

鞍本地区鞍山群变质矿物及变质作用

翟明国

J. D. Sills B. F. Windley

(中国科学院地质研究所) (Department of Geology, University of Leicester, U.K.)

主题词: 鞍山群; 变质矿物; 温压条件

提 要: 鞍本地区鞍山群变质岩出露区可分为鞍山、辽阳、本溪三个小区。所有的变质岩均属角闪岩相, 从西向东, 变质程度递增。三个小区最先出现的特征变质矿物分别是铁铝榴石、十字石和夕线石。退化变质作用由西向东递减, 在东-西鞍山矿区已退变为绿片岩相, 在绿泥片岩中普通角闪石仅作为残留矿物出现在绿泥石的核心。鞍山小岭子矿区有紫苏辉石、红柱石和尖晶石组合, 它们是燕山期花岗岩围岩中的接触变质矿物。

综合以往的研究, 一般认为鞍山地区(樱桃园组)为绿片岩相变质; 弓长岭(大峪沟组)为角闪岩相变质, 特征矿物为十字石和蓝晶石; 本溪地区(烟龙山组和山城子组)变质程度稍高, 出现夕线石。由于在小岭子铁矿发现了紫苏辉石^①, 因此认为含铁建造属麻粒岩相变质, 层位上对应于抚顺地区的下鞍山群石榴子组^②。并有将绿片岩相的西鞍山-眼前山矿带划为元古界的意见^③。笔者等(Sills et al., 1987)认为该区含铁建造属同一层位, 变质程度均为角闪岩相, 从西到东递增, 可分为石榴石、十字石和夕线石带。退化变质从东向西增强, 鞍山地区已普遍退变为绿片岩相。小岭子铁矿受千山花岗岩接触变质作用的迭加, 紫苏辉石和红柱石等为接触变质矿物。

一、地质概况

太古界鞍山群由条带状石英磁铁矿(以下简称BIF)、斜长角闪岩、各类片岩及千枚岩组成。它被花岗片麻岩侵吞和包围, 形成一个个狭长的孤岛漂浮于花岗片麻岩海中。尽管不同矿区斜长角闪岩和沉积岩所占比例不同, 但笔者等曾经提出含铁建造属同一层位^①。为了讨论方便, 本文将该区分为鞍山、辽阳和本溪三个小区。鞍山市以南的小岭子铁矿虽然变质程度较高, 但与西鞍山-眼前山同属一个矿带。辽阳小区主要铁矿为弓长岭, 本溪小区包括歪头山、北台、南芬和棉花卜子等铁矿。

二、变质岩类型

(一) BIF

BIF中可不含或含有少量(<20%)的硅酸盐矿物。在鞍山小区, 常见的硅酸盐矿物是

- ① 徐光荣、陈洪江, 1979, 小岭子铁矿区麻粒岩的发现。
- ② 尹成俊, 1983, 鞍本地区鞍山群同位素地层年代若干问题。鞍本地区鞍山式铁矿地质论文集。
- ③ 刘如琦等, 1983, 辽宁省鞍山地区及清原一带前震旦岩群构造变形规律及其对铁铜矿床的生成与分布的控制作用的研究。

绿泥石、阳起石和镁铁闪石(铁闪石),眼前山铁矿的BIF中还发现有钙铁榴石和黑硬绿泥石。在辽阳小区和本溪小区,BIF中的硅酸盐矿物为镁铁闪石(铁闪石)和阳起石。小岭子的BIF中,还有细脉状钙铁榴石穿过石英和磁铁矿条带,或沿磁铁矿边缘分布,应为次生矿物,与眼前山钙铁榴石产状不同。

(二) 斜长角闪岩

斜长角闪岩主要由普通角闪石和更、中长石组成,可含少量石英或绿帘石。东-西鞍山的斜长角闪岩已退变为绿泥千枚(片)岩,绿泥石核心残留有角闪石,同时伴随极强烈的塑性形变。小岭子铁矿除有含单斜辉石的斜长角闪岩外,还有化学成分相同的基性麻粒岩。

(三) 片岩和千枚岩

据矿物粒度不同可分为千枚岩、细晶片岩和片岩。前二类岩石出现于鞍山小区,主要有绢云千枚岩、绿泥(石英)千枚岩、细粒二云石英片岩、阳起片岩和含铬云母的石英片岩。小岭子有少量含紫苏辉石的黑云石英片岩和紫苏黑云长石片麻岩(长石>10%),并可含石榴石、红柱石和堇青石等。辽阳和本溪主要有二云(石英)片岩,石榴二云片岩、黑云(角闪)片岩。弓长岭铁矿特征的是含十字石的石榴二云片岩,本溪未见十字石,而有含夕线石的二云片麻岩和直闪石榴石英片岩。

三、变质矿物

本文主要讨论石榴石、黑云母、角闪石、辉石、堇青石和十字石等。限于篇幅,仅将部分矿物分析数据列于表1和表2,其余可参考文献[1]。

(一) 石榴石

1. 铁铝榴石 其化学成分特点是Fe含量高,Mg含量低,Ca和Mn含量很低(表1),属FeAl-MgAl系列X(Fe)一般在0.78—0.86($X_{Fe} = Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)$)。小岭子与紫苏辉石共生的石榴石CaO含量约0.7—1.5%,MnO约1.2—3.1%。歪头山和弓长岭的石榴石的CaO和MnO含量低,但变化范围大。本文全面比较了这两个矿区数百个电子探针单矿物分析数据。图1是铁铝榴石和其他矿物的Al-Mg-Fe图解。由表1和图1可以看出,弓长岭的铁铝榴石含略高的Al和Ca,歪头山的有较高的Mg,Fe+Mn的变化不大。它们的Mg-Ca和Mg-Mn之间均为负消长,即随着Mg含量的增高,Ca和Mn则降低,说明Mg与Ca和Mn阳离子之间存在着类质同像替代,在变质温度升高时,Mg替代Ca和Mn。歪头山铁铝榴石的Mg绝对含量要高于弓长岭,Ca和Mn低于弓长岭,说明其形成温度高于后者。Ca和Mn为正消长,它们以相同的地球化学行为进入矿物晶格。这些石榴石都具有明显的成分环带。图2是2个石榴石晶体横切面元素含量变化图。Mn与Ca含量由中心到边缘逐步减少,Fe与Mg含量逐步增高,尤其是Fe的变化幅度大。可见在石榴石初始结晶时温度稍低,Mn和Ca首先进入矿物晶格,随着温度增高,Mg逐渐替代Mn和Ca。在矿物颗粒较细的二云片岩中,石榴石的Mn和Ca含量也偏高,一般与环带石榴石的中心相似。鞍山小岭子铁铝榴石晶体较大,但不具环带构造,显然是因为变质温度高,反应完全所致。

2. 钙铁榴石 粉红色钙铁榴石仅见于鞍山小岭子和眼前山BIF中,虽然它们的产状不同,但化学成分相同(表2),CaO约32—33%, $FeO + Fe_2O_3(FeO^*)$ 约27.5—30%,MgO和 Al_2O_3

表 1 部分变质矿物化学成分 (wt%)
Table 1 Chemical analyses of some metamorphic minerals (wt%)

产地	弓 长 岭					歪 头 山				北 台			小 岭 子			
样品号	85/A34					85/A124				85/A75			85/A108			
矿物	Gt (边)	Gt (中部)	Gt (核)	Bi	Stau	Gt (边)	Gt (核)	Stau	Bi	Gt	Bi	Cumm	Opx	Bi	Cord	Gt
样数	4	5	5	4	6	7	6	6	4	5	6	4	12	9	6	4
SiO ₂	38.12	37.31	37.40	35.10	28.42	36.40	38.20	27.80	31.80	37.40	34.50	51.80	47.40	34.70	47.50	37.30
TiO ₂	0	0.03	0.08	1.10	0.55	0	0	0.50	2.20	0	1.40	0	0	2.30	0	0
Al ₂ O ₃	21.04	20.91	20.76	19.0	54.11	20.70	21.50	52.60	17.30	21.20	16.60	1.80	3.40	16.60	31.80	21.10
FeO*	38.03	37.22	32.84	20.30	12.08	40.70	18.80	12.90	28.70	36.50	19.70	27.80	37.0	23.90	10.90	36.30
MnO	0.01	2.01	5.17	0	0.05	0	17.00	0.70	0	0.30	0	0	0.30	0	0	0.90
MgO	2.33	1.49	1.07	9.40	1.23	2.20	1.80	<1	4.90	4.60	11.90	14.70	11.20	8.10	6.8	3.40
CaO	1.56	2.39	3.62	0	0	0.80	2.90	0	0	0.30	0	0	0.20	0	0	1.60
Na ₂ O	0	0	0	0.60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.50	0	0
K ₂ O	0	0	0	8.40	0	0	0	0	8.10	0	8.0	0	0	8.20	0	0
ZnO	微	微	微	微	1.55	微	微	0	微	微	微	微	微	0	微	微
总量	101.09	101.36	100.94	93.90	97.99	100.80	100.20	94.50	93.00	100.30	92.10	96.10	99.50	94.30	97.00	100.60

阳 离 子 数

Si	3.025	3.000	3.013	5.422	7.840	2.960	2.965	7.841	5.222	2.987	5.430	7.841	1.910	5.450	5.009	2.989
Al	1.968	1.982	1.971	2.578	17.585	1.984	1.979	17.802	2.778	1.996	2.570	0.159	0.070	2.550	3.995	1.990
Ti	0	0.002	0.005	0.128	0.113	0	0	0.108	0.266	0	0.166	0	0	0.272	0	0
Fe	2.590	2.503	2.213	2.628	2.882	2.768	2.658	3.099	3.944	2.438	2.593	3.519	1.247	3.140	0.957	2.430
Mn	0.001	0.137	0.353	0	0.006	0	0.118	0	0	0.020	0	0	0.010	0	0	0.063
Mg	0.276	0.179	0.129	2.155	0.527	0.267	0.220	0.300	1.201	0.548	2.792	3.313	0.672	1.907	1.074	0.410
Ca	0.133	0.206	0.313	0	0	0.070	0.280	0	0	0.026	0	0	0.009	0	0	0.135
Na	0	0	0	0.172	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.163	0	0
K	0	0	0	1.662	0	0	0	0	1.694	0	1.606	0	0	1.643	0	0
Zn	0	0	0	0	0.308	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(mg 数)	9.6	6.7	5.5	45.1	15.5	8.8	7.6	8.8	25.3	18.3	51.8	48.5	35.0	37.8	52.9	14.4

注: 1. 英国Leicester大学剑桥V型电子探针; 2. FeO*—以FeO计算的全铁含量; 3. 其它矿区分析数据参阅参考文献[1]; 4. 矿物代号: Stau—十字石, Opx—紫苏辉石, Cord—堇青石, 其余同图1; 5. mg=100Mg/Mg+Fe.

表 2 小岭子和眼前山铁矿BIF中的钙铁榴石化学成分 (wt%)
Table 2 Chemical analyses of andradite in BIF ores from Xiaolingzi and Yanqianshan (wt%)

产地	样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₂	P ₂ O ₅	总 量
小 岭 子	86-1	35.474	0.056	0.453	0	30.956	0.117	0.214	33.318	0.089	0.035	0.038	0	100.771
	86-2	35.050	0	0.781	0.023	30.052	0.134	0.066	32.760	0.019	0	0	0	98.861
	86-3	34.836	0	0.665	0.005	30.262	0.380	0.110	32.498	0.290	0.087	0.036	0.051	99.22
	86-4	34.830	0.008	0.752	0	28.610	0.384	0.083	33.562	0.196	0.003	0	0	98.412
	86-5	35.214	0	0.847	0	29.378	0	0.073	32.494	0	0	0.330	0	98.039
眼 前 山	86-6	35.220	0	0.310	0	29.850	0.410	0.011	32.930	0	0	0	0	98.731
	86-7	34.461	0	0.502	0	29.453	0.320	0.130	33.25	0	0	0	0	98.116
	86-8	35.310	0	0	0	29.513	0.310	0.512	33.15	0	0	0	0	98.786
	86-9	34.920	0.006	0	0	29.350	0.311	0.532	32.97	0	0	0.021	0	98.11

注: 1. 英国Leicester大学剑桥V型电子探针; 2. FeO*—以FeO计算的全铁含量。

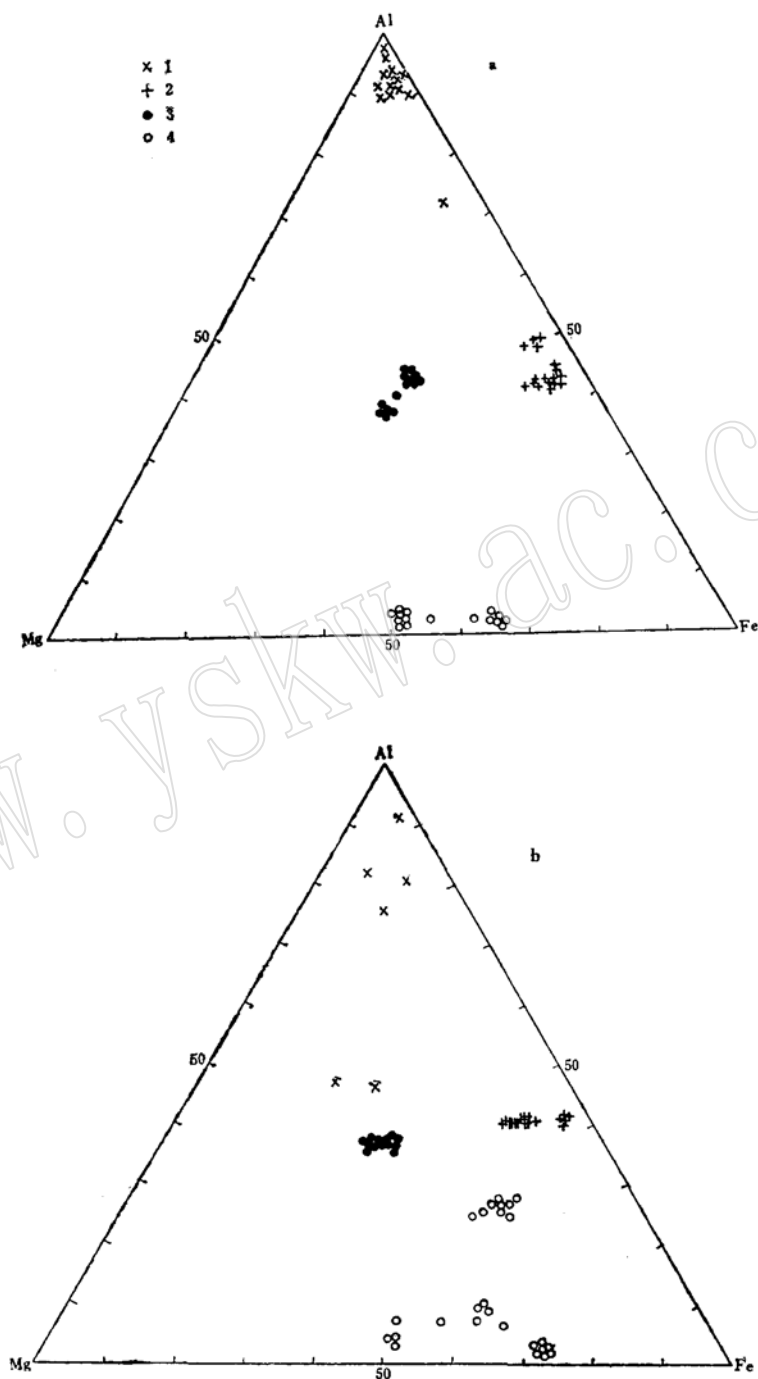


图 1 弓长岭 (a) 和歪头山 (b) 变质矿物的 Al-Mg-Fe 图解

Fig. 1 Al-Mg-Fe diagrams of metamorphic minerals from Gongchangling (a) and Waitoushan (b)

1—白云母 (Muse); 2—铁铝榴石 (Gt); 3—黑云母 (Bi); 4—镁铁闪石 (铁闪石) (Cumm(Gru))

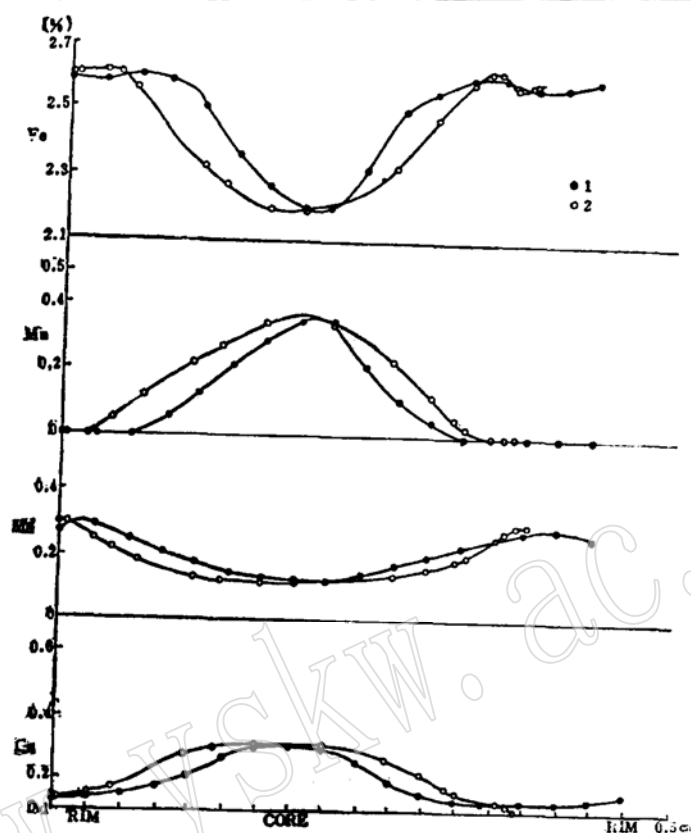


图2 铁铝榴石横切面元素含量变化图

Fig. 2 Variation in element contents along the traverse of almandine

1—(TRAVERSE) 弓长岭样品 (85/A34); 2—(TRAVERSE) 歪头山样品 (85/A79)

RIM—边; CORE—核心

均小于0.5%。小岭子的钙铁榴石是接触变质矿物，但眼前山的应属区域变质，该矿物在BIF中作为区域变质矿物在冀东也有报道^[3]，是值得引起重视的。

(二) 角闪石

1. 普通角闪石 主要存在于斜长角闪岩中，薄片下为淡黄绿色，它的 mg ($mg = 100Mg/Fe + Mg$) 为65—67，个别为58—60， CaO 含量为11.9—13.2%， Na_2O 含量多为0.8—1.5%，几乎不含 K_2O ， Al_2O_3 含量约在2—10%之间。

2. 阳起石 是变质铁矿中常见的硅酸盐矿物。在图3中可以看到三个小区BIF中的阳起石 CaO 和 Al_2O_3 含量大致相当，而 Mg/Fe 比值从西区至东区依次降低。BIF中的阳起石没有随着变质程度的升高而消失，是严格受BIF原岩成分控制的结果。

3. 镁铁闪石-铁闪石 该类闪石出现于变沉积岩(图1)和BIF中(图3)。自形矿物呈棕褐色或棕绿色。在BIF中多与阳起石共生。随变质度增高， Mg 含量递减而 Fe 含量递增。在本溪小区，镁铁闪石(Al_2O_3 1—6%)和铁闪石(Al_2O_3 12—14%)可共存，二者之间有成分间断(图3)。

(三) 黑云母

黑云母可分为原生的变质矿物和次生的蚀变矿物。原生黑云母的化学成分在一定范围内

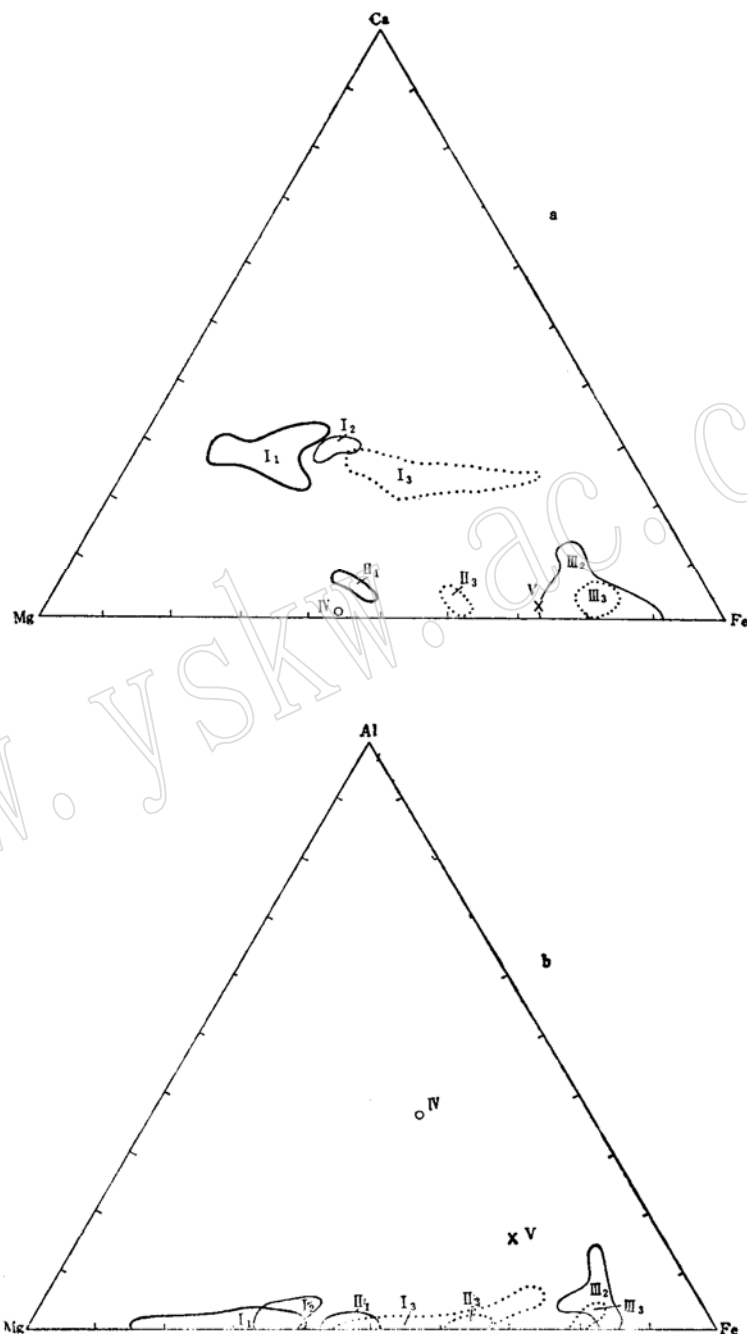


图 3 变质铁矿中硅酸盐矿物的 Ca-Mg-Fe(a)和Al-Mg-Fe(b)图解
 Fig. 3 Ca-Mg-Fe (a) and Al-Mg-Fe (b) diagrams of silicate minerals from metamorphic iron ores

粗线区—鞍山小区；细线区—辽阳小区；点线区—本溪小区

I—阳起石 (Act) (1. 2. 3分别为鞍山、辽阳、本溪小区)；II—镁铁闪石 (Cum)；III—铁闪石 (Cru)；IV—绿泥石 (Chl) (小圆圈)；V—黑硬绿泥石 (叉号)

变化, SiO_2 含量多在31—36%, Al_2O_3 在14.5—17.5%。 TiO_2 含量与变质温度有关。在变质温度稍低的鞍山地区和南芬铁矿, TiO_2 在0.1—1.1%之间, 弓长岭和歪头山约在1.2—2.5%, 而小岭子则为3.4—4.6%。 Mg 和 Fe 比值变化较大, mg 为30—65, 弓长岭某些石榴二云片岩中的云母 Mg 达80—85, 已属金云母。在图1中, 弓长岭和歪头山的黑云母分别集中于 Mg/Fe 比约为1, Al 为37—42和约36—37的地方, 弓长岭样品 Al 含量高于歪头山。而两种石榴二云片岩的原岩物质成分相似^①, 含 Al 量可能反映了变质程度的变化。

(四) 十字石和堇青石

十字石是弓长岭和老岭石榴二云片岩中的特征矿物, 短柱状半自形—自形晶, 少见双晶, 有时被细粒绿泥石和绢云母交代。 SiO_2 含量在26.6—29.8%, Al_2O_3 为51.7—55.6%, MgO 和 FeO^* 分别为1.3%和12.5%左右。

在本溪棉花卜子, 堇青石与黑云母、石英和斜长石共生。在鞍山小岭子, 和堇青石共生的有紫苏辉石、红柱石和黑云母。薄片下鉴别特征是淡浊黄色镶边和不规则浑圆状轮廓, 有时蚀变为绢云母等细粒次生矿物。堇青石平均 SiO_2 为47.5%, Al_2O_3 为31.8%, CaO 为0.17%。 FeO^* 大于 MgO , 分别为10.85%和6.83%, 铁堇青石分子占70—75%。

(五) 红柱石和夕线石

红柱石出现于小岭子矿区 BIF 的围岩与千山花岗岩的接触带中。共生矿物有紫苏辉石、尖晶石、钾长石、堇青石、局部有夕线石和石榴子石。夕线石出现于歪头山二云石英片麻岩中。红柱石和夕线石化学成分相当, SiO_2 和 Al_2O_3 含量大致相等, 不含 Mn 和其它常量元素。

(六) 紫苏辉石和尖晶石

小岭子紫苏辉石具带褐色的粉红至黄绿的明显多色性, 但化学成分正常。 SiO_2 为46.4—48.5%, Al_2O_3 为2.9—5%, $(\text{MgO} + \text{FeO})$ 为47—49%, 含少量 MnO 和 CaO , 几乎不含 TiO_2 。 $X(\text{Fe}) = [\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})]$, $X(\text{Mg}) = [\text{Mg}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})]$, $X(\text{Ca}) = [\text{Ca}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})]$, $X(\text{Mn}) = [\text{Mn}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})]$, X 分别为0.62—0.65, 0.33—0.36, 0.0044—0.0067, 0.0053—0.0088。

与紫苏辉石相伴的尖晶石薄片为绿色, 据化学成份为铁镁尖晶石中的高铁种属, Al_2O_3 平均为52.3%, FeO^* 平均为41.6%, MgO 为1.63%。

四、变质作用 P - T 条件

(一) 鞍山小区

1. 变质矿物共生组合 典型矿物组合 (图4a) 如下:

- (1) Hb (角闪石) + Pl (斜长石) \pm Q (石英); (2) Bi (黑云母) + Musc (白云母) + Q + Pl ;
- (3) Bi + Alm (铁铝榴石) + Pl ; (4) Act (阳起石) + Mt (磁铁矿) + Cumm (镁铁闪石) + Q ;
- (5) Act + Mt + Stil (黑硬绿泥石) + Q ; (6) Chl (绿泥石) + Q + Seri (绢云母) \pm Pl ;
- (7) Chl + Mt + Q \pm Bi ; (8) Chl + Mt + Q \pm Carb (碳酸盐)。

其中(1)—(5) 为典型共生组合, (6)—(8) 包括退变质矿物, 小岭子单列一节讨论。

① Zhai Mingguo, Windley, B.F. and Sills, J.D. (in press) The evolution of Anshan gneisses from the Liaoning Province, N. China. Precambrian Research.

2. 变质 $P-T$ 条件 鞍山小区已受到强烈塑性形变和退变质, 因此没有用于作矿物对温度计的理想矿物。据 BIF 组合来看, 属典型的中级变质作用⁽²⁾。据报道阳起石作为稳定矿物的温度约 450°C 。铁闪石稳定区间为 $350-650^{\circ}\text{C}$ 。在 Ca-Fe-Al-Si 角闪岩系统中, 钙铁榴石生成温度约 600°C 。眼前山钙铁榴石和阳起石及铁闪石共生。目前文献中尚缺乏钙铁榴石在区域变质作用中的生成温度, 此值仅作参考。

斜长角闪岩有时含少量石英, 而少量细粒绿帘石出现于闪石的边缘, 为次生矿物。斜长石 An 为 33—40, 基性程度稍高于和绿帘石平衡的 An_{30} 的斜长石⁽³⁾。普通角闪岩形成温度约在 $450-650^{\circ}\text{C}$ ⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

片岩的典型矿物为黑云母和铁铝榴石, 但后者数量大大少于其它小区, 并常被退变质掩盖。一般认为, 铁铝榴石必要的物质成分由绿泥石分解供给: $2(\text{Mg, Fe, Mn})_{4.5}\text{Al}_3\text{Si}_{2.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 4\text{SiO}_2 = 3(\text{Mg, Fe, Mn})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + 8\text{H}_2\text{O}$ 。在 Mt-Q-Fe (铁橄榄石) 系统中, 当压力小于 $3.5 \times 10^8 \text{Pa}$ 时, 铁铝榴石反应的临界温度为 $500-540^{\circ}\text{C}$ ⁽⁶⁾。据以上分析, 我们将该区的变质温度限定于①在变基性岩中为绿帘石消失的角闪岩相; ②在变质沉积岩中初始出现铁铝榴石而未出现十字石; ③在 BIF 中有阳起石和镁铁闪石共生。由此推测变质温度在 $450-550^{\circ}\text{C}$, 平均约 500°C 。

3. 小岭子铁矿 主要矿物组合为 (图4d)。

(1) $\text{Hb} \pm \text{Cpx}$ (单斜辉石) + Pl; (2) $\text{Bi} + \text{Gt} + \text{Pl} \pm \text{Q}$; (3) $\text{Mt} + \text{Q} + \text{Ad}$ (钙铁榴石) $\pm \text{Gru}$; (4) $\text{Opx} + \text{Cord}$ (堇青石) + And (红柱石) $\pm \text{Sill}$ (夕线石) $\pm \text{Spl}$ (尖晶石) + K-Sp (钾长石) + Bi $\pm \text{Gt}$ 。(4) 中矿物复杂, 反映了一种不平衡状态。据薄片观察, 我们选择了相邻共生的 Bi-Gt , Opx-Gt 和 Cord-Gt 矿物对温度压力计作变质 $P-T$ 计算。对于 Bi-Gt , 本文采用 Thompson⁽⁷⁾ (THOM), Ferry 和 Spear⁽⁸⁾ (F + S) 和 Hodges 和 Spear⁽⁹⁾ (H + S) 三种方法, 选用 12 组矿物对, 结果是: $t(\text{F} + \text{S}) = 750 \pm 65^{\circ}\text{C}$; $t(\text{THOM}) = 686 \pm 45^{\circ}\text{C}$; $t(\text{H} + \text{S}) = 777$

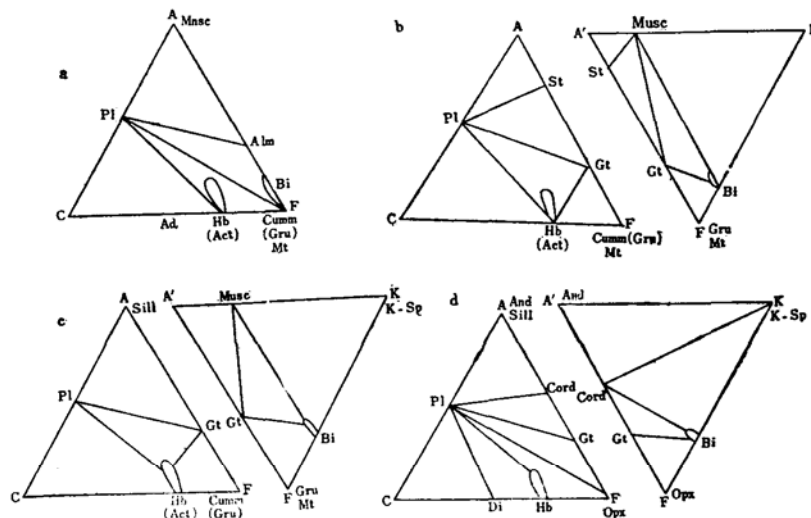


图 4 变质矿物组合 ACF 和 A'FK 图解(无过饱和 K 质矿物出现)

Fig. 4 ACF and A'FK diagrams of metamorphic mineral assemblages

a. 鞍山小区; b. 辽阳小区; c. 本溪小区; d. 小岭子铁矿

$\pm 79^\circ\text{C}$, 结果近似, 平均为 $738 \pm 63^\circ\text{C}$ 。采用Thompson的Gt-Cord温度压力计, 对8对矿物计算的平均结果是 $t = 720 \pm 40^\circ\text{C}$, $P = 2.65 \times 10^8 \text{Pa}$ 变质压力还采用了Newton和Perkins⁽¹⁰⁾(N+P)的Opx-Gt压力计, 设 t 为 600°C , 700°C 和 800°C 时, 压力分别为 $2.05 \times 10^8 \text{Pa}$, $2.57 \times 10^8 \text{Pa}$, $2.67 \times 10^8 \text{Pa}$ 。综合上述结果, 我们得到 P - T 条件为 738°C 和 $2.3 \times 10^8 \text{Pa}$ 。属高温低压的接触变质角岩系⁽³⁾。在图5中, 小岭子的 P - T 区间是由矿物反应式勾划的, 它由3.5和Sill-And分界线确定。这个区间的温度范围与计算值一致, 而压力略低, 在 $2 \times 10^8 \text{Pa}$ 以下。也同样反映了小岭子为高温低压角岩相。

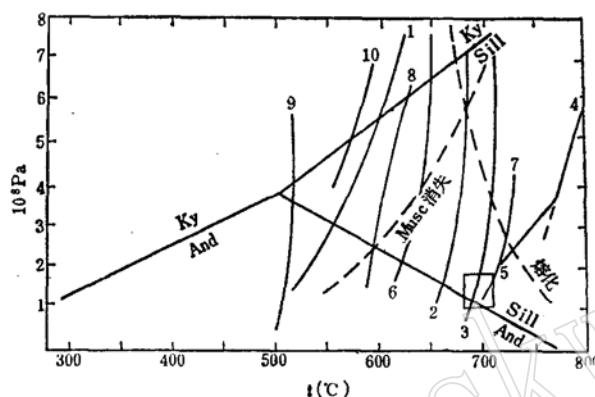


图5 鞍山群变质岩变质 P - T 图

Fig. 5 P - T diagram of Anshan-Benxi metamorphic rocks

1. $\text{Fe}-\text{Chl} = \text{Cord} + \text{Mg} + \text{Q} + \text{V}$ (Tournock, 1960);
 2. $\text{Talc}(\text{滑石}) + \text{Fe}(\text{铁橄榄石}) = \text{Anth}(\text{直闪石}) + \text{V}$ (Greenwood, 1963);
 3. $\text{Anth} + \text{Fa}(\text{铁橄榄石}) = \text{En}(\text{顽火辉石}) + \text{V}$ (Greenwood, 1971);
 4. $\text{Mg}-\text{Cord} = \text{Fo} + \text{En} + \text{Spl} + \text{V}$ (Chernosky, 1974);
 5. $\text{Mg}-\text{Chl} = \text{Fo} + \text{Spl} + \text{Corp} + \text{V}$ (Chernosky, 1974);
 6. $\text{Musc} + \text{Q} = \text{Sill} + \text{K}-\text{Sp} + \text{H}_2\text{O}$ (Perchuk, 1973);
 7. $\text{Anth} = \text{En} + \text{Q} + \text{H}_2\text{O}$ (Greenwood, 1963);
 8. Gru 和 Anth 稳定条件 (Glibert, 1982);
 9. $\text{Q} + \text{Fe}-\text{Chl} = \text{Alm} + \text{L}$ (Hsu, 1968);
 10. $3\text{Stil} + 5\text{Musc} + \text{Q} = 8\text{St}(\text{十字石}) + 5\text{Bi} + 29\text{H}_2\text{O}$ (Hoschek, 1969)
- 以上均引自 Tracy等⁽¹¹⁾, 阎月华⁽¹²⁾, 张儒媛⁽¹³⁾等。虚线为白云母消失和花岗岩熔化曲线, 方框为小岭子变质 P - T 区间

$S) = 516 \pm 12^\circ\text{C}$; $t(\text{THOM}) = 514 \pm 15^\circ\text{C}$; $t(\text{H} + \text{S}) = 533 \pm 11^\circ\text{C}$ 。推断该区 P - T 范围约是 $P = (4-7) \times 10^8 \text{Pa}$, $t = 500-550^\circ\text{C}$ 。

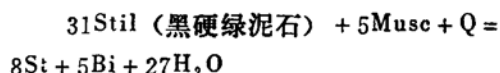
(三) 本溪小区

该区主要变质矿物共生组合(图4c)为:

- (1) $\text{Hb} + \text{Pl} \pm \text{Q}$; (2) $\text{Anth} + \text{Gru}(\text{Cumm}) + \text{Q} + \text{Gt}$; (3) $\text{Bi} + \text{Pl} + \text{Q} + \text{Gt} + \text{Musc}$; (4) $\text{Sill} + \text{K}-\text{Sp} + \text{Musc} \pm \text{Pl}$ 。以夕线石-钾长石-白云母和直闪石-镁铁闪石-石榴石共生为特征。直闪石在 $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 系统中有较宽的稳定范围, 在 $580-750^\circ\text{C}$, 压力 $> 2 \times 10^8 \text{Pa}$ 时, 随压力增高, 有小幅度的温度增高; 而在压力 $< 2 \times 10^8 \text{Pa}$ 时, 温度随压力降低有较大幅度的降低⁽⁵⁾。

(二) 辽阳小区

辽阳弓长岭铁矿的主要矿物共生组合是(图4b): (1) $\text{Hb} + \text{Pl} \pm \text{Q}$; (2) $\text{Cumm} + \text{Gt} \pm \text{Q}$; (3) $\text{Bi} + \text{Pl} + \text{Q}$; (4) $\text{Bi} + \text{Musc} + \text{Gt} + \text{Q}$; (5) $\text{St}(\text{十字石}) + \text{Gt} + \text{Musc} + \text{Bi} + \text{Q}$; (6) $\text{Cumm}(\text{Gru}) + \text{Act} + \text{Mt} + \text{Q}$, 其最大特点是有十字石。一般认为十字石出现的温度高于铁铝榴石⁽³⁾。在水流体存在时及在铁橄榄石、磁铁矿、石英缓冲剂存在时, 石英和十字石组合大致在 $530-700^\circ\text{C}$ 及 $2 \times 10^8 \text{Pa}$ 以上稳定, 如低于 $2 \times 10^8 \text{Pa}$, 含堇青石组合便代之形成⁽¹⁴⁾。可能的反应是:



该反应在 $4 \times 10^8 \text{Pa}$ 及 540°C 时发生。在水或铁橄榄石-磁铁矿-石英缓冲剂存在时, 在 $7 \times 10^8 \text{Pa}$ 及 565°C 发生⁽¹⁵⁾。

用前述 $F + S$, THOM 和 $H + S$ 三种 $\text{Bi}-\text{Gt}$ 温度计算方法对54组矿物对做的计算结果是: 假定 $P = 5 \times 10^8 \text{Pa}$, $t(F + S) = 510 \pm 51^\circ\text{C}$; $t(\text{THOM}) = 481 + 43^\circ\text{C}$; $t(H + S) = 530 \pm 67^\circ\text{C}$ 。假定 $P = 6 \times 10^8 \text{Pa}$, $t(F +$

夕线石在其他地区区域变质岩中未出现。 $\text{Musc} + \text{Q} \rightarrow \text{Sill} + \text{K-Sp} + \text{H}_2\text{O}$ 反应温度约 650°C ，但实际上夕线石生成有一个较宽的温度范围，反应也较为复杂。对44组 Bi-Gt 矿物对做的温度计算，设 $5 \times 10^8 \text{Pa}$ 时， $t(\text{F} + \text{S}) = 590 \pm 43^\circ\text{C}$ ； $t(\text{THOM}) = 620 \pm 21^\circ\text{C}$ ； $t(\text{H} + \text{S}) = 710 \pm 54^\circ\text{C}$ ，平均值为 640°C ，和图5中曲线6基本一致。

五、结 论

以上说明鞍山地区鞍山群的变质作用为角闪岩相。从西到东，变质温度递增。变质基性岩有 $\text{Hb} + \text{Pl} \pm \text{Q}$ 的共同矿物组合。变质沉积岩首次出现的典型变质矿物，在鞍山小区为铁铝榴石，辽阳小区为十字石，本溪小区为夕线石。在图5中，曲线6—9大致为该区的 P - T 范围， P 为 $(4-7) \times 10^8 \text{Pa}$ ，平均约 $5 \times 10^8 \text{Pa}$ 。曲线9—10，10—8和8—6大致为上述三个小区的 P - T 区间。小岭子铁矿的 P - T 区间不协调地位于图5的右下角（方框），矿物压力计计算的压力比该图略高，属紫苏辉石角岩相。接触变质的热源是燕山期千山花岗岩。

本研究得到赵宗溥教授的指导。全部矿物化学数据是由翟明国和 J.D. Sills 在 Leicester 大学分析的。参加野外工作的还有全贵喜、阎月华、王凯怡和郭敬辉，并得到鞍山矿山公司和地质公司的大力帮助。

参 考 文 献

- [1] Sills, J. D., 1987. Banded iron-formation in the early Precambrian of NE China. In: Iron Formation. Appel PWV and La Berge G.L (eds). Theophrastus, pp.487—511.
- [2] Klein, C., 1983. Diagenesis and metamorphism of Precambrian banded-formations. In: Iron-Formation: Facts and Problems. Trudall, A. F. and Morries, R. C.(eds). Amsterdam, pp.417—470.
- [3] Miyashiro, A., 1973. Metamorphism and Metamorphic Belts. London.
- [4] Turner, F. J., 1968. Metamorphic Petrology. McGraw-Hill Book Company. New York.
- [5] Glibert, M. C., Helz, R.T., Popp, R. K. and Spear, F. S., 1982. Experimental studies of amphibole stability. In: Amphiboles: Petrology and Experimental Phase Relations. Reviews in Mineralogy, vol. 9B, Veblen, D.R. and Ribbe, P.H.(eds). Mineralogical Society of America, pp.229—354.
- [6] Hsu, L. C., 1968. Selected phase relationships in the system Al-Mn-Fe-Si-O : a modal for garnet equilibria. J. Petrol. 9, pp.40—83.
- [7] Thompson, A. B., 1976. Mineral reactions in pelitic rocks: II. calculation of some P - T - X (Fe-Mg) phase relation. Am. J. Sci., 276, pp.425—454.
- [8] Ferry, M. and Spear, F. S., 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. Contrib. Mineral. Petrol., 66, pp.113—117.
- [9] Hodges, K.V. and Spear, F. S., 1982. Geochemistry and geobarometry and Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke. Am. Mineral., 67, pp.118—134.
- [10] Newton, R. C. and Perkins, D., 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. Am. Mineral., 67, pp.203—222.
- [11] Tracy, R. J., Robinson, P. and Wolff, R.H., 1984. Metamorphosed ultramafic rocks in the Bronson Hill anticlinorium, central Massachusetts. Am. J. Sci., 284, pp.530—558.
- [12] 阎月华, 1983. 内蒙千里山群变质矿物及变质作用 P - T 条件的研究. 岩石学研究, 第二集, 地质出版社, 第61—74页.
- [13] 张儒媛、从柏林, 1983. 矿物温度计和压力计. 地质出版社.

- [14] Richardson, S.W., 1968. Staurolite stability in a part of the system Fe-Al-Si-O-H. *J. Petrol.*, 9, pp.467—488.
- [15] Hoschek, G., 1969. The stability of staurolite and chloritoid and their significance in metamorphism of pelitic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 22, pp.208—232.

Metamorphic Minerals and Metamorphism of Anshan Group in Anshan-Benxi Area Liaoning

Zhai Mingguo

(Institute of Geology, Academia Sinica)

J. D. Sills B. F. Windley

(Department of Geology, University of Leicester, U.K.)

Key words: Anshan group; metamorphic minerals; *P-T* condition

Abstract

Anshan Archaean metamorphic complex occurs in Anshan-Benxi area that can be subdivided into three districts, i.e., Anshan, Liaoyang and Benxi. The metamorphic grade of all the rocks belongs to amphibolite facies. In general, the grade of metamorphism increases from the west to the east. The typical metamorphic minerals which firstly occur in the metamorphic rocks are respectively almandine, staurolite and sillimanite in Anshan, Liaoyang and Benxi. Nevertheless, the grade of retrogressive metamorphism with strong deformation increases from the east to the west, and the metamorphic rocks in Anshan district have become greenschist facies ones. The previous metamorphic minerals of amphibolite facies occur only as metasomatic residual minerals in chlorite and sericite. Hypersthene, andalusite and spinel have been found in metamorphic rocks at Xiaolingzi in Anshan district. The metamorphic grade of these rocks discords with other rocks in the same district. It is evident that these rocks suffered contact metamorphism after regional metamorphism of amphibolite facies.