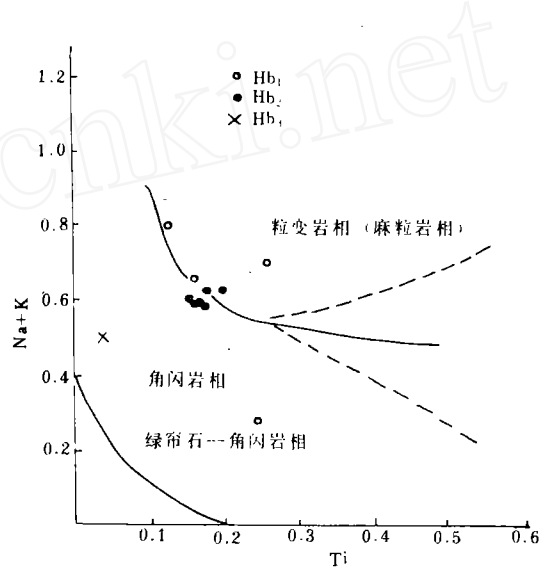


图8 角闪石中(Na+K)—Ti的变异图

(Закрыткин, 1986, 转引自靳是琴等)

黑云母主要存在于变粒岩和片麻岩中,其它各类岩石均有或多或少的出现,与辉石平衡共生。其多色性明显,N_g方向棕褐色、红褐色,N_p方向为黄色。取于黑云变粒岩中的样品^[1],按 Foster, M. D. 分类,属镁质黑云母(图9),富含 MgO(15.8%)和 TiO₂(4.28%),在 TiO₂对 Fe·100/(Mg+Fe)图解上(图10)落在麻粒岩相区。

长石在麻粒岩和斜长角闪岩中主要为斜长石和反条纹长石(由光学方法和探针分析确定),还常见到微斜长石和条纹长石,偶见正长石。斜长石的成分一般变化于 An₃₀—50之间。有少部分 An_{8±},An 随温度降低而减少。与 Hb₁共生的斜长石为 An₄₅—50,与 Hb₂共生的斜长石为 An₃₀—35,与 Hb₃共生的斜长石多为 An_{8±}。反条纹长石中条纹很细,不

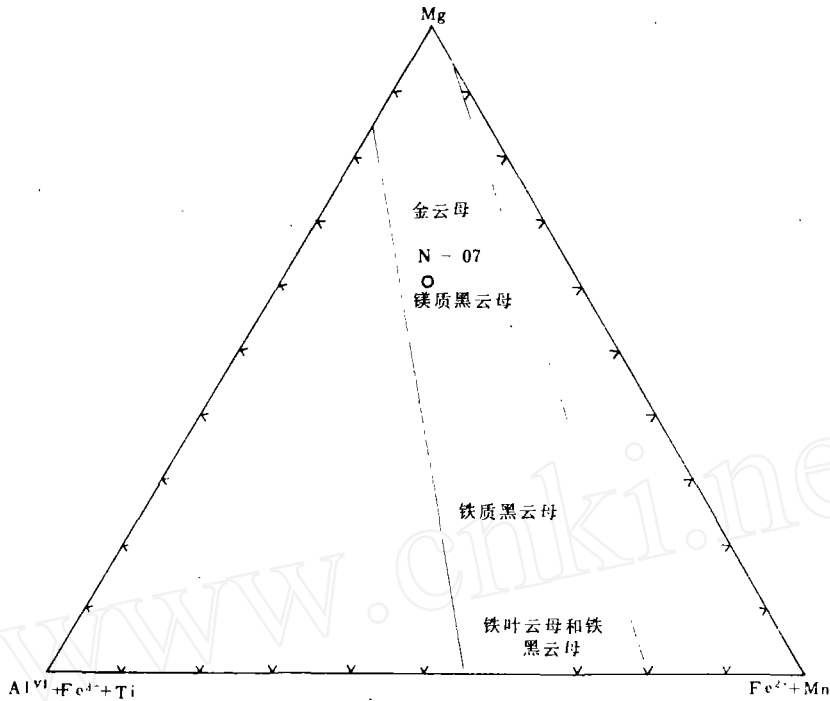


图 9 黑云母的 $Mg-A^{VI}+Fe^{3+}+Ti-Fe^{2+}+Mn$ 图解分类
(Foster, 1960, 转引自靳是琴等)

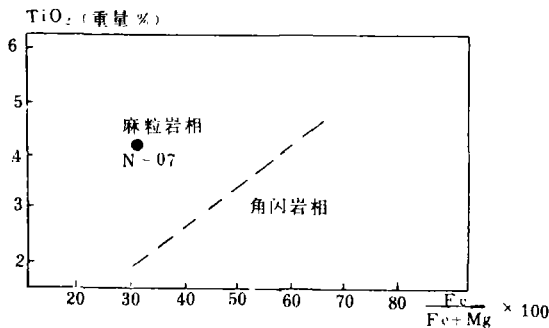


图 10 变质黑云母的 $TiO_2-Fe \cdot 100/(Fe+Mg)$ 图解
(Прыцова, 1965, 转引自靳是琴等, 成因矿物学概论, 下册)

连续。

方柱石是本区的特征变质矿物, 在含辉石的岩石中几乎普遍存在。两个电子探针样品确定含钙柱石 (Me) 为 58 和 60, 均为偏基性的中柱石 (与镜下鉴定一致)。

副矿物磁铁矿在岩石中普遍存在。其化学成分中 SiO_2 含量化学分析和电子探针分析差别较大, 化

学分析含量高。推测磁铁矿中的 SiO_2 不是类质同象组分, 而是混入物。与钛铁矿共生的磁铁矿含 TiO_2 很高 (9.3%), 可能表明含该磁铁矿的斜长角闪岩为岩浆成因。

钛铁矿化学成分富铁贫钛,次要组分只有 Mg 和 Mn,与一般钛铁矿一致。

四、变质作用的 $p-T-fO_2$ 条件

根据矿物组合情况,选择二辉石、单斜辉石—角闪石、角闪石—斜长石、铁—钛氧化物等地质温度计估测变质作用的温度和氧逸度;用单矿物(单斜辉石、角闪石、斜长石)的成分特征及方柱石与斜长石共生关系来估测变质作用的压力及温度。

(一)二辉石地质温度计

采用两种二辉石地温计公式^[3]估算的形成温度列于表 3。

表 3 二辉石地温计主要参数及获得温度

样品号	$a_{Mg_2Si_2O_6}^{Opx}$	$a_{Mg_2Si_2O_6}^{Mp}$	X_{Fe}^{Opx}	t_1 C	t_2 C
N-05	0.389	0.264	0.317	757	803
N-09	0.390	0.031	0.334	683	830
平均				720	817

注: t_1 由公式(1-1-9), t_2 由公式(1-1-18)计算。

从表中可以看出, t_1 和 t_2 相差较大,平均相差 97 C。总平均值 769 C。

(二)单斜辉石—角闪石、角闪石—斜长石地温计

由别尔丘克(Перчук)相图估测的温度列于表 4。

表 4 由 Перчук 相图估测的温度(C)

样品号	N-05	N-08	N-09	JD-8718	JD-8719	JD'-8718	平均
X_{Mg}^{Mp}	0.684	0.679	0.705	0.584		0.577	
X_{Mg}^{Hb}	0.524	0.589	0.562				
$X_{Ca}^{Hb_1}$	0.718		0.735				
$X_{Ca}^{Hb_2}$		0.879			0.738		
X_{Ca}^{Pl}	0.413	0.07	0.422		0.436		
$X_{Mg}^{Hb_2}$		0.757		0.487		0.491	
Mp—Hb ₁	790	760	800				783
Mp—Hb ₂		630		665,690		650,685	664
Hb ₁ —Pl	640		630				635
Hb ₂ —Pl					640,650		
Hb ₃ —Pl		<400					<400

八对单斜辉石—角闪石,其中三对 $Mp-Hb_1$ 估测的温度比较接近,为 760—800 C,平均 783 C,与二辉石地温计的平均值接近。另外五对 $Mp-Hb_2$ 为 630—690 C,平均 664 C,可能代表一次退变质温度。二对 Hb_1-Pl 得到 635 C 结果,结合前述 Hb_1 的光性特征和化学成分及结构特点均表明形成于麻粒岩相条件,且在同一标本上(N-05)采用不同的矿物温度计所得结果不同(表 3,表 4);二辉石为 803 C, $Mp-Hb_1$ 为 790 C, Hb_1-Pl 为 640 C。故此推测 Hb_1-Pl 的数值是低于实际变质温度的。 Hb_2-Pl 取得结果与 $Mp-Hb_2$ 一致。 Hb_3-Pl 取得 <400 C 结果,代表更晚一次退变质或混合岩化后期热液蚀变的温度。

另外,据靳是琴等在莱西马连庄取斜长角闪岩 $Hb-Pl$ 测得 525 C 的结果^[1],可能也代表一期退变质作用。

(三)铁—钛氧化物地质温度计

在斜长角闪岩中(N-04),钛铁矿与磁铁矿共生,经计算,钛铁矿中含钛铁矿分子(Ilm)90%、赤铁矿(Hem)分子 10%;钛磁铁矿中含磁铁矿(Mt)分子 75%,钛铁晶石(Usp)分子 25%。在 Buddington 和 Lindsley 编的共存钛铁矿与磁铁矿平衡与温度、氧逸度和成分关系图上查得; $t=725$ C, $\log f_{O_2}=-15.5$,与其它温度计估算的结果一致,更接近下限。

结合区域变质特征和前述岩矿特征,可以确定,本区主期变质作用温度为 720—817 C, f_{O_2} 为 $10^{-15.5}$ 。后又经历了大约三次的退变质作用,其变质温度分别为 665 C \pm , 525 C \pm 和 <400 C。

(四)压力的估测

前已述及,本区单斜辉石中硬玉分子和钙契尔马克分子表明本区压力低于千里山地区(0.56—0.65GPa)。

雷斯提出利用角闪石的化学成分推测结晶压力的方法,本区麻粒岩相角闪石(Hb_1)均投在 Al^{IV} 对 Si 图解的低压区(<0.5GPa),且 Al^{IV}/Al^{VI} 均大于 2,也表明压力小于 0.5GPa。

偏基性的中柱石与中长石共生,表明其形成深度大致在 17km,压力 0.49GPa。

利用只有 $Hb+Pl$ 矿物共生组合(JD-8719)的单矿物化学成分估测, Hb_2 的结晶压力为 0.39GPa(图 11)。

总之,本区主期变质作用压力 <0.5GPa,大致为 0.49GPa,接近低压与高压界线,尔后各期退变质作用压力均更低。这主要与该区在整个中、晚元古代至古生代地壳以上升为主,未接受沉积,且剥蚀深度加大,从而使静压力降低有关。

四、结 论

综上所述,本区荆山群共经历了四期(次)不同程度的变质作用(图 12)。

第一期(主期)变质作用相当角闪麻粒岩相条件。在富铝泥质岩中出现矽线石(柱状)+钾长石组合;基性岩中出现紫苏辉石+斜长石+单斜辉石+角闪石+石英组合;碳酸盐岩中出现橄榄石+方解石+尖晶石组合。表明变质程度已进入了麻粒岩相的角闪二辉石带。由于二辉石与含水矿物角闪石共生,说明脱水反应不彻底,未达到二辉麻粒岩相;单矿物化学成分表明斜方辉石形成于较低温的角闪麻粒岩相。角闪石、黑云母等均落在麻粒岩相区的下部边界附近。地质温压计取得 $t=780-817$ C, $p=0.49$ GPa, $f_{O_2}=10^{-15.5}$,变质作用

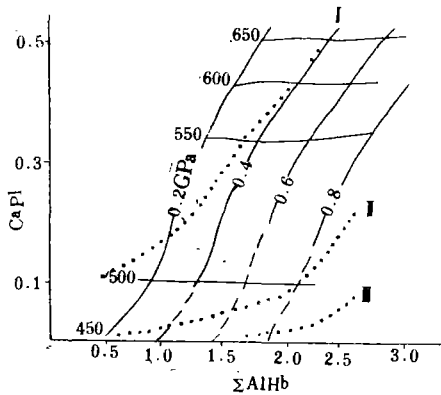


图 11 斜长石—角闪石实验地质温度计
(Plyusnina, 1982, 转引自靳是琴等)

现矽线石(针状、毛发状)+钾长石组合;基性系列中出现斜长石(An30—35)+角闪石组合;碳酸盐岩中出现方解石+透辉石+金云母组合。单矿物化学分析资料表明透辉石、角闪石(Hb₂)均形成于高角闪岩相条件。地质温压计取得 630—690℃, 0.39GPa 的结果。变质作用发生深度依据方柱石与斜长石(An30—35)共生大致为 14km 士。据此计算地热梯度为 45—49 C/km, 相当低压相系^[4]。关于该期变质作用对第一期变质作用的叠加, 镜下见有如下矿物转变现象:

1. 紫苏辉石被绿色角闪石(Hb₂)交代, 角闪

发生在 17km 士的深度。由此计算地热梯度为 42—48 C/km, 相当低压(较高)相系^[4]。据 1/200 万山东省变质图说明书^D认为本区荆山群分布区位于“马连庄—明村热背斜”核部(图 1), 应属于热点式角闪麻粒岩相变质作用。

第二期变质作用, 达到了高角闪岩相条件。在富铝泥质岩中出

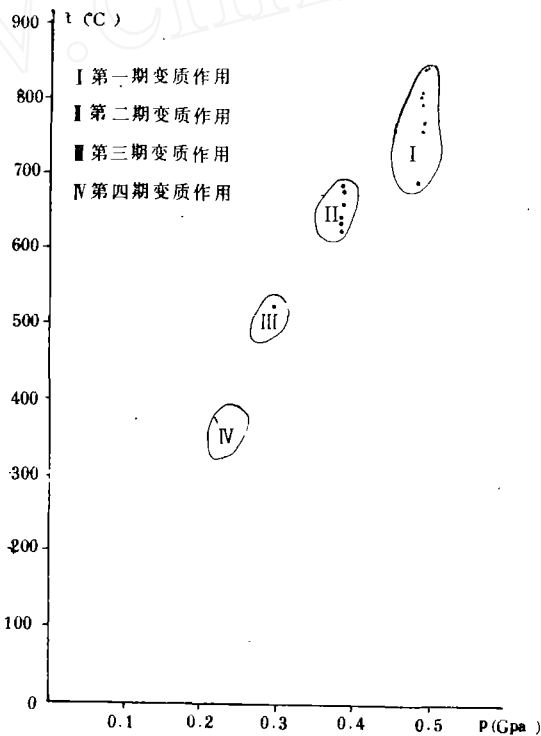


图 12 历次变质作用温压区间简图

D 张成基等, 1982, 1/200 万山东省变质图说明书。

石包裹透辉石。

2. 绿色、蓝绿色角闪石(Hb_2)交代褐色角闪石(Hb_1)。
3. Hb_1 退变成 Hb_2 , 同时析出 TiO_2 , 在其周围或裂隙中形成细粒榍石。
4. 部分黑云母(绿色)与二辉石存在渐变关系, 是二辉石变化的产物。
5. 棕褐色黑云母转变成绿色黑云母。
6. 斜长石成分向酸性演化: 由 An_{40-50} 转为 An_{30-35} 。

第三期变质作用为低角闪岩相条件。主要表现在透辉石、角闪石等浅闪石化、次透闪石化、石榴石的黑云母化及阳起石(即 Hb_3)、绿帘石等的出现。据地温计估测, 其转变温度在 $525\text{C}\pm$ 。

第四期变质作用是区内荆山群经历的最晚、最轻的一次变质作用, 相当绿片岩相条件。主要表现为斜长石的钠长石化, 黑云母、角闪石等的绿泥石化、帘石化、蛇纹石化等。其转变温度低于 400C 。

参 考 文 献

- [1] 靳是琴等, 1987年, 胶东莱西—平度一带麻粒岩相岩石的变质作用特征。地质学报, 第六十一卷, 第三期。
- [2] H. G. F. 温克勒, 1980, 变质岩成因。科学出版社。
- [3] 靳是琴等, 1986, 成因矿物学概论。吉林大学出版社。
- [4] 中华人民共和国地质矿产部《中国变质地质图》编图委员会, 1986, 中国变质地质图(1: 400万)说明书。地质出版社。

METAMORPHIC CHARACTERISTICS OF JINGSHAN GROUP OF THE LOWER PROTEROZOIC IN PINGDU AREA, SHANDONG

Wang Dehong and Lin Runsheng

(*The 4th Geological Brigade, Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources*)

Abstract

The newly defined Jingshan Group in Jiaobei Uplift, overlying the Jiaodong Group and underlying the Fenzishan Group unconclusively, is a flysch-like formation consisting of unstable to semi-stable terrigenous debris (with a minor quantity of pyroclastics at the bottom) of neritic facies with banded carbonate rocks, and has become a metamorphic sedimentary rock sequence of amphibolite-granulite facies after experiencing multi-stage metamorphism.

The paragenetic association of the metamorphic minerals and the interrelationship between the minerals in all the stages show that the rock series have undergone four stages of metamorphism. The p - T conditions of the metamorphism are obtained in terms of monomineralic chemistry and geobarometry as follows:

The first stage of the metamorphism corresponds to amphibolite-granulite facies conditions, with $t=780-817^{\circ}\text{C}$, $p=0.5\text{GPa}\pm$, $f_{\text{O}_2}=10^{-15.5}$, while the second, to high amphibolite facies, with $t=630-690^{\circ}\text{C}$, $p=0.4\text{GPa}\pm$, the third, to low amphibolite facies, with $t=525^{\circ}\text{C}\pm$, and the fourth, to green schist facies, with $t<400^{\circ}\text{C}$.