

碎屑岩的成岩后生作用

Postsedimentary process of clastic sediments

碎屑岩的成岩后生作用是指碎屑岩沉积后转变为沉积岩直至变质作用以前或因构造运动重新抬升到地表遭受风化以前所发生的一切作用。

其所经历的整个地质时期称**成岩后生作用**；它又可进一步细分出若干个亚时期或亚阶段。

成岩后生作用时期，碎屑岩所处的物理化学环境中**诸因素**（如温度、压力、细菌、有机质的转化、孔隙水介质的pH值和Eh值、孔隙水的运动等）**都将不断地和渐进地发生变化**。

碎屑岩的成岩后生作用在其形成演化旋回中占有特别重要的位置，它可以不断地改变其内部的成分和结构，甚至可以面目全非。

碎屑岩的成岩作用极大地影响到岩石的孔隙度和渗透率，对碎屑岩油气藏的形成和开发有密切的关系。

近二十年来国内外油气勘探实践证明，一些大油气田储集层物性较好的原因之一就是沉积期后发育了次生孔隙。

碎屑岩的成岩后生作用主要有：

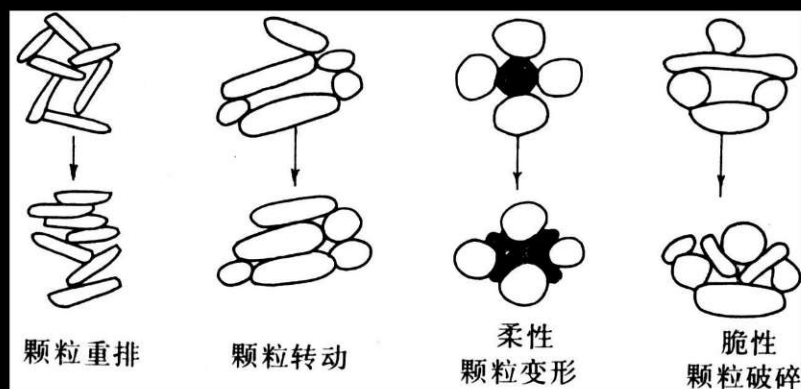
压实和压溶作用、
胶结作用、
交代作用、
重结晶作用、
溶解作用、
矿物多形转变作用

第一节 压实和压溶作用

compaction and pressure dissolution

一、压实作用 (compaction)

压实作用系指沉积物沉积后在其上覆水层或沉积层的重荷下，或在构造形变应力的作用下，发生水分排出、孔隙度降低、体积缩小的作用。



在沉积物内部可以发生颗粒的滑动、转动、位移、变形、破裂，进而导致颗粒的重新排列和某些结构构造的改变。

压实作用最明显的变化是沉积物体积缩小和发生排水、脱水作用。

如，石英砂岩的原始孔隙度为40%左右，在3000m深处其孔隙度降至30~10%。

碎屑岩在300m深处时，75%以上的水已被排出。

所排出的水是孔隙流体的主要来源之一。

碎屑岩的成岩后生作用后绝大部分变化都是在流体中发生的。

颗粒的形状、圆度、粗糙度、分选性等对压实作用的效应都有影响。

颗粒的圆度越高，分选性越好，原始沉积物堆积越紧密。

等大球形堆积的砂级颗粒随机堆积的孔隙度为**37%**，而圆度和分选较差的砂级颗粒堆积的孔隙度可高达**50%**左右。

天然砂中常有各种形态的颗粒，杂基含量亦不同，原始孔隙度可以变化较大，它们的机械压实效应也可出现较大的差别。

砂岩填积组构的均一性除决定于搬运介质的性质外，也决定于颗粒的形态和分选性。

沉积物填积组构随方向不同而有不同的性质，主要是孔隙性和渗透性，称为“**异向性**”。

一般情况下，随着颗粒的圆度变差，扁度增加，沉积物填积组构的异向性也增加。

大多数天然砂沉积物都表现出不同程度的异向性，以**条板状颗粒**为主的填积组构具有**三向异向性**；**片状矿物**为主的填积组构则表现为垂向和横向的**两向异向性**。

随方向不同，沉积层的孔隙度、渗透率及强度也不同。

如，在取自澳大利亚某地的土壤样品中，垂直地面的 $\Phi=0.550$ ；而平行于地面S—N方向样品的 $\Phi=0.565$ ；平行于地面E—W方向样品的 $\Phi=0.585$ 。

在海滩岩中，垂直海滩表面方向样品的强度切变模量为 $5.54 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$ ；平行于海岸线的 $4.10 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$ ；与海岸相交 30° 的水平方向为 $3.93 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$ ；与海岸成 60° 相交的水平方向为 $3.84 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$ 。

质点的粗糙度对沉积物的最终压实程度不起重要作用，但对压实作用的进程有一定的影响。

如，粗糙颗粒具有较大的摩擦力，会影响到压实作用的进展。

粗糙颗粒的表面相互连结也比圆滑颗粒的连接力强，将影响到被压实物质的强度。

砾岩的压实效应较砂岩弱。

砾岩的比体积较砂岩大，除某些碎屑流类型的砾岩由杂基支撑外，大多数砾岩中的砾石是颗粒支撑。

在压实作用过程中相应地发生一定程度的转动，以至扭曲变形或破裂。

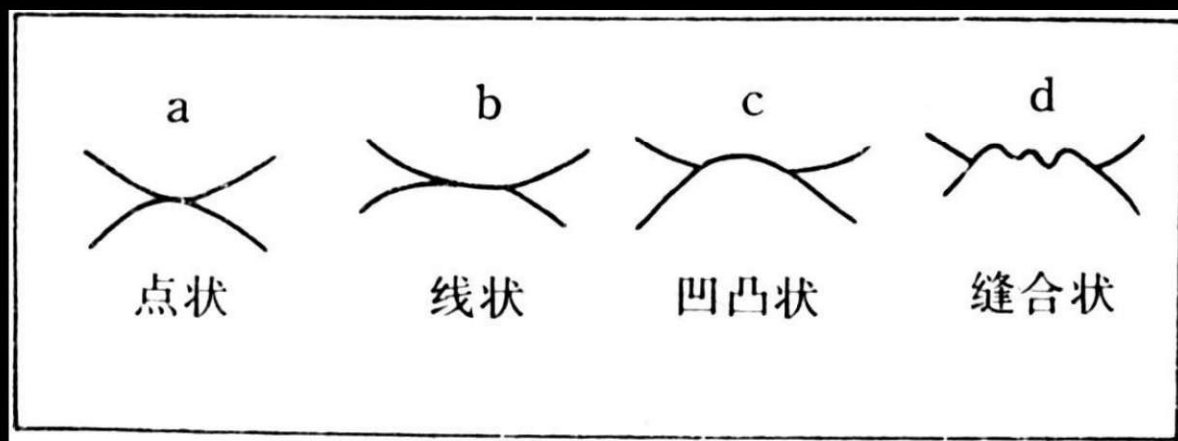
二、压溶作用（pressure dissolution）

压溶作用是物理—化学成岩作用。

沉积物随埋藏深度的增加，碎屑颗粒接触点上所承受的来自上覆层的压力或来自构造作用的侧向应力超过正常孔隙流体压力时（达2~2.5倍），颗粒接触处的溶解度增高，将发生**晶格变形**和**溶解作用**。

此时，砂质沉积物进入了化学压实或压溶作用的阶段。

随着颗粒所受应力的不断增加和地质时间的推移，颗粒受压溶处的形态将由点接触演化到线接触、凹凸接触和缝合状接触。



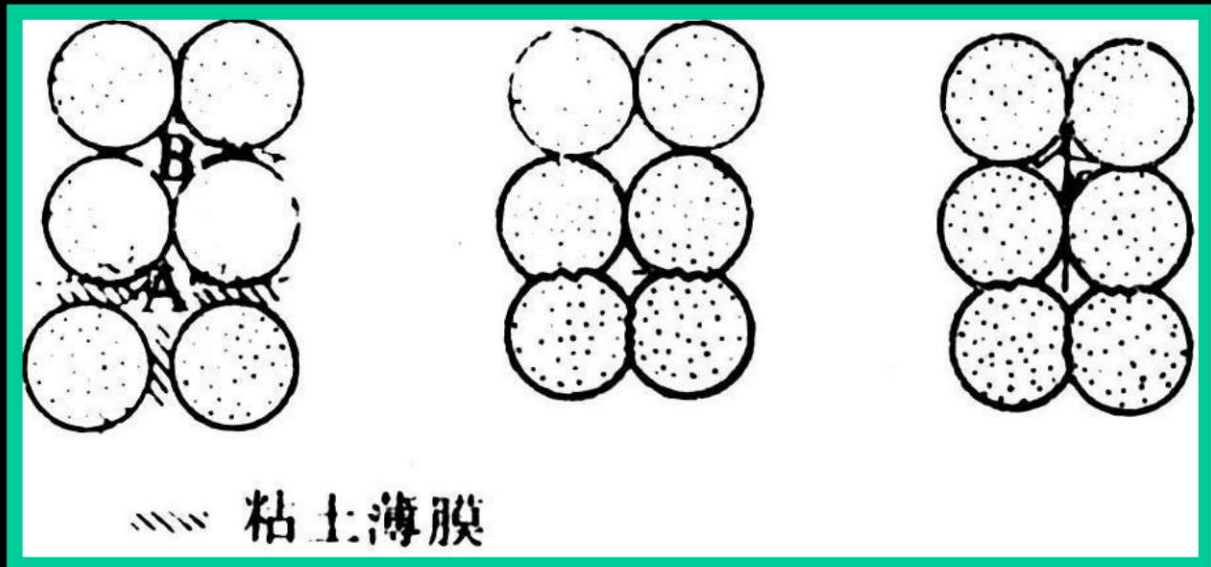
从切线接触至缝合接触，代表孔隙度逐渐降低和埋藏深度逐渐增加的过程。

石英大约在500~1000m深处发生压溶和次生加大生长现象。

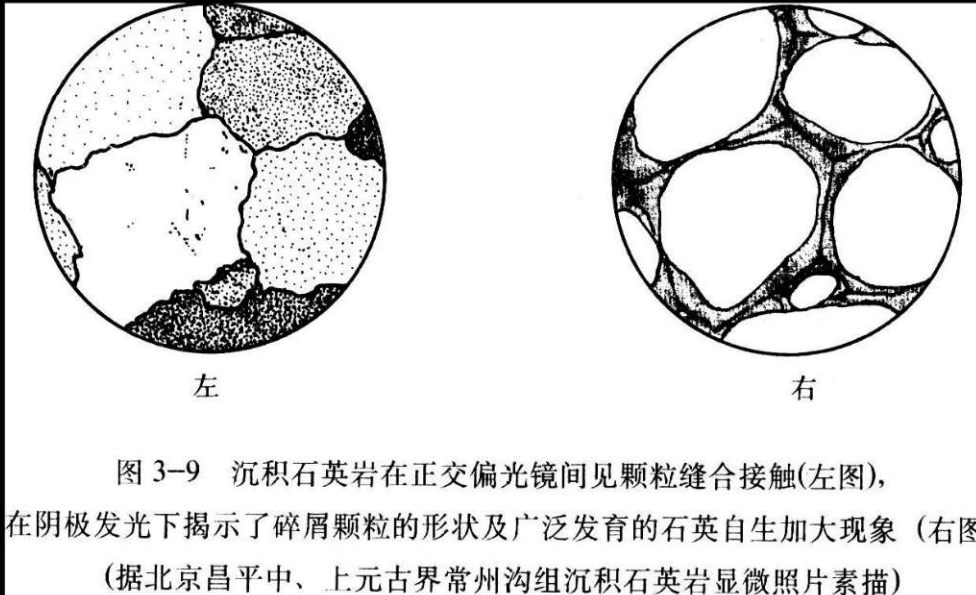
据此推测，压溶作用是500~1000m以下深埋藏成岩作用的特征，其强度随埋深的增加而增加。

一般认为，压溶作用的最大深度值为6000m，在此以下则属变质作用范围了。

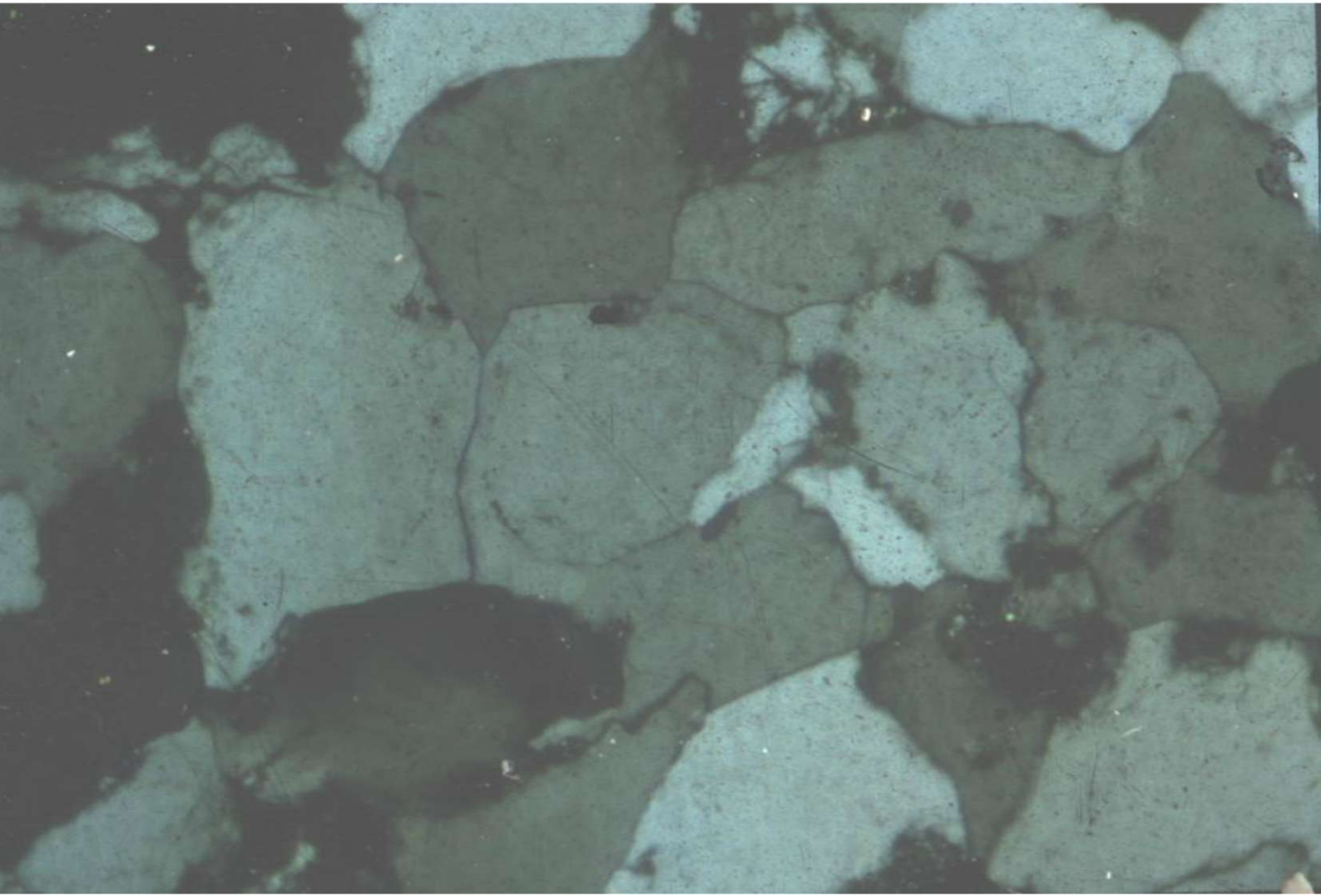
在石英颗粒表面存在的水膜，尤其是在颗粒之间存在的粘膜，能促进石英颗粒接触处优先溶解和溶解物质的扩散。



不过石英颗粒的缝合状接触不都是由压溶作用造成的，它也可以是相邻的石英颗粒次生加大、胶结物相对干扰造成的结果。



Sc1.17a 石英次生加大 (+) 10×10



三、差异压实作用

(Differential compaction)

自然界中常有一些内部结构不均一的沉积层或粒度不一致的薄沉积层，由于原始组分对压力的敏感程度不同，在压实过程中发生差异流动，使原始沉积构造遭到破坏，并形成一些新的构造特征，常见的如瘤状构造、扁豆状构造。

第二节 胶结作用

Cementation

一、概述

胶结作用是指从孔隙溶液中沉淀出矿物质（胶结物），将松散的沉积物固结起来的作用。

胶结作用是沉积物转变成沉积岩的重要作用，也是使沉积层中孔隙度和渗透率降低的主要原因之一。

胶结作用主要发生在成岩作用时期，尤其是成岩作用晚期，也可发生于表生期。

后来的胶结物还可以取代早生的胶结物，也可以发生胶结物的溶解即去胶结作用，形成次生孔隙。

胶结物的生长方式多种多样。

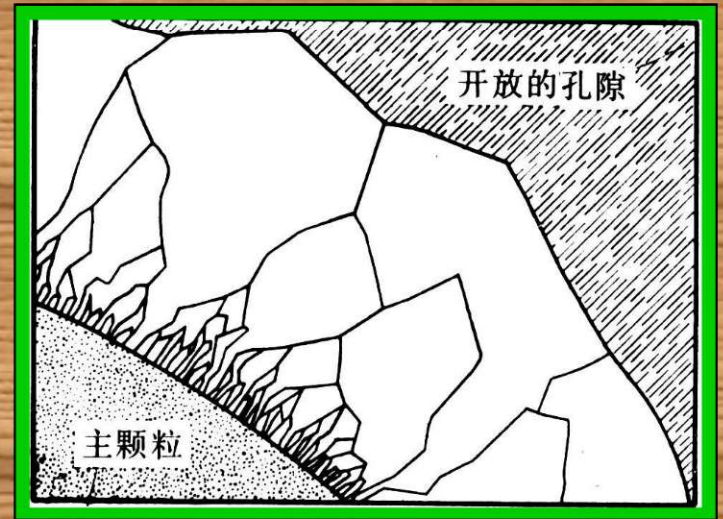
它可以在**同成分的底质上形成次生加大**，如氧化硅在碎屑石英颗粒上形成次生加大；此外如长石、方解石、白云石、锆石、电气石、石榴子石等都可以产生次生加大现象。

胶结物也可以在**不同的底质上沉淀**，如碎屑颗粒边缘的粘土衬边胶结、碳酸盐晶粒的粒间胶结以及石膏、沸石类矿物的粒间胶结等。

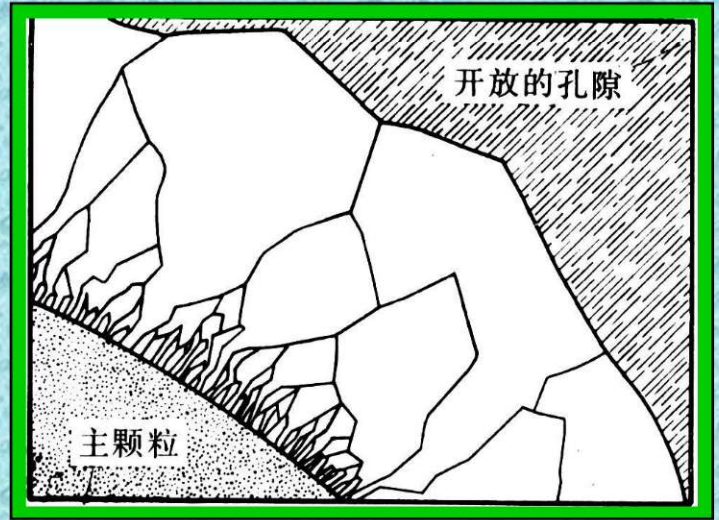
胶结物结晶的大小与晶体生长速度以及底质的性质有关。

一般来说，小晶体生长速度快，大晶体生长速度慢。

孔隙胶结物的结构特征是紧靠底质处的晶体小而数量多，具有长轴垂直底质表面的优选方位；远离底质向孔隙中心，晶体大，数量少。



如果有两种以上的胶结物，靠近底质的形成早，在孔隙中心的形成晚，依次可形成若干个世代的胶结物。



通过孔隙溶液沉淀出的胶结物的种类很多，但就数量而言，主要的胶结物有**氧化硅**和**碳酸盐**两类。

其它较常见的胶结物有氧化铁、石膏和硬石膏、重晶石、磷灰石、萤石、沸石、黄铁矿、白铁矿等。

此外，**粘土矿物**也是碎屑岩中最常见的一类胶结物，但情况较复杂。

二、分述

1、粘土矿物胶结物

碎屑岩中的粘土矿物**大部分**是以陆源碎屑物的形式随碎屑颗粒一道搬运并沉积的。

一部分是在搬运介质中或者在沉积环境中由胶体溶液的凝聚作用与碎屑物同时沉积下来。

在成岩过程中由于孔隙水的运动，在局部孔隙中，还充填着**一些**渗流泥。

这些粘土矿物并非真正的胶结物，但它们在砂岩的石化作用中却占有重要的地位，能将碎屑颗粒紧密地粘结在一起，因此这是一类**特殊的“胶结物”**。实际上应属于**杂基**的范畴。

另外有一部分粘土矿物，它们是在成岩过程中由层内的火山物质或铝硅酸盐矿物等，在孔隙水的作用下，在原地转变为另一种粘土矿物，或者由孔隙水带到附近孔隙内析出成**新的自生粘土矿物**。这部分粘土矿物是**真正的胶结物**。但数量上远比前者要少。

①高岭石

在薄片下较容易辨认，一般是假六边形晶片，集合体呈书页状或蠕虫状，以孔隙充填或交代其他矿物或以其他自生矿物的包体产出。晶形发育良好的自形高岭石，在一些分选较好和粒度较粗的长石石英砂岩、长石砂岩中常见。

①高岭石

自生高岭石除在有足够的 SiO_2 和 Al^{3+} 的循环孔隙水中析出外，可由其他粘土矿物转变而来，亦可是砂岩内部火山玻璃及长石蚀变的产物，其中尤以长石的蚀变产物更为常见和具有重要意义。

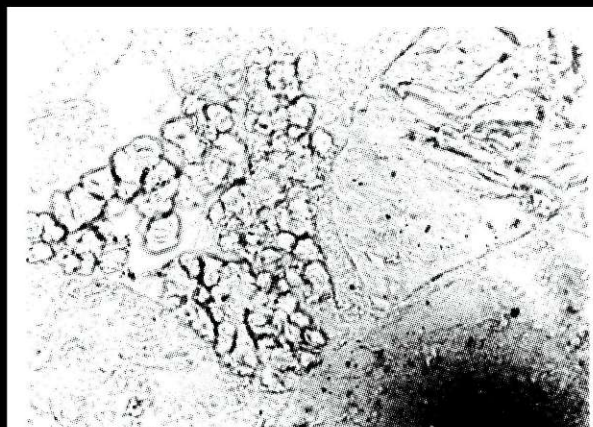
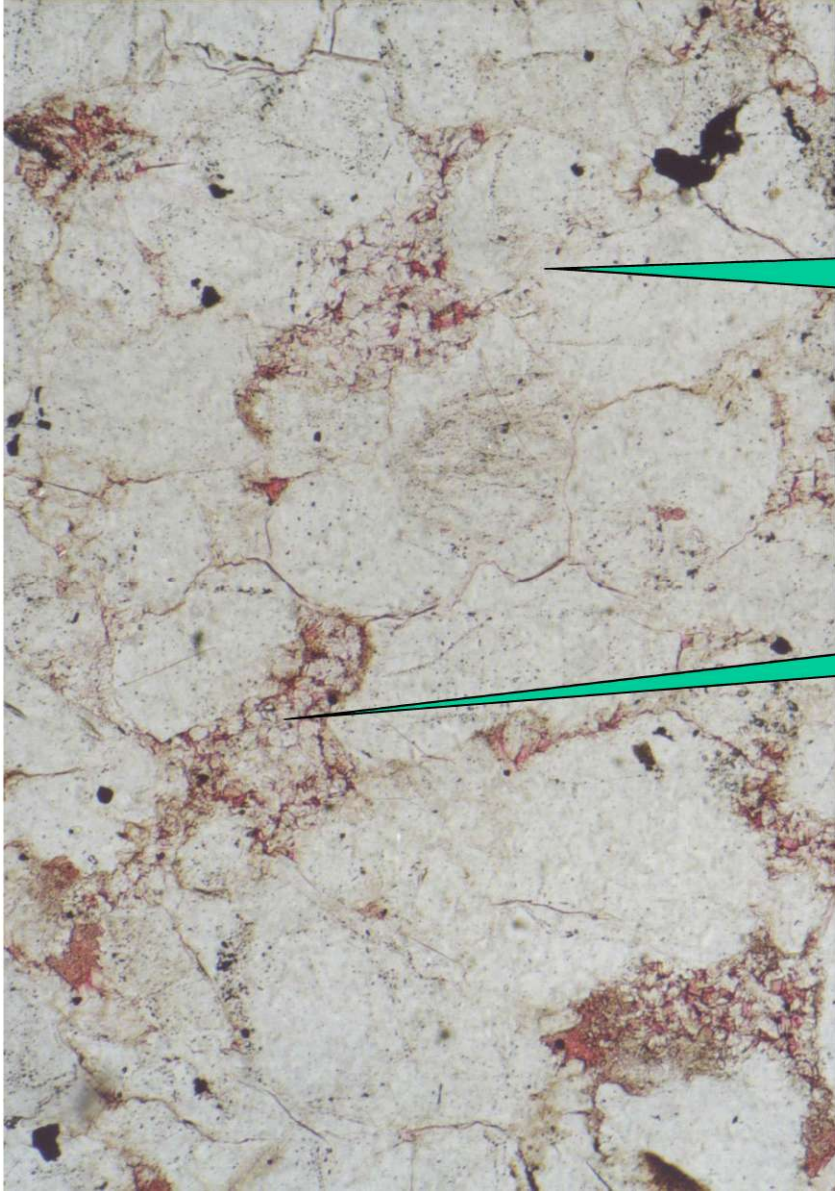


图9-7 岩屑长石质粉—细砂岩，粒间高岭石充填
(二连盆地，阿36井，腾格尔组，单，90×)



广泛的硅质胶结物沉淀导致岩石致密化

同时有高岭石沉淀

图版1 广泛的石英次生加大，伴有高岭石沉淀，高岭石的沉淀作用发生在石英次加大之后，或与石英次生加大同时发生（有自生石英包裹高岭石的现象）。榆28井，2424.53m，山2-3，单偏光，×80。

②伊利石

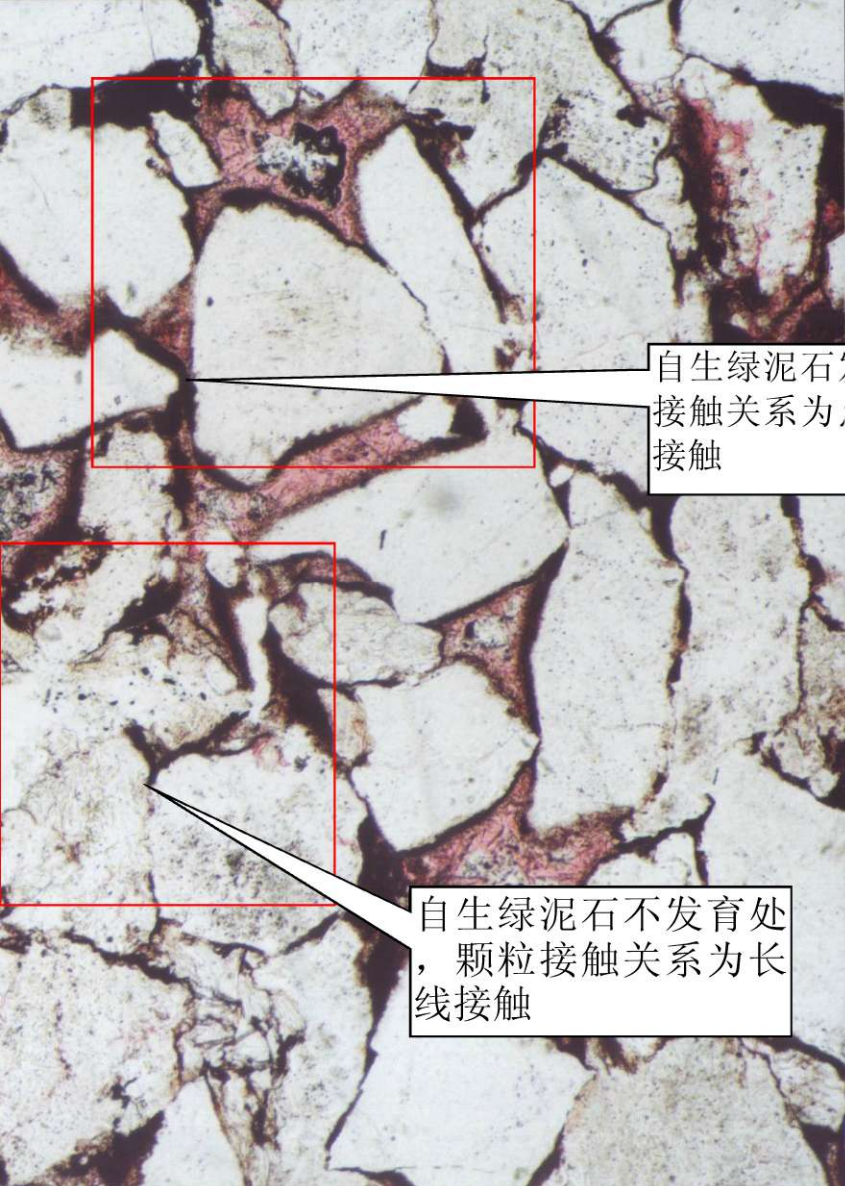
在薄片 中，**鳞片细而薄**，最高干涉色可达一级顶部，因此较高岭石和绿泥石更易发现，呈**不规则的小晶片**产出，其集合体通常呈**颗粒包膜**或**孔隙衬边**形式出现，有时呈网状分布于孔隙中。



③绿泥石

在自生粘土矿物中，绿泥石的形态最多，有板状、蔷薇花状、卷心菜状等，在砂岩中多呈**颗粒包膜**或**孔隙衬边**形式产出。





自生绿泥石发育处，颗粒接触关系为点接触或短线接触

自生绿泥石不发育处，颗粒接触关系为长线接触

图版2
以孔隙衬里方式产出的绿泥石。
陕248井，
2793.25m，石千峰，单偏光，
×80。

④蒙脱石

通常呈极细的鳞片状集合体或呈絮状，显微镜下几乎无法识别。

在扫描电镜下成砂粒表面的**皱纹状薄膜**和**蜂窝状的薄膜**。晶片多呈弯曲状且不易分辨出单个晶片。

⑤伊蒙混层粘土矿物

形态介于伊利石和蒙脱石之间。如混层晶格中富伊利石层，其形态近似于伊利石，呈不规则晶片状。

如富含蒙脱石层，则呈类似于蒙脱石的皱纹状。

2、氧化硅胶结物

(1) 氧化硅胶结物的类型

氧化硅胶结物

非晶质：蛋白石

晶质：方英石、玉髓、石英

蛋白石胶结物主要出现在距地表较近的火
山碎屑岩中，充填或部分地充填碎屑，也可以
交代第三纪以后的砂岩中的方解石介壳。

方英石在火山岩屑砂岩中，组成碎屑颗粒
的纤维环边；在蛋白石胶结物和蛋白石质颗粒
中呈现半纤维状雏晶出现。

玉髓实质上是隐晶石英，呈纤维状、球粒
状或半球状或微晶。

石英是碎屑岩中最常见的硅质胶结物，它可以呈微、细粒状充填于孔隙中，但更常见的是以碎屑石英自生加大边胶结物出现。

根据热力学原理，微、细粒石英比面积较单晶石英大，总自由能亦大于单晶石英，因而 SiO_2 沉淀成**石英的自生加大边**较这在孔隙中重新成核生长**更有利也更稳定**。

一般来讲，非晶质蛋白石胶结物埋藏深度较浅的碎屑岩中，在古近纪前古老的砂岩中很难见到。

而结晶质的玉髓和石英却在地质时代较老、埋深较大的碎屑岩中存在。

在井深较大的岩心中，一般只能见到石英，连玉髓亦很难见到。

(2) 氧化硅胶结物的来源

① 来源于地表水和地下水

② 来源于硅质生物骨壳的溶解

③ 来源于碎屑石英压溶作用

④ 来源于粘土矿物的成岩转化

⑤ 来源于硅酸盐矿物的不一致溶解

⑥ 来源于火山玻璃去玻化和蚀变

⑦ 来源于海底火山喷发

3、碳酸盐胶结物

(1) 碳酸盐胶结物的类型

碳酸盐胶结物包括方解石、文石、白云石、菱铁矿、菱镁矿等。

其中分布最广和最常见的是方解石。

碳酸盐胶结物可以呈晶粒状、斑块状、衬边状产出，呈不协合胶结物；

也可呈自生加大环边出现，呈协合胶结物；

亦可作为砂屑颗粒的次生孔隙充填物或呈结核状、薄纹层状产出。

碎屑岩的颗粒或岩石的微裂缝为碳酸盐矿物特别是方解石充填胶结的现象也是常见的。

(2) 碳酸盐胶结物的来源

① 海水和流动的孔隙水能持续地带入溶解的碳酸盐，为碳酸盐胶结物的主要来源

② 孔隙水溶解碎屑岩中的介壳和碳酸盐颗粒，溶解的物质又作为成岩期的胶结物沉淀下来

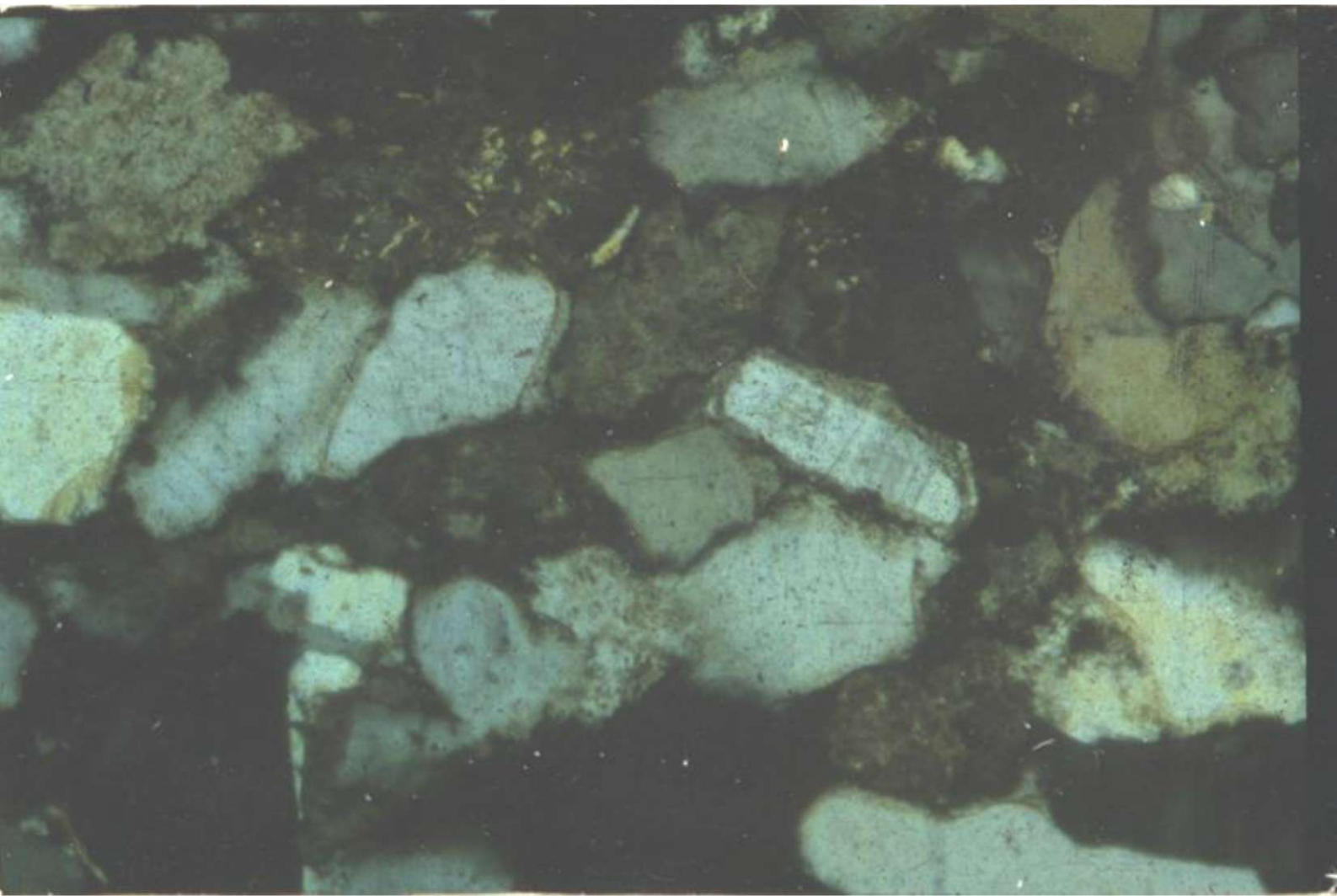
③ 砂岩中碳酸盐颗粒的压溶，也可以为砂岩层上下碳酸盐岩地层的压溶提供大量的碳酸盐胶结物

4、长石胶结物

自生长石是碎屑岩和石灰岩中常见的一种自生矿物。

在碎屑岩中，它可以呈碎屑长石的自生加大边，也可以在基质中呈小的自形晶体产出。

Sc3.6 长石加大边 (+) 10×10



5、沸石胶结物

碎屑岩中常见的沸石类胶结物有方沸石、片沸石、浊沸石及斜沸石等。呈晶粒状、板状、纤维状、针状及束状产出。

6、硫酸盐胶结物

碎屑岩中常见的硫酸盐胶结物是石膏和硬石膏，此外还有重晶石和天青石。

石膏和硬石膏常呈连晶状充填于孔隙中，也可交代其它矿物产出，可形成于沉积期及成岩作用的各个阶段。

形成于沉积期和早成岩期的往往与强蒸发作用有关，晚成岩期往往与早期石膏的溶解和再沉淀作用有关。地层水与沉积物相互反应或不同地层水的混合也可析出石膏与硬石膏。

第三节 交代作用

Replacement

交代作用是指一种矿物代替另一种矿物的现象。

交代作用可以发生于成岩作用的各个阶段乃至表生期。

交代矿物可以交代颗粒的边缘，将颗粒溶蚀成锯齿状或鸡冠状有不规则边缘，也可以完全交代碎屑颗粒，从而成为它的假像。后来的胶结物还可以交代早成的胶结物。

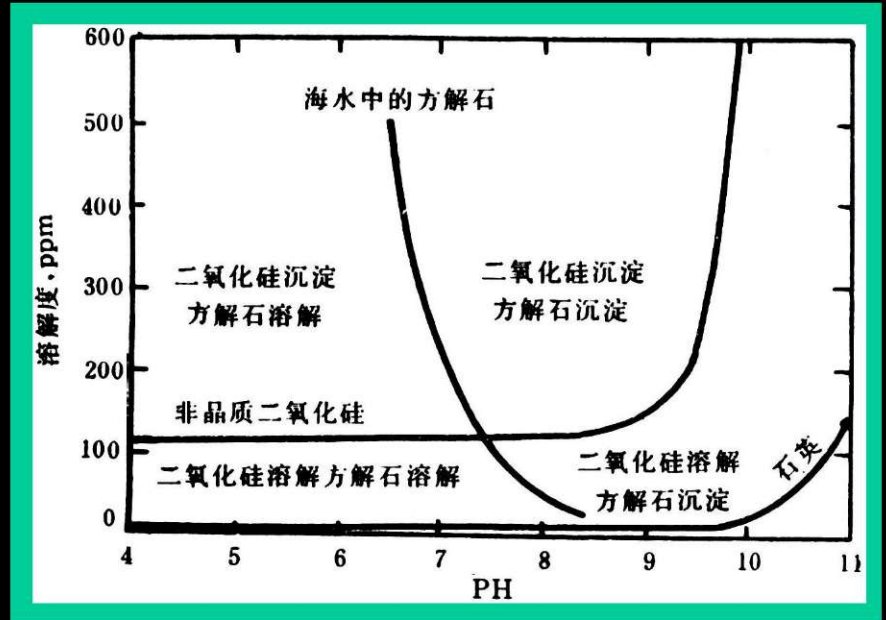
交代作用的实质是体系的**化学平衡及平衡转移**问题。

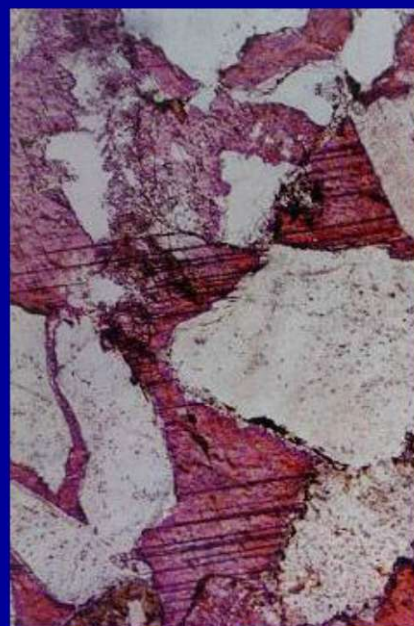
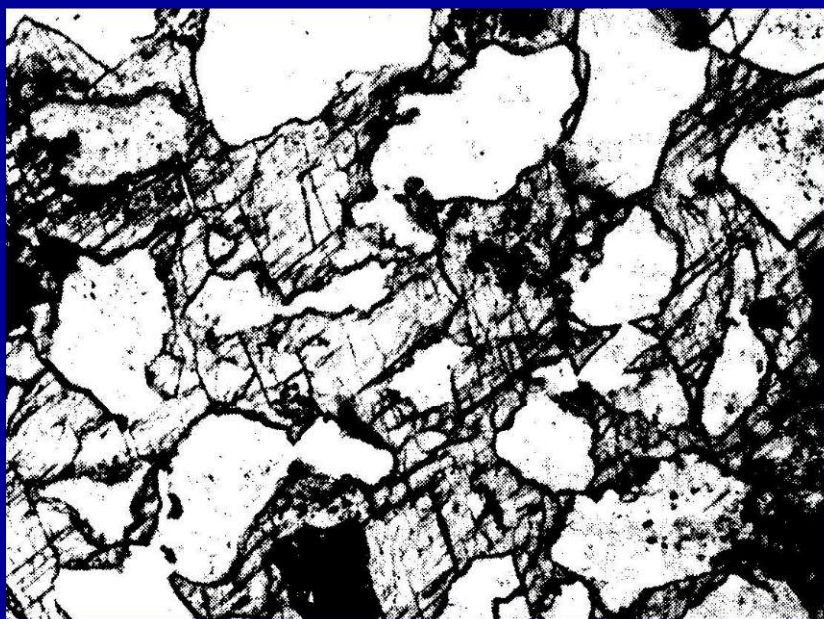
当体系内的物理、化学条件（温度、压力、浓度、流体成分、pH值、Eh值等）发生改变时，**原来稳定的矿物或矿物组合**将变得不稳定，发生**溶解、迁移或原地转化**，形成在新的物理化学条件下稳定存在的**新矿物或矿物组合**。

一、碎屑岩中常见的交代作用

1、氧化硅与方解石的相互交代作用

砂岩中方解石交代氧化硅或氧化硅交代方解石的现象都是常见的。





石英砂岩中石英边缘被方解石连晶交代，
石英的边缘成港湾状或鸡毛冠状

2、方解石对长石的交代作用

方解石或其它碳酸盐矿物交代钾长石也是常见的现象。

方解石常呈不规则的形状交代长石边缘或晶内，亦常见到方解石沿长石解理或双晶方向进行交代，因为这些方向是长石晶体构造上的弱带。

3、方解石交代粘土矿物

在含粘土杂基的砂岩中，特别是在亚（次）杂砂岩中，粘土矿物常被碳酸盐矿物交代。

碳酸盐矿物常是方解石，也可以是白云石和菱铁矿。

在显微镜下，常可以看到碳酸盐矿物，特别是方解石晶体内有粘土残留包体的现象，这表明交代作用不够彻底。

4、粘土矿物与长石的交代作用

由于长石类矿物的不稳定性，长石被粘土矿物交代的现象（通常称之为高岭石化）并不全是在成岩过程中发生的。

部分长石在风化和搬运过程中即可发生水解作用和高岭石化作用。

保留下来的斜长石，有可能在埋深不太大、 CO_2 分压较高和PH值较低（约等于5）的酸性环境中被粘土矿物交代，即发生高岭石化。

5、各种粘土矿物之间的交代作用

自然界中的粘土矿物或者构成泥质岩，或者作为碎屑岩的杂基出现，通常都是一种**混合型粘土**，单成分粘土是少见的。

随着成岩作用的进展，粘土矿物之间会出现有规律的变化。

研究粘土矿物，特别是填隙粘土杂基的成分和结晶度，就可以反推成岩过程中岩石所经历的最大埋深和最高温度。

随着埋深的增加，在 $K^+/H^+ > 6$ （近正常海水）， $\text{Log}[H_4\text{SiO}_4] < 10^{-4}$ 的偏碱环境，当温度为 $100 \sim 130^\circ\text{C}$ 时，蒙脱石可以转化为伊利石。



该反应一般在3000m以下发生， Al^{3+} 和 K^+ 可由长石分解时提供。

当环境富 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 时，蒙脱石在同样温度下不是转变成伊利石，而是被绿泥石所交代。

高岭石的转化情况也很类似。在酸性孔隙水中高岭石是稳定相，但当埋深增加，温度达 $165\sim 210^{\circ}\text{C}$ 时，如果环境变得偏碱性并富 Mg^{2+} ，则生成绿泥石。

在相同条件下，如果孔隙水富含 K^{+} ，则生成伊利石。高岭石向绿泥石和伊利石的转化一般发生在 $3500\sim 4000\text{m}$ 深处。

伊利石和绿泥石在酸性孔隙水中可转化成高岭石。

6、方解石、白云石和菱铁矿的相互交代作用

方解石（包括铁方解石）、白云石（包括铁白云石）和菱铁矿均属三方晶系，为类质同像体。

一般化学式为 $R''[CO_3]$ ， R'' 代表Ca、Fe、Mg，其次是Mn和Zn。

因而在不同埋深， R'' 离子浓度改变的情况下可以互相置换、转化。

二、交代作用的标志

交代作用大都有明显的标志（除混层粘土的转化、石膏和硬石膏的转化以及彻底的去白云石化等外）。

根据矿物的交代关系可以确定矿物的生成顺序。

1、矿物假象

交代矿物具有被交代矿物的假象，矿物的原生成分虽已被交代，但其结晶习性得到完好的保存。



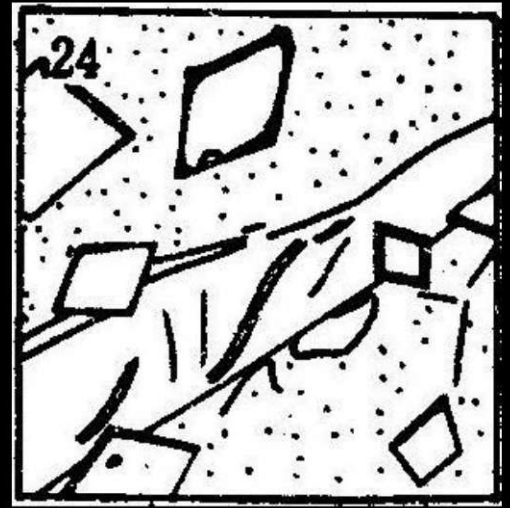
2、幻影构造

岩石受到强烈的交代作用，原生颗粒只留下模糊的轮廓叫**幻影**。

如硅化鲕粒、强白云化岩石中的生物骨壳等。其内部结构结构甚至其边缘已消失，但因其内部有包裹体存在，故显示出颗粒幻影。

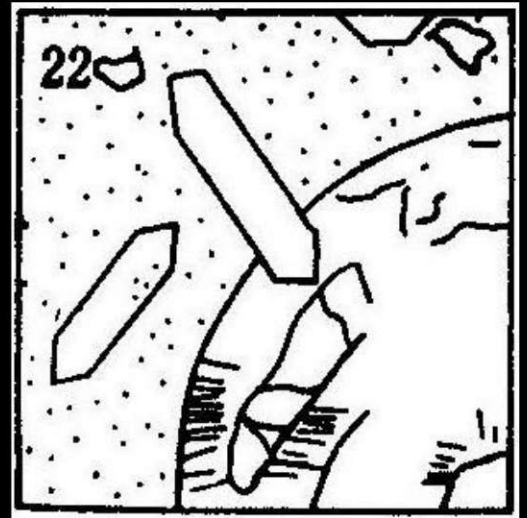
3、交叉切割现象

矿物或颗粒被自形晶体或镶嵌结构的晶体切割或溶（侵）蚀。



4、残留的矿物包体

残留包体表示外面矿物是交代矿物，被包矿物是被交代矿物。



第四节 重结晶作用和矿物的多形转变

Recrystallization and polymorphic inversion of minerals

重结晶现象和矿物的多形转变主要发生在碎屑岩的胶结物中。

在重结晶过程中，包裹物或残留物一般仍保留在重结晶体内，它们是识别重结晶的重要标志。

矿物的多形转变是一种较复杂的广义的重结晶作用。

在一般情况下，当一种矿物转变为另一种更稳定的矿物相时，只发生晶格和形状及大小的变化。

在碎屑沉积岩中最有意义的是文石胶结物向方解石的转化及非晶质氧化硅的蛋白石向玉髓及石英的转化。

隐晶质的胶磷矿转变为显晶质的磷灰石，隐晶质的高岭石转变为鳞片状或蠕虫状的结晶高岭石，也是常见的矿物多形转变现象。

第五节 溶解作用与次生孔隙

Solution and secondary pores

砂岩中的任何碎屑颗粒、杂基、胶结物和交代矿物（后两者统称为自生矿物），包括最稳定的石英和硅质胶结物，在一定的成岩环境中都可以不同程度地发生溶解作用。

溶解作用的结果形成了砂岩中的**次生孔隙**。

施密特和麦克唐纳（V. Schmidt and D. A. McDonald, 1977, 1979）首次对砂岩中次生孔隙的成因类型、岩石学识别标志进行了系统的归纳。

指出，在砂岩中，至少**1/3**以上的孔隙属于次生孔隙。

同时还指出，随着研究工作的进展，很可能会发现砂岩中**次生孔隙的量多于原生孔隙**。

次生孔隙是世界上许多油气储集层的**主要储、渗孔隙**。

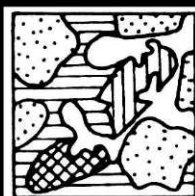
在陕北、新疆、渤海湾、中原、南阳、苏北等油田，都发现了以次生孔隙为主的砂岩储集层。

深部次生孔隙砂体的发现，扩大了油气资源的勘探领域。

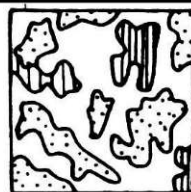
对砂岩溶解作用和次生孔隙的研究，已成为当前砂岩成岩作用研究的一个重要方面。

吕正谋(1983)

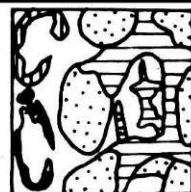
对胜利油田东营
凹陷古近系砂岩
次生孔隙进行了
系统研究，提出
了12种识别标志。



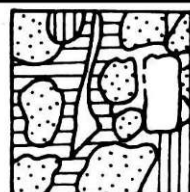
1. 部分溶解



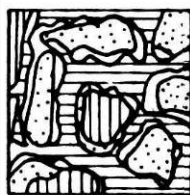
2. 受溶蚀颗粒
及过量孔隙



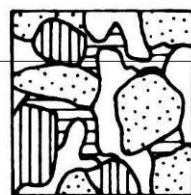
3. 溶蚀残骸



4. 铸模孔隙



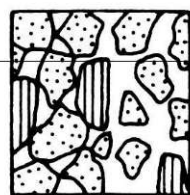
5. 贴粒孔隙



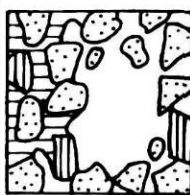
6. 残余胶结物



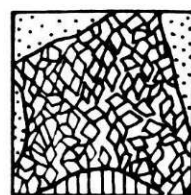
7. 伸长型孔隙



8. 不均匀性填集



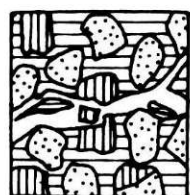
9. 超粒大孔隙



10. 油浸
碳酸盐基质



11. 破碎颗粒



12. 岩石裂缝



石英



长石



砂屑



碳酸盐
胶结物



碳酸盐
基质



孔隙