

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

# 内蒙古中部早元古代造山事件中 麻粒岩相低压变质作用

刘喜山 金 巍 李树勋

(长春地质学院)



内蒙古中部早元古代麻粒岩相低压变质地壳,根据富铝片麻岩中的长石种类和岩石组合,可划分为南北2个带、6个岩石组合。它们代表着不同的变质层状岩系序列及其所经历的变质作用的温度、压力条件和构造背景。矿物的包裹结构和反应边组构,记录了高温低压矿物组合取代了中温高压矿物组合:石榴子石+石英→紫苏辉石+斜长石,蓝晶石→矽线石及石榴子石+蓝晶石/矽线石+石英→堇青石。岩石的变形组构、矿物组合的转变关系和变质作用的 *PT* 轨迹表明:本区与变质作用同期的高温正滑韧性剪切作用,是麻粒岩相低压变质地壳形成的主要原因。由中温高压变质环境转入高温低压变质环境是造山事件中推覆作用与拉伸作用联合作用的结果。

**关键词** 早元古代 矿物组合转变 推覆作用 拉伸作用 造山事件

## 1 前言

以变质相为主题所进行的研究,在确定麻粒岩组合形成于下部地壳环境方面,提供了可靠的证据和结论。然而在解释麻粒岩相变质作用发生及演化的构造环境时,所得出的结论并不令人满意。尽管麻粒岩组合形成于高温( $>700^{\circ}\text{C}$ )环境以及具有“面型”变质作用特点,但相邻的麻粒岩地块之间的压力条件,或者同一块麻粒岩标本中矿物组合的替代关系所揭示的压力条件,却相差很大(其差值可达  $0.5\text{—}0.7\text{GPa}$ )。这表明它们是在地壳发展的不同阶段和构造环境下形成的,这种现象应从构造上加以解释和论证。

我们的资料证实了在华北陆台北部麻粒岩相带的中-西部地段,存在着中一晚太古代麻粒岩相高压变质地壳和早元古代麻粒岩相低压变质地壳。它们不仅在原始沉积环境、变质岩-深成岩组合、构造样式和同位素年龄等方面存在着明显的差异,而且变质作用的 *PT* 轨迹和所代表的变质动力学特征,也有根本的不同<sup>1,2)</sup>。以往的研究多集中于研究变质作用温度、年龄和变质地层层序的归属,而对麻粒岩相低压变质作用并没有给予充分的

国家自然科学基金资助项目。

- 1) 金巍. 华北陆台北缘(中段)早前寒武纪地质演化和变质动力学研究. 博士学位论文, 1989. 117—121页.
  - 2) 刘喜山、金巍、李树勋. 华北陆台两种类型高级变质作用和构造作用的演化——以内蒙古-宁夏为例. 第15届国际矿物学大会论文摘要, 1990, 2: 873—875.
- 本文于1991年5月收到,1992年2月改回.郝粹国编辑.

注意。本文从地质特征,变质岩-深成岩组合、高温韧性剪切带特征,变形-变晶作用关系,及结合反应边矿物组构和变质作用  $PT$  轨迹的特征等方面,论述研究区早元古代麻粒岩相低压变质地壳的结构、构造样式和变质作用的构造环境。研究的结果表明,本区早元古代麻粒岩相低压变质地壳是大陆板块内部陆-陆碰撞作用与拉伸作用的产物,代表造山带变质作用的深部核心部位。岩石中变质反应结构特点,是普遍发育有高温低压矿物组合取代早期阶段形成的中温高压矿物组合。高温韧性剪切作用也出现在这种矿物组合转变的阶段。这清楚地表明本区麻粒岩相低压变质作用发生在地壳的构造加厚之后,重力均衡作用使增厚的地壳隆起并遭受侵蚀减薄的过程中。这与加拿大不列颠哥伦比亚省海岸中央片麻岩杂岩体的演化过程相似<sup>[4]</sup>。所不同的是本区地壳减薄作用起因于变质作用同期的高温正滑韧性剪切作用。笔者认为本区由中温高压变质环境转入高温低压变质环境,是构造推覆加厚和拉伸减薄联合作用的结果。

## 2 地质特征

内蒙古中部麻粒岩相变质地壳由两个不同的岩性-构造单元组成,即太古宙岩性-构造单元和早元古代岩性-构造单元(图 1)。在大青山地区,两个岩性-构造单元之间以近东西向展布的韧性剪切带为界。该带内角闪糜棱片岩中锆石的  $U-Pb$  年龄为  $2045Ma$ <sup>[2]</sup>。同时在该带北侧的太古宙石榴辉石麻粒岩组合中出现有与该带近平行分布,狭窄的角闪岩相级退变质带。

太古宙岩性-构造单元主要分布在内蒙古武川至固阳地区及山西大同地区,此外在包头市东部也有出露。该岩性-构造单元中变质表壳岩有石榴辉石麻粒岩、条带状贫铁矿及石榴石英岩等。它们呈大小不等的包体产出在紫苏花岗岩系中(含有石榴子石)。岩石的片麻理、成分条带和褶皱构造的轴面,走向均为近南北向。英云闪长岩-奥长花岗岩系明显侵入到石榴辉石麻粒岩和紫苏花岗岩中以及固阳西部的绿岩带中<sup>[3]</sup>。同时该岩系遭受到角闪岩相级变形-变质作用改造,形成以北西走向为主的片麻理构造。该岩系中锆石  $U-Pb$  年龄为  $2455Ma$ <sup>[3]</sup>。这标志着本区太古宙变质作用旋回的结束。

早元古代岩性-构造单元构成乌拉山-大青山山脉及蛮汉山主体。该岩性-构造单元主要由变质层状岩系、糜棱岩系和同构造期钾长花岗岩系组成。变质层状岩系的成分条带、片麻理和糜棱岩的叶理的走向以及钾长花岗岩体的长轴方向,在大青山地区为近东西向,与山脉走向一致。在蛮汉山地区则转为北东向。构造样式以大型平卧褶皱和变质作用同期高温韧性剪切变形变质带(以下用  $DDMZ$ )为主,构成东西向巨型构造杂岩带。值得指出的是,笔者在大青山南北两侧的部分地段,在早元古代变质岩系中发现了镶有太古宙麻粒岩、紫苏花岗岩的岩片或岩块。如在忽鸡沟以南,包头至固阳公路的西侧,便可看到在早元古代富铝片麻岩系之间镶有太古宙麻粒岩的残片。两者之间发育有高温变晶糜棱岩。在平面上这些残片呈透镜状,在剖面上则出现“夹层”状的假象。在麻粒岩的残片中,可找到暗色麻粒岩的条带、岩石的片麻理被东西走向的剪切叶理置换的残余(图 2.a)。根据包络面恢复的结果表明,成分条带及片麻理原来的走向为近南北向,以中等角度( $30-50^\circ$ )向西倾斜。如图 2.a 所示其走向与东西走向的剪切叶理近直交。这种构造置换现象在包头市东部的太古宙麻粒岩中更为常见。有必要指出的是,这种构造置换作用仅

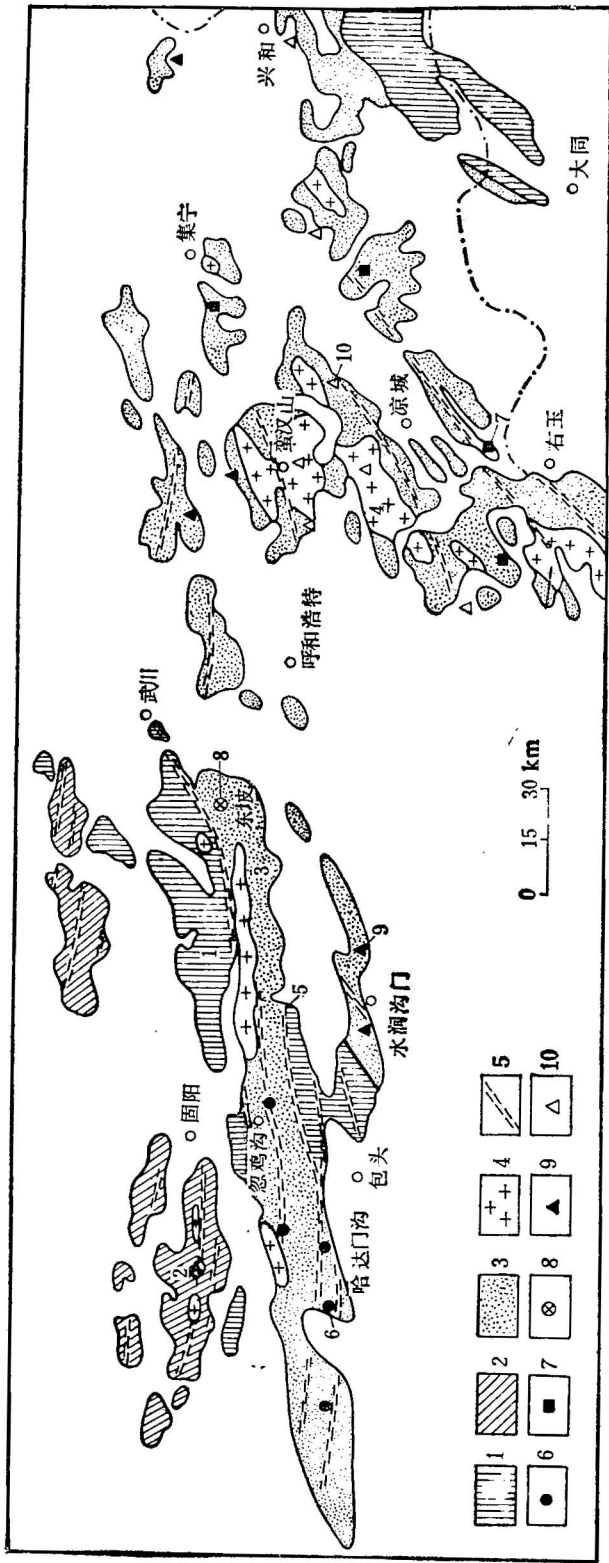


图1 内蒙古中部早前寒武纪变质岩分布略图

Fig. 1 Sketch map of early precambrian metamorphic rocks in Inner Mongolia

1. 太古宙石榴辉石麻粒岩-紫苏花岗岩-TTG 岩系, 2. 太古宙花岗岩-绿岩带, 3. 早元古代富铝片麻岩-大理岩-薄层辉石麻粒岩, 4. 早元古代钾长花闪岩, 5. 韧性剪切带, 6. 砂线石榴蓝青黑云斜长片麻岩, 7. 砂线石榴蓝青黑云斜长片麻岩, 8. 砂线石榴假蓝宝石黑云斜长片麻岩, 9. 砂线石榴黑云斜长(二长)片麻岩, 10. 砂线石榴黑云钾长片麻岩
1. Archean garnet-pyroxene granulite-charnockite-TTG, 2. Archean granite-greenstone belt, 3. Early Proterozoic aluminous gneiss-marble-thin layered pyroxene granulite, 4. Early Proterozoic potash-feldspar granite, 5. Ductile shear zone, 6. Sillimanite-garnet-cordierite-biotite-plagioclase gneiss, 7. Sillimanite-garnet-cordierite-potash feldspar gneiss, 8. Sillimanite garnet-sapphirine-biotite-plagioclase gneiss, 9. Sillimanite-garnet-biotite-plagioclase (two-feldspar) gneiss, 10. Sillimanite-garnet-biotite-potash feldspar gneiss

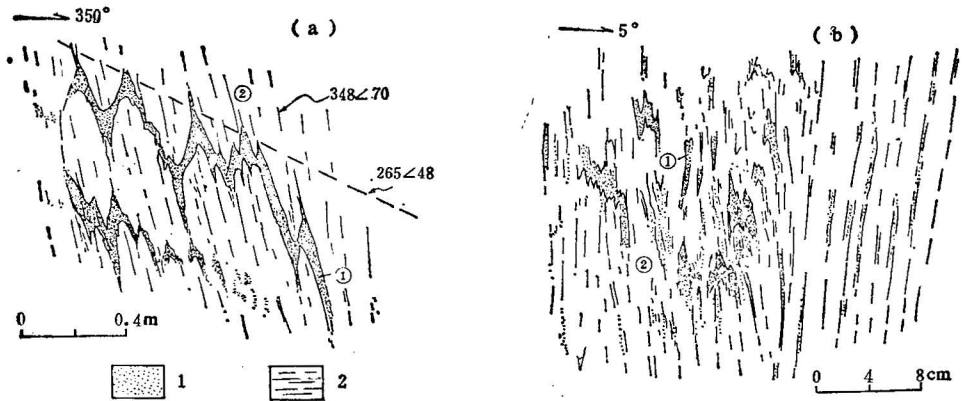


图 2 太古宙麻粒岩残片中成分条带被东西向叶理置换关系(根据照片素描)  
 Fig. 2 Relation of N-S foliated Archean dark granulite replaced by E-W Early Proterozoic foliation

包头至忽鸡沟公路西侧,图 a 与 b 之间距离约 500m

1.暗色麻粒岩 2.浅色麻粒岩(详见正文)

To the west of the Bao-Gu Highway; the distance from a to b is about 500m

1.dark granulite; 2.leucogranulite

在麻粒岩岩块中发育,而在富铝片麻岩中至今尚未发现。在靠近高温的 DDMZ 处,由于剪切叶理进一步置换,使残片中暗色麻粒岩的成分条带基本上消失(图 2. b 中间位置所示),呈残影状细粒集合体分布在糜棱岩化浅色麻粒岩中。以至于被改造为细粒条痕状紫苏辉石糜棱岩(图 2. b 的右侧)。

在 DDMZ 内,含紫苏辉石糜棱岩中,旋转的紫苏辉石残斑呈蝌蚪状镶在韧性变晶的基质中。基质中的紫苏辉石为细粒,呈链条状定向分布,构成剪切叶理构造。在矽线石榴变晶糜棱岩中,铁铝石榴石及条纹长石或斜长石等呈“J”型变斑晶,两端具有明显的压力影。在基质中,由定向生长的矽线石、黑云母组成的生长线理及剪切叶理清楚。剪切叶理的走向与富铝片麻岩的片麻理走向基本一致,但部分地段的倾角存在有一定角度。根据拉伸线理、旋转残斑及岩块,可以判断在忽鸡沟北侧的 DDMZ,其上盘具有从北向南高角度推覆性质。而在水涧沟门北侧富铝片麻岩中的 DDMZ,则具有从北向南正滑剪切的特点(图 3. a 和 b)。两者都由早元古代深部地壳剪切变形作用所形成。从局部的交切关系和基质矿物组合所代表的温度、压力环境来比较,正滑剪切作用比俯冲剪切作用不仅发生的部位浅,而且发育的时间也要晚些。

### 3 岩石组合及分布

早元古代变质层状岩系主要由片麻岩、大理岩、石英岩及薄层状辉石麻粒岩组成。片麻岩包括矽线石榴堇青黑云斜长(或钾长)片麻岩、矽线石榴黑云斜长(或钾长)片麻岩和矽线石榴假蓝宝石黑云斜长片麻岩等富铝片麻岩,石榴黑云斜片麻岩、细粒石榴二长片麻岩和角闪(或黑云)斜长片麻岩。大理岩类包括橄榄透辉大理岩、橄榄尖晶金云母大理、钾

长透辉金云母大理岩及方解石榴透辉斜长片麻岩。片麻状透辉石英岩、长石石英岩、石英岩及薄层二辉麻粒岩、黑云紫苏麻粒岩(常含少量条纹长石)及含辉石石榴斜长角闪岩。根据阎月华(1981)<sup>[4]</sup>、沈其韩等(1987)<sup>[5]</sup>的同位素年龄资料,变质层状岩系的年龄值在1958—1821Ma之间。在富铝片麻岩中常含有石墨,局部富集成石墨矿(兴和和庙沟等石墨矿)。总的特征以富铝片麻岩为主,夹有大理岩、石英岩及薄层麻粒岩。原岩为一套形成在相对稳定的浅水陆棚环境下的砂质碎屑岩和不纯碳酸盐岩。对于其中出现的薄层麻粒岩及含辉石石榴斜长角闪岩,除一部分为层状侵入体外,其岩石组合、矿物组合和地质产状特征表明,原岩相当于成熟度很低的杂砂岩,是否有中-酸性火山岩存在,尚不清楚。

上述岩石类型的组合,在空间分布上具有一定的规律性。首先根据富铝片麻岩中长石种类及相对含量,其组合在空间分布上大致可分为南北2带:北带富铝片麻岩中,以酸性斜长石为主,不含或含少量的钾长石,主要分布在千里山、贺兰山北段及乌拉山-大青山地区。南带以条纹长石(有时含有反条纹长石)为主,主要分布在蛮汉山、右玉、凉城和集宁一带(图1)。这反映两个带的碎屑岩中碎屑成分、粘土矿物成分和含量上的差别。两个带之间在西部为黄土覆盖,在东部以蛮汉山“S”型花岗岩为界。在该岩体南北两侧出现有过渡类型,即石榴二长片麻岩。根据富铝片麻岩中的特征矿物或者组合以及与其它层状岩石的组合特点,可划分为以下6个组合。各自具有一定的空间分布范围,规律性明显,代表着区域性特点(图1)。

**3.1 矽线石榴堇青黑云斜长片麻岩(含有蓝晶石残晶)-大理岩组合:** 分布在哈达门沟内石棉厂至忽鸡沟一带,呈近东西向带状产出,处在两条DDMZ之间。沿走向大理岩出露宽度变化极大,从3000多米变为数十米,以致于断续出露呈透镜状,与片麻岩之间为构造接触。

**3.2 矽线石榴堇青黑云斜长片麻岩(含有少量的钾长石)-石榴黑云斜长片麻岩-薄层状辉石麻粒岩组合:** 分布在哈达门沟DDMZ北侧或被改造成为DDMZ的一部分,呈东西向展布。在哈达门沟前口以西,约5km处,一条长10km的南北向冲沟内(当地人称为西乌兰布浪沟),该组合构成一个大型平卧褶皱。在转折端处,由富铝片麻岩所代表的轴面片麻理置换了早期的成分层。该组合沿走向向东,岩石类型及组合特点出现一些变化,即出现了薄层状方解石榴透辉斜长片麻岩(相当于钙铝硅酸盐岩)和薄层状团块大理岩与石榴黑云斜长片麻岩呈“互层状”产出。

**3.3 矽线石榴假蓝宝石黑云斜长片麻岩-大理岩-薄层状麻粒岩组合:** 分布在武川县西南部东坡一带,处在大青北坡DDMZ的南侧(图1中用“8”标出)(北侧为太古宙石榴辉石麻粒岩-紫苏花岗岩)。在该处,富铝片麻岩的片麻理、薄层状辉石麻粒岩和大理岩的走向均转为北东,与DDMZ的叶理走向基本平行,且都向北西倾斜。大理岩成分复杂,含有一定数量的钾长石。矽线石榴假蓝宝石黑云斜长片麻岩呈长透镜体状,沿走向断续分布在矽线石榴黑云斜长片麻岩之中。其矿物组合(假蓝宝石+尖晶石+铁铝石榴石+矽线石+黑云母+斜长石)不同于南极洲Enderbyland地区太古宙的Napier杂岩中含假蓝宝石的组合<sup>[6,7]</sup>,也不同于苏联阿尔丹地质的含假蓝宝石的组合(阎月华提供的样品)。其特点是不含石英、紫苏辉石和堇青石。

**3.4 矽线石榴黑云斜长片麻岩-大理岩-角闪斜长片麻岩组合:** 分布在水涧沟门北山一

带, 向东在旗下营一带也有出露。在该组合中发育有大型的高温正滑 DDMZ。在该 DDMZ 下盘, 弱剪切变形的矽线石榴黑云斜长片麻岩中见有蓝晶石的残晶, 而未见有堇青石。

**3.5 矽线石榴堇青黑云钾长片麻岩-细粒石榴二长片麻岩-大理岩-麻粒岩组合:** 分布在右玉、凉城和卓资至集宁一带, 处在右玉和凉城的高温 DDMZ 之间。岩石的片麻理及成分条带的走向都呈现出由东西转为北东的特点。

**3.6 矽线石榴黑云钾长片麻岩-大理岩-麻粒岩组合:** 分布在蛮汉山南侧。该组合中岩石的片麻理走向也由东西转为北东。

上述 6 个岩石组合之间以 DDMZ 或显生宙断裂为界。矿物组合的测温测压结果, 可以将它们划分为 3 组: 即组合①、②和⑤; 组合③以及组合④和⑥。

钾质花岗岩根据其矿物成分可划为两类。一类是较典型的“S”型花岗岩。由钾长石+石英+酸性斜长石+黑云母组成, 含有矽线石、堇青石及铁铝榴石等富铝矿物。这类花岗岩在哈达门沟前口, 石棉厂至忽鸡沟一带均有出露。在东部构成蛮汉山杂岩体。岩体除含有大量的富铝片麻岩及大理岩残块外, 同时发育有片麻理构造。岩体的片麻理的产状与围岩基本一致。岩体与围岩之间既有侵入关系, 也有渐变过渡的。总的具有“J”型花岗岩的特点。根据陈亚东等(1989)<sup>[8]</sup>的研究, 蛮汉山“J”型花岗岩的年龄为 1970—1840Ma。另一类为一般钾质花岗岩。在大青山地区沿东西向展布的 DDMZ, 呈板状, 长透镜体分布。同时写过 DDMZ 侵入到上盘太古宙变质地壳, 引起热接触变质作用。岩体边缘韧性剪切变形明显, 中心仍为块状构造。同位素年龄为 1820-1750Ma<sup>[9]</sup>。

变质作用同期 DDMZ 主要由高温糜棱岩及糜棱片麻岩组成, 呈宽度不等的带状发育在区域变质岩中(以往的研究定为变质地层)。岩石具有明显的旋转残斑(或变斑)结构和剪切分异条带。S-C 组构常见。石英的拔丝条带、矽线石、黑云母及角闪石的生长线理和链条状紫苏辉石均限定在剪切叶理面上(图 3a 和 b)。由堇青石+矽线石或者矽线石+细粒石英和长石组成的“竹叶状”条带(图 3、a 和 b)以及黑云母薄层都很发育。由于变晶作用的结果, 基质细粒化不很明显, 这与 C. Simpson (1985)<sup>[9]</sup>研究的结果一致。

## 4 矿物组合转变标志

富铝片麻岩系是构成本区麻粒岩相低压变质地壳最主要的岩石单元。其变形组构和反应关系代表着该地壳所经历的变形-变质作用的历史。含辉石石榴斜长角闪岩中的反应边矿物组构, 也记录了与片麻岩相一致的演化过程。富铝片麻岩(Pb386, 89060 及 Pb191)的矿物组合: 斜长石+石英+钾长石+黑云母+堇青石+石榴石+矽线石+尖晶石+蓝晶石(Pb191 中无蓝晶石), 副矿物锆石、磷灰石及石墨。含辉石石榴斜长角闪岩(P<sub>11-1</sub>)的矿物组合: 普通角闪石+石榴石+斜长石+黑云母+石英+紫苏辉石+透辉石+磁铁矿(图 3.e 和 f)。总的特征是在同一块标本中, 同种矿物具有不同的形态、大小和存在状态。不论在 DDMZ 内, 还是弱变形的岩石中, 都保存有高温低压矿物组合取代中温高压矿物组合的结构。以变质同期韧性剪切作用做为一个相对时标, 矿物组合的变晶作用可划分为 3 个阶段。



#### 4.1 剪切期前变晶作用

韧性剪切变形期前的变晶矿物组合,基本上代表地壳增厚阶段的产物和变化。现在这些矿物在岩石中以残斑或者残晶形式存在。铁铝榴石变斑晶呈“J”型旋转或呈豆荚状变形体。晶体内含含有互不接触的细粒浑圆状尖晶石、黑云母及石英,或仅有矽线石的旋转包体。在石棉厂和忽鸡沟一带弱剪切变形的岩石中(Pb386, 89060),铁铝榴石和蓝晶石呈残晶保留在堇青石变斑晶中(图 3.d)。在水涧沟门的片麻岩中,矽线石集合体中保留有蓝晶石残晶(图 3.b)。在  $P_{11-1}$  样品中,石榴子石颗粒被细粒紫苏辉石+斜长石集合体环绕(图 3.e)及普通角闪石被细粒紫苏辉石+透辉石+斜长石集合体环绕(图 3.f)。斜长石和条纹长石呈“J”型晶体,解理、双晶及条纹均已旋转,两端具有压力影。最突出的特点是石榴石变得不稳定。

#### 4.2 剪切同期变晶作用

韧性剪切变形同期的变晶矿物组合以 3 种形式存在,均代表地壳减薄过程中的产物。①在 DDMZ 内,由动态变晶矿物(具一定生长方向)组成,如长条形堇青石(含定向排列的针状矽线石和黑云母)与拔丝石英条带、黑云母薄层平行产出,构成基质的剪切叶理(图 3.c),或者定向生长的矽线石、黑云母和细粒菱形的长石石英集合体组成变晶基质的剪切叶理和拉伸线理(图 3.b)。②在 DDMZ 内,旋转变斑晶的反应边矿物和处在压力影部位的矿物。如旋转铁铝榴石颗粒边上的堇青石反应边<sup>1)</sup>。在 DDMZ 外,样品 Pb386 中的堇青石变斑晶和  $P_{11-1}$  中的构成石榴子石和普通角闪石反应边的矿物(图 3.d、e 和 f)。此外在紫苏辉石糜棱岩中,在粗粒紫苏辉石残斑颗粒边缘的环状紫苏辉石生长边和基质中呈链条状的细粒紫苏辉石与菱形石英、斜长石,也都属于剪切同期变晶矿物。

#### 4.3 剪切期后变晶作用

韧性剪切变形期后变晶作用的矿物,具有两种存在形式,代表岩石固化(或冷却)阶段的产物。①在辉石糜棱岩中,不论是残斑辉石还是细粒链条状辉石,在它们与斜长石接触处,都发育有褐绿色角闪石。②在矽线堇青石糜棱岩中,在堇青石与石英(或黑云母)条带之间,细粒微斜长石和斜长石集合体无变形并具三边平衡结构(图 3.c)。它们都属于剪切期后变晶作用矿物。在弱变形的岩石内,切割其它矿物而分散生长的白云母和黑云母,也可能属于这一类。

以高温韧性剪切作用为相对时标和以富铝片麻岩为例,矿物组合演化序列可归纳如下: 剪切期前矿物组合:

尖晶石+黑云母+石英+蓝晶石+条纹长石+斜长石+铁铝榴石(+矽线石旋转包体)  
                     铁铝榴石的包体                    残晶                    旋转残斑或变斑晶

剪切同期矿物组合:

堇青石+矽线石+黑云母+石英

1) 刘喜山,徐学纯,金巍,李树勋. 内蒙古中部韧性剪切变形-变质作用的 PT: 轨迹和意义. PT: 轨迹及其在变质地质学中的应用研讨会, 1990.

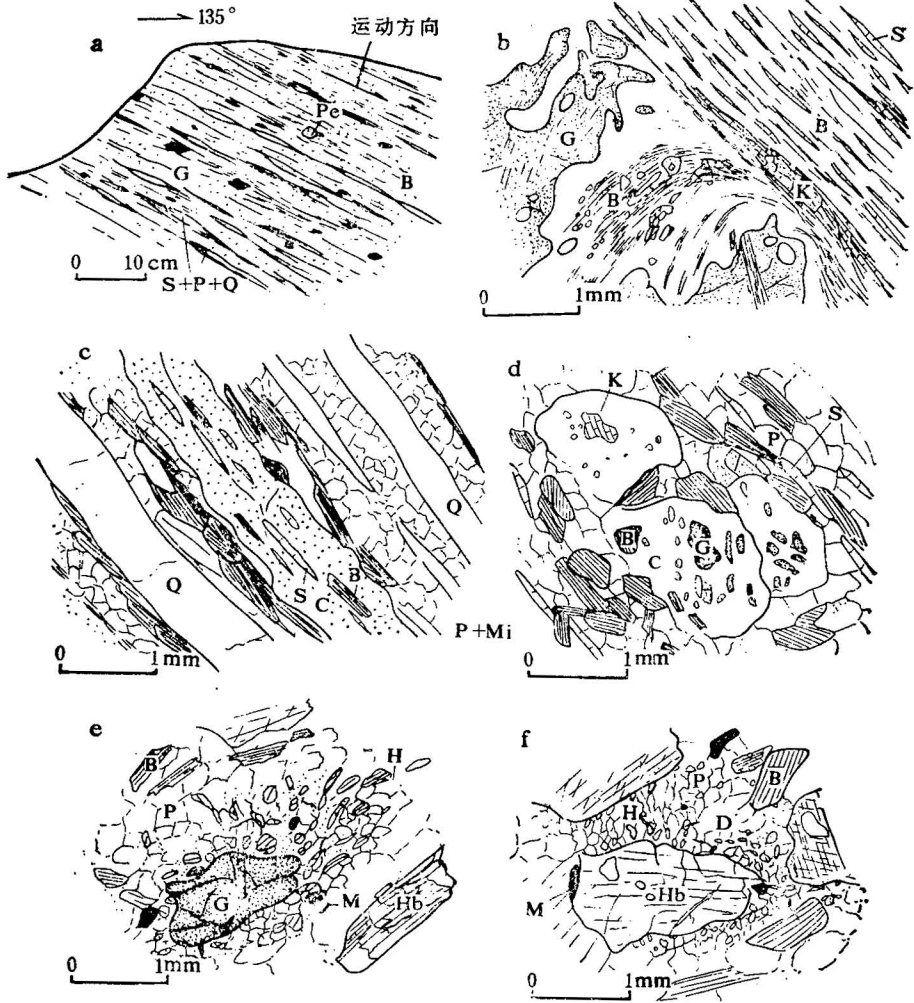


图3 岩石变形与反应边组构图

Fig. 3 Deformation fabrics and corona textures in metamorphic rocks

a. 矽线石榴黑云斜长(二长)片麻岩露头素描(根据照片素描), 水涧沟门; b. 矽线石榴黑云斜长片麻岩显微变形特征, 水涧沟门(89089), 旋转变斑晶石榴子石和大片黑云母为剪切期前矿物, 基质中定向生长的矽线石集合体中有蓝晶石残晶; c. 强变形带中, 含有矽线石、黑云母包体的长条形堇青石与拔丝石英条带和黑云母平行产出, 构成基质剪切叶理, 哈达门沟前口 (Pb191); d. 弱变形区中矽线石榴堇青黑云斜长片麻岩中, 堇青石变斑晶含有蓝晶石或(和)石榴子石残晶, 哈达门沟内石棉厂北侧 (Pb386); e. 弱变形区中含辉石石榴斜长角闪岩中, 石榴子石颗粒被细粒紫苏辉石+斜长石集合体环绕; f. 与 e 在一块岩石中, 普通角闪石被细粒紫苏辉石+透辉石+斜长石集合体环绕, 忽鸡沟北 ( $P_{11-1}$ )。 G. 石榴子石; Pe. 条纹长石; P. 斜长石; S. 矽线石; Q. 石英; B. 黑云母; K. 蓝晶石; H. 紫苏辉石; D. 透辉石; H. 普通角闪石; M. 磁铁矿; C. 堇青石; Mi. 微斜长石

a. Sketch of an outcrop (after photo) of sillimanite-garnet-biotite-plagioclase (two-feldspar) gneiss, from Shuijiangoumen; b. deformation microstructures (rotated porphyroblastic garnet, pre-shearing large biotite and kyanite relics in oriented growth of sillimanite) in sillimanite-garnet-biotite-plagioclase (two-feldspar) gneiss, from Shuijiangoumen (89089); c. elongate cordierite containing sillimanite and biotite inclusions and ribboned quartz bands in the aligned matrix with biotite in highly deformed zones; from Hadamengou (Pb191); d. Porphyroblastic cordierite containing kyanite or garnet relics in weakly deformed regions, from Hadamengou (Pb386); e. breakdown of garnet into hypersthene + plagioclase fine-grained assemblages in garnet-amphibolite from weakly deformed regions; and f. breakdown of hornblende into hypersthene + diopside + plagioclase fine-grained assemblages from the same sample as e, from Huijiugou ( $P_{11-1}$ ) G. garnet; P. perthite; S. sillimanite; Q. quartz; B. biotite; K. kyanite; H. hypersthene; D. diopside; Hb. hornblende; M. magnetite; C. cordierite; Mi. microcline.

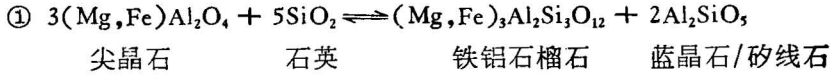


长条状及反应边 柱状定向生长 拔丝及薄层 拔丝及压力影  
组成变晶基质

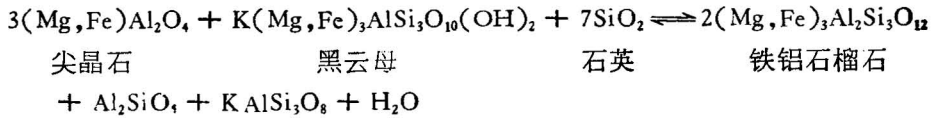
剪切期后矿物组合:

斜长石+微斜长石 + (白云母, 黑云母?)  
在条带间细粒三边相嵌 分散、切割基质矿物

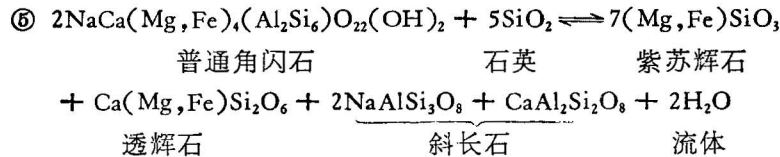
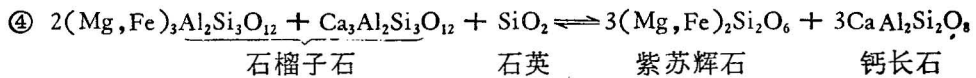
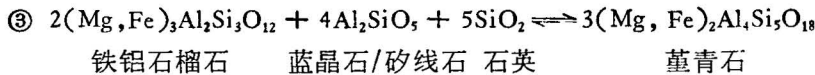
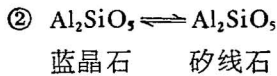
矿物组合转变的代表性变质反应有:



或



蓝晶石/矽线石      钾长石      流体



在本区, 反应①主要代表升压作用; ②和⑤为升温作用; ③和④则代表降压作用。④和⑤在同一块岩石中, 故代表升温降压作用。

## 5 变质作用 $PTt$ 轨迹

不同阶段代表性矿物成分的电子探针分析数据列入表 1, 利用不同方法获得的变质作用温度、压力值列入表 2。

这些资料说明上述矿物组合的转变, 是发生在同一个独立演化的造山事件中。按矿物形成的顺序和计算的温度、压力值, 建立的  $PTt$  轨迹绘在图 4 中, 构成一个具有顺时针演化特点的  $PTt$  轨迹。其演化与 D. J. Ellis (1987)<sup>[11]</sup> 提出的大陆地壳增厚以后又受到快速拉伸作用(构造减薄)的  $PTt$  轨迹相似。采用石榴子石和晶体内黑云母包粒的平衡标定地壳增厚作用主期的温度、压力环境。尖晶石-黑云母-石英-斜长石-(蓝晶石)组合代表增厚过程中所经历的温度、压力环境, 处在蓝晶石稳定区。条纹长石-石榴子石-斜长石-矽线石组合以及由蓝晶石转变的矽线石, 代表受扰动的地温梯度恢复阶段的产物, 反映了一种近似恒压的升温过程。堇青石-矽线石-黑云母-石英组合及石榴子石与堇青石之间平衡, 代表地壳减薄过程中的环境。其演化处在矽线石-堇青石和石榴子石共生的

表 1 代表性矿物电子探针分析结果  
Table 1 Microprobe analyses of minerals

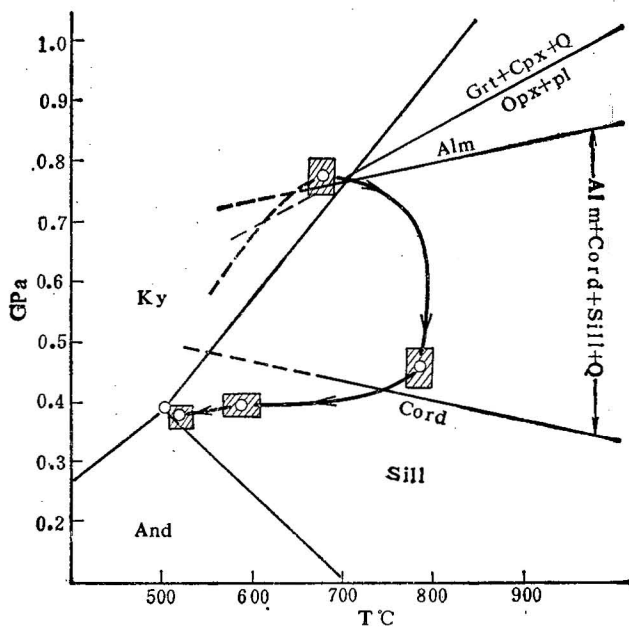
组 分	堇 青 石			黑 云 母			铁铝石榴石				钾长石	斜长石	
	1	2	3	4*	5	6	7	8	9	10	11	12	13
样品号	Pb191	Pb188	Pb386	W1023	Pb191	Pb188	W1023	Pb191	Pb188	Pb386	W1023	Pb191	Pb191
SiO <sub>2</sub>	52.23	48.91	50.10	51.28	35.77	38.57	36.15	39.52	38.92	37.10	38.76	63.86	61.55
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.00	0.11	0.00	5.24	4.91	4.57	0.00	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.02	31.47	33.21	34.33	16.26	15.60	16.32	22.10	21.10	21.10	22.21	19.16	23.63
FeO	5.51	4.63	6.15	5.66	14.58	10.20	15.87	30.74	30.75	31.25	31.66	0.00	0.03
MnO	0.06	0.06	0.49	0.07	0.00	0.04	0.02	0.60	0.21	0.99	0.86	0.00	0.09
MgO	9.87	10.49	10.07	9.91	11.67	15.52	10.76	7.51	7.72	6.78	5.88	0.07	0.06
CaO	0.03	0.03	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.85	0.97	1.10	1.15	0.09	5.69
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.06	0.09	0.14	0.15	0.20	0.13	0.04	0.07	0.04	0.03	1.15	7.58
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.02	0.02	9.81	9.50	9.86	0.01	0.00	0.00	0.00	17.38	0.28
总 计	100.76	95.66	100.25	101.41	93.49	94.56	93.7	101.37	99.78	98.43	100.55	101.71	98.91
	每 18 个氧的阳离子数			每 11 个氧的阳离子数			每 12 个氧的阳离子数				每 8 个氧的阳离子数		
Si	5.19	5.08	5.02	5.03	2.68	2.78	2.71	3.03	3.01	2.97	3.01	2.93	2.76
Ti	0.00	0.01	0.01	0.00	0.30	0.19	0.26	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Al	3.82	3.86	3.92	3.96	1.43	1.35	1.44	2.00	2.01	1.99	2.03	1.04	1.25
Fe	0.45	0.40	0.51	0.47	0.86	0.80	1.02	1.97	1.99	2.09	2.06	0.00	0.00
Mn	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.07	0.06	0.00	0.00
Mg	1.44	1.62	1.50	1.45	1.30	1.59	1.20	0.86	0.89	0.82	0.68	0.01	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.09	0.08	0.10	0.00	0.27
Na	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.10	0.66
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.92	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02	0.02

\* 引自徐学纯 (1989)

表 2 计算的不同阶段变质作用温度和压力

Table 2 Calculated temperature and pressure of different stages of metamorphism

方法	剪切期前		剪切同期		剪切期后		方法来源
	T(°C)	P(GPa)	T(°C)	P(GPa)	T(°C)	P(GPa)	
石榴子石-黑云母 石榴子石-蓝晶石	700±20	0.73—0.8 蓝晶石稳定区					M. J. Holdaway 和 S. M. Lee(1977), [10] J. M. Ferry 和 F. S. Spear (1978), B. A. Глебовицкий (1977) L. L. Perchuk (1970)
石榴子石-堇青石 二辉石			715±25 0.45—0.5	斜方辉石-斜长石区			K. L. Currie (1971); I. Hutcheon 等 (1974); R. A. Wells (1977); B. J. Wood 和 S. Banno (1973)
蓝晶石→夕线石				夕线石区			A. E. Ringwood 和 D. H. Green(1972)
角闪石-斜长石 二长石					580±30 500±	0.4±	Plyusnina (1982); L. L. Perchuk(1985) R. Powell 和 M. Powell (1977); J. A. Whinthey 和 J. C. Storrer(1977)

图 4 早元古代变质作用  $PT$  轨迹图Fig. 4 Diagram of Early Proterozoic metamorphism  $PT$  path

区间内(图 4)。用微斜长石和斜长石的平衡来标定岩石固化(等压冷却)及深部韧性剪切作用活动结束时的物理条件。

## 6 结论与讨论

1. 本区早元古代变质层状岩系南北两个带中片麻岩类型的不同, 标志着大青山地区

与右玉-凉城地区原岩中的碎屑来源及成熟度,都有一定的差异。所含 6 个岩石组合的岩石及矿物组成的差异,不仅反映了它们在原始地层柱中的不同层位,也说明它们在变形变质过程中所处构造位置的不同。岩石组合②和③位于靠近地层柱的下部,组合①和④偏上。组合③的变质温度,压力最高(温度在  $1000^{\circ}\text{C} \pm$ , 压力  $>1.0\text{GPa}$ ); 组合④反映了高角闪岩相到麻粒岩相的转变条件;组合①、②和⑤的形成温压条件相似。但总的来讲,它们都具有相似的演化途径。

2. 变质岩石内保存有地壳先增厚而后减薄所经历的升压和降压过程的记录。早期蓝晶石稳定,随着压力增加,尖晶石和石英反应生成铁铝石榴石和蓝晶石。由升压转入降压过程中,出现升温情况,蓝晶石转变为矽线石和出现石榴子石+钾长石的组合。石榴子石在降压过程中也不稳定,在变质泥质岩石中它与蓝晶石/矽线石和石英反应形成堇青石;在变质镁铁质岩石中,则与石英反应生成紫苏辉石和斜长石。

3. 早元古代地壳增厚起因于板块内陆-陆碰撞引起的推覆作用。地壳减薄是造山事件晚期出现的拉伸作用,即早元古代麻粒岩相低压变质地壳是在造山事件中拉伸作用构造环境下形成的。

4. 早元古代麻粒岩相低压变质地壳形成过程为: 陆-陆碰撞作用使太古宙热地壳在 2100Ma 左右被推到早元古代沉积地壳之上,导致地壳迅速增厚和地温梯度受扰动。热的逆向传导使太古宙地壳沿推覆带发生了角闪岩相级退变质作用。由于地壳增厚速度超过受扰动等温面的恢复速度,出现了低温高压变质作用环境。造山运动主期增厚速度逐渐减缓(此时地壳厚度最大),而等温面恢复作用继续对地壳加热,出现高温高压变质环境。造山运动主期之后,增厚的地壳由于拉伸作用开始减薄,而地热仍继续积累,出现高温低压变质环境,同时出现了“J”型花岗质岩浆的活动,其时距大致为 1960—1940Ma。晚期钾长花岗岩浆在 1820—1750Ma 沿 DDMZ 的就位以及 DDMZ 的“淬火”,标志着早元古代变质旋回的结束。现在的外貌与早元古代变质作用旋回无关。

### 参 考 文 献

- Hollister L S. Metamorphic evidence for rapid (2mm/yr) uplift of a partion of the central gneiss complex, coast mountains. B. C. Canadian Mineralogist, 1982, 22:319—332.
- 刘喜山,李树勋,张履桥. 内蒙古东五分子地区韧性剪切变质作用特征. 岩石矿物学杂志, 1987, 6(4): 306—315.
- 李树勋,刘喜山,张履桥. 内蒙古色尔腾山地区花岗岩-绿岩地质特征. 长春地质学院学报,《变质地质学专辑》, 1987, 81—103.
- 阎月华. 内蒙千里山群变质岩岩石学研究(1981届硕士学位论文文集). 北京:北京科学技术出版社,1983,220—230页.
- 沈其韩,张荫芳. 内蒙中南部早、中前寒武系变质作用的某些特征. 长春地质学院学报,《变质地质学专辑》,1987, 45—53页.
- Harley S L. Sapphirine-cordierite-garnet sillimanite granulite from Enderbyland, Antarctica: implication for FMAS petrogenetic grids in the granulite facies. Contri. Mineral. Petrol., 1986, 94 (4): 452—460.
- Grew E S. Sapphirine-quartz association from Archaean rocks in Enderby land, Antarctica. American Mineralogist, 1980, 65 (9—10): 821—836.
- 陈亚东,钱祥麟,刘金中. 华北克拉通北缘中段太古代变质杂岩序列. 岩石圈科学. 北京:北京大学出版社, 1989, 53—69页.
- Simpson C. Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition. Jour. Struct. Geol., 1985, 7 (5): 503—511.

- 10 张儒瑗,丛柏林. 矿物地质温度及压力计. 北京: 地质出版社, 1983.
- 11 Ellis D J. Origin and evolution of granulites in normal and thickened crusts. *Geology*. 1987,65 (2): 167—170.

## LOW-PRESSURE METAMORPHISM OF GRANULITE FACIES IN AN EARLY PROTEROZOIC OROGENIC EVENT IN CENTRAL INNER MONGOLIA

Liu Xishan, Jin Wei and Li Shuxun  
(*Changchun University of Earth Sciences, Changchun, Jilin*)

### Abstract

According to the kinds of feldspar in the Al-rich gneisses and the characteristics of rock associations, the low-pressure Early Proterozoic metamorphic crust in central Inner Mongolia can be divided into the south belt and north belt which are composed of six rock associations. They represent the relevant rock groups of the layered metamorphic rock series, formed under specific metamorphic temperature and pressure conditions as well as tectonic environments. Mineral inclusions and reaction textures record that the medium-temperature high-pressure mineral assemblages are replaced by the high-temperature low-pressure mineral assemblages: garnet + quartz → hyperthene + plagioclase, kyanite → sillimanite and garnet + kyanite + sillimanite + quartz → cordierite. The decreasing pressure condition is indicated by the break-down of garnet in the metapelite and metamafic rocks. Through the studies of geological setting, deformation fabric, variation of mineral assemblages and metamorphic P-T path, the following conclusions can be made. The early Proterozoic metamorphic crust was produced by intraplate collision at about 2100—1800 Ma. It is indicated by the earlier increasing pressure and later decreasing pressure records in studied samples that the crust is thickened and then thinned. The low-pressure metamorphic crust of granulite facies was formed by extension during the uplifting of metamorphic crust. The changes from medium-temperature/high-pressure to high-temperature/low-pressure conditions are the results of thrusting and shearing and crustal extension in an early Proterozoic orogenic event.

**Key words:** Early Proterozoic, change of mineral assemblages, extension, Orogenic event

### 作者简介

刘喜山, 1944年出生, 1969年毕业于长春地质学院地质系。从事变质岩教学和研究工作, 自1987年以来为长春地质学院地质系副教授。已发表《内蒙古东五分子地区韧性剪切变质作用特征》, 《变质作用条件估算中热力学应用的问题》论文多篇。通讯地址: 吉林省长春市建设街79号岩石教研室, 邮政编码130061。