

密云太古宙变质岩的矿物转化及 PTt 轨迹

高 吉 凤

(中国地质科学院地质研究所, 100037 北京)

主题词 矿物间的转化 矿物成分的再调整 PTt 轨迹

提 要 本文通过某些矿物之间的转化及成分的变化, 研究变质反应的状态。将区内麻粒岩相变质作用划分为四个阶段, 并依据变质作用演化过程中的温度、压力的变化推定了 PTt 轨迹。

密云地区中一晚太古代变质岩系十分发育。长期以来一直把其中的层状岩系按地层对待, 并建立了密云群。近来, 随着工作的深入^[1,2], 认为原来的地层实际上有相当一部分属于英云闪长岩—奥长花岗岩系, 少部分属于由火山岩及火山沉积岩、沉积岩组成的表壳岩, 但缺

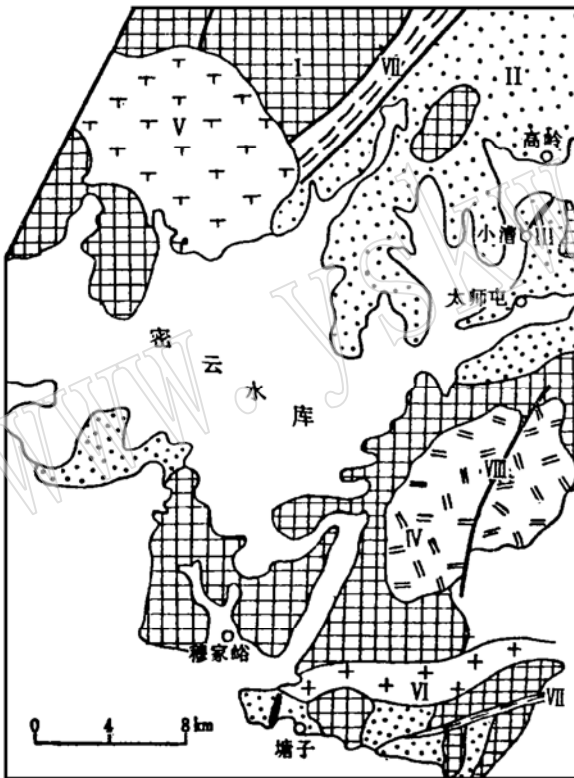


图 1 密云地区地质略图
(据长春地质学院北京密云地区地质考察说明书, 1988, 本文做了局部修改)
Fig. 1 Geological sketch map of Miyun area

I—英云闪长质—奥长花岗岩片麻岩; II—表壳岩; III—表壳岩中的磁铁石英岩; IV—二长花岗岩; V—正长闪长岩; VI—环斑花岗岩; VII—韧性断裂; VIII—断层

国家自然科学基金49070126资助项目。参加本项目野外工作的还有沈其韩、吉成林。
本文于1993年11月收到, 1994年1月改回。

乏完整的地层层序。表壳岩呈孤舟状分布在 TTG 岩系中 (图 1)。本区表壳岩主要是石榴角闪二辉斜长片麻岩、紫苏斜长片麻岩、石榴角闪透辉 (二辉) 斜长麻粒岩、斜长 (辉石) 角闪岩、辉石岩、磁铁石英岩等, 英云闪长质—奥长花岗质片麻岩主要包括石榴角闪斜长片麻岩、(石榴)透辉角闪斜长片麻岩等。本文仅从表壳岩的矿物转化入手, 结合野外地质特征对本区变质作用阶段进行了划分并推定其 PTt 轨迹。

1 变质矿物的转化及成分变化

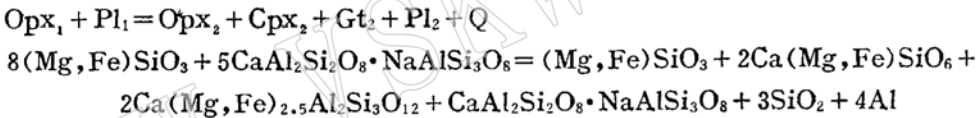
矿物之间的转化在进化及退化变质^[3]的变质反应过程中有明显表现, 但表现形式不同。在进变质中的早期矿物常常被掩盖, 少数是以包裹体形式在峰期共生矿物中保存下来, 而在区域退化变质作用中矿物间的转化则常以反应边及新生矿物的形式出现。

1.1 矿物包裹体

变质矿物并非一个世代形成的, 石榴石可分出四个世代, 透辉石不少于三个世代, 紫苏辉石为二个世代等等。从表 1 可知不同世代的同种矿物间的化学成分是不同的, 其中, 黑云母包裹体与非包裹体成分的 Al_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 TiO_2 、 FeO 、 MgO 不同 (表 1)。包裹体的 f 值 (56.49—57.28) 高于非包裹体 f 值 (52.25), 而 X_{Mg} 值恰恰相反, 含铝系数各不相同, 包裹体的偏低。透辉石与透辉石包裹体的 f 值、 X_{Mg} 值相似, 斜长石与斜长石包裹体的成分相似。由此看出, 变质作用对矿物成分的改造是受变质程度及矿物结构的制约。

1.2 反应边结构

反应边结构也是矿物转化之一。在片麻岩、麻粒岩中可见后成合晶——反应边现象, 紫苏辉石颗粒边缘凸凹不平, 周围被细粒紫苏辉石、透辉石、石榴石、石英、斜长石环绕, 有时还有绿色角闪石。反应边的变质反应为:



本文对反应边的组成矿物都进行了成分测试 (图 2 及表 2)。

从表 2 可知, 反应形成的各种矿物与峰期相应的矿物之间成分略有变化, 反应生成的紫苏辉石、透辉石的 f 值略有升高, X_{Mg} 值略低。石榴石的成分变化较复杂, 钙铁榴石的端员组分平均由 3.2 升为 8.1, 铁铝榴石组分平均由 45.2 增至 54.6, 锰铝榴石由 2.2 增至 2.6, 而镁铝榴石是由 28.1 降至 25.5, 钙铝榴石由 17.6 降至 8.8。上述成分的变化说明变质反应过程中温压条件变化不大。

1.3 在区域退变质中石榴石的成分变化

在条纹状含石榴石二辉斜长片麻岩中, 石榴石残留在以绿泥石为主有少量斜长石的集合体中, 集合体内部有零星分布的磁铁矿, 而在边部磁铁矿呈不完整的环状分布在绿泥石 (+斜

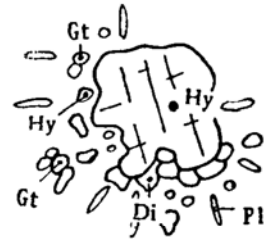


图 2 紫苏辉石反应边示意图
Fig. 2 Schematic diagram of reaction rim of hypersthene

●—探针测试位置 (表 2 中的 2—6 在图中未表示)

表 1 矿物包体成分的变化

Table 1 Compositional variation of inclusions in minerals

| | 黑云二辉斜长麻粒岩 | | | | | 石榴透辉角闪斜长片麻岩 | | | 角闪二辉斜长麻粒岩 | |
|--------------------------------|-----------|-------|-------|--------|-------|-------------|--------|-------|-----------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 黑云母包体 | 黑云母包体 | 黑云母 | 斜长石包体 | 斜长石 | 透辉石包体 | 透辉石 | 透辉石 | 斜长石包体 | 斜长石 |
| SiO ₂ | 35.16 | 37.74 | 37.77 | 60.78 | 63.08 | 50.67 | 47.95 | 50.69 | 61.09 | 62.08 |
| TiO ₂ | 4.69 | 3.24 | 3.24 | 0 | 0.02 | 0.42 | 0.77 | 0.41 | 0 | 0.10 |
| Al ₂ O ₃ | 12.65 | 15.38 | 17.21 | 24.34 | 22.55 | 4.08 | 5.75 | 3.10 | 21.06 | 22.56 |
| Cr ₂ O ₃ | 3.56 | 0.29 | 0.31 | 0 | 0 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.05 | 0.10 |
| FeO | 16.40 | 16.59 | 14.15 | 0.29 | 0 | 12.60 | 11.37 | 10.95 | 0.88 | 0.63 |
| MnO | 0.21 | 0.10 | 0 | 0 | 0.05 | 0.13 | 0.04 | 0.08 | 0.06 | 0 |
| MgO | 12.63 | 12.37 | 12.93 | 0.05 | 0.02 | 12.39 | 11.08 | 10.66 | 0.47 | 0.07 |
| CaO | 0.31 | 0 | 0.04 | 6.46 | 5.43 | 20.16 | 22.34 | 21.49 | 7.24 | 5.89 |
| N ₂ O | 0.08 | 0.06 | 0.03 | 7.85 | 7.09 | 0.94 | 0.07 | 1.57 | 7.45 | 7.84 |
| K ₂ O | 9.26 | 8.78 | 9.60 | 0.46 | 0.53 | 0 | 0 | 0 | 0.67 | 0.66 |
| 合计 | 94.94 | 94.50 | 95.28 | 100.22 | 98.77 | 101.44 | 100.07 | 98.97 | 98.97 | 99.94 |
| Si | 0.10 | 5.689 | 5.595 | 2.705 | 2.817 | 1.890 | 1.829 | 1.935 | 2.772 | 2.749 |
| Ti | 0.58 | 0.367 | 0.361 | 0 | 0.001 | 0.012 | 0.022 | 0.012 | 0 | 0.003 |
| Al ^{IV} | 1.90 | 2.311 | 2.405 | 1.277 | 1.187 | 0.110 | 0.171 | 0.065 | 1.126 | 1.177 |
| Al ^{VI} | 0.60 | 0.421 | 0.600 | | | 0.069 | 0.087 | 0.074 | | |
| Cr | 0.31 | 0.035 | 0.036 | 0 | 0 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | | |
| Fe | 2.28 | 2.091 | 1.753 | 0.011 | 0 | 0.393 | 0.363 | 0.350 | 0.033 | 0.023 |
| Mn | 0.03 | 0.013 | 0 | 0 | 0.002 | 0.004 | 0.001 | 0.003 | 0.002 | 0.002 |
| Mg | 2.25 | 2.78 | 2.855 | 0.003 | 0.001 | 0.689 | 0.630 | 0.607 | 0.032 | 0.005 |
| Ca | 0.05 | 0 | 0.006 | 0.308 | 0.260 | 0.806 | 0.913 | 0.879 | 0.352 | 0.344 |
| Na | 0.27 | 0.018 | 0.009 | 0.677 | 0.614 | 0.068 | 0.005 | 0.116 | 0.655 | 0.673 |
| K | 2.06 | 1.688 | 1.814 | 0.026 | 0.030 | 0 | | | 0.039 | 0.037 |
| Al ^I | 56.9 | 62.6 | 64.0 | | | 16.2 | 20.4 | 11.9 | | |
| f | 56.49 | 57.28 | 52.25 | | | 36.3 | 36.5 | 36.5 | | |
| X _{Mg} | 57.73 | 57.07 | 61.95 | | | 63.6 | 63.4 | 63.4 | | |
| An | | | | 30.5 | 28.7 | | | | 33.6 | 32.6 |
| Ab | | | | 67.0 | 67.9 | | | | 62.6 | 63.9 |
| Or | | | | 3.40 | 3.3 | | | | 3.7 | 3.5 |

样品顺序号 1、9 为紫苏辉石中的包体；2、4、6 为石榴石中的包体。

分析数据由地矿部测试所梁国立、阙松娇测定。

长石) 集合体的外围, 并仍保存着石榴石外形。石榴石成分在退变质中变得不太均匀(表 3)。斜长石 An 值为 29—31, 而石榴石反应后形成的斜长石 An 值为 58, 基性程度明显增高, 其原因有待进一步研究。

1.4 透辉石的转化

在片麻岩、麻粒岩中偶见透辉石残留在阳起石集合体中, 或者完全被阳起石代替并有微量磁铁矿、绿帘石及碳酸盐矿物生成, 绿帘石呈环边状围绕在集合体的外围(图 3),

表 2 紫苏辉石反应边的矿物成分变化
Table 2 Compositional variation of minerals in hypersthene reaction rim

| | 麻粒岩相峰期共生矿物成分 | | | | | | 反应边的矿物成分 | | | | |
|--------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|--------|-------|
| | Hy | Di | Pl | Gt | Gt | Hb | Gt | Gt | Di | Pl | Hy |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| SiO ₂ | 50.83 | 51.27 | 56.26 | 36.69 | 39.65 | 41.60 | 36.66 | 37.47 | 50.39 | 59.15 | 50.34 |
| TiO ₂ | 0.02 | 0.19 | 0 | 0 | 0 | 2.04 | 0.08 | 0.06 | 0.16 | 0.04 | 0.08 |
| Al ₂ O ₃ | 1.50 | 3.24 | 27.89 | 22.85 | 21.45 | 14.10 | 20.51 | 21.20 | 2.89 | 26.65 | 1.66 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.10 | 0.28 | / | 0.03 | 0.22 | 0.18 | 0.15 | 0.03 | 0.19 | | 0.07 |
| FeO | 24.45 | 12.06 | 0.17 | 24.38 | 21.71 | 14.32 | 27.17 | 27.67 | 10.99 | 0.21 | 23.62 |
| MnO | 0.35 | 0.14 | 0 | 1.34 | 0.71 | 0.13 | 1.21 | 1.13 | 0.14 | 0.02 | 0.52 |
| MgO | 21.35 | 11.25 | 0.03 | 6.87 | 7.72 | 10.74 | 7.17 | 5.92 | 10.52 | 0.05 | 21.55 |
| CaO | 0.47 | 19.26 | 6.78 | 7.34 | 7.98 | 11.26 | 6.11 | 6.19 | 22.63 | 6.61 | 0.53 |
| Na ₂ O | 0.08 | 0.84 | 7.25 | 0.05 | 0.35 | 1.31 | 0.07 | 0.05 | 0.92 | 7.15 | 0.05 |
| K ₂ O | 0 | | 0.20 | | | 1.50 | | | | 0.50 | |
| Σ | 99.15 | 98.53 | 98.58 | 99.60 | 99.79 | 97.18 | 99.13 | 99.72 | 98.83 | 100.38 | 98.42 |
| Si | 1.935 | 1.955 | 2.551 | 2.838 | 3.033 | 6.221 | 2.872 | 2.934 | 1.932 | 2.628 | 1.927 |
| Ti | 0.001 | 0.005 | 0 | 0 | 0 | 0.229 | 0.005 | 0.004 | 0.005 | 0.001 | 0.002 |
| Al ^{IV} | 0.065 | 0.045 | 1.490 | 0.162 | 0 | 1.779 | 0.128 | 0.066 | 0.131 | 1.395 | 0.075 |
| Al ^{VI} | 0.002 | 0.101 | | 1.922 | 1.934 | 0.706 | 1.765 | 1.890 | | | |
| Fe ²⁺ | 0.778 | 0.385 | 0.006 | 1.504 | 1.335 | 1.791 | 1.559 | 1.707 | 0.352 | 0.008 | 0.756 |
| Fe ³⁺ | / | / | 0.012 | 0.073 | 0.053 | / | 0.221 | 0.105 | | | |
| Mn | 0.011 | 0.005 | 0 | 0.088 | 0.046 | 0.016 | 0.080 | 0.075 | 0.005 | 0.001 | 0.017 |
| Mg | 1.212 | 0.640 | 0.002 | 0.792 | 0.880 | 2.394 | 0.837 | 0.691 | 0.601 | 0.003 | 1.230 |
| Ca | 0.019 | 0.787 | 0.329 | 0.608 | 0.654 | 1.804 | 0.513 | 0.519 | 0.930 | 0.315 | 0.022 |
| Na | 0.006 | 0.062 | 0.637 | 0.007 | 0.052 | 0.380 | 0.011 | 0.008 | 0.068 | 0.616 | 0.004 |
| K | / | / | 0.012 | / | / | 0.286 | / | / | / | 0.028 | / |
| Cr ³⁺ | 0.003 | 0.008 | / | 0.005 | 0.013 | 0.021 | 0.009 | 0.002 | 0.006 | | 0.002 |
| X _{and} | | | | 0.037 | 0.027 | | 0.110 | 0.052 | | | |
| X _{alm} | | | | 0.504 | 0.450 | | 0.524 | 0.569 | | | |
| X _{sp} | | | | 0.029 | 0.015 | | 0.027 | 0.025 | | | |
| X _{pyr} | | | | 0.265 | 0.297 | | 0.281 | 0.230 | | | |
| X _{grs} | | | | 0.165 | 0.187 | | 0.056 | 0.120 | | | |
| X _{ab} | | | 0.651 | | | | | | | 0.642 | |
| X _{an} | | | 0.337 | | | | | | | 0.328 | |
| X _{or} | | | 0.012 | | | | | | | 0.030 | |
| X _{Mg} | 60.87 | 62.4 | | | | | | | 63.1 | | 61.9 |
| f _{Fe} | 39.0 | 37.6 | | | | | | | 36.9 | | 38.6 |

$X_{Mg} = Mg / (Fe + Mg)$; $f_{Fe} = \Sigma Fe / (\Sigma Fe + Mg)$, 样品由中国地质科学院矿床所陈克樵测试。

表 3 石榴石退变中的新生长石的成分变化
Table 3 Compositional variation of neogenic
feldspar in degradation of garnet

| 矿物名称 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | 总计 | Si | Ti | Al _{IV} | Al _{IV} |
|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|-------|------------------|------------------|
| 反应前的矿物成分 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 斜长石 | 62.24 | 0.03 | 23.02 | / | 0.53 | 0.08 | 0.05 | 6.14 | 7.09 | 0.91 | 100.09 | 2.769 | 0.001 | 1.207 | 0 |
| 斜长石 | 62.80 | 0.04 | 21.71 | / | 0.11 | 0.07 | 0.04 | 6.08 | 7.94 | 0.24 | 99.03 | 2.813 | 0.001 | 1.146 | 0 |
| 斜长石 | 63.11 | 0 | 21.93 | / | 0.27 | 0.03 | 0.03 | 6.17 | 7.95 | 0.36 | 99.85 | 2.808 | 0 | 1.150 | 0 |
| 反应后的成分 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 石榴石 | 36.26 | 0.08 | 22.22 | 1.80 | 25.35 | 2.17 | 5.90 | 5.90 | 0.08 | 0 | 99.76 | 2.837 | 0.005 | 0.163 | 1.886 |
| 石榴石 | 36.72 | 0.12 | 22.49 | 0.07 | 27.31 | 1.84 | 5.82 | 6.04 | 0.04 | 0 | 100.45 | 2.852 | 0.007 | 0.148 | 1.911 |
| 斜长石 | 53.13 | 0 | 30.37 | 0 | 0.40 | 0.08 | 0.06 | 12.42 | 4.77 | 0.19 | 101.42 | 2.381 | 0 | 1.604 | 0 |
| 矿物名称 | Cr | Fe | Mn | Mg | Ca | Na | K | An | Ab | Or | X _{Mg} | Al _{IV} | Pyr | Sps | |
| 反应前的矿物成分 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 斜长石 | | 0.020 | 0.003 | 0.003 | 0.293 | 0.612 | 0.052 | 31 | 64 | 5 | | | | | |
| 斜长石 | | 0.004 | 0.003 | 0.003 | 0.292 | 0.630 | 0.014 | 29 | 69 | 2 | | | | | |
| 斜长石 | | 0.010 | 0.001 | 0.002 | 0.294 | 0.686 | 0.020 | 29 | 69 | 2 | | | | | |
| 反应后的成分 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 石榴石 | 0.111 | 1.659 | 0.144 | 0.688 | 0.495 | 0.012 | | | | | 29.1 | 59 | 24 | 17 | |
| 石榴石 | 0.004 | 1.774 | 0.121 | 0.674 | 0.503 | 0.006 | | | | | 28.4 | 57 | 23 | 20 | |
| 斜长石 | 0 | 0.015 | 0.003 | 0.004 | 0.596 | 0.415 | 0.011 | 58 | 41 | 1 | | | | | |

样品由中国地质科学院矿床研究所陈克樵测试。



图 3 阳起石的环边结构
Fig. 3 Rim texture of actinolite

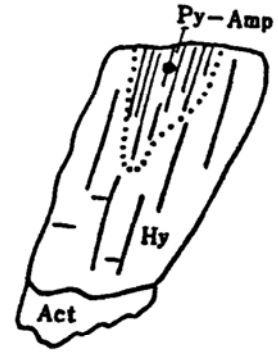


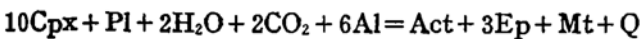
图 4 紫苏辉石转变为辉石-角闪石过渡型矿物
Fig. 4 Transformation of hypersthene into transitional pyroxene-amphibole

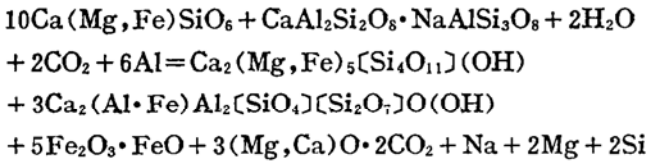
表 4 辉石转变成辉石-角闪石过渡型的成分变化
Table 4 Compositional variation during the transformation of pyroxene into transitional type pyroxene-amphibole

| | 含角闪石二辉斜长麻粒岩 | | 含磁铁矿透辉麻粒岩 | |
|--------------------------------|-------------|--------|-----------|--------|
| | 紫苏辉石 | 辉石-角闪石 | 透辉石 | 辉石-角闪石 |
| SiO ₂ | 51.82 | 53.14 | 52.91 | 53.18 |
| TiO ₂ | 0.14 | 0.10 | 0 | 0.08 |
| Al ₂ O ₃ | 1.50 | 1.43 | 0.98 | 1.47 |
| Cr ₂ O ₃ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FeO | 22.73 | 17.39 | 11.79 | 14.32 |
| MnO | 0.46 | 0.10 | 0.30 | 0.85 |
| MgO | 22.65 | 15.03 | 12.72 | 15.62 |
| CaO | 0.55 | 11.19 | 20.21 | 13.00 |
| Na ₂ O | 0.06 | 0.36 | 1.47 | 0.55 |
| K ₂ O | — | — | — | — |
| 总计 | 99.91 | 98.74 | 100.38 | 99.07 |
| Si | 1.939 | 2.014 | 1.988 | 2.000 |
| Ti | 0.004 | 0.003 | 0 | 0.002 |
| Al ^{IV} | 0.061 | 0 | 0.012 | 0 |
| Al ^{VI} | 0.005 | 0.064 | 0.031 | 0.065 |
| Cr | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe ²⁺ | 0.711 | 0.551 | 0.370 | 0.450 |
| Mn | 0.015 | 0.003 | 0.010 | 0.027 |
| Mg | 1.264 | 0.849 | 0.712 | 0.876 |
| Ca | 0.022 | 0.454 | 0.813 | 0.524 |
| Na | 0.004 | 0.026 | 0.107 | 0.040 |

数据由中国地质科学院矿床地质研究所陈克樵测定。

其反应为：





1.5 紫苏辉石转变为辉石角闪石过渡型矿物

在紫苏辉石中偶见局部解理变得细而密，单偏光下近无色或淡蓝绿色，二级干涉色， $c\wedge Ng' = 15^\circ$ 左右（图4），经探针测试其成分介于角闪石和辉石之间（表4），为辉石一角闪石过渡类型的矿物。

综上所述，在变质作用过程中的各阶段都存在矿物的转化现象，在进变质中由于温度、压力的升高，特别是温度的升高使已有矿物受到改造或者被新矿物代替，仅有少量矿物以包裹体形式保留下来，但其成分也发生了一些变化，经过重新调整达到新的平衡。在温压下降的环境中，变质反应同样明显，生成了新的矿物以及原有矿物的成分发生变化，或者使成分由均匀变得不均匀。

2 变质作用阶段的划分

本区变质作用可划分为四个阶段（图5）

1. 早期阶段：在麻粒岩相变质过程中随温压条件的升高，原有矿物在逐渐改变的环境中新的矿物替代，仅有少量第一世代的或者早期阶段的矿物以包裹体形式存在寄主矿物中。包裹体代表性组合为： $\text{Pl} + \text{Q} \pm \text{Bi} \pm \text{Di} \pm \text{Hb} \pm \text{Gt}$ ，相当于高角闪岩相。

2. 峰期阶段：紫苏辉石、透辉石、斜长石、石榴石或角闪石等矿物之间颗粒呈共生平衡接触，它们代表第二世代的、相当于变质作用峰期阶段的产物，其代表性矿物组合为： $\text{Hy} + \text{Di} + \text{Pl} \pm \text{Q} \pm \text{Gt} \pm \text{Hb}$ ； $\text{Di} + \text{Pl} \pm \text{Q} \pm \text{Gt}$ ，从早期到峰期阶段为一个增温增压过程。

3. 稍晚期阶段：主要表现为紫苏辉石的后成合晶以及透辉石、紫苏辉石的边缘有新生绿色角闪石，新生矿物代表第三世代，为麻粒岩相稍晚期阶段的产物，是降温等压阶段的开始，并开始出现一系列的退变现象。

4. 晚期阶段：主要表现在铁镁矿物的进一步退变为阳起石、绿泥石、绿帘石。透辉石、石榴石的环边是从稍晚期阶段开始一直延续到晚期阶段，是继续降温降压过程。

3 变质作用 PTt 轨迹及演化

3.1 变质反应的温压条件

在利用矿物对确定温压条件时，紧密结合变质反应曲线是非常重要的。本区各类岩石中普遍含角闪石，据Spear（1981）的实验证明，当温度高于 910°C ， 0.1GPa 时角闪石消失（图6中的曲线（3）），故本区变质温度压力不应高于此值。另外，本区石榴石分布普遍，据Green及Ringwood（1967）的两条实验曲线（图6曲线（4）、（5）），有石榴石存在时，如果是橄榄拉斑玄武岩压力不低于 0.5GPa ，如果是石英拉斑玄武岩（ $X_{\text{Fe}} = 0.4$ ），则压力不低于 0.9GPa ，其次，紫苏辉石转变成闪石、滑石，其温度不高于 700°C ；角闪石及透辉石的阳起

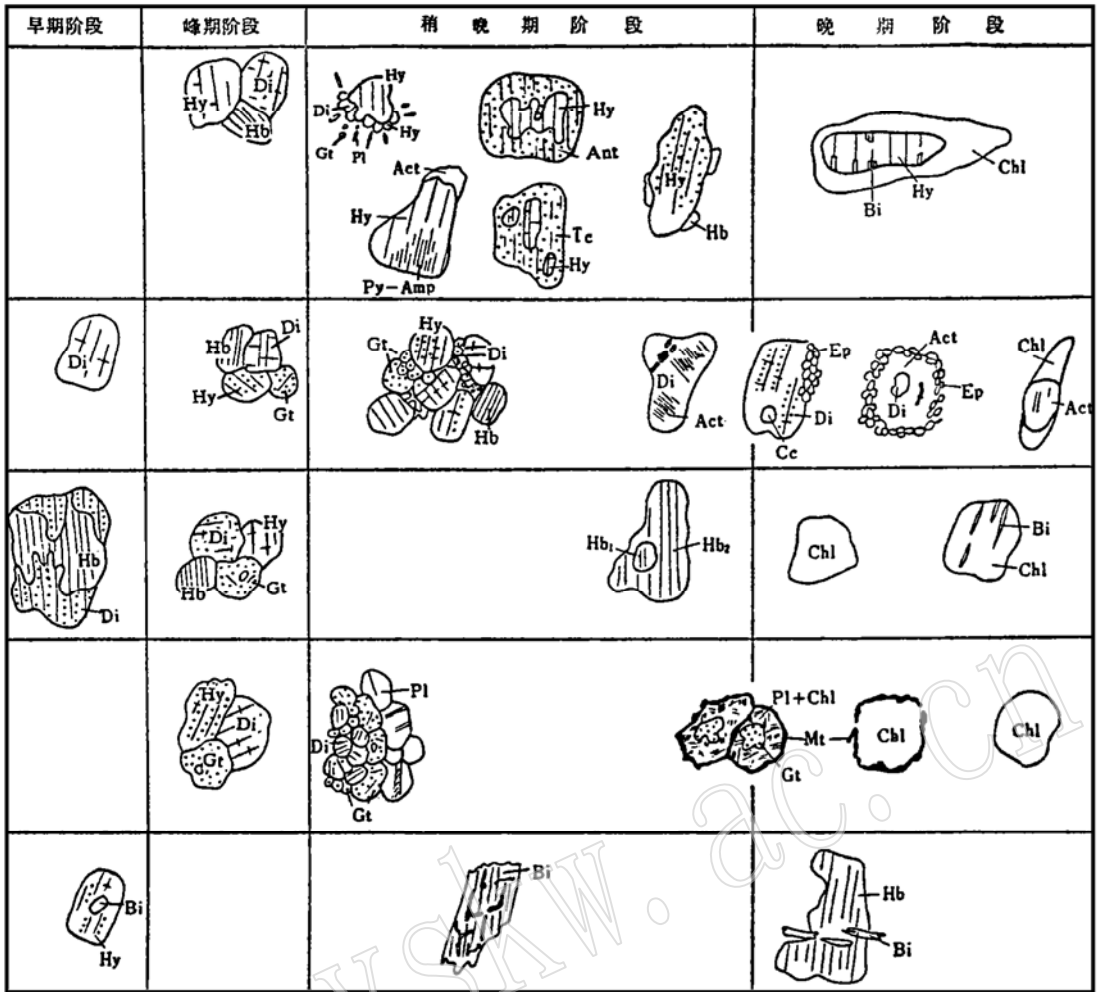


图 5 变质作用各阶段矿物转化示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing transformation of minerals at various stages of metamorphism

Amp—角闪石；Gt—石榴石；Act—阳起石；Hy—紫苏辉石；Ant—直闪石；Bi—黑云母；Hb—普通角闪石；Cpx—单斜辉石；Mt—磁铁矿；Opx—斜方辉石；Chl—绿泥石；Cum—镁铁闪石；Pl—斜长石；Di—透辉石；Py—辉石；Ep—绿帘石；Tc—滑石

石化、绿帘石化的温度为 500°C 左右，压力为 $0.4\text{--}0.6\text{GPa}$ 。

3.2 地质温度与压力计算

利用 Wood-Banno 二辉石对公式计算所获温度一般偏高，故本文采用二辉石对之外的公式进行计算^{[4][5]}。

1. 早期阶段的温压条件：从变质相图可知角闪岩相的温压条件为 $660\text{--}700^{\circ}\text{C}$ 左右， $0.2\text{--}1.0\text{GPa}$ ，依据 Perchuk (1983) 及 Ganguly、Saxena (1984) 的公式所得温度为 $650\text{--}730^{\circ}\text{C}$ (Gt-Bi) 及 $764\text{--}832^{\circ}\text{C}$ (Di-Gt)，总平均温度为 719°C ，估计压力为 0.6GPa (图 6 的 A 点)

2. 峰期阶段：据相图麻粒岩相温度高于 700°C ，压力为 $0.2\text{--}1.0\text{GPa}$ ，温克勒认为麻粒岩相与高角闪岩相的差别不大，主要是水分压低于负荷压。通过矿物对计算峰期阶段的温度

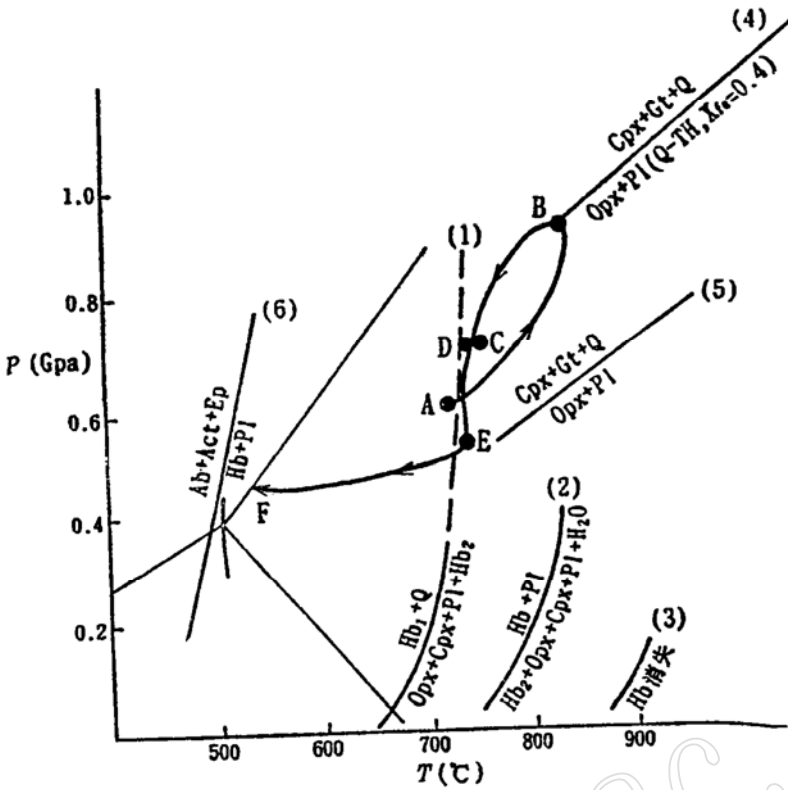


图 6 麻粒岩相变质作用 PTt 轨迹的演化

Fig. 6 Evolution of PTt path of granulite facies metamorphism

(1) 角闪石分解曲线, 据 Binns R. A (1969); (2) $Hb_2 + Pl \rightarrow Hb_2 + Opx + Cpx + Pl + H_2O$ 曲线, 据 Spear (1981); (3) Hb 消失曲线, 据 Spear (1981); (4) 石英斑玄武岩 ($X_{Fe} = 0.4$) 中 $Opx + Pl \rightarrow Cpx + Gt + Q$ (石榴石出现) 反应的温压界限, 据 Ringwood 和 Green (1967); (5) $Cpx + Gt + Q \rightarrow Opx + Pl$ 曲线, 据 Green 和 Ringwood (1967); (6) $Hb + Pl \rightarrow Act + Ab + Ep$ 曲线, 据 Spear (1981); Al_2SiO_5 三相点据 Holdway (1971)
 ● 一各阶段温度压力平均值; A—早期阶段; B—峰期阶段; C 及 D—稍晚期阶段形成反应边的温度压力平均值; E—稍晚期阶段长英质脉 (团块) 中暗色矿物重结晶的温压平均值; F—稍晚期阶段透辉石形成绿帘石环边的温压趋势线

为 710—890°C, 平均 812°C, 经 Powell 及 Newton 等人的压力公式计算, 压力为 0.74—1.18 GPa, 平均 0.91 GPa, (图 8 的 B 点)。

3. 稍晚期阶段: 根据紫苏辉石的后成合晶的矿物成分, 依据不同的矿物对所得平均温度为 767°C, 压力为 0.7 GPa (图 6 中的 C 点)。石榴石退变形成环边的温度为 738°C, 压力为 0.7 GPa (图 6 中的 D 点)。在片麻岩及麻粒岩中常有长英岩脉, 脉体中常有围岩中的紫苏辉石、角闪石等, 其温度平均为 740°C、压力平均为 0.5 GPa (图 6 中的 E 点)。本阶段温度变化不大, 以降压为主。

从本阶段起开始出现退化变质, 其原因除与变质作用本身的降温降压有关外, 构造作用也是重要因素之一。

4. 晚期阶段: 以铁镁矿物退变为主要特征, 各种辉石、角闪石、石榴石等退变为绿泥石、阳起石、绿帘石, 其反应为: $Hb + Pl \rightarrow Ab + Act + Ep$, 温压条件相当于 500°C、0.5 GPa (图 8 中的 F 点)。此阶段以降压为主, 压力变化不大。

3.3 PTt 轨迹的演化^[6-7]

在原始硅铝壳的基础上随着地壳不断下沉而陆续接受了密云群表壳岩——火山碎屑岩、基性火山岩、硬砂岩及硅铁质岩的沉积,同时,在下沉过程中由于侧向压缩造成了构造堆垛,使沉积厚度增大,温度、压力也随着升高,但是,要达到麻粒岩相变质作用所需温压条件,只凭地壳增厚是不够的,正像Sandiford及Powell(1988)所指出的,在正常情况下当地壳厚度为20—30km时,由于地热梯度较低,热平衡温度只有500℃左右,压力约为0.6—0.9 GPa。如果要达到本区麻粒岩相所需的温压平均为810℃、0.9 GPa,必须有岩浆活动的参与。从本区来看,在地壳增厚的过程中,下部地壳发生局部熔融形成了英云闪长质—奥长花岗质岩石和花岗闪长质岩系(TTG),并先后发生侵位,由于岩浆物质的加入不仅使地壳增厚,而且也作为麻粒岩相变质作用提供了足够的热源。根据锆石U-Pb法一致年龄为 $2500 \pm \text{Ma}$ ^①,认为在此期间使岩体与表壳岩完成了麻粒岩相变质作用,由于重力均衡作用地壳开始回返、抬升,出现了降温降压过程。由升温升压演变为降温降压(或近等压)构成了 PTt 演化全过程,形成了逆时针方向的 PTt 轨迹。

参 考 文 献

- 1 李树勋,徐学纯,金巍,刘喜山,麻粒岩相区地质研究现状及评述,长春地质学院学报,1990,(4): 241—251.
- 2 林强,早前寒武纪花岗质岩石成因研究中的若干问题,世界地质,1987,(4): 1—8.
- 3 卢良兆,北京密云含铁镁变质矿物化学特征,长春地质学院学报,1981,(4): 1—9.
- 4 Newton R C and Peikins D. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. Am. Miner., 1982, 67: 203—222.
- 5 Harley S L. The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet in FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ and CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂. J. Petrology, 1984, 25: 665—696.
- 6 石宏仁,区域变质作用的压力—温度—时间(PTt) 轨迹及其在造山带和变质作用中的应用,国外地质科技,1987,(8): 30—36.
- 7 斯皮尔 F S. 确定变质作用 PTt 轨迹的岩石学方法,梅华林、甘晓春、王惠初译,国外前寒纪地质,1990,(3): 4—67.

① 麦延庆,1983,北京密云县大城子地区1:10000地质测量报告。

Transformation of Minerals and *PTt* Path of Archean Metamorphic Rocks in Miyun Area, Beijing

Gao Jifeng

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Key words: transformation of minerals; readjustment of mineral composition; *PTt* path

Abstract

The Archean metamorphic rocks in Miyun area consist mainly of supracrustal rocks and gneisses of tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) composition.

In the supracrustal rocks, there are many characteristic fabrics, such as symplectic coronas of Opx and retrograde metamorphic rim of Di and/or Gt. According to correlations between mineral inclusions and metamorphic reactions, the metamorphic minerals are composed at least of four generations, which represent four stages of the granulite facies metamorphism in this area. Preferred *P-T* estimates of these stages based on geothermometer and geobarometer of mineral pairs are as follows:

| Metamorphic stage | Mineral assemblage | Temperature(°C) | Pressure(GPa) |
|-------------------|--|-----------------|---------------|
| Early | Pl + Q ± Bi ± Di ± Hb ± Gt | 660—700 | 0.2—1.0 |
| Peak | Hy + Di + Pl ± Q ± Gt ± Hb Di + Pl ± Q ± Gt | 812 | 0.9 |
| Late | Symplectic coronas of Opx | 740 | 0.7 |
| Last | Act-Chl-Ep | 500 | 0.5 |

According to above-discussed metamorphic mineral assemblages and mineral reaction as well as metamorphic *P-T* estimates, metamorphism of the supracrustal rocks in Miyun area is characterized by an anticlockwise type *PTt* path.