

麻山群孔兹岩系主期 区域变质作用及演化

姜 继 圣

(长春地质学院, 长春 130026)

主题词 变质反应 $P-T-t$ 轨迹 变质演化 孔兹岩系 麻山群

提 要 麻山群孔兹岩系主期变质作用在区域上可以划分出角闪岩相和麻粒岩相两个变质带。麻粒岩相带内的岩石先后经历了由低角闪岩相—高角闪岩相—麻粒岩相的递增变质阶段。对稳定矿物共生组合及特征变质反应进行了详细研究并确定了变质作用的 $P-T-t$ 轨迹。根据麻山群变质作用 $P-T$ 条件在大规模范围内的一致性, 认为其发生于晚太古末—早元古初期的区域造山环境。

1 区域地质简介

位于我国黑龙江省东部的佳木斯地块, 新近的研究成果^①认为, 该地块是一个在晚元古末由异地的龙江地体和基本为原地的麻山地体碰撞拼合所形成的构造地体。龙江地体, 即前人所谓的“黑龙江群”, 其主体是一套经受了强烈韧性变形改造的构造岩。麻山原地体, 即前人命名的麻山群, 主要是一套以含石墨、富铝、含磷为特征, 同时夹大理岩、钙硅酸盐岩及石英片岩的孔兹岩系^② (图1)。

根据作者的工作, 麻山群孔兹岩系大致可以划分为五个岩性段(表1)。各相邻岩性段间均为连续沉积, 呈明显的渐变关系。

由于近来在麻山群岩石中已获得 2539Ma 的变质年龄^③, 故认为其主期区域变质作用发生在晚太古末至早元古初期。

2 变质作用的时空变化

麻山群孔兹岩系的主期变质作用在区域上形成麻粒岩相和角闪岩相两个变质带。

麻粒岩相带主要分布在鸡西地区的西麻山、柳毛、三道沟、滴道等地, 在勃利及林口以西也有少量出露。从区域上看, 变质带的分布不受地层的埋深控制。该带最主要的特征是紫苏辉石、富钙方柱石、硅灰石和堇青石+紫苏辉石、柱晶石+堇青石等一些高温变质矿物及组合的出现。对泥质岩石的系统研究揭示出, 该带内的岩石曾经经历了由低角闪岩相—

① 张贻侠等, 1989, 佳木斯地块北段岩金成矿条件及成矿靶区研究报告。

② 姜继圣, 1989, 麻山群变质地质及佳木斯地块的地壳演化。长春地质学院博士研究生毕业论文。

③ 黑龙江省第一区调队, 1989, 黑龙江省地质志(送审稿)。

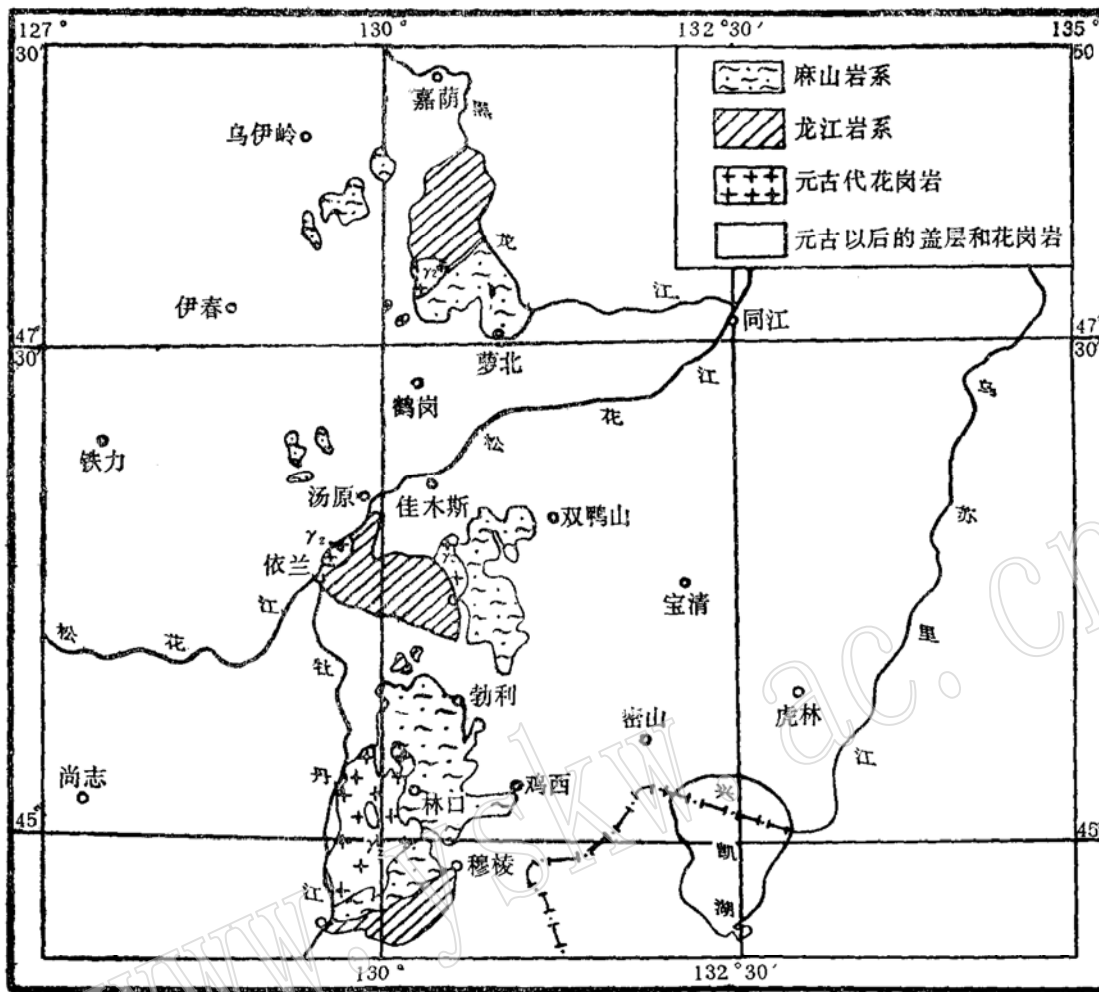


图 1 黑龙江省东部前寒武变质岩区域分布图 (据 1:200 万黑龙江省变质图缩编)

Fig.1 Regional distribution of Precambrian metamorphic rocks in eastern Heilongjiang Province

表 1 麻山群地层层序

Table 1 Strata of Mashan Group

岩性段	主要岩石组合
V 黑云变粒岩段	以黑云变粒岩为主, 夹少量斜长角闪岩及其它角闪质岩石的薄层和透镜体
VI 含磷岩段	含石墨透辉大理岩, 含磷灰石的钙硅酸盐岩, 部分地段还见有含石墨透辉石英岩
III 石墨片岩段	自下而上由以贫钙的长英质石墨片麻岩向富钙的石墨片岩类过渡, 主要岩石类型为含钒钙铝石榴石墨片岩、透辉石石墨片岩、片麻岩、夹白云 橄欖大理岩、钙硅酸盐岩
II 石英片岩—长英片麻岩段	含石墨的砂线石石英片岩、条纹长石石英片岩及长英片麻岩
I 砂线片岩段	以含石墨的石榴砂线片岩为主, 夹石榴砂线堇青片麻岩, 同时含少量含石墨石榴堇青紫苏麻粒岩及柱晶石堇青片麻岩

高角闪岩相—麻粒岩相的递增变质阶段。

角闪岩相带主要分布在鸡西地区的石场、龙山以南至吉祥、光义等地,在林口县大盘道、萝北、桦南、牡丹江以及依兰县城倭肯河桥头也有出露。该带以泥质岩石中出现含红柱石组合、并在局部见有十字石为特征。

主期区域变质作用后期,可能主要由于超变质作用的影响,麻山群遭受了以重熔为主的混合岩化作用。长英质组分高的层位和地段,混合岩化强烈,局部形成重熔的花岗质岩石。高铝的矽线片岩、堇青片麻岩及富钙的二辉麻粒岩、钙硅酸盐岩类,重熔改造现象则不明显。混合岩化的程度明显受原岩控制。

3 特征变质矿物及典型变质反应

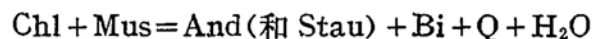
3.1 矽线石

区内的矽线石主要包括两种形态:棱柱状矽线石和纤状矽线石。前者主要赋存在高铝的矽线片岩、堇青片麻岩以及矽线石石英片岩类岩石中(一般不含黑云母或含量很少,不超过3%—6%),这些岩石又分为两类,一种类型以石英为主,不含钾长石,岩石中贫钾贫钠,碱质含量极低;另一类型中除石英外,还含一定数量的钾长石,因此表现为富钾贫钠。矽线片岩层位中,有时可见有少量含红柱石的黑云母片岩或片麻岩夹层。在有的岩石中,棱柱状矽线石和红柱石共存,但不存在反应关系。部分较富铝的石榴矽线黑云斜长片麻岩中也见有棱柱状矽线石,与黑云母、石榴石平衡共生。这些特征与我国鄂西崆岭群孔兹岩系中的情况非常相似^①。原岩恢复及对原始沉积物理想组分的计算结果表明,贫碱高铝矽线片岩类的原岩,是以高岭石粘土为主的强风化陆源碎屑沉积物;而富钾类型的原岩除含高岭石粘土外,还有相当数量的水云母。富含黑云母的片岩、片麻岩类的原岩属正常的泥质沉积物。根据野外及镜下详细的岩相学研究,并结合叶腊石、 Al_2SiO_5 多形变体相转变的有关实验结果,认为这些高铝岩石中的棱柱状矽线石是由叶腊石在低角闪岩相变质条件下直接转变而成,它们与红柱石是相同变质条件下的产物。两者的形成主要受原岩的成分控制^②。

由于矽线片岩中很少出现黑云母,故认为在低角闪岩相初始阶段前的变质反应中无黑云母生成。低级变质所形成的较富锰、铁的绿泥石与石英反应生成石榴石,反应式为



在低角闪岩相变质条件下,高铝岩石中的叶腊石分解生成矽线石,反应式为 $Pyrop = Sil + 3Q + H_2O$,而在正常的泥质沉积岩中,由绿泥石和白云母反应生成红柱石,在局部地段,同时生成十字石。反应方程式为:



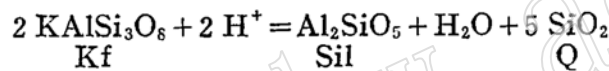
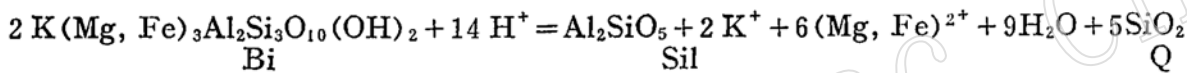
① 姜继圣, 1985, 黄陵变质地区北部崆岭群孔兹岩系变质作用和原岩建造特征, 长春地质学院硕士研究生毕业论文。

② Jiang Jisheng, 1988, The origin of prismatic sillimanite in khondalite Series. International Symposium on Metamorphism and Crustal Evolution. Changchun, China, 1988.

含钾长石的矽线片岩类, 由于其原始沉积物中有相当数量的水云母粘土, 故在进入高角闪岩相阶段后, 白云母开始分解, 变质反应为 $\text{MuS} + \text{Q} = \text{Sil} + \text{Kf} + \text{H}_2\text{O}$ 。一些钾长石颗粒中常见有针状矽线石包体, 可能是这一阶段的产物。

在之后的麻粒岩相变质过程中, 上述不同阶段形成的矽线石发生变质重结晶, 粒度变粗。石英、钾长石以及某些石榴石中的矽线石包体与岩石基质中矽线石粒度的明显差异, 反映变质重结晶作用的存在。而在矽线片岩中呈夹层的含黑云母组合中的红柱石, 则呈过稳定状态。

纤状矽线石多呈细针状、毛发状集合体, 主要赋存在含黑云母的岩石中, 与黑云母关系密切, 二者间存在明显的成因联系。有时在红柱石以及矽线片岩和堇青片麻岩类岩石中钾长石、堇青石矿物的边缘上也见有毛发状矽线石。有的切片上, 可见两种不同形态的矽线石同时并存, 棱柱状矽线石与黑云母接触平直, 而毛发状矽线石与黑云母之间存在转变关系, 反映它们分属不同的世代。结构证据说明后一类矽线石是在区域变质后期, 由于热液中 H^+ 的作用使已存矿物被交代所致, 相应的变质反应为:



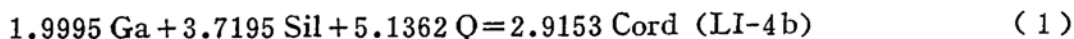
3.2 堇青石

堇青石是麻山群变泥质岩石中仅次于矽线石的另一个特征矿物, 主要呈中细粒变晶赋存在含石墨的石榴矽线堇青片麻岩中。此外, 还赋存在区内的石榴矽线柱晶石堇青片麻岩和含石墨黑云石榴堇青紫苏麻粒岩等特殊岩石类型中。与矽线片岩类相比, 堇青片麻岩类岩石具有较高的 MgO/FeO 值 (约是矽线片岩类的 2 倍)。

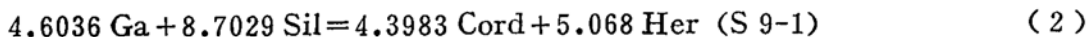
堇青石中 $\text{Mg}/\text{Mg} + \text{Fe}$ 值的变化范围为 65.30%—83.43%, 均属较富镁的堇青石类型。较之区内的其它矿物组合, 赋存在 $\text{Ga}-\text{Hy}-\text{Q}$ 组合中的堇青石 $\text{Mg}-\text{Cord}$ 端员组分最高。堇青石成分均匀, 无色, 无环带及反应边结构。

未受后期混合岩化影响的岩石, 粒度一般较细, 具典型的变晶结构; 遭受混合岩化作用影响的类型, 岩石普遍粒度较粗, 且堇青石、钾长石矿物的边缘常生长有后生的针状矽线石。结构特征表明, 堇青石形成于区域混合岩化作用之前。

对不同类型含堇青石岩石的矿物组合及结构的系统研究^①反映出, 本区的堇青石主要是石榴石、矽线石、石英的反应产物。根据典型岩石中相应矿物的化学成分, 确定其形成反应为

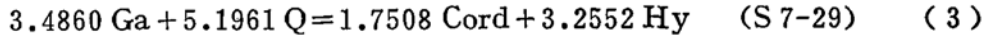


在上述反应进行过程中, 随着反应物的消耗, 在相对高铝的岩石中形成堇青石 + 尖晶石组合, 反应式为

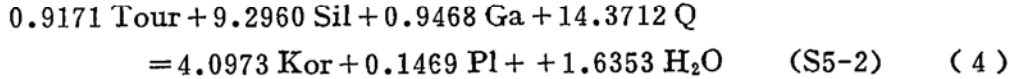


① 姜继圣, 1991, 麻山群堇青片麻岩特征及地质意义 (待发表)。

而在矽线石缺失的情况下形成堇青紫苏麻粒岩，



柱晶石堇青片麻岩在我国发现尚属首次。主要呈小透镜体赋存在麻山群底部的石榴石矽线片岩中，关系渐变。柱晶石和堇青石是组成该岩石的主要矿物，二者共生^①。结构研究认为，柱晶石的形成与电气石的分解有关，其形成反应为



与此同时，在无电气石参与的情况下， $\text{Ga} + \text{Sil} + \text{Q} \rightarrow \text{Cord}$ 。

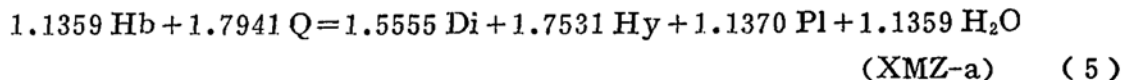
3.3 紫苏辉石

取自不同类型麻粒岩样品中的紫苏辉石以及区内的透辉石样品的成分投影见图 2。共生的紫苏辉石—透辉石矿物对用结线连接。

按照 Deer (1978) 的辉石分类，除两个样品属铁紫苏辉石 (En 50—30 Fs 50—70) 外，其余均属紫苏辉石 (En 50—70 Fs 30—50)。它们的成分组成、共存 Hy-Di 矿物对的分配系数均可与印度的 Madras、Eastern Ghats 等地相应岩石类型中的紫苏辉石对比。

紫苏辉石中 Al_2O_3 的含量，明显与原岩的性质和矿物组合有关，与堇青石共生的紫苏辉石含量最高 (3.6%)；含石榴石、黑云母组合的次之，为 1.712%—1.427%；二辉石组合中最低，为 0.734%—0.821%。泥质麻粒岩中紫苏辉石高铝的性质，与世界上许多典型麻粒岩地区如印度的 Madras、Paderu 地区^[3,4]以及阿尔丹地盾^[5]富铝岩石中紫苏辉石的特征相似。

部分由中基性侵入体变质所成的麻粒岩，有的可见有褐色角闪石呈残留存在，因此认为这些岩石中的紫苏辉石是由原侵入岩或在角闪岩相变质阶段中所形成的普通角闪石在石英参与下反应所成。变质反应为



对一些具相同成因的含石榴石紫苏麻粒岩类 (如 S 5—7)，变质反应则可能为

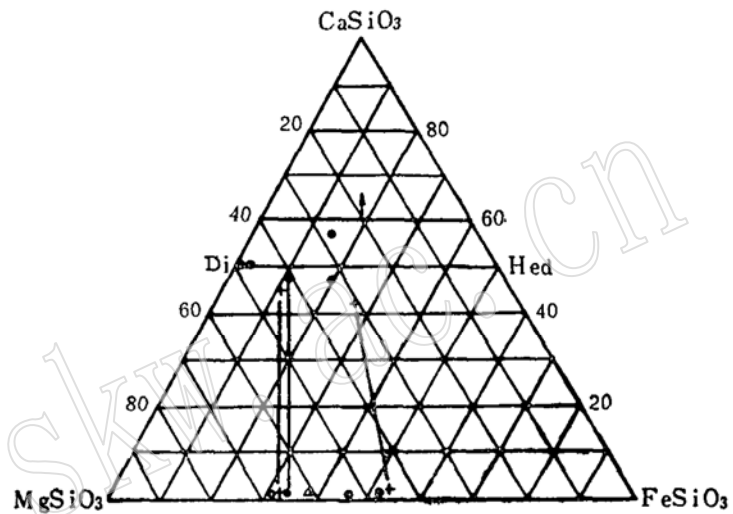


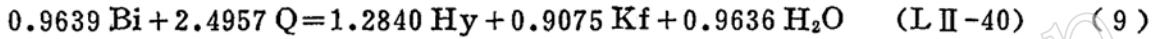
图 2 辉石类矿物的化学成分投影
Fig. 2 Plotting of Compositions for Pyroxene minerals

① 姜继圣, 关雅先, 王公庆, 范国传, 1991, 麻山群孔兹岩系柱晶石特征及成因研究 (待发表)。

副变质成因的二辉麻粒岩类具有与区内的钙硅酸盐岩、钙硅酸盐片麻岩类相同的地球化学特征。这些岩石矿物组合简单,矿物间具典型的平衡镶嵌结构。根据角闪岩相带中所出露的钙硅酸盐岩类岩石的矿物组合特征,推断它们系一些较低级变质的含铁钙镁硅酸盐矿物分解所成。如 $Act=3Hy+2Di+Q+H_2O$ (Boyd, 1959; Fyfe, 1962) (7)

或 $Hb=Hy+Di+An+H_2O$ (Johannes, 1969)。 (8)

含石墨石榴黑云紫苏麻粒岩类与含石墨石榴黑云斜长片麻岩类的地球化学特征非常接近,在剖面上有时二者相邻。这类麻粒岩中出现钾长石,矿物量统计表明,由于紫苏辉石的出现,麻粒岩类岩石中黑云母含量降低,而斜长石、石英的含量与石榴黑云斜长片麻岩大体相同。在一些具条带状构造的麻粒岩切片上,可观察到紫苏辉石和石榴石各自以一定的组合呈条带状分布。在富紫苏辉石的条带中,一般无黑云母;在含石榴石一侧,紫苏辉石变少或无紫苏辉石,而含一定数量的黑云母,我们认为在这种情况下,紫苏辉石形成于反应



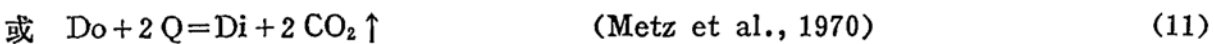
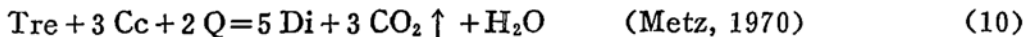
麻粒岩相带内这种宏观及微观尺度上的 $Bi+Ga$ 及 $Hy+Fel$ 的成分分带,除了受构造应力及碳质的影响之外,可能主要受变质作用过程中水的活度控制。

3.4 透辉石

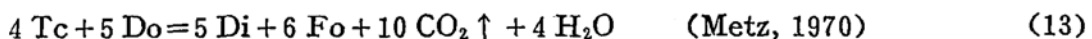
麻山群地层中,透辉石的分布远较紫苏辉石广泛。除部分存在于二辉麻粒岩中外,大量的赋存于钙硅酸盐岩及部分大理岩中。含磷层位以下,在贫钙岩石中呈夹层的麻粒岩和钙硅酸盐岩中,透辉石的钙铁辉石分子含量高, Hed 22.32—47.66, $Mg/Mg+Fe=0.52-0.78$; 矿物中 Al_2O_3 的含量也稍高,为 1.033%—1.587%。而含磷层位的透辉石,其分子组成与理想透辉石成分接近, Hed 仅占 0.18—2.25, $Mg/Mg+Fe=0.98-1.00$, Al_2O_3 含量低,为 0.610%—0.279%。

透辉石和紫苏辉石的 FeO 、 MgO 含量以及 $Mg/Mg+Fe$ 值与其赋存岩石的铁镁含量及相应比值呈良好的正线性相关关系,说明区内辉石类矿物中这些元素的分配主要受原岩成分控制。

本区钙硅酸盐类岩石的矿物组合主要为 $Di+Pl+Q$, $Di+Scap\pm Pl+Q$, 有时含少量碳酸盐矿物。结合在某些切片上所观察到的退变质现象,推测在钙硅酸盐岩中透辉石的形成反应为:



在大理岩中,相应的变质反应为:

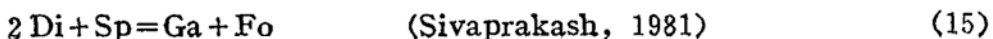


麻粒岩相带内,方柱石矿物的端员组成为 $Me_{79.16}Ma_{20.46}$, 大量富钙柱石分子的方柱石的出现,反映它们是麻粒岩相变质作用的产物^[6]。

根据区内含方柱石矿物组合的特征,认为发生了如下反应^[7]



在该阶段,大理岩中可能还发生了如下反应



前人在区内还发现有硅灰石(牡丹江第一地质调查所, 1986), 认为与方柱石所反映的温压条件相同, 同样是麻粒岩相变质作用的产物^[8]。

3.5 石榴石

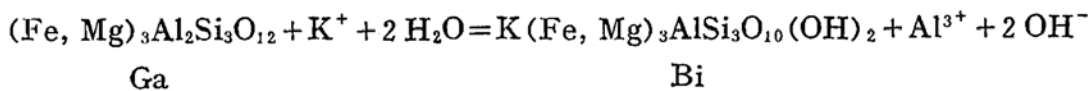
石榴石在泥质和铁镁质岩石中大量出现, 在富钙岩石和部分大理岩中也有分布。它们的成分变化范围较广, 并且主要受原岩的化学成分和变质作用的物理条件控制。成分分析结果表明, 麻粒岩相带内泥质岩石中石榴石的成分变化范围为 Alm 57.47—79.39, Spes 0.33—3.29, Pyr 18.96—36.24, Gros 0.72—8.08; 泥质麻粒岩中的石榴石为 Alm 65.70, Spes 4.41, Pyr 18.01, Gros 11.88, 仍以 Alm 分子为主, 但 Gros 分子含量增高。这些石榴石成分均匀, 无明显分带。富钙系列岩石中的石榴石, Gros 组分明显增高。石墨片岩中石榴石含 Gros (97.51), 为钙铝榴石。电子探针半定量测试结果, 该类石榴石含钒 0.1%—0.3%。区内有的石榴透辉斜长片麻岩中, 石榴石含有异常高的 Spes 分子 (29.08), 认为与该岩石含异常高的 MnO (2.4%) 有关。

角闪岩相带内石榴石的成分变化范围为 Alm 65.21—73.95, Spes 4.18—9.30, Pyr 4.36—13.81, Gros 5.04—26.04。

石榴石中 CaO、MnO、FeO、MgO 组分与其原岩中相应元素的含量均为正相关, 证明本区变质矿物中元素的分配, 原岩成分是一个最主要的控制因素。在 Alm (+Spes)—Pyr—Gros 图解上, 麻粒岩相带泥质岩中的石榴石都集中在偏向 Pyr 端员一侧, 反映它们的镁铝榴石分子偏高; 角闪岩相泥质组合中的石榴石都偏向 Alm + Spes 一侧, 锰铝榴石分子偏高。而这些岩石中 MgO 的平均含量基本相同, 在某种程度上, 可能反映了它们在变质程度上的差异 (Miyashiro, 1953)。这些特征能够反映出, 除原岩外, 变质温度是决定区内矿物成分的另一重要因素。

3.6 黑云母

麻山群中, 尤其在麻山地区孔兹岩系底部的砂线片岩层位, 黑云母含量较少。系统工作表明, 除了在有的岩石类型中, 可能主要由于水的活度的影响, 部分黑云母发生分解形成紫苏辉石外, 对区内绝大多数岩石类型, 黑云母作为一个稳定的矿物相存在。只是在区域变质作用后期, 受热液作用的影响, 部分黑云母被交代, 形成毛发状砂线石。同时很可能是由于同一事件的影响, 石榴石、紫苏辉石及钛铁矿等铁镁矿物受热液蚀变, 围绕这些矿物的边缘形成次生的黑云母。形成反应如:



显然, 上述两种交代过程代表完全不同的物化环境。前者热液中富含 H^+ , 而后者必须富 K^+ 。由此可以推断, 本区的混合岩化热液经历了由初期的酸性到末期的碱性介质条件的转变。

麻粒岩相带内的黑云母 FeO 含量偏低, MgO 偏高; 而角闪岩相带中的黑云母则与前者相反。这在一定程度上反映了变质作用对矿物成分的控制。另一方面, 区内黑云母中的 TiO_2 及 Al^{IV} 与相应岩石的 TiO_2 及 Al_2O_3 也表现出明显的正相关性, 反映出原岩对黑云母成分的控制作用。

4 变质作用的温压条件

变质作用 $P-T$ 条件的确定, 主要可以通过两种途径。一是根据区内的特征矿物组合及有关变质反应的实验资料, 大致确定变质作用不同阶段的温压范围。麻山群中, 含矽线石矿物组合广泛出露, Al_2SiO_5 多形变体中无蓝晶石, 大量堇青片麻岩的出现, 以及变质作用强度在时间、空间上的变化, 反映麻山群主期变质作用属低压型区域动力热流变质。根据世界上一些类似孔兹岩的地区如阿尔丹、拉普兰、印度、斯里兰卡以及我国集宁地区的 $T-P$ 资料 (姜继圣, 1990), 这些地区麻粒岩相变质作用的温压范围为 $700-800^\circ\text{C}$, $(5-7) \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

由上述对变质作用及变质反应的讨论可知, 麻山群低角闪岩相变质作用以石榴石、红柱石及高铝岩石中的棱柱状矽线石共生为特征, 局部露头上还见有十字石; 高角闪岩相变质以白云母分解出现矽线石 + 钾长石组合为标志, 故在 $P-T$ 图上, 低角闪岩相变质阶段的温度范围大致可以用 $Mus + Chl + Q = Stau (And) + Bi + H_2O$ 和 $Mus + Q = Sil + Kf + H_2O$ 两条反应曲线控制。麻粒岩相变质, 以紫苏辉石出现以及石榴石、矽线石和石英反应生成堇青石为特征, 故该阶段的温度范围大致可以通过 $Amp + Q = Opx + Cpx + Pl + H_2O$, $Bi + Q = Hy + Kf + H_2O$ 以及 $Ga + Sil + Q = Cord$ 的反应曲线判定。

这些反应曲线在 $P-T$ 图上的位置见图 4。

判断变质作用 $P-T$ 条件的另一个途径, 是通过矿物学工作, 利用共生矿物对进行温度、压力计算。

使用不同的共生矿物对, 对区内不同变质带所做的温压计算结果见表 2。

在麻粒岩相带内, 作者重点选择了三道沟 (样品代号 S-)、柳毛 (L-) 和西麻山 (XM-) 三处麻山群典型出露地区, 分别选用 Ga-Bi、二辉石以及 Cord-Ga 共生矿物对, 以确定麻粒岩相地区的 $P-T$ 分布。由计算结果可以看出, 除了因方法不同而对同一样品的温度计算值有些差异外, 利用同一种方法对上述三个地区中同类岩石所确定的温度都基本一致。这说明鸡西麻粒岩相变质带内变质时的温度分布在区域上是均匀的。

对五种 Bi-Ga 地质温度计的计算结果进行比较可以看出, (4) 式 (Holdaway and Lee, 1977) 计算结果稍低, (5) 式 (Hodges and Spear, 1982) 计算结果稍高, 而利用 Ferry and Spear (1978) 的理想固熔体实验式 (1) 与 Indares and Martignole (1985) 的麻粒岩非理想固熔体计算式 (2) 所得的结果非常接近, 故作者倾向于把 (1) (2) 式的计算结果作为本区麻粒岩相带利用 Ga-Bi 矿物对所确定的温度 ($800-850^\circ\text{C}$)。该温度与用二辉石温度计中的 (6) 式 (Wood and Banno, 1973) 和 (7) 式 (Nehru and Wyllie, 1974) 的计算结果接近, 故认为本区麻粒岩相变质“顶峰”的温度范围为 $800-850^\circ\text{C}$ 。

选用矽线堇青片麻岩、柱晶石堇青片麻岩及堇青紫苏麻粒岩等具不同矿物组合的五个 Cord-Ga 矿物对进行温度计算的结果, 变质温度仍为 $800^\circ\text{C} \pm$ 。与地质观察所得结论相同, 说明本区的堇青石是麻粒岩相变质条件下的产物。

角闪岩相带内样品计算的温度变化范围为 $600-700^\circ\text{C}$, 多数在 $600^\circ\text{C} \pm$, 作者选用 Ferry and Spear (1978) 地质温度计 (1) 所得大盘道地区 (D2-5) 的温度 650°C 做为

表 2 麻山群孔兹岩系温度、压力计算结果
Table 2 Temperatures and pressures calculated from khondalite series of Mashan Group

样品号	矿物对	温度 (°C)				压力 (Pa)	
麻粒岩相带							
L II-39	Bi-Ga	824 ^④	818 ^②	735 ^③	688 ^④	878 ^⑤	
S 5-5	Bi-Ga	876	858	797	712	924	
LD-16	Dy-Di	851 ^⑥	805 ^⑦	904 ^⑧	923 ^⑨		
XM 2-a	Dy-Di	890	810	891	942		
S 7-31	Dy-Di	916	817	889	950		
L II-40	Hy-Ga	693 ^⑩	771 ^⑪				
	Ga-Opx-Pl-Q						7.375 × 10 ⁸ ^⑫ 6.7546 × 10 ⁸ ^⑬ 4.831 × 10 ⁸ ^⑭ 6.541 × 10 ⁸ ^⑮
S 7-28	Hy-Ga	739	817				
S 8-15	Di-Ga	823 ^⑯	803 ^⑰				
	Ga-Cpx-Pl-Q						6.2 × 10 ⁸ ^⑱
S 9-1	Cord-Ga	788 ^⑲	739 ^⑳	815 ^㉑			4.45 × 10 ⁸ ^㉒ 4.98 × 10 ⁸ ^㉓
L I-4 b	Cord-Ga	805	769	904			4.82 × 10 ⁸ 4.68 × 10 ⁸
XM 8-4	Cord-Ga	738	692	732			3.86 × 10 ⁸ 5.01 × 10 ⁸
S 5-2	Cord-Ga	800	747	821			4.56 × 10 ⁸ 5.05 × 10 ⁸
S 7-29	Cord-Ga	899	743	858			5.40 × 10 ⁸ 6.06 × 10 ⁸
S 7-23	Ga-Pl-Al ₂ SiO ₅ -Q						[4.29 × 10 ⁸ ^㉔ 4.27 × 10 ⁸ ^㉕
S 5-5	Ga-Pl-Al ₂ SiO ₅ -Q						4.71 × 10 ⁸ 5.31 × 10 ⁸
角闪岩相带							
D 2-5	Bi-Ga	657 ^①	607 ^②	603 ^③	639 ^④		
	Ga-Pl-Al ₂ SiO ₅ -Q						6.399 × 10 ⁸ ^⑤
Y 1-5 a	Bi-Ga	690	605	601	732		
	Ga-Pl-Al ₂ SiO ₅ -Q						6.56 × 10 ⁸ ^⑥
M 10-1	Bi-Ga	583	559	571	701		
混合片麻岩							
S 11-5	Bi-Ga	764 ^⑦	735 ^⑧	712 ^⑨	669 ^⑩	822 ^⑪	
	Ga-Pl-Al ₂ SiO ₅ -Q						3.52 × 10 ⁸ ^⑫ 3.76 × 10 ⁸ ^⑬

① Ferry and Spear, 1978; ② Indares and Martignole, 1985 ③ Thompson 1976; ④ Holdaway and Lee, 1977; ⑤ Hodges and Spear, 1982; ⑥ Wood and Banno, 1973; ⑦ Nehru and Wyllie, 1974; ⑧ Lindsley et al., 1981, ⑨ Wells, 1977; ⑩ Harley, 1984; ⑪ Sen and Bhattacharya, 1984; ⑫ Perkins and Chipera, 1985; ⑬ Newton and Perkins, 1982; ⑭ Harley, 1984; ⑮ Ellis and Green, 1979; ⑯ Krogh, 1988; ⑰ Thompson, 1976; ⑱ Bhattacharya et al., 1988; ⑲ Hutcheon et al., 1974; ⑳ Hutcheon et al., 1974; ㉑ Bhattacharya, 1986 (A 式); ㉒ Ghent, 1976; ㉓ Newton and Haselton, 1981.

角闪岩相变质的温度。

麻粒岩相变质作用的“顶峰”压力,利用不同的辉石-石榴石地质压力计的计算结果都集中在(6—7) × 10⁸ Pa, 与角闪岩相带内所获得的有限的几个压力数据基本一致。说明在区域变质作用达到高峰时,麻山群孔兹岩系的变质压力也基本上是一致的。不同变质带内变质温度的明显差异反映出,除了地层埋深造成的地热增温外,区域热流分布不均匀是造成麻山群主期变质作用强度分带的主要原因。Bohlen (1987)^⑨将这种异常热梯度归之为幔

源物质的底侵作用。在区内无明显同期幔源岩浆侵入作用的情况下, 作者认为本区麻粒岩相变质作用的动因可能主要与地球早期壳幔相互作用过程中其它形式的对流有关。

作者将使用 Perkins III and Chipera (1985) 的 Ga-Opx-Pl-Q 地质压力计 (12式) 中的 PMg 式对样品 L II-40 计算所得的压力值 7.375×10^8 Pa 作为麻粒岩相变质的“顶峰”压力。而使用 Cord-Ga 压力计及在麻粒岩相带高铝岩石中使用 Ga-Pl-Al₂SiO₅-Q 压力计的计算结果表明, 该类岩石所记录的压力明显降低, 所有样品压力值集中在 $(4.5-5) \times 10^8$ Pa 范围内。由此反映出在堇青石的形成过程中, 麻粒岩相带内的变质压力明显降低。这意味着, 在麻山群主期区域变质作用麻粒岩相“顶峰”压力之后, 有一个明显的构造抬升过程。根据堇青石的形成温度与麻粒岩相变质“顶峰”温度无明显变化, 说明矽线石与石榴石分解形成堇青石的反应发生在区域构造抬升, 压力释放的初期阶段。

对麻粒岩相带内所做的唯一一个含矽线石、石榴石、黑云母的混合片麻岩样品测温的结果, 不同方法的计算值集中在 700—750℃, 压力 $(3.52-3.76) \times 10^8$ Pa。其温度、压力记录较含堇青石的矿物组合明显降低, 说明区域混合岩化发生在堇青石形成之后, 与由岩相学研究所得的结论一致。

分别对石榴矽线堇青片麻岩 (XM8-4) 及黑云石榴堇青紫苏麻粒岩 (S7-28) 的石英中的 CO₂ 包体进行测温, 得 Sil + Cord 组合中包体的均一温度为 280℃; Hy + Cord 组合中均一温度为 350℃, 计算压力为 1.7×10^8 Pa。认为该温压值反映抬升后期阶段, 区域变质作用降温过程中 CO₂ 在石英中的圈闭温度和压力, 代表主期变质作用的结束。

5 变质作用的演化及动力学过程

以上讨论可以看出, 麻山群孔兹岩系明显表现出多相变质的特点。在时间和空间上, 麻山群主期变质作用经历了低角闪岩相—高角闪岩相—麻粒岩相的递增变质阶段。

在低角闪岩相变质阶段的初期, 变质泥质岩石中的绿泥石首先与石英反应生成石榴石。继之, 在原岩为正常泥质沉积的岩石中形成红柱石、十字石, 同时在高铝的高岭石质粘土岩中由叶腊石直接分解形成矽线石, 造成本区低角闪岩相条件下红柱石和矽线石共生的典型特征。由于以后的递增变质及区域混合岩化的影响, 这些低级变质组合中的矿物成分已被改造。根据红柱石、十字石的形成反应 (Hoschek, 1969), 并参照我国鄂西地区崆岭群孔兹岩系的温度压力计算结果 (姜继圣, 1985), 推断该阶段的温压条件为 530—560℃, $(3-4) \times 10^8$ Pa。

在高角闪岩相变质阶段, 变质泥质岩中的白云母变得不稳定, 分解生成矽线石 + 钾长石。根据角闪岩相带内的测温结果, 并参照 Mus + Q = Sil + Kf + H₂O 特征反应的形成条件 (Althous et al., 1970; Day, 1973), 将麻粒岩相带内高角闪岩相阶段的温压条件确定为 600—700℃, $(4-5) \times 10^8$ Pa。

随构造埋深的增加及区域热流的进一步升高, 麻粒岩相带钙镁及铁镁系列岩石中在角闪岩相条件下形成的角闪石、透闪石等钙铁镁硅酸盐矿物变得不稳定, 形成二辉石组合。同时部分含石榴石的泥质岩石中的黑云母也变得不稳定, 分解形成紫苏辉石 + 钾长石。麻粒岩相变质作用达到高峰。“顶峰”变质温度为 800—850℃, 压力 7.4×10^8 Pa。麻粒岩相变质

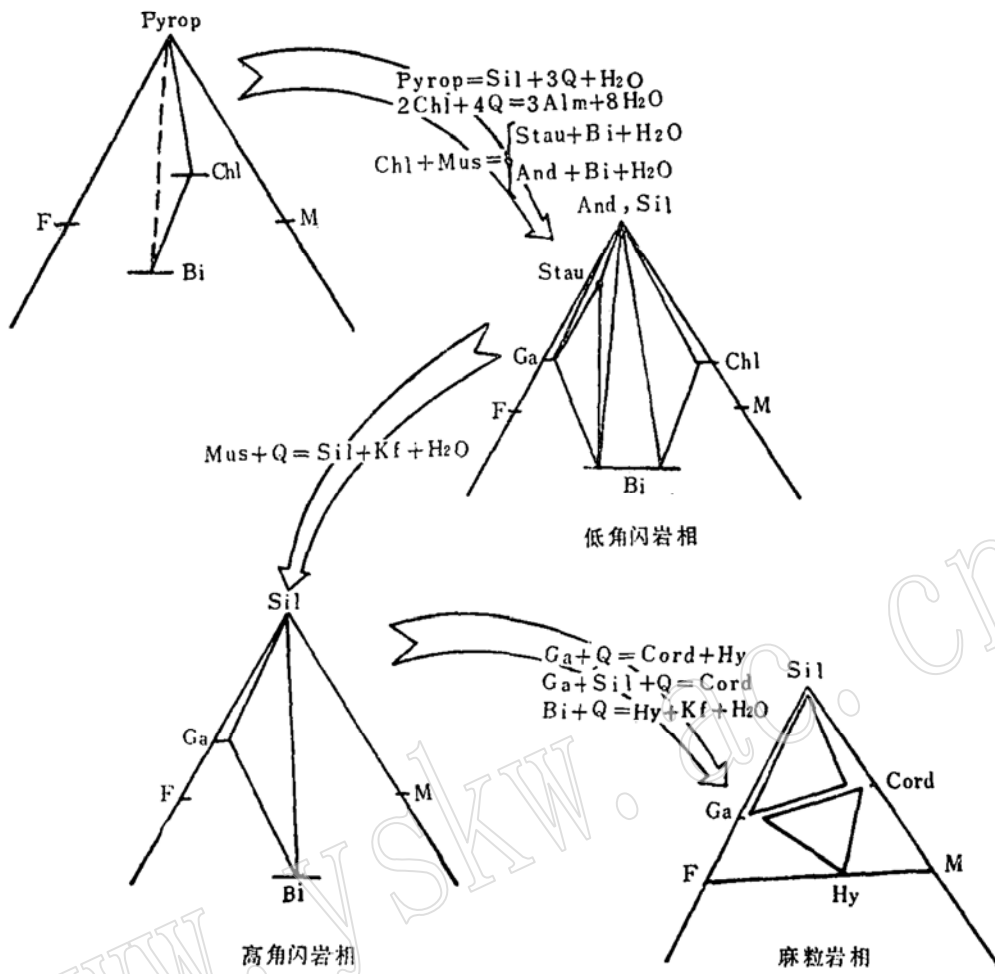


图 3 麻山群变质泥质岩石矿物组合的递增变化

Fig. 3 Prograde variations of pelitic assemblages in Mashan Group

高峰之后，由于地层的褶皱或其它作用，地壳加厚，而导致麻粒岩相区的均衡抬升。在压力释放的初期阶段，矽线石、石榴石在石英参与下反应生成堇青石。进而随反应物的消耗，各自形成铁尖晶石或紫苏辉石，同时在较富硼的岩石中形成柱晶石。该阶段的变质温度为 800℃，压力 $(4.5-5) \times 10^8$ Pa。

泥质岩石中矿物组合的递增变化及典型的变质反应可归纳如图 3。

麻粒岩相条件下，富钙岩石中则形成高温的富钙方柱石组合及大理岩中的石榴石 + 镁橄榄石组合。

主期区域变质作用后期，伴有区域性混合岩化。其发生初始阶段的温压条件为 700—750℃， $(3.5-4) \times 10^8$ Pa。受原岩影响，在麻山群下部层位主要形成以贫钠贫钙为特征，较少出现含黑云母的榴斑混合岩，而在上部则主要形成条带状黑云母混合片麻岩，局部形成重熔的花岗质岩石。同时受热液作用的影响，原变质岩中的黑云母、堇青石、钾长石局部被交代，形成属第二个世代的毛发状矽线石。混合岩化作用后期，由于热液向碱性条件转化，部分石榴石、钛铁矿及紫苏辉石发生蚀变形形成次生的黑云母。在富钙岩石中则出现葡萄石化、黝帘石化、次闪石化等退变质现象。

综上所述，麻山群麻粒岩相变质作用的演化序列可以大致划分为：(A)低角闪岩相变

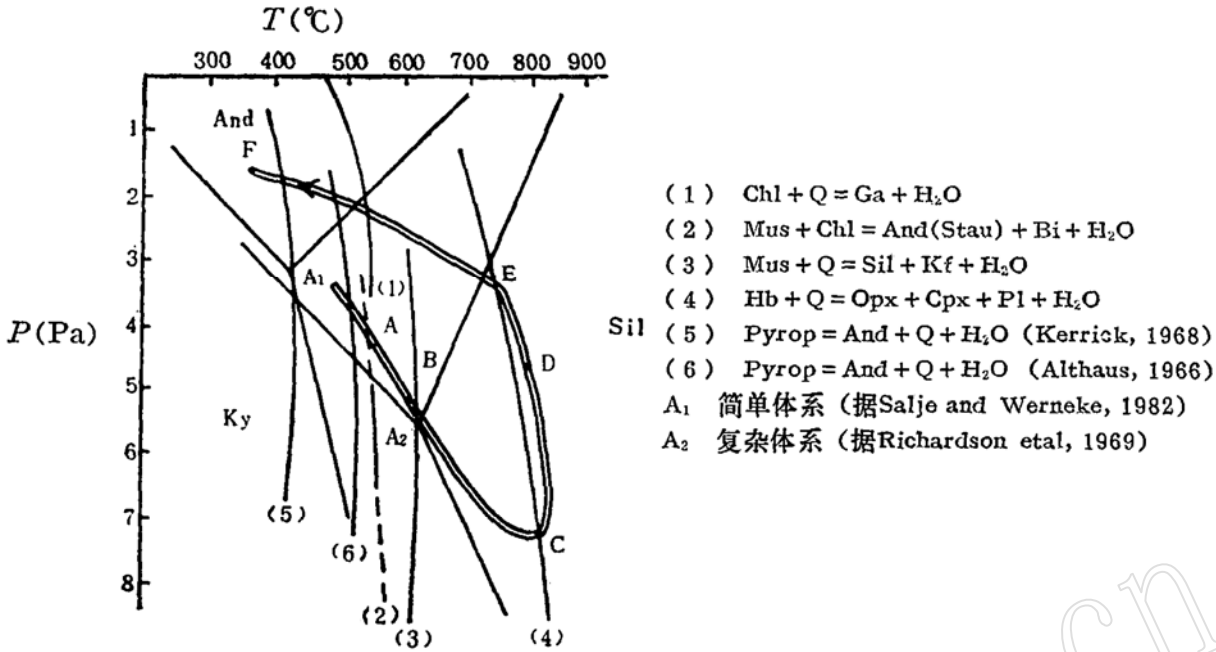


图 4 麻山群麻粒岩相变质作用的 P - T - t 轨迹

Fig. 4 P - T - t path of granulite facies metamorphism in Mashan Group

质阶段，红柱石、十字石、棱柱状矽线石形成；(B)高角闪岩相变质阶段，矽线石 + 钾长石组合形成；(C)麻粒岩相变质高峰，紫苏辉石形成；(D)构造抬升，堇青石形成；(E)区域混合岩化作用；(F)降温降压过程，富 CO_2 气液包体圈闭，主期区域变质作用结束。其 P - T - t 演化轨迹可综合于图 4。

可以看出，麻山群麻粒岩相变质作用的演化具有与典型的造山带模式相同的 P - T - t 轨迹 (England and Thompson, 1984^[10])。由低角闪岩相变质到麻粒岩相变质高峰，变质作用的温度和压力都逐渐升高，说明造山运动初期变质温度随地层埋深同时增加。但在区域上，由于热流分布不均，而造成变质作用在空间上的强度差异。麻粒岩相高峰期后到堇青石形成阶段，温度几乎不变，而压力明显降低，反映褶皱回返，地壳有一个迅速的抬升过程。并且根据麻粒岩相带在如此大的范围内所反映出来的 P - T 条件的一致性，从而判定麻山群主期变质发生于晚太古末—早元古初期的区域造山环境。

本文是作者博士研究生毕业论文的一部分。论文工作得到导师董申保教授、贺同兴教授、张贻侠教授的悉心指导，沈其韩研究员提出了宝贵修改意见，谨此致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 姜继圣. 孔兹岩系及其研究概况. 长春地质学院学报, 1990, 20(2): 167—175.
- 2 Lu Liangzhao, Jiang Jisheng. Metamorphic evolution of the khondalite series from early Proterozoic Kongling Group, Western Hubei Province. In: The High Grade Metamorphics. The Theophrastus Publications, Greece. 1991, 265—295.
- 3 Walker T L, Collins W H. Petrological study of some rocks from Hill Tracts, Vizagapatnam District, Madras Presidency. Geol. Surv. India Rec., 1907, 36:1—18.
- 4 Grew E S. Sapphirine, kornerupine and sillimanite + orthopyroxene in the charnockitic region of South India. J. Geol. Soc. India, 1982, 23:469—505.

- 5 Perchuk L L, Arapovich L Ya, Podlesski K K, Lavranteva I V, Gerasimov V Yu, Fedkin V V, Kitsul V I, Karsakov L P, Berdnikov N V. Precambrian granulites of the Aldan shield, eastern Siberia, USSR. *J. Metamorphic Geol.*, 1985, 3:265—310.
- 6 Goldsmith J R, Newton R C. Scapolite-plagioclase stability relations at high pressures and temperatures in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4$. *Am. Mineral.*, 1977, 62:1063—1081.
- 7 Sivaprakash C. Petrology of calc-silicate rocks from Koduru, Andhara Pradesh. *J. Geol. Soc. India*, 1981, 25:735—743.
- 8 Mukherjee A, Rege S M. Stability of wollastonite in the granulite facies: Some evidence from Eastern Ghats, India. *Neues Jahrb. Min. Abhdl.*, 1972, 118:23—42.
- 9 Bohlen S R. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *J. Geol.*, 1987, 95:617—632.
- 10 England P C, Thompson A B. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism 1. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust. *J. Petrol.*, 1984, 25:894—928.

Regional Metamorphism and Evolution of Mashan Khondalite Series

Jjang Jisheng

(Changchun University of Earth Sciences)

Key words: metamorphic reaction; P - T - t path; evolution of metamorphism; khondalite series; Mashan Group

Abstract

The Mashan khondalite series in eastern Heilongjing Province, China, was regionally metamorphosed during the late Archean to early Proterozoic and subsequently underwent migmatization. Two zones of progressive metamorphism are recognized: the granulite facies zone and the amphibolite zone.

Studies on their textural relation and metamorphic reaction reveal that the metamorphic rocks in the granulite facies zone have undergone three episodes of metamorphism from lower amphibolite facies to upper amphibolite facies, and finally to granulite facies.

At the stage of lower amphibolite facies, in high-aluminium and alkali-depleted rocks, pyrophyllite transferred directly into prismatic sillimanite, whereas in normal pelitic rocks, chlorite and muscovite formed during low grade metamorphism transferred into andalusite and biotite. The P - T conditions of the stage are inferred to be 530—560°C, $(3-4) \times 10^8$ Pa.

At the stage of upper amphibolite facies, muscovite in high-potassium metapelites was converted into sillimanite and potash feldspar in the presence

of quartz. The P - T conditions of this stage are $600\text{--}700^\circ\text{C}$, $(4\text{--}5) \times 10^8\text{Pa}$.

The granulite facies metamorphism is marked by the appearance of hypersthene of metamorphic origin in mafic rocks and some of pelitic rocks. The "peak" metamorphic temperature and pressure of this stage are $800\text{--}850^\circ\text{C}$, and $7.4 \times 10^8\text{Pa}$ respectively.

After the granulite facies metamorphism, with the crustal thickening caused by the folding or thrusting during regional metamorphism, isostatic uplift of the crust resulted in the formation of cordierite from the continuous reaction of sillimanite + garnet + quartz. P - T conditions of the stage are calculated at 800°C , and $(4.5\text{--}5) \times 10^8\text{Pa}$.

The temperature and pressure of migmatization stage determined by Bi-Ga and Ga-Pl-Sil-Q pairs are $700\text{--}750^\circ\text{C}$, and $(3.5\text{--}4) \times 10^8\text{Pa}$ respectively.

Mineral assemblages and metamorphic reactions of other rock series at different stages are also discussed.

On the basis of the above discussion, a possible P - T - t path of the Mashan khondalite series in the regional metamorphism is given in this paper.

The similarity of the P - T - t path of metamorphism of the Mashan Group to that of typical orogenic belts and its uniform P - T conditions on a large scale suggest that the metamorphism of the Mashan khondalite series occurred in a regional orogenic background.