第十八章　变质反应和变质带

(Metamorphic Reactions and Metamorphic Zones)

一、变质反应的基本类型和主要特征

1. 概述

岩石在变质过程中最主要的变化是矿物成分的变化，而矿物成分变化都是通过特定的化学反应实现的。这种发生在变质作用条件下的化学反应称作**变质反应**（metamorphic reaction）。变质反应是在一定的 *T*、*P*、*x* 等物理化学条件下发生的，因此，研究变质反应，不仅可以理解岩石变质过程中矿物成分变化过程，而且可以获得变质条件信息。*P-T-t* 轨迹中的 *P-T* 条件，可以通过研究变质反应来估计。因此，变质反应作为地质温压计有重要的研究意义。

变质反应可以从不同角度进行划分。基本分类是按照参加反应的物相种类，将其分为固-固反应和有流体相参加的反应。由于流体相主要是 H_2O 和 CO_2，因此主要是 H_2O 和 CO_2 参加的反应。流体相中还有微量 O_2，有 O_2 参加的反应称氧化—还原反应，它使含铁矿物价态转化，如 6Hem（赤铁矿）=4Mt（磁铁矿）+O_2。这类反应在解释含铁矿物稳定性是重要的（Miyashiro,1994）。此外，根据反应物与生成物的关系，变质反应可分为不连续反应和连续反应两类。根据反应是否改变矿物原子数，变质反应可分为净转移反应和交换反应两类。

温度是控制变质反应的最主要因素。温度升高，反应速率呈指数倍增加，反应容易进行。相反，温度降低，反应速率极其缓慢，反应难于进行彻底。通常在写反应方程式时，把高温矿物组合写在右侧，低温矿物组合写在左侧。把升温过程从左至右的反应称正向反应，把降温过程自右至左的反应称逆反应。如脱水反应是正向反应，其逆向反应是水化反应，脱碳酸反应是正向反应，其逆反应为碳酸盐化反应等等。

化学反应在平衡时的基本热力学方程是：$d(\triangle G)=0=\triangle V\mathrm{d}P-\triangle S dT$。式中：$\triangle G$ 为反应的吉布斯自由能的变化；$\triangle S$ 为反应的熵变；$\triangle V$ 为反应的摩尔体积变化。

由上式可得：$dP/dT=\triangle S/\triangle V$。这就 Clausius-Clapeyron 方程。式中 dP/dT 为 *P-T* 图解上的反应曲线斜率。因此，只要我们知道反应的熵变和反应的摩尔体积变化，就可以计算出反应在 *P-T* 图解上的斜率。正向反应 $\triangle S$ 一般为正值，所以斜率正负取决于 $\triangle V$。

2. 固—固反应

固—固反应的反应物和生成物都是固相，不涉及流体相，因而平衡条件与流体相无关，反应影响因素仅为 *T* 和 *P*，是较好的温压指示计。此外，由于固体的 $\triangle S$ 和 $\triangle V$ 随 *T*、*P* 的变化很小，近似计算时 $\triangle S$、$\triangle V$ 可看作常数，所以反应斜率 $\mathrm{d}P/\mathrm{d}T$ 也近似等于常数。因此固—固反应在 *P-T* 图解上为直线。常见的固—固反应有以下三类。

2．1　多形转变

变质岩中常见的多形转变反应是铝硅酸盐矿物三个多形变体红柱石（And）、蓝晶石（Ky）和夕线石（Sil）之间的反应：

Ky=And; Ky=Sil ; And=Sil　　(18-1)

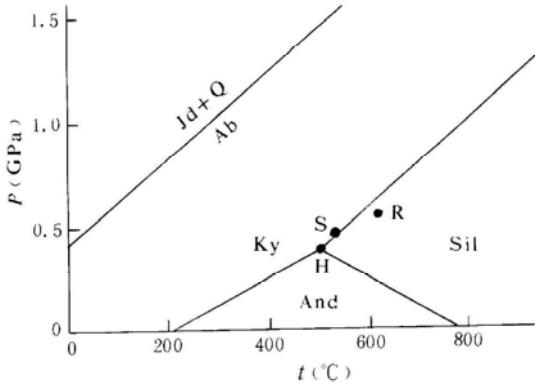

图 18-1　两个重要的固—固反应

（引自 Miyashiro, 1994, 简化）

H、R、S 分别为 Holdaway（1971）、RichardSon 等（1969）和 Salje（1986）测定的 Al_2SiO_5 三相点

三矿物摩尔体积为：V_{And}=51.5 ； V_{Ky}=44.09；V_{Sil}=49.90。所以 Ky=And、Ky=Sil 反应△V 均为正值，这两个反应线都具有正斜率。而反应 And=Sil 的△V 为负值，具有负斜率。在 P-T 曲解上三条反应线相交于一点，点上 And、Ky、Sil 三相共生，所以称三相点（图 18-1）。三条反应线上相应的两相共生。三条反应线将 P-T 空间分为三个区，每个区仅一相稳定：And 在低压区稳定，Ky 在高压区稳定，而 Sil 在高温区稳定。这个反应的岩石学意义是非常清楚的：And、Ky、Sil 是富 Al 矿物，他们在岩石中出现说明岩石富铝（变泥质岩）。红柱石（And）出现说明岩石形成于低温条件，蓝晶石（Ky）出现说明高压变质条件，而夕线石（Sil）的出现则指示高温变质条件。但是，由于该反应是仅靠很小的自由能驱动，且活化能很大（用来破坏有力的 Si-O、Al-O 键），因此，反应实验曲线标定出现了越位和准稳定问题（Vernon,1976）。不同的人实验结果不一致，三相点位置不同（图 18-1）。自然界也常常看到两个 Al_2SiO_5 多形变体同时出现而其中一个处于准稳定状态的现象。例如在 Sil 稳定区出现准稳定 And。这种准稳定现象在作成因解释时必须注意。

另两个重要的多形转变反应 Coe（柯石英）=Q 和 Dia（金刚石）=Gra（石墨）已如前述（参见图 17-9）。Coe 和 Dia 的出现都说明岩石形成于 3.0Gpa（100Km）以上的超高压条件，是很好的超高压指示矿物。

2．2　固溶体的出溶

高温时固溶体矿物为均一的一相，当温度降低到固溶体分解曲线（solvus）之下，就会分解为成分不同的两相，称为出溶。出溶的两相往往呈页片状、条纹状交生体，也可最终分解为两个矿物单晶。变质岩中常见的条纹长石、具斜方辉石页片的单斜辉石及晕长石都是固溶体出溶结果。前二者在火成岩部分已有介绍，晕长石固溶体分解曲线（或称“溶线”）见图 18-2。

X-射线研究发现，在变质岩中往往见不到成分均匀的钠质斜长石（An_{5-15}），这些钠质斜长石多为钠长石（$An_{<5}$）和钙质奥长石（An_{15-25}）两相显微交生。这种显微交生体称为**晕长石**（peristerite）。钠质斜长石出溶除形成晕长石外，还可形成钠长石和钙质奥长石的单独颗粒。晕长石固溶体分解曲线可

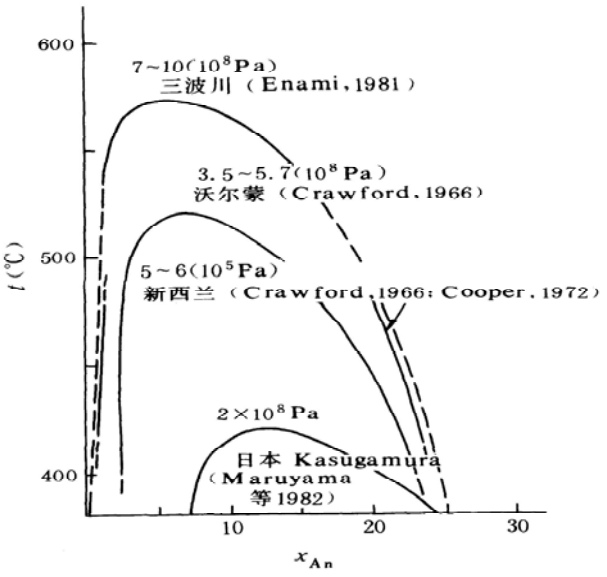

图 18-2　不同压力下的晕长石固溶体分解曲线

（Maruyama et al., 1982; 引自 Hyndman, 1985）

作为地质温度计。不过压力的影响也是明显的：压力降低，溶线向低温方向收缩（图 18-2）。

2．3　纯固相之间的反应

反应物和生成物是化学成分不同的纯固相矿物。如图 18-1 所示反应：

$$NaAlsi_2O_6+SiO_2=NaAlsi_3O_8 \qquad (18\text{-}2)$$

Jd（硬玉）　Q　　Ab

该反应有较平缓的正斜率，是较好的地质压力计：矿物组合 Jd+Q 的出现是高压的标志。

3．H_2O 和 CO_2 参加的反应

这类反应由于涉及流体相，影响因素复杂，除 *P*、*T* 外，流体成分（x_{H_2O}、x_{CO_2}）有很大影响。因此，一般说来不是很好的温压计。流体相参加的反应中，△*S*、△*V* 都明显受 *P*、*T* 的影响，△*S*/△*V* 不是一个常数，所以，在 *P*—*T* 图解上，有流体相参加的反应是斜率不断变化的曲线。

3．1　分类及 *x* 对平衡温度的影响

Greenwood（1967）将 H_2O 和 CO_2 参加的反应分类成下列 5 种类型（Mryashiro,1994），在 *T*-*x* 图上，它们的曲线有不同的形状（参见图 18-3）。

①简单的脱水反应（简称脱水反应）B=D+H_2O。平衡温度随着 x_{H_2O} 增加而增高，x_{H_2O}=1 时平衡温度最高。

②简单的脱碳酸反应（简称脱碳酸反应）B=D+CO_2。平衡温度随着 x_{CO_2} 增加而增高，x_{CO_2}=1 时平衡温度最高。

③脱水-脱碳酸反应 B=D+H_2O+CO_2。*T*-*x* 平衡曲线为上凸形。当 $x_{CO_2}=n_{CO_2}/(n_{H_2O}+n_{CO_2})$ 时平衡温度最高。式中，n_{CO_2}、n_{H_2O} 分别为化学反应式中 CO_2 和 H_2O 的系数。

④碳酸盐化-脱水反应 B+CO_2=D+H_2O，*T*-*x* 平衡曲线为 S 形，平衡温度随 x_{H_2O} 增加而增高，X_{H2O}=1 时平衡温度最高。

⑤水化—脱碳酸反应 B+H_2O=D+CO_2。*T*-*X* 平衡曲线为反 S 形，平衡温度随 x_{CO_2} 的增加而增高。x_{CO_2}=1 时平衡温度最高。

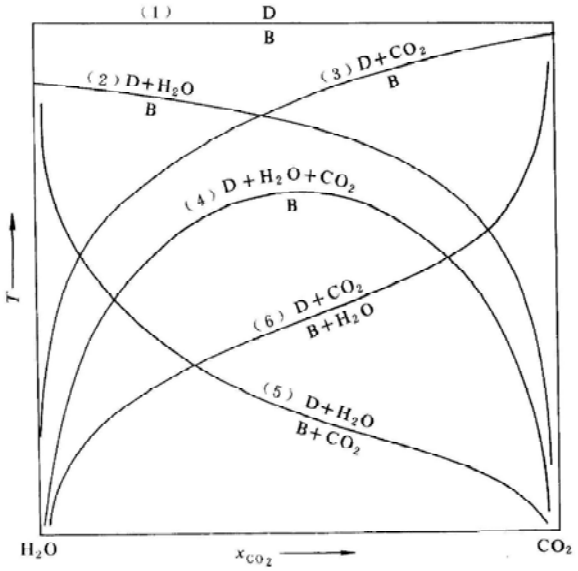

图 18-3　示固定压力下各种反应平衡曲线主要形状的 *T*-*X* 概略图解

$x_{H_2O}+x_{CO_2}=1$。B 和 D.成分固定的固相；（1）固—固反应；(2)—(6).H_2O 和 CO_2 参加的反应，详见文中说明（Greenwood, 1967; 引自 Miyashiro, 1994）

3．2　脱水反应

变质作用过程中脱水反应是大量的。其中，脱水反应

$$KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2+SiO_2=KAlSi_3O_8+Al_2SiO_5+H_2O \qquad (18\text{-}3)$$

Ms（白云母）　　Q　Or(正长石)　Als(铝硅酸盐)

是最重要的脱水反应之一，这是高级变质与中级变质的临界反应。Or+Als 组合指示高级变质，而 MS+Q 组合指示中低级变质。反应式中铝硅酸盐（Als），视反应压力条件可以是 Ky（高压）、Sil（中压）或 And（低压）(图 18-4)。

由图 18-4 可清楚看出，该反应不仅受 *T*、*P* 控制，而且流体成分 x_{H_2O} 也是很重要的控制因素。当 x_{H_2O}=0 时，平衡温度最低，反应 *P*-*T* 曲线具负斜率，且接近直线。随着 x_{H_2O} 增加，平衡温度增高，平衡曲线逐渐变为正斜率曲线，x_{H_2O}=1 时，平衡温度最高，曲线斜率和曲率最大。而且 x_{H_2O} 对平衡温度的影响随压力增高而明显增大。当 *P*=1.0GPa 条件下，x_{H_2O}=1 时的平衡温度比 x_{H_2O}=0 时的平衡温度高 400℃，可见 x_{H_2O} 影响之大。

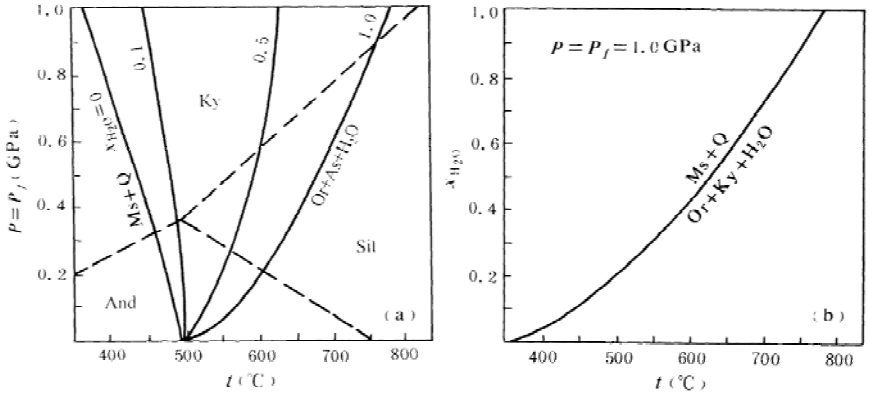

图 18-4　反应 Ms=Or+Als+H_2O 的 *P-T-X* 图解（左）和 *P*=1.0GPa 下的 *T-X* 图解（右）
（据 к о р и к о в с к и й（1979）资料作出）

上述特点也是一般脱水反应的特点。由于地壳流体中 H_20 是大量的，所以在通常的成因分析中，把流体相近似看作纯水相，即考虑脱水平衡时，仅考虑图解中 x_{H_2O}=1 条件下的 P-T 曲线，把脱水反应作为地质温压计应用。在这种情况下，通常脱水反应具有正斜率。但高压时流体相具有高密度，△V 成为负值，使脱流体反应斜率为负值。据 Vernon(1976)，当压力超过 3.0GPa 时，大多数脱水反应具负斜率。

3．3　脱碳酸反应

脱碳酸反应是钙质变质岩中常见的反应。代表性的有如图 18-5 所示的两个反应

$$CaCO_3+SiO_2=CaSiO_3+CO_2 \qquad (18\text{-}4)$$

Cc　　Q　Wo（硅灰石）

$$CaMg(CO_3)_2+2SiO_2=CaMgSi_2O_6+2CO_2 \qquad (18\text{-}5)$$

Dol(白云石)　　Q　　Di(透辉石)

前者是中级变质与高级变质的临界反应，后者是低级变质与中级变质的临界反应，Cc+Q 组合在低—中级变质条件下稳定，Dol+Q 组合在低级变质条件下稳定。富钙岩石中 Di 出现标志中级变质开始，而硅灰石是富钙岩石高级变质的指示矿物。由图 18-5 可看出，这两个反应有脱碳酸反应的下述一般特点：它们都不仅受 T、P，而且受 x_{CO_2} 控制。当 x_{CO_2}=0，反应平衡温度最低，平衡曲线为负斜率的直线。随 x_{CO_2} 增加，平衡温度增高，平衡曲线斜率变为正斜率曲线，x_{H_2O}=1 时，平衡温度最高，曲线斜率和曲率最大（但如脱水反应一样，在高压下变为负斜率）。如 x_{H_2O} 对脱水反应的影响类似，x_{CO_2} 对平衡温度的影响也随压力的增高而显著增大。当 P=0.3Gpa 条件下，x_{CO_2}=1 时的平衡温度比 x_{CO_2}=0 时的平衡温度要高约 400℃。但是，比较图 18-4 与图 18-5 可看出，脱水反应中，x_{H_2O} 的增加引起的平衡温度增高比较均匀，而脱碳酸反应中 x_{CO_2} 的增加引起的平衡温度增高很不均匀。在 x_{CO_2} ＜0.1 时，平衡温度随 x_{CO_2} 增加而增加的速率快。x_{CO_2} ＞0.1 后平衡温度随 x_{CO_2} 的增加而增加的速率越来越慢。例如在 *P*=0.3GPa 条件下，x_{CO_2} 从 0 至 0.1，平衡温度增加了约 270℃，而 x_{CO_2} 从 0.5 至 1.0，平衡温度仅增加了约 50℃。这可能是有时在成因分析时，以 x_{CO_2}=1 的反应曲线近似代表脱碳酸反应平衡条件而作为地质温度计使用的原因。但必须指出的是，地壳中 CO_2 分布是极不均匀的，对脱碳酸反应的平衡条件必须尽可能把 x_{CO_2} 的影响考虑进去。

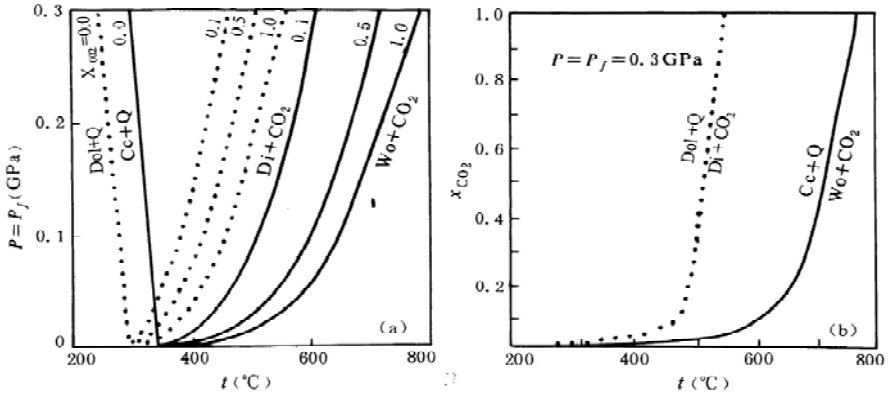

图 18-5　Cc+Q=Wo+CO_2（实线）和 Dol+Q=Di+CO_2（虚线）的 *P-T-X* 图（左）和 *P*=0.3GPa 下的 *T-X* 图（右）

左图据 Tracy and Frost（1991）引自 Blatt and Tracy（1995）；右图据左图作出

3．4　脱水—脱碳酸反应

图 18-6 所示的脱水—脱碳酸反应

$$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2+3CaCO_3+SiO_2=5CaMgSi_3O_6+3CO_2+H_2O \qquad (18\text{-}6)$$

Tr（透闪石）　　Cc　　Q　　Di(透辉石)

是钙质变质岩中常见的变质反应，它也是低级变质与中级变质的临界反应。Tr+Cc 是低温矿物组合，而 Di+Tr 或 Di+Cc 的出现是中级变质开始的标志。$x_{CO_2}=n_{CO_2}/(n_{H_2O}+n_{CO_2})$ = 3/(3+1)=0.75 时，平衡温度最高。

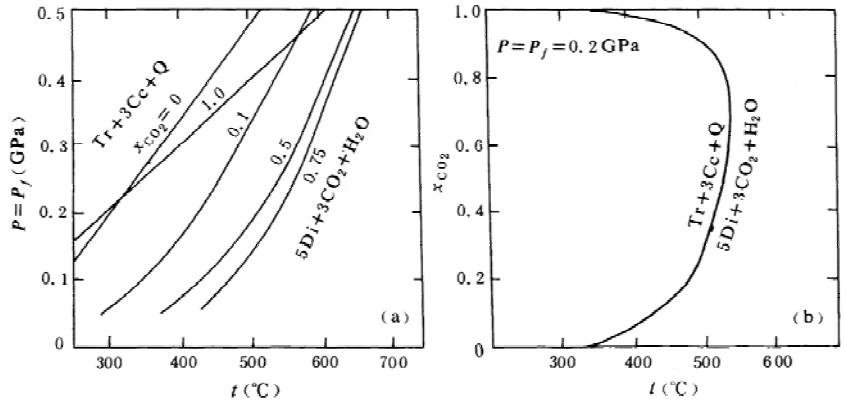

图 18-6　反应 Tr+3Cc+Q=5Di+3CO_2+H_2O 的 *P-T-X* 图（左）和 *P*=0.2GPa 下的 T-X 图（右）

左图据 Blatt and Tracy (1994)和 Winkler (1976)资料作出；右图引自 Blatt and Tracy (1994)

二、连续反应和交换反应

1．　不连续反应和连续反应

根据反应物与生成物之间的关系，变质反应可分为不连续反应和连续反应两类。前面所提到的变质反应，反应物和生成物之间的关系是突变的，在给定压力和流体成分条件下，反

应在一个特定的温度发生。在 *P*—*T*，*P*—*x*，*T*—*x* 等双变量图解上反应物、生成物只能在单变反应线上共生。偏离了平衡条件，不是反应物消失（生成物稳定）就是反应物稳定（生成物消失）。这样的反应称为**不连续反应**（discontinuous reaction）。

另一些反应涉及成分可变的固溶体，反应物与生成物之间的关系是渐变的，在给定压力和流体成分条件下，反应在一个温度范围内连续发生。在 *P-T*、*P-X*、*T-X* 等双变量图解上，反应物和生成物在双变反应区内共存。在双变区中，成分不断调整，反应的 P-T 条件取决于岩石成分。这样的反应称为**连续反应**（continuous reaction）或**滑动反应**（sliding reaction）。

例如变泥质岩中常见的反应

$3(Mg, Fe)_2Al_4Si_5O_{18}=2(Mg, Fe)_3Al_2Si_3O_{12}+4Al_2SiO_5+5SiO_2$ （18-7）

Crd(堇青石) Gt(石榴石) Sil Q

是一个连续反应。Currie（1971）通过实验研究了反应进行过程的细节（图 18-7a）。低压下 Crd(堇青石)稳定。随着压力增高，Gt(石榴石)开始出现。Gt 开始出现的温度和压力取决于岩石的化学成分（x_{FeO}）：岩石越富 Mg，Gt 开始出现的压力越高。Gt 出现后，Crd 并未立即消失，二者有一个共存区。出现的 Gt 比 Crd 更富 Fe（$x_{FeO}^{Gt} > x_{FeO}^{Crd}$）。随着压力增高，Gt 和 Crd 成分分别沿上、下两条曲线不断调整，都越来越富镁。同时，Crd 含量逐渐减少，Gt 含量逐渐增加。直到 x_{FeO}^{Gt}=原始 x_{FeO}^{Crd} 时，Crd 全部消失。Crd 消失的 T、P 条件也取决于岩石化学成分（x_{FeO}）。在相对富 Mg 的岩石中，Crd 可以稳定于更高的压力。Crd 与 Gt 共存区宽度也取决于原岩成分。 图 18-7b 是岩石 x_{FeO}=0.6 时该反应的 P-T 图解。从该图可看出，该反应主要依赖于压力。随着温度增加，Gt 和 Crd 共存区增大。图中还表示了共存的 Gt、Crd 的 x_{FeO} 等值线，根据共存的 Gt、Crd 成分，可估计变质作用 T、P 条件。

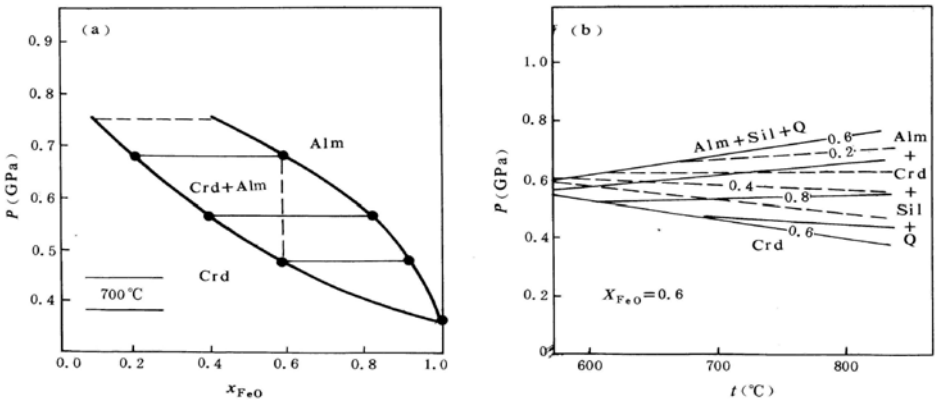

图 18-7 反应 3Crd=2Gt+4Sil+5Q 的双变量图解

a.*T*=700℃时的 *P*-X_{FeO} 图解(Currie，1971，转引自 Winkler，1976)，X_{FeO}=FeO/(FeO+MgO)；b.岩石 X_{FeO}=0.6 时的 P-T 图解，据 Winkler(1976)资料作出，数字为 X_{FeO}^{Gt}（实线）和 X_{FeO}^{Crd}（虚线）。

2. 净转移反应和交换反应

根据反应是否改变矿物原子数，变质反应可分为净转移反应和交换反应两类。前面所列举的所有反应，均引起矿物原子数变化，属于**净转移反应**（net-transfer reaction）。另一类反应仅引起共存矿物间原子（如 Mg，Fe）交换，而不改变有关矿物的原子数，称为**交换反应**（exchange reaction）。由于交换反应不改变有关矿物原子数，仅引起系统很小的体积变化，

因而压力对平衡的影响很小（Miyashiro, 1994）。

设 x_i^A 、x_i^B 分别为 i 组分在平衡共存的 A、B 两相中的摩尔分数，根据 Nernst 分配定律，分配系数 $K_D = x_i^A / x_i^B$ 是 T、P 的函数而与 i 物质的总含量无关，即：$\ln K_D = \triangle G^o / RT$。

交换反应体积变化很小，$\triangle V \approx 0$，故 $\triangle G^\circ = \triangle H^\circ - T\triangle S^\circ$ （$\triangle H$ 为反应的焓变），所以：$\ln K_D = \triangle H^\circ / RT - \triangle S^\circ / R$.。

若将△H°，△S° 看作常数，则上式为一直线方程。$\ln K_D$ 与 1/T 呈直线函数关系，因而交换反应的是好的地质温度计，在地质研究中应用得非常广泛。

在很多变质岩中，共存的两个铁镁矿物间会发生 Fe-Mg 交换反应。Fe 原子从一个矿物向另一个矿物迁移，这种迁移由同样数量的 Mg 原子相反方向迁移所补偿。

例如共存的黑云母（Bi）和石榴石（Gt）之间的 Fe-Mg 交换反应：

$$Mg_3Al_2Si_3O_{12} + KFe_3Al_3Si_3O_{10}(OH)_2 = Fe_3Al_2Si_3O_{12} + KMg_3Al_3Si_3O_{10}(OH)_2 \quad (18\text{-}8)$$

Pyr(镁铝榴石)　　Ann(羟铁云母)　　Alm(铁铝榴石)　　Phl(金云母)

据 Ferry 和 Spear（1978）实验研究，该反应平衡常数 $K_D = (Fe/Mg)_{Gt}/(Fe/Mg)_{Bi}$ 与 T（K）、P（bar）的关系为：$\ln K_D = (2089 + 0.0096P)/T - 0.782$。这就是 Gt-Bi 温压计。从上式可看出压力影响较小，可作为地质温度计使用。由于 Gt、Bi 共生可在从低温到高温的很多变质岩中找到，因此， 该温度计是一个用得很广的地质温度计。此外，还有石榴石—堇青石、黑云母—角闪石、黑云母—绿泥石、石榴石—绿泥石、石榴石—单斜辉石等交换反应地质温度计。

三、成岩格子、变质带和等变线

1. 成岩格子、变质带和等变线的基本概念

一个化学成分在一定范围的岩石系统，在一定 P-T 条件范围内遭受变质作用时，随着外界条件的变化，岩石系统内通常会发生一系列变质反应。在 P-T 图解上，这些反应的单变线通常彼此会相交。这种在 P-T 空间上单变线相交的网状系统称为**成岩格子**（petrogenetic grid）。如图 18-9 就是一个泥质变质岩成岩格子。最简单的成岩格子是图 18-1 中的 Al_2SiO_5 系统成岩格子。成岩格子是研究变质岩成因、定量估计岩石形成的 P-T 条件的常用方法之一。

在变质岩分布区，变质程度不同的岩石在空间上往往呈有规律的带状分布。根据变质岩矿物、矿物组合、结构构造等特点，可将这些变质程度不等的带划分出来。同一个带的变质岩在一个基本相同的 P-T-X 范围内形成，这些指示变质程度的带称为**变质带**（metamorphic zone）。带与带之间的界线称为**等变线**（isograd）。

英国地质测量学家乔治·巴罗（George Barrow）于 1893 年第一个成功地在苏格兰高地加里东造山带东南部 Dalradian 地区绘制出递增变质带图。他是以变泥质岩中随变质程度（温度）增高而依次出现的新矿物（称为指示矿物）为标志划分变质带的，因而称该变质带为**指示矿物带**（index mineral zone）。也就是说，他是以指示矿物出现的线作为等变线划分变质带的。在苏格兰高地共标绘出黑云母、石榴石、十字石、蓝晶石、夕线石等 5 条等变线（图 18-8），这五条等变线将该变质区划分为绿泥石带（黑云母等变线低温侧）、黑云母带、石榴石带、十字石带、蓝晶石带、夕线石带等 6 个指示矿物带，通称为巴罗式区域变质带。

旧矿物消失、新矿物出现是变质反应的结果。因此，上述指示矿物等变线实质是发生在自然界的变质反应线，Winkler（1976）称之为**反应等变线**（reaction isograd），而 Miyashiro（1994）称为**真等变线**（true isograd）。等变线记录的是岩石在热峰时发生的变质反应。因为一个地区热峰是穿时的，所以一个地区各等变线，也不是同时形成的，也是穿时的。

指示矿物带以指示矿物为标志划分。在一些情况下，应用指示矿物易使人误解，可代之以**临界矿物组合**（critical mineral assemblage）作为划分变质带的标志。临界矿物组合是变质带的特征矿物组合，它产生在带的低温限的等变线上。如夕线石带的临界矿物组合为 Sil-Alm-Ms。此外，在少数情况下，也采用结构构造作为划分变质带　的标志。此时，标绘出的等变线不是反应等变线，Miyashiro（1994）称这样的等变线为**假等变线**（false isograd）。

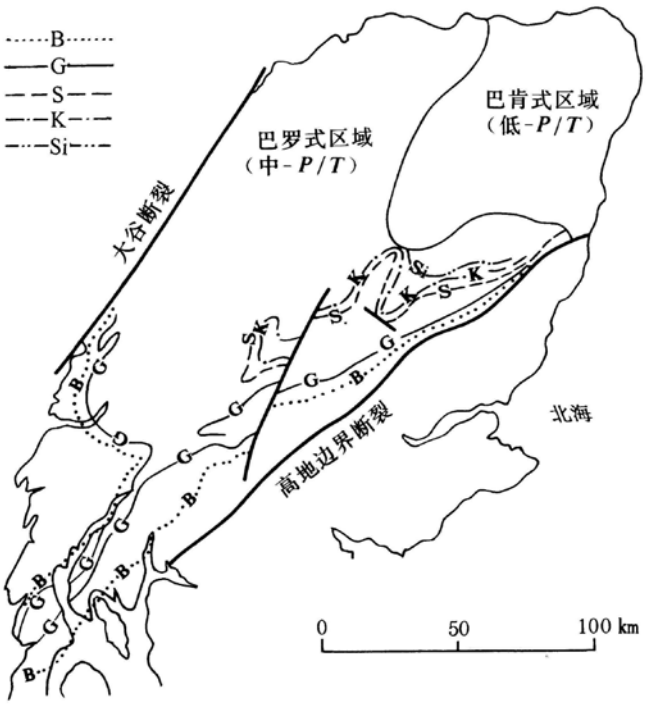

图 18-8　苏格兰高地巴罗式区域变质带
（引自 Miyashiro, 1994）

2. 巴罗式变质带的等变线反应

苏格兰高地加里东造山带巴罗式变质带 5 个等变线上发生的变质反应如图 18-9 所示。

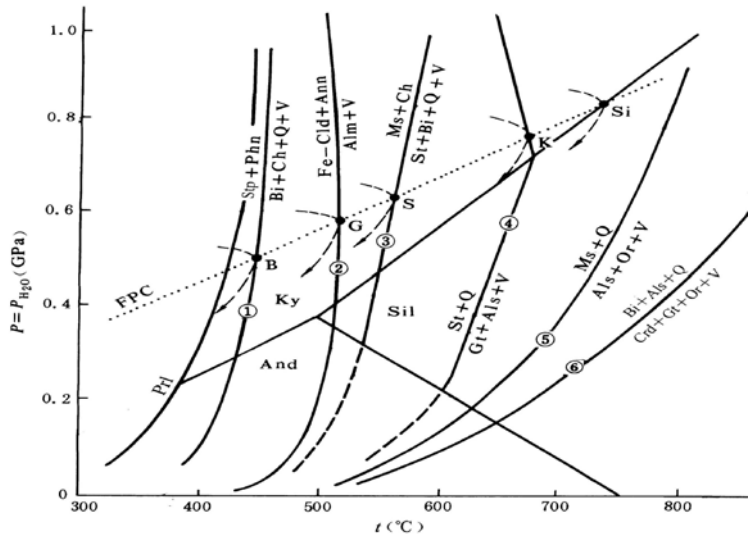

图 18-9　变泥质岩中若干重要变质反应与巴罗式变质带等变线

变质反应曲线来源：①winkler, 1976;③④ Crawford and Mark, 1982. 其余引自 Spear and Cheney, 1989。 B、G、S、K、Si 分别为黑云母、石榴石、十字石、蓝晶石、夕线石等变线。*P-T* 轨迹（带箭头的点线）和野外 *P-T* 曲线（FPC）参考 Dempster（1985）对 Dalradian 岩石热模拟成果示意性作出，

矿物代号参见附录

（1）黑云母等变线反应

Stp(黑硬绿泥石)+Phn(多硅白云母)=Bi+Ch(绿泥石)+Q+H_2O(V，蒸汽)　　（18-9）

这是一个连续反应。对于连续反应，在一个递增变质区，反应从一条线开始，连续进行穿过该线高温侧一个带。在这种情况下，等变线是指示连续反应开始的线。如图 18-9 的 *P-T* 图解上，也仅表示反应开始的线（连续反应双变反应区的低温侧）。此外，一个基于连续反应的等变线的温度在一定压力和流体成分条件下，取决于该地区变泥质岩的 FeO/MgO 比。

由于白云母（Ms）通常在变泥质岩中较多而黑硬绿泥石（Stp） 较少，所以该反应标志着 Stp 消失和 Bi 的出现，由绿泥石带向黑云母带的转变。

（2）石榴石等变线反应

Cld(硬绿泥石)+Bi=Gt(石榴石)+H_2O(V) (18-10)

这是黑云母带与石榴石带的分界反应，以变泥质岩中石榴石出现为标志。这也是一个连续反应，图 18-9 中以富铁端员不连续反应

Fe-Cld+Ann(羟铁云母)=Alm(铁铝榴石)+H_2O (18-11)

标定该等变线。

（3）十字石等变线反应

Ms+Ch=St(十字石)+Bi+Q+H_2O(V) (18-12)

这是石榴石带与十字石带的分界反应，以十字石出现为标志，指示中级变质的开始。这也是一个连续反应，反应开始温度与变泥质岩 FeO/MgO 比有很大关系。

（4）蓝晶石等变线反应

St+Q=Gt+Ky+H_2O(V) （18-13）

这是十字石带与蓝晶石带的分界反应，这也是一个连续反应，以其低温限作等变线。由于通常的变泥质岩是硅过剩的，所以该反应造成十字石消失。但由于蓝晶石在榴石带已稳定，因此，这不是蓝晶石开始出现的等变线。确切地说，该等变线是以十字石开始消失为标志。称其为蓝晶石等变线，可能因为在该等变线高温侧变泥质岩中蓝晶石大量出现，可容易观察到。

（5）夕线石等变线反应

Ky=Sil (18-1)

这是蓝晶石带与夕线石带的分界反应。该反应是不连续反应，而且是多形转变，在一定压力下反应温度是一定的。该等变线以变泥质岩中夕线石出现、蓝晶石消失为标志。不过由于前述反应动力学原因，反应常常进行不彻底，使得在夕线石带出现准稳定的蓝晶石。

3. 夕线石—正长石带和堇青石—石榴石—正长石带

在苏格兰高地，夕线石带构成变泥质岩最高温部分。从图 18-9 可看出，夕线石带的温度仍低于反应（18-3）Ms+Q=Sil+Or+H_2O(V)（图 18-9 反应⑤）的反应温度，白云母（Ms）仍稳定。如前所述，该反应是中级变质（角闪岩相）进入高级变质（麻粒岩相）的临界反应。在世界一些其它地区，如大别山，变泥质岩可经受超越该反应温度的高级变质，Ms 不稳定，出现 Sil+Or 共生。因此，基于反应（18-3）的等变线称作夕线石—正长石等变线，是夕线石带（中级变质）与夕线石—正长石带（高级变质）的分界。

在夕线石—正长石带，黑云母（Bi）仍稳定。当温度进一步增加到超越反应 Bi+Sil+Q=Crd（堇青石）+Gt（石榴石）+Or+H_2O（图 18-9 反应⑥）时，Bi 不稳定，出现 Crd+Gt+Or 共生。基于该反应的等变线称作堇青石—石榴石—正长石等变线，是夕线石—正长石带与堇青石—石榴石—正长石带的界限。

思 考 题

1. 为什么固—固反应是较好的地质温压计？
2. 为什么说与脱碳酸反应相比，脱水反应是较好的地质温压计？
3. 为什么当 X_{H2O}=0 时，在 *P-T* 图解上脱水反应一般是负斜率的直线？
4. 说明反应 Ms+Q=Als+Or+H_2O 的岩石学意义。
5. 写出两个本章未讲到的岩石中常见的多形转变反应。
6. 说明连续反应的特点。
7. 查阅文献，找出两个交换反应地质温度计。
8. 说明变质带的定义和划分标志。
9. 利用图 18-9 说明，野外变质梯度（视地热梯度）不同的变质地区出现的指示矿物带是否相同。
10. 岩石中既有 Sil，又有 And，是否说明岩石形成的 *P-T* 条件一定在图 18-1 中的 And=Sil 反应线上？有哪几种可能？
11. 一泥质变质岩（片岩）具有矿物组合 Alm+Ch+Bi+Ms+Sil+Q，利用成岩格子（图 18-9）定量估计其热峰变质条件（*T*、*P* 范围）。