



# 油气储层地质学基础

## Basis of Hydrocarbon Reservoir Geology

于兴河 教授 博士生导师

中国地质大学（北京）能源学院石油教研室

Tel: 82320109 或 82321857 (O)

Email: [billyu@cugb.edu.cn](mailto:billyu@cugb.edu.cn)





# 第六章 储层成岩作用

第一节 成岩作用分析测试方法与内容

第二节 成岩作用和孔隙演化

第三节 碳酸盐岩成岩作用及孔隙演化

第四节 成岩序列与演化模式



# 第六章 储层成岩作用

影响成岩作用的因素很多，主要有盆地构造演化、沉积体系的分布、埋藏史、盆地的热演化史以及地下水溶液的活动等。

**决定性的要素有：**岩性特征、流体性质、温度大小及压力条件。

**决定储层物性发育的宏观因素为：**①构造演化的阶段性；②沉积格局的复杂性；③成岩作用的多样性。

**定义：**成岩作用是指碎屑沉积物在沉积后到变质作用之前，这一漫长阶段所发生的各种物理、化学及生物变化或反应。

**研究重点：**是对那些引起物性变化的成岩事件（包括对孔隙的破坏作用和导致次生孔隙形成的作用），探讨储层中孔隙的演化规律，以此预测有利油气带。



# 第一节 成岩作用分析测试方法与内容

就成岩作用本身而言，首先是从其产物——岩石入手进行研究，系统地**对储层岩心进行详细观察**（宏观和薄片两方面）和分析测试，特别注意储层孔隙在时间和空间上的变化，以此获得较准确的岩性资料、各种成岩现象和孔隙变化的特征，进而推测可能经历的成岩作用和过程。

其次，根据孔隙流体温度和压力等成岩参数，从物理化学和热化学等角度探讨**成岩反应的机理与条件**。

最后，结合盆地构造演化规律、沉积相展布特征等，建立储层的**成岩演化模式**，寻找出孔隙的演化规律，以便对孔隙的发育带进行评价和预测。

岩石矿物学方法	实验测试方法
1、常规岩石薄片	1、毛细管压力法
2、孔隙铸体薄片研究	2、有机质成熟度分析法
3、荧光薄片研究	3、有机酸分析
4、阴极发光薄片研究	4、同位素分析
5、扫描电镜分析	
6、X—衍射分析	
7、电子探针及能谱分析	
8、流体包裹体分析	

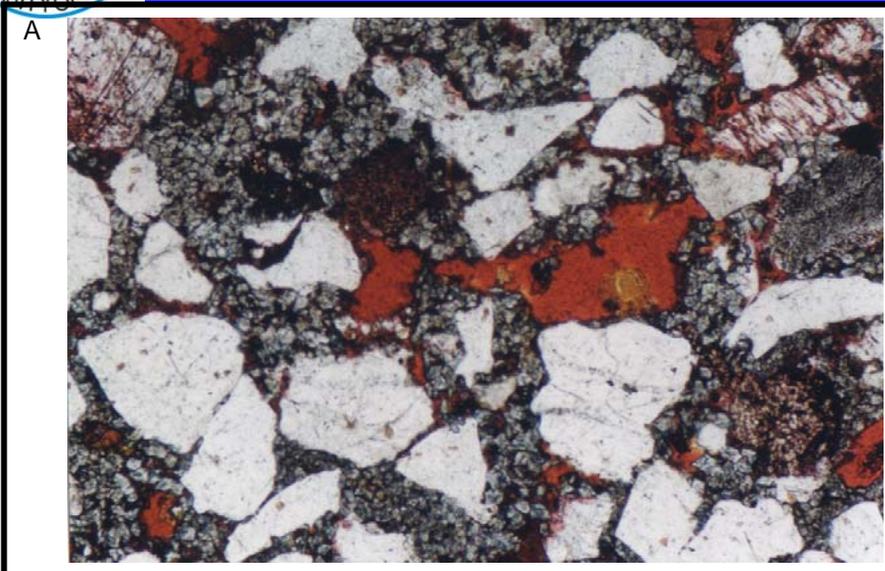


## 一、岩石矿物学方法

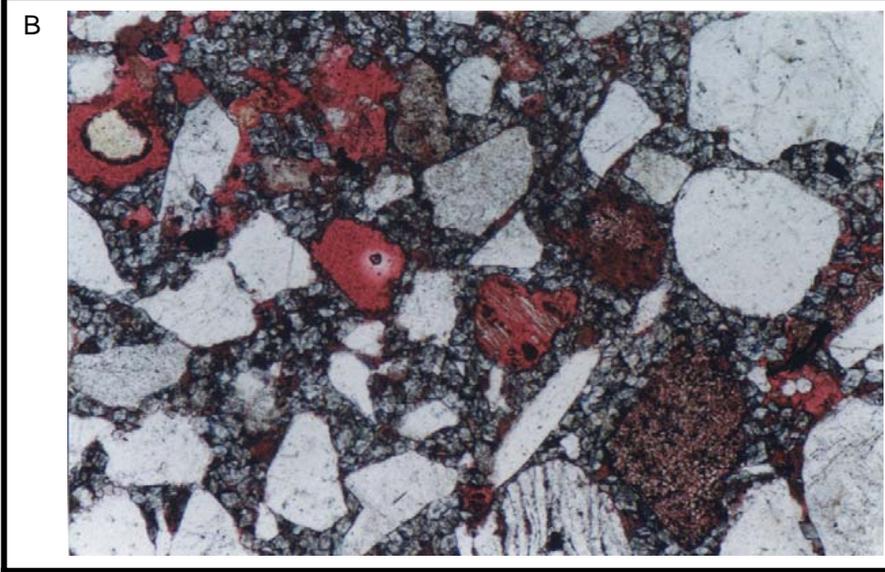
### (一) 常规岩石薄片研究

通过偏光显微镜观察、描述岩石的成分、结构、构造、成岩变化及孔隙特征，并对岩石进行定名。为便于成岩和孔隙研究，可制作染色铸体薄片，更为有效的是制作多用片，其目的是用同一薄片进行多项分析。

- ① 矿物成分：颗粒、填隙物、交代物成分；
- ② 结构特征：颗粒大小、形状、圆球度、分选性；
- ③ 压实特征：颗粒接触关系、压实率计算；
- ④ 胶结特征：胶结类型、胶结物成分、产状、分布、顺序及胶结率计算；
- ⑤ 溶解特征：被溶解矿物类型、产状、程度、期次，次生孔隙类型、大小、含量及分布。



镜下特征:															深度: 2777.3m 样品号:				
557 结构特征	粒径(mm): 最大 1.48/主要区间 1.48~0.50										胶结类型: 孔隙								
	分选性: 中					磨圆: 次圆					石英加大: 个别								
碎屑组分 (%)	多晶石英	单晶石英	长石		火成岩		变质岩		沉积岩		其它		岩屑总量	面孔率 (%)					
			斜长石	钾长石	火山岩	花岗岩	千枚岩	片岩	糜棱岩	泥岩	灰岩	帘石			云母				
	2	89	/	3	6	/	/	/	/	/	/	/	6	9					
填隙物 (%)	基质		胶结物					填隙物总量 (%)	孔隙类型										
	泥质	高岭石	方解石	铁方解石	铁质	铁白云石	硅质		黄铁矿	粒间孔	粒间溶孔	粒内溶孔	颗粒溶孔	晶间孔	生屑内孔	铸模孔			
								1									/	<1	<1



**描述:**

A: 20倍, 单偏光  
白云石和铁白云石(粉晶, 自形)孔隙式胶结, 孔隙以粒间溶孔及铸模孔、粒间孔为主, 连通性极差。

B: 20倍, 单偏光  
铸模孔、粒内溶孔。

**特征描述:**

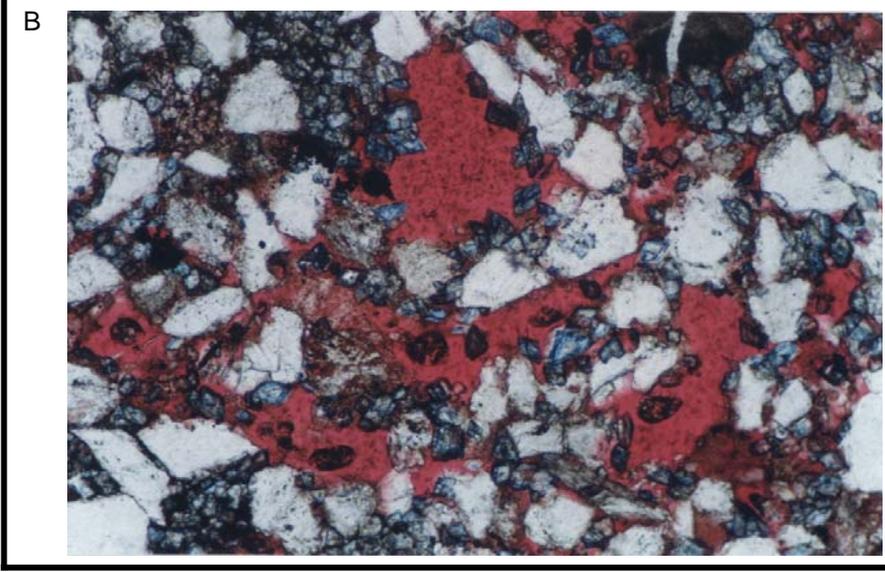
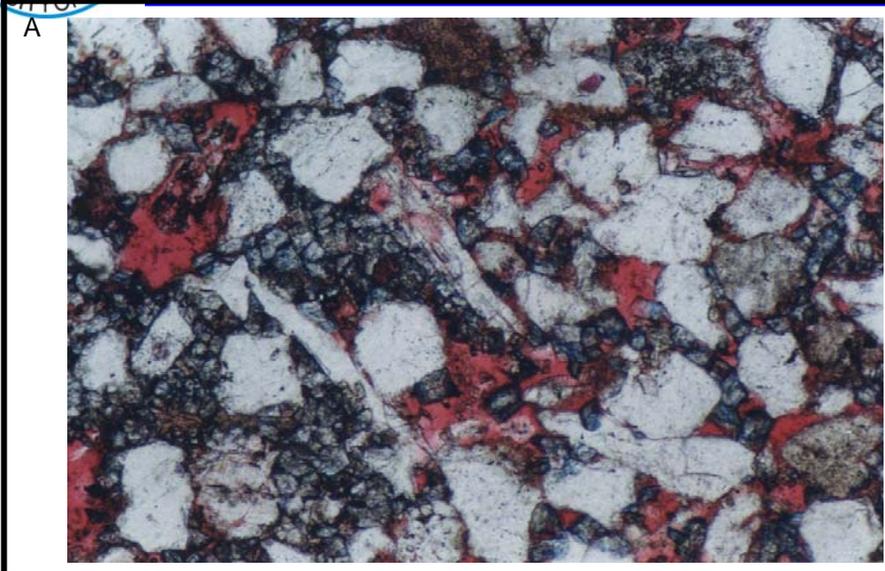
粗砂与中砂混杂分布, 颗粒排列无定向, 颗粒之间为点接触, 火山岩岩屑蚀变深, 一类为硅化, 另一种为高岭石化(全由高岭石及其晶间孔组成, 外形轮廓保留完好), 白云石和铁白云石(粉晶, 自形)胶结, 孔隙以粒间溶孔及铸模孔、粒间孔为主, 连通性极差。



# 第一节

# 成岩作用分析测试方法与内容

China University of Geosciences, Beijing  
Bill Yu



镜下特征:															深度: 2774.3m 样品号:				
545 组 构 特 征	粒径(mm): 最大 0.28/主要区间 0.25-0.1										胶结类型: 孔隙								
	分选性: 好					磨圆: 次圆					石英加大: 个别								
碎屑 组 分 (%)	多晶 石英	单晶 石英	长石		火成岩		变质岩		沉积岩		其它		岩屑 总量	面 孔 率 (%)					
			斜 长 石	钾 长 石	火 山 岩	花 岗 岩	千 枚 岩	片 岩	糜 棱 岩	泥 岩	灰 岩	帘 石			云 母				
	3	82	/	9	5	/	/	/	/	/	<1	1	6	9					
填 隙 物 (%)	基质		胶结物					填隙 物 总 量 (%)	孔隙类型										
	泥 质	高 岭 石	方 解 石	铁 方 解 石	铁 质	铁 白 云 石	硅 质		黄 铁 矿	粒 间 孔	粒 间 溶 孔	粒 内 溶 孔	颗 粒 溶 孔	晶 间 孔	生 屑 内 孔	铸 模 孔			
								2									/	13	/

**描述:**

A: 80倍, 单偏光  
铁白云石多为零散分布, 交代颗粒。局部见较大的粒间溶孔。

B: 80倍, 单偏光  
同上。

**特征描述:**  
细砂含量95%, 碎屑近于等轴状, 无定向排列。此外含生屑(有孔虫)4%, 颗粒之间多为点接触, 一部分为漂浮状态, 白云石为自形粉晶, 常集中呈棒槌状, 不规则团块状分布, 铁白云石多为零散分布。孔隙孔径小, 连通性差, 分布亦不均匀。



# 第一节 成岩作用分析测试方法与内容

## (二) 孔隙铸体薄片研究

孔隙铸体是研究储集岩孔隙结构的一种直观方法，通常有两种方法：一是将孔隙结构的复制品——孔隙铸体在扫描电镜下进行直接观察；二是将铸体的岩样切成薄片，在偏光显微镜下进行观察。主要包括：孔隙和喉道类型、大小、形状、分布、面孔率、孔喉配位数等。

## (三) 荧光薄片研究

通过对岩石薄片照射荧光来鉴定是否含油或油质的轻重。荧光系列薄片的流程为：偏光分析→荧光分析→X射线衍射分析→能谱分析→电子探针分析。

## (四) 阴极发光薄片研究

它是研究碎屑与胶结物成分、胶结世代、岩石结构和构造的主要手段，特别是对于一般显微镜难以解决的钙质及硅质胶结现象和某些重结晶现象，以及孔隙类型的鉴定等。



# 第一节 成岩作用分析测试方法与内容



## (五) 扫描电镜分析

由于放大倍数高，分辨率高，可以观察到普通显微镜下观察不到的东西，如粘土矿物、微孔隙等。扫描电镜对矿物鉴定的基本原理是根据其形貌和晶形，对于晶貌相似的矿物，效果较差。

1. **胶结物类型**：鉴定孔隙和喉道中自生胶结物的类型，特别是细小的粘土类矿物及不同类型的沸石类矿物（表4—3）。
2. **胶结产状**：识别自生粘土胶结物的胶结产状（孔隙充填、孔隙衬边和孔隙桥塞）和石英、长石次生加大的级别。
3. **溶解、交代作用**：长石蚀变、矿物的溶解、交代、再生长，自生矿物组合及形成顺序。
4. **孔隙类型**：（尤其是微孔隙）、形态、数量。
5. **喉道类型**：喉道的大小与形态。
6. **孔喉连通情况**。



# 第一节

# 成岩作用分析测试方法与内容



表 4—3 常见粘土矿物特征表（据陈丽华，1990，有修改）

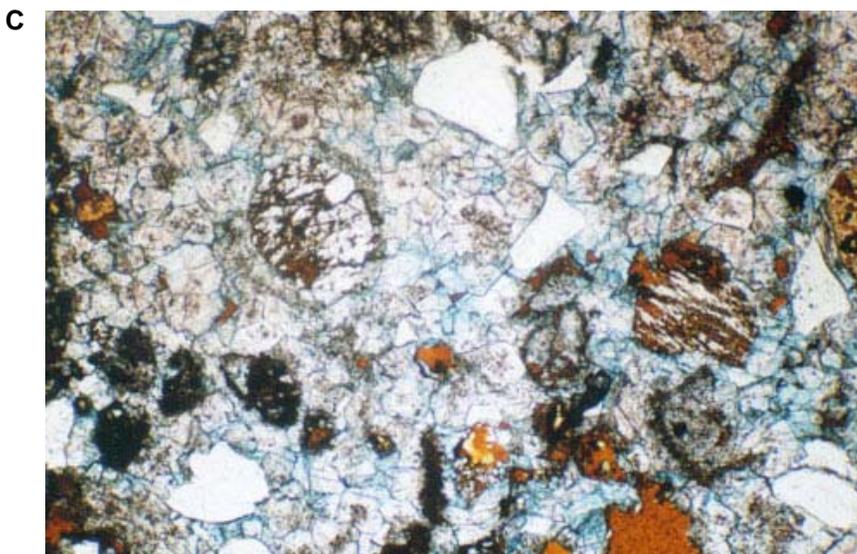
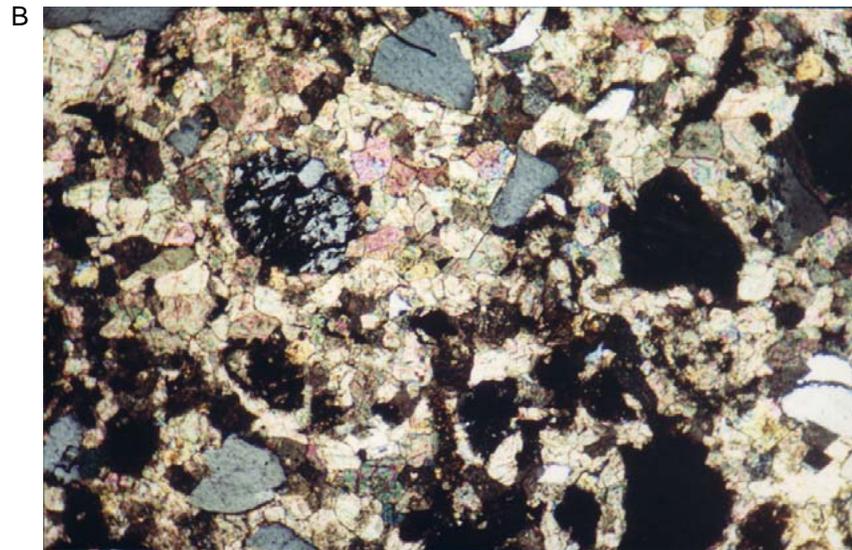
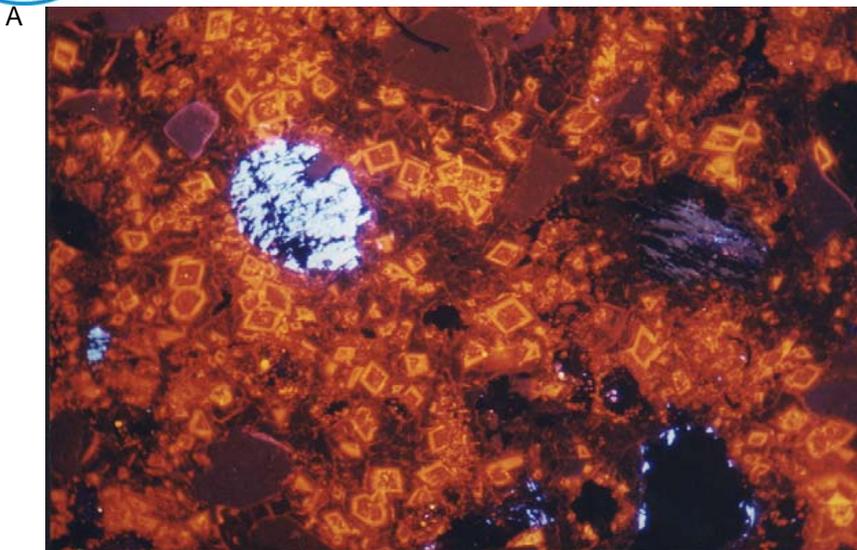
粘土矿物	化学分子式	X 射线衍射图谱特征 d (001) Å <sup>①</sup>	扫描电镜下单体形态	扫描电镜下集合体形态	孔隙中主要分布方式 (产状)
高岭石	Al <sub>4</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>20</sub> ] (OH) <sub>8</sub>	7.1 ~ 7.2	假六方板片状	书页状、蠕虫状、手风琴状	分散质点 (孔隙充填)
蒙脱石	(1/2Ca, Na) <sub>0.7</sub> (Al, Me, Fe) <sub>4</sub> [(Si, Al) <sub>8</sub> O <sub>20</sub> ]nH <sub>2</sub> O	Na-12.99 Ca-11.50	絮状、片状、蜂窝状	花瓣状、蜂窝状、絮状	孔隙衬边 孔隙桥塞 孔隙充填
伊利石	K <sub>1-1.5</sub> , Al <sub>4</sub> [Si <sub>7-6.5</sub> , Al <sub>1-1.5</sub> O <sub>20</sub> ](OH) <sub>4</sub>	10	片状、蜂窝状、丝缕状	鳞片状、板片状、羽毛状	孔隙衬边 孔隙桥塞 孔隙充填
绿泥石	[Me, Al, Fe] <sub>12</sub> [(Si, Al) <sub>8</sub> O <sub>20</sub> ] (OH) <sub>16</sub>	14, 7.14, 3.5, 4.72	针叶状、玫瑰花朵状、绒球状	薄片、鳞片状	孔隙衬边 孔隙充填

① 1Å=10<sup>-10</sup>m



# 第一节 成岩作用分析测试方法与内容

China University of Geosciences  
Bill Yu  
Beijing



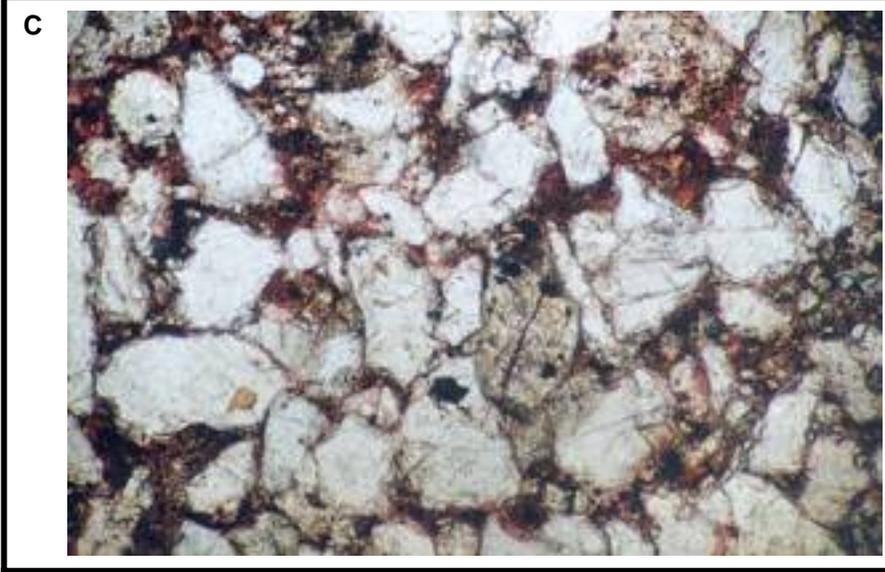
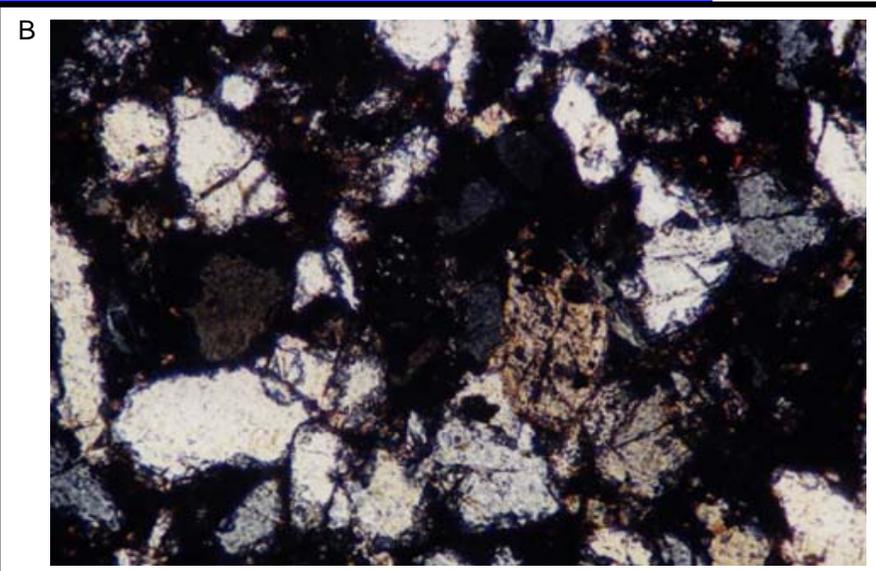
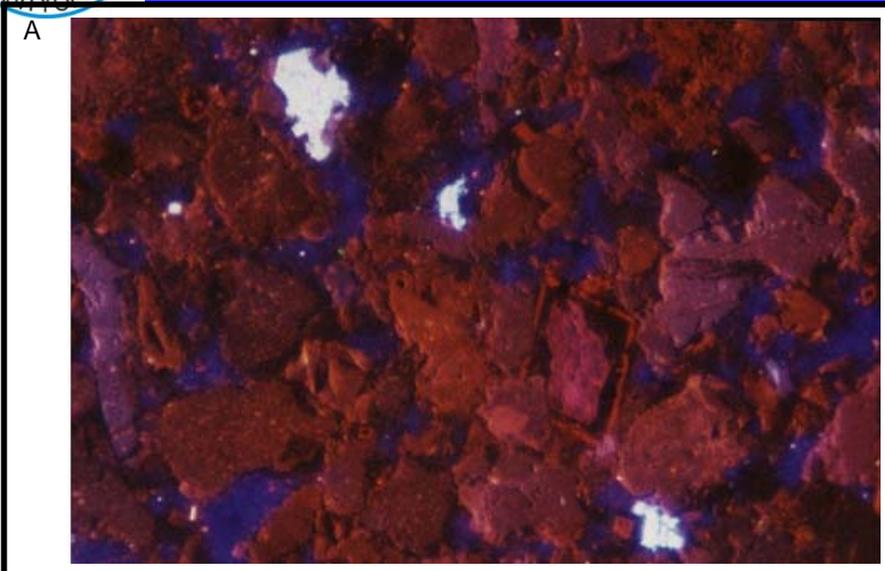
描述: 深度: 2780.3m 样品号: 569

A: 40倍, 阴极发光  
白云石具环带结构, 自形、半自形, 核部发橙红色光, 环部发桔黄色光, 含铁白云石发暗橙红色光, 见钾长石为核的表鲕, 同心层已被白云石化, 见长石白兰色、灰粉兰色光。在白云石、含铁白云石充填后, 长石有溶蚀现象发生。石英发暗棕色、暗紫色光, 基本无加大现象。

B: 40倍, 正交偏光  
含铁白云石和白云石发育处。

C: 40倍, 单偏光  
同上。

阴极发光



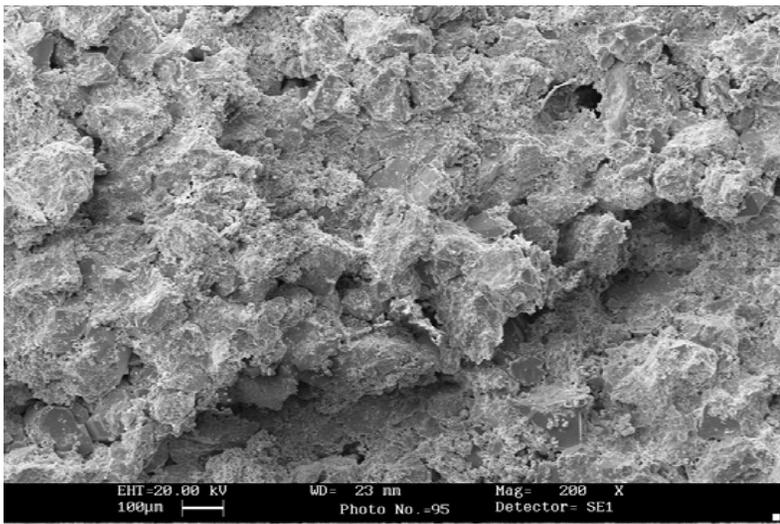
描述: 深度: 2766.28m样品  
号: 513

A: 100倍, 阴极发光  
白云石充填、交代, 具单环结构, 环带发桔红色光, 其核部为发棕紫色光的石英颗粒。石英发棕色、棕紫色光, 见石英次生加大现象, 加大部分不发光, 长石发白兰色光, 可见后期有溶蚀, 高岭石充填粒间发靛兰色光。

B: 100倍, 正交偏光  
白云石和高岭石充填粒间。

C: 100倍, 单偏光  
同上。

A: PY30-95 (2764.28m, 样品号505)



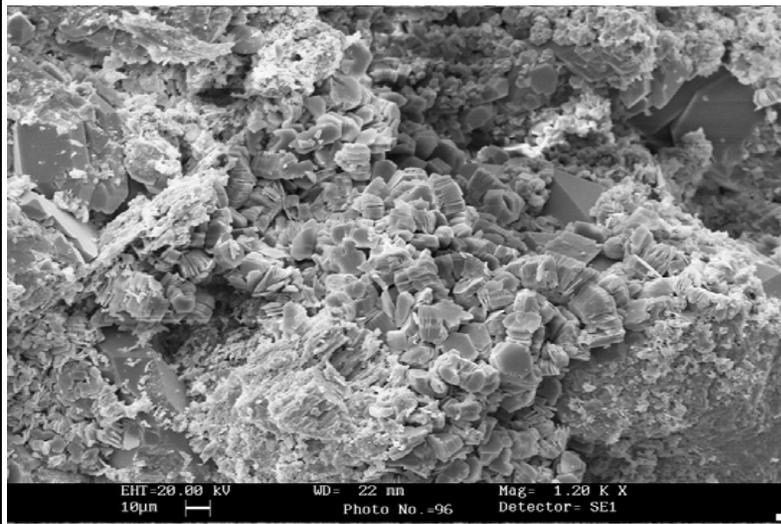
A:  
全貌, 粒  
间孔隙30  
~  
60  $\mu$  m。

B:  
粒间高岭  
石胶结  
物。

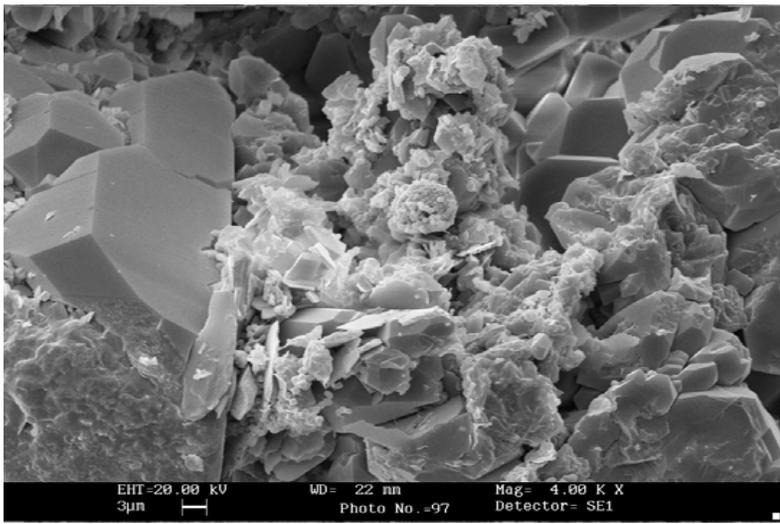
C:  
石英表面  
溶蚀坑内  
黄铁矿及  
片状伊利  
石充填。

D:  
粒间高岭  
石与铁白  
云石晶  
体。

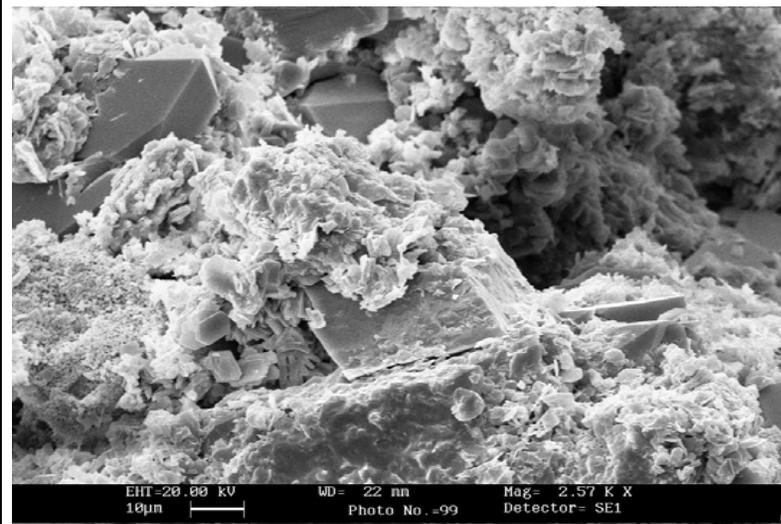
B: PY30-96 (2764.28m, 样品号505)



C: PY30-97 (2764.28m, 样品号505)



D: PY30-99 (2764.28m, 样品号505)



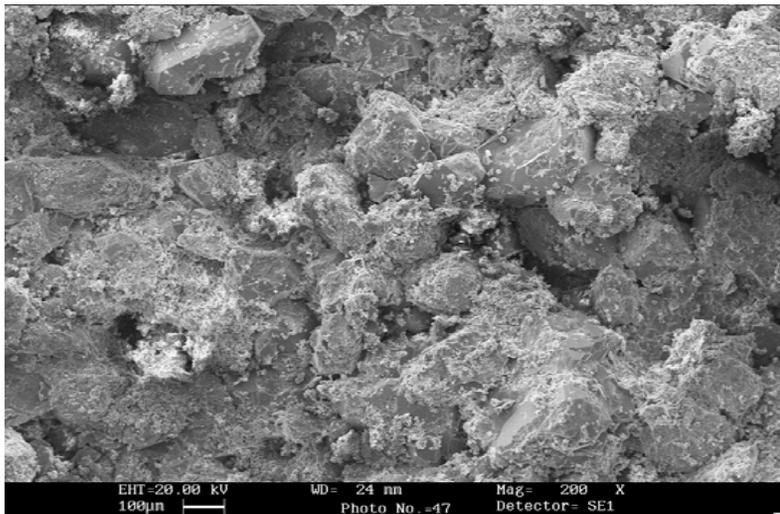


# 第一节

# 成岩作用分析测试方法与内容

China University of Geosciences  
Bill Yu  
Beijing

A: SSH-47 (2760.31m, 样品号463)



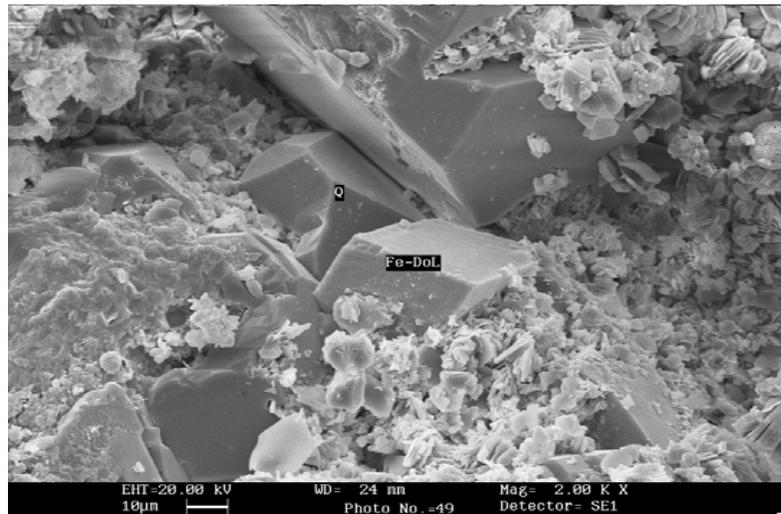
A:  
全貌, 粒  
间孔隙  
20~  
50 µ m。

B:  
粒间铁白  
云石, 高  
岭石, 石  
英加大III  
级。

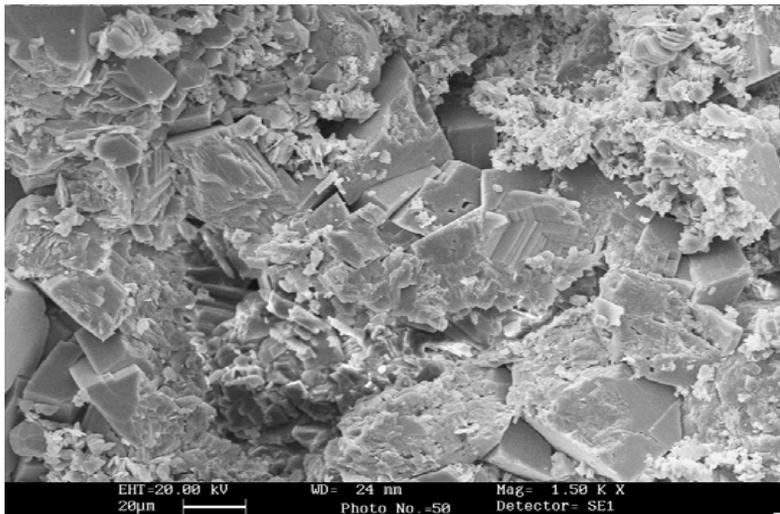
C:  
粒间铁白  
云石胶结  
物。

D:  
粒表高岭  
石与黄铁  
矿。

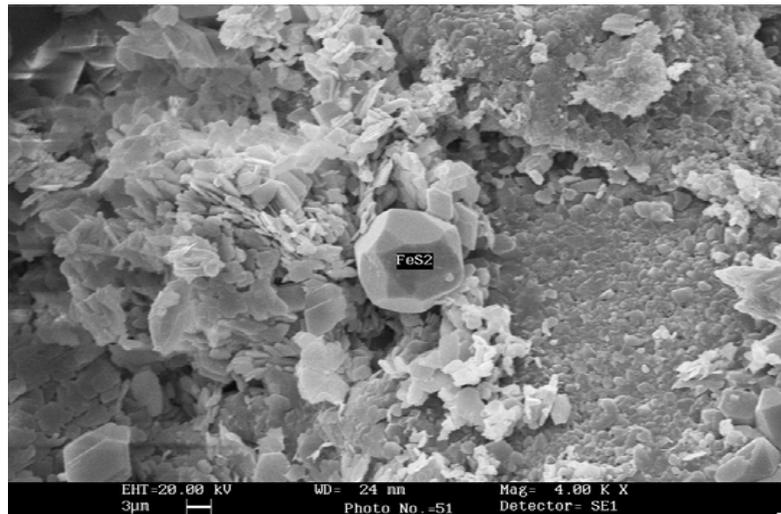
B: SSH-49 (2760.31m, 样品号463)



C: SSH-50 (2760.31m, 样品编号463)



D: SSH-51 (2760.31m, 样品号463)





## (六) X—衍射分析

根据X—衍射图谱上峰值 $d$ 的大小来确定矿物类别，根据峰高、峰面积确定衍射强度，进行矿物定量，而根据峰形函数即同一类矿物的峰形变化，可以反映矿物本身的某种变化。因此，X射线衍射分析所能解决的问题主要有：①粘土矿物的定量分析；②混层粘土矿物鉴定与混层比计算；③自生矿物的分析与鉴定。

## (七) 电子探针及能谱分析

这是一种重要的微观成分分析手段，若将扫描电镜、阴极发光与电子探针和能谱仪配合使用，可进一步提高矿物鉴定的能力和精度。

## (八) 流体包裹体分析

矿物包裹体是矿物生长时所捕获的成岩介质溶液。它记录了矿物形成时的条件及流体。含有包裹体的自生矿物可以是方解石、白云石、石英、沸石、石膏、石盐等。



## 二、实验测试方法

实验室的各种分析与测试是获取地下第一手资料的最直接、最可靠的手段，就成岩研究而论主要是获取流体、古地温资料及孔隙度与渗透率资料。

### (一) 毛细管压力法分析

测定岩石毛细管压力曲线的方法较多，但目前在油田中常用的方法主要有三种：

1. 半渗透隔板法
2. 压汞法
3. 离心法

### (二) 有机质成熟度分析

在成岩作用研究中，有机质热成熟度分析主要用于成岩阶段的划分。通常应用三个指标：

1. 镜煤反射率 ( $R_o$ )
2. 孢粉颜色及热变指数 (TAI)
3. 热解烃峰峰温 ( $T_{max}$ )



## (三) 有机酸分析

利用离子色谱或液相色谱可测定油田水和干酪根中有机酸的类型及含量。

## (四) 稳定同位素分析

同位素分析主要是获取古地温、自生矿物形成顺序等资料。

### 1. 水的同位素变化

正常海水的  $\delta^{18}\text{O}$  (平均海水标准) 均为0, 在某些地区, 由于淡水的稀释或强烈的蒸发, 这些数值有所变化。淡水的同位素组成因地而异, 变化较大,  $\delta^{18}\text{O}$  在  $-50 \sim 0$  之间变化。

### 2. 碎屑岩(氧)的同位素特征

沉积岩的全岩  $\delta^{18}\text{O}$  值普遍较高。碎屑岩的同位素组成受其母岩成分控制, 在某种意义上, 不存在同位素平衡, 因此, 其同位素组成具有非均质性。碎屑颗粒石英和长石等, 难于与海水达到同位素平衡, 其同位素组成具继承性。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

碎屑岩储层及其储集性能既受沉积相的控制，又受到成岩作用的强烈影响。前者控制着储层物性的平面分区性；而后者决定着其垂向上的分带性。因此，碎屑岩储层的成岩作用研究就是综合分析其中孔隙空间的形成过程、机理及演化规律。

### 一、成岩作用的基本要素

**岩石、流体、温度和压力**是发生各种成岩作用的四个基本要素，也称基本成岩参数和条件。

#### (一) 岩性

碎屑岩储层的岩性包括**碎屑颗粒、填隙物（胶结物与杂基）的成分、结构和组构等**。

地下水溶液对碎屑矿物颗粒的溶解，淡水对颗粒的淋滤以及矿物之间所发生的交代作用等，都是依据其成分与结构的差异所进行的，具有明显的选择性。选择的条件就是其影响成岩的基本因素和成岩环境。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



### (二) 温度

温度是发生各种成岩变化的基本条件之一，其大小不仅可以影响成岩作用的类型与速度，而还影响成岩作用的方向。成岩作用发生时的地温，即古地温计算与恢复则是其关键。**通常而言古地温对成岩作用的影响大致有以下几个方面：**

- ① **影响矿物的溶解度：**大多数矿物的溶解度会随着温度的增加而增大。
- ② **影响矿物的转化：**地温梯度不同，矿物转化的深度不一。
- ③ **影响孔隙流体和岩石的反应方向：**因为化学反应的平衡常数受温度控制，温度的变化势必引起反应的变化。
- ④ **古地温控制下有机质的成岩演化序列：**有机酸对矿物颗粒的溶解是形成次生孔隙重要途径之一。有机质随温度的变化衍生出不同的化学成分，而不同化学成分的有机酸对矿物的溶解则明显不同。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



古地温是成岩作用阶段划分主要指标之一。古地温的确定方法有：

- ① 流体包裹体测温；
- ② 镜质体反射率；
- ③ 粘土矿物组合及转化；
- ④ 自生矿物的分布和演变。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



### (三) 压力

压力的大小对成岩反应具有一定的控制作用，主要表现在影响成岩的进程速度与方向。

常用的压力参数有：**静水压力** ( $P_h$ )、**孔隙流体压力** ( $P_p$ )、**有效应力** ( $P_f$ )、**剩余流体压力** ( $P_e$ )及**静岩压力** ( $P_t$ —总压力) (图4—6)。孔隙流体压力等于上覆水柱的重量时，称为**静水压力**；比上覆水柱重量大的孔隙压力称为**剩余压力**，当孔隙流体压力大于静水压力时（超高压），有效应力相应变小，直至为零。压力参数直接控制了储层的机械压实和压溶作用，也可以说是直接控制物性的一个重要因素。

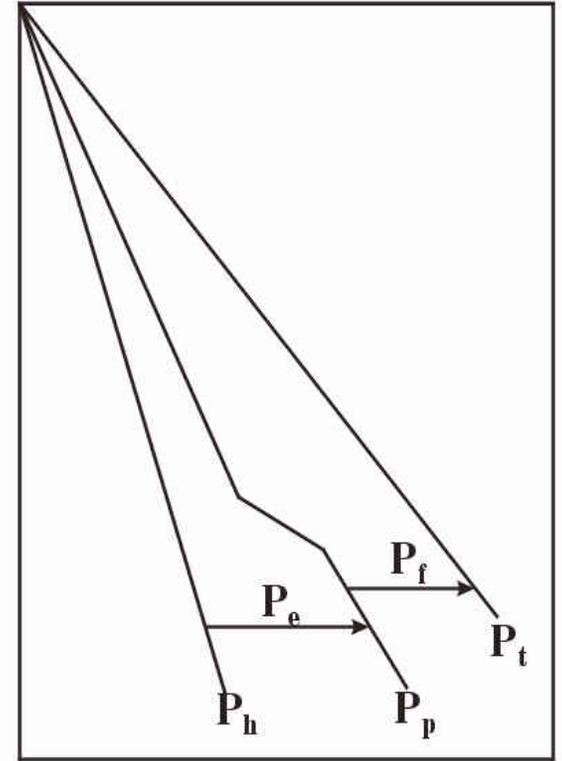


图4—6 压力关系示意图

### (四) 流体

储层中所见到的自生矿物的沉淀与溶解作用是由沉积盆地内大量溶解物质所造成。成岩期间储层中存在着不同成分的孔隙流体或地下水溶液，这种流体是重新分配矿物的动力学条件。因此，其化学成分和活动程度对成岩作用起着很重要的控制作用。具体来说；**孔隙流体一般包括孔隙水、油和气**，其中**孔隙水的影响最突出**。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



### 1、孔隙水的化学成分

孔隙水的无机离子测定是油田化学的常规分析项目（ $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ，即六大离子），方法较为成熟。 $\text{Na}^+$  +  $\text{K}^+$ 含量随深度的变化可以反映成岩作用的变化，如在成岩过程中（通常是晚成岩阶段），长石的溶解可以释放出 $\text{Na}^+$ 或 $\text{K}^+$ 。

当埋深大于某一深度时， $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 的减少则是由于伊利石 / 蒙脱石混层矿物迅速向伊利石转化而吸收了 $\text{K}^+$ 所致。

### 2、孔隙水的流动方式和动力

Coustaou (1977) 根据盆地的水动力特征将其为“青年”、“中年”和“老年”三个阶段，分别对应**压实驱动流**、**重力驱动流**和**滞流（无水流）**三种水动力类型（图4—7）。

**压实驱动流**是指在上覆沉积物的负荷下，由压实作用挤出流体，使流体从盆地中心向盆地边缘或从深部向浅部的流动形式；

**重力驱动流**是指由地形高差引起重力作用使流体从高势区向低势区的流动形式，

而**滞流**是指不存在任何流动的状况。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

单纯说某盆地属那一种类型的流动方式并不能客观地反映盆地的流体动力学特征，而应依据不同层位的特点，根据系统动力的来源、流向和演化方式，可把油气成藏流体动力系统分为**重力驱动型、压实驱动型、封存型和滞流型**四种（康永尚等，1999），各类型的流体系统具有不同的成岩环境（表4—9），所发生的成岩反应也有所差异。

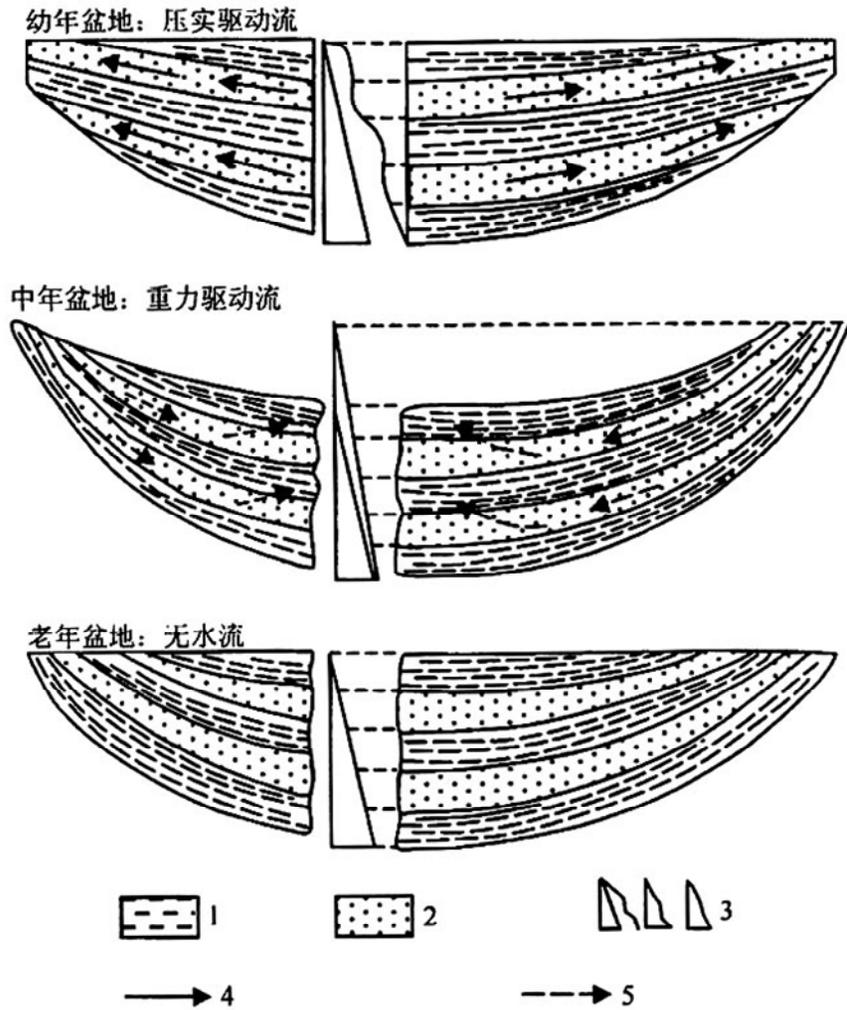


图 4—7 盆地流体动力演化阶段与类型划分（据 Coustau, 1977）

1—粘土；2—砂岩；3—垂直孔隙压力剖面；  
4—压实驱动流；5—重力驱动流



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



表4—9 不同流体动力系统的特征、演化方式、成岩环境及对成岩的影响

系统类型	压实驱动型	重力驱动型	封存型	滞流型
主要流体动力特征	压实力作用下，流体由盆地沉降中心向边缘或从深部向浅部流动	重力作用下，流体由盆地边缘向中心或从一侧向另一侧的侧向流动，分区域性和局部性两种	系统与外界只存在周期性的流体交换，异常高压形成幕式交换	无动力来源和流体流动，为正常压力平衡状态
演化方式	物质流为主，伴随着能量流	物质流为主，伴随着能量流	能量流为主，伴随着物质流	能量流为主，伴随着物质流
成岩环境与特点	封闭性水循环 有机酸为主 选择性反应	开启性水循环 大气水为主 选择性反应	半封闭性水循环 有机酸为主， 成岩反应活跃	无水循环 无机酸为主 成岩反应慢
影响成岩反应的因素	压力、温度及有机质丰度	pH、Eh 及离子浓度	超压力带与有机质丰度	温度、pH、Eh 及离子浓度



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

### 二、主要成岩作用

成岩作用的四个基本要素决定了可能发生的各种成岩作用。流体性质与矿物成分决定矿物是被溶解而形成次生孔隙，还是发生沉淀而堵塞孔隙。可以说，成岩过程是孔隙的形成与消亡的交替过程。因此，依据成岩作用对砂体孔隙演化的影响，可将其分为两大类：

**一是降低砂体孔、渗性的成岩作用：**主要有机械压实作用和胶结作用，其次为压溶作用和重结晶作用；

**二是增加砂体孔渗性的成岩作用：**主要为溶解和淋滤作用。交代作用对孔隙的影响不大，但可为后期溶解作用提供更多的易溶物质从而有利于溶解作用的进行。

#### (一) 机械压实作用

机械压实作用是沉积物在上覆重力及静水压力作用下，发生水分排出，碎屑颗粒紧密排列而使孔隙体积缩小、孔隙度降低、渗透性变差的成岩作用。影响碎屑岩的压实作用主要有颗粒的成分、粒度分选、磨圆度、埋深及地层压力等。机械压实作用的最终结果就是减小粒间体积，使原始孔隙度降低。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

沉积物经机械压实作用后，会发生许多变化，主要有：①碎屑颗粒的重新排列，从游离状到接近或达到最紧密的堆积状态；②塑性岩屑挤压变形；③软矿物颗粒弯曲进而发生成分变化；④刚性碎屑矿物压碎或压裂。

沉积物被压实固结的程度可称为压实作用强度。定性表征压实作用强度的方法是在镜下描述碎屑颗粒的接触关系；随着压实强度的增大，碎屑颗粒接触依次为点接触、线接触、凹凸接触和缝合接触。而定量的表征方法较多，常用的有以下二种：

### 1、颗粒的紧密度

前人多称填集密度，它是通过镜下测微尺或图象仪测量任意方向上的颗粒截距总长度来计算，具体算法如下：

$$\text{颗粒的紧密度} = (\text{颗粒截距总长度} / \text{测量长度}) \times 100\%$$

显然，比值越大颗粒的排列越紧密，压实强度也越大。根据紧密度，按研究区最大原始孔隙度计算压实后损失的孔隙度，并按一定井段间隔计算孔隙压实梯度，以反映压实作用强度。根据这种方法可对压实作用强度进行分级（表4—10）。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



表4—10 压实作用强度分级（据裘亦楠，1994修改）

压实作用强度	弱压实	急剧压实	强压实
颗粒的紧密度	<70%	70%~90%	>90%
压实后损失的孔隙度	<10%	11%~27%	27%
孔隙压实梯度	<1%, 100m	>1%, 100m	0.5%, ±100m

### 2、压实率

通过砂体原始孔隙体积与压实后的粒间体积进行对比，计算压实率。压实率反映了砂体压实后原始孔隙体积降低的百分比。

$$\text{压实率} = (\text{原始孔隙体积} - \text{压实后粒间体积}) / \text{原始孔隙体积}$$

上式中，原始孔隙体积可通过岩石颗粒粒度和分选性，应用Sneider图版进行估算，而压实后粒间体积一般是通过薄片估算的。粒间体积包括孔隙体积、胶结物体积和杂基体积。在压实率计算中，最好在每个深度段选择不同岩性进行计算，并建立不同岩性的深度—压实率剖面。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

### (二) 压溶作用

当上覆地层压力或构造应力超过孔隙水所能承受的静水压力时，引起颗粒接触点上晶格变形和溶解，这种局部溶解称压溶作用。通常情况下，细砂岩比粗砂岩压溶作用进行的更快（郑浚茂等，1989），而且形成的埋深较大，多大于3000m。石英压溶是最常见的压溶现象，压溶作用会造成石英颗粒之间相互穿插的现象，形成颗粒之间线接触、凹凸接触及缝合接触，从而降低岩石的孔隙度。

### (三) 胶结作用

胶结作用是指矿物质在碎屑沉积物孔隙中沉淀，形成自生矿物并使沉积物固结为岩石的作用。胶结作用的成岩效应是堵塞孔隙，但不减小粒间体积，这与压实作用的成岩效应有所差别。

实质上，胶结作用研究就是自生矿物形成的研究。碎屑岩储层中最常见的自生矿物有：①碳酸盐类矿物，如方解石、白云石、及菱铁矿等；②硅质岩和铝硅酸盐类，如石英、长石、粘土矿物等；③沸石类和硫酸盐类矿物，如石膏、硬石膏、重晶石等。

## 第二节 成岩作用和孔隙演化

碎屑沉积物刚一沉积，孔隙水就和颗粒发生反应。到底是矿物颗粒发生溶解，还是沉淀形成新的自生矿物，决定因素有两个：

- 一是矿物的饱和度，涉及到孔隙流体和岩石颗粒的成分；
- 二是矿物质和孔隙水之间的反应速度，受控于温度和压力。

### 1、胶结方式

矿物的胶结方式主要有孔隙充填、孔隙衬边、孔隙桥塞和加大式四类型（图4—8）。

- (1) 孔隙充填式胶结
- (2) 孔隙衬边式胶结
- (3) 孔隙桥塞式胶结
- (4) 加大式胶结

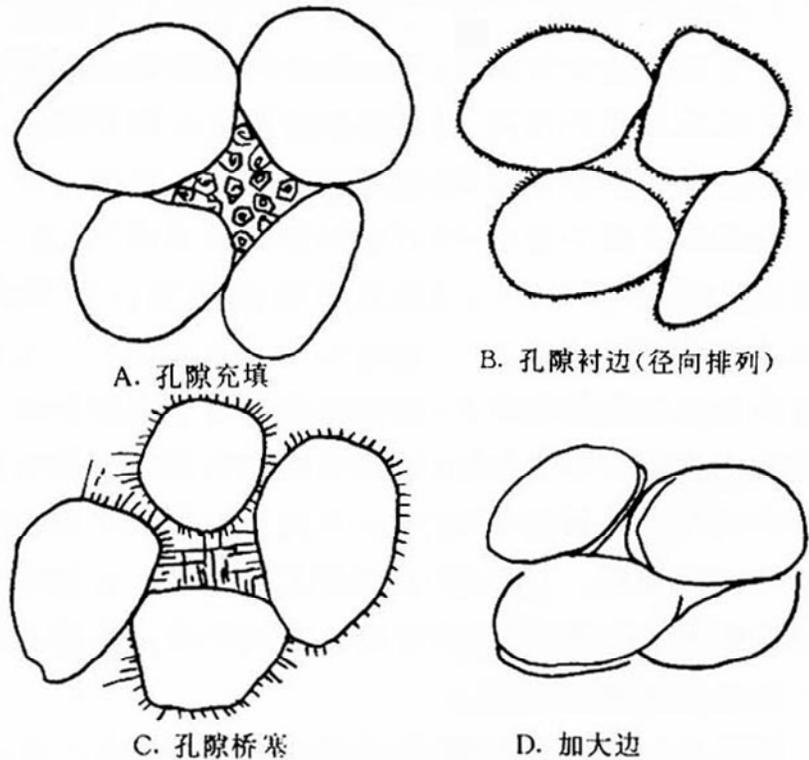


图4—8 自生胶结物的产状（引自吴胜和等，1998）



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



### 2、胶结作用

#### 1) 碳酸盐胶结作用

碳酸盐胶结物种类多，其中方解石是碳酸盐胶结物中最普遍的矿物，其次为白云石、铁白云石和菱铁矿等。孔隙水中含有一定数量的碳酸盐是碳酸盐胶结物形成的前提，适宜的物理化学条件（尤其是溶液的pH值）是碳酸盐胶结物沉淀的关键（郑浚茂等，1989）。在成岩过程中，碳酸盐胶结物可形成于不同的成岩阶段，并具有不同的特征（表4—11）。

表 4—11 不同成岩期形成的碳酸盐矿物特征（据周自立、朱国华，1992）

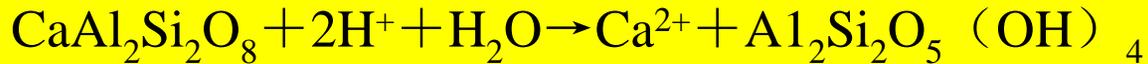
主要特征	早期碳酸盐矿物	晚期碳酸盐矿物
形成时期	主要压实期以前	主要压实期以后
矿物种类	方解石、白云石	铁方解石、铁白云石
结构特点	微晶或环边状	中、细晶、嵌晶及连晶
分布	少，常呈透镜状	呈层状，分布广
成岩作用性质	砂层孔隙水沉淀	埋藏成岩作用



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

碳酸盐溶解度对溶液的pH值极敏感，随着pH值的升高，其溶解度降低而发生碳酸盐沉淀，pH值的升降常与岩层中有机质在埋藏时被喜氧或厌氧细菌分解形成CO<sub>2</sub>有关。

由于钙长石的溶解和粘土矿物的形成，导致Ca<sup>2+</sup>活度的增加，从而引起方解石的沉淀，如钙长石高岭土化的变化所示：



该反应同时也提高了pH值，而使方解石的溶解度降低。另外，在含有NaCl的孔隙水中，钙长石向钠长石转变所发生的离子交换，也是一个增强Ca<sup>2+</sup>活度的反应：



该反应影响了氧化硅的活度，因此可引起了硅质的溶解，但并不影响pH值。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



### 2) 硅质胶结作用

氧化硅胶结物可以呈晶质和非晶质两种形态出现。硅质胶结最常见的形式是石英颗粒光性连续增生，即石英次生加大，常形成石英自形晶面，或相互交错连接的镶嵌状结构。通常将石英的次生加大分为四级：

- ▶ **I级加大：**在薄片下见少量石英具窄的加大边或自形晶面。
- ▶ **II级加大：**大部分石英和部分长石具次生加大，自形晶面发育，有的可见石英小晶体。
- ▶ **III级加大：**几乎所有石英和长石具次生加大，且加大边较宽，多呈镶嵌状。
- ▶ **IV级加大：**颗粒之间呈缝合接触，自形晶面基本消失。

石英次生加大对砂岩孔隙度的影响程度差异很大，这取决于石英次生加大的强度，当石英次生加大很强时，可使砂岩变为致密层或极低渗透层，失去储集性能。然而，我国东部中、新生代陆相断陷盆地中的长石砂岩，一般石英次生加大较弱，仅使孔隙度降低3%~5%，孔喉及渗透率降低并不很大。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



硅质胶结物的来自孔隙水，而孔隙水中溶解的 $\text{SiO}_2$ 可有不同的来源：

- ① 硅质生物骨骼的溶解；
- ② 火山玻璃蚀变和土壤水；
- ③ 粘土矿物的转变，蒙脱石随着埋深的增加，温压的升高，在向混层矿物和伊利石转化的过程释放出 $\text{SiO}_2$ ；
- ④ 硅酸盐矿物的溶解；长石风化，转变为高岭石可释放出 $\text{SiO}_2$ ；
- ⑤ 压溶作用。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

影响石英次生加大的因素很多，既有岩性因素——岩石矿物成分与结构，也有成岩环境和动力因素——温度、压力及流体（表4—12）。

表 4—12 影响石英次生加大强度的因素(据周自立、朱国华，1992)

影响因素		增强因素	抑制因素
岩性因素	支撑方式	颗粒支撑	杂基支撑
	石英碎屑含量	多	少
	原生孔隙度	高	低
	原生孔隙大小	大	小、
	碎屑薄膜胶结物	少	多
成岩环境与动力因素	地温	>60℃	<60℃
	地压	正常	异常压力
	流体性质	水层及油水层	油层

### 3) 粘土矿物的胶结作用

粘土矿物是砂岩的又一重要胶结物，几乎所有砂岩中都有一定量粘土填隙物，常见砂岩的粘土矿物胶结物有高岭石、伊利石，蒙脱石和绿泥石等，它们有自生的和他生的两种。他生的指来源于母岩的粘土矿物，自生的指就地生成或再生的粘土矿物，它们之间成分、结构及分布等方面存在着明显的差异。

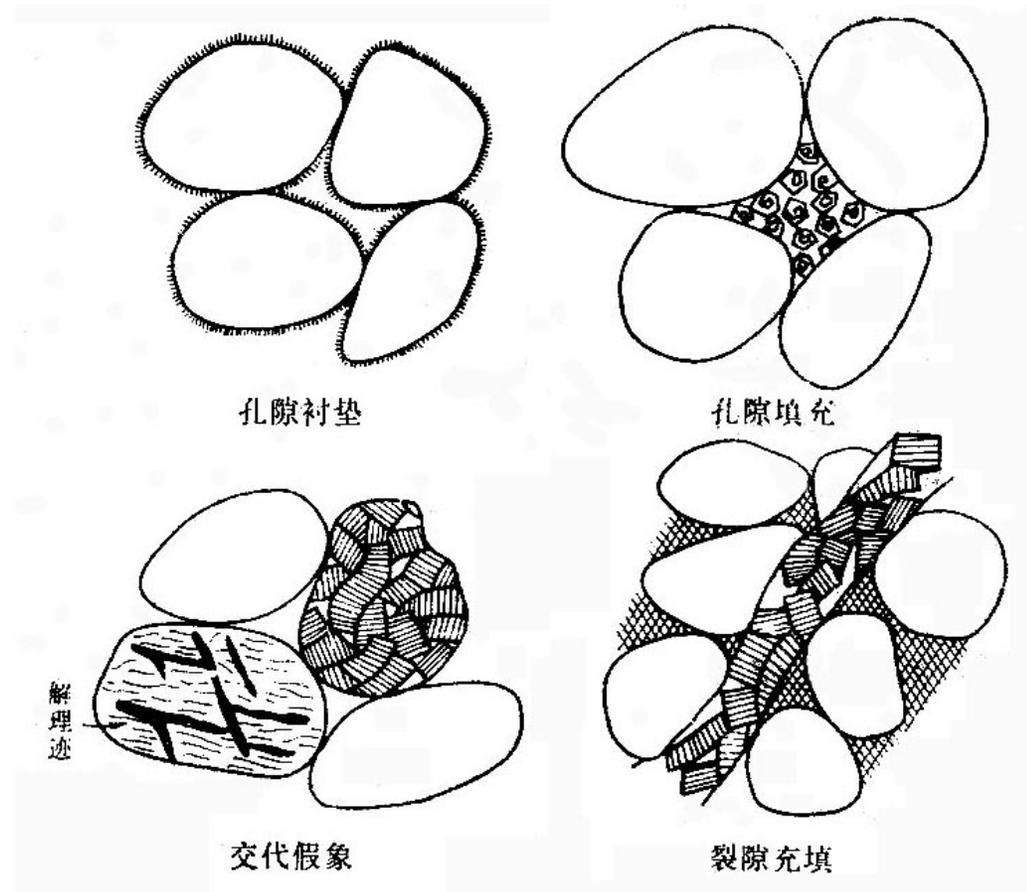


图 4—9 砂岩中自生粘土矿物的产出类型示意图 (据 M. wilson 等, 1977)

粘土矿物的产状通常有四种类型：①孔隙衬垫（也称粘土或颗粒包壳）；②孔隙填充；③交代假象；④裂缝和晶洞充填（图4—9）。





## 第二节 成岩作用和孔隙演化



### 3、胶结物对储集性能的影响

自生胶结物对储层的影响，总的趋势是使孔隙和喉道变小，使孔隙形态复杂化，因而降低了其储集性能，严重的致使岩石丧失储集能力而成为非储层。

显然，胶结物含量越多，对储层的储集性能影响越大。在实际工作中，常用胶结率来定量表示胶结作用对砂体孔隙性的影响：

$$\text{胶结率} = (\text{胶结物含量} / \text{原始孔隙体积}) \times 100\%$$

值得重视的是，胶结作用对岩石储集性能的影响最主要的是表现在对渗透率的降低，喉道胶结作用则会大大降低岩石的渗透率（因渗透率与喉道半径的平方成反比）。

### 4、压实与胶结的相互关系

成岩过程中，压实作用和胶结作用是使孔隙度降低的最重要的成岩作用类型，但两者降低孔隙度的方式不同，并**互相制约**。压实作用不可逆地减小岩石的粒间体积，胶结作用虽然堵塞孔隙，但不减少粒间体积，胶结作用如果进行得快，压实作用就会受阻。

- 被压实作用减小的原始孔隙百分比 =  $(40 - \text{粒间体积}) / 40 \times 100\%$

- 被胶结作用消除的原始孔隙百分比 =  $(\text{胶结物} / 40) \times 100\%$



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

### (四) 溶解与交代作用

广义上的溶解作用是指地下水溶液对岩石组份的溶解过程，通常可分为两类：

- ▶ 一是固相均匀溶解，部是使未溶解固相的新鲜面成分不变；
- ▶ 另一种溶解为选择性溶解；岩石组分的不一致溶解，所形成新矿物的化学组成与被溶解矿物相近，如长石高岭石化。

前者多称为溶解，后者称为溶蚀。交代是矿物被溶解，同时被孔隙沉淀出来的矿物所置换，新形成的矿物与被溶矿物没有相同的化学组分，如方解石交代石英。

砂岩中矿物的溶解和沉淀主要与孔隙水中有机酸和碳酸的浓度及 $\text{CO}_2$ 浓度有关。同时也受地温和其他物理化学因素控制。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

在成岩环境中，碎屑岩储层中的无机成岩作用与烃源岩的有机成岩作用有密切关系，二者相互促进，影响许多成岩作用的发展及成岩阶段的演化。

研究表明，沉积物中的有机质在埋藏成岩阶段能产生大量有机酸：

- 温度低于80，有机酸含量低；
- 温度高于80，油田水中有机酸的含量呈指数增加；
- 温度高于120时，有机酸将发生脱羧或部分脱羧作用。

有机酸脱羧产生 $\text{CO}_2$ 控制了水溶液的pH值，使之有利于溶蚀作用进行，如果产生羧酸的高峰期略早于液态烃的生成时间，那么流经烃源岩临近砂层的羧酸可引起碳酸盐、铝硅酸盐的溶蚀，促使次生孔隙发育，提高储层的孔隙度和渗透率。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



### 三、次生孔隙形成的机理

碎屑岩中次生孔隙从成因上讲包括三大类：**一是由溶解（或溶蚀）作用所形成的次生溶孔；二是由成岩收缩作用形成的收缩裂缝；三是由构造应力作用形成的构造裂缝**（图4—11）。

#### （一）次生孔隙的成因类型

Schmit等（1979）对次生孔隙的成因进行了详细的分类（表4—15）。从成因上讲上，由溶解作用形成的次生孔隙可分为三类：

##### 1、沉积物溶解产生的孔隙

它是很常见也很重要的一种类型，由可溶性颗粒和可溶性基质（表4—16）的选择性溶解而形成。这些可溶性物质的溶解可以产生大量的孔隙。

##### 2、自生胶结物溶解产生的孔隙

是最常见的一种次生孔隙类型。溶解的胶结物大多是碳酸盐矿物，如方解石、白云石和菱铁矿，也有绿泥石、蒙脱石、沸石、硬石膏等（表4—16）。这些胶结物在溶解前可能存在于任何原生和次生孔隙中，而胶结物的溶解则可使孔隙重新开启和连通。

##### 3、自生交代矿物溶解产生的孔隙

是由交代沉积组分的可溶性矿物，主要是方解石、白云石、菱铁矿等（表4—16），经选择性溶解而形成；在砂岩次生孔隙中占有一定的比例。



# 第二节 成岩作用和孔隙演化

表 4—15 次生孔隙成因类型 (据 Schmit 等, 1979)

成岩作用		次生孔隙量
岩石破裂作用		少数、个别地层较多
颗粒破裂作用		很少
收缩作用		少数
溶解作用	方解石	较多
	白云石	多
	菱铁矿和铁白云石	较多
	蒸发岩	少数、个别地层较多
	长石	较多
	其它铝硅酸盐	较多
	氧化硅矿物	多

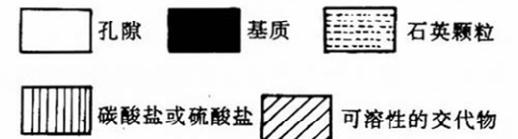
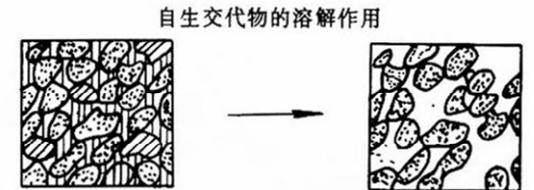
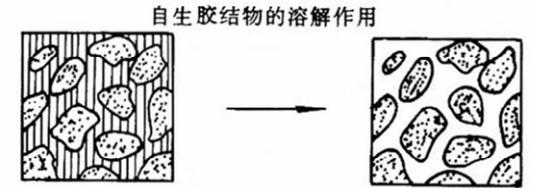
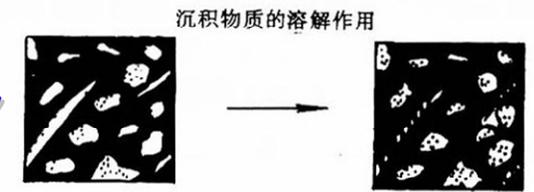


图 4—11 砂岩次生孔隙的成因类型

(据 Schmidt, 1979)

## 第二节 成岩作用和孔隙演化

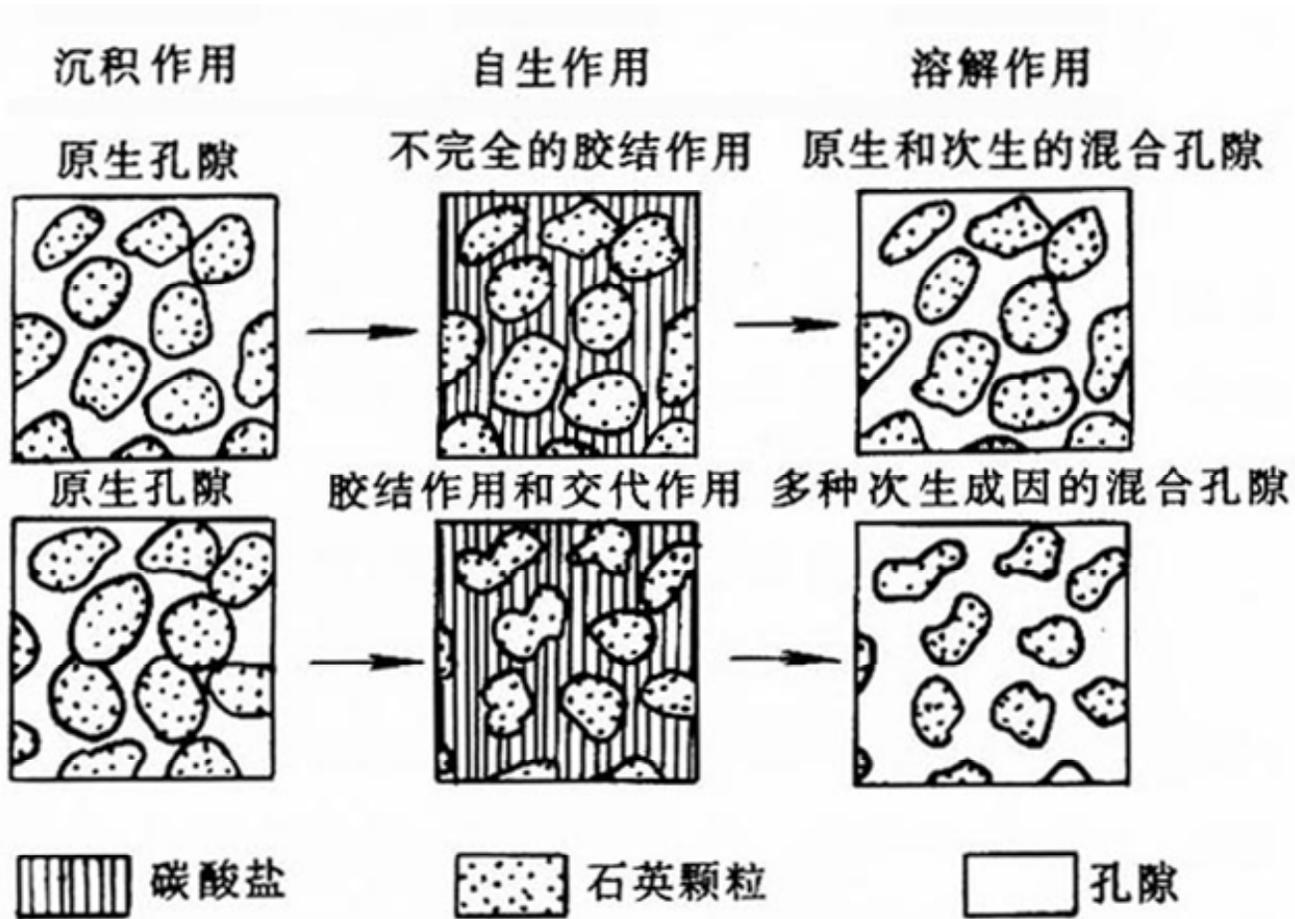


图4—12 混合孔隙发育示意图 (据Schmidt, 1979)



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

### (二) 次生孔隙的形成机理

溶蚀作用是形成次生孔隙的主要成岩过程，无论是碳酸盐还是硅酸盐，其溶蚀作用都是地层中的水溶液（孔隙流体）和岩石在一定温度与压力下相互反应的结果。

众所周知，酸溶性组分的溶解构成了碎屑岩储层中最主要的次生孔隙，导致酸溶性组分溶解的观占主要有两种：一是含碳酸的水溶液引起的溶解；另一是有机酸，主要是短链羧酸——脂肪酸引起的溶解。

#### 1、孔隙中的溶解流体

对地下岩石矿物进行溶解作用的流体主要有大气淡水、有机酸、酚及碳酸。大气淡水对岩石矿物的影响主要发生在地表和近地表，通过断层和裂缝可延伸至地下深处；有机酸、酚、碳酸则是在地下，其作用范围主要在地下的岩层中。

##### 1) 大气淡水

当盆地的构造运动，将地层抬升暴露地表或浅埋时，地层会遭到大气淡水的淋滤，或淡水沿沉积间断和不整合对地层进行淋滤与溶解；造成开启性无机酸水溶液的水循环，其作用范围主要在浅处地层中。只有当断层和裂缝与深部地层连通并开启时，才对深部地层产生作用。由于大气淡水为酸性水，含CO<sub>2</sub>，且pH值低，因而对碳酸盐、长石、黑云母等矿物有溶解作用。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化



### 2) 有机酸和酚

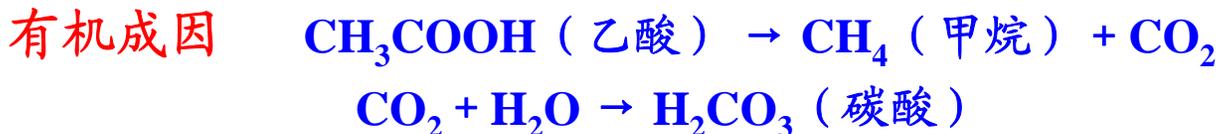
有机酸和酚是导致岩石组分溶解的重要溶剂，油田水中普遍存在含量较高的短链水溶性的一元、二元羧酸，即有机酸，也称脂肪酸。油田水中的主要羧酸类型为乙酸、丙酸，乙二酸和丙二酸。

有机酸和酚主要来自有机质的演化。干酪根的 $^{13}\text{C}$ 核磁共振和红外光谱资料表明：

- ①干酪根可通过热降解脱去含氧官团而产生有机酸；
- ②也可通过岩石中的矿物氧化剂（粘土矿物中的 $\text{Fe}^{3+}$ 、多硫化物和颗粒表面的氧化剂）的氧化形成有机酸。

### 3) 碳酸

碳酸的形成有二种机理，即有机成因和无机成因。





## 第二节 成岩作用和孔隙演化



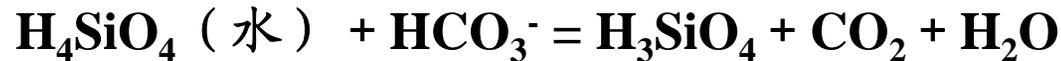
### 2、碳酸对矿物的溶解作用

1) 对方解石的溶解  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 (\text{水}) = 2\text{HCO}_3^- (\text{水}) + \text{Ca}^{2+} (\text{水})$

2) 对长石的溶解 长石的溶解作用随流体中所含 $\text{CO}_2$ 浓度的增加而增加。



### 3) 对氧化硅的溶解



硅质的溶解主要存在三种机理:

- ①在长石的溶解中，由于 $\text{H}^+$ 的消耗使溶液的pH值升高；
- ②在反应中由于硅酸和 $\text{HCO}_3^-$ 离子之间反应，使硅质和水置换到有利于石英溶解；
- ③随温度增加石英溶解度增大。



## 第二节 成岩作用和孔隙演化

### 3、有机酸对矿物的溶解作用

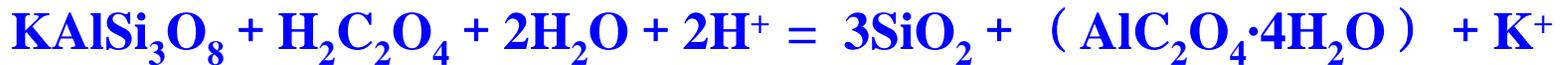
#### 1) 对碳酸盐的溶解

在醋酸存在的条件下，对方解石的溶解：



#### 2) 对硅酸盐的溶解

假设长石和草酸的成岩反应如下：



因此，足够的有机酸来源和充足的水体流动是非常必要的。

由此可以得出，在一定温压条件下，有机酸对硅酸盐易溶，对碳酸盐难溶；无机酸对碳酸盐易溶，对硅酸盐难溶的结论。

提出有机酸脱羧基作用对硅酸盐矿物的大量溶解，而对碳酸盐矿物不溶或难溶的地温范围在100~130℃，压力系数介于1.2~1.3±，这在我国东部许多油田中可以得到证实。从化学反应平衡的原理不难理解，其反应如下：





## 第二节 成岩作用和孔隙演化



### (三) 次生孔隙形成的影响因素

- ① 充足的水体能量和良好的渗透性对次生孔隙的形成非常有利。无论是碳酸还是有机酸对矿物的溶解都需要足够的水，这只能通过水的不断流动来弥补原生水的不足和水的酸溶性；
- ② 富有机质的生油岩和潜在的储层尽量靠近，只有这样才可使泥岩中产生的酸性溶液顺利地进入砂岩中，并且途中损失少；
- ③ 砂泥比是保证有足够酸来源的一重要指标，泥岩过少，则产酸量不够。反之，如果过多，则是低能环境、砂岩的渗透性不好；
- ④ 干酪根的热演化史决定了酸的生产深度，这是预测次生孔隙垂向分布规律的一个关键。

## 第二节 成岩作用和孔隙演化

### (四) 次生孔隙的识别标志

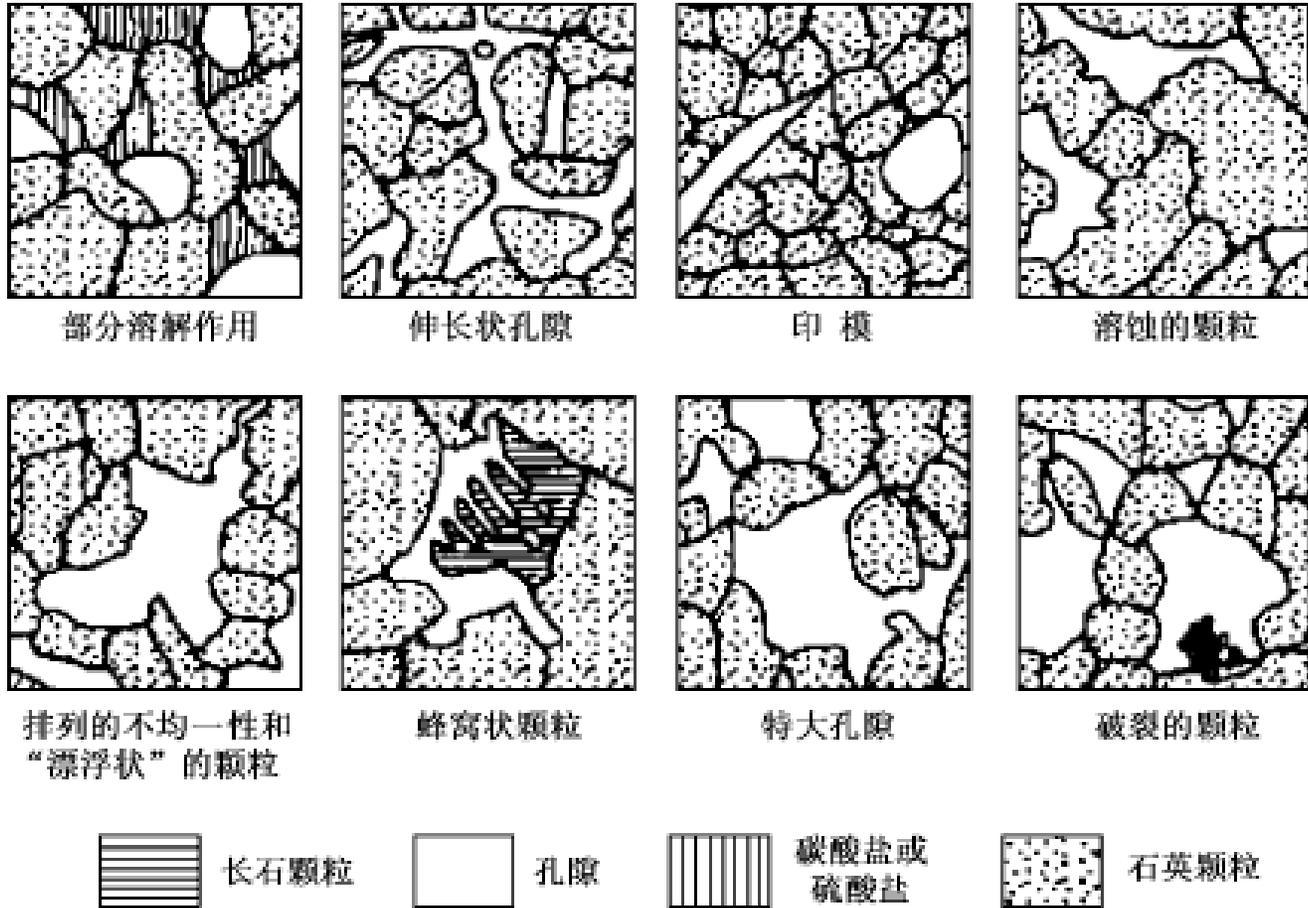


图 6-11 鉴别砂岩次生孔隙的岩石学标志 (据 Schmidt 等, 1979)



# 第三节 碳酸盐岩成岩作用及孔隙演化



## 一、成岩作用类型

根据成岩作用对原生孔隙的影响及对次生孔隙和裂缝的控制，可将成岩作用类型分为二类：

(1) 破坏孔隙的成岩作用：包括胶结作用、机械压实作用、压溶作用、重结晶作用和沉积物充填作用等；

(2) 有利于孔隙形成和演化的成岩作用：包括溶解作用、白云石化作用、生物和生物化学成岩作用、破裂作用等。

表 6-20 碳酸盐岩成岩作用与孔隙的形成和破坏 (据吴胜和, 1998)

成岩期	成岩作用	成岩效应	储集空间	
同生准同生期	建设性	大气淡水溶解作用	碳酸盐、蒸发盐溶解	溶孔、角砾孔隙
		生物掘穴作用	形成洞穴网络	洞穴
		生物化学作用	藻丛腐烂	窗格状孔隙
		成岩收缩作用	干裂、化学收缩	收缩缝
	破坏性	白云石化作用	方解石-白云石	晶间孔隙
		胶结作用	孔隙度降低	
		沉积物充填作用	孔隙度降低	
		新生变形作用	文石-方解石	
埋藏成岩期	建设性	重结晶作用	白云石化后白云石连锁镶嵌	
		构造破裂作用	伸拉破碎和挤压破碎	
		白云石化作用	局限于裂缝、断层附近	
	破坏性	溶解作用	局限于裂缝、断层附近	
		压实作用	塑性变形、孔隙度附近	
		压溶作用	颗粒变形、缝合接触	
		胶结作用	孔隙度降低	
		重结晶作用	孔隙度降低	
表生成岩期	建设性	挤压作用	颗粒重新排列、缝合化	
		去载破裂作用	形成裂缝	裂缝
		岩溶作用	形成溶孔、溶洞、溶缝	溶孔、溶洞、溶缝
	破坏性	风化成土作用		孔隙网络
		沉积物充填作用	孔隙度降低	
	去白云化作用	斑点状胶结作用		



### 二、碳酸盐岩孔隙演化

碳酸盐岩储层孔隙的成因既有原生的、也有次生的，但是相对于碎屑岩来说，**其多数孔隙是次生的**，即由于次生溶蚀作用或生物、化学作用形成的各种孔隙和溶洞。原生孔隙仅在礁灰岩、生物滩及颗粒灰岩中存在，但这些原生孔隙也因碳酸盐岩的成岩作用强而被改造或充填。

据研究（吴胜和，1998），有利于碳酸盐岩孔隙保存的因素主要有以下几点：

- 1、较小的埋藏深度
- 2、超孔隙压力
- 3、岩石骨架强度的增加
- 4、渗透性屏障的存在
- 5、油气早期侵位



## 第四节 成岩序列与演化模式

### 一、碎屑岩储层成岩作用阶段的划分

#### (一) 术语和定义

- 1. 成岩阶段:** 指碎屑沉积物沉积后经各种成岩作用改造, 直至变质作用之前所经历的不同地质历史演化阶段。可划分为同生成岩阶段、早成岩阶段、中成岩阶段、晚成岩阶段和表生成岩阶段。
- 2. 同生成岩阶段:** 沉积物沉积后尚未完全脱离上覆水体时发生的变化与作用的时期称同生成岩阶段。
- 3. 表生成岩阶段:** 指处于某一成岩阶段弱固结或固结的碎屑岩, 因构造抬升而暴露或接近地表, 受到大气淡水的溶蚀, 发生变化与作用的阶段。

#### (二) 成岩阶段划分依据

- 1. 自生矿物的特征**
- 2. 粘土矿物组合、伊利石/蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物的转化**
- 3. 岩石的结构、构造特点及孔隙类型**
- 4. 有机质成熟度指标**
- 5. 古温度**



# 第四节 成岩序列与演化模式

表 4—19 碎屑岩成岩阶段划分规范(修改)

同生成岩期		(1) 海绿石、鲕绿泥石的形成; (2) 同生结核的形成; (3) 平行层理面分布的菱铁矿微晶及斑块状泥晶; (4) 分布于粒间和颗粒表面的泥晶碳酸盐																									
埋藏成岩		最高古地温 (°C)	有机质			粘土岩		砂岩固结程度	砂岩中自生矿物										溶解作用			接触类型	孔隙类型				
期	亚期		R <sub>o</sub> (%)	孢粉颜色 TAI	成熟带	I/S 中 S 层 (%)	混层类型分带		蒙皂石 (S)	S/I S/C 混层	高岭石 (K)	伊利石 (I)	绿泥石 (C)	石英加大级别	方解石	铁白云石	长石加大	钠长石化	浊沸石	楣石	石硬石膏			长石及岩屑	碳酸盐	沸石类	
成岩期	早成岩	A	常温 ~65	< 0.35	淡黄 <2	未成熟	>70	蒙皂石带	弱固结																	点	原生孔发育
		B	65~85	0.35~0.5	黄 2.0 ~2.5	半成熟	70 ~ 50	无序混层带	半固结—固结					1												状	原生孔及少量次生孔
	晚成岩	A	85~140	0.5~1.3	桔黄—棕 0.25 ~3.7	成熟	50 ~ 15	有序混层带	固结																		点—线状
B		140~170	1.3~2.0	棕黑 3.7~4	高成熟	≤15	超序点混层阵层有带							3												线—缝合状	次生孔减少、并出现裂缝
C		170~200	2.0~4.0	黑 >4	过成熟	混层消失	绿伊利石带							4												缝合状	裂缝发育
风化—表生成岩期		(1) 含低价铁的矿物(如黄铁矿、菱铁矿、铁白云石、铁方解石、云母、绿泥石、海绿石等)的褐铁矿化; (2) 褐铁矿的浸染现象; (3) 碎屑颗粒表面的高价铁的氧化膜; (4) 新月形碳酸盐胶结物及重力胶结; (5) 渗流填充物; (6) 表生钙质结核; (7) 硬石膏的石膏化; (8) 表生高岭石; (9) 溶解孔洞																									

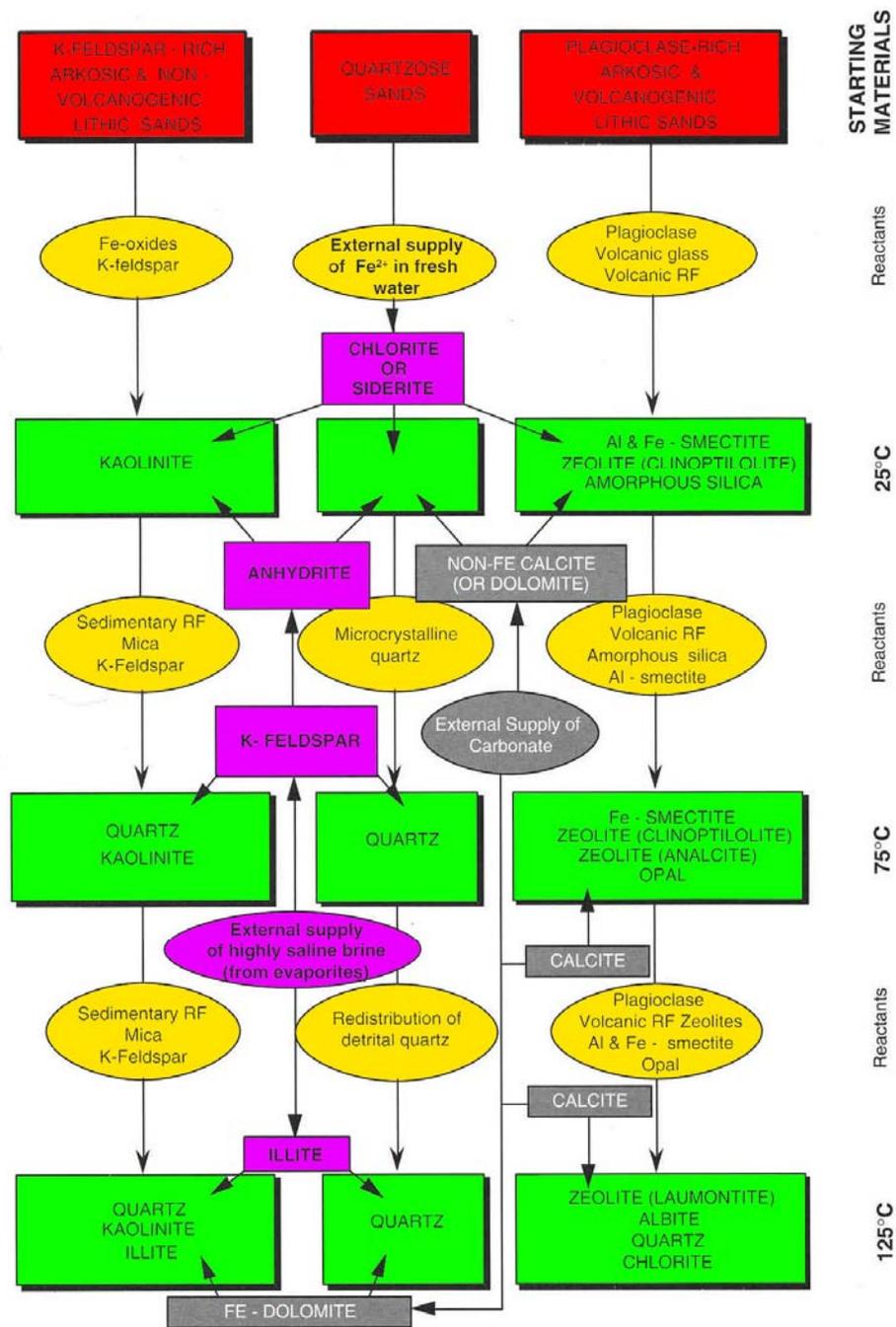


Figure 9. Flow chart illustrating the combined control of sediment composition, depositional environment, and burial temperature on diagenetic cements in sandstones.



# PY30-1-3井

CMP=2D;TH=THF;MAT=TTI  
TG=1;TI=0.5;EXP=None;PRM=MKC  
CNV=Tab



## 单井盆模的孔隙度变化

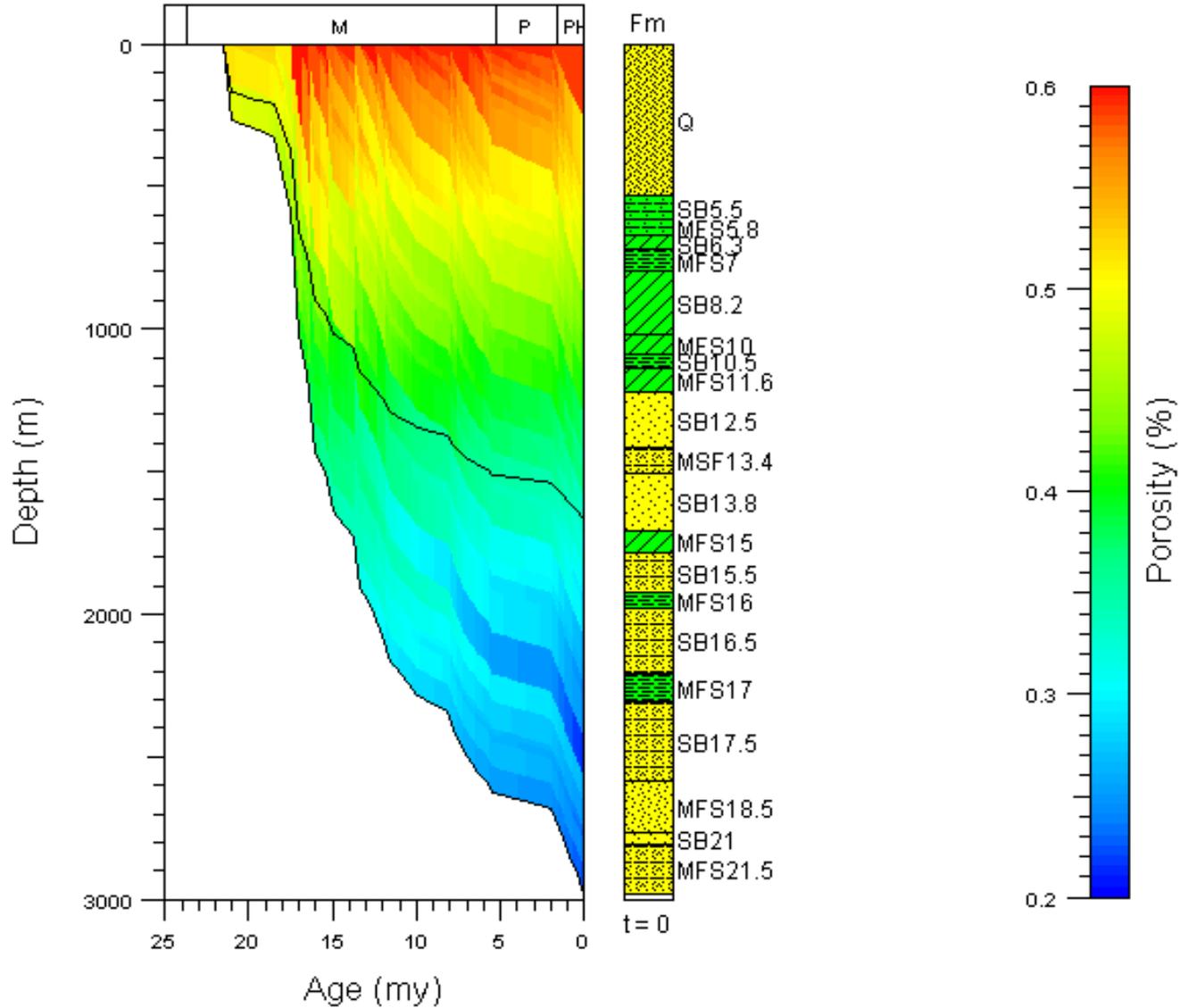


图 5-1 PY30-1-3 井孔隙度随埋藏史变化图



# PY30-1-3井

CMP=2D;TH=THF;MAT=TTI  
TG=1;TI=0.5;EXP=None;PRM=MKC  
CNV=Tab



## 单井盆模的渗透率变化及储盖组合特征

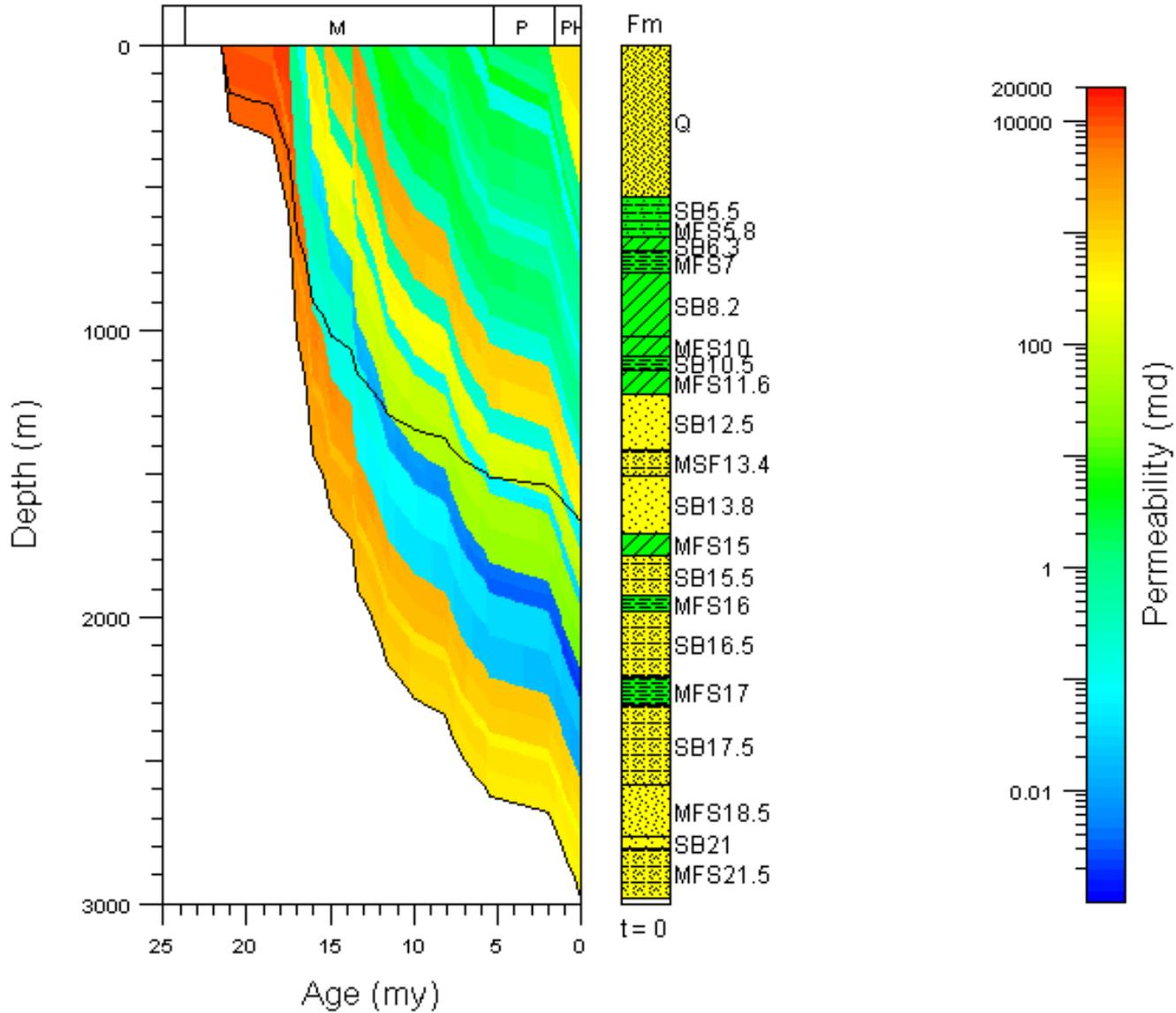


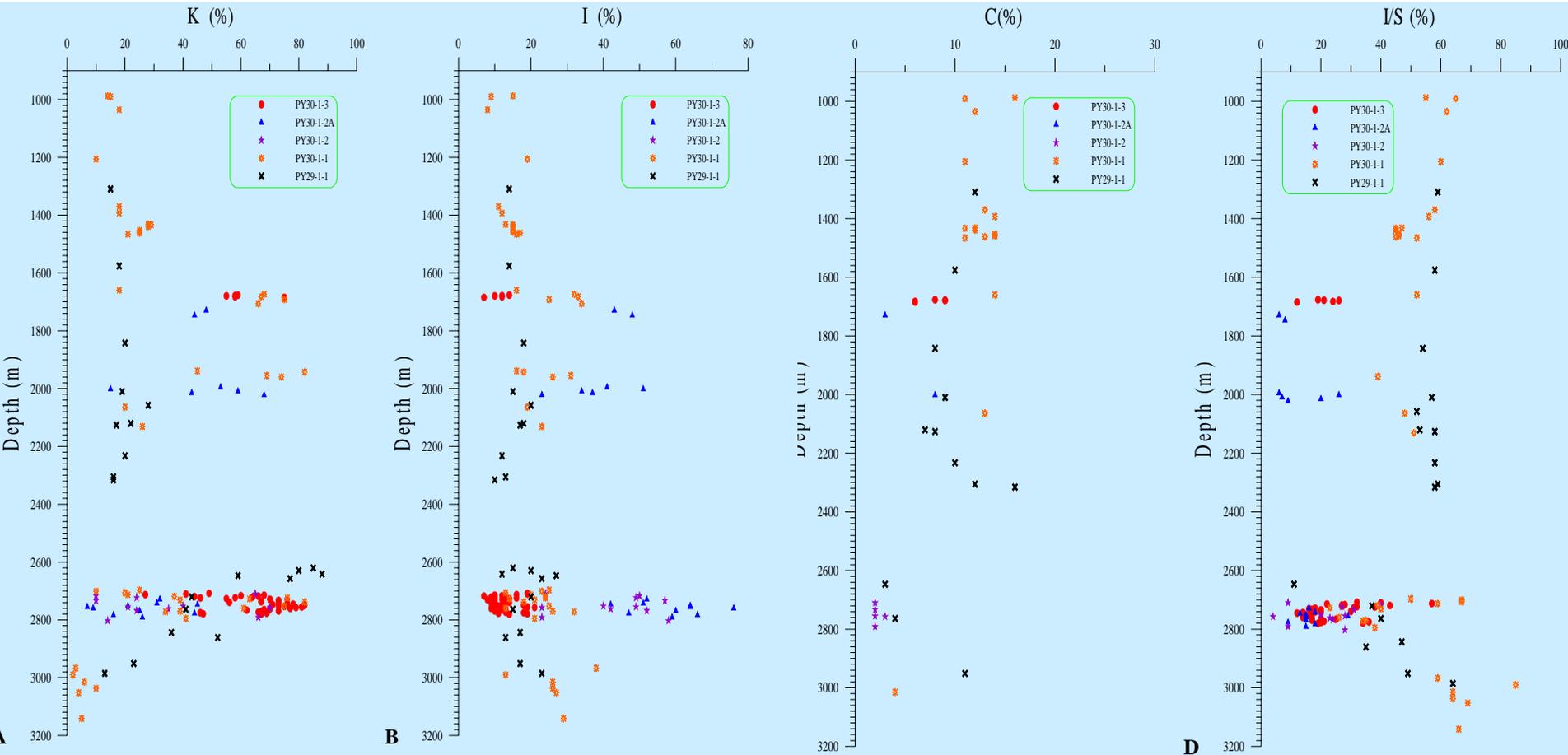
图 5-2 PY30-1-3 井渗透率随埋藏史变化图



# 第四节 成岩序列与演化模式



## 二、成岩作用对储层的影响



PY30-1气田储层粘土矿物随深度的变化



## 第四节 成岩序列与演化模式

### 二、成岩作用对储层的影响

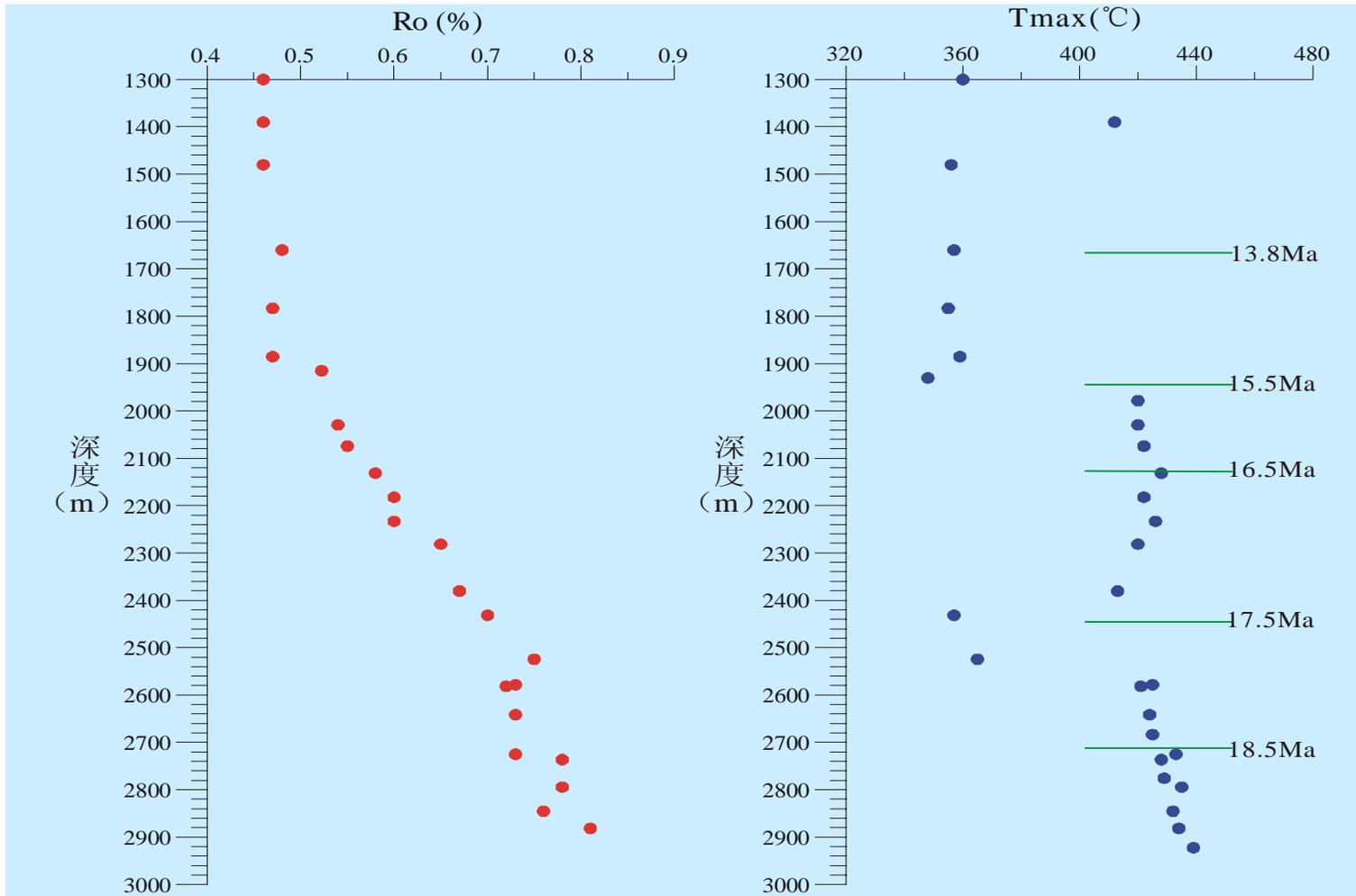
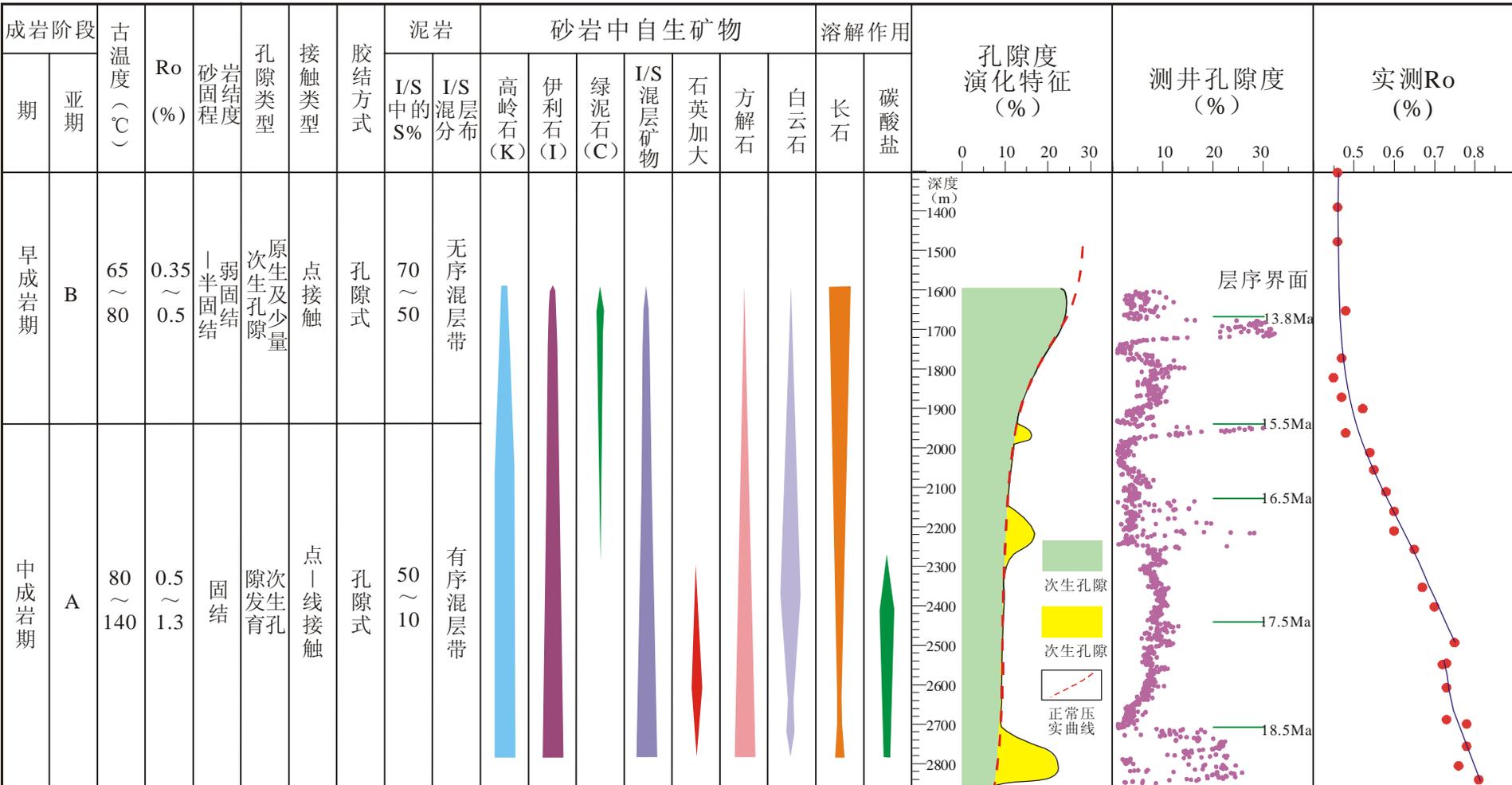


图 4-6 PY3-1-3 井镜质体反射率  $R_o$  与  $T_{max}$  随深度变化散点图

# 第四节 成岩序列与演化模式

## 三、成岩演化序列



PY30-1-3井成岩序列图

# 第四节 成岩序列与演化模式

## 三、成岩演化序列

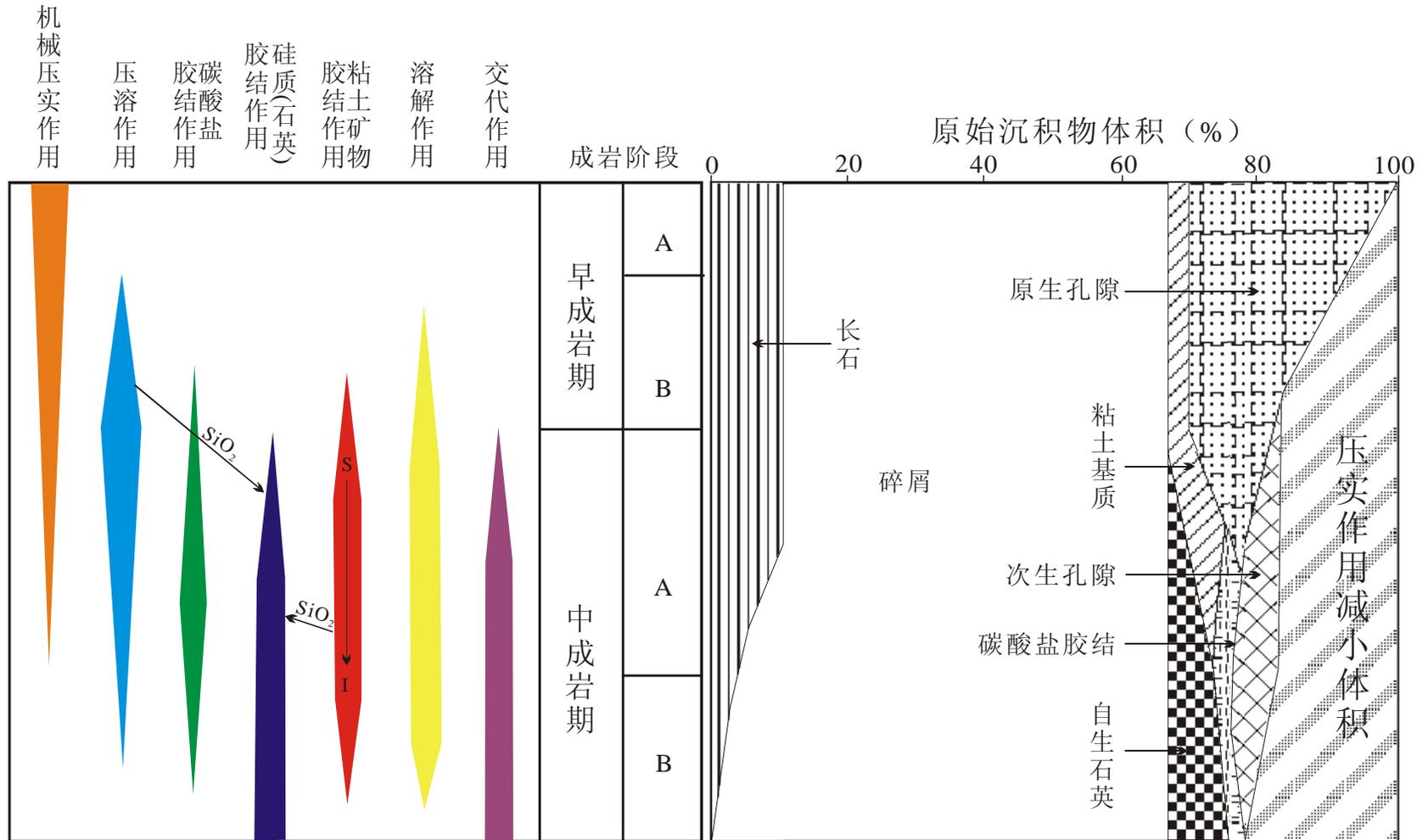


图 4-7 PY30-1-3 井石英砂岩成岩过程及孔隙演化模式图

# 四、成岩演化模式



溶解作用



硅质沉淀



压实作用



固结作用



压实与胶结



淋滤作用

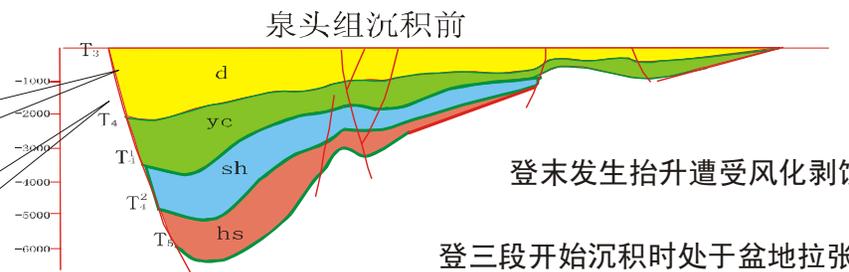
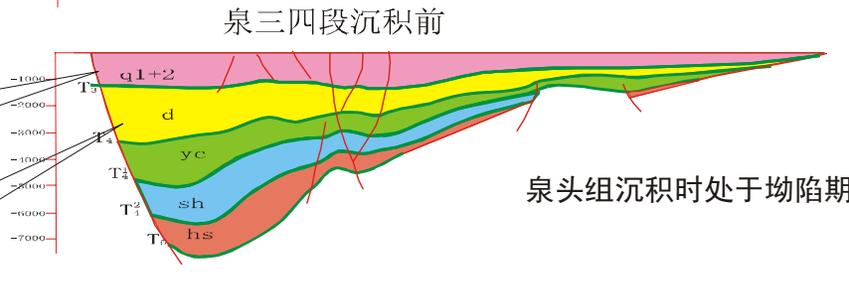
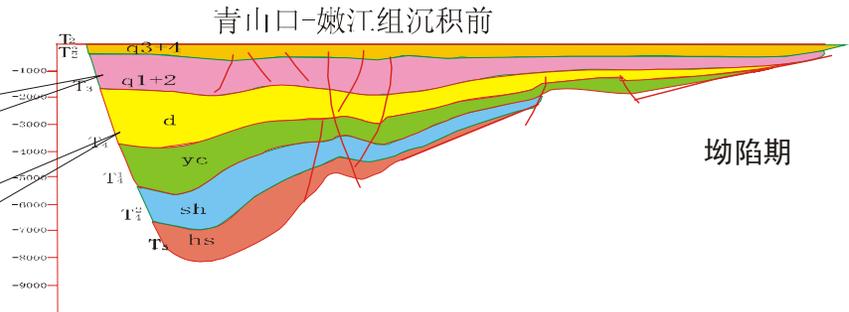
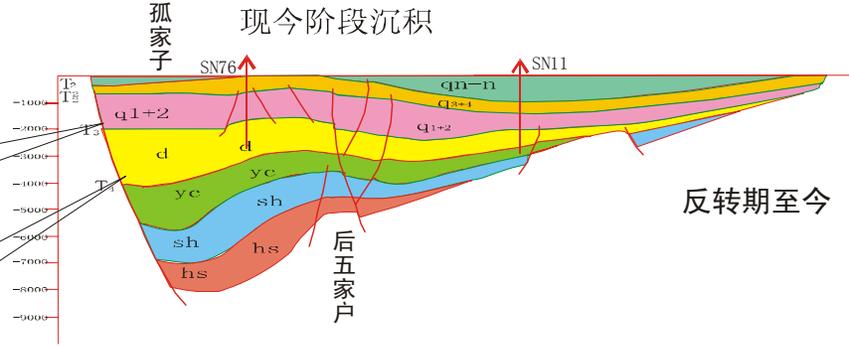
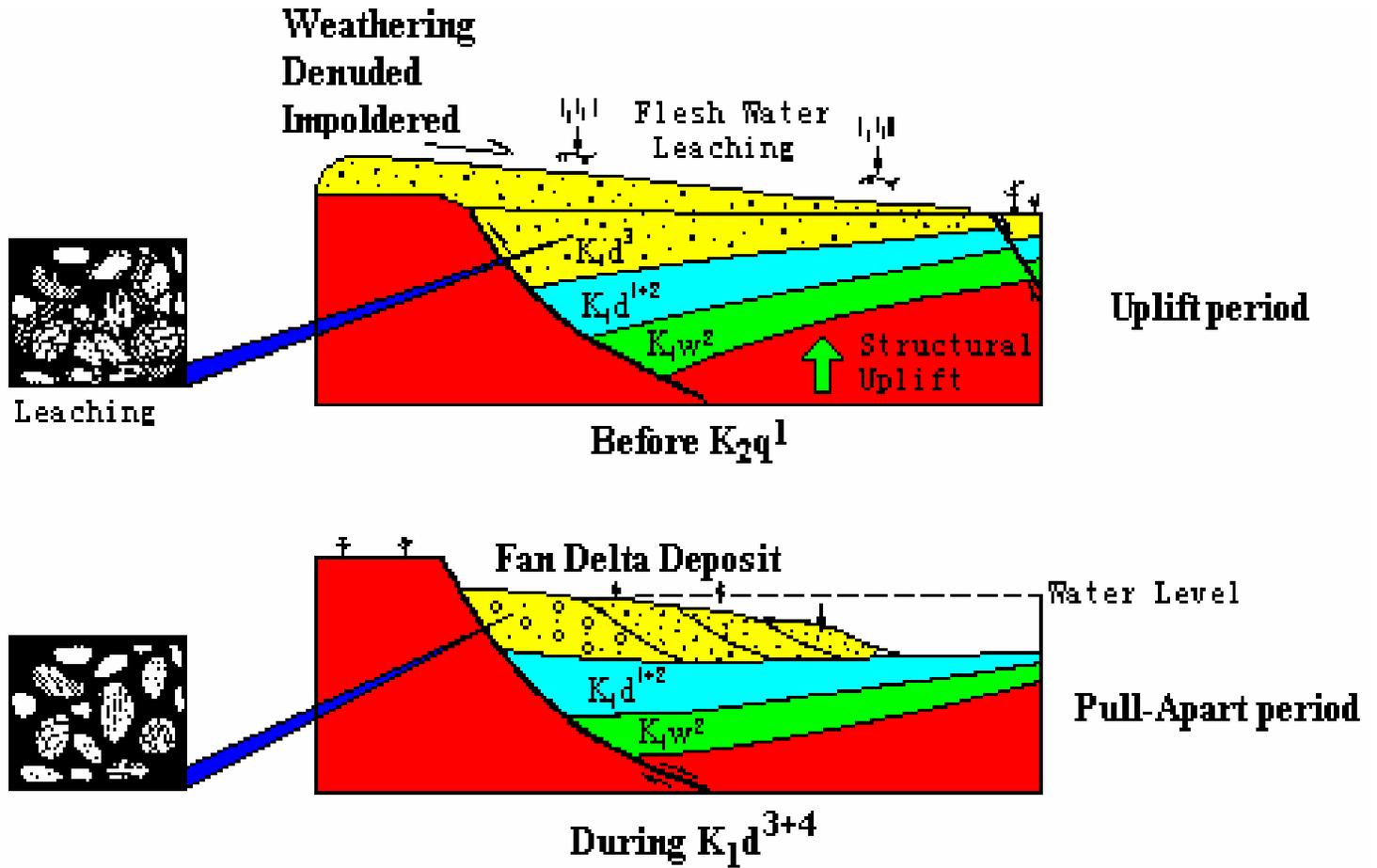


图6 孤家子-八屋南地区成岩演化模式图

# 第四节 成岩序列与演化模式

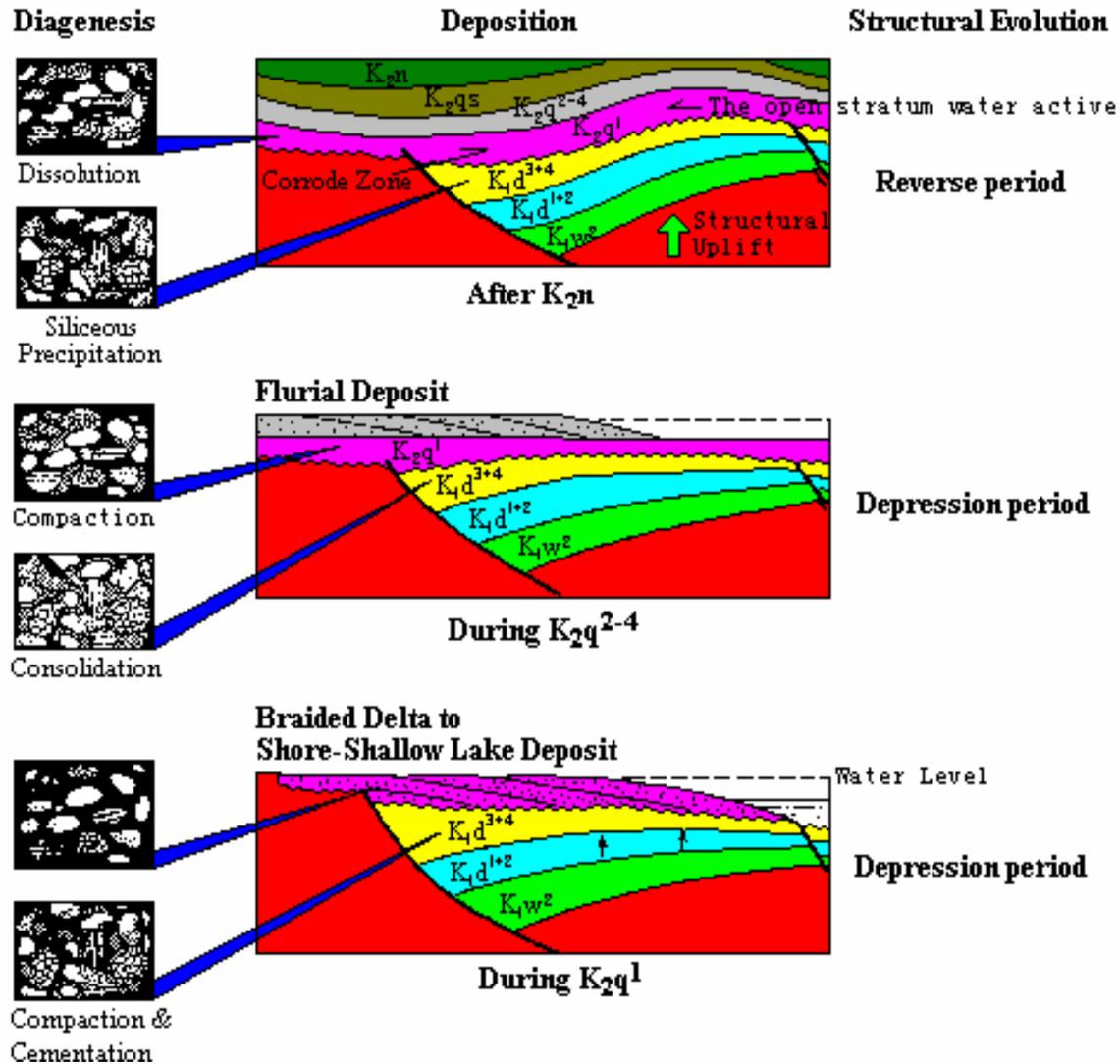
## 四、成岩演化模式



松辽盆地南部十屋断陷构造、沉积、成岩综合一化模式

# 第四节 成岩序列与演化模式

## 四、成岩演化模式



松辽盆地南部十屋断陷构造、沉积、成岩综合一化模式



# 思考题

- 1、次生孔隙形成的原因主要有哪些？
- 2、碎屑岩的成岩作用可以划分为哪几个阶段？每个阶段各有什么标志？
- 3、碎屑岩储层成岩作用有哪几种？分别对孔隙有什么影响？
- 4、压实作用和胶结作用有什么异同点？
- 5、如何识别次生孔隙？
- 6、碳酸盐岩的成岩作用有哪几种？
- 7、碳酸盐岩的成岩阶段有哪些？各阶段的特点是什么？