

草河群区域变质带及石榴石的研究

刘 光 启

(中国地质科学院沈阳地质矿产研究所)

主题词: 区域变质作用; 变质相、带; 石榴石; 辽东草河群

提 要: 辽东草河群由北向南, 可以分出比较完整的中压型巴罗式变质带、变质带的分界线或等变质度线和面基本上与地槽褶皱的构造方向一致, 显示出带型区域变质作用和复合变质作用的特点。区域变质相带的矿物共生组合、斜长石号码、岩石类型、矿物的物理化学性质都具有独自的特征。变质相带的变泥质岩石中的石榴石均属铁铝榴石, 随变质度的增高, 石榴石成分中的 Al_2O_3 、 MgO 、 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量增加, CaO 、 MnO 含量降低。

一、变质相、带

辽宁东部草河群具有典型的带状区域变质作用的特点。它反映出辽东前寒武纪地质继宽甸运动之后又发展到一个新的历史阶段。研究草河群的递增区域变质作用和其中的主要变质矿物, 才有可能认识草河群变泥质岩的带状区域变质作用。

辽东前寒武纪暖阳地槽褶皱带的草河群, 由北向南(鞍山-青城子), 可以分出比较完整的中压型巴罗式变质带: 绿泥石带、黑云母带、铁铝榴石带、十字石带、蓝晶石带和夕线石带^[1]。其中, 绿泥石带、黑云母带和铁铝榴石带属绿片岩相; 十字石带和蓝晶石带属低温角闪岩相; 夕线石带属高温角闪岩相。草河群递增区域变质带在空间上的展布(见图1)。

(一) 绿片岩相

绿片岩相在辽东地区分布较广。它包括绿泥石带、黑云母带、铁铝榴石带。考虑到绿片岩相的温度和压力变化范围较大, 不能很好地反映各变质区的不同情况, 因此, 都城秋穗(Miyashiro, 1973)^[2]等将绿片岩相进一步划分为低温绿片岩相和高温绿片岩相, 它们分别相当于绿泥石带、黑云母带和铁铝榴石带。结合本区情况, 我们将绿片岩相也划分为低温和高温绿片岩相, 它们的矿物组合列于表1。

(1) 低温绿片岩相绿泥石带 岩石类型为绿泥片岩和绿泥绢云千枚岩。矿物共生组合为绿泥石 + 绢云母 + 石英 ± 钠长石。这些变泥质岩石具清楚的条带状构造(变余水平层纹)和变余砂状、粉砂状构造, 其中粉砂状石英偶见增生变大。

(2) 低温绿片岩相黑云母带 岩石主要类型为黑云母石英片岩、二云母片岩。矿物共生组合为黑云母 + 白云母 + 石英 + 斜长石 + 绿泥石。在变复理石建造中的岩石, 其原始的沉积结构、构造, 如水平层纹、斜层纹和递变层理等保存良好。砂复理石保留着清晰的变余结构和碎屑矿物的增长边。在辽阳市的太华、太平村一带, 变质带的长轴呈北东向, 与地层界线基本一致。

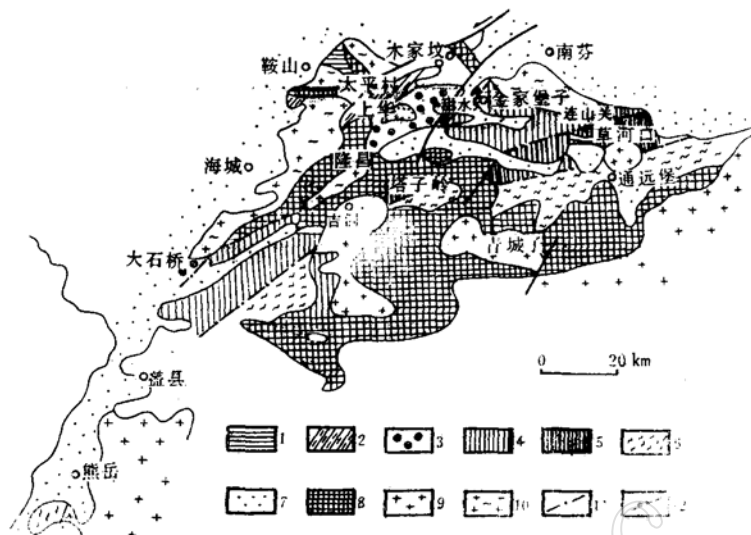


图1 辽东地区草河群前进区域变质带分带略图

Fig. 1 Sketch map showing zonation of the regional progressive metamorphic belt of Caohe Group in eastern Liaoning

1—绿泥石带；2—黑云母带；3—石榴石带；4—十字石带；5—蓝晶带石；6—夕线石带；7—上覆层的中元古界及其它时代地层；8—下伏层的鞍山群、宽甸群；9—后期花岗岩类($\gamma_2-\gamma_3^1$)；10—混合花岗岩($M\gamma_1-M\gamma_2$)；11—断层；12—变质带分界线

表1 草河群绿片岩相-角闪岩相变质矿物组合表

Table 1 Metamorphic mineral assemblage of the greenschist-amphibolite facies in Caohe Group

变质相	绿 片 岩 相			角 闪 岩 相	
	绿泥石带	黑云母带	铁铝榴石带	十字石- 蓝晶石带	夕线石带
变	石 英				
	斜长石	An=5-11	An=25-30	An=26-30	An=26-35
泥	绿泥石		---		
	白云母			---	
质	黑云母				
	铁铝榴石				
岩	十字石			---	
	蓝晶石				
	夕线石				

(3) 高温绿片岩相铁铝榴石带 该带铁铝榴石可能是绿泥石脱水反应而生成的，变质反应为绿泥石+石英→铁铝榴石+水。岩石主要类型为石榴黑云片岩、含榴二云片岩。矿物共生组合为铁铝榴石+黑云母+白云母+石英+斜长石。变复理石建造中的各种沉积结构、

构造仍保存较好,但岩石几乎全部为变晶结构。变泥质岩颗粒变粗,一般为0.5—2.5mm。

(二) 角闪岩相

角闪岩相分布辽阳市甜水乡至凤城县通远堡镇一带。由于该变质相的温度和压力条件变化范围较大,因而又划分为低温和高温角闪岩相,它们分别相当于十字石带、蓝晶石带和夕线石带。

(1) 低温角闪岩相十字石带 本带与绿泥石带的主要分界的变质反应是:绿泥石+白云母=十字石+黑云母+石英;其变质反应的条件为^[3]:

$$P_{H_2O} = 4 \times 10^8 \text{ Pa}, t = 540 \pm 15^\circ \text{C}$$

$$P_{H_2O} = 7 \times 10^8 \text{ Pa}, t = 560 \pm 25^\circ \text{C}$$

(据Hoshek 1969)

这就是说在 $(4-7) \times 10^8 \text{ Pa}$ 条件下, $t = 540^\circ \text{C} - 560^\circ \text{C}$ 是低温角闪岩相和高温绿片岩相的温度界限。本带宽15km,在辽阳市甜水乡和吉洞乡以南一带,呈长条状分布于铁铝榴石带的东侧。主要岩石类型为石榴十字黑云片岩。矿物共生组合为十字石+铁铝榴石+黑云母+石英+斜长石。原岩的结构几乎全部消灭,主要呈变晶镶嵌结构。但其中的水平层纹和斜层纹等仍可见到。

(2) 低温角闪岩相蓝晶石带 本带宽5km,在本溪县草河口镇一带,呈长条状分布于十字石带的东侧。岩石主要类型为含榴蓝晶石黑云片岩。矿物共生组合为蓝晶石+铁铝榴石+黑云母+石英+斜长石。本带岩石结构、构造同十字石带相比无大的变化。但蓝晶石不象十字石那样多,蓝晶石呈变斑状,最大的变斑晶可达2—3cm,蓝晶石常被绢云母、绿泥石、白云母等矿物所交代,有的呈孤岛状残留在后生矿物或矿物集合体中,部分完全被交代者仍保留其假象,有的边部常见有一圈白云母的镶边。在应力作用影响下,晶体常发生破裂和弯曲,并见有扭折带和波状消光。

(3) 高温角闪岩相夕线石带 本带主要分布在连山关花岗岩体的南侧及凤城县通远堡镇和大石桥镇以南,即处于暖阳地槽褶皱带的中部。岩石主要类型为夕线石榴黑云片岩。矿物共生组合为夕线石+铁铝榴石+黑云母+石英+斜长石±微斜长石。本带岩石结晶变粗,呈变晶镶嵌结构,沉积层理仍保持完好。夕线石呈柱状、豆荚状和毛发状集合体,在夕线石周围常见有一圈属于退化变质产物的绢云母镶边。

二、石榴石的研究

这里描述的13个石榴石,分别采自辽东草河群不同变质相带的变泥质岩中。

(一) 形态和物理性质

石榴石一般呈半自形,分布不均匀。显微镜下为无色透明,均质体,未见光性异常现象。折光率 $N = 1.778 - 1.823$ 。颗粒直径0.3—3.5mm。无解理,裂隙发育,偶尔见几条平行的裂纹。晶体中有不规则的粒状石英和磁铁矿包体。其中,石英包体多数呈“线状”排列,展示了原始的层理,有的石英包体呈“S”形排列,与岩石片理交角可达45—60°,表明石榴石在结晶过程中曾发生过旋转,并是同构造期结晶的。有些石榴石在退化变质作用过程中被绿泥石,绢云母所交代,但多数仍有石榴石的残晶。

(二) 化学成分与变质度的关系

13个石榴石主要化学成分列于表2。草河群的石榴石主要组分是铁铝榴石(77.89—83.88%)。

表2 石榴石单矿物主要化学成分(wt%)

Table 2 Major chemical composition of individual almandine minerals(wt%)

样品号	变质带	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	取样地点
80228	铁铝榴石带	36.6	0.26	18.8	17.5	10.8	1.22	6.22	6.28	0.26	0.10	辽阳安平乡陈家坟村
85001*		38.0	0.03	19.2	8.65	25.43	1.08	1.22	3.34	0.24	0.22	辽阳隆昌乡
81443	十字石带	37.0	0.18	19.08		34.37	1.68	3.0	4.3	0.1		辽阳甜水乡陈家街
81444		37.0	0.2	19.0		32.21	1.88	3.18	3.86	0.36	0.02	辽阳甜水乡谢家堡
81438		38.6		19.32		32.75	2.94	3.04	2.14	0.08		凤城县老堡西山
81891*		37.2	0.22	19.36		30.59	2.50	6.52	2.14	0.20		营口市英落乡金家牌坊
81909		36.4	0.52	19.48	6.23	23.04	3.16	1.82	2.24	1.56	0.18	营口市大石桥镇张官屯
81411		35.8	0.06	19.44	2.36	29.1	3.5	1.82	2.8	0.18	0.3	本溪县草河口镇
85002*		36.92	0.03	21.2	15.7	20.8	1.61	2.55	2.35		0.02	辽阳塔子岭乡
80036	夕线石带	37.2	0.14	19.76	1.19	34.56	2.04	1.44	2.7	0.14		辽阳吉洞乡南山
85003*		38.4	0.2	21.76	5.4	26.55	3.24	2.03	1.64	0.28	0.24	凤城县通远堡镇
85004*		38.6		19.8	7.0	24.8	2.1	4.76	1.76		0.10	辽阳塔子乡南山

* 电子探针的石榴石内核成分, 其它为单矿物化学全分析, 由沈阳所分析, 表中空白处为没做项目。

(1) 石榴石的含铁性($F_{\text{总}} = \text{Fe} \cdot 100 / (\text{Fe} + \text{Mg})$)是变质岩中最重要的特征指数, 其 $F_{\text{总}}$ 随变质度的增高而降低。石榴石的 $F_{\text{总}}$ 变化于90.47—86.92之间; 镁铝榴石组分含量变化于5—9.5之间; 钙铁榴石组分含量变化于1—5之间, 钙铝榴石组分含量变化于2.10—10.70之间^[4]。这说明草河群的变质作用压力波动不太大。将不同变质带的石榴石做了组分分析(见表3), 并把

表3 石榴石的端员成分含量(mol%)

Table 3 End member components of almandine

端员成分	变质带	铁铝榴石带	十字石 - 蓝晶石带					夕线石带
铁铝榴石		80.04	83.88	78.96	80.72	81.25	78.16	81.25
钙铁榴石		1.58	1.52	2.89	1.78	1.51	1.48	3.66
钙铝榴石		10.70	3.90	2.90	3.50	6.71	2.26	3.37
镁铝榴石		4.73	9.38	7.35	9.32	5.19	9.52	8.44
锰铝榴石		2.95	1.32	7.90	4.68	5.34	8.58	3.28

石榴石的端员组分投到索波列夫(Sopolev, 1964)^[5]的三角图解中可明显看到, 草河群无论哪个变质度的石榴石, 都落在角闪岩相低区内(见图2)。这 and 实际所划分的变质相是吻合的。通过主要氧化物的计算, 可以看出石榴石的成分随变质度的增加而变化。 $\text{FeO} + \text{MgO}$ 含量随变质度增高而增高, 铁铝榴石带是17.02—26.51%, 夕线石带是28.58—36.6%。 $\text{CaO} + \text{MnO}$ 含量随变质度增高而降低, 铁铝榴石带是4.56—12.50%, 夕线石带是3.63—6.52%。

(2) 对不同变质带中的石榴石X光衍射分析, 测定晶胞参数(a_0), 其结果见表4。从表中可看出石榴石的晶胞参数 a_0 值是随变质度的增大而有规律的减少, 这完全符合一般规律。 a_0 值最小的是夕线石带和十字石带, 为11.535—11.526 Å; 最大的是铁铝榴石带, 为11.580 Å。

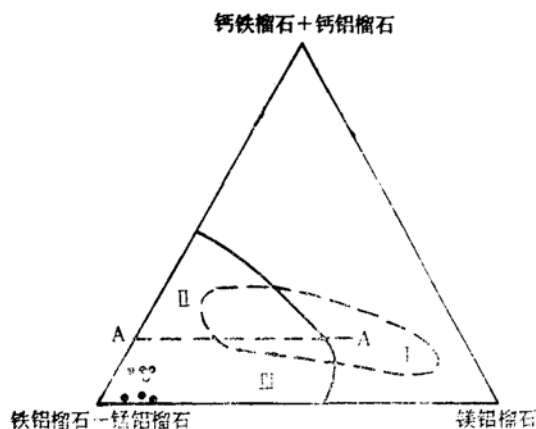


图2 石榴石端员矿物组成图解
Fig.2 End member components
of almandine

(依Sopolev, 1964)

I—榴辉岩相；II—麻粒岩相；III—一角闪岩相；
A-A线以上为高压区

表4 草河群不同变质带石榴石晶胞参数 (Å)

Table 4 Lattice parameters (a_0) of almandines from different metamorphic
zones of Caohe Group (Å)

样 品 号	80228	3636	81443	81891	81438	81432	80036
a_0	11.580	11.574	11.555	11.546	11.536	11.526	11.535
变 质 带	铁铝榴石带	蓝晶石带	十字石带	十字石带	十字石带	十字石带	夕线石带

注：由辽宁省地矿局中心实验室测试。

将所得的石榴石化学成分和晶胞参数值投影到南蒂(Nandi, 1967)的石榴石化学成分与变质度的关系图解上⁽⁴⁾。可看出石榴石的样品落的区间与实际所划分的变质相带相一致(见图3)。

(3) 不同变质带中的石榴石的主要氧化物,随变质度增高,石榴石的 Al_2O_3 、 MgO 、 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量向增高方向移动, CaO 和 MnO 含量向降低方向移动。

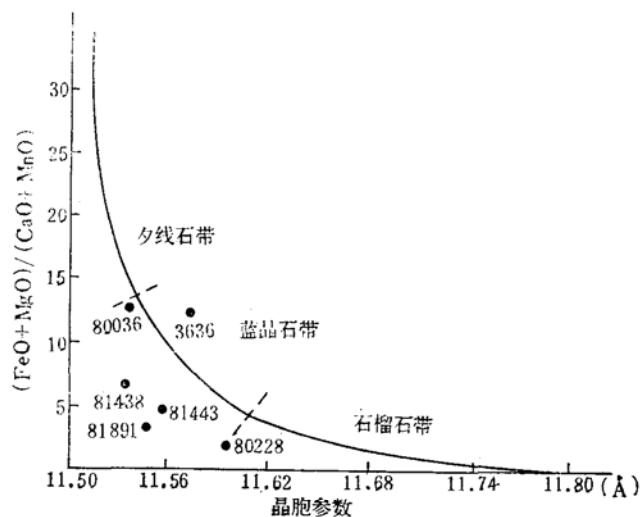


图3 变泥质岩中石榴石成分 $(\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{CaO} + \text{MnO})$ 对其晶胞参数同变质度的关系(据Nandi, 1967)

Fig.3 $(\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{CaO} + \text{MnO})$ ratios versus lattice parameters and degree
of metamorphism of almandine from metamorphosed argillaceous rocks

(三) 石榴石的环带

本区石榴石的环带构造,在铁铝榴石带和十字石-蓝晶石带最为明显,在夕线石带相对减弱至消失。这说明石榴石成分随变质作用的增强而扩散均一化了^[6]。

根据上述石榴石环带的特点,我们选择铁铝榴石带和十字石-蓝晶石带的石榴石环带做了电子探针分析,在铁铝榴石带,石榴石的外环带比内核MnO含量增大4.08%,CaO含量降低0.23%,含铁性($F_{总}$)降低2%。在十字石-蓝晶石带,石榴石的外环带比内核MnO含量增大0.76%,CaO降低1.67—1.10%,含铁性($F_{总}$)降低2%。这说明草河群中区域变质作用所形成的环带状石榴石,是在降温条件下发生的,显示出退化变质作用。

(四) 石榴石-黑云母地质温度计

在显微镜下见到铁铝榴石带、十字石带、蓝晶石带和夕线石带的石榴石和黑云母彼此平直接触,无穿切或交代现象,说明它们是平衡共生的。因此草河群中的石榴石和黑云母矿物对可以当作地质温度计。

目前实验工作能够确定,随变质度的增高,Mg从黑云母向石榴石作再分配,Mg和Fe在石榴石和黑云母间的分配系数(K_D)随变质度增高而降低。

将各变质带中与石榴石共生的黑云母做了单矿物分析(见表5)。利用石榴石和黑云母间铁、镁的分配同温度的依存关系来确定 K_D 值(见表6)。依照 K_D 值的大小来区分不同的变质带。经计算80228号石榴石和黑云母矿物对的铁、镁分配系数为7.37,反映出较低的变质作用(高温绿片岩相)。81438、81891、85002号石榴石和黑云母矿物对的铁、镁分配系数为5.89、5.90、5.63,反映出相当于低温角闪岩相的变质作用。85004号石榴石和黑云母矿物对的铁、镁分配系数为4.07,反映出相当高温角闪岩相的变质作用(见表6)。将变泥质岩

表 5 黑云母的主要化学成分 (wt%)

Table 5 Major chemical composition of individual biotite minerals (wt%)

样品号	变质带	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O*	CO ₂	F
80228	铁铝榴石带	37.2	1.94	18.08	10.71	9.44		8.16		7.46	0.12		3.91		
81438	十字石	34	1.56	20.2	0.66	18.12	0.18	9.8		9.24	0.10	0.14	5.02	0.50	1.19
81891		34.4	1.54	20.36	1.14	18.05	0.28	8.8	0.3	9.54	0.12		4.67	0.08	1.26
85002*	蓝晶石带	36.02	2.3	19.37		19.23		9.57	0.08	8.67	1.18				
85004*	夕线石带	36.69	1.47	19.88		22.07	0.03	9.0	0.04	7.91	0.28				

*电子探针分析结果,其它是单矿物全分析,由沈阳所分析,空格为未做项目。

表 6 变泥质岩共生的石榴石和黑云母矿物对的 K_D 值与温度关系

Table 6 Relationship between K_D value and temperature of almandine-biotite pair associated with metamorphosed argillaceous rocks

样品号	变质带	X_{Mg}^{Ca}	X_{Mg}^{Bi}	X_{Fe}^{Ca}	X_{Fe}^{Bi}	K_D	t(°C)
80228	铁铝榴石带	0.082	0.606	0.393	0.394	7.37	345
81438	十字石带	0.120	0.489	0.746	0.507	5.89	545
81891	十字石带	0.102	0.462	0.689	0.529	5.90	555
85002	蓝晶石带	0.110	0.420	0.880	0.580	5.63	580
85004	夕线石带	0.140	0.421	0.858	0.470	4.07	620

中的石榴石和黑云母矿物对的成分(矿物的克分子分数)投影到彼尔丘克(Л. Л. Перчук, 1970)的图解上^[7](见图4)估测出不同变质带变泥质岩形成的温度。铁铝榴石带的变质温度345℃; 十字石带的变质温度545—555℃; 蓝晶石带的变质温度580℃; 夕线石带的变质温度620℃。

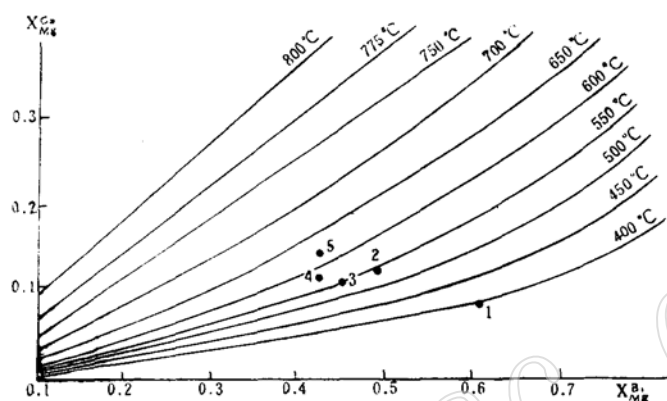


图4 变泥质岩中石榴石与黑云母共生矿物对的成分与温度间的关系

Fig.4 Relationship between composition and temperature of associated almandine-biotite pair from metamorphosed argillaceous rocks

(据Л. Л. Перчук, 1970)

注: 1—样号80228; 2—样号81438; 3—81891; 4—85002; 5—85004

三、结 论

综上所述,对草河群的区域变质带及主要变质矿物石榴石可得出如下结论:

(一) 辽宁东部的草河群的沉积变质建造,经受了草河期主幕的递增区域变质作用。由缓阳地槽褶皱带的边部向中间可分出典型的中压型巴罗式的变质带。变质带的分界线或等变质度线和面,基本上与地槽褶皱构造线的方向一致,显示出带型区域变质作用和复合变质作用的特点。

(二) 草河群区域变质相带的矿物共生组合、斜长石号码、岩石类型、矿物的物理化学性质都具有独自的特征(见表7)。同种原岩在不同的变质作用条件下,形成不同的变质矿物及矿物组合。变泥质岩在低温绿片岩相中出现绿泥石、绢云母、黑云母;高温绿片岩相出现铁铝榴石;低温角闪岩相出现十字石和蓝晶石;高温角闪岩相出现夕线石。

(三) 晚期变质作用具明显的退化变质作用的特征,具体表现为早期变质矿物被晚期变质矿物所交代;但晚期的退化变质作用比早期的前进变质作用弱得多。

(四) 本区不同变质矿物组合属递增区域变质作用产物:在区域变质作用中温度压力条件发生变化,引起矿物组合有规律地变化,而本区不同变质带的矿物组合,正反映了变质作用条件的改变。铁铝榴石带形成温度在345℃以上;当温度和压力条件升高,十字石和蓝晶石相继出现,进入低温角闪岩相,形成温度545—580℃;当温度和压力再升高,代之而出现了夕线石,进入高温角闪岩相,形成温度为620℃左右。这就是本区递增区域变质作用的变化系列。

表 7 辽东草河群递进区域变质带的区域内矿物、岩石进化表(变泥质岩)

Table 7 Evolution of minerals and rocks (metamorphosed argillaceous rocks)
in the regional progressive metamorphic belt of Caohe Group in eastern Liaoning

变 质 相		变 质 带	首次出现矿物	变泥质岩矿物共生组合	斜长石号码 ^①	主 要 岩 石 类 型
绿片岩相	低温	绿泥石带	绿 泥 石	绿泥石+绢云母+石英+钠长石	钠长石 $An=5-11$	绿泥千枚岩, 绿泥片岩
		黑云母带	黑 云 母	黑云母+白云母+石英+斜长石+绿泥石	斜长石 $An=25-30$	黑云片岩, 二云母片岩
	高温	铁铝榴石带	铁铝榴石	铁铝榴石+黑云母+石英+斜长石+白云母	斜长石 $An=26-30$	石榴黑云片岩、含榴二云片岩
角闪岩相	低温	十字石带	十 字 石	十字石+铁铝榴石+黑云母+石英+斜长石	斜长石 $An=26-35$	十字石榴黑云片岩
		蓝晶石带	蓝 晶 石	蓝晶石+铁铝榴石+黑云母+石英+斜长石	斜长石 $An=26-35$	含榴蓝晶石片岩
	高温	夕线石带	夕 线 石	夕线石+铁铝榴石+黑云母+石英+斜长石	斜长石 $An=28-40$	夕线石榴黑云片岩

① An 是笔者在费氏台上用斜长石的双晶法测得。

(五) 综合考虑草河群中矿物组合的形成温度及压力稳定在偏低的区间, 将草河群变泥质岩系形成的 $P-T$ 条件放到 Miyashiro (1972) 的相图上^[2]来表示(见图5), 其形成温度在345—620℃之间; 压力在 $(4-7) \times 10^8 \text{Pa}$ 。在 $P-T$ 相图上呈现出一个斜率较缓的区间。

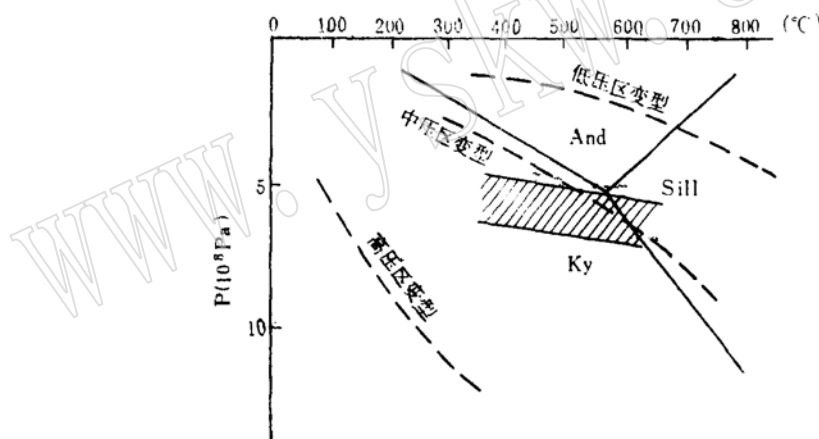


图 5 相系类型与变质反应的关系(据Miyashiro, 1972)

Fig. 5 Relationship between facies types and metamorphic reactions

注: 图中平行线排列范围为草河群区域变质范围

参 考 文 献

- [1] 姜春潮、刘光启, 1983, 辽吉东部前寒武纪草河群变复理石建造的研究. 地质论评, 第29卷, 第1期, 第9—16页。
- [2] Miyashiro, A., 1973. Metamorphism and metamorphic belts, George Allen and Unwin, London.
- [3] 白瑾主编, 1986, 五台山早前寒武纪地质. 天津科学技术出版社, 第221页。
- [4] 姜春潮等著, 1987, 辽吉东部前寒武纪地质. 辽宁科技出版社, 第265—268页。
- [5] 张儒璠、从柏林, 1983, 矿物温度计和矿物压力计. 地质出版社, 第169—170页。
- [6] 余昌涛, 1984, 辽阳-本溪区辽河群变质粘土质-半粘土质岩中的石榴石. 沈阳地矿所所刊, 第9号, 第104页。

- [7] Lyons, J.B., 1970. Mg/Fe partitioning in garnet and biotite from some granitic, pelitic and calcic rocks. *Amer. Mineral.*, vol. 55.

A Study of the Regional Metamorphic Belt and the Mineral Almandine in Caohe Group

Liu Guangqi

(Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences)

Key words: regional metamorphism; metamorphic facies and belt; almandine; Caohe group in eastern Liaoning

Abstract

A fairly complete medium-pressure Barrovian type progressive regional metamorphic belt can be recognized in the Caohe Group, which includes chlorite, biotite, almandine, staurolite, kyanite and sillimanite zones.

The regional metamorphism of the Caohe Group shows a series of special characteristics in such aspects as mineral assemblages, rock types, chemical and physical properties of minerals, which are consistent with the features of various metamorphic zones of the region.

During the regional metamorphism, the Al_2O_3 , $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ and MgO contents of almandine increased but the CaO and MnO contents decreased with the heightening of the grade of metamorphism.

Using the garnet-biotite mineral pair as a geothermometer, the author has determined the formation temperatures of the metamorphosed argillaceous rocks, the almandine zone is below 450°C , the staurolite-kyanite zone $450-600^\circ\text{C}$, and the sillimanite zone $600-620^\circ\text{C}$.