第二十三章 矿物的形成、演化与共生组合

本章概要：

1. 地球和宇宙矿物分布的基本格局。
2. 形成矿物的地质作用类型；岩浆矿物结晶的总体趋势；伟晶作用中矿物的成分特征；高温、中温和低温热液矿物共生组合；典型变质矿物；表生矿物的成分特征。
3. 矿物世代的概念；矿物形成顺序及其识别标志；假象与副象的概念。
4. 矿物标型的概念；矿物标型特征的主要类型。

第一节 地球与宇宙矿物的分布

1．地球岩石圈的矿物数量与空间分布

从地壳深部→地表，矿物种属及数量趋向增多。其实，地球从地核→地慢→地壳，矿物种属及数量亦趋向增多。这就是地球矿物空间分布的一般规律，表明绝大多数矿物种分布于低温低压条件下形成的地质体中，少部分分布于高温高压条件下形成的地质体中。迄今为止，已知的矿物种约 4000 种，其中绝大多数分布在地壳中。

随着深度的增加，地球密度、重力、温度和压力均增加。这说明地球内部不同深度范围的热力学条件差异悬殊，从而导致在不同空间部位矿物组合和物相转变等出现变化。在地表常温常压下，多为表生含水矿物，如粘土矿物、褐铁矿、沸石类等；地表以下岩石圈中常见石英族、长石族、云母族、辉石族和角闪石族等，形成于较低压力、中至较高温度，水在矿物组成中的作用相对减小。向下当压力达 12×10^8—15×10^8 Pa 时，则为榴辉岩矿物组合，此时钠长石转变为硬玉，钙长石转变为石榴石，以致长石消失，形成辉石和石榴石为主的矿物组合。当压力大于 30×10^8 Pa 时，则形成石榴石二辉橄榄岩，先是柯石英代替石英，且随着深度的增加，云母族和角闪石族相继消失。当压力在 30×10^8—40×10^8 Pa 时，出现金刚石和镁铝榴石等矿物；当压力更大时，石榴石被尖晶石所取代，SiO_2 主要以斯石英的形式产出。

2. 岩石圈不同岩层的矿物分布

岩石圈是指地球的刚性外壳层，它是由一些相互独立运动的离散板块构成，包括地壳和上地幔顶部。岩石圈板块在洋脊上形成，而在俯冲带内沉入地球内部。由于壳幔结构和岩石圈动力学性质的不同，可划分出不同类型的岩石圈，如大陆克拉通、造山带、裂谷、边缘海洋壳和岛弧岩石圈等。由南海－华北地区岩石圈及软流圈结构模式（图 23-1）可说明岩石圈总体结构及其与软流圈间的关系。

中国地质大学（武汉）岩石矿物教研室

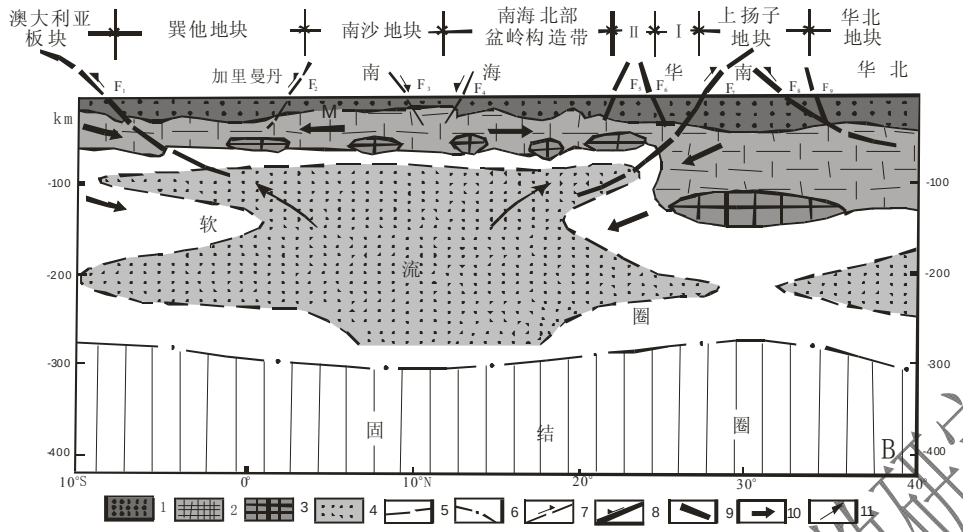


图23-1. 南海－华北地区岩石圈及软流圈结构模式（据蔡学林等，2006）
1-岩石圈地壳，2-岩石圈上地幔，3-岩石圈中下部高速块体或幔块构造，4-软流圈内低速异常体，5-岩石圈底界面，6-软流圈底界面，7-俯冲碰撞带及大型逆冲断裂带，8-伸展断裂带，9-碰撞缝合带，10-板块及块体运移方向，11-软流圈内物质流动方向，Ⅰ-赣湘桂构造带，Ⅱ-云开地块，M-莫霍面

大陆地壳通常分为三层，自上而下为沉积岩层、变质岩+花岗岩层和玄武岩层。大洋地壳厚度很小，平均为 6~8 km，最上部为很薄（厚度<0.5 km）的海底沉积物，向下为枕状玄武岩和岩墙状辉长岩以及由超镁铁质岩蚀变形成的蛇纹岩。上地幔顶部主要是由镁铁质和超镁铁质成分的橄榄岩类岩石组成。

地壳从玄武岩层→花岗岩层→变质岩层→沉积岩层，矿物的种属和数量趋向增多。

2.1 玄武岩层的矿物分布

构成本层岩石的主要成分相当于辉长岩和玄武岩类。在其底部，由于温度和压力的增高辉长岩类也可能变成麻粒岩。主要分布于洋壳和陆壳下部。

本层超基性－基性岩中的主要矿物是橄榄石、辉石、角闪石、石榴石、斜长石、铬铁矿、铜镍硫化物矿物、铂族元素矿物、金刚石和自然铬等。

2.2 花岗岩层的矿物分布

花岗岩层主要由各种长英质的岩浆岩和变质岩组成，底部集中了大量的花岗岩类岩石，而基性和超基性岩的比例小于 15%。主要分布于陆壳的上层，洋壳则缺乏。

分布于花岗岩类岩石中的主要矿物是石英、碱性长石亚族、斜长石亚族、黑云母、锆石、绿帘石、独居石等。

2.3 变质岩层的矿物分布

岩浆岩和沉积岩在地壳内部由于受到温度、压方以及化学活动性流体的作用，往往使其矿物组合和结构构造被重新改造，从而转变成在新的地质环境中平衡稳定的岩石，即所谓变质岩。变质岩主要分布于陆壳，约占地壳总体积的 27.4%。

区域变质岩中的矿物种类相当多，几乎包括了上述分布在玄武岩层和花岗岩层中的绝大多数矿物以及沉积岩层中矿物的转变产物。

2.4 沉积岩层的矿物分布

地壳表层由于长期遭受各种外动力作用的改造，从而形成了一套沉积岩层，其平均厚度为 1.8 km，成分特点是 H_2O、CO_2、有机质、S、Cl、B、F 的含量显著增高。陆壳和洋壳均

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

有沉积层，但后者的厚度只有前者的十分之一，且主要为现代松散沉积物。

在地壳表层外生作用条件下形成的产物，类型比较复杂，有残留风化壳型、分化淋滤型、机械沉积型、化学沉积型、生物化学沉积型等。

分布于残留风化壳的矿物主要是一些含水的氧化物和氢氧化物所组成的混合物，如褐铁矿、铝土矿、硬锰矿以及高岭石等。分布在淋滤形成的次生富集带的矿物，有辉铜矿、铜蓝等，它们产于硫化物铜矿床中。

在机械沉积的砂矿中，主要分布着一些化学性质比较稳定的矿物，如自然金、自然铂、金刚石、独居石、锆石等。它们赋存在以冲积为主的松散沉积物中。

分布在化学沉积岩石中的矿物，随沉积环境的不同而有所差别。例如，石盐、钾石盐、光卤石、芒硝、钾盐镁矾（kainite, MgSO4 • KCl • 3H2O）、石膏、硬石膏等，是含盐层的主要矿物组合；硬锰矿、软锰矿、水锰矿、菱锰矿等含锰矿物，是滨海浅水沉积岩层中的主要矿物组合；方解石和白云石则是巨厚海相地层碳酸盐岩中的主要组成矿物。

综上所述可知，地壳中矿物在纵向上的分布特征是，从玄武岩层→花岗岩层→变质岩层→沉积岩层，不论是矿物的种类还是数量，都在不断地增多。在地壳的横向空间上，矿物分布的种类和数量同样具有区域性的差别。以有用矿产为例，地中海地区的汞矿、马来西亚的锡矿、赞比亚及智利的铜矿、中国的钨矿、南非的金刚石等，都是很重要的富集地区。我国江西的钨、锡矿，贵州的汞、锑矿，新疆阿尔泰的绿柱石、内蒙古白云鄂博的稀土元素矿物等，也是重要的富集地带。这些都说明了地壳中的矿物在空间分布上具有一定的分带性或不均匀性。

3 上地幔的矿物分布

上地慢的化学成分主要为超镁铁质，岩石类型主要为橄榄岩类（包括二辉橄榄岩及方辉橄榄岩）、辉石岩和榴辉岩。组成地慢岩的主要造岩矿物为镁橄榄石、顽火辉石、透辉石和镁铝榴石。这些矿物约占上地幔矿物的 95%一99%。在 l50－350 km 深度范围内，这些稳定矿物的质量百分比为：镁橄榄石 57%，斜方辉石 17%，镁铝榴石 14%，透辉石－硬玉 12%。

目前所知上地幔的矿物约有 40 种左右，其中以硅酸盐矿物为多，包括橄榄石、粒硅镁石、斜硅镁石、镁铝榴石、高铬镁铝榴石、夕线石，蓝晶石，等。其中，镁橄榄石、顽火辉石、透辉石和镁铝榴石等，属于上地慢主要造岩矿物，它们约占上地慢矿物总数的 95%－99%；而柯石英、高铬镁铝榴石、金刚石、碳硅石及钾铁镍硫化物则是上地慢的专属性矿物。

橄榄石是橄榄岩类岩石的主要矿物，在岩石中的含量通常大于 50%，其中以镁橄榄石为主，它是深源捕虏体中的主要矿物。

铬透辉石主要见于二辉橄榄岩中，与其相组合的是镁铝榴石。

地球上的金刚石主要来源于上地幔的金伯利岩。在金伯利岩中与金刚石共生的主要矿物有铬镁铝榴石、铬透辉石、顽火辉石和成分为 Fo90 的镁橄榄石。

综上所述，上地幔上部为方辉橄揽岩带，其下部是石榴石二辉橄榄岩带，在这两个岩带中又存在着小的榴辉岩体，其中矿物的分布是不均匀的。

5 宇宙矿物分布

5.1 月岩的矿物分布

目前从月岩样品中发现的矿物约有 60 余种，其中有少数是地球上未曾发现的。月岩矿物的分布具有如下特点：

1） 月岩的主要造岩矿物为地球上典型的超基性－基性岩和陨石中的硅酸盐矿物，即主要是

中国地质大学（北京）岩石物质研究

辉石、基性斜长石、橄榄石和钛铁矿。月岩与地球玄武岩的不同之处，在于月岩的玄武岩含钛铁矿较多。

2） 月岩矿物的种属和数量有局限性，与地球上已知的矿物种属及数量相比，月岩中显然是少得多。主要是因为月球上不存在水和挥发组分，缺乏矿物形成过程中必不可少的介质，阻碍了化学反应作用的进行。

3） 在月岩中发现了地壳和陨石中还未曾发现的矿物，它们是：三斜铁辉石（pyroxferroite）、亚铁板钛矿（atomaloolite）、钛铬铁矿（titanochromite）和静海石（t rangulniyite）。在月岩中最有意义的标型矿物是三斜铁辉石、钛铬尖晶石和镁质铁板钛矿。已发现的含水矿物是正方纤铁矿（akaganeite）。

月岩可分为月陆岩（光亮部分）和月海岩（黑暗部分）。月陆岩按其化学成分可分为两种类型：第一种类型是 A12O3 含量大于 26%的斜长岩类。这种类型岩石包括两个系列，一是斜长岩－苏长岩－橄长岩系列，二是辉长－苏长岩及辉长－斜长岩系列。月陆岩矿物中，单斜辉石主要为透辉石、镁普通辉石和易变辉石。斜方辉石则主要是古铜辉石。橄榄石以富 Mg 为突出特点，Fo 分子通常占 70－95%。斜长石以钙长石占绝对优势，尖晶石族主要是含 Mg 的高 Al 尖晶石，次为含 Mg 的钛铁晶石。

月海岩与辉长－玄武岩类岩石相当。低钛玄武岩（TiO2<6%）和高钛玄武岩（TiO2>8%）是月海岩的主要岩石化学类型。分布在月海岩中的辉石主要是单斜辉石，其特点是成分变化很大，绝大多数是含 Mg 或含 Fe 的变种。橄榄石通常都更富含 Fe，一般含铁橄榄石组分为 30－40%。斜长石按其成分与培长石或钙长石相当．尖晶石族以含 Mg 极低的钛铁晶石占绝对优势。

5.2 陨石的矿物分布

陨石是宇宙的星际物质从空间坠落到地球上的碎块或其它星球上的一些碎块。它是一种天然的多相矿物体系，保留了宇宙成因矿物的原始面貌。按陨石的矿物组成，可分为石陨石、铁陨石和石－铁陨石 3 大类，其中以石陨石为最多，约占陨石总量 90%左右，铁陨石和石－铁陨石分别约占 8%或 6%左右。

陨石中分布约 130 种左右的矿物，其中大多数与地球矿物相似。石陨石主要由 Mg、Fe、Ca 的硅酸盐矿物组成，所含镍－铁不多，主要矿物约有 20 余种，其中有镁橄榄石、贵橄榄石、透铁橄榄石、顽火辉石、古铜辉石、斜顽辉石等。铁陨石几乎全由镍铁合金组成。石－铁陨石主要由数量大致相等的硅酸盐矿物及金属镍－铁组成，一般有金属镍－铁矿物、橄榄石、斜方辉石、贫钙单斜辉石及其它次要矿物，并有一定的均质原生玻璃存在。

从陨石的化学成分看，地球岩石中已知的化学元素在陨石中均有发现，说明陨石物质与地球物质具有同源性。据此，铁陨石可能类似于地球内核物质成分，石－铁陨石类似于地慢物质成分，石陨石接近于地壳物质成分。大多数陨石矿物是在缺水、缺硫、缺氧的极端还原条件下形成的，它们中的 Fe、Ni 多成二价，并出现多种 C、P、N、Si 化物以及呈金属单质出现的矿物，各种固溶体矿物的成分变化范围也要比地球矿物宽广得多。例如，金属镍－铁在陨石中是很普遍的，而在地球上则很少出现；地球上大量出现的石英在陨石中却很少见到。仅产出于陨石、而在地球上还未发现的矿物种及亚种约有 30 多种。

5.3 宇宙尘的矿物分布

宇宙尘是一些降落到地球上的宇宙物质小颗粒。宇宙尘有两类，即行星际空间尘埃与消融型宇宙尘。前者为各类小行星体相互碰撞破碎或星云凝聚残留在行星际空间的尘埃，它们是极微细矿物颗粒组成的集合体，形状不规则，元素丰度具典型的地外物质特征，在地质体

中极难发现。后者则为陨石、流星、彗星等大体在降落过程中表面温、压骤增，表面物质气化、熔融而形成尾随陨落体的烟尘。烟尘中的粒子粒度多在 0.1－0.3 mm，经高温熔融并迅速在大气中冷蔽再沉降到地表。其矿物成分、化学组成和结构构造都反映出高温熔融与迅速冷凝的特征。

宇宙尘根据其矿物组成与物理性质可分为铁质、铁－石质和玻璃质 3 种类型。铁质宇宙尘主要组成矿物为自然铁、磁铁矿和方铁矿等，具强磁性；铁－石质宇宙尘由铁镍和硅酸盐矿物组成，亦具磁性，但较铁质者弱；玻璃质宇宙尘是一种玻璃球体，没有磁性。消融型宇宙尘在地球上各个地质时代的沉积岩和沉积变质岩中均有分布，表明自远古以来宇宙尘的沉降是持续的。

第二节 矿物形成作用与共生组合

1. 矿物形成作用类型与矿物组合的概念

矿物形成地质作用的按一定的物理化学条件，可划分为内生作用、外生作用和变质作用。

内生作用（endogenic process）主要指由地球内部热能导致形成矿物的各种地质作用，主要包括岩浆作用、伟晶作用和热液作用。**外生作用**(exogenic process)又称表生作用，指主要在太阳能作用下，地球表层系统的岩石圈、水圈、大气圈和生物圈相互作用过程中形成矿物的各种地质作用，主要有风化作用和沉积作用。**变质作用**(metamorphism)是指已形成的矿物受到岩浆活动和地壳运动的影响，其成分与结构发生变化而生成新的矿物的各种地质作用，主要包括接触变质作用和区域变质作用。上述几种作用间经常存在着一些过渡性质的作用类型，如火山作用与沉积作用之间的火山沉积作用等。

不同或相同的自然作用在一定空间中可形成几种矿物，我们将这些矿物之间的关系称为组合关系，而将同处于一定空间中的几种矿物的集合称为“**矿物组合**”（mineral association）。显然，矿物组合本身不具有任何成因意义，它只表示有关矿物的空间联系。在一定的时空范围内和一定的物理化学条件控制下，由一定的自然作用所形成的几种矿物的集合，称为“**矿物共生组合**”（mineral paragenetic association）。显然，共生在一起的矿物不仅满足“同空间”这个一般矿物组合的要求，其形成过程还应基本满足“同时间”、“同介质”和“同条件”这三同，即是在同一时空域发生的同一种自然作用。如果处在一定空间范围内的几种矿物分别是在不同时间、或相同时间的不同介质在不同物理化学条件下形成的，这样的矿物组合称为“**矿物伴生组合**”（mineral accompanying association）。在近地表有时见到黄铁矿被褐铁矿包裹，褐铁矿是黄铁矿形成后的氧化产物，它们只不过是在近地表这个特定空间的伴生矿物而已。还应指出，有的矿物彼此间从不共生，或者说是“禁止”共生。如橄榄石绝不与石英共生，因为橄榄石属硅酸不饱和矿物，当有游离 SiO_2 存在时，它必然要与橄榄石反应形成辉石族矿物，而不可能析离出来形成石英；同理，似长石、霓石也不能与石英共生。

矿物共生组合的研究在探讨矿物岩石成因及指导找矿勘探方面具有重要意义，也有助于野外较简单地质体中矿物的鉴定。如何判断哪些矿物具有共生关系呢？对于复杂地质作用形成的矿物，这是需要通过系统的野外地质观察和详细的室内研究（包括普通光学显微镜、阴极发光分析、矿物相平衡和矿物相律分析等）才能准确回答的问题。通常，共生矿物的晶粒比较均匀，晶粒间常呈三角接触，彼此穿入程度基本相同，不存在先后结晶和矿物间溶蚀、交代、包晶、穿脉、环带及放射状等结构。这些特征是矿物共生的重要标记，在矿物共生分析中普遍采用。一般来说，一定的地质作用总是有一定的矿物共生组合与之相对应，了解几种主要地质作用所形成的矿物共生组合，是深入研究矿物共生关系的基础。

2. 岩浆作用及其矿物共生组合

中国地质大学（武汉）岩矿测试研究室

岩浆作用(magmatism)是地下深处高温高压下形成的岩浆熔融体在上侵运移过程中与周围环境不断交换能量及成分并逐渐冷却形成岩浆岩的地质作用。它们主要来源于上地幔物质的分熔或地壳物质的局部熔融。由于来源及成因不同，硅酸盐岩浆可分为超基性（SiO_2<45%）、基性（SiO_2 45%－53%）、中性（$SiO_2$53%－66%）、酸性（SiO_2＞66%）和碱性（SiO_2不足，Na_2O、K_2O含量高）等几种化学成分类型。

在各类岩浆岩中，最主要的造岩矿物有橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、普通角闪石、碱性长石、斜长石、黑云母、白云母、石英、霞石、白榴石等，常见的副矿物有榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿、尖晶石、独居石等。岩浆岩成分不同，所形成的矿物种类、组合和含量便有明显差异。如超基性岩的主要矿物有橄榄石、辉石，副矿物有铬铁矿、自然铂、金刚石等，不含石英；基性岩除辉石、角闪石和基性斜长石外，还常含钛铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和磷灰石等副矿物；酸性的花岗岩则主要由石英、钾长石、斜长石和云母组成。

根据大量研究和人工实验，鲍文（1922）提出玄武岩浆冷却过程中矿物结晶的两个系列（图 23-2）。位于反应系列上部的矿物早结晶，结晶温度较高；位于反应系列下部的矿物晚结晶，结晶温度较低。两个系列中温度相近的矿物可以共生。这一原理称为“鲍文反应原理”。

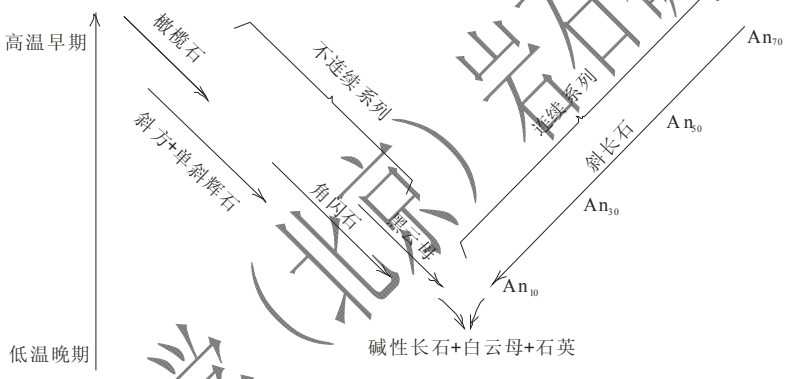


图 23-2 鲍文反应原理示意图(klein and Hurlbut, 1993)

3．伟晶作用及其矿物共生组合

伟晶作用（pegmatitization）是在地表下约 3－8 km 的高温（约 400 ℃－700 ℃）高压（围岩压力大于内部压力）富含挥发份和稀有、放射性元素的残余岩浆体系中，形成伟晶岩及其有关矿物的地质作用。

伟晶岩的主要矿物与有关深成岩相似，如常见的花岗伟晶岩主要由钾长石、钠长石、云母、石英等矿物组成。常富含稀有元素和挥发性组份矿物，如绿柱石、电气石、天河石、黄玉、绿辉石、锂辉石、铌钽铁矿、褐帘石等矿物。伟晶岩体呈脉状或不规则状，常具带状构造。矿物晶粒粗大或巨大，其云母可达数平方米，微斜长石单晶体可重达百吨。由钾长石和石英共结交生常形成文象结构，在晶洞中可发育完好的晶簇，其中富集的稀有、稀土和放射性元素矿物可以构成重要的矿产。

5 热液作用及其矿物共生组合

热液作用（hydrothermalism）是指在地下数千米到地表范围内来自不同源区、温度在 500－50 ℃的气水或热水溶液逐渐冷却或与围岩相互作用过程中形成矿物的地质作用。按来源不同可将热液划分成岩浆期后热液、火山热液、变质热液和地下水热液等主要类型。按温

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

度不同将热液作用大致可分成高温、中温、低温 3 种类型。

高温热液作用的温度区间约在 500－300 ℃，其中高于 374 ℃时称气化作用，所形成的矿物组合以 W、Sn、Mo、Bi、Be、Fe 为特征：金属矿物主要有黑钨矿、锡石、辉钼矿、辉铋矿、白钨矿、磁铁矿、磁黄铁矿、毒砂等，非金属矿物主要有石英、云母、黄玉、电气石、绿柱石等。

中温热液作用的温度区间在 300－200 ℃，主要形成 Cu、Pb、Zn 的矿物组合和相应的矿床。金属矿物有黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、自然金等，非金属矿物有石英、玉髓、方解石、白云石、菱镁矿、重晶石、绢云母、绿泥石等。

低温热液作用形成于 200－50 ℃之间，主要形成以 As、Sb、Hg、Ag 为特征的矿物组合及相应的矿床：金属矿物有雄黄、雌黄、辉锑矿、辰砂、自然银等，非金属矿物有石英、玉髓、方解石、蛋白石、重晶石、高岭石、明矾石、石英、蒙脱石、伊利石、沸石、绢云母等。

6 风化作用及其矿物共生组合

风化作用（weathering）是指在地表或近地表的常温常压条件下，矿物和岩石受太阳能、大气、水及有机物的影响而发生机械破碎和化学分解，部分易溶组份（K，Na，Ca 等）形成真溶液被地表水及地下水带走，部分难溶组份（Si，Al，Fe，Mn 等）残留在原地或搬运到不远处堆积形成风化壳中新矿物和岩石的过程。

在地表风化作用下，硫化物和碳酸盐最不稳定，硅酸盐、氧化物和自然元素最稳定。因此，风化壳中残留的矿物主要有自然金、自然铂、金刚石、磁铁矿、石英、刚玉、金红石、锆石、石榴石等；新生的表生矿物主要有玉髓、蛋白石、褐铁矿、铝土矿、硬锰矿、水锰矿、高岭石、蒙脱石、孔雀石、蓝铜矿等。新生的矿物集合体常具有多孔状、皮壳状、钟乳状和土状等形态。

在硫化物矿床氧化带中，孔雀石、褐铁矿等对化学风化新生矿物的形成颇具典型意义。一般，硫化物中的黄铜矿 $CuFeS_2$ 在风化过程中首先分解为 $CuSO_4$ 和 $FeSO_4$ 溶液，当 $CuSO_4$ 与富碳酸的水溶液或碳酸盐岩发生反应，则形成孔雀石 $Cu_2[CO_3](OH)_2$；而 $FeSO_4$ 极易氧化为 $Fe_2(SO_4)_3$，后者又易水解为氢氧化铁 $Fe(OH)_3$ 胶体，其凝聚后即形成了褐铁矿 $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$。

7 沉积作用及其矿物共生组合

沉积作用（sedimentation）指地表风化产物及火山喷发物被流水、风、冰川和生物等搬运至适宜环境中沉积下来，形成新的矿物或矿物组合的地质作用。它包括机械沉积、化学沉积、胶体沉积和生物化学沉积等类型。

机械沉积（mechanical sedimentation）是指风化壳或火山喷发物中的矿物岩石碎屑被各种外营力搬运过程中，由于搬运介质的速度降低，矿物按颗粒大小、密度高低先后沉淀的作用。机械沉积常形成大量石英、长石及少量高密度稳定矿物的堆积，但一般不形成新矿物，而只构成新的矿物组合。自然金、金刚石、金红石、锡石、黑钨矿、锆石、硬玉、独居石等在机械沉积物中可富集成砂矿。

化学沉积（chemical sedimentation）是指溶解有大量化学元素的地表水或地下水溶液在运动过程中，由于水分蒸发、浓度增高、易溶盐类达到过饱和时发生的矿物结晶作用。化学沉积主要发生在内陆湖泊或封闭海湾中，形成磷酸盐、硫酸盐、硼酸盐、硝酸盐及卤化物等易溶盐类矿物，主要有石膏、芒硝、石盐、钾盐、光卤石、硼砂等。盐类矿物通常依溶解度由小到大依次晶出。

胶体沉积（colloid sedimentation）指含有大量 1～100nm 晶质或非晶质微粒的地表水或地下水（胶体溶液）在运动过程中，因电解质中和而发生的凝聚沉淀形成胶体矿物的作用。海盆地、湖泊和沼泽是主要的胶体沉积场所，常见的胶体矿物有赤铁矿、铝土矿、软锰矿、

中国地质大学（北京）岩相构造研究生

硬锰矿等氧化物和氢氧化物。

生物化学沉积（biochemical sedimentation）是指在生物新陈代谢作用下，通过复杂生物化学反应形成生物成因矿物或生物骨骼堆积形成生物矿物的作用。磷块岩中的磷灰石、部分沉积赤铁矿的形成多与生物化学作用，特别是细菌作用有关。硅藻土中的蛋白石、贝壳灰岩中的方解石则是生物遗体堆积。

8 接触变质作用及其矿物共生组合

接触变质作用（contact metamorphism）是指岩浆侵入围岩后与其发生物质或能量的交换而使接触带岩石的矿物组成和结构发生变化的地质作用。按侵入体与围岩间有无元素交换，又分为接触热变质和接触交代变质两种作用。

接触热变质作用（contact thermometamorphism）：指岩浆与围岩接触时，围岩受岩浆高温烘烤而使其原有矿物重结晶（如石灰岩变为大理岩，颗粒变粗）或生成一些与围岩成分相关的新矿物（如泥质岩中的红柱石和堇青石等富铝矿物）的作用。该作用发生在围岩部分，即外接触带。

接触交代作用（contact metasomatism）：指岩浆侵入围岩时，侵入体与围岩交换某些组分并发生化学反应而形成新矿物的地质作用。作用发生在侵入体内外接触带。常见中酸性侵入体与碳酸盐岩接触时，侵入体中富含 SiO_2、Al_2O_3 和挥发性组分的气体和溶液进入碳酸盐岩，而碳酸盐岩中部分 CaO、MgO 组分被带出而进入侵入体，发生双交代作用(dimetasomatism)，形成矽卡岩（skarn）。当碳酸盐岩富镁时，如为白云岩或白云质灰岩，形成由镁橄榄石、尖晶石、透辉石、镁铝榴石及后期热液蚀变的硅镁石、斜硅镁石、蛇纹石、金云母等组成的镁质矽卡岩；当围岩为富钙的灰岩时，则出现由钙铝榴石、钙铁榴石、透辉石、钙铁辉石、硅灰石、方柱石、符山石及后期热液蚀变的透闪石、阳起石、绿帘石、绿泥石等组成的钙质矽卡岩。接触交代作用可形成磁铁矿、黄铜矿、白钨矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿等矿物的富集，构成相应的矽卡岩矿床。矽卡岩形成温度一般在 600－400 ℃，深度一般不超过地下 4.5 km。

9 区域变质作用及其矿物共生组合

区域变质作用（regional metamorphism）指伴随区域构造变动而出现的高温、高压及以 H_2O、CO_2 为主要活动组分的流体使原有岩石的结构构造和矿物组成发生大规模变化改组的作用。

区域变质作用的温度和压力变化范围很大。按温压条件的不同可分为高、中、低 3 级区域变质作用。变质矿物的种属由原岩化学成分及变质程度所决定。低级区域变质主要形成白云母、绿帘石、绿泥石、阳起石、蛇纹石、滑石、黑云母等含（OH）$^-$的硅酸盐矿物；中级区域变质主要形成角闪石、斜长石、石英、石榴石、透辉石、云母、绿帘石等；高级区域变质主要形成高温高压下稳定的不含（OH）$^-$的矿物，如正长石、斜长石、辉石、橄榄石、石榴石、刚玉、尖晶石、矽线石、堇青石等。

区域进变质（温压升高）过程中，形成的矿物有向不含（OH）$^-$、体积小、密度大的方向转化。在定向压力下，柱状、片状矿物趋于定向排列，形成片理和片麻理构造。

第三节 矿物的演化

1 矿物世代的概念

在一定空间中，如果同一种矿物先后多次形成，它们的先后关系称为矿物的世代（generation）。

矿物的世代通常与一定的矿物演化阶段相适应。例如，在热液硫化物矿床的形成过程

中国地质大学（北京）矿物岩石教研室

中，通常经历早期的黄铁矿石英阶段，中期的石英多金属硫化物阶段和晚期的石英碳酸盐阶段。不同成矿阶段所形成的同种矿物石英便分属不同的世代，按形成时间的先后而依次将早期的石英称为第一世代、中期的石英称为第二世代，晚期的石英称为第三世代。

2 矿物形成顺序的判别

一定地质体中的各种矿物可以是同时形成的，也可以在不同时间段形成，这种矿物形成时间上的先后关系，称为**矿物的形成顺序**(paragenetic sequence of minerals)。矿物的形成顺序取决于结晶温度、熔体或溶液中各组分的相对浓度等多种复杂因素，通常可依照下述标志确定：

⑴空间关系：若某一矿物以另一矿物为基底生长，则前者生成较晚，后者较早；具对称带状构造的岩脉、矿脉或晶洞中，脉壁或外带矿物生成在先，而中心或内带矿物生成在后（图24-3）。

⑵自形程度：当有不同矿物接触时，一般早结晶的矿物因生成时有充分的自由空间而形成自形晶，较晚结晶的呈半自形晶，最后结晶的矿物因只能填充空隙生长而呈他形晶（图24-4）。

⑶交代关系：若一种矿物被另一种矿物沿裂隙或边缘交代（**交代作用** metasomatism 是指矿物与熔体、气液或溶液相互作用而发生组分上的交换，使原矿物转变为其他矿物的作用），则被交代的矿物生成在先（图 24-5）。

⑷接触关系：一种矿物穿过或充填另一种矿物时，则被穿过或被充填的矿物形成较早（图24-6）；一种矿物包围另一种矿物时，则被包围的矿物形成较早（图 24-7）。

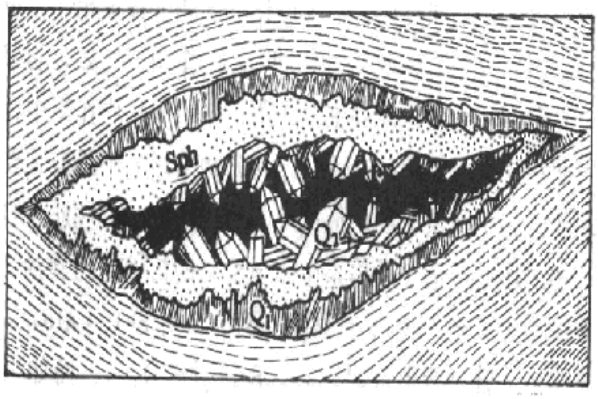
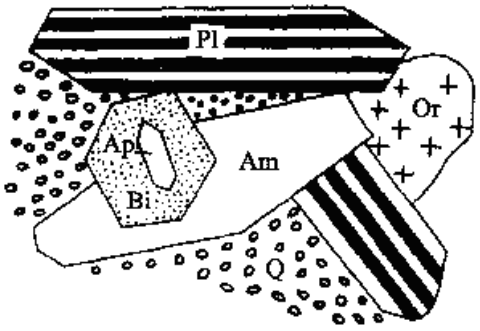


图 23-3. 晶洞中矿物生成顺序（引自赵珊茸，2004）
洞壁石英（Q1）生成最早，闪锌矿（Sph）次之，中心石英（Q2）最晚形成



中国地质大学矿物教研室

图 23-4. 自形程度不同的矿物晶体生成顺序关系：磷灰石（Ap）→黑云母（Bi）→角闪石（Am）→斜长石（Pl）→正长石（Or）→石英（Q）

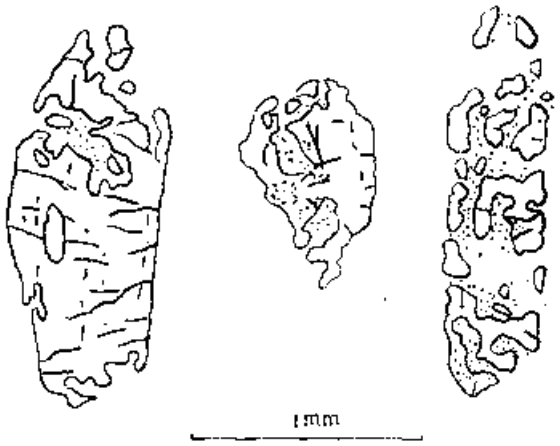


图 23-5. 早形成的榍石因后期溶蚀交代而成残核状



图 23-6. 矿物生成顺序的穿插关系：脉状矿物形成晚。

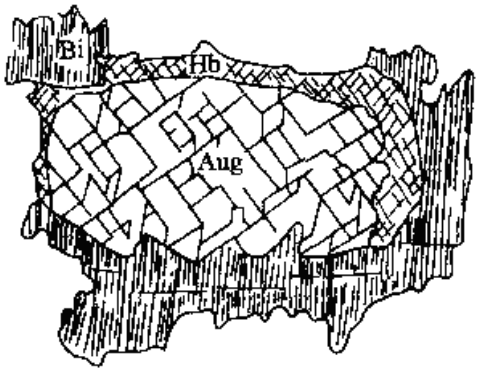


图 23-7. 早期形成的普通辉石（Aug）被晚期普通角闪石（Hb）和黑云母（Bi）所包围（潘兆橹等，1993）

3 矿物的变化

矿物形成后遭受各种自然作用，若在物理化学条件方面的改变超过其稳定范围，矿物将在形态、粒度、成分、结构等方面发生变化，变化强烈时可形成新矿物。

3.1 化学成分变化。是最常见的矿物变化，以热液蚀变和化学风化中的交代作用为主要形式，也包括脱水和水化。

中国地质大学（北京）矿物教研室

如：

热液作用中，岩浆成因橄榄石受热液交代转变为蛇纹石，其反应式为：

$$3Mg_2[SiO_4] + 4H_2O + SiO_2 \rightarrow Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$$

含水矿物因失去结晶水而变成另一种矿物的作用称为**脱水作用**（dehydration）。如芒硝在干燥空气中失去水分而转变为无水芒硝，其反应式为：

$$Na_2[SO_4]\cdot 10H_2O \rightarrow Na_2[SO_4] + 10H_2O$$

无水矿物因水的加入而变为含结晶水矿物的作用称为**水化作用(**hydration**)**。如硬石膏在近地表，由于外部压力下降，并受地表水作用而转变为石膏，其反应式为：

$$Ca[SO_4] + 2H_2O \rightarrow Ca[SO_4]\cdot 2H_2O$$

3.2 晶体结构变化。包括同质多象转变和晶化及非晶化。

3.2.1 同质多象转变。如火山岩中的高温 β-石英经过一段时间会变成低温稳定的变体 α-石英。

3.2.2 非晶化与晶化。含放射性元素铀或钍的矿物由于受到放射性蜕变能量的影响，结构由晶质向非晶质转变（如含放射性元素的锆石 $Zr[SiO_4]$变为非晶质的水锆石），这种作用称为**非晶化作用**（non-crystallization）或**蜕晶作用**(metamictization)。这些变生非晶质的准矿物习惯上称为**变生矿物**（metamict mineral）。与此相反，一些非晶质准矿物在漫长的地质历史中，会逐渐变为结晶质，这种作用称为**晶化**（crystallzation）或**脱玻化**(devitrification)。

3.3 晶体形态、粒度等变化。矿物形成后，受后来温度、压力、溶液或熔浆的作用，可发生次生长大而由细变粗，发生韧性变形而呈眼球状、拉丝状或细晶化，发生溶蚀而变圆滑形成凸晶或出现蚀象。

第四节 矿物标型

“矿物标型”是指能够反映一定形成条件的矿物学现象，它包括矿物标型组合、矿物标型种属和矿物标型特征等 3 个方面的内容。

1．矿物标型组合

矿物标型组合（typomorphic mineral assemblage）是指在特定的自然环境中形成的专属性矿物组合，它的出现，能够作为判定某一特定形成条件的标志。

例如，矽卡岩建造的组合可出现的标志高温形成条件的各种辉石、石榴石、符山石和大部分金属矿物，而萤石、石英、绿泥石、方解石、黄铁矿、黄铜矿等又是在较高温、中温和较低温条件下都能出现的矿物，同时出现透辉石、石榴石、符山石等富钙为特征的矿物。

2．矿物标型种属

矿物标型种属（typomorphic mineral species）是指在特定的自然环境中形成的矿物种，它的出现，能够作为判定某一特定形成条件的标志，也称为标型矿物。

标型矿物具有单成因性。例如，白榴石只产于碱性火山岩和次火山岩中，标示碱性岩浆的高温浅成结晶条件；十字石只产于变质岩中，标示中级变质环境。

3 矿物标型特征

矿物标型特征（typomorphic mineral characteristics）是指在不同地质时期和不同地质作用条件下，形成于不同地质体中的同一种矿物在各种属性上所表现的差异，这些差异能够作为判断其形成条件的标志。例如，锆石在侵入岩、火山岩、沉积岩、变质岩及热液脉中均有分布，随着生成条件的不同，它在晶形、颜色、微量元素含量等方面表现出明显的差异。所以，矿物的标型特征可以包括形态标型、成分标型、结构标型、物性标型、谱学标型等多种

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

标型。

3.1 形态标型

矿物形态的基本样式取决于其结构特征，在基本样式制约下的变化却是形成条件的反映，由此决定了矿物形态的标型性。

黄铁矿是绝大多数热液矿床中都出现的矿物，其形态特征能够给出矿床成因和成矿远景方面的重要信息。在金矿床中，粗大自形晶黄铁矿含金性差；细小他形碎裂黄铁矿含金性好。在低过饱和度、低硫逸度和较高温（约高于 300℃）或较低温（约低于 200℃）条件下，黄铁矿主要呈立方体{100}或八面体{111}习性，含金性差；在高过饱和度、高硫逸度和中温（200～300℃）条件下，黄铁矿呈五角十二面体{hk0}习性，常见各种聚形，含金性好。

许多矿物的形态都与形成条件有关，如方解石随形成温度由高至低，从板状经短柱状至长柱状；辰砂随深度的增加，其晶形由板状经菱面体状变为柱状；刚玉在贫 Si 岩石（如正长岩、斜长岩）中呈长柱状或近三向等长，而产于 Si 较高的岩石（如花岗片麻岩）中时呈板状。

3.2 成分标型

矿物的化学成分能够敏感地反映形成条件的微小变化，信息最最大，具有极为重要的标型意义。

例如，黄铜矿 $CuFeS_2$ 的主要元素量比与形成温度有关。当形成温度高于 200 ℃时，硫的含量就不足，即（Cu+Fe)∶S>1；形成温度越高，硫的含量越不足；当形成温度低于 200 ℃时，黄铜矿的成分与理想化学式一致，即（Cu+Fe）∶S=1。

不同类型岩浆岩中黑云母的 Mg、Fe 含量变化具有标型特点：产于超基性岩中的黑云母最富 Mg 而贫 Fe，基性岩次之，中性岩中 Mg、Fe 含量相近，而在酸性岩中却富 Fe 贫 Mg，尤其是在花岗伟晶岩中最富 Fe 贫 Mg。

中酸性火山热液金矿床中的自然金常与银、硒、碲构成类质同象系列，有时形成碲金矿和碲银矿等标型矿物。浅成金矿自然金中铅、锌和锑的含量较高，且常含硒、锰和锡。

黄铁矿中 S、Fe、As、Sb、Se、Te、Co、Ni 等元素含量及有关比值是矿床成因和深部远景判别的重要标志。岩浆热液型矿床中的黄铁矿 Co/Ni>1，岩浆型或沉积型硫化物矿床 Co/Ni<1。通常，变质热液型金矿床黄铁矿 Au/Ag＞0.5，最高可达 5.7；火山热液型金矿床黄铁矿 Au/Ag＜0.5；沉积—变质热卤水成因金矿床黄铁矿的 Au/Ag 值最低，为 0.1～0.3。由浅部至深部，黄铁矿中 As、Sb、Bi、Se、Te 的平均含量呈降低趋势。层控矿床中黄铁矿的 S/Se 比值变化于 17.6×10^4～33.4×10^4 之间；同生沉积型黄铁矿的 S/Se＞3×10^4；沉积－改造矿床中黄铁矿的 S/Se 比值在 0.19×10^4－0.8×10^4 之间；火山热液型黄铁矿 S/Se 比值一般小于 1×10^4；热液成因黄铁矿的 S/Se 比值一般在 1×10^4－2.8×10^4 之间。

3.3 结构标型

矿物的结构标型主要反映在晶胞参数、离子配置、多型、有序度和键长等方面。

许多矿物的晶胞参数都能提供重要的成因和找矿信息。金伯利岩中与金刚石共生的镁铝榴石，由于成分中富含 Cr，其晶胞参数 a_0 远比产于“非金伯利岩”中的镁铝榴石要大。

多型性是层状矿物的重要标型。例如，黑云母以 1M、$2M_1$ 和 3T 多型最多，产于侵入岩中为 $2M_1$ 和 1M 型，喷出岩中以 1M 型为主，沉积岩中主要为 1M 和 $1M_d$ 型，接触变质成因者主要为 $2M_1$ 型，区域变质成因者主要为 1M 和 3T 型，交代成因者为 $2M_1$ 和 1M 型，伟晶岩中各种多型几乎全有。更有意义的是，在热液矿床的蚀变围岩中，层状矿物的多型会随距离矿体的远近而规律变化，为找矿方向的确定提供依据。

有序度是温度和冷却速度及时间的函数。高温或迅速结晶和年龄小的矿物有序度低，低温或缓慢结晶和年龄老的矿物有序度高。

中国地质大学（北京）岩矿物教研室

3.4 物理性质标型

矿物物理性质如颜色、硬度、密度、磁性、电性、发光性等均可有一定的标型性，它们本质上都是矿物化学成分和晶体结构标型的不同表现形式。

颜色是最直观的物理性质标型。在变质岩中，普通角闪石长轴方向的颜色在薄片中随结晶温度增高由蓝绿色、绿色变为褐色；黑云母随变质温度增高也由绿色变为棕褐色。

黄铁矿热电性是判别金矿化贫富和矿体剥蚀程度的重要标志，例如，在金矿床中，一般富矿段和矿体上部黄铁矿热电系数 α 为高正值，贫矿段及下部多为负值。

石英的吸光度（红外光谱参数）与石英中铝碱金属量呈负相关。

上述各种矿物标型特征，多数是定性的，有的也可半定量或定量估测形成时的温度压力等物理化学条件。所谓的地质温度计和地质压力计，就是利用矿物或矿物组合的标型特征（主要是成分标型）来计算温度或压力条件。

思考题及习题

1. 简述地球矿物的空间分布规律。
2. 地球矿物的绝大多数分布于地壳，其中以哪类矿物为主？
3. 残留风化壳分布有哪些矿物？
4. 简述矿物形成的主要地质作用及影响因素。
5. 岩浆作用与火山作用有什么关系？火山熔岩中的矿物粒径远比深成岩中的矿物细小，原因何在？
6. 解释矿物组合、矿物共生组合和伴生组合的概念。
7. 如何判别矿物的共生组合？
8. 简述高温、中温和低温热液矿床的温度区间和主要矿物组合。
9. 风化作用只破坏矿物而不形成矿物，这种看法对吗？试举例说明。
10. 何谓矿物的世代？
11. 在一块手标本上有孔雀石和蓝铜矿，还有黄铜矿，它们之间的共生、伴生关系如何？
12. 何谓矿物标型？矿物主要有哪些方面的标型特征？这些标型特征间有无内在联系？试以正文中提到的一种矿物为例说明之。
13. 举例说明假象和副象及其意义。

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室