本课件不得用于商业用途，
传播目的只是资源共享。
仅供地信网会员学习参考

变质岩岩石学

Metamorphic Petrology

课程内容

变质作用基本概念
变质反应及其控制因素
变质岩的基本特征
共生分析和共生图解
变质相、变质相系和变质作用 PTt 轨迹
接触变质作用及岩石
区域变质作用及岩石
其他变质作用及岩石
变质岩研究方法
变质作用与地壳演化

主要参考书：

王仁民, 1989,《变质岩石学》，地质出版社
Raymond, L. A., 1995, Petrology, Metamorphic Rocks.
魏春景，张立飞, 2003. 变质岩石学讲义（自编）
Bucher K. & Frey M., 2002, Petrogenesis of Metamorphic Rocks.

变质岩研究的对象
主要为地球表明出露的地壳岩石
少量来自较深的地幔岩石
变质岩石学的主要任务之一就是研究不同构造环境、不同深度岩石的变化
离散板块边界－大洋中脊的变质作用
汇聚板块边界－俯冲带和岛弧的变质作用　　双变质带

变质岩的研究意义
(1) 理论意义
变质岩石约占地壳总体积的 27.4%，是地壳的重要组成部分。
它们广泛地分布于早前寒武纪结晶基底及其以后的各种重要的地质构造单元中，如：碰撞造山带、大陆边缘和大陆裂谷带等。

变质岩石记录了地壳演化的热历史，是探讨地壳形成演化的重要方面。

尤其是 80 年代以来发展的变质作用 PTt 轨迹理论，把变质作用过程与地质动力学过程联系起来，使得地质学家能够从一块岩石标本乃至一粒矿物晶体中看到整个造山带的动力学过程。这里还应该强调的是 80 年代以来在世界几个造山带中发现的含有柯石英和金刚石的超高压榴辉岩，不仅大大地拓宽了变质作用的研究范围，而且涉及 90－100km 的超高压岩石的折返机制对传统地质理论提出了挑战，从而使超高压变质作用的研究一度成为地质学中的热点问题。

(2) 研究变质岩石的重要经济价值

据前苏联学者 A. B. СиДоренко(1963) 统计，西方国家前寒武纪矿产储量占国家总储量比为：铁矿 70%、锰 63％、铬铁矿 73％、铜 73－26％、镍硫化物 72％、钴 93％、铀 66％、金云母（白云母）100％。此外金、铂等贵金属亦占绝大部分。而前寒武纪地层大部分变质岩，从而可见变质岩对国家资源的重要性。

第一章 变质作用的基本概念

第一节 变质作用的概念及研究范围

第二节 变质作用类型

第三节 变质作用方式

第一节、变质作用的概念及研究范围

变质作用（Metamorphism）一词是由法国学者 Boue (1820)年首次提出来的，后来由英国学者 C. Lyell (1833) 在他的名著《地质学原理》中, 在系统地总结了水火之争的成果后，比较系统地进行了论述。

在地壳形成和发展过程中，由于物理化学条件的改变，早先形成的岩石(包括岩浆岩和沉积岩）在固态条件下所发生的矿物成分、结构构造的变化称为变质作用。

由变质作用所形成的岩石称为**变质岩** (metamorphic rocks)。

The word "Metamorphism" comes from the Greek:

meta = change, morph = form, so metamorphism means to change form.

In geology, metamorphism refers to the changes in mineral assemblage and texture that result from subjecting a rock to conditions such pressures, temperatures, and chemical environments different from those under which the rock originally formed.

关于变质作用的概念应强调以下几点:

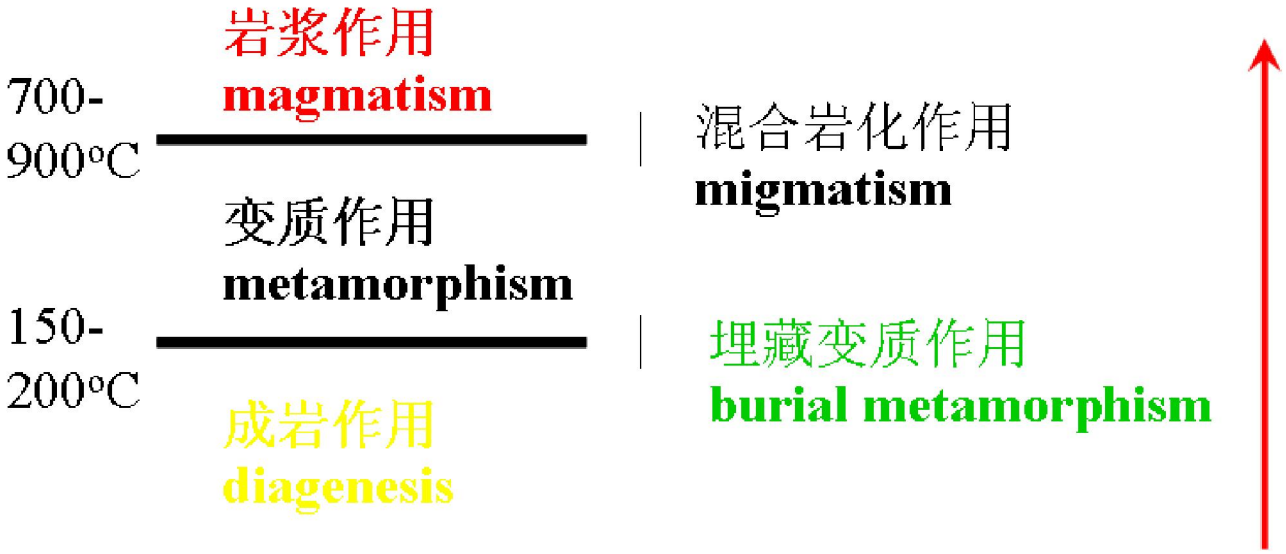
(1) 变质作用是一种**改造作用**，这种改造发生在**风化带和胶结带以下**，原岩经过改造后在固态下转变为一种新的岩石。如果原岩为沉积岩，变质后的岩石称为负变质岩；如果原岩为岩浆岩，变质后的岩石称为正变质岩。

(2) 变质过程中岩石**基本上保持固态**，并且强调**温度的递增过程**，这一点与**岩浆作用**不同。岩浆作用强调的是**矿物从硅酸盐熔体中结晶**，所涉及的是**晶体－液态的平衡**，并强调**温度的下降过程**。当变质作用温度较高时，岩石可发生**部分熔融**，出现一定数量的熔体，这些熔体与固态残余物之间可发生**混合岩化作用**。当熔体数量较多时转变为典型的**岩浆作用**。**广义的变质作用**概念包括岩石在固态下的**变质作用**和有部分熔体出现的**混合岩化作用**。

变质作用的研究范畴 (The Limits of Metamorphism)：

1、变质作用的下限：与成岩作用的界限-埋藏变质作用

2 、变质作用的上限：与岩浆作用的界限-混合岩化作用



The Limits of Metamorphism
Low-temperature limit grades into diagenesis
Diagenetic/weathering processes are indistinguishable from metamorphic
Metamorphism begins in the range of 100-150oC for the more unstable types of protolith
Some zeolites are considered diagenetic and others metamorphic – pretty arbitrary
Marked by the formation of minerals such as laumontite, analcime, heulandite, carpholite, paragonite, prehnite, pumpellyite, lawsonite, glaucophane or stilpnomelane
变质作用的上限是与**岩浆作用**的界限。在温度较高时，变质岩石可以发生**部分熔融**，出现**混合岩化作用**，当熔体达到一定量时就过渡为岩浆作用。岩石发生部分熔融的温度随岩石类型、含水量和压力等因素不同而变化。因此变质作用的上限温度有很大的变化范围，一般为 **800－1000℃**。

第二节、变质作用类型

接触变质作用 contact metamorphism
动力变质作用 dynamic metamorphism
气成水热变质作用 hydrothermal metamorphism
区域变质作用 regional metamorphism
混合岩化作用 migmatism
埋藏变质作用 burial metamorphism
洋底变质作用 ocean floor metamorphism
冲击变质作用 shock metamorphism

1. 接触变质作用 (contact metamorphism)

接触变质作用是伴随岩浆作用而发生的一种局部变质现象，当岩浆侵入时，周围的岩石受侵入体所散发的热和挥发份的影响而发生的变质作用。这类变质作用以低压为特征，压力一般不超过 0.2－0.3GPa。
根据**变质作用方式和影响因素**可进一步分为**热接触变质作用**和**接触交代变质作用**两类，代表性岩石分别为**角岩**和**矽卡岩**。
如果在地壳深部，能否发生接触变质作用？

2、动力变质作用(dynamic metamorphism)

构造断裂带上的岩石在构造应力作用下通过破碎、变形和重结晶作用等，所发生的矿物成分和结构构造变化，称为动力变质作用。其岩石以**高应变**为特征。形成的代表性岩石如**构造角砾岩、碎裂岩和糜棱岩**等。
动力变质作用是局部变质作用的一种，受**构造断裂带**的控制。

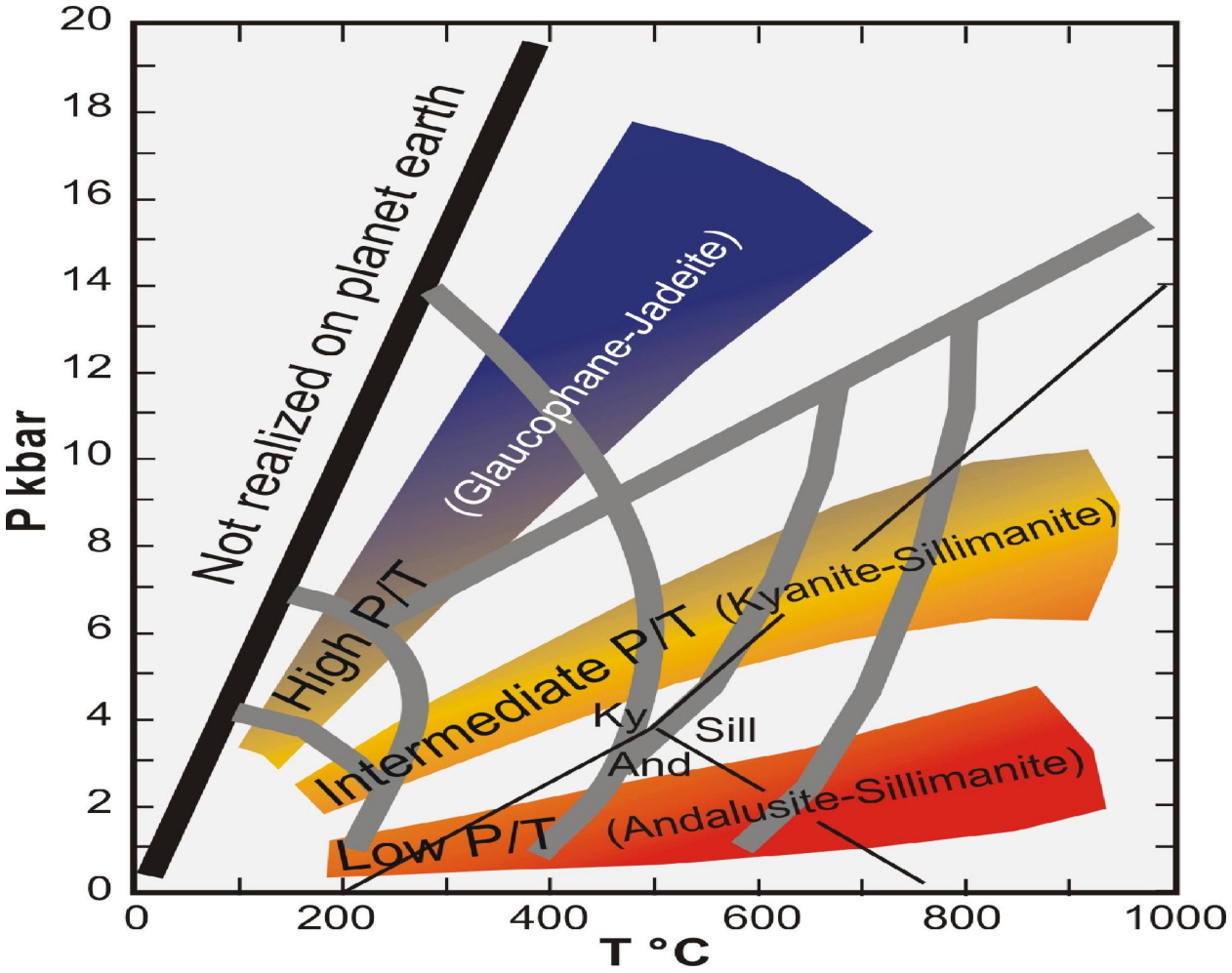
3. 汽成水热变质作用 (hydrothermal metamorphism)

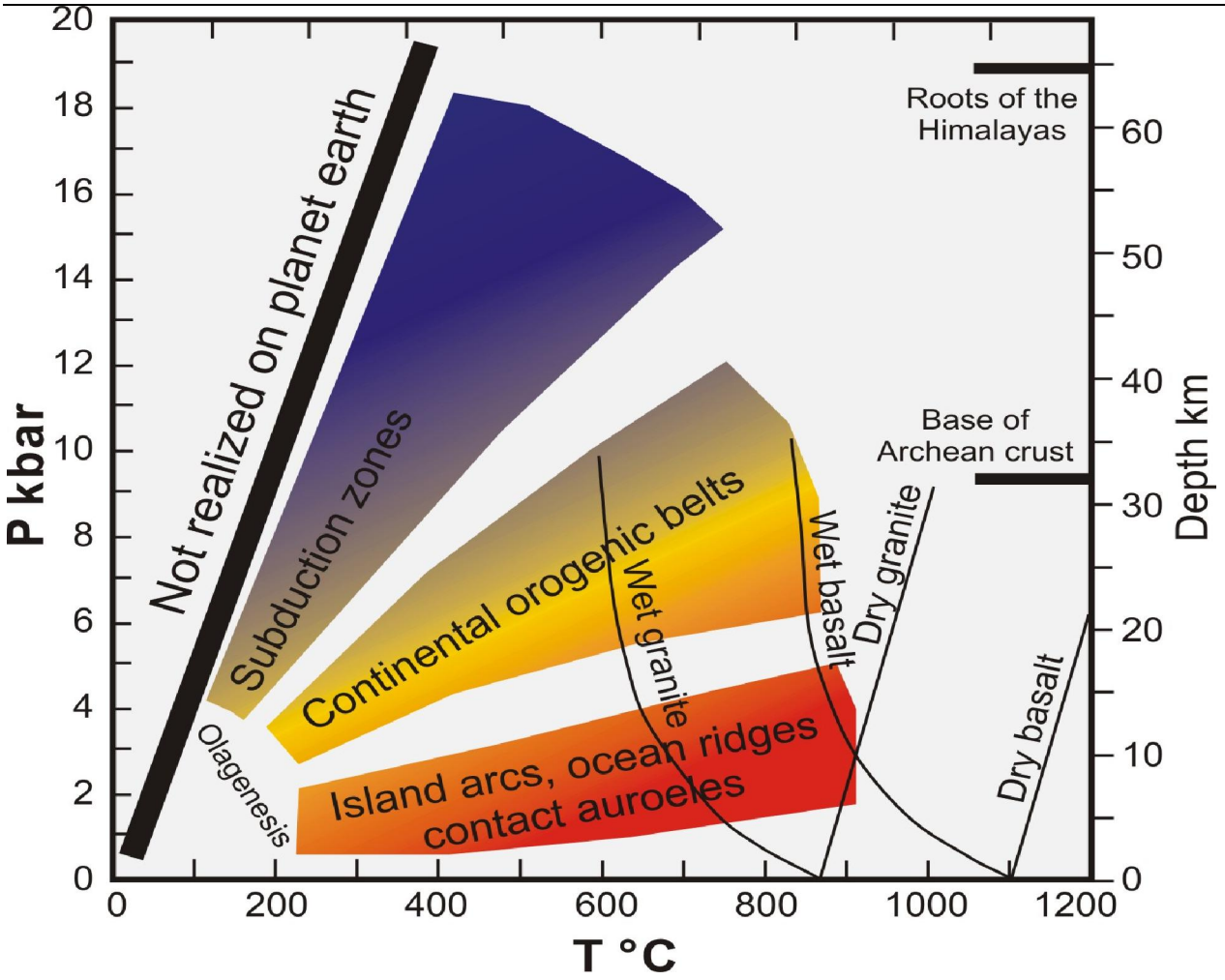
具有化学活动性的流体与固体岩石发生交代，而引起岩石发生矿物成分、结构构造的变化过程，称为气成水热变质作用，它可以出现在很多地质环境中，特别是岩体和矿脉等附近，也称为近矿围岩蚀变，也称蚀变岩。

如某些钨锡矿脉附近，花岗岩和片麻岩常常云英岩化而变成云英岩。

4. 区域变质作用 (regional metamorphism)

分布范围广泛且变质因素复杂，也称“造山变质作用” (orogenic metamorphism)。主要出现在**前寒武纪结晶基底、碰撞造山带、会聚板块边缘及大陆伸展带等**。
影响变质作用的主要因素有：**温度、压力 (负荷压力)、应力和化学活动性流体**等。
按变质作用发生时的**地热梯度（dT/dP），都城秋穗(Miyashiro)** (1961，1994) 将区域变质作用划分为**低压型、中压型和高压型**。





5. 混合岩化作用 (migmatization)

在变质作用后期，当温度较高时岩石中出现部分熔融形成花岗质熔体，这种现象称为**深熔作用(anatexis)**。当熔体数量不多时，它与固态变质岩石发生混合、交代，称为**混合岩化作用 (migmatization)**，形成各种各样的混合岩。这种作用也称为**超变质作用 (ultrametamorphism)**。当熔体达到一定数量时，就过渡为岩浆作用，形成花岗岩。有些变质岩未经深熔，仅在固态条件下受到富含 K、Na、Si 的流体交代或者纯因固态扩散而变成混合岩，称为**花岗岩化作用 (granitization)**。

6. 埋藏变质作用 (burial metamorphism)

沉积盆地中的沉积物(包括火山物质), 被埋藏到一定深度，引起温度和压力的升高，从而产生变质作用。这种变质作用同样也具有较大的区域规模，也可以看成区域变质作用的一种。但埋藏变质作用是由**埋深**所引起，**应力作用不明显，岩石缺乏结晶片理。**埋藏变质的温度、压力条件较低，一般出现**浊沸石相**和**葡萄石－绿纤石相**组合，普遍发育**变余组构。**

Regional Burial Metamorphism
Otago, New Zealand
Isograds mapped at the lower grades:

1) Zeolite
2) Prehnite-Pumpellyite
3) Pumpellyite (-actinolite)
4) Chlorite (-clinozoisite)
5) Biotite
6) Almandine (garnet)
7) Oligoclase (albite at lower grades is replaced by a more calcic plagioclase)

7. 洋底变质作用 (ocean floor metamorphism)

指**洋中脊附近的岩石**由于受到**来源于洋中脊地幔对流的热**和**自上而下的热卤水**的影响发生变质作用，变质程度**自上而下主要为沸石相、葡萄石－绿纤石相和绿片岩相，深部也可出现角闪岩相**，为**低压相系**，由于洋底扩张洋底变质作用的岩石遍布整个洋底。

Two types of ocean-floor metamorphism:

1) low grade alteration
   a) formation of palagonite
   b) formation of smectites
   c) formation of carbonate
   d) compact and dehydration

2) High grade metamorphism
   a) Zoelite facies
   b) pumpellyite facies
   c) epidote facies
   d) amphibolite facies

8、冲击变质作用 (shock metamorphism)

发生在陨石冲击星体表面时产生的**冲击坑**中，它是在**极短的时间内**发生的，压力可达**数十到上百个吉帕 (GPa)**，温度可超过 10000℃。因此它是在**瞬时高温和动态高压条件下**发生的特殊类型变质作用出现了一些特殊的**高压变质矿物**，如：**柯石英(coesite) 斯石英(stishorite),**

根据出露的规模和范围，变质作用类型可以分为两类：

1. 局部性的 变质作用（local metamorphism）

接触变质、动力变质、冲击变质和气成水热变质

2. 区域性的变质作用(regional metamorphism)

区域变质、混合岩化、埋藏变质和洋底变质

第三节 变质作用方式

重结晶作用
变质结晶或变质反应
交代作用
变质分异作用

变形及破碎作用

1. 重结晶作用

主要涉及同种矿物之间组分的**溶解、迁移和再次沉淀结晶**过程，而**不形成新的矿物相**。

如纯的石灰岩中隐晶质的方解石通过重结晶变成较粗大的方解石晶体，形成大理岩。

$CaCO_3 = CaCO_3$

2. 变质结晶作用或变质反应

指在变质作用的温度压力范围内，原岩**基本保持固态条件下**发生的化学反应，这一过程中**伴有新矿物相的生成**，并相应地**有原有矿物相消失**。

如：$CaCO_3$ (方解石) + SiO_2 (石英) = $CaSiO_3$ (硅灰石) + CO_2

3. 交代作用

交代作用是指**有组分的带入和带出的过程**，原有岩石在有外来组分加入的情况下，同时必须有一定组分的被带出，这一过程应该是**等体积的代换过程**。发生的机理非常复杂，包括**渗透作用**和**扩散作用**等。

4. 变形作用

岩石在构造应力作用下的变形有两种表现：**脆性变形**和**塑性变形**。

1>. 脆性变形，一般发生在地壳浅部、低温低压和应力快速作用的条件下，组成岩石的矿物来不及调整颗粒的形状及本身的位置，甚至来不及拆开颗粒边界上彼此铰合的结构就发生了总体破裂。岩层在脆性变形后，形成断层角砾和断层泥，固结后形成各种**断层角砾岩**和**碎裂岩**。

2>. 塑性变形，在地壳深部，较高的围限压力和温度，及慢应变速率等条件下，岩石体受到应力作用变形时，变形体并**不发生破裂**而仅改变其形状，如发生**褶曲和扭曲**等，这种不失去其自身内聚力的变形称为韧性变形。

岩石塑性变形的主要表现有：

（1）塑性变形可引起矿物晶体出现内部晶格滑动和位错， 发育波状消光、亚颗粒、扭折、机械双晶及变形纹等**变形结构。**

（2）由于岩石内部所受的应力不均匀引起**组分化学位的梯度变化**。

如某些组分在受到最大垂直应力的部分趋向于溶解，而在受垂直应力较小的部分沉淀，从而形成岩石内部的扩散流。与之有关的结构现象有如压溶现象、压力影和糜棱结构等。

（3）在应力作用下，变质岩石中的矿物出现**优选定向(preferred orientation)**， 从而形成变质岩石所特有的**结晶片理**。

5、变质分异作用

指成分均匀的岩石经过变质作用后，出现**矿物成分不均匀现象**的各种作用统称为变质分异作用。

但主要的有以下两种：

（1）压力不均匀引起的侧分泌作用

（2）与应力作用有关的分异作用

第四节　变质岩石的研究意义

（1）研究变质岩石对探讨地壳的形成与演化具有重要意义

（2）研究变质岩石有重要的经济价值

对变质作用与沉积成岩作用的界限可从两个方面考虑：

1>. 基于沉积岩石学的观点: **沉积物中相互连通孔隙的完全封闭**是成岩作用结束、变质作用开始的标志

2>. 另一个基于变质岩石学的观点: 强调**真正变质矿物组合的出现**是变质作用开始的重要标志。这些变质矿物包括**浊沸石、硬柱石、钠云母和叶腊石**等。

很低温变质作用(Very Low Temperature Metamorphism)

根据目前认识，**最低温的变质矿物**是**浊沸石**，在较高压力下为**硬柱石**。
片沸石--> 浊沸石+石英+水
变质作用的温度下限应**稍微低于 200℃**。
煤的变质程度（镜质煤发射率）和伊利石的结晶度
变质作用开始界限，构成**石油的死亡线**。因此，变质作用开始的界限有重要的经济意义。

总结：
怎样理解变质作用？
变质作用与成岩作用、岩浆作用的区别和联系
变质作用的类型？与局部和区域构造的关系？
造山带、洋中脊、大型沉积盆地、花岗岩侵入、断裂带、陨石撞击
变质作用发生的方式？
重结晶作用，变质结晶和变质反应，交代作用，变质分异作用，变形和破碎作用

回顾：
Metamorphism 变质作用的概念
变质作用的范畴：成岩作用－岩浆作用
变质作用的类型：8 种类型
变质作用的方式：5 种方式

第二章 变质反应及其控制因素

变质过程中，变质反应总是生成新的矿物相而消耗原有的矿物相, 从而使岩石达到新的平衡。

传统的观念是将一种新的特征矿物相的出现作为同一变质级别的标志。这一点在野外变质岩研究和填图时非常有效，只有能够在手标本上识别这些特征矿物即可。

如果我们能够理解产生新生矿物的变质反应，发生反应的物理条件，什么因素控制这些反应，我们就能够很好的理解变质作用的过程。

如果具有很好的实验和理论数据，我们就可以确定一个反应的 P-T-X 空间，并限定岩石在何种条件下发生的变质

第二章 变质反应及其控制因素
第一节 变质反应的基本类型
第二节 变质反应的控制因素

第一节 变质反应的基本类型
1.固态反应
(1.1) 相转变 (Phase transformations)
(1.2) 溶离反应 (出溶反应) (Exsolution)

(1.3) 纯固态反应 (Solid-solid net-transfer)
2.脱挥发分反应 (Devolatilization Reactions)
3.氧化还原反应 (Redox Reactions)
4.连续反应与不连续反应 (Continuous and Discontinuous Reaction)

1. 固态反应 (solid-solid reaction)

(1.1) 同质多型转变 (Isochemical phase transformation)

变质岩中最常见的同质多型转变为 Al2SiO5 三个多型变体之间的转变：

Ky (Al2SiO5) = And (Al2SiO5)
Ky (Al2SiO5) = Sill (Al2SiO5)
Sill (Al2SiO5) = And (Al2SiO5)

另外，有： **石英（SiO2）＝ 柯石英（SiO2）= 斯石英 （SiO2）**
石墨(C)＝金刚石(C)
方解石 （CaCO3）＝ 文石（CaCO3）

The transformations depend on temperature and pressure only
三个相的转变只受温度和压力的控制

石英＝柯石英(coesite) P > 2.6 GPa
在 Raman 分析谱图上出现 521－525 cm-1 特征峰
由于由柯石英向石英转化过程中体积增加 30%，在寄主矿物中常常出现放射状裂纹。

金刚石(diamond)
石墨＝金刚石 P = 36 kbar; T = 800 OC
极高突起，Raman 光谱具有 1331cm-1 峰

(1.2) 固溶体的溶离反应 (Solid exsolution reaction)

高温时相互混溶的固溶体，在温度降低至临界温度时发生溶离，如由 KNa-1 交换构成的碱性长石固溶体在温度降低时分解为富钠碱性长石和富钾碱性长石两种固溶体相。

条纹长石：钠长石与钾长石固溶体分离

注意与双晶的区别

高温或高压时相互混溶的固溶体矿物，在温度或压力降低时不稳定，发生**出溶**，形成 2 个或更多的固体矿物相。

(1.3) 纯固态反应 (Solid-Solid Net-Transfer Reactions)

A + B = C + D

这是变质岩中最普遍的反应，如：
这类变质反应，通常受压力的控制而具有明显的体积变化，因此在 P－T 图上其斜率往往平行于温度轴。
这类反应通常做为压力计。
如果矿物中含有流体成分，这些流体必须保留在反应中，这样流体既不会产生，也不会消耗
如果有流体的加入或产生, 就不能作为 solid-solid net-transfer reaction

2. 脱挥发分反应 (Devolatilization Reactions)

这是变质岩石中最常见的反应，包括脱 H2O 反应和脱 CO2 反应，尤以**脱水反应**常见。因为在低温条件下形成的矿物都具有较高的挥发分 (尤其是水)，而且温度越低，H2O 含量越高

这些脱水反应是划分变质作用温度范围，或变质程度的主要依据。

The hydrous assemblage is always on the low-temperature side of the curve, and the evolved fluid phase is liberated as temperature increases

一般来说，流体相如水比固体相有较大的熵值，反应熵变 S>0，其体积变化 V 则随压力变化而不同。在低压下（<1-3kb），流体 V 值较大，这类反应的斜率 dP/dT= S/ V 很小，反应单变线很缓，反应温度随压力增加而迅速增加；但当压力较大时（>3kb），气相很容易被压缩 V 变小，反应单变线近于与压力轴平行，反应温度不随压力变化而变化；当反应压力很大时， V<0，这类反应单变线变为负斜率。

脱水反应单变线与压力轴平行，因此，这些脱水反应是划分变质作用温度范围，或变质程度的主要依据，通常作为温度计。

Suppose H2O is withdrawn from the system at some point on the water-saturated equilibrium curve: pH2O < Plithostatic

According to Le Châtelier's Principle, removing water at equilibrium will be compensated by the reaction running to the right, thereby producing more water

这样，通过进一步消耗反应左侧的矿物相使反应右侧的矿物相稳定

因此，当水从产生 Kfs + Sill + H2O 的区域中移走将会使消耗 Ms + Qtz 的区域轻微扩张, and the reaction curve shifts toward lower temperature

两个途经能够使 pH2O 小于 PLith：

通过岩石变得干燥，减少岩石的水含量使 Pfluid < PLith

保持 Pfluid = PLith, 但通过加入别的成分的流体，如 CO2 或其它流体，使水的相对含量稀释

T-Xfluid 图解中

因为 H2O 和 CO2 是最普通的变质流体, X 在 T-X 图解中通常为 H2O (or CO2) 在 H2O-CO2 混合物中的摩尔组分

压力 P 也是一个普通变量, 一个 T□Xfluid 图解应该在特定的压力下产生

在 T-Xfluid diagrams 中，几乎所有脱水曲线都具有类似的形态

最大的温度在纯水的一端，向 XH2O 低的方向曲线变陡，在 XH2O 非常低时近于直立

反应温度实际上可以是比温度为最大值 at pH2O = Plith 低的任何温度

Must constrain the fluid composition (if possible) before using a dehydration reaction to indicate metamorphic grade

在变质反应中是最普遍的，包括进化变质的脱水反应和退化变质的水化反应

H2O-CO2 是最常见的流体，对所有流体的反应原理是相同的.

变质反应不仅受温度和压力的控制，而且受流体分压(partial pressure of the volatile species)的控制

3、氧化还原反应 (Redox Reactions)

这类反应主要涉及**铁的价态变化**。

这类反应的主要控制因素是**氧逸度**，在变质作用过程中，这类反应的地位虽不不如上述反应那样重要，但它们的**缓冲效应（Buffering）**控制了变质体系中的 **fO2 值**，从而控制含铁硅酸盐的出现及成分。

如当 fO2 高时，Fe3+为主，它不易进入**黑云母、石榴石和堇青石**等矿物晶格，但有利于形成**磁铁矿、绿帘石、硬绿泥石和十字石**等。

4. 连续变质反应和不连续反应 (Continuous and discontinuous Reactions)

连续反应也称为滑动反应，指的是有固溶体矿物参加的反应中，反应过程中反应物与生成物之间不断进行组分调整，也就是说生成物的形成不需要反应物的马上消失，二者之间出现一个共生的区域，所以在 PT 图上反应单变线变

成双变域。

当原岩的 FeO/(MgO+FeO) 分别为 0.4、0.6 和 0.8 时，堇青石和石榴石的共存域在 PT 图上的变化。共存域的宽度和位置既取决于原岩成分，又取决于温压条件。

Chl + Ms + Qtz -->Grt + Bt + H2O

在 KFMASH 体系是连续反应，我们将会发现绿泥石、白云母、石英、黑云母和石榴石可以同时出现在变质级别为超过石榴石带的一定区间的同一个岩石中。

固溶体相矿物成分在这一期间中发生变化，矿物含量也相应变化，直到其中的一个反应物随着变质级别的增高而消失，反应结束

不连续反应也称为非滑动反应，指的是在有固溶体矿物参加的反应中，反应物和生成物都有一定的成分，在单变线的两侧只能有一种矿物组合是稳定的。

第二节、 变质反应的控制因素

温度 (Temperature)、压力 (Pressure) 、应力 (Stress)、流体 (fluid)

1、温度 (Temperature)

温度是影响变质反应平衡的**最主要**物理化学因素，**温度升高引起进变质反应速度以指数倍增加**，

随着变质温度的升高，岩石将发生一系列变质反应，一般变质岩石的主要矿物组合都反映**最高温度条件**，称为**峰期变质组合**。

温度降低，引起退变质反应发生。通常，我们所说的变质程度和变质级都强调温度的划分。一般变质作用中的温度范围为 **200℃－900（1000℃）**。

变质作用过程中，引起岩石温度升高的原因很多。对接触变质作用来说，围岩温度升高与岩浆释放的热量有关。动力变质作用中，岩石的温度升高与构造运动的机械能有关。但对于大规模的区域变质作用来说，岩石温度的升高与来自深处的热流有关，热流值的高低常以**地热梯度**来表示。

The source of temperature is either from magma or due to the depth factor

Metamorphism usually result into change in min. comp. and texture of rocks (Ig. and Sed.) which are subjected to temp. > 100℃ and pressure > 1000's Mpa.

Low-grade metamorphism: Occurs at about 100℃ to 600℃.

High-grade metamorphism: Occurs at > 600 ℃

2、压力 (P) 包括负荷压力（Pl）和流体压力（Pf）

（1）负荷压力 (confining pressure)

指地下某一深处的岩石所承受的上覆岩层的重力，所以，**负荷压力的大小是深度和上覆岩层密度的函数**, 若按照地壳的平均密度计算，深度每增加 1 公里，压力增加 0.275kb。

压力单位，过去常用千巴 (kbar) 或巴 (bar) (1 巴＝0.987 大气压)，而现在国内文献中压力单位统一为帕斯卡 (Pa＝牛顿/m2)。

1bar = 105 Pa

1kbar = 108 Pa = 0.1 GPa

负荷压力具有**各向均性**的特点，也是影响变质反应平衡的重要的物理化学因素，如对正斜率反应，压力增加温度也增加，对于负斜率反应，压力增加，反应温度降低。对多数变质反应来说，压力增加，有利于形成摩尔体积小，密度大的矿物。

通常，人们所说的变质作用压力类型如：低压、中压和高压型变质作用，指的是压力与温度的变化关系 dP/dT，而非压力的绝对值。

一般来说，在地壳深度范围内，发生变质作用的温度 200℃到 900 ℃ (或 1000℃)，压力< 25 kbar (75 km)

很低级（甚低级）变质作用 (very-low metamorphism)

超高温变质作用（T≥ 1000℃）

超高压变质作用 （压力值 P 超过石英＝柯石英转变线，一般为 26－30kb 以上）

(2) 流体压力 (Pfluid)

指岩石中流体所承受的压力。在大多数中深变质条件下，岩石所承受的负荷压力会完全传递给其中的流体，因此 Pfuild＝Plith，此时流体压力不是决定变质反应平衡的独立因素。

在地壳浅部，岩石裂隙比较发育时，由于流体相的密度小于固态岩石的密度，出现 Pf<Pl。

而在某些岩浆侵入体附近，由于岩浆析出大量的流体相，可出现局部的 Pf>Pl 情况。Winkler（1979）指出在某些变质过程中也会出现局部的"**流体超压**"，即当岩石中的毛细孔很小，岩石的强度又足够大时，变质反应析出的流体相会产生类似于高压锅的效应，形成**局部流体超压**。有人试图用这种效应解释高压变质岩石的成因。

当 Pf≠Pl 时，流体压力也是控制变质反应平衡的物理化学因素。

3、应力

应力指**构造运动**产生的**侧向压力**，一般来说应力不是控制变质反应平衡的独立因素，但它对变质作用过程十分重要。

应力以多种方式增加变质反应速度。如应力作用使**矿物晶格变形**，使粗大矿物**细粒化**，因而由于**表面能增加而加速变质反应**；另一方面，应力作用使岩石产生**裂隙**，为**粒间溶液**的活动打开通道，促进**组分迁移**和**交代作用**的发生。

另外，**应力的垂直分力与负荷压力的作用相同，这部分应力也称为构造超压(Tectonic overpressure)**。但这是非常小的分量，对变质作用的影响并不是有些人想象的那么大。

4、流体的作用

岩石中总是存在一些流体，这些流体的成分以 **H2O 和 CO2** 为主，它们存在于矿物晶格和粒间溶液中。这些流体的作用除了其分压 (Pf)可能控制变质反应平衡外，其本身作为溶剂是促进变质反应进行的一个重要因素。实际上大多数变质反应的进行都以流体作为媒介，进行元素和组分的溶解与迁移，在真正干的条件下发生变质反应极为困难。

如对 2MgO+SiO2=Mg2SiO4 的实验研究发现，在干的条件下，1000℃时，4 天时间只形成 26％的镁橄榄石；但有水参与时，在 450℃条件下，只需几分钟反应就完成了。

在进变质作用过程中，以水为主的流体相不断减少，因此一般变质作用过程也是岩石的脱水过程。

另外，**流体相的成分**也是变质反应的一个控制因素，如在反应 14，CO2 的分压（摩尔分数）直接影响着反应温度。

除了上面讨论的因素之外，氧逸度对含铁矿物参与的变质反应有重要影响。如果考虑变质反应动力学问题，时间也是个重要因素。

总结

变质反应的基本类型

固态反应
脱挥发分反应
氧化还原反应
连续和不连续反应

变质反应的控制因素

温度 (Temperature)－加快反应速度
压力 (Pressure) －改变矿物结构增大岩石的密度
应力 (Stress)－使岩石破碎、变形、动态重结晶、变质分异
流体 (fluid)－变质反应的催化剂

本章的重点问题：

1、变质反应有那些主要类型？

2、固－固反应和脱水反应有何特点？

3、何为连续反应与不连续反应？

3、控制变质反应的主要因素有那些？它们怎样影响变质反应？

第二章回顾：

变质反应的基本类型

纯固态反应－3 种类型

脱挥发分反应

氧化还原反应

连续和不连续反应

变质反应的控制因素

4 种因素

需要掌握的重点问题：

1、变质反应有那些主要类型？

2、固－固反应和脱水反应有何特点？

3、何为连续反应与不连续反应？

3、控制变质反应的主要因素有那些？它们怎样影响变质反应？

第三章 变质岩的基本特征

第一节 变质岩的化学成分特征

第二节 变质岩的矿物成分特征

第三节 变质岩的结构和构造特征

第一节 变质岩的化学成分特征

变质岩的化学成分取决于**原岩的组分**和**变质作用的类型和强度**，如不伴有交代作用，则变质岩的化学成分就取决于原岩，如伴有交代作用则变质岩的化学成分既取决于原岩，又取决于交代作用的强度和类型

等化学系列 (isochemical series)：具有同一原始化学成分的所有岩石构成等化学系列，其变质矿物组合的不同是由变质作用的类型和强度所决定的。

Turner 以这一概念为基础把常见的变质岩石分为五个等化学系列：即**富铝（泥质）系列、基性系列、长英质系列、碳酸盐系列和超基性系列。**

但自然界的岩石成分不可能只局限这 5 种成分，还有它们之间的过渡

1. 泥质系列，或称为富铝系列

1). 原岩为泥岩 (mudstone) 和页岩 (shale) 等

2). 在化学成分上富 Al_2O_3、SiO_2、K_2O，贫 CaO 和 Na_2O， $K_2O>Na_2O$

3). 常见的变质矿物：

Bi (biotite-黑云母), Ms(muscovite-白云母), Chl(chlorite-绿泥石), Ky (kyanite-蓝晶石), Sil (sillimanite-矽线石), And (andalusite-红柱石), Alm (almandine-铁铝榴石), Chtd (chloritoid-硬绿泥石), Cord (cordierite-堇青石), St (staurolite-十字石), Kfs－钾长石

Slate: compact, very fine-grained, metamorphic rock with a well-developed cleavage. Freshly cleaved surfaces are dull.

Phyllite: a rock with a schistosity in which very fine phyllosilicates (sericite/phengite and/or chlorite), although rarely coarse enough to see unaided, impart a silky sheen to the foliation surface. Phyllites with both a foliation and lineation are very common.

Schist: a metamorphic rock exhibiting a schistosity. By this definition schist is a broad term, and slates and phyllites are also types of schists. In common usage, schists are restricted to those metamorphic rocks in which the foliated minerals are coarse enough to see easily in hand specimen.

2. 基性系列：或称铁镁系列

1). 原岩为基性岩浆岩(火山岩或侵入岩)和铁质白云质泥灰岩等，

2). 化学成分上富 CaO、FeO*、MgO，贫 Na2O 和 K2O,Na2O>K2O

3). 常见变质矿物: Chl (绿泥石)， Ep (绿帘石)， Act (阳起石)， Hb (普通角闪石)， Hy (紫苏辉石)， Di (透辉石)， Pl (斜长石)

3. 长英质系列

原岩为各种砂岩、粉砂岩，中酸性岩浆岩

化学成分上富 SiO2、Na2O、K2O，贫 Al2O3, 贫 MgO, FeO

常见变质矿物：Ms(白云母)， Bi(黑云母) , Kfs (钾长石)，Qtz

Gneiss: a metamorphic rock displaying gneissose structure. Gneisses are typically layered (also called banded), generally with alternating felsic and darker mineral layers. Gneisses may also be lineated, but must also show segregations of felsic-mineral-rich and dark-mineral-rich concentrations.

4. 碳酸盐系列：

原岩为石灰岩和白云岩，

化学成分上富 CaO 或富 MgO

常见变质矿物：Calcite (方解石)，Dolomite (白云石)，Talc (滑石)， Tremolite (透闪石)， Diopside (透辉石)，Wollastonite (硅灰石), Grossular (钙铝榴石)，镁橄榄石 (Olivine), Serpentine (蛇纹石)

5. 超基性系列：或称超铁镁系列

1). 原岩为超基性岩浆岩，或地幔岩, 少见.

2). 化学成分上富 MgO 和 FeO。

3). 常见变质矿物：镁铝榴石 (Pyrope), Olivine, Opx, Cpx, Spinel, Talc, Serpentine, phlogopite 等

第二节 变质岩的矿物成分特征

变质岩的矿物成分也取决于两个方面：

1>原岩的化学成分：什么样的原岩就决定出现什么样的变质矿物

2>变质作用条件：同样的原岩组分，在不同的变质温压条件下可出现不同的矿物。

变质矿物: 特征变质矿物、贯通变质矿物

特征变质矿物：

稳定范围比较窄，反映外界条件变化比较灵敏的一类变质矿物，如 And, Sill, Ky, Cord 等

贯通变质矿物：

稳定范围比较宽，温压条件变化不敏感的一类变质矿物，如：长石、石英等。

五个等化学系列特征对比表

与岩浆岩相比，变质岩矿物成分的一般特征为：

（1）经常出现一些特征的 Al 硅酸盐变质矿物。

如：红柱石、蓝晶石、矽线石等富铝矿物，十字石、堇青石等富铝矿物；

（2）常见片状、纤维状矿物。 如：云母、角闪石、绿泥石等。

（3）变质岩中的矿物常出现明显的变形特征。如：波状消光、亚颗粒、扭折带、拉长等。

第三节 变质岩的结构和构造特征

一、结构和构造的基本定义：

结构 (Texture): 岩石中矿物的自形程度、粒度、形态及其相互关系等特征的总称。

构造 (Structure): 岩石中矿物的空间分布状态及其相互关系等特征的总称。

组构 (Fabric): 笼统地指结构、构造的总称。

二、变质岩的结构：变余结构、变晶结构、交代结构。

1 变余结构

变余结构指变质作用不彻底，而使原岩的结构部分地被保留下来。

原岩结构的保留取决于两方面因素:

首先是**岩石的变质程度**，如在低级变质岩石中易于出现变余结构，随着变质程度的增加，岩石中的变余结构减少；

其次是**原岩的结构和成分**，如粗粒岩石比细粒岩石易于保留原岩结构，含水少的岩石 (如花岗质岩石) 比含水多的岩石 (如泥质岩石) 易于保留原岩结构。

变余结构的命名是"变余＋原岩结构名称":

与**沉积岩**有关的变余结构包括变余泥质结构、变余砂状结构、变余砾状结构等。

与**岩浆岩**有关的变余结构包括变余斑状结构、变余花岗结构、变余辉长结构、变余辉绿结构，变余交织结构等。

2. 变晶结构

变质作用过程中，岩石在固态下由变质结晶作用形成的结构。

按自形程度
按矿物粒度的相对大小
按矿物粒度的绝对大小
按矿物的形态
按矿物之间的相互关系

(1) 按自形程度：

全自形变晶结构，组成岩石的各种矿物都发育完好，基本上呈自形晶，在变质岩石中罕见。

半自形变晶结构，岩石中的不同矿物自形程度不同，部分为自形，部分为他形晶。

他形变晶结构，岩石中的各种矿物都呈他形晶，这种情况对变晶结构最为特征。

与岩浆岩的结晶结构相比，变质岩中矿物的自形程度不反映结晶的先后次序，而是反映结晶力的大小。结晶力指的是晶体生长过程中，反抗周围的固态物质而使自身向外生长的能力。把变质矿物按结晶力减小的顺序排列构成变晶系。据 F. Becke(1930), 区域变质岩石中一些常见矿物在变晶系中的顺序为：

榍石、金红石、石榴石、十字石、蓝晶石、夕线石、硬绿泥石、钠长石、白云母、黑云母、绿泥石、石英、堇青石、正长石、微斜长石。

矿物结晶力的大小，与矿物本身的特点有关，通常比重大的矿物结晶力也大；另外矿物的自形程度也与变质条件如温度、压力和流体等因素有关，如多数矿物的自形程度都随变质温度的升高而变得好些。

（2）按矿物粒度的相对大小

等粒变晶结构 (isogranular texture)，岩石中大部分矿物粒度大致相近。

不等粒变晶结构，矿物粒度连续变化。

斑状变晶结构(Porphyroblastic texture)，岩石中不同矿物的粒度明显不同，表现为某种较大的矿物颗粒分布在其他细小的矿物颗粒之中，大的为**变斑晶**，小的为**基质**。

斑状结构与斑状变晶结构的区别

斑状结构（岩浆岩结构）	斑状变晶结构（变质岩结构）
①斑晶比基质形成得早。	斑晶与基质同时形成。
②斑晶受到残余岩浆的改造，斑晶有溶蚀、暗化边等现象。	斑晶内常有基质矿物的包体，有时撑开基质矿物。
③由岩浆中先结晶的造岩矿物组成，如长石、角闪石、辉石、石英等。	由结晶力较大的特征变质矿物组成，如石榴石、十字石、蓝晶石、红柱石、硬绿泥石等。

(3) 按矿物粒度的绝对大小

粗粒变晶结构（>3 mm），
中粒变晶结构（3－1 mm），
细粒变晶结构（1－0.1 mm），
微粒变晶结构（<0.1 mm）。

变质矿物的粒度大小:

1. **变质温度的控制**，当变质程度愈高时，矿物的粒度也愈粗。
2. 与**变质矿物自身成核的能力和晶体生长速度**有关。如**石榴石、十字石**等矿物，虽然相应组分在岩石中含量不多，但仍经常形成较大晶体，**石英**则相反。

（4）按矿物形态

粒状变晶结构，岩石主要由一些粒状矿物如石英、长石和方解石等组成，也称为**花岗变晶结构(granoblastic texture)**。按颗粒的外形轮廓可进一步划分为：

① **镶嵌粒状变晶结构(三连点或三边结构)**，矿物呈简单的多边形或浑圆形，彼此接触界线平直。

② **齿形粒状变晶结构（缝合线结构）**，矿物颗粒外形极不规则，彼此接触线呈齿状。

③ **角岩结构**，粒度很细的、均匀的显微粒状变晶结构。

鳞片变晶结构，岩石主要由云母、绿泥石和滑石等片状矿物组成。

纤状变晶结构，岩石主要由纤维状、长柱状或针状矿物组成，如阳起石、透闪石、夕线石和硅灰石等，它们常成平行排列或束状集合体。

（5）按着矿物之间的相互关系

包含变晶结构，指粒度较大的矿物（**主晶**）包裹了一些不定向的细小矿物（**客晶**），主晶通常为一些**自形程度较好的变斑晶**，而其中所包裹的客晶为**基质中的矿物**，或者为**前一变质阶段的矿物**。一般随着变质程度增加，变斑晶中的包裹物减少。

当主晶中的包裹物很多时，可使主晶呈筛网状，称为**筛状变晶结构**。当主晶中的包裹物定向排列时，称为**残缕结构**。此时主晶中的内片理或者与外片理平行，或者与外片理斜交（见图 3－4）。

当变斑晶形成过程中有应力作用时，变斑晶中的包裹物可发生弯曲状排列，表现为**“S”形的旋转结构**。

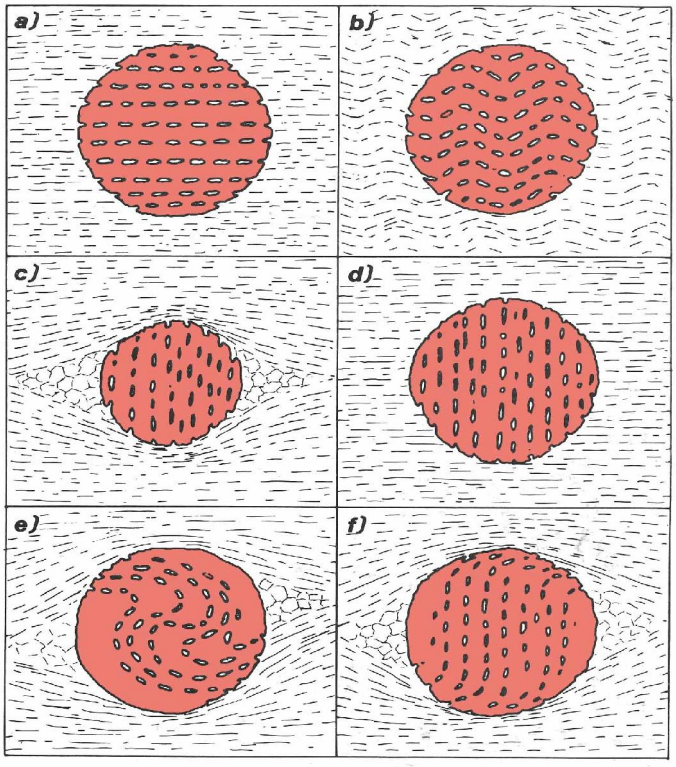
变斑晶生长与变质作用的关系

Post-kinematic: Si is identical to and continuous with Se

Pre-kinematic: Porphyroblasts are post-S2. Si is inherited from an earlier deformation. Se is compressed about the porphyroblast in (c) and a pressure shadow develops.

Syn-kinematic: Rotational porphyroblasts in which Si is continuous with Se suggesting that deformation did not outlast porphyroblast growth.

From Yardley (1989) An Introduction to Metamorphic Petrology. Longman.



反应边结构，一种或数种矿物沿某矿物晶体成放射状、似蠕虫状或镶边状，它们彼此在晶形和光性方位上都不连续，也称为**冠状体**，这种结构的出现是**相邻矿物间反应未达到平衡的结果。**

后成合晶结构，两种或两种以上的次生矿物共生在一起，它们可以构成**原生矿物的反应边**，是**原生矿物分解的产物**。这种结构在**高压麻粒岩，榴辉岩和石榴橄榄岩**中很常见。

变晶结构的命名原则：

以**形态命名**为主，如粒状变晶结构、鳞片变晶结构等；

两种形态的矿物同时出现时，按**少前多后**的原则，如鳞片粒状变晶结构、纤状粒状变晶结构等；

把**矿物粒度的绝对大小和相对大小**放在形态名称的前面，如细粒不等粒粒状变晶结构等；

对具有**斑状变晶结构**的岩石，应描述**基质的结构类型**，如**岩石为斑状变晶结构，变斑晶为石榴石，基质为细粒粒状变晶结构。**

3. 交代结构

交代结构是指一个变质矿物和矿物集合体被另一个矿物和矿物集合体取代的现象，在取代过程中有物质成分的交换和结构的改组。

主要的交代结构有：

（1）交代残余结构，当一个原生矿物被一个次生矿物交代时，交代进行不完全，便有原生矿物的残余保留在次生矿物中。如区域变质岩中的石榴石被绿泥石替代，在绿泥石片状集合体中保留石榴石的残余。

（2）交代假象结构，当一个原生矿物被一个次生矿物所交代，如果交代作用进行的很彻底，则次生矿物整个取代了原生矿物，具有原生矿物的假象。如橄榄石的蛇纹石化、石榴石的绿泥石化、红柱石的绢云母化等常保留原生矿物的假象。

（3）交代净边结构，常见于混合岩中，在钾长石与斜长石的接触处，常见受绢云母化或云雾状的斜长石周围有一表面洁净的环带或镶边，称为**净边**。净边的产生是由于交代作用由外向内进行，原来的次生矿物如云母等被再度吸收而成。

（4）交代蠕英结构，此种交代结构在混合岩中比较普遍，但成因不一。如斜长石被微斜长石交代时可在其接触带附近出现蠕英结构。斜长石交代微斜长石时，析出过剩的 SiO2，也能在斜长石边缘出现蠕英结构。不同成分的斜长石之间发生交代作用时，也能形成蠕英结构。

（5）交代条纹和反条纹结构，常见于混合岩中，微斜长石中的钠长石形态可以有线状、树枝状、网脉状、透镜状、补丁状、棋盘格子状等，称为**条纹长石**。

三. 变质岩的构造 包括变余构造、变成构造。

变余构造指变作用不彻底，把原岩的构造保留下来。

与沉积岩有关的构造如变余层理构造、变余波痕构造等。

与火山岩有关的构造如变余杏仁构造、变余流纹构造和变余枕状构造等。

变成构造，由变质结晶作用和变形作用形成的构造。常见的有：

（1）**斑点构造**，在变质作用初期，岩石中由于某些组分的局部集中所形成的形状不一、大小斑点，构成斑点构造。斑点得成分有碳质、硅质和铁质物质，或者是红柱石、堇青石和云母等矿物的雏晶。

（2）板状构造，岩石在构造应力作用下常形成一组密集平行的破劈理，这些破劈理就构成板状构造的板理。具有板状构造的岩石重结晶作用不明显，板理面上常见较弱的丝绢光泽，系由细小的绢云母和绿泥石等重结晶所至，岩石主要为变余泥质结构。

（3）千枚状构造，岩石中的各种组分已基本重结晶并定向排列构成千枚理，但矿物的粒度细小，肉眼不能分辨，仅在片理面上见强烈的丝绢光泽。

（4）片状构造，主要由片、柱状矿物（如云母和角闪石等）和部分粒状矿物（如石英、长石等）定向排列而成。与千枚状构造不同的是具有片状构造的岩石重结晶程度高些，肉眼可以辨认。

（5）片麻状构造，主要由粒状矿物和少量的片、柱状矿物定向排列而成，由于片、柱状矿物含量少，在岩石中断续分布构成片麻理。

（6）**条带状构造**，岩石中的片、柱状矿物和粒状矿物分别集中，形成颜色和粒度不同的条带，称为条带状构造。
（7）**块状构造**，岩石中的矿物和矿物集合体作均匀的分布，排列无定向性。
（8）**褶劈构造**，在千枚岩和片岩中常见早期的面状构造被后期面理切穿的现象，这种后期面理中若无任何矿物充填即为板状劈理，如果被另一期的矿物所充填则称为褶劈理。

此外，如果暗色矿物集合体在浅色矿物构成的基质中作不连续的条片状分布，称为**条痕状构造**。

当长石，尤其是钾长石巨晶，和长英质集合体呈不连续的透镜状分布，此时基质中的片理会围绕透镜体而弯曲，巨晶和透镜体的两侧可以出现一些结晶拖尾，或其它充填物，称为**眼球状构造**。

面状构造 (面理): 叶理 (foliation), 片理 (schistose), 劈理 (cleavage), 条带状构造 (banded layer)
线状构造 (线理): 杆状构造, 拉伸线理, 皱纹线理

第四章　共生分析和共生图解

本章要点：
1. 如何认识和确定变质作用的平衡？
2. 吉布斯相律和柯尔任斯基矿物相律有何异同？它们对讨论变质作用有何意义？
3. ACF、A'KF 和 AFM 图解有哪些特点？如何把矿物成分和原岩成分投影在这些图解上？如何用这些图解进行变质矿物共生分析？

4.1. 变质岩的平衡问题及相律
变质岩平衡共生组合的确定
封闭体系中的吉布斯相律和戈尔德斯密特矿物相律
开放体系中的柯尔任斯基矿物相律
4.2. 组分共生图解
图解的表示方法
ACF 图解
AKF 图解
AFM 及 A(K)FM 图解

4.1.1. 变质岩平衡共生组合的确定

变质岩作为一个多相多组分体系，用物理化学原理来处理变质作用的问题，其核心是**平衡问题**。
只有在达到物理化学平衡条件下，才能利用平衡热力学的基本原理探讨其成因过程。

矿物平衡共生组合(equilibrium assemblage)：
在一定的 P-T 条件下，岩石中同时出现的自由能最小的矿物组合。

尽管时代和地区不同，总体化学成分相同或相似的变质岩 (即等化学系列)，在相同的物理化学条件下，其矿物组合能够重复出现，表明达到了平衡，这样的矿物组合称为**共生组合**

平衡? 不平衡?

变质岩能否达到物化平衡是关键问题，特别是在低级变质地区、混合岩化发育地区和汽成水热变质地区，经常出现不平衡的结构现象；

电子探针的应用发现很多变质矿物如石榴石、角闪石等有环带结构，岩石在总体上并未达到平衡。

局部平衡（local equilibrium）：即在总体上并未达到平衡的岩石中，存在着多个达到平衡的结构域（textural domain），对于每一个具体的结构域来说都可以应用物理化学的平衡原理。

因此，在研究变质岩石时，首要一点就是确定哪些组合是平衡的。

平衡共生组合的确定：

1>. 在一个薄片中只有相互接触的矿物才可能组成平衡共生矿物组合。

2>.平衡共生组合中同一矿物的不同颗粒，具有相同的　　成分. 但对于有成分环带的矿物如何看待?

3>.岩石的不同部位，按矿物对之间的组分分配关系所得的温压条件基本一致。

4>. 平衡体系必须符合相律 F＝ C- ϕ+2

二、封闭体系的 Gibbs 相律和 Goldschmidt 相律

$$F = C - \phi + 2$$

F = [总变量数]-[平衡关系数]

F: 体系的自由度的数量，可以自由改变而不使体系平衡受到破坏的变量数 (如：温度、压力、每个相的成分，等)

C: 封闭体系中限定每个相的独立组分的最小数目，

ϕ: 平衡状态下稳定共生的相的最大数目。

体系的概念：

体系是一个热力学单元，它的范畴大小因研究对象而异。相对于体系而存在的称为环境。体系与环境之间既没有物质交换也没有能量交换的称为孤立体系；体系与环境之间有能量交换而没有物质交换的称为封闭体系；体系与环境之间既有能量交换也有物质交换的称为开放体系。

严格意义上说，自然界不存在绝对孤立体系和封闭体系，体系的开放与否，是与组分的性状密切地联系在一起的

Goldschmidt 相律

在自然界岩石中，对体系平衡的影响因素至少为温度和压力，因此常出现 F ≥ 2,

$$F = C - \phi + 2 \geq 2$$

$$\text{则有 } \phi \leq C$$

即：在温度、压力都可以改变的条件下，封闭体系中稳定共生的矿物相的最大数目小于或等于独立组分数，称之为 Goldschmidt 矿物相律，也可称为矿物相律。

变质体系的相律

对于一个具有确定组分 C 的岩石

让我们考虑以下 3 种情况:

a) $\phi = C$　　F = 2

这是标准的双变平衡

岩石可能出现代表一个变质带的平衡矿物组合

b)　$\phi < C$　(F > 2)

主要出现在具有固溶体的矿物系统中

c)　$\phi > C$

至少是 2 种情况中的一种:

1) F < 2

样品的变质级别恰好位于单变反应曲线上 (univariant reaction curve (isograd, F = 1)或者是 不变点上 invariant point (F = 0)

Consider the following three scenarios:

C = 1

ϕ= 1 common

ϕ = 2 rare

ϕ= 3 only at the specific P-T conditions of the invariant point

(~ 0.37 GPa and 500oC)

F = 0, ϕ = 3

F = 1, ϕ = 2

F = 2 ϕ = 1

2) 没有达到平衡

矿物相律只适合于体系达到平衡的情况下, 而在体系没有达到平衡时,可以出现任何数量的矿物

Graywackes typically contain fragments of a number of different rocks in a matrix of grains derived from a rapidly eroding source

Dozens of minerals may be present, but they are not in equilibrium with one another

A number of igneous and metamorphic rocks also have retrograde reactions that begin, but do not run to completion

严格地说，变质作用并不是在封闭体系下进行的，变质过程中，一些活动组分如 H2O 和 CO2 等总要发生变化，当出现交代作用时，很多造岩氧化物也要不同程度地变化。本世纪五十年代，苏联学者柯尔任斯基对交代作用进行了一系列理论研究，提出了组分相对活动性学说，第一次把相律应用于开放体系。

Korzhinskii 把各种岩石组分按活动性排列为：

H2O-CO2-K2O-Na2O-CaO-MgO-FeO-Fe2O3-SiO2-Al2O3

1、活动组分： H2O-CO2-K2O-Na2O

2、惰性组分：

1>杂质组分:BaO, CuO

2>独立组分: P2O5

3>类质同象组分: Mg(Fe)O

4>过剩组分: SiO2

5>有效惰性组分: CaO-MgO-FeO-Fe2O3 -Al2O3

三、开放体系的 Korzhinskii 矿物相律

Korzhinskii 相律：

$$f = C - \phi + 2$$

$$C = k + m, \quad f \geq 2 + m, \quad \phi \leq k$$

k = 有效的惰性组分； m = 活动组分

柯尔任斯基矿物相律：在一定的温度压力范围内，在开放体系下同时共存的平衡共生矿物相的最大数目等于独立有效惰性组分数，而与活动组分和杂质组分等无关。

四、 组分共生图解

共生图解表示在特定温压条件下的平衡共生组合与其原岩独立组分之间的关系，这类图解也称为变质相图；

一般选择三个特征的独立有效惰性组分做成等边三角形。如 ACF 和 A‘KF 图解。

也可以选择四个组分做成四面体，然后再向某一平面上投影，如 AFM 图解

组分的表示方法：二组分，三组分，四组分

请注意！有效的共生相图必须是指示特定的温压范围，例如变质地体的一个变质带，因为矿物和矿物组合的稳定性随 P 和 T 的变化而改变

1. ACF 图解

Escola（1915）在研究芬兰奥里耶维地区的低压角闪岩相变质岩时，就使用了 ACF 图解。他把 H2O 和 SiO2 作为过剩组分，把 Fe2O3 和 Al2O3 归并，把 MgO、FeO 和 MnO 归并，又考虑到 K2O 和 Na2O 主要含在钾长石和钠长石中，在 ACF 图解中不表示钾、钠长石。这样矿物共生组合便取决于下列三组分，分别以 A、C、F 表示：

$$A=Al_2O_3+Fe_2O_3-(K_2O+Na_2O)$$

$$C=CaO-3.3P_2O_5$$

$$F=MgO+FeO+MnO$$

使用 ACF 图解的前提是：

SiO2 饱和或过饱和；

Fe、Mg 完全类质同象；

K2O 和 Na2O 存在于长石中。

该图解的主要优点是其**适用的成分范围比较宽，包括泥质、基性和钙质等系列的岩石。**但该图解**并未考虑 K2O、Na2O，因此不能表示含钾、含钠矿物**。因此确切地说，**ACF 图解最适合于 SiO2 过饱和的富钙岩石，即基性系列在中、低压变质条件下的相关系。**

2. A'KF 图解

泥质岩石的成分特点是贫 CaO，富 Al2O3（Al2O3>Na2O+K2O+CaO)，富 K2O，在中高级变质泥质岩中，CaO 主要存在于斜长石中。由于 ACF 图解很难确切地表示富钾泥质岩石，因此 Escola 提出 A'KF 这一辅助图解。

$$A' = Al_2O_3+Fe_2O_3-(Na_2O+CaO)$$

$$K = K_2O$$

$$F = FeO+MgO+MnO$$

泥质岩石中的特征矿物主要投影在 A'KF 图解上的 A'F 边上，在黑云母和白云母都稳定的中低级变质条件下，两种云母之间的连线把该图解分成两个区：

K2O 不足的泥质岩石中的特征矿物投影在这条线的右侧，不能与钾长石共生。

而 K2O 过剩的泥质岩石投影在云母线的左侧，这些岩石出现钾长石，不出现富铝矿物。

只有在高级变质条件下，白云母分解后，无论岩石中 K2O 过剩与不足，富铝矿物才可以与钾长石共生。

ACF 和 A’KF 图解配合使用可以表示大部分变质岩石如基性系列、富铝系列和长英质系列等的变质矿物组合与全岩成分之间的关系，但这两个图解的共同问题是把 FeO 和 MgO 作为完全类质同象组分，这在表示出现多个铝硅酸盐矿物的组合时会出现错误。因此有必要引入更为合理的图解。

3. AFM 图解

AFM 图解是 J. B. Thompson(1957)提出的，他把 FeO 和 MgO 处理为两个独立的组分，主要适用于泥质岩石。

一般泥质岩石主要由 SiO2、Al2O3、MgO、FeO、K2O 和 H2O 六个组分组成，称为 **KFMASH 体系**。

如果矿物组合中出现石英，可把 SiO2 作为过剩组分，H2O 作为完全活动组分，此时变质岩石的共生关系取决于 Al2O3、MgO、FeO 和 K2O 四个组分。

考虑到变质泥质岩石在中低级变质时都含有白云母，在高级变质时都含有钾长石。因此，Thompson 设计在 AKFM 四面体中从白云母成分点 M 或从钾长石成分点 K 向 AFM 面上投影的共生图解。

$$A = Al_2O_3 \qquad K = K_2O \qquad F = FeO \qquad M = MgO$$

为了避免用 3 维的四面体, Thompson 设计用 AFM 面, 而取消 K2O 顶点

他意识到不能从 K2O 投影, 因为没有矿物相位于这一顶点

白云母(Ms)为富 K 变质泥质岩最常见的矿物相，可以从 Ms 投影到 AFM 基面上
黑云母（Bi）从 Ms 点上投影形成一个带(Fe/Mg 变化)，并且在 AFM 三角图解之外
在高级变质岩石中，白云母脱水形成钾长石（high-K phase）
AFM diagram 应该从钾长石(Kfs)投影
从 Kfs 投影时, biotite 投在 Kfs-F-M 平面中

A = Al2O3 - 3K2O (if projected from Ms)
= Al2O3 - K2O (if projected from Kfs)
F = FeO
M = MgO

我们要避免使用上面的立体图解投影，通过上述公式分别计算投影组分:

A = Al2O3 - 3K2O; F = FeO; M = MgO

我们可以将任何成分直接投在 AFM 图解上
当 A, F, and M 是正值, plotting a point is straightforward
当 A 是负值, 如黑云母 biotite, 投影的步骤如下:
A=(Al2O3-3K2O)/(Al2O3-3K2O+FeO+MgO)
M=MgO/(FeO+MgO)
投点时, 从 A 沿稳定的 M/F 比值延长 Since M/(F+M) = 0.66
从 A 沿垂直线向下延长到 A/(A+F+M) = - 0.5
在 A ＝ -0.5 时水平线的宽度决定于 F:M

黑云母的垂直区域决定于 Al-Al 和 (Fe-Mg)-Si 的固溶体替代
A 用白云母投影时，K-feldspar 投影离开了 AFM
要在 AFM 图解中包括 Kfs，将其设定在负值的无限大的位置上

实际工作中，矿物成分在 AFM 图上的标绘不必用立体图投影，只需在二维平面内用 A 和 M 两个比值参数坐标即可。

以白云母作为投影点时，得到两个参数的计算方法是：
A＝(Al2O3－3K2O)/(Al2O3-3K2O+MgO+FeO) (分子数比）
M＝MgO/(MgO+FeO)

以钾长石作为投影点时，A 的计算方法为：
A＝(Al2O3－K2O)/(Al2O3-K2O+MgO+FeO)

AFM 图解可以反映变质矿物组合中常见的两种类型替代关系，契尔马克型替代和 Fe－Mg 之间的替代，可以表示滑动变质反应。另外，该图解在相律上也比较合理。

由于黑云母和石榴石中 Mg-Fe 固溶体, 大部分区域被两相域占据 with tie-lines (+Qtz+Mu)
尽管我们可以在 ACF 和 AKF 图解上投影理想的矿物分子式 ，但要将真正的镁铁矿物相投在 AFM 图解上，则必须通过电子探针确定矿物的 Mg/(Fe+Mg)

回顾：共生组合&共生图解
矿物平衡共生组合的定义
封闭体系的吉布斯相律和 Goldschmidt 矿物相律
开发体系下的 Korzhinskii 矿物相律
共生图解：
ACF、A'KF 和 AFM 图解有哪些特点？分别适用于何种类型（或成分）的岩石？
如何把矿物成分和原岩成分投影在这些图解上？
如何用这些图解进行变质矿物共生分析？

第五章　变质相、变质带和变质相系

Metamorphic facies, zones and facies series

本章要点

1、何为变质相？

2、何为变质带（递增变质带），有几种类型？

3、接触变质作用有哪些变质相？其主要变质反应和矿物组合如何？

4、区域变质作用有哪些变质相？其主要变质反应和矿物组合如何？

5、何为变质相系？主要有几种类型？与大地构造的关系？

5.1. 变质相的概念 Conception of metamorphic facies

变质相 20 世纪初期由挪威地质学家戈尔德斯密特(Goldschmidt, 1911) 和芬兰地质学家爱斯克拉（Escola,1915）提出的。

变质相的概念 Metamorphic facies

Pentii Eskola (1920) "**一个变质相是指类似的温度、压力条件下达到化学平衡的所有岩石的总和（不论其结晶方式），一个变质相内部，随着岩石总体化学成分的改变，其矿物组合作有规律的改变**"。

"In any rock or metamorphic formation which has arrived at a chemical equilibrium through metamorphism at constant temperature and pressure conditions, the mineral composition is controlled only by the chemical composition. We are led to a general conception which the writer proposes to call metamorphic facies."

但 Eskola 的这些思想竟然在很长时间内未得到应有的重视。直到第二次世界大战结束以后，由柯尔任斯基、Turner 和 Ramberg 等人才先后对变质相的概念进行了修订。在变质相的定义方面，最有代表性的是 Fyfe 和 Turner（1966）的提法：

"**一个变质相指一定的温度、压力区间内的一整套变质矿物共生组合，它们在时、空上反复出现并密切伴生在一起，一个变质相内部，其矿物组合和岩石总体化学成分之间有着固定的因而也是可以预测的对应关系**"。

变质相概念的双重含意：

Descriptive (描述性): 全岩成分 (Xbulk) 与矿物组合的关系

这是变质相概念的基础

一个变质相是一套重复出现的变质矿物组合

如果在一个地区，一组特征的平衡矿物组合出现，我们可以确定该地区的岩石达到了某个变质相

Interpretive (解释性): 每一个变质相应代表一个温度和压力条件范围

Eskola 意识到 P-T 的重要性，并正确地估计了他提出的变质相相对的温压范围

Advances in experimental techniques and the accumulation of experimental and thermodynamic data have allowed us to

assign relatively accurate temperature and pressure limits to individual facies

5.2. 变质相的划分

Eskola (1920) proposed 5 original facies:

绿片岩相 Greenschist
角闪岩相 Amphibolite
角岩相 Hornfels
透长石相 Sanidinite
榴辉岩相 Eclogite

Easily defined on the basis of mineral assemblages that develop in mafic rocks

In his final account, Eskola (1939) added:

麻粒岩相 Granulite
绿帘石－角闪岩相 Epidote-amphibolite
蓝闪石片岩相 Glaucophane-schist (now called 蓝片岩相 Blueschist)

... and changed the name of the hornfels facies to the pyroxene hornfels facies

1960 年 Coombs 根据新西兰很低温变质岩 (very low-grade metamorphic rocks) 的研究成果，提出了沸石相、葡萄石－绿纤石变质杂砂岩相:

浊沸石相 Zeolite
Prehnite-pumpellyite

Fyfe et al. (1958) also proposed:

钠长绿帘角岩相 Albite-epidote hornfels
角闪石角岩相 Hornblende hornfels

接触变质相：

(1) 钠长绿帘角岩相：温度为 300－400℃，压力为 0.1-0.4GPa
(2) 普通角闪石角岩相：温度为 400－650℃，压力为 0.1-0.4GPa
(3) 普通辉石角岩相：温度为 650－800℃，压力为 0.1-0.4GPa
(4) 透长石相：温度为>800℃，压力为 0.1-0.4GPa

区域变质相

（1）浊沸石相(Z): 温压条件为 P＝0.2－0.3GPa, T=200（150）－300℃。
（2）葡萄石－绿纤石相(PP): 温度为 300－360℃，压力为 0.25-0.35GPa。
（3）绿片岩相(LGS): 温度为 350－500℃，压力为 0.3-0.8GPa。
（4）绿帘角闪岩相(EA): 温度为 500－560℃，压力为 0.3-1.0GPa。
（5）低角闪岩相（LA): 温度为 550－650℃，压力为 0.3-1.0GPa。
（6）高角闪岩相 (HA): 温度为 650－700℃，压力为 0.3－1.0GPa。
（7）麻粒岩相(G): 温度为 700－900℃，压力为 0.3-1.2GPa。
（8）蓝片岩相 (GL): 温度范围很宽，200－550℃，压力 0.3-1.2GPa。
（9）榴辉岩相 (E): 温度范围很宽，400－900℃，压力一般超过 1.0GPa

It is convenient to consider metamorphic facies in 4 groups:

1) Facies of high pressure

The blueschist and eclogite facies: low molar volume phases under conditions of high pressure

Blueschist facies occurs in areas of low T/P gradients, characteristically developed in subduction zones

Eclogites are stable under normal geothermal conditions

汇聚板块边缘（俯冲带）和古老大陆地盾区金伯利岩中的包体

2) Facies of medium pressure

Most metamorphic rocks now exposed belong to the greenschist, amphibolite, or granulite facies

The greenschist and amphibolite facies conform to the "typical" geothermal gradient

3) Facies of low pressure

Albite-epidote hornfels, hornblende hornfels, and pyroxene hornfels facies: contact metamorphic terranes and regional terranes with very high geothermal gradient.

Sanidinite facies is rare- limited to xenoliths in basic magmas and the innermost portions of some contact aureoles adjacent to hot basic intrusives

4) Facies of low grades

Rocks often fail to recrystallize thoroughly at very low grades, and equilibrium is not always attained

Zeolite and prehnite-pumpellyite facies are thus not always represented, and the greenschist facies is the lowest grade developed in many regional terranes

5.3 变质带的概念

变质带是英国地质学家 George Barrow (1893, 1912) 研究苏格兰高地加里东期泥质片岩时提出的: **不同变质程度的岩石在区内呈带状有规律地分布，可划分出若干个变质强度带，通常称为变质带**。

George Barrow was one of the first systematic studies of the variation in rock types and mineral assemblages with progressive metamorphism

George Barrow (1893) 研究苏格兰高地加里东期的 Dalradian 片岩时，以泥质岩石中新矿物的首次出现为标志划分了三个变质带，即十字石带、蓝晶石带和夕线石带。

后来 Barrow（1912）、Tilley (1925)和 Harker (1932)进一步扩展为 6 个变质带。

每一个特征矿物首次出现的点的连线称为等变度（Isograd）。并且较高级变质带都是在前一个变质带组合基础上发育形成，因此，这一变质带系列称为递增变质带(Progressive metamorphic zones)，也称为巴洛型变质带 (Barrovian metamorphic zones)

Note：

Barrow noted significant and systematic mineralogical changes in the pelitic rocks

He subdivided the area into a series of metamorphic zones, each based on the appearance of a new mineral as metamorphic grade increased

The new mineral that characterizes a zone is termed an index mineral

The sequence of zones now recognized, and the typical metamorphic mineral assemblage in each, are:

Chlorite zone. Pelitic rocks are slates or phyllites and typically contain chlorite, muscovite, quartz and albite

Biotite zone. Slates give way to phyllites and schists, with biotite, chlorite, muscovite, quartz, and albite

Garnet zone. Schists with conspicuous red almandine garnet, usually with biotite, chlorite, muscovite, quartz, and albite or oligoclase

Staurolite zone. Schists with staurolite, biotite, muscovite, quartz, garnet, and plagioclase. Some chlorite may persist

Kyanite zone. Schists with kyanite, biotite, muscovite, quartz, plagioclase, and usually garnet and staurolite

Sillimanite zone. Schists and gneisses with sillimanite, biotite, muscovite, quartz, plagioclase, garnet, and perhaps staurolite. Some kyanite may also be present (although kyanite and sillimanite are both polymorphs of Al2SiO5)

Metamorphic Zones

Barrovian metamorphic zones are defined by reactions that result in the appearance or disappearance of minerals and can be mapped as isograds:

chl —> bi —> gt —> st —> ky —> sill —> sill + or

Barrovian zone	mineral assemblage
chlorite zone	**chlorite + mus + qtz + H_2O + relict minerals**
biotite zone	**chlorite + biotite + mus + qtz + H_2O**
garnet zone	**chlorite + biotite + garnet + mus + qtz + H_2O**
staurolite zone	**staurolite + 2 AKFM phases + mus + qtz + H_2O**
kyanite zone	**kyanite + 2 AKFM phases + mus + qtz + H_2O**
sillimanite zone	**garnet + biotite + sillimanite + mus + qtz + H_2O**
2nd sillimanite zone or sillimanite + orthoclase zone	**sill + or + qtz + H_2O + melt and no mus**

在世界造山带也发育有类似的变质带系列，这些变质带也称之为**巴洛带 Barrovian zones**

The P-T conditions referred to as “Barrovian-type” metamorphism (fairly typical of many belts)

Isograd = line that separates the zones (An isograd is meant to indicate a line in the field of constant metamorphic grade)

总结:

An isograd (等变度) represents the first appearance of a particular metamorphic index mineral in the field as one progresses up metamorphic grade

When one crosses an isograd, such as the biotite isograd, one enters the biotite zone

Zones thus have the same name as the isograd that forms the low-grade boundary of that zone

Because classic isograds are based on the first appearance of a mineral, and not its disappearance, an index mineral may still be stable in higher grade zones

A variation occurs in the area just to the north of Barrow's, in the Banff and Buchan district

Pelitic compositions are similar, but the sequence of isograds is:

chlorite

biotite

cordierite

andalusite

sillimanite

The stability field of andalusite occurs at pressures less than 0.37 GPa (~ 10 km), while kyanite sillimanite at the sillimanite isograd only above this pressure

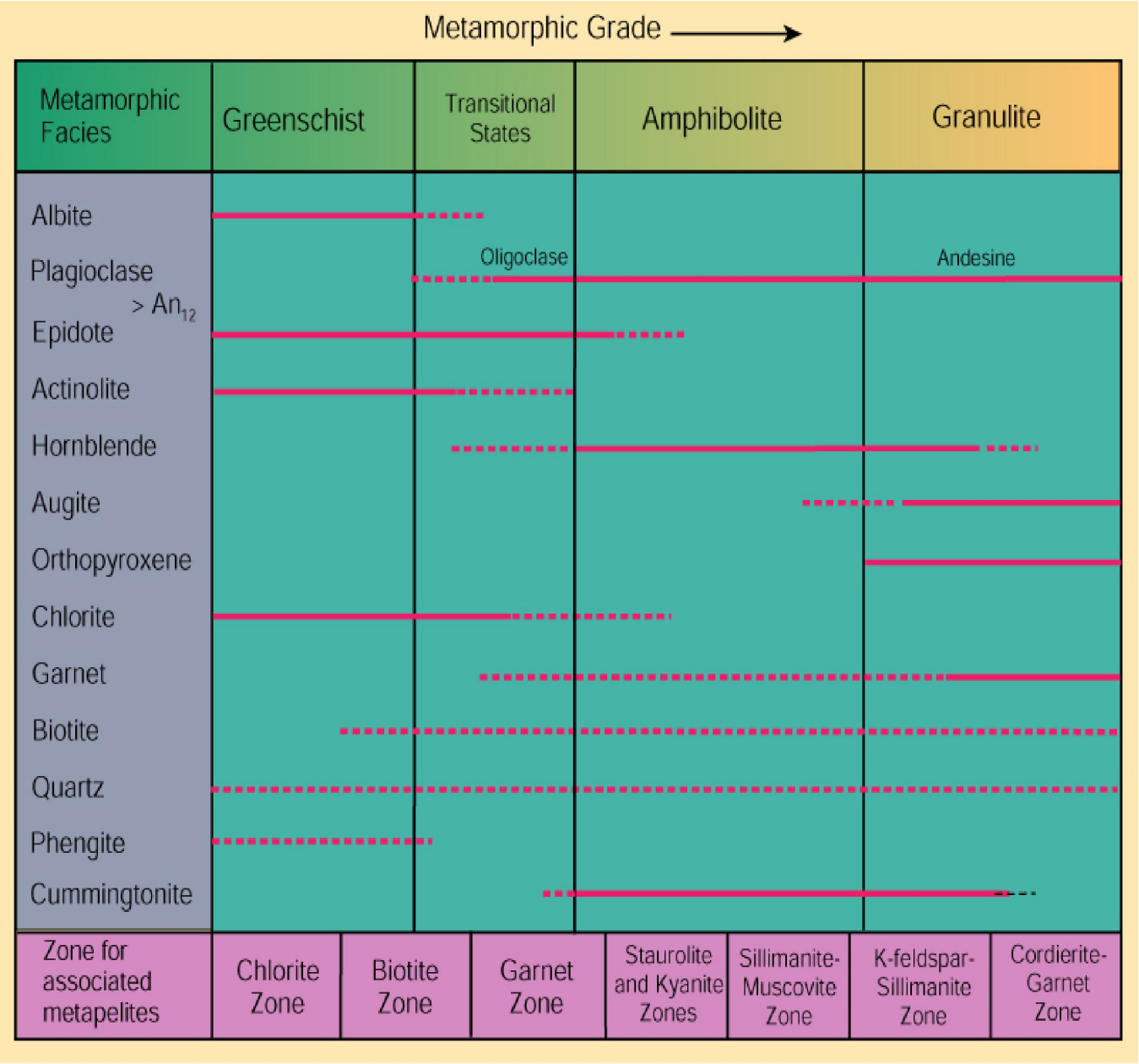


Fig.Typical mineral changes that take place in metabasic rocks during progressive metamorphism in the medium P/T facies series. The approximate location of the pelitic zones of Barrovian metamorphism are included for comparison. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

5.3. 变质相系 Facies Series

横穿一个变质地体的不同级别的变质就可以得到该地体的野外变质梯度, 并可以穿过一系列变质相。

变质相系的概念

1961 年，日本岩石学家都城秋穗（Miyashiro) 首次提出了变质相系的概念。

每一个变质相相当于一定的温压范围，但在某一个变质地区和变质带中，其温压范围一般很宽，不能用一个变质相来代表，可能表示为一系列的变质相，这就是变质相系。

换句话说，**在同一变质地带的不同空间上，由变质相系所表达的峰期变质条件，在 P－T 图解上构成一条曲线，它们代表当时某种野外地热梯度，与所处的大地构造背景联系起来了。**

变质相系的概念通过**变质时的特定地热梯度**把**变质作用的 PT 条件**与**大地构造环境**结合起来，对变质岩石学的发展起了重要作用，它不仅为后来的板块构造理论提供了岩石学上的证据，而且成为世界各地区变质岩石学家们工作的指导思想，

如欧洲变质图就是以这一理论为原则编制而成的。

都城秋穗划分出五个变质相系

① 低压相系：红柱石－夕线石型，低压型（领家－阿武隈型），以泥质岩石中出现红柱石（低级）、夕线石（高级）及堇青石等为特征地热梯度大于 25℃/km。

② 中压相系：蓝晶石－夕线石型，中压型（巴洛型），以泥质岩石中出现蓝晶石和夕线石为特征，地热梯度为 16－25 ℃/km。

③ 高压相系：硬玉－蓝闪石型，高压型（三波川型），以基性岩中出现硬玉＋石英、蓝闪石、硬柱石等矿物为特征，地热梯度 小于 16℃/km。

④ 低压过渡型，也称为布恰型（Bucchan type），以泥质岩石中出现红柱石－十字石，或红柱石－蓝晶石为特征。

⑤ 高压过渡型，以出现 蓝闪石和蓝晶石为特征。

Miyashiro (1961) proposed five facies series, most of them named for a specific representative “type locality” The series were:

1. Contact Facies Series (very low-P)
2. Buchan or Abukuma Facies Series (low-P regional)
3. Barrovian Facies Series (medium-P regional)
4. Sanbagawa Facies Series (high-P, moderate-T)
5. Franciscan Facies Series (high-P, low T)

5.4. 各变质相的基本特征

5.4.1. 接触变质相

钠长绿帘角岩相

普通角闪石角岩相

辉石角岩相

透长石相

5.4.2. 区域中压变质相

浊沸石相

葡萄石－绿纤石相

绿片岩相

角闪岩相 (低和高角闪岩相)

麻粒岩相

5.4.2. 区域高压变质相

蓝片岩相

榴辉岩相

5.4.1. 接触变质相

（1）钠长绿帘角岩相 Albite-epidote hornfels

在不同岩石中出现的矿物组合为：

钠长石＋绿帘石＋阳起石 (透闪石)＋绿泥石±石英	基性岩石
白云母＋黑云母＋石英±钠长石±红柱石±堇青石	泥质岩石
方解石＋透闪石±白云石±滑石	碳酸盐

温度范围为 300－400℃，压力为 0.1-0.4GPa。
温度范围相当于绿片岩相

（2）普通角闪石角岩相 Hornblende Hornfels

在不同岩石中出现的矿物组合为：

斜长石（An>20％）＋普通角闪石±透辉石	基性岩石
白云母＋黑云母＋石英±红柱石±堇青石±斜长石	泥质岩石
方解石＋透辉石＋镁橄榄石±钙铝榴石	碳酸盐

基性岩石中没有斜方辉石，泥质岩石中红柱石和堇青石不与钾长石共生。
温度约为 400－650℃，压力为 0.1-0.3GPa。
相当于角闪岩相

（3）辉石角岩相

在不同岩石中出现的矿物组合为：
泥质岩石中白云母不稳定，变为红柱石/夕线石和钾长石，共生矿物组合为：
黑云母＋红柱石/夕线石＋钾长石＋石英±堇青石±斜长石
基性岩石中出现紫苏辉石：斜长石＋紫苏辉石＋透辉石＋石英
碳酸盐中出现硅灰石，共生矿物组合为：方解石＋硅灰石＋镁橄榄石

温度为 650－800℃，压力不超过 0.2GPa。
相当于麻粒岩相

（3）透长石角岩相

在基性岩和泥质岩中不出现透长石相
碱性侵入岩与灰岩接触带出现黄长石、钙镁橄榄石、斜硅钙石和透长石等高温淬火矿物为特征。
温度极高，约 800－1100℃，压力极低，0.02-0.08GPa。

5.4.2 区域变质相及矿物组合

(1). 浊沸石相

—变质作用的开始
典型矿物组合： 浊沸石+绿泥石+石英
浊沸石+葡萄石+绿泥石+石英
变质反应：

片沸石 = 浊沸石+3 石英+2H2O (T = 200℃)

(2). 葡萄石－绿纤石相

典型矿物组合：　绿纤石+葡萄石+绿泥石+钠长石+石英
绿纤石+绿泥石+绿帘石+钠长石+石英
葡萄石+绿纤石+绿帘石+钠长石+石英

变质反应：

Lm (片沸石) + Pr　(葡萄石) + Chl = Pmp + Q + H2O　**2-4 kbar, 360-400 ℃**

（3）绿片岩相

有人也称之为**低绿片岩相**，相当于 Winkler（1976）的**低级变质级**，在**变质基性岩**中进入这一相的标志是**绿纤石消失，出现黝帘石/斜黝帘石**(Winkler, 1976)，可能的变质反应为：

绿纤石＋绿泥石＋石英＝黝帘石＋阳起石＋H2O

Nitsch(1977)对这一反应的实验条件为：

0.25GPa　　345±20℃
0.4GPa　　350±20℃
0.7GPa　　370±20℃

绿片岩相开始的标志：出现**绿帘石＋阳起石**共生，并伴随着**绿纤石**的消失。

不同岩石系列在绿片岩相的矿物组合为：

绿帘石＋阳起石＋绿泥石＋钠长石±石英±方解石	基性岩石
白云母＋绿泥石＋石英	泥质岩石
白云母＋黑云母＋绿泥石＋石英	泥质岩石

泥质岩石中也可以出现**硬绿泥石**及**富锰铝榴石的石榴石**。

这一变质相的温度为 350－500℃，压力为 0.3－0.8GPa。

（4）绿帘角闪岩相

其特征是在**基性岩**中出现**普通角闪石**，在泥质岩中出现**富铁铝榴石的石榴石**。可能的变质反应为：

阳起石＋斜黝帘石＋绿泥石＋石英＝普通角闪石＋H2O

硬绿泥石＋绿泥石＋石英＝铁铝石榴石＋H2O

白云母＋绿泥石＋石英＝铁铝石榴石＋黑云母＋H2O

据 Liou 等（1982）对第一个反应的实验条件为 0.5GPa 时，T 约为 500℃。

特征变质矿物组合为：

普通角闪石＋绿帘石＋钠长石＋绿泥石±石英	基性岩石
铁铝石榴石＋黑云母＋白云母＋石英	泥质岩石

泥质岩石的组合相当于**铁铝石榴石带**，在这一变质条件下**硬绿泥石和绿泥石**都可能出现。这一变质相的温度为 500－560℃，压力为 0.3－1.0GPa。

（5）低角闪岩相

泥质岩石中以出现**十字石（中压）**和**堇青石（低压）**和 **在白云母存在时富铁绿泥石**及**硬绿泥石**的消失为标志，可能的变质反应为：

Chlorite＋Muscovite = staurolite + biotite+ Quartz + H2O

该反应的实验条件为：

PH2O＝0.4GPa 时　　T＝540±15℃
PH2O＝0.7GPa 时　　T＝565±15℃

Chlorite + muscovite + quartz = cordierite + biotite+ Al2SiO5 + H2O

实验条件为：

PH2O＝0.1GPa　　T＝515±10℃

PH2O＝0.2GPa　　T＝525±10℃

PH2O＝0.4GPa　　T＝555±10℃

在变质基性岩中，从**绿帘角闪岩相**到**低角闪岩相**的界线不如**泥质岩石**明显，Turner & Verhoogen(1960)强调斜长石从 An=5 到 An=17 的成分的跃迁为标志，Turner(1966)又认为斜长石 An=17 不适合，而倾向于 **An>30**。

泥质岩石和基性岩石的特征矿物组合为

中压条件下，泥质岩石矿物组合：

十字石＋铁铝石榴石＋黑云母＋白云母＋石英±斜长石

蓝晶石＋铁铝石榴石＋黑云母＋白云母＋石英±斜长石

低压条件下，泥质岩石矿物组合：

堇青石＋红柱石＋黑云母＋白云母＋石英±斜长石±铁铝石榴石

基性岩石矿物组合：

普通角闪石＋斜长石（An>30）±黑云母±绿帘石±石英

低角闪岩相 T=550-650℃，P = 0.3-1.0 GPa。相当于泥质岩石的 St, Ky 带

（6）高角闪岩相

泥质岩石进入高角闪岩相的标志是**白云母＋石英**不稳定，转变为**钾长石＋Al2SiO5**，即：

白云母＋石英＝钾长石＋夕线石/红柱石＋H2O

这一反应的实验条件为：

PH2O＝0.1GPa　　T＝580℃

PH2O＝0.3GPa　　T＝660℃

Winkler(1976)指出这一反应发生在 PH2O<0.35GPa 的条件下，如果 PH2O>0.35GPa，岩石中有**斜长石**存在时，**片麻岩**就会发生**深熔作用**。

白云母＋石英＋斜长石＋H2O＝熔体（由钾长石＋钠质斜长石＋石英组成）＋钙质斜长石或石英（取决于其原始含量）＋Al2SiO5+H2O（溶解在熔体中）

所以，片麻岩中发生深熔，出现混合岩化作用也是高角闪岩相开始的标志。高角闪岩相的特征矿物组合为（图 5－4）：

夕线石＋石榴石＋黑云母＋钾长石＋石英±斜长石	泥质岩石，中压
红柱石＋堇青石＋黑云母＋钾长石＋石英±斜长石	泥质岩石，低压
普通角闪石＋斜长石±透辉石±石英	基性岩石

高角闪岩相的温度为 650－700℃，压力为 0.3－1.0GPa。

（7）麻粒岩相

在**基性岩**中以出现**紫苏辉石**为标志，即：

普通角闪石＋石英＝紫苏辉石＋透辉石＋斜长石＋H2O

压力较高时:

紫苏辉石＋斜长石＝石榴石＋透辉石＋石英 (高压麻粒岩)

泥质岩石进入麻粒岩相的标志:

夕线石＋黑云母不稳定，转变为**石榴石＋堇青石**。

Bi + Sil + Q = Alm + Cord + Kfd + H2O

麻粒岩相的特征矿物组合为：

紫苏辉石＋透辉石＋斜长石±石英±角闪石	基性岩石
透辉石＋石榴石＋斜长石＋石英	基性岩石

夕线石＋石榴石＋堇青石＋钾长石＋石英±斜长石　　泥质岩石

麻粒岩相的温度为 700－900℃，压力为 0.3-1.2 GPa。

（8）蓝片岩相 (高压相系)

蓝片岩相：也称为蓝闪石片岩相，为**低温高压变质相**，

T < 350 oC 时，在**变质基性岩**中，以出现**蓝闪石、绿纤石、硬柱石、硬玉＋石英和文石**等典型高压矿物为特征——**硬柱石蓝片岩相**

当 T > 350 oC 时，**绿纤石和硬柱石**不稳定，形成**绿帘石、石榴石**等——**绿帘石蓝片岩相**

在**长英质岩石**和**泥质岩石**中，以出现**蓝闪石、多硅白云母、石英和钠长石**等。

蓝片岩相的温度范围很宽，200－450℃，压力 0.6－1.2GPa。

（9）榴辉岩相

高压变质相，在**基性岩**中的特征矿物组合为**绿辉石＋石榴石**，此外有含量不等的**石英、蓝晶石、角闪石、帘石和金红石**等，**不出现斜长石**。

在**变质泥质岩石**中出现**蓝晶石＋滑石**为特征，还可以出现多**硅白云母、石榴石、富镁的硬绿泥石**等，称为**白片岩**（Schreyer, 1973, 1985, 1987)。

榴辉岩相的温度范围很宽，400－900℃，压力一般超过 1.0 GPa，即**钠长石＝硬玉＋石英**。近年来，在榴辉岩中发现**柯石英和金刚石**等超高压矿物指示其最高压力可达到 2.8－3.5GPa（Chopin, 1984)。

NaAlSi3O8(Ab) ＝ NaAlSi2O6(Jd) ＋ SiO2(Qtz)

3CaAl2Si2O8(An) ＝ Ca3Al2Si3O12(Grs) ＋ 2Al2SiO5(Ky) ＋ SiO2(Qtz)

Carswell (1990) 榴辉岩分类

低温榴辉岩 大洋俯冲带

中温榴辉岩 大陆俯冲碰撞带

高温榴辉岩 金伯利岩包体

纤状变晶结构 Low-T eclogite from Tianshan

变质带、变质相和变质级对应关系

变质相		变质带		变质级
		富Al系列	Fe-Mg系列	
浊沸石相 葡萄石－绿纤石相				很低级
蓝片岩相				
绿片岩相	低	Chl Bi	Ab-Chl, Ab-Act	低级
	高	Alm	Ab-Hb	
角闪岩相	低	St Ky	Pl-Hb	中级
	高	Sil		高级
麻粒岩相		Cord-Alm	Cpx-Opx	
榴辉岩相			Omp-Gt	

回顾：

变质相、变质带、变质相系

变质相的概念——一个变质相指一定的温度、压力区间内的一整套变质矿物共生组合，它们在时、空上反复出现并密切伴生在一起，一个变质相内部，其矿物组合和岩石总体化学成分之间有着固定的因而也是可以预测的对应关系

接触变质有那些变质相，特征变质矿物？

区域变质有那些变质相，特征矿物组合？

递增变质带的概念， 巴洛变质带包括那些变质带？等变度？

变质相系主要有那些类型？

第 6 章：接触变质作用及岩石

§1 接触变质作用的定义

§2 主要接触变质相

§3 主要接触变质岩石

§4 碳酸岩和超镁铁岩的变质作用

§1. 接触变质作用 (contact metamorphism)

接触变质作用是伴随岩浆作用而发生的一种局部变质现象，当岩浆侵入时，周围的岩石受侵入体所散发的热和挥发份的影响而发生的变质作用。这类变质作用以低压为特征，压力一般不超过 0.2－0.3GPa。

根据变质作用方式和影响因素可进一步分为热接触变质作用和接触交代变质作用两类，代表性岩石分别为角岩和矽卡岩。

热接触变质作用以高的地热梯度为特征，温度范围大致为 300－800℃，有时达到 1000℃。而压力很低，为 0.02－0.3GPa。

热接触变质岩石的特征矿物为**红柱石、堇青石、夕线石和硅灰石**等低压矿物，有时出现**铁铝石榴石和十字石**等。

热接触变质岩石一般呈**块状构造，不显定向性**，甚至云母和角闪石等片、柱状矿物也无定向。
斑状变晶结构、角岩结构和花岗变晶结构，浅变质者常见**变余组构**。

接触变质晕

接触变质晕也称为**接触变质带**，指岩浆侵入体**围岩**中的接触变质程度围绕侵入体为中心在空间上有规律地变化。

影响接触变质晕的因素：

1）岩浆岩体的成分：中酸性侵入体的热量不如基性辉长岩。

2）岩浆岩体侵位的深度：中深成岩浆侵入体侵位深度较大，冷却速度缓慢，故接触变质晕较宽；而浅成和喷出岩体只能形成高温而狭窄的接触晕。

3）侵入体的体积：侵入体的体积愈大，其热容量愈大。围岩最高温度的保持时间与侵入体厚度的平方成正比。

4）围岩的成分和性质：泥质岩和碳酸盐类岩石对温度的变化　　比较敏感，导热性亦好，所以容易形成较宽的接触晕；而长英质和基性围岩则变质晕较窄。

5）接触面的陡缓及其与围岩走向间的关系：接触面平缓的部位接触晕较宽，同时沿着围岩走向的方向上接触晕较宽。

北京房山周口店岩体为一燕山期的花岗闪长岩体，直径约 7.5km，侵入于震旦－二叠纪地层中，发育典型的接触变质晕圈

接触变质作用叠加在早期 NNE 向展布的、以出现硬绿泥石、绿泥石为特征的区域变质带之上，由外向内划分为：
黑云母带－距离岩体约 1km；
红柱石带－千枚岩和片岩中出现空晶石或红柱石。大理岩中白云石仍稳定；
铁铝石榴石、十字石带－片岩和角岩中出现十字石和铁铝石榴石，大理岩中出现透闪石。
夕线石带－最靠近岩体，变质泥质岩中出现夕线石和钾长石，大理岩中出现镁橄榄石和透辉石。

§2 主要接触变质相

一、钠长绿帘角岩相
二、普通角闪石角岩相
三、辉石角岩相
四、透长石相 (少见）

一、钠长绿帘角岩相及其岩石

T = 300－400 oC, 0.1-0.4 GPa, 一般位于变质晕圈的外围，常保留原岩的结构构造

1、变泥质岩石的矿物组合

1) Bi + Ms + Q (斑点板岩)
2) And (+ Cld) + Bi + Ms + Q (红柱石角岩)

2、碳酸盐系列

i: 纯石灰岩：大理岩

ii: 硅质白云质灰岩：

1) Tc (滑石)+Cc+Q　(滑石大理岩)

2) Tc+Do (白云石)+Cc (滑石白云石大理岩)

3) Tr (透闪石) + Do + Cc (透闪石大理岩)

3、Mg-Fe 质岩石

Ab+Ep+Act+Chl+Q (钠长绿泥石片岩)

相当于区域变质作用的**绿片岩相**

二、普通角闪石角岩相

温度约为 400－650℃，压力为 0.1-0.3GPa。

基性岩石中没有**斜方辉石**，泥质岩石中**红柱石和堇青石**不与**钾长石**共生。

相当于**角闪岩相**

1、变泥质岩石：

1) And+Pl+St+Q (红柱石十字石角岩)

2) Cord+St+Pl+Q (堇青石十字石角岩)

3) Cord+Pl+Chl+Q (堇青石角岩)

2、碳酸盐系列岩石

i:纯石灰岩：　大理岩

ii:不纯灰岩：

泥灰岩类：

4) Di+Gro+Pl (透辉石钙铝榴石角岩)

5) Di+Gro+Cc (透辉石钙铝榴石大理岩)

硅质白云质灰岩：

6) Di+Cc+Q (透辉石大理岩)

7) Di+Fo+Cc (透辉石橄榄石大理岩)

8) Fo+Cc (橄榄石大理岩)

3、Mg-Fe 质岩石：

9) Hb+Pl (普通角闪石角岩)

10) Hb+Di+Pl (透辉石普通角闪石角岩)

三、辉石角岩相

温度为 650－800℃，压力不超过 0.2 GPa。

1、变泥质岩类

1) And+Cord+Q+Kfs

2) And+Cord+Pl+Q+Kfs

3) Cord+Pl+Q+Kfs

4) Hy+Cord+Pl+Q+Kfs

在**含镁较高**的原岩中，形成紫**苏辉石－堇青石－正长石角岩**。

当压力稍高或原岩中 **FeO 较高**时，经常有**黑云母**取代**堇青石**，也可以出现**铁铝石榴石**。

当原岩高度**富铝**，以致 **SiO2 不足**时，出现**刚玉、尖晶石**等。形成**刚玉－红柱石－正长石角岩，尖晶石－堇青石－正长石角岩**等。

××**正长石角岩**

2、碳酸盐类

泥灰岩类：

5) Grs + Di + Pl

6) Di + Grs

7) Di + Gro + Wo (硅辉石)

××角岩

白云质灰岩：

8) Di + Wo + Cc

9) Di + Fo + Cc

10) Fo + Bru(Mg(OH)2)+Cc

××大理岩

3、基性岩类

出现**紫苏辉石**为特征

斜长石＋单斜辉石±斜方辉石±石英±角闪石

§3 主要的热接触变质岩石

1、斑点板岩

斑点板岩为泥质岩石在浅变质（**钠长绿帘角岩相**）条件下的产物，为隐晶质，肉眼可见**斑点构造**。常有变余层理构造，镜下见变余泥质结构，重结晶程度弱。原来的粘土矿物可部分地保留下来，并和**绢云母、绿泥石**等一起，呈微弱的条带状分布。典型的斑点是**显微隐晶质**的，矿物难以辨认。

2、角岩

角岩是热接触变质作用特有而且常见的岩石，肉眼下一般为**致密均匀的块状构造**，典型的角岩甚至连**云母**也不显定向。**斑状变晶结构、角岩结构或者花岗变晶结构**等。角岩类型主要包括：泥质角岩、长英质角岩和基性角岩等。

（1）泥质角岩

在中低级变质 (为**普通角闪石角岩相/钠长绿帘角岩相**)，由**石英、白云母、黑云母**等组成，呈暗色，经常含有较多的碳质。**红柱石和堇青石**等特征变质矿物多呈**变斑晶**产出。可定名为**红柱石角岩**和**堇青石角岩**等。

变质作用温度超过白云母＋石英＝红柱石＋钾长石＋水反应，进入**辉石角岩相**时，**堇青石和红柱石/夕线石**等可以和**钾长石（通常为正长石）**共生，有**石英**存在时，**白云母**不稳定，而**红褐色的黑云母**仍然是常见矿物。

在**含镁较高**的原岩中，形成**紫苏辉石－堇青石－正长石角岩**。当压力稍高或原岩中 FeO 较高时，经常有**黑云母**取代**堇青石**，也可以出现**铁铝石榴石**。

当原岩**高度富铝**，以致 **SiO2 不足**时，出现**刚玉、尖晶石**等。形成**刚玉－红柱石－正长石角岩，尖晶石－堇青石－正长石角岩**等。

（2）长英质角岩

一般由**石英、钾长石、斜长石和云母**等组成，这类岩石由于 **K2O 过剩**，在**钠长绿帘角岩相和普通角闪石角岩相**中不出现**红柱石和堇青石等富铝矿物**，但在**辉石角岩相**中可出现**少量的富铝矿物与钾长石共生**。矿物组合与**富铝的泥质角岩**相同，只能从矿物含量上加以区分。

（3）基性角岩

随变质程度由低向高可出现：

钠长石＋绿帘石＋阳起石＋绿泥石±石英±黑云母(钠长绿帘角岩相)

斜长石＋普通角闪石±黑云母±透辉石±石英(普通角闪石角岩相)

斜长石＋单斜辉石±斜方辉石±石英±角闪石(辉石角岩相)。

随着变质程度增高，斜长石中**An 组分**增多。

3、接触片岩和片麻岩

一般来说，热接触变质作用以**重结晶和变质结晶作用**为主，**变形作用不明显**，所以**热接触变质岩**以角岩为特征，并**不发育结晶片理**。但有时由于岩体强力侵位，挤开围岩，引起围岩变形，或者热接触变质岩**继承**原来的定向组构，而形成**结晶片理**。这种由接触变质作用形成的具有**片状和片麻状构造**的岩石称为**接触片岩和片麻岩**。除了发育结晶片理外，**接触片岩**和**片麻岩**的结构和矿物组成与**角岩**相同。

接触片岩一般为**普通角闪石角岩相**，如果原岩为**泥质岩石**，其主要变质矿物为**白云母、黑云母、石英及长石**等，特征变质矿物可出现**红柱石、堇青石及铁铝石榴石、十字石**等，特征变质矿物多呈**变斑晶**产出。基质为**粒状鳞片或鳞片粒状变晶结构，片状构造**。

定名原则：特征变质矿物＋云母的种类＋（接触）片岩。如：红柱石黑云母接触片岩等。

接触片麻岩一般为**辉石角岩相**，在泥质系列中，其主要变质矿物为**石英、钾长石、斜长石和黑云母**等，特征变质矿物出现**红柱石、堇青石、夕线石、铁铝石榴石**等，**斑状变晶结构，基质为鳞片粒状变晶结构，片麻状构造**。

定名原则：特征变质矿物＋主要片柱状矿物＋长石种类＋（接触）片麻岩。如：红柱石夕线石黑云母钾长（接触）片麻岩。

4、大理岩

大理岩是由**碳酸盐类**原岩变质形成的岩石，随着原岩成分不同出现不同的大理岩类：

<table>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>纯灰岩</td><td colspan="3">大理岩</td></tr>
<tr><td>硅石灰岩</td><td colspan="2">石英大理岩</td><td>硅灰石大理岩</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

碳酸岩和超基性岩的变质作用

Calcareous rocks are predominantly carbonate rocks, usually limestone or dolostone

Typically form in a stable continental shelf environment along a passive margin

They may be pure carbonate, or they may contain variable amounts of other precipitates (such as chert or hematite) or detrital material (sand, clays, etc.)

The spectrum from pure carbonate to purely clastic rocks is essentially complete

Become metamorphosed when the passive margin becomes part of an orogenic belt

Metamorphism of Calcareous and Ultramafic Rocks

Metacarbonates are metamorphosed calcareous rocks in which the carbonate component is predominant

Marbles are nearly pure carbonate

Calc-silicate rocks: carbonate is subordinate and may be composed of Ca-Mg-Fe-Al silicate minerals, such as diopside, grossular, Ca-amphiboles, vesuvianite (符山石), epidote, wollastonite, etc.

Skarn: calc-silicate rock formed by metasomatism between carbonates and silicate-rich rocks or fluids

Contact between sedimentary layers

Contact between carbonate country rocks and a hot, hydrous, silicate intrusion, such as a granite

Metamorphism of Ultramafic Rocks

Alpine peridotites: uppermost mantle = base of slices of oceanic lithosphere that become incorporated into the continental crust along subduction zones

Dismembered portions of ophiolites: pieces of oceanic crust and mantle that either separate from the subducting slab and become incorporated into the accretionary wedge of the subduction zone, or (more commonly) get trapped between two terranes during an accretion event

Strings of ultramafic bodies in orogens follow major fault zones separating contrasting rock bodies. Interpreted as remnants of oceanic crust + mantle that once separated collisional terranes, and thus mark the suture zone

Association of blueschist facies rocks with the ultramafics further supports a subduction-related origin

第七章　区域变质作用及其岩石

主要问题：

1、区域变质岩石有哪些主要类型？

2、如何区分板岩、千枚岩和片岩？

3、如何区分片岩和片麻岩？

4、蓝片岩、麻粒岩和榴辉岩的特点及其地质意义如何？

5、如何区分斜长角闪岩和角闪斜长片麻岩？

§7.1　概述

区域变质作用是分布范围广泛且变质因素复杂的一种变质作用。

它可以出现在多种地质环境中，如前寒武纪结晶基底、碰撞造山带、会聚板块边缘及离散型板块边缘等。

影响变质作用的主要因素有：**温度、压力（负荷压力）、应力和化学活动性流体**等。

区域变质作用是由于**大规模的构造作用产生热扰动(thermal perturbation)**，而**受扰动的地热体制**向**稳态松弛（thermal relaxation）过程**中发生的。

根据变质作用发生时的**野外梯度(dT/dP)** 不同, Miyashiro (1961, 1994) 将区域变质作用划分为**低压型、中压型和高压型**。

二、 区域变质岩石类型

主要有：板岩、千枚岩、片岩、片麻岩、斜长角闪岩、长英质粒岩、麻粒岩、榴辉岩、石英岩和大理岩

变质泥质岩：有板岩、千枚岩、片岩、片麻岩

变质基性岩：绿片岩、斜长角闪岩、麻粒岩、蓝片岩、榴辉岩

变质长英质岩石：长英质粒岩、石英岩

变质碳酸盐岩：大理岩。

1、板岩

板岩具有板状构造，变质程度低，原岩重结晶作用不明显，仅在板理面上见到微弱的丝绢光泽，系由细小的绢云母和绿泥石等重结晶所至。

岩石主体为残余的粘土质、粉砂质和凝灰质物质等，常出现变余层理构造。原岩为泥质、粉砂质沉积岩及部分中酸性凝灰岩、沉凝灰岩等。

可根据颜色、杂质成分、构造及变斑晶等对板岩进一步划分和定名：如黑色板岩、碳质板岩、斑点板岩及空晶石板岩等。

Slate:　compact, very fine-grained, metamorphic rock with a well-developed cleavage. Freshly cleaved surfaces are dull

2、千枚岩

千枚岩以发育千枚状构造为特征，岩石中的各种组分已基本重结晶并定向排列构成千枚理，但矿物的粒度细小，肉眼不能分辨。

结构为显微鳞片变晶结构及斑状变晶结构，矿物成分主要为绢云母和石英以及含量不等的绿泥石和钠长石等，有时可出现黑云母、硬绿泥石、石榴石和磁铁矿等变斑晶，常常由于含有较多的绢云母而显示强烈的丝绢光泽。

千枚岩的原岩有泥质、粉砂质沉积岩、及部分火山凝灰岩等

Phyllite: a rock with a schistosity in which very fine phyllosilicates (sericite/phengite and/or chlorite), although rarely coarse enough to see unaided, impart a silky sheen to the foliation surface. Phyllites with both a foliation and lineation are very common.

phyllite is characterized by a satiny sheen.

3、片岩

片岩以发育片状构造为特征，片柱状矿物（云母、绿泥石、滑石、蛇纹石、阳起石等等）含量超过30%。

与千枚岩相比，片岩中矿物的结晶粒度较粗，为显晶质的鳞片（粒状）变晶结构。

由于原岩成分和变质条件不同，片岩类型变化多样, 主要包括：云母片岩、绿片岩、蓝片岩和镁质片岩 4 类。

（1） 云母片岩

主要变质矿物为黑云母、白云母、石英及长石等，多数情况下石英大于长石，长石小于 25%，片柱状矿物大于 30%，粒状矿物小于 70%。当 K2O 不足时，可出现红柱石、蓝晶石、夕线石、堇青石、十字石、铁铝石榴石及硬绿泥石等特征变质矿物，鳞片粒状变晶结构及斑状变晶结构等，片状构造。

原岩为泥质沉积岩及火山沉积岩，变质程度主要为**绿帘角闪岩相**和**低角闪岩相**。

云母片岩的定名原则为：

特征变质矿物＋云母成分（黑云母、白云母或二云母）＋片岩。

当有两种以上的特征矿物时，以**少前多后**的原则，如十字石榴二云片岩，当石英超过 50%时，也可参与定名，如石榴石白云母石英片岩等。

Schist: a metamorphic rock exhibiting a schistosity. By this definition schist is a broad term, and slates and phyllites are also types of schists. In common usage, schists are restricted to those metamorphic rocks in which the foliated minerals are coarse enough to see easily in hand specimen.

（2）绿片岩

主要矿物为**绿泥石＋绿帘石＋阳起石＋钠长石**，以及含量不等的**石英、方解石和白云母**等，**鳞片（纤状）粒状变晶结构，片状构造。**

原岩成分为基性火山岩和富铁质白云质泥灰岩等，变质程度为绿片岩相。

绿片岩的定名原则为：主要矿物＋片岩，如绿帘阳起片岩、绿泥钠长片岩等。

绿片岩是绿片岩相的特征岩石，地质分布极为广泛。

（3）蓝片岩

蓝片岩是蓝片岩相的典型岩石。

蓝片岩相也称为蓝闪石片岩相，是 Eskola（1939）提出的，认为是一个高压中温变质相。

Miyashiro（1961）提出变质双带和变质相系的概念，**把蓝片岩作为高压变质带和高压相系的标志，认为蓝片岩的形成与板块俯冲作用有关，蓝片岩、蛇绿岩和混杂岩一起是确定板块缝合线的重要标志。**因此，与蓝片岩有关的高压变质作用研究很受地质学家们的重视。

蓝片岩：

矿物组合：Na-am+Law+Gt+Phen +Ab +Q （硬柱石蓝片岩相）

Na-am+Ep+Chl+Ab+Q （绿帘石蓝片岩相）(Evans, 1990)

T < 350-400 oC 时，在**变质基性岩**中，以出现**蓝闪石、绿纤石、硬柱石、硬玉＋石英和文石**等典型高压矿物为特征——硬柱石蓝片岩相，矿物组合：Na-am + Law + Gt + Phn +Ab +Q

当 T > 350-400 oC 时，**绿纤石和硬柱石**不稳定，形成**绿帘石、石榴石**等——绿帘石蓝片岩相 Na-am + Ep + Chl + Ab + Q

在**长英质岩石和泥质岩石**中，以出现**蓝闪石、多硅白云母、石英和钠长石**等。蓝片岩相的温度范围很宽，200－500℃，压力 0.6－1.2GPa。

在富铁镁的长英质和泥质岩中可以出现**硬绿泥石(chloritoid)、纤柱石 (Carpholite)低温高含水矿物与蓝闪石、多硅白云母等共生**

蓝片岩： 主要由**钠质闪石**组成的，具片状构造的**蓝绿色片岩**(Blueschist)。

在不同原岩类型中出现的矿物组合如下：

变质基性岩：**蓝色闪石、硬柱石、硬玉＋石英、文石等特征低温高压矿物为标志，此外还常出现绿纤石、绿帘石、绿泥石、钠长石、阳起石及多硅白云母等**；

在变质酸性火山岩中出现蓝色闪石＋多硅白云母＋钠长石＋石英等；

在变质泥质岩中出现蓝色闪石＋多硅白云母＋石英；

在碳酸盐中出现蓝色闪石＋方解石等。

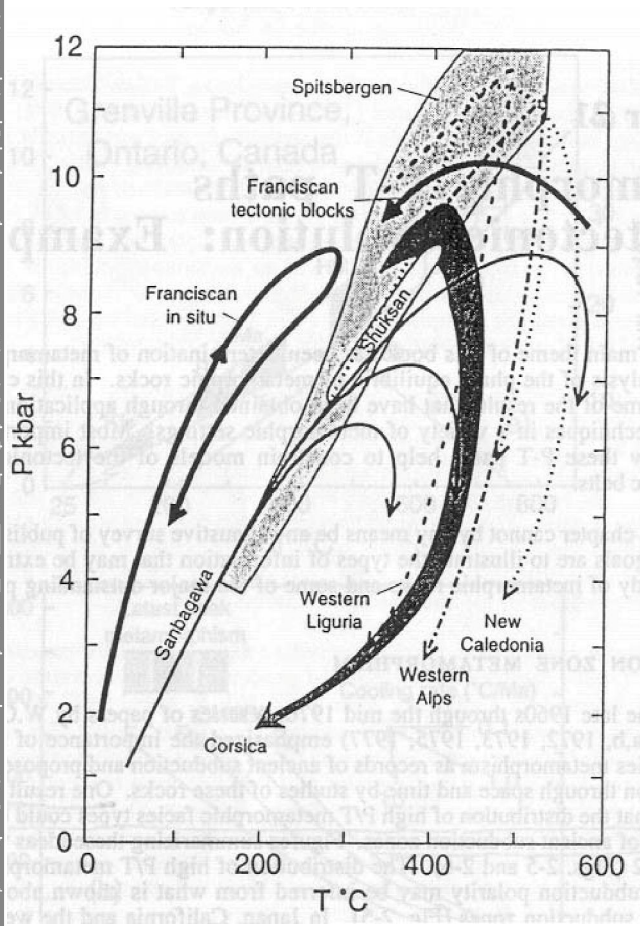
Pumpellyite = zoisite + grossular +chlorite + quartz + H2O

Lws + Ab = Zo + Pa + Qtz + H2O

蓝片岩中的**蓝色闪石**是一系列**钠质角闪石**的总称，其常见类型为**蓝闪石(glauco-phane)**、**青铝闪石（crossite）**、**镁钠闪石（magnesio-riebeckite）**等。

Ernst (1988) 总结了很多蓝片岩地体的 PT 轨迹，其结果见图 4－5。所有蓝片岩体都经历一个前进变质轨迹，包括沸石相→葡萄石－绿纤石相→蓝片岩相→榴辉岩相，前进变质轨迹与俯冲过程相对应。这些前进轨迹多数具有 dT/dP 斜率 35-40℃/kbar（≈10℃/km），只有 Franciscan 蓝片岩稍微陡一些。

俯冲带变质作用 PT 历史的明显不同在于其退变质过程。有两种类型：（1）多数退变轨迹表现明显的减压作用，有时伴随一定的加热，称为西阿尔卑斯型。其特点是在早期蓝片岩和榴辉岩相组合之上广泛叠加绿片岩相和角闪岩相变质作用。除阿尔卑斯之外，土尔其、希腊的 Cyclades、Klamath 山（加里福尼亚）、日本三波川、新西兰的 Haast 片岩、New Calidonia 及北亚和中国的某些地区都为这种类型。（2）Franciscan 型，其特点为退变质轨迹与进变质轨迹相似。在这种情况下，原来的高压组合会很好地保存下来，不会叠加绿片岩相和角闪岩相组合。



4）镁质片岩

镁质片岩主要由**蛇纹石、绿泥石、滑石、阳起石、透闪石及菱镁矿**等组成，为**鳞片变晶结构，片状构造**。

原岩为超基性岩及部分极富镁的碳酸盐，常形成于中、低级变质条件。常见如**蛇纹石片岩、绿泥滑石片岩及阳起石片岩**等。

4、片麻岩

片麻岩主要由石英、长石及部分暗色矿物如云母、角闪石辉石等组成，有时出现石榴石、夕线石等特征变质矿物，粒状矿物大于 50%，长石大于石英。鳞片粒状变晶结构、片状构造。

片麻岩的原岩成分包括**泥质岩、砂岩、粉砂岩及中酸性岩浆岩**等。根据原岩成分和矿物组合，将片麻岩进一步划分为：

（1）富铝片麻岩

原岩为泥质岩石。主要矿物成分为**钾长石、斜长石、石英和黑云母**等，**粒状矿物含量一般超过 50%，长石含量大于石英**，也可以出现数量不等的特征变质矿物如**红柱石、夕线石、堇青石、石榴石和刚玉**等。具有**片麻状构造，鳞片粒状变晶结构，或斑状变晶结构**。由于出现**钾长石与富铝矿物**共生，因此在**石英**存在时，不出现**原生白云母**，一般代表**高角闪岩相**条件。定名原则：

特征变质矿物＋主要片、柱状矿物＋长石种类＋片麻岩

如夕线石黑云母钾长片麻岩。

（2）长英质片麻岩

原岩为砂岩、粉砂岩和中酸性岩浆岩。主要由**长石、石英及部分暗色矿物**组成，除**石榴石**外，很少见其他富铝特征变质矿物。常见类型如黑云（角闪）斜长（钾长或二长）片麻岩。

当原岩为中酸性侵入岩时，常定名为花岗质片麻岩、花岗闪长质片麻岩、英云闪长质片麻岩和奥长花岗质片麻岩等。**英云闪长质 (tonalitic)片麻岩、奥长花岗质 (trondhjemitic) 片麻岩和花岗闪长质 (granodioritic) 片麻岩**常常密切共生在一起，在**太古宙克拉通**中广泛分布，常称之为 TTG 系列、或灰色片麻岩。

5、长英质粒岩

主要包括变粒岩 (leptynite) 和浅粒岩 (leptite) 两类。

变粒岩主要由**钾长石、斜长石和石英**等粒状矿物组成，含有少量的片柱状矿物如**云母、绿泥石、角闪石、绿帘石、辉石电气石及石榴石**等，一般**长英质粒状矿物含量>70%，长石>25%，片柱状矿物含量 10－30%**，它和片麻岩的主要区别在于特征的**细粒等粒粒状变晶结构**，且**粒度在 0.5mm 以下，并常为块状或弱片麻状构造**。

浅粒岩与变粒岩组成相似，但**片柱状矿物含量在 10%以下**。

长英质粒岩类的原岩常为中酸性火山岩、火山碎屑岩、及砂岩粉砂岩等。

对本类岩石的命名可按照特征变质矿物＋片柱状矿物＋长石种类＋基本名称进行。如石榴黑云斜长变粒岩

6、斜长角闪岩

原岩为基性岩浆岩(玄武岩、辉长岩、辉绿岩)。主要由**普通角闪石＋斜长石**组成，可出现含量不等的**绿帘石、透辉石、黑云母、石英及石榴石**等，**角闪石等暗色矿物含量大于 50%。粒状柱状变晶结构，片状、片麻状或条带状构造。**

当变质程度为**角闪岩相**时，斜长石中 **An 组分一般超过 30%**称为斜长角闪岩。

当变质程度为**绿帘角闪岩相**时，斜长石主要为**钠长石**，并出现较多的**绿帘石和绿泥石**等，称为钠长绿帘角闪岩。

7、麻粒岩

麻粒岩（granulite）最早为德国及北欧岩石学家所引用，用以指德国 Saxony 地区的一套由无水矿物所组成的片麻岩系，由 C.C.Weiss (1803)首次命名。矿物组成有：**石榴子石，蓝晶石（或夕线石）、长石、石英、金红石**等。这种岩石的粒状矿物由于强烈的塑性变形经压扁而常具相间排列的粗细条带或透镜状构造，即所谓的“麻粒结构” 。

1920 年，Eskola 提出了麻粒岩相的概念，以**辉石（紫苏辉石）的出现**为标志，包括了一组在高温条件下形成的区

域变质岩石。后来这一术语在使用上一直存在着较大的分歧。1972 年，Mehnert 所定义的麻粒岩为：“一种细粒至中粒的变质岩石，主要由长石组成，石英可有可无，铁镁矿物主要是无水的，结构主要是花岗变晶的（粒状变晶的），构造呈片麻状至块状。

麻粒岩是麻粒岩相的典型岩石，矿物形成的温度和压力相当于麻粒岩相条件。与麻粒岩矿物成分相当的中粗粒岩石（粒度大于 3mm）和铁镁矿物含量大于 30%（体积）者，都不列入麻粒岩类，而应该定名为 pyriclasites（斜长辉石岩），pyribolites（斜长闪辉岩）或 pyrigarnites（斜长榴辉岩）。

这一概念强调麻粒岩是一种以**无水矿物**为特征的**浅色细粒岩石**。但目前地质学家们使用的麻粒岩一词并未遵循这一定义。

目前麻粒岩的定义和特征：

（1）麻粒岩是麻粒岩相的特征岩石，在基性成分的岩石中出现含有**紫苏辉石**的矿物组合或者出现**石榴石＋透辉石＋斜长石＋石英**的组合，在泥质和长英质成分的岩石中也常出现**紫苏辉石，暗色矿物**的含量应在 85%以下。

（2）可含有相当数量的**斜长石、钾长石（常为条纹长石）、石榴子石或其他高温变质矿物（夕线石、堇青石）**以及不等数量的**石英**，副矿物为**金红石和钛铁矿**，不出现**榍石**.

（3）经常出现不等量的含水矿物如**角闪石、黑云母**等，**角闪石**由于富铁和钛表现为橄榄绿色或棕色，**黑云母**也因富镁和钛而显深棕色。有时，麻粒岩中含水矿物的出现与**退化变质**有关。

（4）结构方面不宜作具体规定，细、中、粗粒均可出现，但以**中细粒**为主，构造为**块状、片麻状或条带状等。**

根据原岩成分和变质矿物组合，麻粒岩可进一步划分为：

(1) 基性麻粒岩

主要由**紫苏辉石、透辉石及角闪石**等暗色矿物组成，通常含量可达 30－85%左右，

浅色矿物以**中基性斜长石**为主，**石英**少或无，可有少量**石榴子石、铁矿物、黑云母**等。

粒状变晶结构，块状构造。

其原岩主要为基性岩石及含镁铁较高的泥质灰岩等。

常见类型有紫苏辉石暗色麻粒岩、二辉暗色麻粒岩等。

普通角闪石＋石英＝紫苏辉石＋透辉石＋斜长石＋H2O

压力较高时:

紫苏辉石＋斜长石＝石榴石＋透辉石＋石英 (高压麻粒岩)

相图分析：

在**中低压条件下**随着温度的升高，变质基性岩由角闪岩相首先转变为**角闪麻粒岩相**，以出现 **Hb+Opx+Pl+Q** 组合为特征，然后，随着**角闪石**消失，转变为**二辉麻粒岩相**，以出现 **Pl+Cpx+Opx+Q** 组合为特征。后者**随着压力的升高**，通过反应：

Pl + Opx = Cpx + Gt + Q

而转变为**高压麻粒岩**，以出现 **Pl+Cpx+Gt+Q** 为特征。随着压力进一步升高，该组合中的**斜长石越来越富含钠**，直到最后消失而变为**榴辉岩相**。

（2）富铝麻粒岩

原岩为泥质岩石，主要变质矿物为**钾长石（条纹长石）、斜长石和石英**等，特征变质矿物出现**堇青石、夕线石、石榴石和紫苏辉石及假蓝宝石**等，为**块状构造、弱片麻状构造及条痕状构造等，粒状变晶结构。**

在印度、及其他很多前寒武纪结晶基底中，麻粒岩相的**泥质岩石**以出现**石英＋条纹长石＋斜长石＋石榴石＋夕线石及石墨**等为特征，称为**孔兹岩（Khondalite）**。

当压力较高时，**蓝晶石**取代**夕线石**，为**泥质高压麻粒岩**。当压力较低时，矿物组合中出现**堇青石**，为**低压麻粒岩**。

泥质岩石麻粒岩相变质相平衡 （低压麻粒岩）
UHT (超高温变质作用）

1>. FMAS (FeO-MgO-Al2O3-SiO2) 体系
Sil, Cord, Grt, Spr(假蓝宝石), Spl (尖晶石), Opx,

（3）中酸性麻粒岩

主要由**浅色粒状矿物（长石、石英）**和**暗色矿物（紫苏辉石、角闪石、黑云母等）**组成，其中暗色矿物含量在小于 30%左右；

斜长石为**中长石一更长石**，钾长石为**微斜长石、条纹长石、反条纹长石**等，**石英**可有一定数量，有时可出现少量**石榴子石**等富铝矿物。

通常为**鳞片粒状变晶结构，片麻状或弱片麻状构造**。

其原岩较复杂，可以是中酸性火山岩、火山碎屑岩、火山硬砂岩。常见类型有二辉浅色麻粒岩、紫苏黑云浅色麻粒岩等。

紫苏花岗岩

在麻粒岩地体中还经常出现一种矿物成分与麻粒岩相同，但确有岩浆岩一样的结构构造甚至产状的岩石，称为**紫苏花岗岩** (Charnockite)。可能由原来的岩浆侵入体经麻粒岩相变质形成，也可能由高温无水岩浆结晶形成，还有可能由**混合岩化作用**所致。

麻粒岩的变质条件为温度 700－900℃，压力 6－12Kb，一般地 PH2O<<Pl，因为在麻粒岩相的温度条件下，如果 PH2O＝Pl，会发生**广泛的深熔作用**，只有当 PH2O<<Pl 时，才发生**麻粒岩相变质作用**。麻粒岩的变质条件与下部地壳相当，就其地震波速来说，也与**深部地壳**吻合，因此，**麻粒岩是研究下部地壳的窗口**。

麻粒岩主要分布于世界各大陆的结晶基底中，时代为太古宙及早元古代，在显生宙碰撞造山带、岩浆增生弧及大陆裂谷带中也有麻粒岩分布。

8、 榴辉岩

榴辉岩的定义：**榴辉岩相的代表岩石，特征矿物组合为绿辉石＋石榴石，此外有含量不等的石英、多硅白云母、蓝晶石、角闪石、帘石和金红石等，不出现斜长石。**

原岩相当于玄武质岩石，块状构造。

矿物组成：Gt+Omp+Ru+/-Ky +/- Pg+Q

绿辉石是硬玉 (NaAlSi2O6) 和透辉石 (CaMgSi2O6) 类质同象系列之间的辉石，也含有一定量的钙铁辉石 (CaFeSi2O6)、霓石 (NaFe3+Si2O6) 和契尔马克组分 CaAl2SiO6。

石榴石是铁铝榴石－镁铝榴石－钙铝榴石－锰铝榴石构成的固溶体。

榴辉岩相的温度范围很宽，400－900℃，压力一般超过 1.0GPa，近年来，在榴辉岩中发现柯石英和金刚石等超高压矿物指示其最高压力可达到 2.8－3.5GPa（Chopin, 1984)。

NaAlSi3O8(Ab)＝NaAlSi2O6(Jd)+SiO2(Qtz)

3CaAl2Si2O8(An)＝Ca3Al2Si3O12(Grs)+2Al2SiO5(Ky)+SiO2(Qtz)

野外产状 A、B、 C 类（Coleman, 1965)

高、中、低温榴辉岩类 (Carswell, 1990)

1)、低温榴辉岩：与蓝片岩伴生，成因与洋壳俯冲作用有关

美国： Franciscan 杂岩，希腊的 Sifnos, New Caledonia 等，我国的西天山榴辉岩，北祁连山榴辉岩等

2)、中温榴辉岩：与石榴石云母片麻岩和花岗质片麻岩伴生，与大陆俯冲有密切关系

我国的大别山榴辉岩，柴北缘榴辉岩等

3)、高温榴辉岩：在深部来源的金伯利岩包体，形成深度大于 150 km

我国的山东蒙阴，辽南金州金伯利岩中的包体等

低温榴辉岩以含有低温高含水性矿物，如硬柱石、纤柱石、蓝闪石等为特征 (薄片自土耳其)

中温榴辉岩－大陆深俯冲的产物

矿物组合：Grt+Omp+Rt, Phn, Ky, Amp

大陆地壳深俯冲发生的必要条件：

1）必须具有大洋岩石圈的俯冲和消亡

2）必须是被动大陆边缘

大陆型俯冲带的岩石组合：

正片麻岩——花岗质片麻岩
副片麻岩——沉积岩变质的片麻岩
中高温榴辉岩 (T > 600 oC, P > 2.0 GPa)
大理岩
石榴橄榄岩
硬玉石英岩
白片岩

大陆地壳岩石是其主要组分。

超高压变质岩石

1、矿物学标志

柯石英 （coesite）

金刚石 (diamond)

矿物多型：金红石 II

矿物的出溶结构

石英 ＝ 柯石英

28 kbar ; 800 OC

在 Raman 分析谱图上出现 521－525 cm-1 特征峰

金刚石

石墨 ＝ 金刚石

36 kbar; 800 OC

极高突起，Raman 光谱具有 1331cm-1 峰

第八章　其它变质作用及变质岩

Chapter 8: Other types of metamorphism and rocks

主要问题：

1、什么是混合岩？它有哪些主要类型？

2、如何认识混合岩的成因？

3、何为动力变质作用？

4、岩石的韧性变形有几种方式？各有哪些特点？

5、动力变质岩石有那些主要类型？各有哪些特征？

6、冲击变质作用、洋底变质作用和埋藏变质作用有哪些特点？

7、何为汽成水热变质作用？汽成水热变质岩有哪些主要类型？

其它类型变质作用

§1 混合岩化作用及混合岩

§2 动力变质作用及岩石

§3 冲击变质作用及岩石

§4 埋藏变质作用

§5 洋底变质作用

§6 汽成水热变质作用及岩石

§1 混合岩化作用及混合岩

1.1 Concept of migmatite

混合岩一词最早由芬兰岩石学家 Sederholm (1907) 提出的，原指由熔融体和固体组成的混合物。后来，地质学界对混合岩的概念和成因产生了很大争论。

到 80 年代的国外文献中强调混合岩一词是个描述性术语，指的是发育于中高级变质区宏观上极不均匀的岩石，其中一部分为长英质的浅色体。

混合岩化作用 (migmatization)

当变质温度较高时岩石中出现部分熔融形成花岗质熔体，这种现象称为**深熔作用(anatexis)**。当熔体数量不多时，它与固态变质岩石发生混合、交代，称为**混合岩化作用 (migmatization)**，形成各种各样的混合岩。

当熔体达到一定数量时，就过渡为**岩浆作用**，形成**花岗岩**。

The Limits of Metamorphism

High-temperature limit grades into melting

Over the melting range solids and liquids coexist

If we heat a metamorphic rock until it melts, at what point in the melting process does it become “igneous”?

Migmatites (“mixed rocks”) are gradational

1.1 Concept of migmatite

混合岩由基体和脉体两部分组成：

脉体，又称为浅色体 (leucosome)，指混合岩中新生的长英质或花岗质的部分，脉体的岩性类型有花岗质、伟晶质、细晶质及长石石英脉等。

基体，指混合过程中残留的变质岩，一般达到角闪岩相和麻粒岩相，具体岩石类型有各种变粒岩、片麻岩和斜长角闪岩等。

1.2. 混合岩的分类及岩石类型

分类原则：

<1> 基体与脉体的种类和组成

<2> 基体和脉体的相对含量及相互关系

1>、混合岩化变质岩

脉体 <15%， 命名原则：脉体+混合岩化变质岩

如： 含伟晶质细脉混合岩化黑云母片岩

2>、混合岩

50%>脉体>15%， 脉体+基体+构造+混合岩

如：长英质斜长角闪角砾混合岩

3> 混合片麻岩

脉体 >50%，基体中暗色矿物+构造+混合片麻岩

如：黑云母眼球状混合片麻岩

4> 混合花岗岩

脉体 >80%

如：云雾状黑云母混合花岗岩

混合岩的主要类型

根据混合岩基体和脉体的比例及其构造特征，常见的类型包括：

眼球状混合岩 基体是富含云母和角闪石的片麻岩或其它具有明显定向性构造的岩石，脉体是一些碱性长石的变斑晶或透镜状的长石、石英集合体。其长轴平行于主片理排列，基体的片理常常绕过这些变斑晶或集合体，总体构成眼球状构造。

条带状混合岩 基体可以是黑云母片麻岩或斜长角闪岩，一般片理发育。脉体呈条带状平行于基体的片理分布，一般脉体厚度均匀，延伸较远。

网状混合岩 脉体呈网状或树枝状分布于基体之中。

角砾状混合岩 基体呈碎块或角砾状分布于脉体中，此类混合岩的基体多半是片理不发育或具有块状构造的镁铁质变质岩类。角砾的大小极不相同，从成因上看角砾混合岩极可能是先期的构造角砾岩混合岩化的产物。

肠状混合岩(ptygmatite) 脉体发生强烈褶曲而成为肠状。

阴影混合岩 也称为**迷雾状混合岩**，在混合岩化很深的情况下，脉体的数量远远超过了基体，基体几乎消失，仅在花岗质或花岗闪长质的总体岩石中，隐约看出暗色矿物集中的条片或团块，它们分布不均，与脉体之间无明显界线，远观似云雾状（图 8－1F）。

1.3. 混合岩的成因

最早提出混合岩成因模式的是芬兰地质学家 Selderholm (1907－1934)，他认为混合岩是花岗岩浆注入于片岩或片麻岩所致, 认为形成混合岩的流体（岩汁，ichor）来自于相邻的花岗岩体。

Holmquist(1921)指出岩浆注入的模式只能解释局部的混合岩化现象，而不能说明大范围的混合岩成因问题。对于广泛分布的条带状混合岩的成因，Holmquist 提出了脉熔合岩(veinite)模式，把混合岩的成因解释为岩石内部形成的熔体或溶解物质富集于浅色脉体的结果，脉体物质来自变质岩本身，这是与 Sederholm 的外源说对立之处，也是当代混合岩争论的一个焦点。

Winkler 和 Von Platon 进行过一系列熔融实验，主张混合岩是片麻岩部分熔融形成的，混合岩中的浅色体是由熔融物质集中所致，Winkler 称之为**原地成因说**。

Mehnert 研究混合岩时提出部分熔融加上变质分异的模式。即岩石中发生部分熔融，同时浅色熔体和暗色残留物作小尺度的分离成为透镜体或细脉（图 8－2D）。他把原始变质岩称为**古成体（palaeosome)**，它分异成浅色体和暗色体，后者总称为**新成体（neosome)**，古成体在化学成分上等于浅色体加上暗色体。

很多学者强调混合岩是由交代作用形成的，

混合岩化过程中出现的流体（或岩汁）以渗透或扩散方式运动，将 Si、Na、K 等带入岩石，同时使 Fe、Mg、Ca 等带出并相对富集，形成 “基性前锋”，使岩石中部分发生改变为“脉体”，部分交代残余为基体，总体构成混合岩。

变质岩石通过这种固态交代作用，使其 Fe、Mg、Ca 等基性组分不断降低，Si、Na、K 等酸性组分不断增高，最后可变成花岗质岩石，这种固态岩石不经过岩浆阶段直接变为花岗岩的作用称为**花岗岩化作用**(granitization)。

混合岩化作用方式可归纳为：

深熔（即部分熔融）、岩浆注入、交代作用、变质分异

混合岩化方式

有熔体出现	**岩浆注入**	**熔融**

1>岩浆注入说 (Selderholm)

认为形成混合岩的流体（岩汁，ichor）来自于相邻的花岗岩体的注入。

2>深熔作用 Anatexis (Winkler)

混合岩是片麻岩部分熔融形成的，混合岩中的浅色体是由熔融物质集中所致。

3> 变质分异作用

岩石中发生部分熔融，同时浅色熔体和暗色残留物作小尺度的分离成为透镜体或细脉。

4> 交代作用 (metasomatism)

混合岩化过程中出现的流体（或岩汁）以渗透或扩散方式运动，将 Si、Na、K 等带入岩石，同时使 Fe、Mg、Ca 等带出并相对富集，形成 “基性前锋”，使岩石中部分发生改变为“脉体”，部分交代残余为基体，总体构成混合岩。

§2. 动力变质作用及岩石

动力变质作用是构造带上的岩石在应力作用下的各种变形作用和与之伴随的重结晶作用。

岩石在构造应力作用下的变形主要有两种表现：脆性变形和塑性变形。

2.1. 变形机制

1>. 脆性变形，一般发生在地壳浅部、低温低压和应力快速作用的条件下，组成岩石的矿物来不及调整颗粒的形状及本身的位置，甚至来不及拆开颗粒边界上彼此铰合的结构就发生了**总体破裂**。岩层在脆性变形后，形成**断层角砾**和**断层泥**，固结后形成各种**断层角砾岩**和**碎裂岩**。

2>. 塑性变形，在地壳深部，较高的围限压力和温度，及慢应变速率等条件下，岩石体受到应力作用变形时，变形体并不发生破裂而**仅改变其形状**，如发生**褶曲和扭曲**等，这种不失去其自身内聚力的变形称为韧性变形。

塑性变形发生的机制

晶内滑移：地壳深部岩石发生塑性变形时的主要方式，一个单晶的塑性变形主要通过滑移来实现，滑移包括直线滑移和双晶滑移。直线滑移是指晶格相互作层状滑动，所滑移的距离是结晶学基本单位的整数倍。双晶滑移指的是滑移的距离是结晶学基本单位的分数。结果使滑移面一侧的晶格由于剪切形成原有晶格的镜面映象。

位错 (dislocation) 蠕变和攀移, 形成位错壁和亚颗粒

与晶内塑性变形有关的结构

波状消光 (undulatory extinction)

变形带（deformation band)

亚颗粒(subgrain)

扭折带 (kink band)

机械双晶

变形纹 (deformation lamellae)

动态重结晶 (Dynamic recrystallization)

2.2. 动力变质岩的分类

动力变质岩简明分类表 （据 Spry, 1968 略有改动）

	0－10%	**10－50%**	**50－90%**	**90－100%**
定向性（具糜棱面理）	**构造砾岩**	**初糜棱岩**	**糜棱岩**	**超糜棱岩**
块 状 构 造	**构造角砾岩**	**初碎裂岩**	**碎裂岩**	**超碎裂岩**
玻璃态或隐晶质	**假玄武玻璃**			
重结晶（片状或片麻状）	**变晶糜棱岩**			

动力变质岩的命名

一个动力变质岩的基本组成部分可分为**基质（碎基）**和**碎斑**，

基质是所有动力变质岩中都存在的，而在强烈变形的岩石中碎斑可完全消失，因此基质的性状和数量是动力变质岩分类的基础。

多数动力变质岩原岩是可以识别的，因此在动力变质岩命名中可根据变质变形程度把原岩名称和动力变质岩名称结合使用，如：糜棱岩化××岩、××糜棱岩等。

动力变质岩的类型

(1) 构造或压碎角砾岩 (breccia)

由原岩经构造压碎所形成的一系列棱角状的碎块和粉碎的基质组成：**张性角砾岩**和**压性角砾岩**

(2) 碎裂岩类 (cataclasite)

成因上以**脆性变形**为主，韧性流变不发育，一般**无明显的定向构造**，碎斑中常见**微裂隙等脆性破裂特征**，重结晶作用弱。按着碎基的含量可进一步分为初碎裂岩（碎基 10－50%）、碎裂岩（碎基 50－90%）和超碎裂岩（基质 90－100%）。

(3) 糜棱岩类 (mylonite)

糜棱岩是**塑性变形**形成的具有**糜棱叶理（面理）构造**的岩石，糜棱岩发育各种**塑性变形和重结晶结构**，如波状消光、变形纹、变形带、晶内扭折、变形双晶、亚颗粒及核幔结构等，**糜棱岩是韧性变形带的特征岩石**。

进一步地，据基质含量可把糜棱岩分为初糜棱岩（基质 10－50%）、糜棱岩（基质 50－90%）和超糜棱岩（基质 90－100%）。

(4) 千糜岩 (phyllonite)

也称为**千枚糜棱岩**，其变形程度相当于糜棱岩和超糜棱岩，但变形过程中**重结晶**形成许多**片状矿物如云母和绿泥石**等，而使岩石具有**千枚状构造**。

(5) 变晶糜棱岩 (blastomylinite)

变晶糜棱岩（blastomylonite），也译为变余糜棱岩，指糜棱岩经过**明显的重结晶**，使其原来的变形结构几乎消失，从而有时很难与区域片岩和片麻岩区别。

(6) 假玄武玻璃 (pseudotachylite)

是一种黑色、光性均匀的物质，是碎裂岩类中一种变形极端强烈的变种，**代表极高应变速率下碎裂的产物**。

岩石塑性变形的主要表现有：

（1）塑性变形可引起矿物晶体出现内部晶格滑动和位错， 发育波状消光、亚颗粒、扭折、机械双晶及变形纹等变形结构。

（2）由于岩石内部所受的应力不均匀引起组分化学位的梯度变化。

如某些组分在受到最大垂直应力的部分趋向于溶解，而在受垂直应力较小的部分沉淀，从而形成岩石内部的扩散流。与之有关的结构现象有如压溶现象、压力影和糜棱结构等。

（3）在应力作用下，变质岩石中的矿物出现优选定向(preferred orientation)， 从而形成变质岩石所特有的结晶片理。

§3 冲击变质作用 (shock metamorphism) 及岩石

发生在陨石冲击星体表面时产生的冲击坑中，它是在极短的时间内发生的，压力可达数十到上百个吉帕 (GPa)，温度可超过 10000℃。在瞬时高温和动态高压条件下发生的特殊类型变质作用出现了一些特殊的**高压变质矿物**，如：**柯石英(coesite) 斯石英 (stishorite)、斜锆石、焦石英和冲击玻璃**等，并且许多矿物的晶体结构遭受破坏。石英和长石等可以发育**多组面构造**，**黑云母**发育**扭折带**，多数矿物都发育强烈的**波状消光**。

§4 埋藏变质作用

（1）**缺少透入性片理**；

（2）埋藏变质作用常使原岩改造得不彻底，保留大量的**原岩组构**；

（3）在沉积盆地中，自浅而深发育**浊沸石相**和**葡萄石－绿纤石相**，如在新西兰南岛 Taringatura 地区，自上而下出现片沸石、浊沸石、浊沸石＋葡萄石和浊沸石＋葡萄石＋绿纤石。

（4）埋藏变质作用出现于**显生宙，尤其是中、新生代的地槽沉积物中**。中国的准葛尔和鄂尔多斯盆地也发生了埋藏变质作用。

§5 洋底变质作用（Ocean-floor metamorphism）

洋底变质作用指洋中脊附近的岩石由于受到**来源于深部的热流**和**自上而下的热卤水**的影响发生变质作用，变质程度自上而下主要为**沸石相、葡萄石－绿纤石相和绿片岩相，深部也可出现角闪岩相**，为**低压相系**，由于洋底扩张洋底变质作用的岩石遍布整个洋底。

Two types of ocean-floor metamorphism:

1) low grade alteration
   a) formation of palagonite （橙玄玻璃）
   b) formation of smectites
   c) formation of carbonate
   d) compact and dehydration

2) High grade metamorphism
   a) Zoelite facies
   b) pumpellyite facies
   c) epidote facies
   d) amphibolite facies

§6 汽成水热变质作用及岩石

汽成水热变质作用是指**热水溶液**与**固态岩石**发生**交代作用**，使其化学成分、矿物成分和结构构造发生变化的过程，也称为**蚀变作用**。

影响汽成水热变质作用的主要因素为：

①气水热液的性质；

②围岩的性质；

③温度、压力等外部条件。

主要的蚀变作用和蚀变岩类型：

1 蛇纹岩化及蛇纹岩

纯橄榄岩和橄榄岩等**超基性岩**受**水热交代作用**变成蛇纹岩这种过程称为**蛇纹岩化**

2 磐岩化与青磐岩

中性和中基性火山岩经**气水溶液的交代作用**形成的，主要由**绿泥石、钠长石、绿帘石、石英、方解石、阳起石和黄铁矿**等矿物组成的，绿色－暗绿色的块状岩石称为**青磐岩**，这种过程称为**青磐岩化**。

3 云英岩化及云英岩

云英岩化是**酸性侵入岩**遭受**气水热液交代作用**形成云英岩的过程。云英岩的主要组成矿物是**石英和云母**，这里的云母为**白云母、锂云母和铁锂云母**等，不出现**黑云母**，此外可出现**黄玉、萤石、电气石、锡石、辉钼矿、辉铋矿、毒砂、白钨矿及黄铁矿**等

4 夕卡岩化和夕卡岩

在**中酸性侵入体**和**碳酸盐岩**的接触带附近，由于**接触交代作用**形成的一种岩石，称为**夕卡岩**。

第九章　变质作用与地壳演化

9.1. 变质带、变质相、变质相系和变质作用的 PTt 轨迹

9.2. Metamorphism and tectonics

9.3. 前寒武纪地壳演化

一、由变质相、变质相系到 PTt 轨迹

———变质地质学的形成和发展

递增变质带 (Barrow 型变质带)

变质相的概念: Goldschmidt (1911）,Escola (1915)

变质相系的概念：Miyashiro (1961)

在同一变质地带的不同空间上，由变质相系所表达的峰期变质条件，在 P－T 图解上构成一条曲线，它们代表当时某种固定的地热梯度(geothermal gradient) 。变质相系的概念通过变质时的特定地热梯度把变质作用的 PT 条件与大地构造环境结合起来，对**变质岩石学**的发展起了重要作用，它不仅为**板块构造理论**提供了岩石学上的证据，而且为**变质地质学**理论的形成奠定了理论基础。

变质作用的 PTt 轨迹

我们现在地壳表明见到的各类变质岩石一般都经历了比较复杂的变质过程，尤其是造山带中的区域变质岩石，从埋深、俯冲、碰撞、地壳加厚、基性岩浆的 underplating 等，到折返、抬升、剥露到地表，不同形成环境的岩石都记录了不同的变质过程，也记录了各自的 P-T 演化与时间 t 之间的内在联系。

England and Richardson (1977) 以阿尔卑斯为例，对大陆内部造山带的大地构造演化过程进行了热模拟研究，提出了变质作用 PT 轨迹的概念。

地壳**在构造作用之前**应具有**特定的稳态地热梯度**，当与相邻地壳碰撞时，由于大规模的逆掩作用和岩片堆叠，使地壳迅速加厚，随着**构造埋深作用**，岩层所承受的压力也迅速增高。

当浅部低温的岩层迅速进入深部的过程中，温度的升高要相对慢得多。其结果是在这部分地壳中出现**热扰动**，使地热梯度偏离原始状态（稳态），当构造作用停止时，岩层所处的压力最大。

由于地幔热流上升和地壳本身内部放射性成因热的加温作用，出现**热松弛现象（thermal relaxation）**，即地壳的温度趋向于增高，向**稳态地热梯度**变化。

变质作用 PTt 轨迹的概念

变质作用的 PTt 轨迹（metamorphic PTt path) 是指岩石从它的变质起点到被剥蚀出露于地表所经历的温度－压力变化历史(Spear, 1989)

The complete set of T-P conditions that a rock may experience during a metamorphic cycle from burial to metamorphism (and orogeny) to uplift and erosion is called a pressure-temperature-time path, or P-T-t path

变质作用 PTt 轨迹的研究能够反映与变质作用历史有关的动力学过程，根据**热传导理论**和**现代热力学**的原理，把**变质过程中的热体制**和**构造作用**联系起来。

Three principal factors that control the P-T paths of metamorphic rocks:

(1) The perturbation of the thermal structure and the geological structure of the crust.

The tectonic mechanisms that can cause the perturbation of the crustal thermal structure and crustal thickness include:

a. Subduction – the thermal structure is typified by depressed geotherms

b. Thrusting

c. Homogeneous thickening of the crust – pure shear can lead to thickened crust and thermal perturbation.

d. Crustal thinning by extension and erosion.

e. Folding

f. Magma intrusion. Heat is convected into the crust.

It is important that tectonic processes operate on a time scale that is rapid relative to thermal relaxation. The tectonic perturbation occur almost instantaneously.

(2) The relaxation of the thermal perturbation towards a steady state value.

(3) The exhumation a rock as the result of uplift and erosion or tectonic thinning.

They have three effects on the thermal evolution of metamorpic rocks.

(a) They change thickness of the crust and therefore, the t geotherm towards which the perturbed geotherm evolves.

(b) lowering the pressure on the rock.

(c) lowering the temperature of the rock

一般变质作用发生于从热扰动到热松弛的过程中，或者说在变质过程中，地热梯度是变化的。

正常地热体制受到扰动的方式有多种：如板块俯冲、碰撞、伸展，岩浆的侵位及岩层褶皱等。

在地壳加厚区（碰撞造山带），变质作用的 PTt 轨迹取决于：

地壳加厚方式和程度、热松弛的速率、岩石折返的速率等，

峰期变质作用发生于岩石的回返过程中，往往在引起**地壳加厚的构造过程停止**后的数十个百万年发生。

P-T-t 研究方法

正演：以热传导理论的基本方程模拟变质作用过程

反演：根据变质岩石中所记录的信息推测其 P-T-t 轨迹

1>、PTt 轨迹的正演法：Heat transfer Equation

2>、PTt 轨迹反演模拟

反演模拟是从变质岩石中所记录的信息推测其 PTt 轨迹。

其基本假设是变质反应的速度往往慢于热松弛速度，在一个或一组变质岩石中通过结构分析可追索一系列平衡状态。利用这些保留的平衡状态确定变质作用的 PTt 轨迹。

这种反演变质作用 PTt 轨迹的方法包括：（1）矿物包裹体系列的地质温压计计算；（2）矿物的环带分析；（3）反应结构研究。

2、利用矿物环带推测变质作用 PT 轨迹　　微分热力学

9.2. 变质作用与大地构造环境 metamorphism and plate tectonics

stable cratons : cratons are stable and relatively cold, with 'normal' thermal gradients of ~20 K/km. In detail, this simplification is incorrect. Continental rocks usually begin life somewhat hotter than this as a result of crustal stacking and radiogenic heat generation, but then cool over time.

离散板块边缘（大洋中脊、大陆裂谷）

汇聚板块边缘（岛弧、俯冲带<大洋俯冲带、大陆俯冲带>）

1.板块离散边界－大洋中脊 Mid-Ocean Ridges

Passive

Plate separation-induced passive upwelling decompression melting for MORB.

During extension at mid-ocean ridges, convection carries heat to very shallow levels, where 7-km thick oceanic crust forms;

Hydrothermal circulation produces low P/T metamorphism, often called seafloor metamorphism

Ocean-floor metamorphism and representative lithologyies

- Concept
- Regional metamorphism
  Horokanai Ophiolite
- Hydrothermal metamorphism
  Serpentinization
  Chlorization
  Spilitization
  Rodingitization
  Epidotisation

2. 汇聚板块边界－岩浆弧

Magmatic arcs are sites where heat is advected to shallow levels, producing **low P/T metamorphism**.

The heat is chiefly provided by silicate melts derived from melting of the upper mantle.

Contact metamorphism is common in such settings. Good examples of this include the Sierra Nevada and Klamath Mountains.

岩浆弧（西太平洋型和科迪勒拉型）

岛弧岩浆作用：基性－酸性火山岩，花岗岩－花岗闪长岩

低压高温变质

深熔作用

Subduction Zones 汇聚板块边界变质作用

Rapid subduction advects cold material into the mantle, producing **high P/T metamorphism** , sometimes called "Franciscan-type" or "Sambagawa-type" in reference to two classic examples in California and Japan.

The "**coldness**" of the subduction zone depends on the age of the plate (older = colder) and the rate of subduction (faster = colder). **Eclogites** are the signature rocks of this process.

The signature rocks of high-pressure metamorphism are blueschists and eclogites.

俯冲带的分类

Maruyama et al. (1996): A-type (collision-type)
B-type (Cordilleran-type)

Ernst (2001): Alpine-type
Pacific-type

Shuguang Song et al. (2006): Continental-type
Oceanic-type

高压-超高压变质都发生在板块汇聚边缘，与板块之间俯冲碰撞有关.

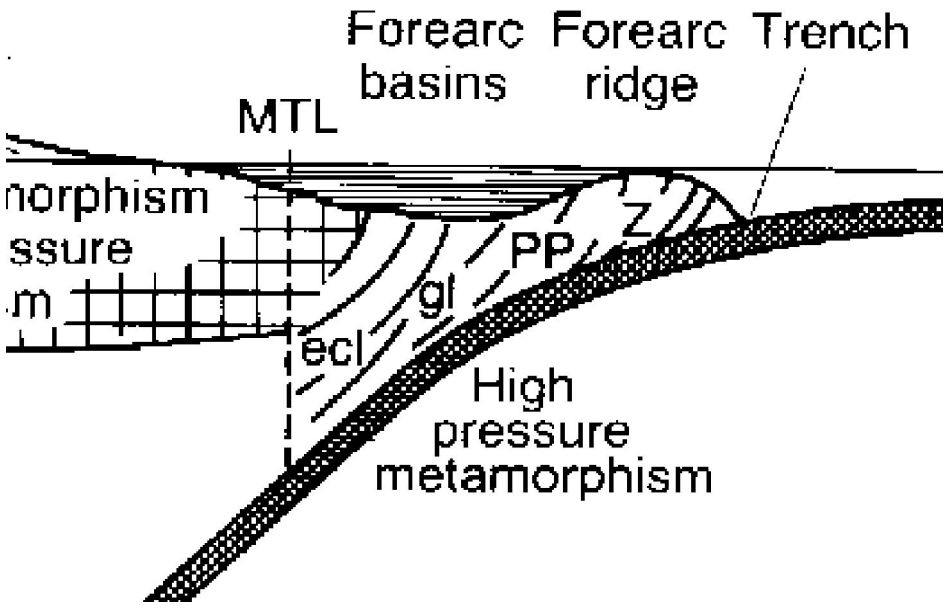
大洋向大陆俯冲的大洋俯冲带：形成低温榴辉岩和蓝片岩及蛇绿混杂岩;

大陆--大陆之间的大陆型俯冲带：中高温榴辉岩，片麻岩及石榴橄榄岩。

Plate tectonics and plume tectonics both are different aspects of mantle convection:

Plate tectonics driven by the cold thermal boundary layer on top (cooling plates)

Plume tectonics driven by the hot thermal boundary layer at bottom (CMB)



"Warm" subduction zones--a result of slow subduction or young subducted lithosphere

"Cold" subduction zones--a result of rapid subduction or young subducted lithosphere

They have different thermal regimes, dehydration depths, mantle wedge temperatures and circulation, and styles of volcanism

地幔中的水的问题已引起人们的普遍关注，有人曾估算地幔中的水是目前地表水的 2 倍(Ahrens,1989,**Nature**; Thompson,1992,**Nature**)，最新的研究结果表明可能达到地表水的 5 倍(Murakami, et al., 2002,**Science**)。**这些水流体最有可能就是通过板块冷俯冲的方式被带入到地幔中去的。**

Subduction zones with **cold** geotherms transport water through slabs to mantle wedge
Subduction zones with **warm** geotherms create magmatic arcs.

双变质带：

俯冲型板块边缘包括活动性大陆边缘带（安第斯型）和岛弧带。

总的来说，靠近大洋一侧，发育高压低温的变质作用；而靠近大陆一侧，有高温低压变质相系分布。安第斯型活动大陆边缘的俯冲带倾向于向大陆方向迁移，而岛弧带的俯冲带不断向大洋方向后退，以致向大洋方向造成新的双变质带的重复出现。每一对变质带内部的低压带与高压带在时间上应是很接近的

大陆地壳深俯冲发生的必要条件：
1）必须具有大洋岩石圈的俯冲和消亡
2）必须是被动大陆边缘

Ultrahigh-pressure (UHP) metamorphism
石英的相变
石英－柯石英 P >2.6 GPa
柯石英—斯石英 P > 8 GPa

Continent-Continent Collisions

Rapid crustal thickening during continental collisions produces high temperatures because of the large amount of radiogenic elements in continental crust. The pressures are moderate because continental crust is never thicker than ~75 km (2.5 GPa). These abnormally high temperatures are followed by cooling to a normal cratonal geotherm. This is the cause of so-called "Barrovian" metamorphism, signature minerals of which are staurolite + kyanite. Good examples are known from the Tibet and Himalaya.

The India-Asia collision zone is our best example of an active continent-continent collision.

9.3. 前寒武纪地壳演化

地球形成以来至今已有 46 亿年的历史，地球上所发现的最古老锆石年龄是 42－44 亿年。
前寒武纪克拉通由两种地体组成：**低级变质的花岗－绿岩地体，高级片麻岩－麻粒岩地体**。
原始地壳是个什么样子？何时出现大洋？何时出现了洋壳与陆壳的差异？太古代有没有板块构造？ 这些都是需要我们进一步探索的问题

太古代高级地质体（片麻岩－麻粒岩区）：

太古代高级地质体见于格陵兰南部、波罗的、乌克兰、阿尔丹、印度南部和我国华北北部一带。
已经识别出的有三种岩石组合：**长英质片麻岩组合、深变质似绿岩带组合和克拉通沉积岩与火山岩组合**。

高级地质体与低级地质体的关系

（1）高级地质体是花岗岩一绿岩区的深部产物，是受到强烈剥蚀的绿岩带的根部带。

（2）高级地质体无论在年代上还是在构造环境上都与低级地体完全不同。但是从现有的同位素年龄资料分析，并没有表现出明显的高级地质体比低级地质体更老或更新。。

（3）第三个模式即同时异相，高级地质体与低级地质体是时代大体相同但构造环境完全不同的两类地质体，高级地质体是构造上的稳定区而低级地质体是太古代的活动区。

问题思考：

为什么高压超高压变质主要出现在显生宙？

大洋（包括大洋岩石圈）是怎样形成的？大洋在将来有没有可能消失？

大陆深俯冲是如何发生的？与大洋岩石圈俯冲有什么差别？

变质岩岩石学复习总结

第一章：变质作用的基本概念

- **怎样理解变质作用？**
- **变质作用的界限，与成岩作用、岩浆作用的区别和联系**
- **变质作用的类型？与局部和区域构造的关系？**

造山带、洋中脊、大型沉积盆地、花岗岩侵入、断裂带、陨石撞击

- **变质作用发生的方式？**

1. 重结晶作用，
2. 变质结晶和变质反应，
3. 交代作用，
4. 变质分异作用，
5. 变形和破碎作用

第二章 变质反应及其控制因素

第一节　变质反应的基本类型

1. 固态反应

(1.1) 相转变 (Phase transformations)

(1.2) 溶离反应 (出溶反应) (Exsolution)

(1.3) 纯固态反应 (Solid-solid net-transfer)

2. 脱挥发分反应 (Devolatilization Reactions)

3. 氧化还原反应 (Redox Reactions)

4. 连续反应与不连续反应 (Continuous and Discontinuous Reaction)

第二节　变质反应的控制因素

1. 温度 (Temperature)

2. 压力 (Pressure)

(1) 负荷压力 (confining pressure)

(2) 流体压力 (Pfluid)

3. 应力 (Stress)

4. 流体 (fluid)

本章的重点问题：

1、变质反应有那些主要类型？

2、固－固反应和脱水反应有何特点？

3、何为连续反应与不连续反应？

3、控制变质反应的主要因素有那些？它们怎样影响变质反应？

第三章 变质岩的基本特征

本章要点：

1、何为等化学系列？变质岩石的五个等化学系列在化学成分和矿物成分上有那些特征？

2、变质岩的主要结构类型有哪些？各有何特征？

3、变质岩的变晶结构和岩浆岩的结晶结构有何不同？

4、变质岩的主要构造类型有哪些？各有何特征？

五个等化学系列：即富铝（泥质）系列、基性系列、长英质系列、碳酸盐系列和超基性系列。

五个等化学系列的主要特征

等化学系列	原岩类型	化学成分特征	矿物成分
富铝系列	泥岩、页岩等	富 Al_2O_3、SiO_2、K_2O，贫 CaO	主要矿物：石英、斜长石、钾长石、绿泥石、绢云母、黑云母、白云母； 富铝特征矿物：铁铝榴石质石榴石、硬绿泥石、蓝晶石、红柱石、夕线石、堇青石、十字石
基性系列	基性岩浆岩和铁质白云质泥辉岩	富 CaO、FeO*、MgO，$Na_2O>K_2O$	斜长石、石英、绿泥石、绿帘石/黝帘石、角闪石、单斜辉石、斜方辉石、石榴石
长英质系列	各种砂岩、粉砂岩，中酸性岩浆岩	富 SiO_2、Na_2O、K_2O	石英、斜长石、钾长石、及含量不等的云母、绿泥石、角闪石、辉石等，也可以出现少量的富铝特征变质矿物
碳酸盐系列	石灰岩和白云岩	富 CaO 或富 MgO	方解石、白云石，及少量的滑石、蛇纹石、透闪石、透辉石、镁橄榄石和硅灰石等
超基性系列	超基性岩浆岩	富 MgO	滑石、蛇纹石、透闪石、橄榄石、尖晶石、顽火辉石、及一些碳酸盐矿物

岩石的结构：岩石中矿物的粒度、自形程度、形态及相互关系等特征，

变余结构

变晶结构

交代结构

（1）交代残余结构

（2）交代假象结构

（3）交代净边结构

（4）交代蠕英结构

变形结构

构造：岩石中各种矿物及矿物集合体的空间分布及排列方式等特征。

3.3.2 变质岩的构造

变质岩的构造包括变余构造和变成构造。

变余构造指变作用不彻底，把原岩的构造保留下来。与沉积岩有关的构造如变余层理构造、变余波痕构造等。与火山岩有关的构造如变余杏仁构造、变余流纹构造和变余枕状构造等。

变成构造由变质结晶作用和变形作用形成的构造，常见的有：

（1）斑点构造

（2）板状构造

（3）千枚状构造

（4）片状构造

（5）片麻状构造

（6）条带状构造

（7）块状构造

（8）褶劈构造

条痕状构造。

眼球状构造。

第四章 共生分析和共生图解

本章要点：

1 如何认识和确定变质作用的平衡？

2 矿物平衡共生组合的定义

3 吉布斯相律和柯尔任斯基矿物相律有何异同？

4 如何用矿物相律来讨论变质作用的相平衡？

5 ACF、A'KF 和 AFM 图解有哪些特点？如何把矿物成分和原岩成分投影在这些图解上？

6 如何用这些图解进行变质矿物共生分析？

第五章 变质相、变质带和变质相系

本章要点：

1、变质相的概念？

一个变质相指一定的温度、压力区间内的一整套变质矿物共生组合，它们在时、空上反复出现并密切伴生在一起，一个变质相内部，其矿物组合和岩石总体化学成分之间有着固定的因而也是可以预测的对应关系

2、何为变质带（递增变质带），有几种类型？

3、接触变质作用有哪些变质相？其主要变质反应和矿物组合如何？

接触变质相：代表性矿物组合？

(1) 钠长绿帘角岩相：温度为 300－400℃，压力为 0.1-0.4GPa

钠长石＋绿帘石＋阳起石 (透闪石)＋绿泥石±石英	基性岩石
白云母＋黑云母＋石英±钠长石±红柱石±堇青石	泥质岩石
方解石＋透闪石±白云石±滑石	碳酸盐

(2) 普通角闪石角岩相：温度为 400－650℃，压力为 0.1-0.4GPa

斜长石（An>20％）＋普通角闪石±透辉石	基性岩石
白云母＋黑云母＋石英±红柱石±堇青石±斜长石	泥质岩石
方解石＋透辉石＋镁橄榄石±钙铝榴石	碳酸盐

(3) 普通辉石角岩相：温度为 650－800℃，压力为 0.1-0.4GPa

泥质岩石中白云母不稳定，变为红柱石/夕线石和钾长石，共生矿物组合为：
黑云母＋红柱石/夕线石＋钾长石＋石英±堇青石±斜长石
基性岩石中出现紫苏辉石：斜长石＋紫苏辉石＋透辉石＋石英
碳酸盐中出现硅灰石，共生矿物组合为：方解石＋硅灰石＋镁橄榄石

(4) 透长石相：温度为>800℃，压力为 0.1-0.4GPa

碱性侵入岩与灰岩接触带出现黄长石、钙镁橄榄石、斜硅钙石和透长石等高温淬火矿物为特征。

4、区域变质作用有哪些变质相？其主要变质反应和矿物组合如何？

区域变质相

（1）浊沸石相(Z): 温压条件为 P＝0.2－0.3GPa, T=200（150）－300℃。

典型矿物组合：
浊沸石+绿泥石+石英； 浊沸石+葡萄石+绿泥石+石英

变质反应： 片沸石 = 浊沸石+3 石英+2H2O (T = 200℃)

（2）葡萄石－绿纤石相(PP): 温度为 300－360℃，压力为 0.25-0.35GPa。

典型矿物组合： 绿纤石+葡萄石+绿泥石+钠长石+石英
绿纤石+绿泥石+绿帘石+钠长石+石英
葡萄石+绿纤石+绿帘石+钠长石+石英

变质反应： Lm (片沸石) + Pr (葡萄石) + Chl = Pmp + Q + H2O

（3）绿片岩相(LGS): 温度为 350－500℃，压力为 0.3-0.8GPa。

在变质基性岩中进入这一相的标志是绿纤石消失，出现黝帘石/斜黝帘石
变质反应：绿纤石＋绿泥石＋石英＝黝帘石＋阳起石＋H2O

（4）绿帘角闪岩相(EA)：温度为 500－560℃，压力为 0.3-1.0GPa。

其特征是在基性岩中出现普通角闪石，在泥质岩中出现富铁铝榴石的石榴石。可能的变质反应：

阳起石＋斜黝帘石＋绿泥石＋石英＝普通角闪石＋H2O

硬绿泥石＋绿泥石＋石英＝铁铝石榴石＋H2O

白云母＋绿泥石＋石英＝铁铝石榴石＋黑云母＋H2O

（5）低角闪岩相（LA)：温度为 550－650℃，压力为 0.3-1.0GPa。

泥质岩石中以出现十字石（中压）和堇青石（低压）和在白云母存在时富铁绿泥石及硬绿泥石的消失为标志，可能的变质反应为：

Chlorite＋Muscovite = staurolite + biotite+ Quartz + H2O

Chlorite + muscovite + quartz = cordierite + biotite+ Al2SiO5 + H2O

基性岩 **An > 30**

中压条件下，泥质岩石矿物组合：

十字石＋铁铝石榴石＋黑云母＋白云母＋石英±斜长石

蓝晶石＋铁铝石榴石＋黑云母＋白云母＋石英±斜长石

低压条件下，泥质岩石矿物组合：

堇青石＋红柱石＋黑云母＋白云母＋石英±斜长石±铁铝石榴石

基性岩石矿物组合：

普通角闪石＋斜长石（An>30）±黑云母±绿帘石±石英

（6）高角闪岩相 (HA)：温度为 650－700℃，压力为 0.3－1.0GPa

泥质岩石进入高角闪岩相的标志是白云母＋石英不稳定，转变为钾长石＋Al2SiO5，即：

白云母＋石英＝钾长石＋夕线石/红柱石＋H2O

片麻岩中发生深熔，出现混合岩化作用也是高角闪岩相开始的标志。高角闪岩相的特征矿物组合为（图 5－4）：

夕线石＋石榴石＋黑云母＋钾长石＋石英±斜长石	泥质岩石，中压
红柱石＋堇青石＋黑云母＋钾长石＋石英±斜长石	泥质岩石，低压
普通角闪石＋斜长石±透辉石±石英	基性岩石

（7）麻粒岩相(G)：温度为 700－900℃，压力为 0.3-1.2GPa

在基性岩中以出现**紫苏辉石**为标志，即：

普通角闪石＋石英＝紫苏辉石＋透辉石＋斜长石＋H2O

压力较高时:

紫苏辉石＋斜长石＝石榴石＋透辉石＋石英 **(高压麻粒岩)**

泥质岩石进入麻粒岩相的标志:

夕线石＋黑云母不稳定，转变为石榴石＋堇青石。

Bi + Sil + Q = Alm + Cord + Kfd + H2O

麻粒岩相的特征矿物组合为：

紫苏辉石＋透辉石＋斜长石±石英±角闪石	基性岩石
透辉石＋石榴石＋斜长石＋石英	基性岩石
夕线石＋石榴石＋堇青石＋钾长石＋石英±斜长石	泥质岩石

（8）蓝片岩相 (GL): 硬柱石蓝片岩相 **Lws + Pmp + Gln + Arg + Chl**
绿帘石蓝片岩相 **Ep + Gln + Grt + Phn**

（9）榴辉岩相 (E): 温度范围很宽，400－900℃，压力一般超过 1.0GPa

在基性岩中的特征矿物组合为绿辉石＋石榴石，此外有含量不等的石英、蓝晶石、角闪石、帘石和金红石等，不出现斜长石。在变质泥质岩石中出现蓝晶石＋滑石为特征，还可以出现多硅白云母、石榴石、富镁的硬绿泥石等，称为白片岩

5、何为变质相系？主要有几种类型？与大地构造的关系？

在某一个变质地区和变质带中，其温压范围一般很宽，不能用一个变质相来代表，可能表示为一系列的变质相，也就是变质相系。

都城秋穗划分出五个变质相系

① 低压相系：**红柱石－夕线石型**，低压型（领家－阿武隈型），以泥质岩石中出现红柱石（低级）、夕线石（高级）及堇青石等为特征地热梯度大于 **25℃/km**。
② 中压相系：**蓝晶石－夕线石型**，中压型（巴洛型），以泥质岩石中出现蓝晶石和夕线石为特征，地热梯度为 **16－25 ℃/km。**
③ 高压相系：**硬玉－蓝闪石型**，高压型（三波川型），以基性岩中出现硬玉＋石英、蓝闪石、硬柱石等矿物为特征，地热梯度 **小于 16℃/km**。
④ **低压过渡型**，也称为布恰型（Bucchan type），以泥质岩石中出现红柱石－十字石，或红柱石－蓝晶石为特征。
⑤ **高压过渡型**，以出现蓝闪石和蓝晶石为特征。

第六章　接触变质作用及岩石

主要问题：
1、何为接触变质作用？
2、不同原岩接触变质岩的特点？接触变质大理岩，角岩有那些特点？
3、热接触变质晕有那些特点？

第七章　区域变质作用及其岩石

主要问题：
1、区域变质岩石有哪些主要类型？
主要有：板岩、千枚岩、片岩、片麻岩、斜长角闪岩、长英质粒岩、麻粒岩、榴辉岩、石英岩和大理岩

- 变质泥质岩：有板岩、千枚岩、片岩、片麻岩
- 变质基性岩：绿片岩、斜长角闪岩、麻粒岩、蓝片岩、榴辉岩
- 变质长英质岩石：长英质粒岩、石英岩
- 变质碳酸盐岩：大理岩

2、如何区分片岩和片麻岩？
3、麻粒岩的定义，形成条件？
4、蓝片岩的定义，分类和矿物组合及其构造意义？
5、榴辉岩的特点、分类、成因及其构造意义如何？

第八章　其它变质作用及变质岩

1、什么是混合岩？它有哪些主要类型？
2、混合岩的成因有那几类？
3、何为动力变质作用？
4、岩石的韧性变形有几种方式？各有哪些特点？
5、动力变质岩石有那些主要类型？各有哪些特征？
6、冲击变质作用、洋底变质作用和埋藏变质作用有哪些特点？
7、何为汽成水热变质作用？汽成水热变质岩有哪些主要类型？

第九章　　变质作用与地壳演化

1、变质带、变质相系与变质作用的 PTt 轨迹的内在联系
　　变质作用 PTt 轨迹的概念及其研究意义

2、变质作用与板块构造的关系：不同构造环境下的变质作用特征，与变质相系结合
3、早期地壳演化