

中朝克拉通北部早前寒武纪变质作用演化的 三种主要样式及其地质动力学

卢良兆 徐学纯 董永胜

(长春科技大学地球科学学院)

摘 要 中朝克拉通北部早前寒武纪变质作用演化及其 $P-T-t$ 轨迹主要有三类样式: 第一类以内蒙古集宁—怀安太古宙高级区为代表, $P-T-t$ 轨迹表现为顺时针形式, 峰期温压高达 $800^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$, $0.90\text{GPa}\sim 1.00\text{GPa}$, 峰期后为大幅度等热减压, 反映了板块碰撞造山带的陆壳成倍构造增厚和后期拉张减薄机制; 第二类以冀东—辽西太古宙高级区为代表, $P-T-t$ 为逆时针形式, 早期增温为主, 峰期温压均较高, 峰期后为近等压冷却过程, 它们反映地壳因岩浆底侵而增厚的动力学机制; 第三类以辽东—吉南早元古代变质地带为代表, $P-T-t$ 轨迹亦为逆时针, 但特征是早期增压明显, 继之以近等压增温, 峰期为中低压, 峰期后近等压冷却, 这类样式反映了较稳定陆块壳内裂隙区的闭合过程。

关键词 $P-T-t$ 轨迹 地质动力学 中朝克拉通

分类号 P581

变质作用演化样式及其 $P-T-t$ 轨迹能有效地反映大地构造环境及各种地质动力学机制, 它们是变质地质学的研究前沿, 尤其是早前寒武纪变质作用的构造体制研究近年来引起了更大的重视。中期克拉通北部早前寒武纪变质杂岩广泛出露, 可划分若干变质地区(图1)。本文研究其中的集宁—怀安、冀东—辽西和辽东—吉南这三个典型地区的变质作用演化和 $P-T-t$ 轨迹样式及其所反映的不同构造环境和地质动力学。

1 集宁—怀安太古宙高级区

该区位于鄂尔多斯地块北部, 为南蒙太古宙麻粒岩相带的东段(图1), 出露的变质杂岩以晚期太古代孔兹岩系为主^[1], 主要由含石榴黑云变粒岩—浅粒岩和富夕线石榴钾长片麻岩及大量S型花岗岩组成。原岩为含—富含粘土质长石杂砂岩夹粘土岩, 属于半稳定陆块内浅海相沉积; 分布于怀安地区的杂岩系以浅色麻粒岩和辉石黑云斜长片麻岩为主, 夹夕线石榴片麻岩等, 原岩以斜长花岗质侵入岩为主, 夹火山沉积岩, 形成于陆块中活动性较大的边缘带。经作者近年详细研究^[1,2]认为这两套岩系不是基底和盖层关系, 而是同时异相, 且发现彼此具有相同

本文1997年12月收到。

第一作者简介: 卢良兆, 男, 67岁, 教授, 博士生导师。研究方向为前寒武纪变质地质动力学。通讯地址: 长春市长春科技大学地球科学学院, 邮政编码: 130026。

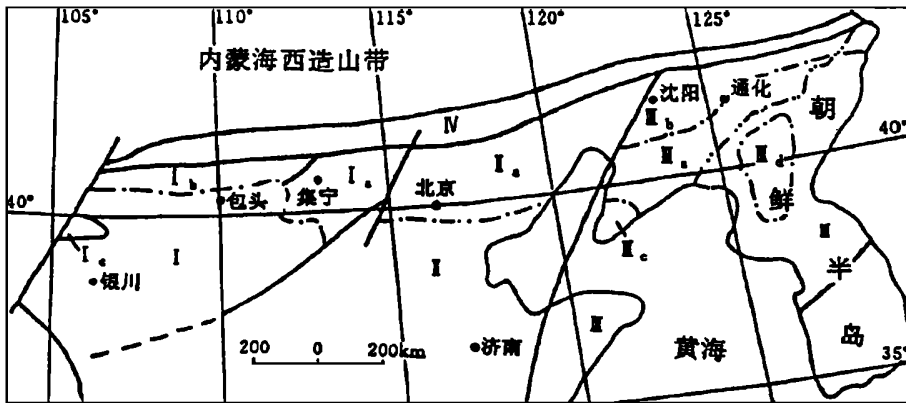


图1 中朝克拉通北部早前寒武纪变质地区(带)划分

Fig 1 Division of early Precambrian metamorphic terrain (belt) in northern Sino-Korea Craton

- I. 鄂尔多斯地块: Ia 集宁—怀安太古宙变质地区, Ib 大青山—乌拉山太古宙变质地区,
Ic 贺兰山—千里山太古宙变质地区; II 华北地块: IIa 冀东—辽西太古宙变质地区;
III 胶辽地块: IIIa 辽东—吉南早元古代变质地带, IIIb 龙岗太古宙变质地区,
IIIc 辽南太古宙变质地区, IIId 狼林太古宙变质地区; IV. 阴北—冀北早元古宙变质地带

的变形和变质作用演化样式及历史,其全过程发生于2 500Ma~1 900Ma之间,包括五期构造变形(D₁~D₅)和六个阶段变质作用(M₁~M₆)。通过本区富铝片麻岩和基性变质岩中矿物的演化和变形-变质序列的研究,结合大量矿物对温压计资料确定其PTt轨迹为顺时针形式(图2)。

D₁为本区最早期顺层剪切和韧性变形作用,发生于变质作用M₁之前至初期,形成一系列构造成分层和面理S₁,它们由低温矿物组成,因目前岩石中仅偶然见及,无法详细研究,故图中未表示。进变质M₂阶段形成的特征组合为Ky+Alm+Bt+Pl+Qz和Cpx+Hb+Pl,估算温度600℃~650℃,压力0.70GPa~0.80GPa,为中高压低角闪岩相。与此同时本区主期构造变形D₂形成一系列轴向NEE的平卧褶皱和推覆体及透入性片理S₂,为目前变质岩中主要片理。

变质峰期M₃阶段富铝片麻岩中的特征组合为Sil+Grt+Bt+Kfs+Pl+Qz,基性变质岩中则为Grt+Opx+Cpx+Hb+Pl,属于中高压麻粒岩相,估算温度800℃~850℃,压力为0.90GPa~1.00GPa。与其大体同时的D₃,为较宽缓的S₂片理褶皱,片理S₃一般不发育。

变质峰期后的PT变化第一阶段(M₄)以降温后又重新增温为特征,表现为片麻岩中Grt转变为不定向的Bt₂,后者接着又转变为纤状夕线石(Sil₂)。估算的这阶段温度700℃~750℃,压力0.70GPa~0.80GPa,均低于M₃阶段,故上述纤状夕线石化主要应与水活度降低有关^[2]。接着出现等热减压阶段M₅,特征是富铝片麻岩中Grt转变成Cr₂SiO₅或Cr₂SiO₅+Opx±Cum。基性麻粒岩中则石榴石周围被蠕状交生的Opx+Pl冠状体所环绕。这些均属典型的减压反应。估算的这阶段温度为600℃~700℃,压力0.50GPa左右。发生于M₄~M₅阶段的D₄和D₅为局部叠加的片理褶皱及晚期韧性变形带的形成,它们对变质作用影响不大。

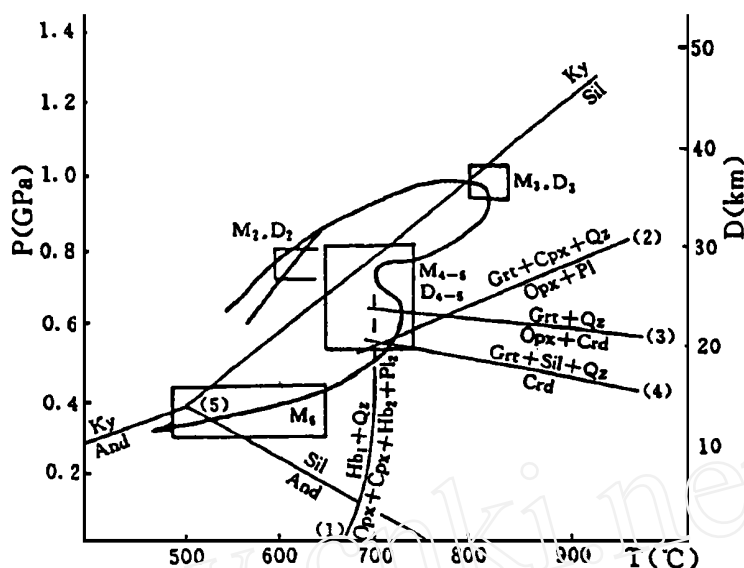


图2 集宁—怀安地区变质作用 PTt-D 轨迹

Fig. 2 Early Precambrian metamorphic PTt-D path of Jining-Huaian district

M ~ M₆为变质作用的演化阶段, D ~ D₅为构造变形期, 粗线为 PTt-D 轨迹。

变质反应(1) $\text{Hbl} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Opx} + \text{Cpx} + \text{Hb}_2 + \text{Pl} + \text{H}_2\text{O}$ (Binns, 1969);

(2) 橄榄拉斑玄武质原岩中 $(\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO}) = 0.40)$ 时 $\text{Grt} + \text{Cpx} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Opx} + \text{Pl}$ (Rinwood and Green, 1967);

(3) $\text{Grt} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Opx} + \text{Crd}$ ($X_{\text{Mg}}^{\text{岩石}} = 0.5$) (Hensen 和 Green, 1973);

(4) $\text{Grt} + \text{Sil} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Crd}$ ($X_{\text{Mg}}^{\text{Crd}} = 0.8$) (Weisbrod, 1973);

(5) A₂SD₅ 三相点 (按 Richardson 等, 1968; Mueller 和 Saxena, 1971 资料修改)

晚期降温退变质阶段(M₆)开始于辉石的角闪石化及石榴石中扩散环带的普遍发育, 估算的温度为590℃~650℃, 压力0.30GPa~0.40GPa。更晚期则还有细鳞片状黑云母及阳起石等低温矿物的出现。

图2说明本区孔兹岩系中PTt-D轨迹的样式是变质作用初期(M₂以前)较大幅度增压, 至M₂阶段地热梯度降到20℃/km左右, 这反映地壳较迅速地大幅度构造增厚。接着自M₂至M₃阶段则以大幅度增温为主, 反映构造作用减弱后, 在增厚地壳下部的地热增温过程。峰期压力条件表明沉积表壳岩当时已进入35km~40km深处, 形成中(高)压麻粒岩相组合。峰期后为典型的近等热减压过程, 且减压达0.50GPa左右。据有关研究资料^[3]分析, 这应与地壳中出现拉张体制和构造减薄作用有关。本区在此过程还有广泛的深熔花岗质岩浆上升, 其热效应使等热减压过程更为典型, 并出现一套低压麻粒岩相组合的叠合, 此后随岩浆冷却和结晶而大幅度降温。这种PTt-D轨迹样式反映板块碰撞造山带构造演化全过程的各种地球动力学机制^[4]。结合区域地质研究表明, 包括本区的鄂尔多斯地块北部太古宙麻粒岩相带早前寒武纪的构造演化与此相似, 晚太古代为较稳定陆缘, 主要形成一套孔兹岩系的原岩建造, 其北侧固阳—武川一线以北为蒙古地块, 其南部为活动陆缘, 并形成一套火山-沉积建造, 两地块之间可能隔小洋盆(图3a)。太古宙末期两地块拼合和碰撞后, 进一步发生陆壳俯冲作用, 地壳成倍地构造增厚, 使孔兹岩系原岩部分进入地壳下部深处, 发生中高压麻粒岩相变质(图3b)。至早元古代,

全区出现新的拉张体制,在本区表现为地壳构造减薄和回返隆升作用,导致减压和深熔作用和低压高温变质阶段的叠加(图 3c, d), 至早元古代末期稳定化成为麻粒岩相高级区。

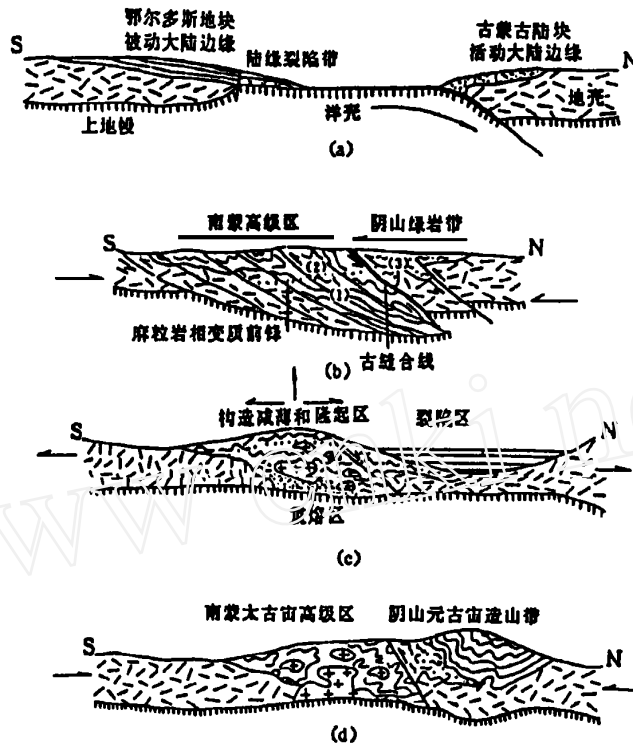


图 3 内蒙古中南部早前寒武纪构造演化

Fig. 3 Early Precambrian tectonic evolution of central-south portion of Inner Mongolia

(a) 晚太古代阶段(2 800Ma~2 600Ma); (b) 太古宙末—早元古代初期(2 600Ma~2 400Ma):

(1) 深部麻粒岩相变质, (2) 浅部角闪岩相变质, (3) 绿岩带低压低角闪岩相-绿片岩相变质;

(c) 早元古代中晚期(2 300Ma~2 000Ma?), (d) 早元古代末期(2 000Ma~1 900Ma)

2 冀东—辽西太古宙高级区

该区位于华北太古宙地块的北部(图 1), 区内虽有一些早、中太古代地壳的残块^[5], 但以晚太古代灰色片麻岩为主, 原岩为多期侵入的 TTG 杂岩及其它花岗质岩石, 它们在变质杂岩中的相对含量随当时所处的地壳深度而大幅度增加。地球化学研究^[5, 6]表明它们大多数是硅铝壳或更古老的灰色片麻岩深熔作用的产物。部分英云闪长岩和奥长花岗岩则为地壳内基性岩部分熔融成因, 只有少数灰色片麻岩的岩浆可能来源于亏损上地幔。变质表壳岩总体只占很次要地位⁶, 且主要集中于地壳剖面上部的岩系(如单塔子群)中, 以变质中酸性火山-沉积建造为主。此外最特征的是虽规模不大但遍及全区的变质基性顺层侵入体和部分火山岩及岩墙群, 地球化学特征表明其来源于亏损上地幔。

本区太古宙存在多期变质作用, 但以晚太古代变质事件具有最普遍和重要意义。其产状特征是变质强度随深度增大, 即与地壳剖面一致, 如冀东的迁西—遵化一带位于后期东西向隆起

区轴部, 出露地壳中相对较深构造层次的岩石, 它们即以花岗质岩石为主, 变质作用达麻粒岩相。此带在晚太古代经历了三期构造变形($D_1 \sim D_3$)和三个阶段变质作用($M_1 \sim M_3$)。 D_1 为压缩体制下的近水平剪切作用, 目前仅残留一些层内流变褶皱, S_1 见于局部石榴石变斑晶中; D_2 与变质峰期 M_2 同时, 是本区主期褶皱作用, 并形成透入性片理 S_2 ; D_3 为 M_3 之后的更晚期的东西向宽缓褶皱, 与变质作用关系不大。对基性变质岩的重点研究表明早期 M_1 阶段的平衡组合为 $Hb + P1$, 它们常残存于峰期辉石晶体中。峰期 M_2 阶段的平衡组合为 $Opx + Cpx \pm Hb + P1$ 或 $Cpx + Grt \pm Hb + P1$ 。峰期后 M_3 阶段常见到石榴石环绕峰期斜方辉石构成“红眼圈”, 说明普遍存在 $Opx + P1 \rightarrow Grt + Cpx + Qz$ 的反应, 这在密云地区最为典型。与此同时, 辉石普遍角闪石化。

据以上矿物变化序列和各种地质温压计数据构筑的 $PT-t-D$ 轨迹为逆时针形式(图4)。其进变质阶段 PT 迹线较平缓, 说明增温比增压更为迅速, 估算的 M_1 阶段温度 $650^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$, 压力 $0.50\text{GPa} \sim 0.60\text{GPa}$ 。峰期 M_2 的温度为 800°C 左右, 压力约 0.80GPa , 形成麻粒岩相组合。峰期后为较典型的等压冷却过程, 至 M_3 阶段温度降到 700°C 以下, 压力仍为 0.80GPa 左右, 由于 PT 迹线此时穿越图4的反应线(2), 故 Opx 常转变为 Grt , 形成红眼圈构造。辉石转变为晚期角闪石则与 PT 迹线穿越反应线(1)有关。

逆时针 $PT-t$ 轨迹通常认为是与地壳因岩浆底侵而垂向增厚这种地质动力学机制有关^[7], 前文已表明花岗质岩浆作用确是本区太古宙陆壳生长和演化的主要机制。虽幔源花岗质岩浆的加入可能是次要的, 但幔源基性岩浆底侵可能仍是重要的地质动力学机制, 它们诱发了广泛的壳内花岗质岩浆作用和高温变质作用。据此分析本区 $PT-t$ 轨迹在进变质($M_1 \sim M_2$)阶段不断增温可能即与基性

岩浆底侵所带入的热量有关, 而压力的缓慢增加则是地壳因岩浆物质加入和压缩体制下两幕构造作用的联合效应。峰期后的等压冷却过程说明当时地体未较快地回返抬升。一段时间内仍处于 30km 左右深处, 较合理的解释是当时地壳虽有所增厚, 但添加到深部的物质以密度较大的镁铁质岩石为主, 硅铝壳虽反复改造, 但并未大幅度增厚, 所以没有出现重力均衡作用所诱发的地体大幅度回返抬升。

通常认为地壳因岩浆底侵而增厚的构造环境为活动陆缘的岩浆岩带, 它们与板块构造相

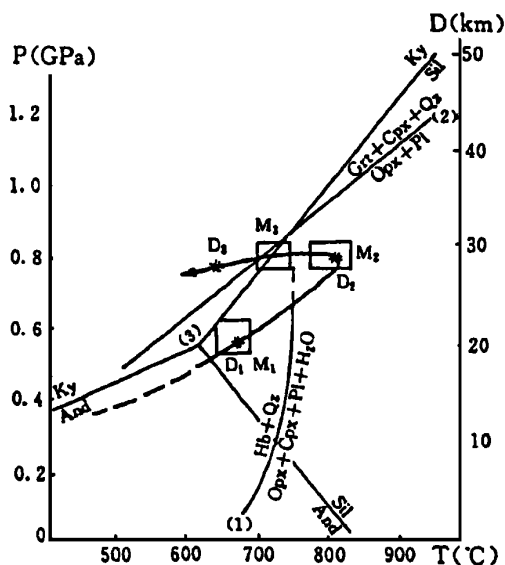


图4 冀东—辽西地区变质作用 $PT-t-D$ 轨迹

Fig. 4 Early Precambrian metamorphic $PT-t-D$ path of eastern Hebei and western Liaoning district. 方框 M_1 , M_2 , M_3 分别为变质作用三个阶段的 PT 区间, 带箭头的粗曲线为 $PT-t-D$ 轨迹。 D_1 , D_2 , D_3 为三幕构造变形作用。变质反应平衡线: (1) $Hb + Qz \rightarrow Opx + Cpx + P1 + H_2O$ (Binn's, 1969); (2) $Opx + P1 \rightarrow Grt + Cpx + Qz$ (岩石中 $Fe/(Fe + Mg) \approx 0.4$) (Green and Ringwood, 1967); (3) $A l S D s$ 三点相 (Richardson, 1968)

联系^[8]。虽本区的岩石组合特征与其相似,但非明显的带状分布,从华北地块目前总的构造框架来看也难以确定本区当时是否相当于显生宙活动陆缘。近来一些研究者提出大陆上的花岗岩区可能与地幔柱上升有关,本区太古宙长期以大量花岗质岩浆活动为特征,幔源镁铁质顺层侵入岩相当普遍。研究还表明当时厚达 50km~60km 的地壳未因重力均衡作用而回返,很可能其下部有大量高密度的镁铁质岩石。这些迹象表明地幔柱上升这种地球动力学机制也可能适用于本区,值得进一步研究。

3 辽东—吉南早元古代变质地带

该区位于胶辽地块北部的辽东和吉林省南部,北邻龙岗太古宙陆块,南侧则存在辽南和北朝鲜地狼林太古宙变质地区。全区早元古界按变质岩石组合和原岩建造可分两大类型^[9],第一类变质岩系大面积广泛分布,相当于南辽河群和集安群。主要由含少量黑云母、角闪石或透辉石的变粒岩—浅粒岩组成,夹含石墨黑云变粒岩、富铝片麻岩和片岩、各种斜长角闪岩、大理岩及钙镁硅酸盐岩石,主体变质岩的原岩为含少量泥质、泥灰质杂质的细粒长英质碎屑岩,火山岩极次要,应为较稳定古陆硅铝壳内裂隙区的浅海相沉积建造。第二类变质岩系以北辽河群(和老岭群)为代表,成带状局部分布。主要由千枚岩—二云片岩、浅粒岩及块状白云质大理岩组成,原岩为页岩—粉砂岩、石英岩和钙镁碳酸盐沉积,应形成于当时古陆内构造更稳定的浅海区。

这两套沉积建造均形成于 2 400Ma~2 200Ma 之间,总体为同时异相。它们在 2 000Ma~1 900Ma 之间经历了基本相同的变形和变质作用。形成以营口—宽甸一带为热轴的大型热背斜,变质带明显,轴部为高角闪岩相,南北两翼为低绿片岩相。其全过程经历了压缩体制下的三期构造变形(D₁~D₃)和五阶段变质作用(M₁~M₅)。据集安群和南辽河群富铝变质岩的岩相学、显微构造和成因矿物学研究,结合各种地质温压计资料确定的变质作用 PT-t-D 轨迹如图 5 所示。

图中表明 M₁ 和 D₁ 同时,形成近东西向褶皱及片理 S₁,特征组合为 Mus+ Bt ± Chl ± Pyp+ P1+ Qz,属于低绿片岩相,估算的 M₁ 温度为 400℃~500℃,压力为 0.28GPa 左右。主期构造变形作用 D₂ 是叠加于 F₁ 之上的紧密同斜至平卧褶皱,同时发育透入性片理 S₂,M₂ 发生于 D₂ 晚期—期后,特征组合为 And+ Alm+ Crd+ Bt+ Mus+ P1+ Qz。由于还曾见 Sil 和 And 平衡共生,说明当时 PT 条件应在 And-Sil 反应线附近的 And 一侧。又因岩石中 Alm+ Bt 代替 Chl+ Mus 及 Crd+ Alm 代替 Chld 出现,另一方面 Mus+ Qz 普遍稳定,还偶见 Stau+ Mus+ Qz 组合,据图 5 中有关临界反应线的综合分析, M₂ 的温度为 550℃~600℃,压力为 0.35GPa~0.45GPa 左右。

本区变质峰期可分为 M₃ 和 M₄ 两阶段, M₃ 的特征组合为 Sil+ Grt+ Crd+ Kfs+ P1+ Qz,表示当时 PT 条件在反应线(4)和(5)的右侧和(6)的下方。M₄ 和 D₃ 同时,岩石中发育不均匀的剪切叶理 S₃,其附近黑云母变形并纤状夕线石化,石榴石成透镜状,表明温度的进一步升高。按以上矿物共生和转变的临界反应曲线及地质温压计资料, M₃~M₄ 阶段温度应在 700℃~750℃,更接近 700℃,压力为 0.50GPa~0.60GPa。

本区富铝片麻岩中从未见峰期石榴石转变为堇青石现象,说明峰期后不存在明显减压反应。相反从 Grt 中心向边缘 Ca 常增加,共生的 P1 中则出现 Ca 降低的正环带。按 Spear 等(1992)的研究和图解^[10]分析, M₄ 至 M₅ 应为近等压的降温过程。应用 GA SP 压力计和 Grt-Bt

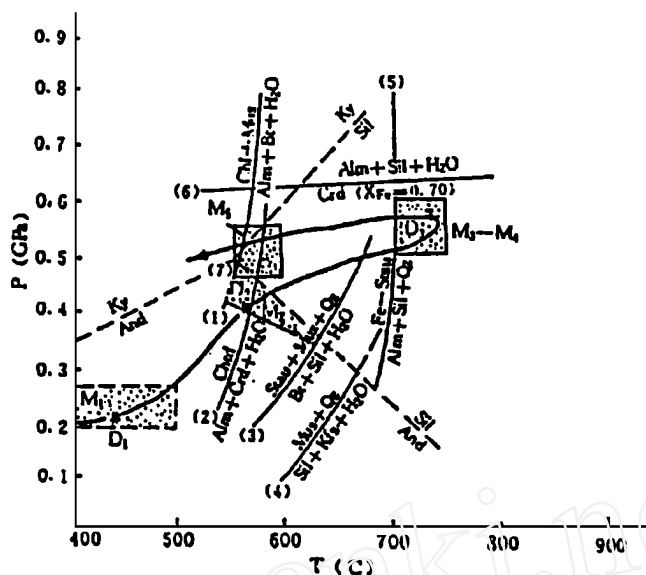


图 5 辽吉早元古代变质作用的 PT-t-D 轨迹

Fig. 5 Early Proterozoic metamorphic PT-tD path of eastern Liaoning and southern Jilin district
 $M \sim M_5$ 为各变质阶段的 PT 范围, $D \sim D_3$ 为三幕变形作用的相对时间, 带箭头粗线为 PT-tD 轨迹, 变质反应:

- (1) $\text{Chl} + \text{M us} \rightarrow \text{A lm} + \text{Bt} + \text{H}_2\text{O}$ (Thompson, Norton, 1968), (2) $\text{Chld} \rightarrow \text{A lm} + \text{Crld} + \text{H}_2\text{O}$ (Ganguly, 1969),
 (3) $\text{Stau} + \text{M us} + \text{Q z} \rightarrow \text{Bt} + \text{Sil} + \text{H}_2\text{O}$ (Hoschek, 1969), (4) $\text{M us} + \text{Q z} \rightarrow \text{Sil} + \text{Kfs} + \text{H}_2\text{O}$ (Day, 1973),
 (5) $\text{Fe-Stau} + \text{Q z} \rightarrow \text{A lm} + \text{Sil} + \text{H}_2\text{O}$ (Richardson, 1968), (6) $\text{A lm} + \text{Sil} + \text{Q z} \rightarrow \text{Crld}$ (Currie, 1971),
 (7) $\text{A l}_2\text{SD}_5$ 三相点 (据 Richardson 等, 1968)

温度计估算的M₅阶段温度为550°C~600°C, 压力则仍在0.45GPa~0.55GPa左右

前文原岩建造的研究已说明它们形成于陆壳内凹陷区, 与较稳定陆壳的缓慢拉张和减薄有关(图 6a), 但根据构造变形样式分析, 变质作用主要在后期压缩体制下进行, 其 $P-T$ 轨迹为逆时针, 特征是进变质早期压力增加相对较快, 这是由于 D_1 和 D_2 这两期构造堆垛作用使包括新沉积表壳岩和已减薄基底在内的陆壳总厚度重新增大, 相伴的增温与较正常的地热梯度有关。至 M_2 阶段表壳岩最大构造埋深已达 15km 左右, 压力为 0.40 GPa, 温度在 600°C 左右, 深部形成中低压低角闪岩相组合, 浅部为绿片岩相(图 6b)。

从M₂到M₃阶段为近等压增温, 压力变化不大表明地壳的缩短和厚度回增作用此时已基本结束, 但温度却继续增到700℃, 在热轴地区形成高角闪岩相组合(图6c)。这阶段的增温很难再与所处深度的增加相联系, 而应和深熔岩浆上升有关, 同变质的壳源花岗岩广泛分布于热轴区与此完全吻合。热背斜两翼及北辽河群分布区缺少这期花岗岩, 故一般为绿片岩相变质。对压缩体制下的地壳温度异常升高, Loosveld等^[11]提出一种新的地质动力学假说, 认为是在地壳增厚的同时, 上地幔亦局部增厚并下垂, 以致被软流圈吞噬(图6b, c), 结果使后者的顶面局部上升, 在岩石圈底部局部引起高温和深熔作用, 上升的岩浆又导致浅部的低压高温变质作用。这种机制也可能适用于本区。

变质峰期后为等压冷却过程,这说明经侧向压缩之后,本区硅铝壳并未超厚,所以没有出现反映地体块速回返的等热减压(ITD)轨迹,这是本区与典型板块碰撞造山带的本质区别。其原因可能是本区陆壳前期减薄和后期构造增厚的幅度基本相似,互相补偿,所以构造作用停止。

并达温度高峰期后,已位于 10 余公里深处的表壳岩仍停留于这一深度,只是随侵入岩浆的冷凝和结晶作用,温度大幅度降低。这些岩石的出露地表可能与中晚元古代的另一构造事件有关。总之这种样式的 $PTt-D$ 轨迹是反映较稳定陆块壳内裂隙带的闭合过程。

4 几点认识

(1) 本文所研究的三个典型变质地区分属于不同的地块(图 1)。其变形-变质作用演化和 $PTt-D$ 轨迹样式完全不同,反映彼此不同的构造环境和地质演化历史。而同属鄂尔多斯地块的集宁—怀安、大青山—乌拉山和贺兰山—千里山等变质地区,则与 $PTt-D$ 轨迹样式十分相似,同属胶辽地块的辽东—吉南和胶东早元古代变质带也是如此。这暗示中朝克拉通太古宙时不是统一的整体,而是存在独立的鄂尔多斯、华北、胶辽等陆块,它们可能于太古宙末才初步以各种方式拼合。

(2) 西起贺兰山北段,经内蒙南部、冀西北、冀东至辽西的太古宙麻粒岩相变质带亦非属于东西向的同一构造单元,其西段南蒙孔兹岩系——麻粒岩系地区与非洲 Limpopo 带很相似,其构造与板块体制碰撞造山带相联系;而其东段冀东—辽西灰色片麻岩高级区则与北美 Adirondack 和南极 Enderby Land 等麻粒岩区相似,与岩浆底侵引起的地壳增厚有关,这说明下地壳麻粒岩相变质作用成因也有多样性。

(3) 本文确立的辽东—吉南早元古代变质作用的 $PTt-D$ 轨迹对于表述较稳定陆壳内裂隙带的发育和闭合过程可能有特殊指示意义。它与冀东—辽西地区的太古宙 $PTt-D$ 轨迹虽同为逆时针形式,但样式不同,反映的构造环境也完全不同,所以不能单靠 $PTt-D$ 轨迹顺时针或逆时针这两种基本形式来判断构造环境和地质动力学机制,必须重视其具体样式及区域变质地质背景,应结合它们进行综合分析。

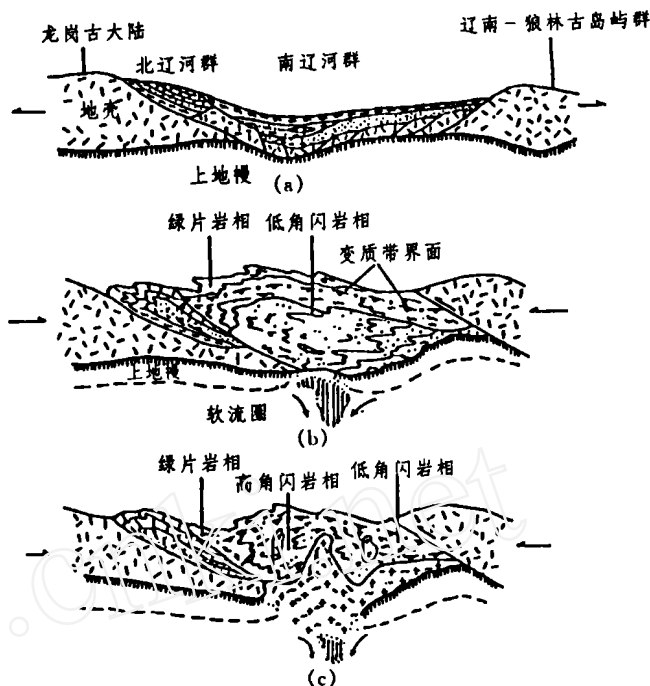


图 6 辽东—吉南早元古代构造演化

Fig. 6 Early Proterozoic tectonic evolution of eastern Liaoning and southern Jilin district

- (a) 早元古代早-中期(2 400Ma ~ 2 200Ma) 沉积建造形成阶段,
(b) 早元古代末变质作用前期(M₁ ~ M₂) 阶段(2 000Ma ~ 1 900Ma),
(c) 变质作用高峰期(M₃ ~ M₄) 阶段(1 900Ma ~ 1 800Ma). 解释见正文

本文矿物代号: A ln-铁铝榴石, A n-钙长石, A nd-红柱石, B t-黑云母, Chl-绿泥石, Chtd-硬绿泥石, Cpx-单斜辉石, Crd-堇青石, Cum-镁铁闪石, Crt-石榴石, Grs-钙铝榴石, Hb-普通角闪石, Kao-高岭石, Kfs-钾长石, Ky-兰晶石, Mus-白云母, Opx-斜方辉石, Pl-斜长石, Pyp-叶腊石, Qz-石英, Stau-十字石, Ser-绢云母, Sil-夕线石

参 考 文 献

- 1 卢良兆, 靳是琴, 徐学纯, 刘福来. 内蒙东南部早前寒武纪孔兹岩系成因及含矿性. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992. 1~46.
- 2 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 1996. 1~69.
- 3 Harley S L. The origin of granulites: a metamorphic perspective. *Geol. Mag.* 1989, 126: 215~247.
- 4 England P, Thompson A B. Pressure-temperature-time parths of regional metamorphism, I-heat-transfer during the evolution of regions of thickened continental crust. *Jour. Petrol.* 1984, 25: 894~928.
- 5 伍家善等. 华北陆台早前寒武纪重大地质事件. 北京: 地质出版社. 1992.
- 6 贺高品, 卢良兆等. 冀东和内蒙古东南部早前寒武纪变质作用演化. 长春: 吉林大学出版社, 1991, 1~63.
- 7 Wells P R A. Thermal models for the magmatic accretion and subsequent metamorphism of continental crust. *Earth Planer. Sci. Lett.* 1980. 46: 253~165.
- 8 Bohlen S R. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *Jour. Geol.* 1987. 95: 617~682.
- 9 Lu L iangzhao. The Precambrian metamorphic geology and tectonic evolution of the Jiao-Liao Massif. *Jour. Changchun University of Earth Sciences, Spe.* 1996, 26: 25~32.
- 10 Spear F S, Florence F P. Themobarometry in granulites: Pitfalls and new approaches. *Precambrian Res.* 1992, 55: 209~241
- 11 Loosveld R J H. A model for low pressure facies metamorphism during crustal thickening. *Jour. Geol.* 1990, 8: 257~267

THREE MAIN STYLES OF EARLY PRECAMBRIAN METAMORPHIC EVOLUTION IN NORTHERN SINO-KOREA CRATON AND THEIR GEODYNAMICS

Lu L iangzhao Xu Xuechun Dong Yongsheng

(Changchun University of Science and Technology)

Abstract The northern portion of Sino-Korea Craton consists of four independent blocks and each includes several metamorphic terrains or belts. Three styles of early Precambrian metamorphic evolution and their PT-tD paths have been distinguished in these terrains.

The first style was found in Jining-Huai'an Archean high-grade terrain of Inner Mongolia. This district is characterized by widespread Al-rich para-gneiss (Khondalite suite) and some hypersthene plagioclase gneisses of granulite facies. They were subjected to five episodes of tectonic deformation and six stages of metamorphism from 2.6Ga to 1.9Ga. The mineral paragenesis and transformation of Al-rich gneisses in the whole process of metamorphism show a trend of $Ky-Sil+Grt+Bt+Kfs \rightarrow Crd \pm Opx \rightarrow And$. The metamorphic PT-tD path of this terrain is clockwise with $T = 800^{\circ}C \sim 850^{\circ}C$, $P = 0.90GPa \sim 1.00GPa$ in its peak

stage and a typical isothermal decompression (ITD) process in post-peak stage. It reflects double thickening of crust by geodynamic process such as A-subduction and tectonic stacking in a collisional belt, followed by tectonic thinning and uplifting in the later stage.

The second style has been established in eastern Hebei-western Liaoning Archaean high-grade terrain which is mainly composed of late Archaean grey gneiss (TTG intrusions) and other granitic rocks with Subordinate volcano-sedimentary supracrustal sequences and some layered basic intrusions. The mineral evolution of basic rocks in granulite-facies belt is characterized by assemblage of $\text{Opx} + \text{Cpx} + \text{Hb} + \text{Grt} + \text{pl}$ in its peak metamorphism with $T = 800 \sim 850^{\circ}\text{C}$, $P = 0.70 \sim 0.80\text{GPa}$, and extensive development of Grt corona around Opx or Cpx during its post-peak stage. All data give rise to a counter clockwise PT-t-D path with a nearly isobaric cooling process at its post-peak stage. It indicates the tectonic environment of vertical crustal thickening by magmatic accretion.

The third style of PT-t-D path was constructed in eastern Liaoning-southern Jilin early Proterozoic metamorphic belt. It was a rifted ensialic depression within the Jiao-Liao Massif during the middle stage of early Proterozoic with the formation of sedimentary sequences of shallow sea and continental shelf. By the end of early Proterozoic, they were subjected to three deformational episodes and five stages of metamorphism with the development progradal zones and a typical thermal anticline. Its axial area is characterized by high amphibolite-facies metamorphism. The mineralogic evolution in its Al-rich rocks is $\text{And} \rightarrow \text{Sil} + \text{Grt} + \text{Crd} \rightarrow \text{Ky}$. Its PT-t-D loop is also counter clockwise, but it is distinguished from the second style by rapid raising pressure in its early stage and succeeded by a nearly isobaric heating process and lower pressure ($0.50 \sim 0.60\text{GPa}$) in peak stage. Such PT-t-D path may be genetically related to the closing process of a rifted depression within a rather stable continental massif.

Key words: PT-t-D paths, metamorphic evolution, geodynamics, Sino-Korea Craton.