

内蒙古中部太古代麻粒岩递进变质成因

Progressive Metamorphic Genesis of Archaean Granulites in Central Nei Mongol

刘喜山

Liu Xishan

(长春地质学院 长春市 130061)

(Changchun University of Earth Sciences, Changchun, 130061)

摘要 由早元古代造山运动早期自北西向南东推覆作用引起并使之得以保存的太古代变质作用强度逆转的剖面出露在内蒙古中部的固阳-武川地区。变质镁铁质岩石中矿物组合的变化在低级区为阳起石+绿帘石+绿泥石→普通角闪石+钠长石→普通角闪石+斜长石→石榴石(或透辉石)+普通角闪石+斜长石→无色角闪岩+钠长石;在高级区为普通角闪石+斜长石→紫苏辉石+透辉石+斜长石→石榴石+透辉石₍₂₎+石英。这些变化已被用来恢复太古代时期从低绿片岩相到麻粒岩相的递进变质序列及尔后经历的近等压冷却的退变质作用过程。高级区变质表壳岩与低级区绿岩带的岩石组合、岩石化学、岩石地球化学和变质作用演化序列的对比研究结果表明,两者属于太古代同一火山-沉积单位。其变质程度的不同起因于在经受区域性递进变质作用时,两者处在地壳的不同位置。

Abstract A reversed profile of Archaean metamorphic grades is exposed in Guyang-Wuchuan area of central nei Mongol, which was caused and preserved by early Proterozoic napping from north-west to south-east during continental collision. The continuous changes of mineral assemblages developing in metabasic rocks, such as Act+Ep+Chl→Hb+Ab→Hb-Pl→Grt (or Di) +Hb+Pl→Am (no color) +Ab in low-grade area; Hb+Pl→Opx+Cpx+Pl₍₂₎→Grt+Cpx₍₂₎+Qz in high-grade area, are used to construct the progressive metamorphic sequence from low-greenschist facies to granulite facies, and to determine the retrograde metamorphism of isobaric cooling. Comparing studies of rock association, petrochemistry, geochemistry and metamorphism show that metamorphic supracrustal rocks in both low-grade and high-grade areas belong to the same petrological unit of volcano-sedimentary sequence. The difference of metamorphic grades between them is caused by the different positions when they underwent regional progressive metamorphism. The low-middle grade and high-grade areas

• 本文1996年2月2日收到,1996年3月14日改回。

本研究得到国家自然科学基金委(49372130)及(49132070)资助

作者简介:刘喜山 男 1944年出生 教授 变质岩专业

were located at the upper-middle and low crustal conditions, respectively.

主题词 太古代 麻粒岩 递进变质作用 内蒙中部

Key Words: Archaean; Granulite; Progressive metamorphism; Central Nei Mongol

分类号: P588.34

Classific. code: P588.34

1 前言

太古代含麻粒岩高级变质地壳代表当时在下地壳环境中形成的产物已得到了广泛的接受,同时对其成因也行了广泛地讨论(Windley 1981; 卢良兆 1991)。由于含麻粒岩高级变质地壳的物质组成、结构及 $P-T$ 参数的空间演化均显示出具有多样性的特征(Harley 1989; 刘喜山等 1993),因而导致了地质学家用不同的构造模式来解释其成因。Schenk (1984) 用 A 型俯冲模式讨论了意大利南部的 Calabria 地区海西期麻粒岩。Sandiford and Powell (1986) 用大陆拉伸构造解释了从晚太古代到显生宙的麻粒岩形成与演化。Bohle and Mezger (1989) 用岩浆增生的模式讨论了美国东北部 Adirondacks 元古宙的麻粒岩。Van Reenen et al. (1990) 用克拉通碰撞模式解释了南部非洲的 Limpopo 带麻粒岩的形成与演化。本文认为如果从变质地质过程来讨论麻粒岩的形成机制与演化,那么一种与太古代中-上部变质地壳形成和演化的对比研究是必要的。其原因是这种研究可能为地质学家长期以来一直很感兴趣的一个问题,即太古代低级变质的绿岩带是否代表麻粒岩变质时的中-上部地壳,提供一种答案。内蒙古中部的太古代变质杂岩为这方面的研究提供了一个较好的实例。其研究结果表明太古代麻粒岩相的变质表壳岩和绿岩带属于同一火山-沉积单位,其变质强度的差异是起因于在经历递进变质时所处地壳位置的不同。

2 区域地质

内蒙古中部主要由早前寒武纪变质杂岩所占据。武川-余太近东西向断裂带则控制了这套变质杂岩组合在空间分布上的基本格局。在断裂带的南侧为由太古代基底再造杂岩、早元古代孔兹岩及早元古代板状花岗岩组成的近东西向展布的线型杂岩带,出露宽度约 20km,长度大于 200km,构成乌拉山-大青山山脉的主体,代表早元古代时期岩石圈碰撞的根部带(刘喜山 1994a, b)。分布在断裂带北侧的太古代变质杂岩根据其变质程度可进一步划分为太古代低级变质区——花岗岩-绿岩带和高级变质区——紫苏花岗岩-麻粒岩杂岩。低级区主要分布在固阳和武川的红山子一线西北侧。早元古代时期区域性自北西南东的推覆作用(孙德育等 1987; 刘喜山等 1987)使变质程度高的岩石组合推覆到变质程度低的岩石组合之上,出现了变质作用强度逆转序列(刘喜山等 1992)。高级区分布在该线东南侧的下温壕-西乌兰不浪-纳令沟地区,另外在研究区北部的老羊壕及召和庙一带也有零星分布(图 1)。低级区与高级区的主要区别除了变质作用峰期的温度、压力强度值外,还表现在变质表壳岩与深成侵入杂岩的比例,紫苏花岗岩仅侵入到高级区。本文的研究主要集中在与麻粒岩形成的有关问题。

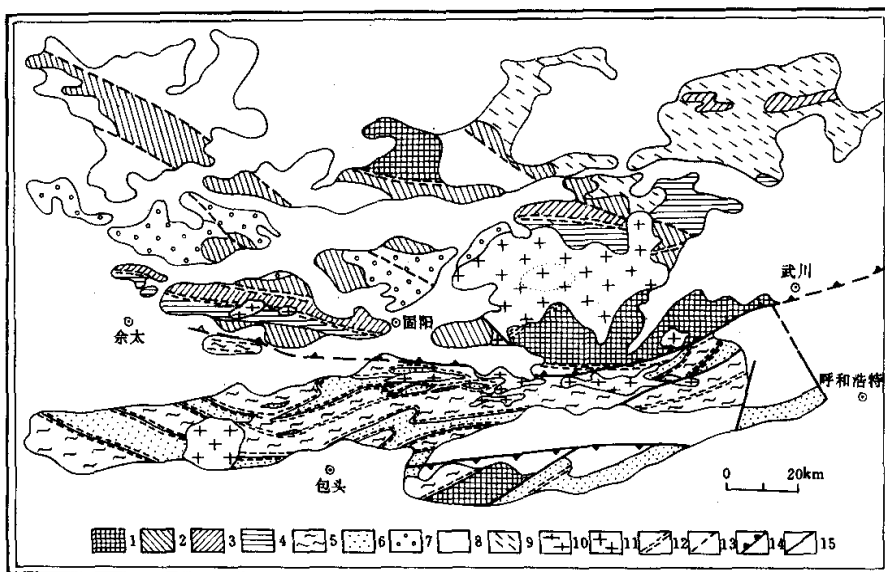


图 1 内蒙古中部早前寒武纪变质地质图

- 1. 太古代紫苏花岗岩-麻粒岩杂岩；2. 低角闪岩相变质绿岩带；3. 高绿片岩相变质的绿岩带；4. 低绿片岩相变质的绿岩带；5. 太古代基底再造杂岩；6. 早元古代孔兹岩；7. 中元古沉积盖层；8. 晚元古以后的沉积盖层；9. 晚太古代花岗岩(?)；10. 早元古代花岗岩；11. 显生宙花岗岩；12. 早元古韧性剪切带；13. 显生宙韧性剪切带；14. 显生宙逆冲断裂；15. 脆性断裂

Fig. 1 Map of Precambrian metamorphic rocks in central Nei Mongol

3 岩石学

3.1 低级区

绿岩带自下而上可划分为三个大的岩石组合：下部含石榴斜长角闪岩夹角闪石岩及少量条带状磁铁石英岩，中部黑云阳起片岩、角闪和（或）黑云斜长片麻岩；上部云母钠长片岩、绿帘钠长片岩及石英片岩。尽管受到递增变质作用改造，在某些地段仍可发现保留有与火山作用有关的结构和构造，如在阳起绿泥石片岩中保有变余气孔、杏仁构造；在云母钠闪长片岩中保存有变余晶屑和斑晶（李树勋等 1987）。岩石普遍具有一组结晶面理构造，其产状分别以中等角度向南西和北东倾斜，组成早期的褶皱构造，轴面走向近南北。在靠近早元古韧性剪切带处，在露头上或在采集的岩石薄片，很容易发现近东西走向的剪切叶理构造明显地改造或者置换了早期的面理构造。岩石为片状变晶结构和粒状变晶结构，仅在部分变质基性岩石中发育有斑状变晶、变晶包含结构及反应边结构（详见下述）。张履桥等（1986）^① 结合岩石化学及地球化学的研究，将其原岩建造序列恢复为：下部为超镁铁质-镁铁质火山岩夹有少

① 张履桥，李树勋，刘喜山，1986. 内蒙古中部东五分子-朱拉沟地区太古宙地质及含矿性（研究报告）

量钙碱性火山岩及硅铁质岩；中部为钙碱性火山岩、火山碎屑岩及少量泥质粉砂岩和基性熔岩；上部为长英质火山碎屑岩及不成熟的碎屑沉积岩。目前保存的厚度约为9~9.5 km。

对代表性岩石化学及地球化学研究表明(李树勋等 1987)；绿岩带下部的超镁铁质岩除个别样品属于橄榄质科马提岩外(张履桥等, 1986)^①，大部分样品属于玄武质科马提岩(图2和图3)。作为绿岩带下部的主要岩石单元——斜长角闪岩，则均属于拉斑玄武岩。

3.2 高级区

高级变质区的变质表壳岩系其分布和完整性远不及低级变质区的绿岩带。目前呈大小不等岩石包体产出在紫苏花岗岩质杂岩中。分布面积较大及出露较全的地段有阳泰沟及纳令沟。根据张履桥等(1986)^①实测地质剖面，自下而上岩石组合变化为角闪辉石→基性麻粒岩→中酸性麻粒岩、二长片麻岩→透辉斜长片麻岩→条带状磁铁石英岩或榴英夹极少量的夕残石榴斜长片麻岩(宽度不足1m)。不论是变质表壳岩还是紫苏花岗杂岩，岩石均具有一组片麻状或条带状构造。它们的走向和由它们组成紧密褶皱，轴面走向均为南北向。岩石总体为中粒粒状变晶结构，反应结构比较发育(详见下述)。

根据各种岩石类型在剖面不同位置的比例关系，结合岩石化学及地球化学的研究，下部以拉斑玄武岩为主，夹有少量的玄武质科马提岩及条带状硅铁质岩；中部为钙碱性火山岩组合，以英安岩及流纹英安岩为主；上部则以火山碎屑岩、不成熟的沉积碎屑岩及硅铁质岩为主。岩石组合序列、岩石化学成分连续性变化趋势与低级变质区的绿岩带十分相似(图2)，而且这种相似性也表现在岩石稀土元素的配分模式上(图3)。

如果把变质表壳岩的原岩建造形成作为晚太古代火山-沉积作用的一个重要组成部分，那么高级区变质表壳岩与低级区的绿岩带在岩石组合序列方面不仅在自下而上的变化规律方面具有一致性，而且在横向上是可以进行对比的。岩石化学成分及其连续性变化趋势和地球化学组成方面的相似性也有力地支持它们属于太古代同一火山-沉积单位的认识。而变质作用研究的成果也支持在递增变质作用进行时，太古代火山-沉积地壳不论在横向上还是在纵向上都是连续的。

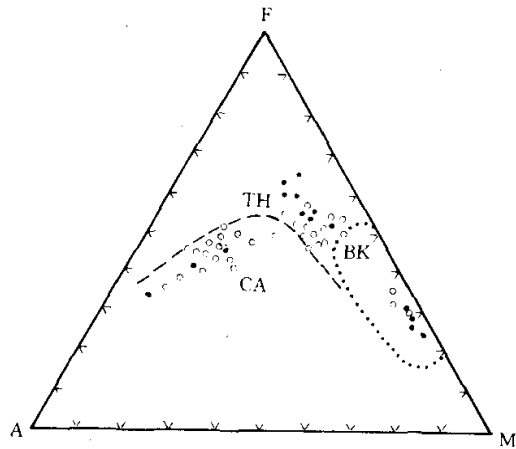


图2 岩石化学成分演化的AFM图(据李树勋等 1987；张履桥等 1986)

TH为拉斑玄武岩；CA为钙碱性火山岩；BK为科马提岩；黑点为低级区；圆圈为高级区

Fig. 2 A-F-M diagram of evolutionary trend of chemical composition of volcanic rocks

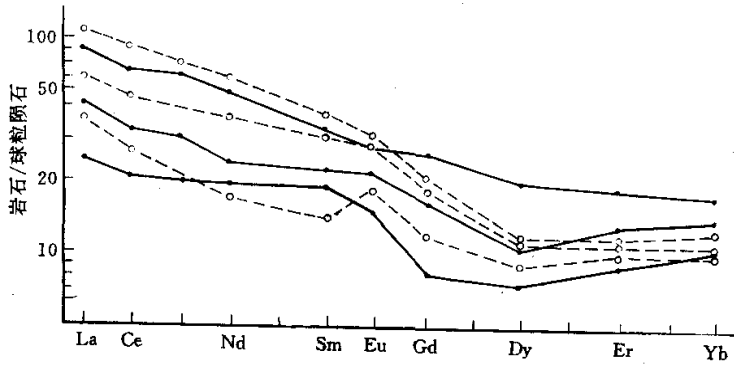


图3 镁铁质岩石稀土元素配分模式图(据张履桥等,1986)
 断线为低级区；实线为高级区

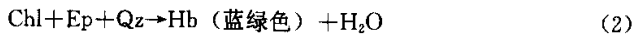
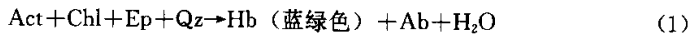
Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution pattern of mafic volcanic rocks

4 变质作用

对各种地质事件对比研究表明，区域变质作用是研究区内最早发生的一次改造事件。变质作用演化的总特点和趋势在早期阶段表现为区域性递增变质作用，具有明显的分带性；晚期表现出一种近等压（或略有升压）冷却的退变质作用。

4.1 低级区的变质作用

正如前面已提到的那样，低级区变质作用强度的空间分布特征表现为一种逆转序列。其变化规律自南向北（北召沟-南坝-哈布齐尔沟）从低绿片岩相到低角闪岩相顶部。值得指出的是向北穿过中元古查尔泰群至老洋壕地区，地表为角闪岩相矿物组合，但在观察内蒙古101地质队在该地区的钻探岩芯时，发现了含紫苏花岗岩-麻粒岩组合。因而构成一个大型的变质作用强度逆转剖面（图4）。尽管各变质作用强度带之间的接触界线为韧性剪切高应变带（宽为100~150m），但根据各剪切带之间基性变质岩中所保存的反应结构及矿物组合的递进变化，其递增变质序列仍可建立起来。自南向北的变化为：在南坝附近蓝绿色普通角闪石取代阳起石或者两者共存，在岩石中绿泥石、绿帘石含量降低，其中两者之一消失，表明发生过下列变质反应：



低绿片岩相 高绿片岩相

根据李树勋等（1987）、刘喜山等（1987）的研究，发生上述反应的条件为 $T=500^\circ\text{C} \pm$ ， $P=0.2\sim 0.3\text{GPa}$ 。由于反应进行得不彻底，因而存在有过渡性矿物组合，如 Hb（蓝绿色）+ Act+Ep+Ab+Qz±Chl。从南坝至公巨成，变质基性岩中褐绿色普通角闪石和斜长石组合出现。而阳起石、绿泥石消失。再向北到哈布齐尔沟，分别出现了含石榴石或透辉石的变质矿

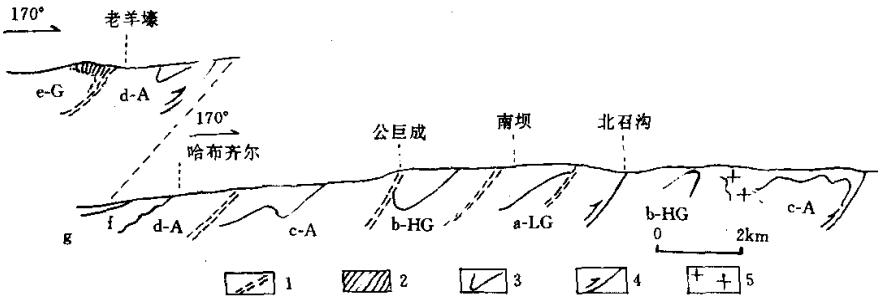
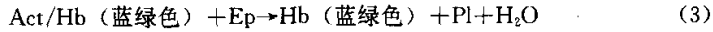


图4 内蒙古中部北台沟-老羊壕变质强度逆转剖面(根据张履桥等(1986)的实测地质剖面简化和补充)

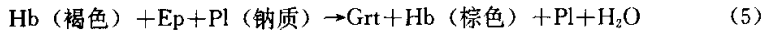
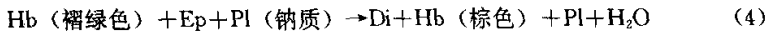
1. 早元古韧性剪切带; 2. 角闪岩相退变质带; 3. 褶皱构造; 4. 显生宙推覆断裂; 5. 早元古花岗岩; a-LG 为绿帘绿泥片岩-云母片岩-变粒岩(低绿片岩相); b-HG 为角闪片岩-细粒角闪/云母片麻岩(高绿片岩相); c-A 为斜长角闪岩夹角闪岩-角闪斜长片麻岩-条带状磁铁石英岩(低角闪岩相); d-A 为含石榴(或透辉石)斜长角闪岩-含辉石角闪岩-角闪斜长片麻岩-条带状磁铁石英岩(低角闪岩相); e-G 为麻粒岩-长英片麻岩-条带状磁铁石英岩(麻粒岩相); f. 中元古沉积盖层; g. 中生代沉积盖层

Fig. 4 Reversed profile of Archean metamorphic grades from Beizhaogou to Laoyanghao area of central Nei Mongol

物组合。普通角闪石的 N_g 方向为棕褐色, 石榴石晶体内含有的细粒椭圆形钠质斜长石及褐色普通角闪的包体(图 5a)。这指示岩石中曾发生过如下变质反应:



高绿片岩相 低角闪岩相



反应(4)及(5)为角闪岩相内部反应。反应(3)的温度、压力条件为 $T=550^\circ\text{C}$, $P=0.4\sim 0.6\text{GPa}$ 。根据李树勋等(1987)的研究, 含石榴石-普通角闪石-斜长石组合的平衡温压条件为 $T=650^\circ\text{C}$, $P=0.5\sim 0.6\text{GPa}$ 。上述的结果揭示了从低绿片岩到角闪岩相, 矿物组合的递增变化为 $\text{Act} + \text{Chl} + \text{Ep} \rightarrow \text{Hb} + \text{Ab} \rightarrow \text{Hb} + \text{Pl} \rightarrow \text{Grt (或 Di)} + \text{Hb} + \text{Pl}$, 相应温度和压力的变化分别为 $500\sim 650^\circ\text{C}$ 、 $0.2\sim 0.6\text{GPa}$, 变质热梯度为 $25 \pm 2^\circ\text{C}/\text{km}$ 。

在石榴斜长角闪岩内, 普通角闪石颗粒的边上发育有无色亚铁闪石的反应边。同时与亚铁闪石相接触的斜长石中其钙长石分子含量由原来的 $\text{An}=21$ 转变为 $\text{An}=8$, 形成亚铁闪石+钠长石的矿物组合(图 5b)。利用 Plyusnina (1982) 的变异图解, 获得该组合的平衡温度、压力为 $T=450 \pm 30^\circ\text{C}$, $P=0.5\sim 0.6\text{GPa}$ 。与石榴石、普通角闪石、斜长石组合的平衡温度、压力条件相对比, 属于一种近等压冷却的过程。指示这种退变质作用是在地壳厚度变化不大(构造相对稳定)的环境下发生的。变质作用 PTt 轨迹绘于图 6 中。

有必要指出的是早元古代韧性剪切带切割了上述所有变形变质地质体, 而本身又被中元古界查尔泰群以角度不整合的形式所覆盖。

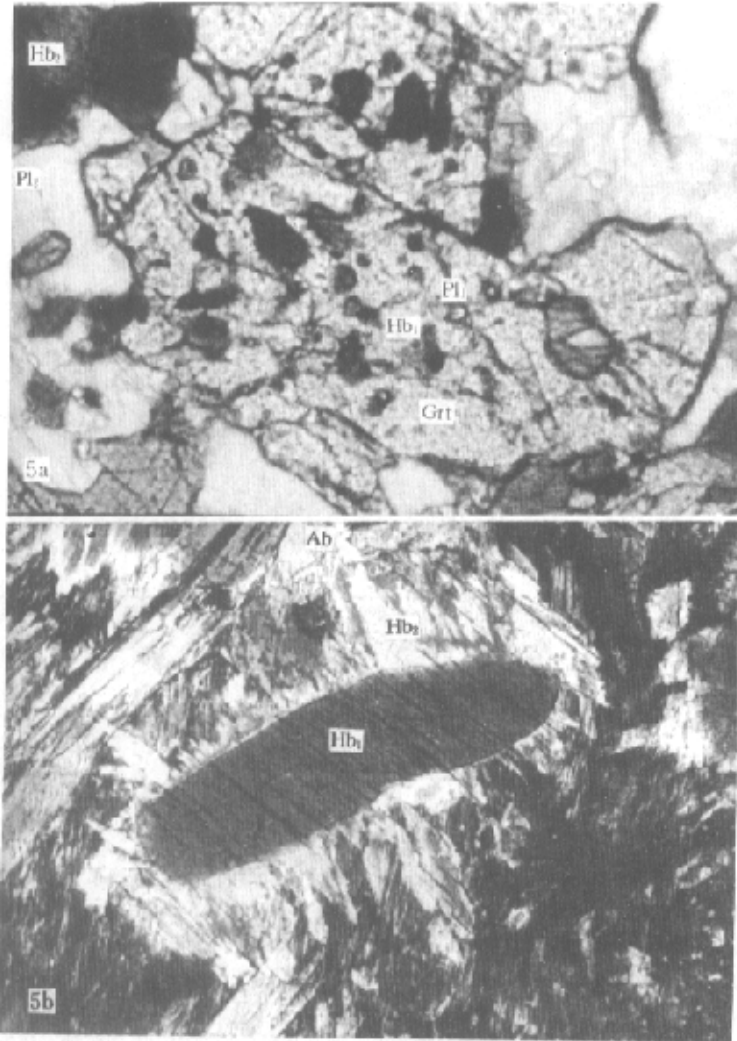


图 5 石榴斜长角闪岩中的反应结构

a. 石榴石(Grt)内角闪石(Hb₁), 钠质斜长石(Pl₁)包体; b. 普通角闪石(Hb₁)被无色亚铁闪石(Hb₂)所环绕

Fig. 5 Reaction corona textures of garnet-bearing amphibolite

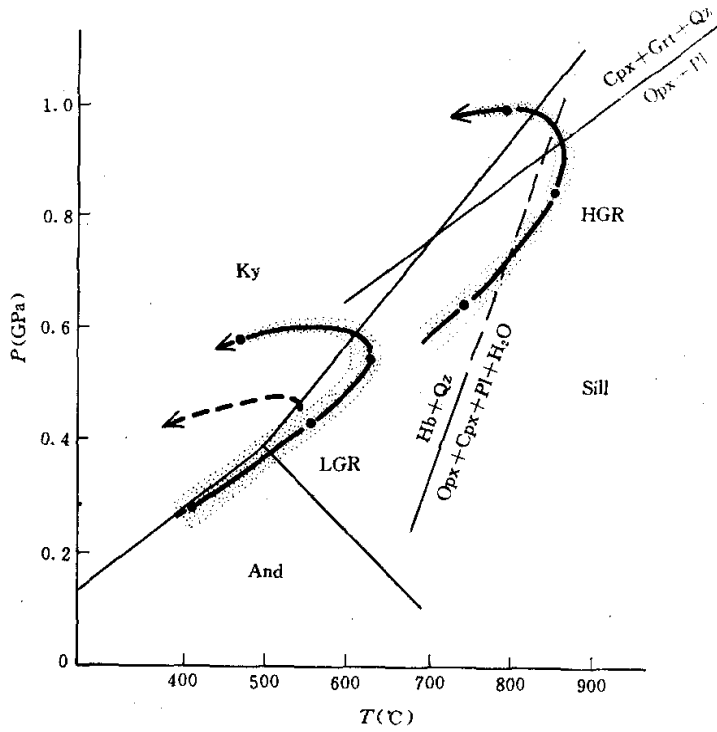
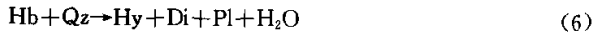


图6 内蒙古中部太古代变质作用 PTt 轨迹
 LGR 代表低级变质区绿岩带的 PTt 轨迹; HGR 代表高级变质区麻粒岩的 PTt 轨迹
 Fig. 6 PTt path of Archaean metamorphism in central Nei Mongol

4.2 高级区的变质作用

麻粒岩的产状及反应结构清楚地表明麻粒岩是由斜长角闪岩经递增变质而形成的。其证据来自于阳泰沟及纳令沟地区石榴石基性麻粒岩中的辉石斜长角闪岩透镜体(或者包体)。在斜长角闪岩内,柱状褐色普通角闪石颗粒边上生长有由细粒紫苏辉石+透辉石+斜长石组成的高温变质矿组合(图7a)。这表明发生过如下变质反应:



而在石榴辉石麻粒岩中,除了发现紫苏辉石内有椭圆状褐色普通角闪石包体外,还发育由细粒的石榴石+石英+透辉石(2)组成的链状集合体分布在中-粗粒紫苏辉石、透辉石及斜长石颗粒之间(图7b)。此外在紫苏石英闪长岩和紫苏斜长花岗岩中,也发育有相类似的反应边结构(刘喜山等1993)。很明显在二辉麻粒岩形成及紫苏花岗岩杂岩侵位之后发生过如下变质反应:

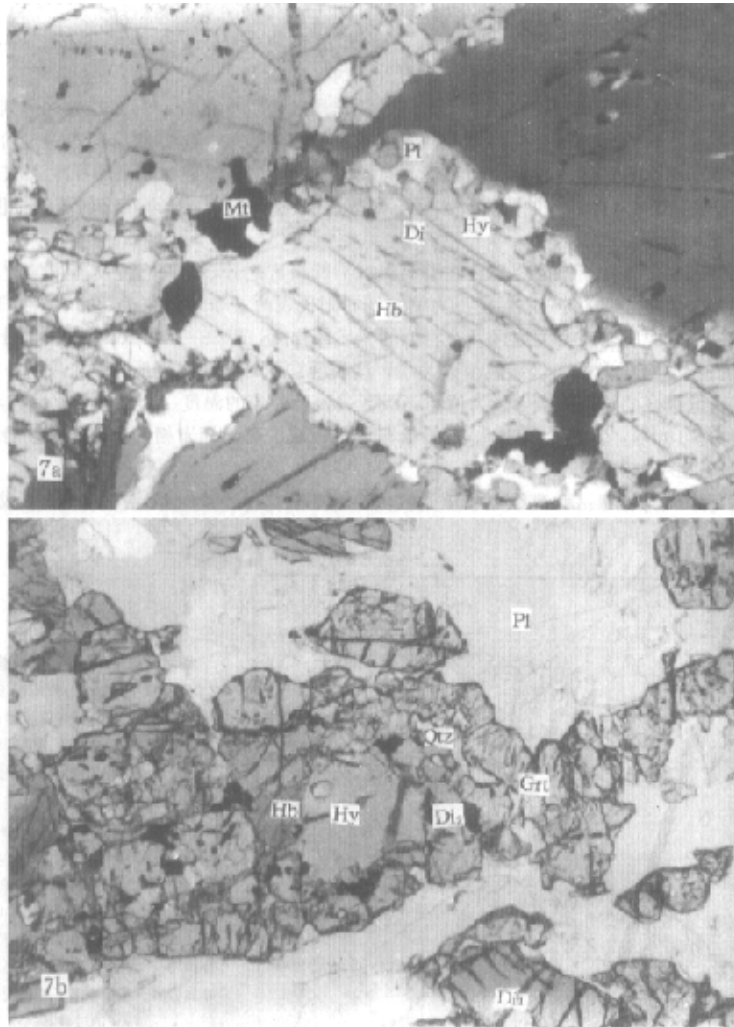
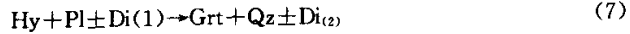


图7 麻粒岩的反应结构

7a. 指示辉石麻粒岩矿物组合形成的反应边结构；7b. 指示含石榴石麻粒岩矿物组合形成的反应边结构；Grt 为石榴石；Hb 为角闪石；Di 为透辉石；Hy 为紫苏辉石；Pl 为斜长石；Qtz 为石英；Mt 为磁铁矿

Fig. 7 Reaction corona textures of granulites



许多研究已表明反应(7)发生在一种近等压冷却的环境中(Harley 1989; Selverstone et al. 1990; 崔文元等 1991; 刘喜山等 1993; 耿元生等 1994)。

如果把麻粒岩的形成与演化作为下地壳地质作用过程的一部分,那么其演化可划分为如下几个阶段:①由斜长角闪岩经递增变质转变为二辉石麻粒岩→②二辉麻粒岩稳定阶段(峰期变质)→二辉石麻粒岩经近等冷却转变为石榴辉石麻粒岩。峰期前变质热梯度为 $25 \pm 1^\circ\text{C}/\text{km}$ 。根据刘喜山等(1993)的研究,本区石榴辉石麻粒岩变质作用的 PTt 轨迹绘在图6中。该图很清楚地表明:

(1) 本区太古代变质杂岩尽管存在有高级区与低级区之分,但两者变质作用的 PTt 轨迹演化趋势是一致的,而峰期变质温度压力值的不同则代表两者当时处在地壳的不同构造位置。

(2) 在峰期变质之前两类地区具有相似的变质热梯度,即 $25 \pm 1^\circ\text{C}/\text{km}$,而且都处于中—低压环境。温度与压力呈一次线性函数关系,这表明它们是同一次变质作用产物。

(3) 以低级区的峰期温度、压力值与高级区进入麻粒岩的温度、压力值相比较,其差值: ΔT 为 $50^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$, $\Delta P = 0.1\text{GPa}$ 。这恰恰与低级区缺少高角闪岩相变质地壳相吻合(高角闪岩相温压范围非常窄)。

因而可以认为低级区与高级区在遭受区域递增变质作用改造时是连续的,其形成模式如图8所示。

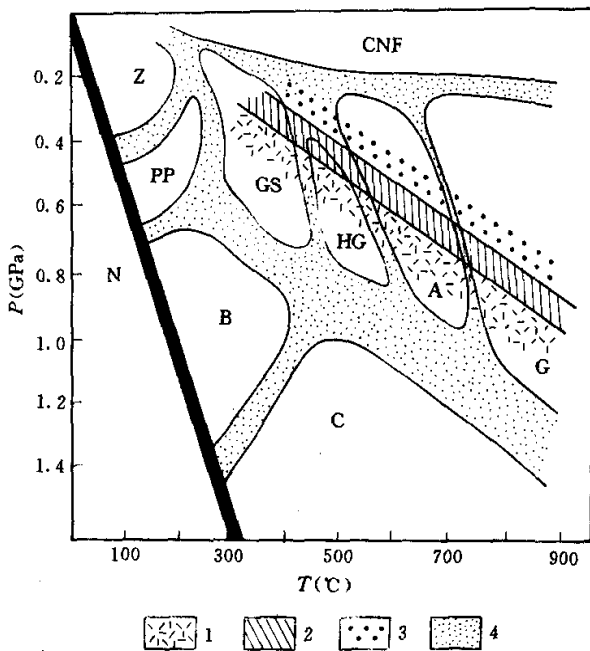


图8 太古代递增变质模式图

Z为浊沸石相; PP为葡萄石-绿纤石相; B为蓝片岩相; C为榴辉岩相; GS为绿片岩相; HG为高绿片岩相; A为角闪岩相; G为麻粒岩相; CNF为接触变质相; N为不发生变质作用区(图中各变质相范围及边界根据Yardley(1989)图2.8和Spear(1993)图2.2); 1. 超镁铁质-镁铁质火山岩夹少量钙碱性火山岩和硅铁质岩组合; 2. 钙碱性火山岩-火山碎屑岩夹少量基性熔岩及泥质粉砂岩组合; 3. 长英质火山碎屑岩-不成熟沉积碎屑岩夹少量硅质岩; 4. 各变质相之间的过渡区

Fig. 8 Schematic model of Archaean progressive metamorphism

从该图我们可以推测由于大量岩浆自深部地壳溢出, 不仅形成了太古代火山-沉积地壳, 而且也使这些火山-沉积地壳连续地倾斜下插进入中、下部地壳, 接受从低绿片岩相到麻粒岩相区域性递增变质作用改造。

5 结 论

(1) 变质基性岩中矿物组合的渐进转变、前进变质反应结构及计算的温度压力的逐渐增加均支持本区麻粒岩属于递增变质成因的观点。而晚期的近等压冷却退变质作用是在构造相对比较稳定的环境下与大量岩浆侵入下地壳冷却有关。

(2) 高级区变质表壳岩和低级区绿岩带在岩石组合、岩石化学、地球化学和变质作用演化等方面所表现出的相似性, 有力地支持它们属于同一火山-沉积单位的认识, 只是在接受递增变质时所处的构造位置不同。绿岩带处在中-上部地壳环境, 而麻粒岩处在下部地壳环境。

(3) 早元古代大规模自西北向南东的推覆作用, 不仅使太古代低级变质地壳得以保存, 同时也是太古代麻粒岩抬升的主要原因。

参 考 文 献

- 孙德育, 周永辉, 张履桥, 斯日格楞. 1987. 内蒙古固阳西花岗岩-绿岩地体韧性剪切带特征, 世界地质 (构造地质学专辑), 110~126
- 卢良兆. 1991. 内蒙古集宁地区太古宙麻粒岩相变质作用的 PT 轨迹及其大地构造意义, 岩石学报, (4), 1~12
- 刘喜山, 李树勋, 张履桥. 1987. 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, 6, 306~316
- 刘喜山. 1994. 大青山造山带中基底再造杂岩的特征及其指示意义, 岩石学报, (4), 413~427
- 刘喜山, 李树勋, 金巍. 1994. 大青山造山带内基底再造杂岩叠加变质作用特征. 见: 钱祥麟, 王仁民主编, 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 100~110
- 李树勋, 刘喜山, 张履桥. 1987. 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): 81~102
- 耿元生, 吉成林. 1994. 河北怀安东洋河地区石榴基性麻粒岩的变质演化. 见: 主编钱祥麟, 王仁民主编, 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 89~100
- 崔文元, 王长秋, 王时麒. 1991. 辽西太古代建平变质杂岩的地球化学和变质作用的 PT 轨迹, 岩石学报, (4): 13~27
- Bohlen S R, Mezger K. 1989. Origin of granulite terranes and the formation of the lower most continental crust. *Science*, 244: 326~329
- Harley S L. 1989. The origins of granulites; a metamorphic perspective. *Geol. Mag.*, 126: 215~247
- Liu Xishan, Ji Wei and Li Shuxun. 1993. Two types of precambrian high-grade metamorphism. *Inner Mongolia, China. J. Metamorphic Geol.*, 11: 499~511
- Plyusina L P. 1982. Geobarometry and geothermometry of plagioclase-hornblend-bearing assemblages. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80: 140~146
- Sandiford K and Powell R. 1986. Deep crustal metamorphism during continental extension; ancient modern examples. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79: 151~158
- Schenk V. 1984. Petrology of felsic granulites, metapelites, metabasites, ultramafics and metacarbonates from southern Calabria (Italy): prograde metamorphism, up lift and cooling a former lower crust. *J. Petrology.*, 25: 255~298
- Selverstone J and Chamberlain C P. 1990. Apparent isobaric cooling paths from granulites; two counter examples from British

- columbia and New Hampshire. *Geology*, 18: 301~310
- Spear F S. 1993. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineralogical Society of America, Washington, 13~24
- Van Reenen D D, Roering C, Brandl G, Smit C A and Barton J M. 1990. The granulite facies rocks of the limpopo belt. Southern Africa. In Vielzeuf D, Vidal Ph (eds), *Granulites and Crustal Evolution*. Academic Publishers, 257~289
- Windley B F. 1981. Phanerozoic granulites. *J. Geol. Soc. London*, 138: 745~751
- Yardley B W D. 1989. *An Introduction to Metamorphic Petrology*. Longman Scientific and Technical. Singapore, 49~51