



# 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)





# 第八章 储层敏感性分析

第一节 储层敏感性机理

第二节 储层敏感性评价

第三节 开发过程中储层性质的动态变化



## 第一节 储层敏感性机

- **储层损害**是由储集层内部潜在损害因素及外部条件共同作用的结果。
- **内部潜在损害因素**主要指储集层的岩性、物性、孔隙结构、敏感性极流体性质等储集层固有的特征。
- **外部条件**主要指的是在施工作业过程中引起储层孔隙结构及物性的变化，使储集层受到损害的各种外界因素。
- 一般而言，**储集层的敏感性是由储层岩石中含有的敏感性矿物所引起的**。敏感性矿物是指储集层中与流体接触易发生物理、化学或物理化学反应并导致渗透率大幅下降的一类矿物。
- **常见的敏感性矿物**可分为水敏性矿物、酸敏性矿物、碱敏性矿物、盐敏性矿物及速敏性矿物等（表8-1），与之相对应的是层的五敏（表8-2）。



# 第一节 储层敏感性机

表8-1 可能损害地层的几类敏感性矿物（据张绍槐，罗平亚，1990）

敏感性类型	敏感性矿物		损害形式	
水敏性	绿泥石-蒙脱石 蒙脱石 降解绿泥石	伊利石-蒙脱石 降解伊利石 水化白云母	晶格膨胀 分散运移	
酸敏性（含高pH值碱敏性）	HCl	蠕绿泥石 绿泥石-蒙脱石 海绿石 水化黑云母	铁方解石 铁白云石 赤铁矿 黄铁矿 菱铁矿	化学沉淀 $Fe(OH)_3 \downarrow$ 非晶质 $SiO_2 \downarrow$ 酸蚀释放出微粒运移
	HF	方解石 白云石 钙长石	沸石类：浊沸石 钙沸石、斜钙沸石 片沸石、辉沸石 各类粘土矿物	化学沉淀 $CaF_2 \downarrow$ 非晶质 $SiO_2 \downarrow$
	pH > 12	钾长石、钠长石、微晶石英、石髓（玉髓）、斜长石、各类粘土矿物 蛋白石-CT、蛋白石-A（非晶质）		硅酸盐沉淀 硅凝胶体
流速敏感性	高岭石、毛发状伊利石、微晶石英 微晶白云母、降解伊利石、微晶长石		分散运移 微粒运移	
结 垢	石膏、重晶石、硫铁矿、方解石、赤铁矿、天青石、硬石膏、岩盐、菱铁矿、磁铁矿		盐类沉淀	



# 第一节 储层敏感性机

表8-2 储层的五敏性

储层五敏	含义	形成因素
速敏性	流速增加引起渗透率下降造成地层的损害	粘结不牢固的速敏矿物在高流速下分散、运移而堵塞孔隙和喉道
水敏性	与地层不配伍的流体使地层中粘土矿物变化引起的地层损害	流体使地层中蒙皂石等水敏性矿物发生膨胀、分散而导致孔隙和喉道的堵塞
盐敏性	储层在盐液作用下渗透率下降造成地层损伤	盐液进入地层引起盐敏性粘土矿物的膨胀而堵塞孔隙和喉道
酸敏性	酸液与地层酸敏矿物反应产生沉淀使渗透率下降	盐酸或氢氟酸与含铁高或含钙高的矿物反应生成沉淀而堵塞孔隙引起渗透率降低
碱敏性	碱液在地层中反应产生沉淀使渗透率下降	地层矿物与碱液发生离子交换形成水敏性矿物或直接生成沉淀物质堵塞孔隙



# 第一节 储层敏感性机

## 一、储层的速敏性

- 储层因外来流体流动速度的变化引起地层微粒迁移，堵塞喉道，造成渗透率下降的现象称为储层的速敏性。
- 速敏性研究的目的在于了解储层的临界流速及渗透率的变化与储层中流体流动速度的关系。

### (一) 速敏矿物与地层微粒

速敏矿物是指在储层内，随流速增大而易于分散迁移的矿物。高岭石、毛发状伊利石以及固结不紧的微晶石英、长石等，均为速敏性矿物。如高岭石，常呈书页状（假六方晶体的叠加堆积），晶体间结构力较弱，常分布于骨架颗粒间而与颗粒的粘结不坚固，因而容易脱落、分散，形成粘土微粒。



# 第一节 储层敏感性机



➤ 地层内部可迁移的微粒包括三种类型：

- 1、储层中的粘土矿物，包括速敏性粘土矿物（高岭石、毛发状伊利石等）和水敏性粘土矿物（蒙皂石、伊/蒙混层）等，水敏性矿物在水化膨胀后，受高速流体冲击即会发生分散迁移；
- 2、胶结不坚固的碎屑微粒，如胶结不紧的微晶石英、长石等，常以微粒运移状堵塞孔隙喉道；
- 3、油层酸化处理后被释放出来的碎屑微粒，如硫酸盐矿物（石膏、重晶石、天青石）、硫铁矿、岩盐等，由于温度和压力变化，引起溶解和再沉淀，或入侵滤液与地层流体发生有机垢（石蜡、沥青）和无机结垢（ $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{FeCO}_3$ 、 $\text{BaSO}_4$ 、 $\text{SrSO}_4$ ）而堵塞孔隙喉道。



# 第一节 储层敏感性机

## (二) 外来流体速度对微粒迁移和孔喉堵塞的影

➤ 地层微粒堵塞孔喉通常存在三种形式:

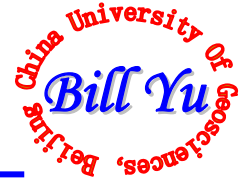
- 1、细粒物质在喉道处平缓地沉积 (Smooth Deposition) ;
- 2、微粒在喉道产生“桥堵” (Pore Bridging) , 堵塞流动通道;
- 3、较大颗粒恰好嵌入喉道, 形成“卡堵” (Size Exclusion) 。

当外来流体的流速过大或存在压力激烈波动时, 与喉道直径较匹配的微粒开始移动. 一方面这部分微粒可以在喉道处形成较稳定“桥堵”, 另一方面由于此时流速较大, 成“桥”过程中流体对微粒的击力也较低速时强. 因此, 导致岩石中的喉道在较短时间大量地被塞, 造成多孔介质渗透能力骤然减小, 此时的流速即为临界流速 (8-1) 。 临界流速所标志的并不是微粒运移的开始, 而是稳定“桥堵”的形成。





# 第一节 储层敏感性机理



流速增加将导致岩石渗透率的大幅度降低，其渗透率的伤害可达原始渗透率的20-50%，甚至超过50%。当流速超过一定值时，启动的微粒粒径过大，与喉道直径不匹配，难于形成新的“桥堵”，而随着流速的进一步增加，高速流体冲击着微粒和“桥堵”，一部分微粒可能被流体带出岩石，从而使渗透率回升（图8-1）。

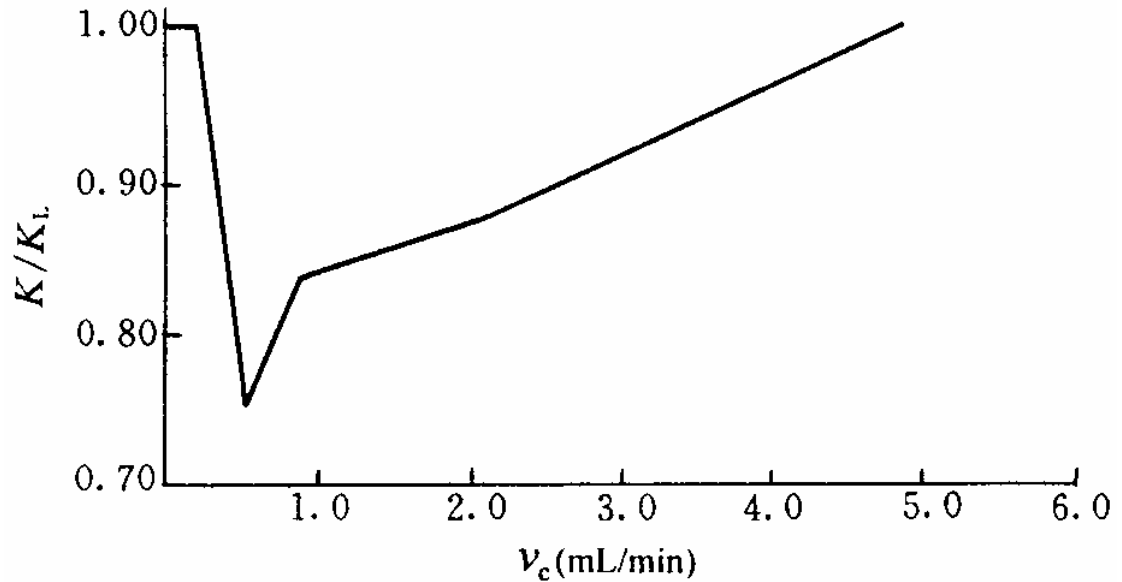


图8—1 岩石流动实验曲线



# 第一节 储层敏感性机理

## (三) 流体性质对速敏性的影响

- 对速敏性有影响的流体性质主要为**盐度、pH值以及流体中的分散剂**，这些性质对水敏性粘土矿物的分散迁移影响较大。
  - 低盐度的流体使水敏性粘土矿物水化、膨胀和分散，它们较低的流速下便会发生迁移，并可堵塞喉道，从而导致岩临界流速值减小；同时，由于水敏性粘土在低盐度流体中水化膨胀，在高速流体冲击下易于分散，这样，不仅释放更多更细小的粘土微粒，而且释放出由粘土矿物作为胶结的其它矿物颗粒，从而使地层微粒数量增加，使速敏性增强。
  - 分散剂对速敏性的影响与高pH值流体相似。钻井液滤液是强的粘土分散剂之一，由此引起的粘土分散导致的渗透率损害不容忽视。



# 第一节 储层敏感性机理

## (四) 储层物性对速敏性的影响

- 储层物性对速敏性也有一定的影响，尤其是喉道的大小、几形状对储集层的伤害尤为明显。
  - 比如大孔粗喉型的砂岩储集层，喉道是孔隙的缩小部分、孔喉直径比值接近于1，一般不易造成喉道堵塞，但容易造成出砂。而对于喉道变细的砂岩储集层、孔隙喉道直径差别特别大，喉道多呈片状、弯片状或束状，易形成微粒堵塞喉道。



# 第一节 储层敏感性机理

## 二、储层的水敏性

**储层的水敏性**是指当与地层不配伍的外来流体进入地层后，引起粘土矿物水化、膨胀、分散、迁移，从而导致渗透率不同程度地下降的现象。储层水敏程度主要取决于储层内粘土矿物的类型及含量。

大部分粘土矿物具有不同程度的膨胀性。在常见粘土矿物中，蒙皂石的膨胀能力最强，其次是伊/蒙和绿/蒙混层矿物，而绿泥石膨胀力弱，伊利石很弱，高岭石则无膨胀性。

储层水敏性与粘土矿物的类型和含量以及流体矿化度有关。储层中蒙皂石（尤其是钠蒙皂石）含量越多及水溶液矿化度愈低，则水敏强度愈大。



## 三、储层的盐敏性

- **储层盐敏性 (salt sensibility)** 是指储层在系列盐液中，由于粘土矿物的水化、膨胀而导致渗透率下降的现象。储层盐敏性实际上是储层耐受低盐度流体的能力的度量，度量指标即为**临界盐度**。
- 当不同盐度的流体流经含粘土的储层时，在开始阶段，随着盐度的下降，岩样渗透率变化不大，但当盐度减小至某一临界值时，随着盐度的继续下降，渗透率将大幅度减小，此临界点的盐度值称为**临界盐度**。

粘土膨胀过程可分两个阶段：

- 第一阶段是由表面水合能引起的，即外表面水化膨胀；
- 第二阶段被称为渗透膨胀阶段，即内表面水化阶段。



## 第一节 储层敏感性机理

### 四、储层的酸敏性

- **酸敏性 (acid sensibility)** 是指酸液进入储层后与储层中的酸敏性矿物发生反应，产生凝胶、沉淀，或释放出微粒，致使储层渗透率下降的现象。
- 酸敏性导致地层损害的形式主要有两种，
  - 一是产生化学沉淀或凝胶，
  - 二是破坏岩石原有结构，产生或加剧速敏性。
- **酸敏矿物**是指储层中与酸液发生化学沉淀或酸化后释放出微粒引起渗透率下降的矿物。一般地，酸化处理中，多用盐酸处理碳酸盐岩油层和含碳酸盐胶结物较多的砂岩油层，用土酸（盐酸和氢氟酸的混合物）处理砂岩油层（适用于碳酸盐含量较低、泥质含量较高的砂岩油层）。所以酸化过程中的酸液包括盐酸（HCl）和氢氟酸（HF）两类。



## 第一节 储层敏感性机理

### 五、储层的碱敏性

- **碱敏性 (natron sensibility)** 是指具有碱性 (pH值大于7) 油田工作液进入储层后, 与储层岩石或储层流体接触而发生反应产生沉淀, 并使储层渗流能力下降的现象。
- 碱性工作液通常为pH值大于7的钻井液或完井液, 以及化学驱中使用的碱性水。这些流体进入储层, 使其产生碱敏性的机理主要为:
  - 粘土矿物在碱性工作液中发生离子交换, 成为较易水化的型粘土, 使粘土矿物的水化膨胀加剧, 导致水敏性。





## 五、储层的碱敏性

- 碱性工作液还会与储层矿物发生一定程度的化学反应，与碱的反应活性从高到低依次为：高岭石、石膏、蒙皂土、伊利石、白云石和沸石，而长石，绿泥石和细石英砂的反应活性中等。碱与矿物反应的结果不仅导致阳离子交换，甚至有可能生成新的矿物。

例如：



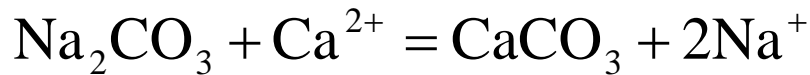
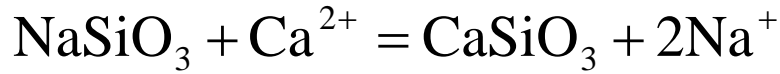
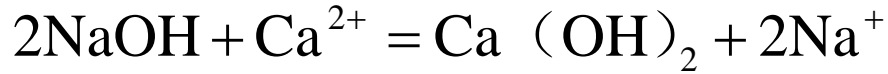
这些新生矿物沉积在储层中，导致起渗透率损害。

- 由于碱性工作液与储层矿物或储层流体不配伍，破坏了储层原有的离子平衡，产生碱垢，降低储层的渗透率。





## 第一节 储层敏感性机理



- 高pH值环境使矿物表面双电层斥力增加，部分与岩石基质未胶结的或胶结不好的地层微粒，将随碱性工作液运移，并在喉道处“架桥”，堵塞孔喉。

**五敏实验是评价和诊断油气层伤害的最重要的手段之一。**

一般来说，对每一个区块，都应该做五敏实验，再参照表8-6进行完井过程中保护油气层技术方案的制定，并指导生产。



# 第一节 储层敏感性机理

表8-6 五敏实验结果的应用

项目	实验结果及其应用
速敏实验 (包括由速敏和水速敏)	<ul style="list-style-type: none"><li>(1) 确定其它几种敏感性实验(水敏、盐敏、酸敏、碱敏)的实验流速;</li><li>(2) 确定油井不发生速敏伤害的临界产量;</li><li>(3) 确定注水井不发生速敏伤害的临界注入速率, 如果注入速率太小, 不能满足配注要求, 应考虑增注措施;</li><li>(4) 确定各类工作液允许的最大密度。</li></ul>
水敏实验	<ul style="list-style-type: none"><li>(1) 如无水敏, 则进入地层的工作液之矿化度只要小于地层水矿化度即可, 不做严格要求;</li><li>(2) 如果有水敏, 则必须控制工作液的矿化度大于 <math>Cc1</math>;</li><li>(3) 如果水敏性较强, 在工作液中要考虑使用粘土稳定剂。</li></ul>
盐敏实验 (升高矿化度和降低矿化度的实验)	<ul style="list-style-type: none"><li>(1) 对于进入地层的各类工作液都必须控制其矿化度在两个临界矿化度之间, 即 <math>Cc1 &lt; \text{工作液矿化度} &lt; Cc2</math>;</li><li>(2) 如果是注水开发的油田, 当注入水的矿化度比 <math>Cc1</math> 要小时, 为了避免发生水敏伤害, 一定要在注入水中加入适合的粘土稳定剂, 或对注入水进行周期性的粘土稳定剂处理。</li></ul>
酸敏实验	<ul style="list-style-type: none"><li>(1) 为基质酸化之酸液配方设计提供科学的依据;</li><li>(2) 为确定合理的解堵方法和增产措施提供依据。</li></ul>
碱敏实验	<ul style="list-style-type: none"><li>(1) 对于进入地层的各类工作液都必须控制其pH值在临界pH值以下;</li><li>(2) 如果是强碱敏地层, 由于无法控制水泥浆的pH值在临界pH之下, 为了防止油气层伤害, 建议采用屏蔽式暂堵技术;</li><li>(3) 对于存在碱敏性的地层, 要避免使用强碱性工作液。</li></ul>



## 六、储层的水锁效应

在油气开发过程中，钻井液、固井液及压裂液等外来流体侵入储层后，由于毛细管力的滞留作用，地层驱动压力不能将外来流体完全排出地层，储层的含水饱和度将增加，油气相渗透率将降低，这种现象称之为**水锁效应**。

### ➤ 造成水锁效应的原因有内外两方面的因素：

- 储层孔喉细小、存在敏感性粘土矿物，是造成外来流体侵入引起含水饱和度和上升而使油水渗透率下降的**内在原因**；
- 侵入流体的界面张力、润湿角、流体粘度以及驱动压差和外来流体侵入深度等则是**外部因素**。

➤ 水锁效应大小的决定因素为**储层毛管半径**。解决水锁效应的最佳途径是减小外来流体侵入储层的总量及深度，而加大返排压差，采用低粘度、低毛管力入井液是减轻水锁效应的有效途径。



# 第一节 储层敏感性机理

## 七、储层的应力敏感性

- 岩石所受净应力改变时，孔喉通道变形、裂缝闭合或张开，导致岩石渗流能力变化的现象叫做**岩石的应力敏感性**，它反映了岩石孔隙几何学及裂缝壁面形态对应力变化的响应。
- 当前的应力敏感性研究均以渗透率的应力敏感性为研究重点。
- 在不同的储层中，渗透率的应力敏感程度差异较大，影响储层渗透率应力敏感性的主要因素包括（表8-7）：

表8-7 储层应力敏感性的影响因素

影响因素	作用效果
储层渗透率	初始渗透率越小，应力敏感性越强
储层岩石类型	岩石硬度越小，应力敏感性越强
胶结类型和程度	胶结程度越低，应力敏感性越强
流体饱和度	含流体饱和度越大，应力敏感性越强
泥质和杂质含量	泥质和杂质含量越大，应力敏感性越强



## 第一节 储层敏感性机理

- ① **储层渗透率**：大量研究表明，储层初始渗透率越小，那么储层渗透率随有效应力的变化越显著，储层渗透率应力敏感性越强。
- ② **储层岩石类型**：储层岩石颗粒的硬度越大，岩石越不易被压缩，因此其应力敏感性越弱，反之亦然。
- ③ **胶结类型和程度**：岩石胶结得越好，越不易变形，渗透率变化就越不明显。
- ④ **液体饱和度**：储层岩石饱和液体后，其孔喉表面会附着一层不可流动的液体。当岩石受到压缩时，这些不可流动层加剧了岩石渗透性能的降低，因此，含水或含油饱和度越大，其应力敏感性越强。
- ⑤ **泥质和杂质含量**：相比岩石颗粒而言，泥质和杂质是非常容易变形的，而且它们很容易堵塞孔喉，造成渗透率的明显降低。因此，泥质和杂质含量增大，渗透率的应力敏感性显著增强。



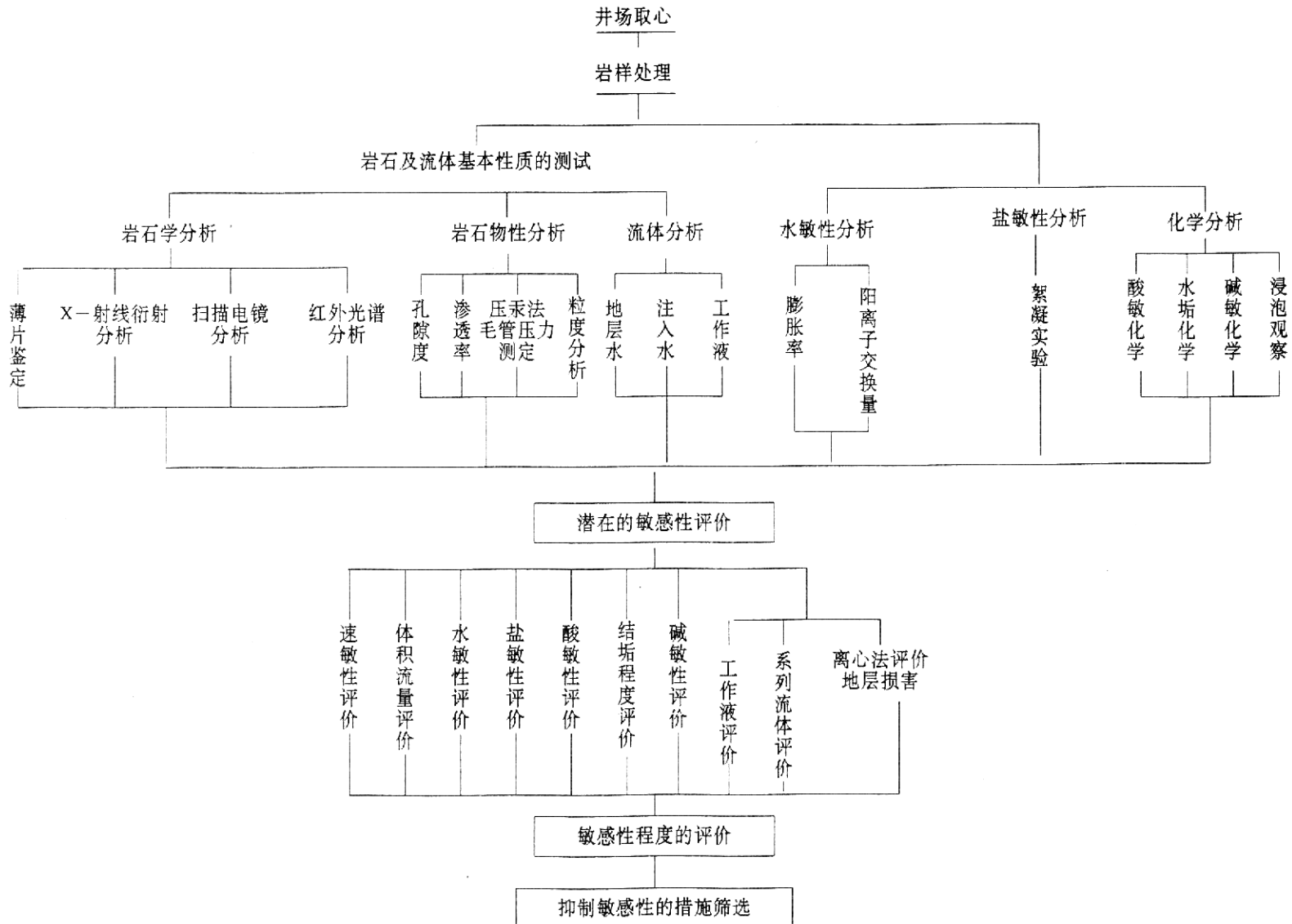
## 第二节 储层敏感性评价

- 对储层的各种敏感性进行研究和评价的目的是为开发生产过程中免各种敏感性的发生，保护油气储层。在储层伤害评价研究中，层敏感性评价是最主要的手段之一。
- 储层敏感性评价包括两方面的内容：
  - 一是从岩相学分析的角度，评价储层的敏感性矿物特征，研究储层潜在的伤害因素；
  - 二是在岩相学分析分析的基础上，选择代表性的样品，进行敏感性实验，通过测定岩石与各种外来工作液接触前后渗透率的变化，来评价工作液对储层的伤害程度。



## 第二节 储层敏感性评价

图8-2 储层敏感性评价研究流程（据陈丽华等，1994）





## 第二节 储层敏感性评价

### 一、潜在敏感性分析

#### (一) 储层岩石基本性质的测试

- 通过岩石学和常规物性等分析，了解储层的敏感性矿物的类型和含量、孔隙结构、渗透率等，预测其与不同流体相遇时可能产生的损害。
- 岩石基本性质的测试项目包括：**岩石薄片鉴定、X衍射分析、毛管压力测定、粒度分析、阳离子交换试验等。**

#### 1、岩石薄片鉴定

岩石薄片鉴定可以提供岩石的最基本性质，了解敏感性矿物的存在与分布。鉴定的内容包括：**①碎屑颗粒；②胶结物；③自生矿物和重矿物；④生物或生物碎屑；⑤含油情况；⑥孔隙、裂缝；⑦微细层理构造**





表8-8 储层矿物与敏感性（据姜德全等，1994，有修改）

敏感性矿物	潜在敏感性	敏感性程度	产生敏感性的条件	抑制敏感性的办法
蒙皂石	水敏性 速敏性 酸敏性	3 2 2	淡水系统 淡水系统、较高流速 酸化作业	高盐度流体、防膨剂酸处理 酸敏抑制剂
伊利石	速敏性 微孔隙堵塞 酸敏 ( $K_2SiF_6$ )	2 2 1	高流速 淡水系统 HF酸化	低流速 高盐度流体、防膨剂 酸敏抑制剂
高岭石	速敏性 酸敏 ( $Al(OH)_3 \downarrow$ )	3 2	高流速，高pH值及高瞬变压力 酸化作业	微粒稳定剂 低流速、低瞬变压力 酸敏抑制剂
绿泥石	酸敏 ( $Fe(OH)_3 \downarrow$ ) 酸敏 ( $MgF_2 \downarrow$ )	3 2	富氧系统，酸化后高pH值 HF酸化	除氧剂 酸敏抑制剂
混层粘土	水敏性 速敏性 酸敏性	2 2 1	淡水系统 高流速 酸化作业	高盐度流体、防膨剂 低流速 酸敏抑制剂
含铁矿物（铁方解石、铁白云石、黄铁矿、菱铁矿）	酸敏 ( $Fe(OH)_3 \downarrow$ ) 硫化物沉淀 酸敏 ( $Fe(OH)_3 \downarrow$ )	2 1	高pH值，富氧系统； 流体含 $Ca^{2+}$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Ba^{2+}$ ， 高pH值，富氧系统	酸敏抑制剂，除氧剂 除垢剂 酸敏抑制剂、除氧剂
方解石（白云石）	酸敏 ( $CaF_2 \downarrow$ )	2	HF酸化	HCl预冲洗 酸敏抑制剂
沸石类	酸敏 ( $CaF_2 \downarrow$ )	1	HF酸化	酸敏抑制剂
钙长石	酸敏	1	HF酸化	酸敏抑制剂
非胶结的石英、长石微粒	速敏	2	高流速 高的瞬变压力	低流速 低的瞬变压力

注：3—强；2—中；1—较弱。



## 第二节 储层敏感性评价

### 2、X衍射分析

X—衍射分析是鉴定微小的粘土矿物最重要的分析手段。

### 3、扫描电镜分析

- 观察并确定粘土矿物及其它的胶结物的类型、形状、产状、分布；
- 观察岩石孔隙结构特别是喉道的大小、形态及喉道壁特征；
- 了解孔隙结构与各类胶结物、充填物及碎屑颗粒之间的空间联系。

### 4、粒度分析

- 细小颗粒运移是造成储层伤害的重要原因，因此，需要了解碎屑岩中的颗粒粒度大小和分布。
- 对于比较疏松易于分散的碎屑岩的粒度分析，通常采用筛析法和沉降法。对于泥质以外的胶结物，分析前要用盐酸等化学药品进行处理。



## 第二节 储层敏感性评价

### 5、常规物性分析

测定岩石的孔隙度、渗透率和流体饱和度，选择低孔低渗储层进行敏感性专项实验。

### 6、毛管压力测定

通过毛细管压力测定获取孔隙结构参数。岩石的孔隙结构在评价储层敏感性中十分重要。通常孔隙结构较差（孔喉尺寸较小、孔喉分布不均匀）的岩石受到的损害比孔隙结构较好的岩石明显。



## 第二节 储层敏感性评价

### (二) 流体分析

在油气勘探和开发的各个环节，外来流体与地层流体之不同外来流体之间均存在发生化学反应的可能性。因此，应对有关流体进行化学成分分析，预测各种流体之间形成化学结垢的可能性。这些流体主要是地层水、注入水、泥浆滤液、射孔液等。



## 第二节 储层敏感性评价

### (三) 水敏性预分析

通常测定岩石的膨胀率和阳离子交换能力，定性地预测岩石水敏性的可能程度（表8-9）。

表8-9 水敏性分析指标

水敏性程度	水敏粘土含量%	膨胀率%	阳离子交换量mg (当量) /100g
弱	0 ~ 10	0 ~ 3	0 ~ 1.4
中	10 ~ 20	3 ~ 10	1.4 ~ 4
强	> 20	> 10	> 4



## 第二节 储层敏感性评价

### 1、岩石的膨胀试验

- 粘土矿物经过液体浸泡，就会有水分子进入粘土矿物层间，造成粘土体积膨胀。
- 粘土膨胀测定的方法主要有两大类：
  - 一种比较简单的量筒法；
  - 另一种方法是通过膨胀仪测定的。

### 2、阳离子交换实验

- 通过阳离子交换实验，测定阳离子交换容量等特征，用于判断岩石所含粘土矿物颗粒吸附各种添加剂的能力、粘土的水化膨胀和分散性等。这对研究储层的水敏性很有用。
- 影响离子交换作用反应程度的因素有：所含粘土矿物的种类、结晶程度、有效粒级、该类粘土矿物及水溶液的阳离子（或阴离子）化学性质，以及该体系中的PH值。



## 第二节 储层敏感性评价

### (四) 酸敏性预分析

通过酸溶分析和浸泡观察，研究静态条件下岩样可能产生的酸敏性。

#### 1、酸溶分析

酸溶分析的目的是通过静态实验，检验酸-岩反应过程中是否存在产生二次沉淀的可能性。酸溶失率是指酸溶后岩样失去的重量与酸溶前岩样重量的百分率（ $R_w$ ）。

$$R_w = \frac{W_o - W}{W_o}$$

式中  $R_w$ ——酸溶失率（%）；  
 $W_o$ ——酸溶前岩样重量（g）；  
 $W$ ——酸溶后岩样重量（g）。

#### 2、浸泡观察

分别用盐酸、土酸、氯化钾溶液和蒸馏水浸泡岩样，观察是否有颗粒胶结或骨架坍塌等现象。并可进行显微照相或录像，观察浸泡前后岩样表面的显微变化。



## 第二节 储层敏感性评价

### 二、岩心流动实验与储层敏感性评价

#### (一) 速敏性评价

- 速敏性评价试验的**目的**在于了解储层渗透率变化与储层中流体流动速度的关系。如果储层具有速敏性，则需要找出其开始发生速敏时的临界流速，并评价速敏性的程度。
- 与速敏性有关的实验参数主要为**临界流速、渗透率伤害率及速敏指数**。

#### 1、渗透率伤害率

$$D_K = \frac{K_L - K_{LA}}{K_L}$$

- 式中  $D_K$ ——渗透率伤害率；  
 $K_L$ ——伤害前岩样液体渗透率；  
 $K_{LA}$ ——伤害后岩样渗透率的最小值。





## 第二节 储层敏感性评价

表8-10 速敏性流动试验评价指标

评价指标	渗透率 伤害率 $D_K$	$\leq 0.05$	0.05 ~ 0.30	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.70	$\geq 0.70$
	速敏指 数 $I_{vV}$	$\leq 0.05$	0.05 ~ 0.10	0.10 ~ 0.25	0.2 ~ 0.70	$\geq 0.70$
敏感程度		无速敏	弱速敏	中等偏弱速 敏	中等偏强速 敏	强速敏



## 第二节 储层敏感性评价

### 2、速敏强度

- 当某些岩样的临界流速相近时，由速敏性产生的渗透率伤害率越大，则速敏性越强。但实际情况往往复杂得多，有些岩样虽然渗透率差值较小，但临界流速可能也小，前者反映速敏性较弱，而后者反映速敏性较强。
- 为此，需综合这二个参数进行综合评价，即用速敏指数（ $I_v$ ）来表述速敏性的强弱，其与岩样的临界流速成反比，与由速敏性产生的渗透率伤害成正比，即：

$$I_v = \frac{DK}{V_c}$$

式中  $I_v$ ——速敏指数；  
 $DK$ ——渗透率伤害率；  
 $V_c$ ——临界流速。



## 第二节 储层敏感性评价

### (二) 水敏性评价

- 储层中的粘土矿物在接触低盐度流体时可能产生水化膨胀，从而降低储层的渗透率。水敏性流动实验的目的正是为了了解这一膨胀、分散、运移的过程以及储层渗透率下降的程度。
- 水敏性评价实验的作法是，先用地层水（或模拟地层水）流过岩心，然后用矿化度为地层水一半的盐水（即次地层水）流过岩心，最后用去离子水（蒸馏水）流过岩心，其注入速度应低于临界流速，并分别测定这三种不同盐度（初始盐度、盐度减半、盐度为零）的水对岩心渗透率的定量影响，并由此分析岩心的水敏程度（图8-5）。其结果还可以为盐敏性评价实验选定盐度范围提供参考依据。
- 在驱替过程中采用的速度要随着液体矿化度的降低而降低，否则由于微粒运移而形成的“桥堵”，会给分析储层损害的原因带来困难。



## 第二节 储层敏感性评价

- 可采用水敏指数评价岩样的水敏性，水敏指数定义如下：

$$I_w = \frac{K_L - K_w^*}{K_L}$$

式中  $I_w$ ——水敏指数；

$K_L$ ——岩样没有发生水化膨胀等物理化学作用的液体渗透率，通常用克氏渗透率或标准盐水测得的渗透率值；

$K_w^*$ ——去离子水（或蒸馏水）渗透率。

水敏性强度与水敏指数成正比，水敏程度越强，储层的可能损害越大（表8-11）。

表8-11 水敏性流动试验评价指标

水敏指数 $I_w$	$\leq 0.05$	0.05 ~ 0.30	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.70	0.70 ~ 0.9 0	$\geq 0.90$
敏感程度	无水敏	弱水敏	中等偏弱水敏	中等偏强水敏	强水敏	极强水敏



## 第二节 储层敏感性评价

### (三) 盐敏性评价

- ▶ 通过盐敏性评价实验可以观察储层对所接触流体盐度变化的敏感程度。
- ▶ 该试验通常在水敏试验的基础上进行，即根据水敏试验的结果，选择对渗透率影响最大的矿化度范围，在此范围内，配制不同矿化度的盐水，由高矿化度到低矿化度依顺序将其注入岩心（按照盐度减半的规划降低盐度），并依次测定不同矿化度盐水通过岩样时的渗透率值（图8-6）。当流体盐度递减至某一值时，岩样的渗透率下降幅度较大，这一盐度就是临界盐度。这一参数对注水开发中注入水的选择和调整有较大的意义。
- ▶ 盐敏性是地层耐受低盐度流体的能力量度，而临界盐度（ $S_c$ ）即为表征盐敏性强度的参数，单位为mg/L。
- ▶ 盐敏性与流体中所含离子的种类有关，对于同一地层来说，对单盐（如NaCl）的临界盐度通常高于复合盐（如标准盐水）的临界盐度（表8-12）。



## 第二节 储层敏感性评价

表8-12 盐敏性流动试验评价指标

临界 盐度 $S_c$ mg/L	NaCl 盐水	$\leq 5000$	5000 ~ 10000	10000 ~ 20000	20000 ~ 40000	40000 ~ 100000	$\geq 100000$
	标准 盐水	$\leq 1000$	1000 ~ 2500	2500 ~ 5000	5000 ~ 10000	10000 ~ 30000	$\geq 30000$
敏感 程度		无盐敏	弱盐敏	中等偏 弱盐敏	中等偏 强盐敏	强盐敏	极强盐敏



## 第二节 储层敏感性评价

### (四) 酸敏性评价

- 酸敏评价实验的目的在于了解准备用于酸化的酸液是否会对地层产生伤害及伤害的程度，以便优选酸液配方，寻求更为有效的酸化处理方法。
- 流动酸敏评价（表8-13）以注酸前岩样的地层水渗透率为基础，然后反向注0.5~1VP（孔隙体积倍数）的酸（注酸量不能太大，否则反映的是酸化效果，而不是酸敏效果，酸化效果评价时注入酸液量为5VP以上）。然后，再进行地层水驱替，通过注酸前后岩样的地层水渗透率的变化来判断酸敏性影响的程度。
- 选择长度等于或大于5cm，直径2.5cm的岩样，注入一倍孔隙体积15%HC1或0.5倍孔隙体积15%HC1+0.5倍孔隙体积的12%KC1+3%HF，反应时间为1~2小时，定义酸敏指数为：

$$I_a = \frac{K_w - K_{wa}}{K_w}$$

式中  $I_a$ ——酸敏指数；  
 $K_w$ ——地层水渗透率；  
 $K_{wa}$ ——酸化后地层水渗透率。

表8-13 酸敏性流动试验评价指标

酸敏指数 $I_a$	$\leq 0.05$	0.05 ~ 0.30	0.30 ~ 0.70	$\geq 0.70$
敏感程度	无酸敏	弱酸敏	中等酸敏	强酸敏



## 第二节 储层敏感性评价

### (五) 碱敏性评价

- 碱敏性评价实验开展较晚，其评价方法还在摸索之中。目前比较常用的方法有**碱水膨胀率测定**、**化学碱敏实验**和**流动碱敏实验**。
- 碱水膨胀率测定是评价已知碱配方使地层岩石产生水化膨胀的程度，其操作方法及评价指标与水敏性评价类似。化学碱敏实验与化学法酸敏性实验基本相同。
- 碱敏性流动实验的作法是，以一定浓度（通常大于1%）的NaCl盐水作为标准盐水，依次测定碱度递增的碱水（NaCl/NaOH）的渗透率，最后为一定浓度（通常大于1%）的NaOH溶液。一个系列通常由五个以上的碱水组成。





## 第二节 储层敏感性评价

### (六) 正反向流动实验

- **正反向流动实验**是指在用流体作正向流动后，在不中断流动的状态下，接着以同样的流体、同样的流速作反向流动，以观察岩样中的微粒运移及其产生的渗透率的变化情况。
- 在正向流动的情况下，由于流体的流动速度超过了临界流速，造成了较多的微粒在喉道外“桥堵”，引起流体渗透率的大幅度下降，当反向流动时，这些堵塞在喉道的微粒会被冲开，解除了“桥堵”，使流体渗透率上升（图8-7），但是若有较多的可移动微粒的存在，往往过了一段时间后，它们又在其它喉道外形成“桥堵”，导致渗透率再次下降。

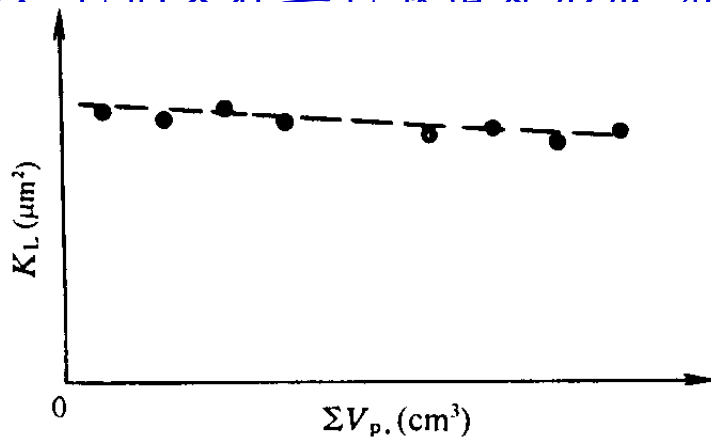


图8-7 正反向流动实验曲线

**正反向流动过程是检验与核实微粒运移程度的实验，但它又受岩样本本身正反两个方向渗透率差异的影响。故应采用换向时渗透率的波动值与最终渗透率值的比较来评价微粒运移程度。**



## 第二节 储层敏感性评价

可采用运移敏感指数评价一定流速下微粒的活动性:

$$I_m = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\text{反}}}$$

式中  $I_m$ ——运移敏感指数;

$K_{\max}$ ——换向后渗透率的最大值;

$K_{\min}$ ——换向后渗透率的最小值;

$K_{\text{反}}$ ——反向流动后的最终平衡渗透率。

表8-14 正反向流动实验储层敏感性评价指标

运移敏感指数 $I_m$	$\leq 0.05$	$0.05 \sim 0.25$	$0.25 \sim 0.50$	$\geq 0.50$
敏感程度	无微粒运移	有微粒运移	中等程度微粒运移	严重的微粒运移



## 第二节 储层敏感性评价

### (七) 体积流量评价

- **体积流量试验的目的**是了解储层渗透率的变化与流过储层液量之间的关系。试验是在低于临界流速下，用大量液体流过岩样，考察岩样胶结物稳定性。注入水的体积流量试验可以通过不同注入孔隙体积倍数的情况岩样渗透率的变化来评价注入水注入量的敏感性（图8-8）。

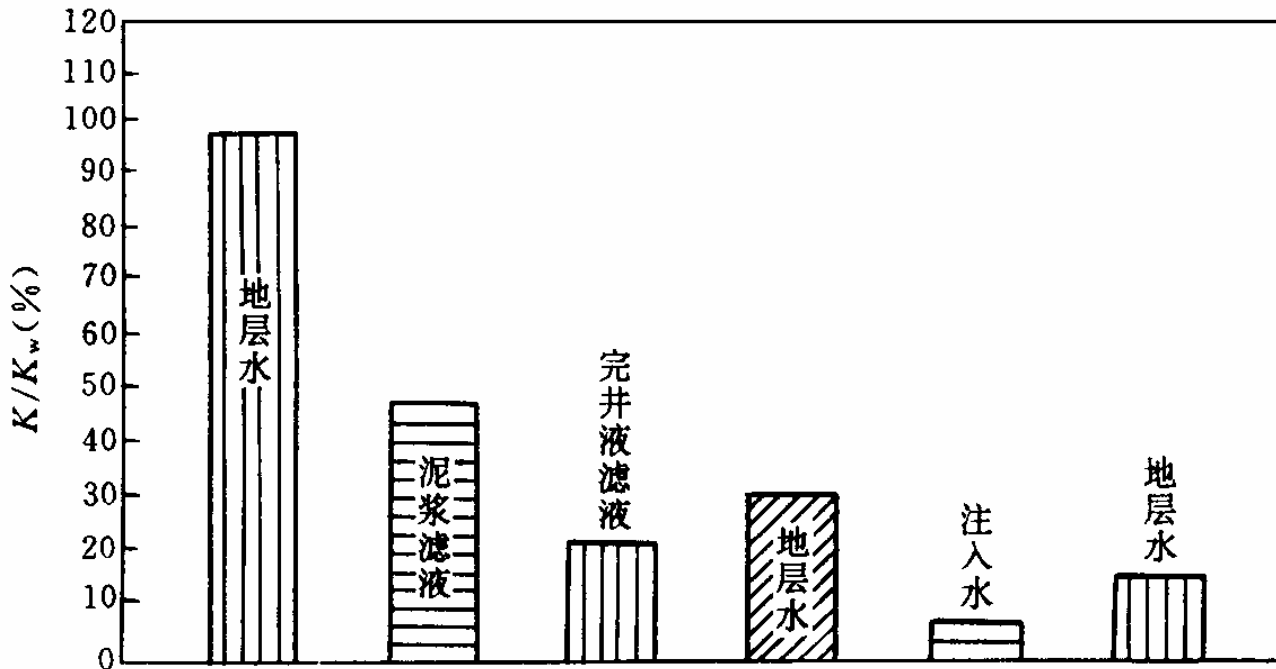


图8-8 体积流量评价实验曲线图



## 第二节 储层敏感性评价

- 采用**体积敏感指数**来评价体积流量对岩样的损害程度（表8-15）。体积敏感指数定义如下：

$$l_q = \frac{K_l - K_{lq}}{K_l}$$

式中  $l_q$ ——体积敏感指数；  
 $K_l$ ——用标准盐水或地层水测定的渗透率；  
 $K_{lp}$ ——用工作液测定的渗透率。

表8-15 体积流量实验储层敏感性评价指标

体积敏感指数 $l_q$	$\leq 0.30$	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.70	$\geq 0.70$
敏感程度	弱敏感	中等偏弱敏感	中等偏强敏感	强敏感



## 第二节 储层敏感性评价

### (八) 应力敏感评价

- 岩石应力敏感性研究的目的是有如下几点：
  - 准确地评价储层，通过模拟围压条件测定孔隙度可以将常规孔隙度值转换成原地条件下的值。有助于储量评价；
  - 求出岩心在原地条件下的渗透率，便于建立岩心渗透率 $K_c$ 与测试渗透率 $K_e$ 的关系，对认识 $K_e$ 和地层电阻率也有帮助；
  - 为确定合理的生产压差服务。
- 应力敏感性评价实验可用气体、中性煤油或标准盐水（质量分数为8%）作为实验流体，用气体做实验流体时的实验步骤为：
  - 最高实验围压按二分之一上覆岩压选取，以下分4~8个压力点。
  - 保持进口压力值不变，缓慢增加围压，每个压力点持续30min后测定岩样气体渗透率。
  - 保持进口压力值不变，缓慢减小围压，每一压力点持续1小时后测定岩样气体渗透率。
  - 所有压力点测完后关闭气源，停止实验。



## 第二节 储层敏感性评价

- 应力敏感的损害率 $D_{k2}$ 按式(7-15)计算:

$$D_{k2} = \frac{K_l - K'_{\min}}{K_l} \times 100\%$$

式中:

$D_{k2}$ ——应力不断增加至最高点的过程中产生的渗透率损害最大值;

$K_l$ ——第一个应力点对应的岩样渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$  ;

$K'_{\min}$ ——达到临界应力后岩样渗透率的最小值,  $10^{-3} \mu m^2$  ;

按式7-9计算应力敏感性引起的不可逆渗透率损害率 $D_{k3}$ :

$$D_{k3} = \frac{K'_l - K_r}{K'_l} \times 100\%$$



## 第二节 储层敏感性评价

表8-16 应力敏感性评价指标（引自万仁溥，2000）

渗透率损害率%	(可逆) 损害程度
$D_k^* \leq 5$	无
$5 < D_k^* \leq 30$	弱
$30 < D_k^* \leq 50$	中等偏弱
$50 < D_k^* \leq 70$	中等偏强
$70 < D_k^* \leq 90$	强
$D_k^* > 90$	极强

注:  $D_k^*$ 表示 $D_{k2}$ 或 $D_{k3}$



### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化



表8-17 注水开发对储层的影响

影响因素	变化情况
矿物组成	岩石粒度中值提高 部分碳酸盐矿物损失
储层孔隙度	喉道半径增大，孔隙度增加
储层渗透率	孔隙充填物被溶解，渗透率增加 水敏性矿物含量高的地层，渗透率降低
润湿性	亲水性增加
含油性	含油性降低





### 一、开发过程中储层性质的动态变化状况

#### (一) 储层岩性参数的变化

以胜利油区馆上段油藏为例，油层为河流相正韵律高渗透率、高孔隙度、高饱和度的疏松砂岩，岩性以粉细砂岩、粉砂岩、细砂岩为主。利用孤岛油田三个不同时期几十口取芯井的粒度分析资料，在三个不同开发时期，泥质含量与粒度中值之间均具有良好的负相关性；但是，随着注水开发程度的加深，泥质含量有所降低，粒度中值相对增大（表8-18）。

- 泥质含量的变化是由于储层中粘土矿物在注水过程中的变化造成的。



### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化



表8-18 孤岛油田不同开发时期的馆陶组储层岩性参数变化

开发时期岩性	低含水开发期		中、高含水开发期		特高含水开发期	
	泥质含量 %	粒度中值 mm	泥质含量 %	粒度中值 mm	泥质含量 %	粒度中值 mm
粉砂岩、粉细砂岩	10 ~ 20	0.1 ~ 0.14	8 ~ 12	0.11 ~ 0.15	< 5	0.14 ~ 0.18
细砂岩、中细砂岩	8 ~ 12	0.13 ~ 0.16	5 ~ 8	0.14 ~ 0.21	< 5	0.16 ~ 0.25

表8-19是胜坨油田二区试验室分析的粘土矿物变化统计表。随着含水阶段的提高，高岭石相对含量减少，伊利石含量相对增加。高岭石在长时期受注入水浸泡的情况下，晶体格架遭破坏，从而形成细小的微粒，这些微粒容易随采出液带出油层。而绿泥石、伊利石一般呈膜状附贴于颗粒表面或环绕颗粒，其结晶格架较紧密，不易遭到破坏，故随着开发程度的加深这些粘土矿物的相对含量增高。



# 第三节 开发过程中储层性质的动态变化

China University of Geosciences  
Bill Yu  
Beijing

表8-19 胜坨油田二区粘土矿物成分及含量变化统计表

层位	含水阶段	粘土含量 %	粘土矿物组分相对含量, %					伊/蒙混层比
			伊/蒙混层	蒙皂石	伊利石	高岭石	绿泥石	
1 <sup>2</sup>	中	7.0	12	(6)	4.5	74	5	50
1 <sup>2</sup>	高	2.5	14	(5.8)	7.5	65	8.5	42
1 <sup>2</sup>	特高	3.2	2	(0.4)	17	67	14	20
8 <sup>3</sup>	初	8.3	10	(5.5)	2.8	82	5	55
8 <sup>3</sup>	初	7.8	4.2	(1.2)	2	88	5	30
8 <sup>3</sup>	中	6	6.8	(2.5)	2	87	5	38
8 <sup>3</sup>	高	7.5	22.7	(10.6)	6.3	65	6	46.7
8 <sup>3</sup>	高	6.0	6	(1.5)	1.7	87	3.7	25
8 <sup>3</sup>	特高	5.4	16.3	(4.1)	5.6	73	4.7	25
8 <sup>3</sup>	特高	5.4	21	(4.6)	5.5	69	4.5	22



## (二) 储层物性参数的变化

➤ 渗透率的变化比较复杂，大体可以分成两类：

- 一类是注入水长期冲刷后岩心渗透率增加，
- 另一类则是岩心渗透率反而减少。

➤ 孤岛油田馆上段不同开发时期取芯井油层物性资料的分析结果表明，从低含水期、中高含水期到特高含水开发期，储层的物性发生了很大变化。平均孔隙度由初期的34%提高到特高含水期的39%（图8-9）。渗透率的变化更大，中高含水期粉砂岩的渗透率变化相对较小，而粉细砂岩的渗透率增大一倍左右；特高含水期，渗透率增大十倍以上（图8-10）。

➤ 由此说明，注水开发使得充填于储层孔隙内的粘土矿物的分布形态和含量发生了变化，导致储层的孔隙度和渗透率增加，尤其是高含水期，强注强采以后，渗透率明显增大。

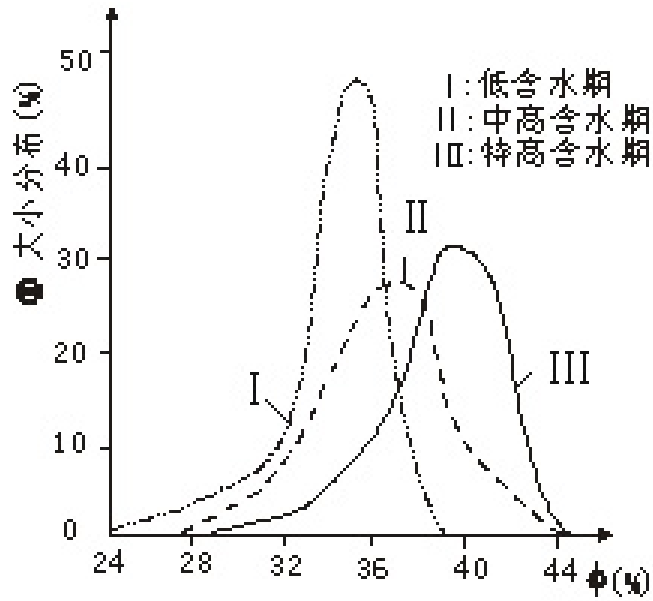
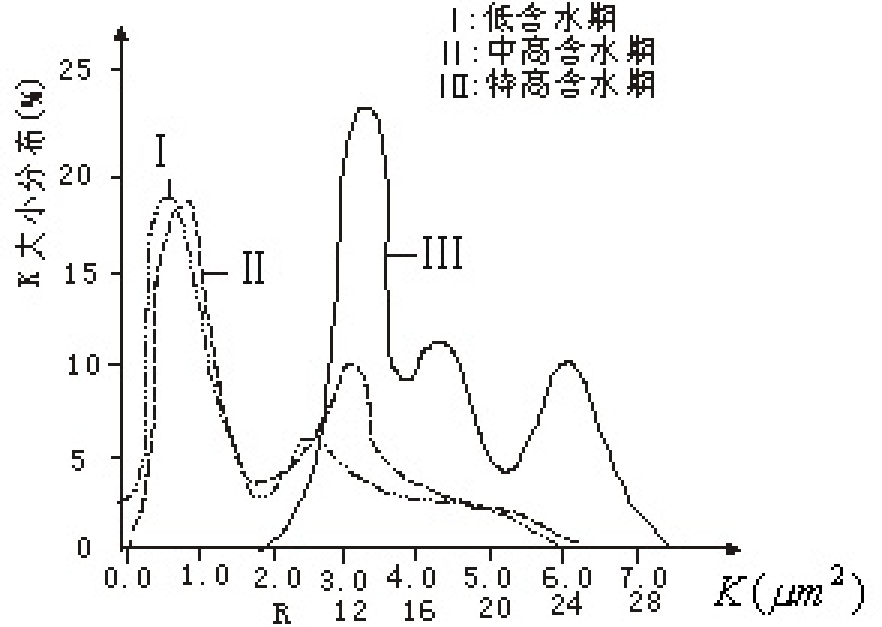


图8-9 不同开发时期孔隙度分布曲线



特高含水期坐标参数

图8-10 不同开发时期空气渗透率分布曲线（据李阳）



### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化

- 孤东油田馆上段也表现出相似的变化规律，统计了孤东油田29口取心井的资料，其中水淹前取心井22口，水淹后取心井7口。由于注入水对储集层孔隙中粘土的冲刷作用，使储集层泥质含量下降，粒度中值增大（表8-20）。同时由于孔隙喉道被注入水疏通，孔喉半径加大，使储层孔隙度和渗透率都增大。

表8-20 孤东油田馆上段水淹前后储层物性统计表（据岩心资料）

时 间	孔隙度 %	渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	泥质含量 %	粒度中值 mm
水淹前	34.2	2148	7.8	0.15
水淹后	35.5	3744	6.8	0.16
差值	+1.3	+1596	-1.0	+0.01



### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化

- 同样，对胜坨油田统计了二区沙二上12时间和沙二下83时间单元同含水阶段18口取心井的分析化验资料（表8-21、表8-22），沙二上12单元是各种正韵律河床沉积，沙二下83层是各种反韵律河口坝沉积。

表8-21 胜坨油田胜二区沙二段12时间单元不同开发时期储层参数统计表

年代	孔隙度 %	水平渗透率 $10^{-3} \mu m^2$	水饱和度 %	油饱和度 %	粒度中值 mm
平均	30.9	7930	34.0	43.5	0.258
1960s	29.7	7580	30.1	54.7	
1970s	31.7	7500	33.1	52.4	0.246
1980s	30.5	8080	34.4	43.6	0.265
1990s	30.5	9990	37.1	33.7	0.293



### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化



表8-21 胜坨油田胜二区沙二段12时间单元不同开发时期储层参数统计表

年代	孔隙度 %	水平渗透率 $10^{-3} \mu\text{m}^2$	水饱和度 %	油饱和度 %	粒度中值 mm
平均	30.9	7930	34.0	43.5	0.258
1960s	29.7	7580	30.1	54.7	
1970s	31.7	7500	33.1	52.4	0.246
1980s	30.5	8080	34.4	43.6	0.265
1990s	30.5	9990	37.1	33.7	0.293

孤岛油田、孤东油田馆上段储层都属于岩性疏松、胶结很差的河道砂沉积，在生产过程中出砂严重。泥质含量由开发初期约8%，到特高含水期大量减少至14%，说明水驱后大量泥质等胶结物及细粒物质被冲掉，导致渗透率大幅度地增加。





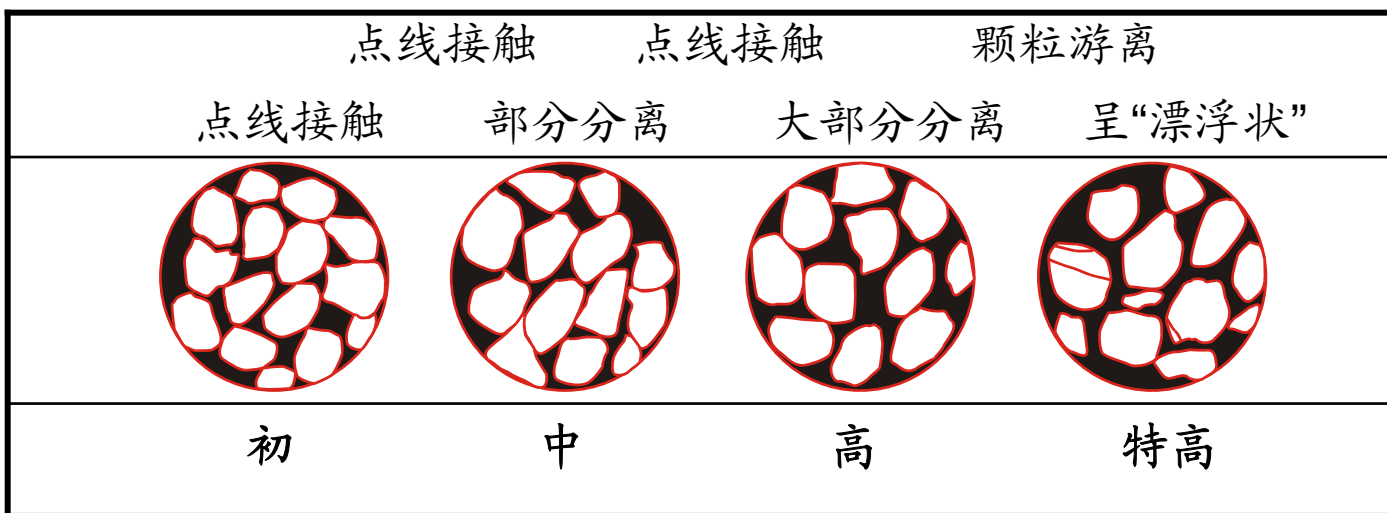
### (三) 储层孔隙结构参数的变化

- 选用孤岛油田馆上段开发初期的渤108井和开发中期的中13-K13井作为对比，分析孔隙结构参数在注水开发过程中的变化（表8-23）。
- 在储层骨架中矿物颗粒间的支撑方式是影响储层渗透性及孔喉的重要因素之一。在初、中含水阶段储层骨架颗粒的接触关系变化不大，薄片鉴定、电镜观察的图像可以看出，初、中含水阶段矿物颗粒间的接触关系仍为点—线接触（图8-11）。
- 高含水阶段储层骨架颗粒支撑方式改变较为明显，粒间原有的点、线接触关系部分不存在，原孔隙及颗粒接触处的胶结物被水冲走或被搬运至其它部位。连通孔隙增多，原有的点、线接触处变为连通孔喉，部分颗粒处于流体衬托状态。

表8-23 孤岛油田两口井孔隙结构和孔喉分布参数对比表

井号	层位	孔喉均值, $\Phi$		分选系数, $\Phi$		孔喉歪度		孔喉峰值, $\Phi$	
		变化范围	平均	变化范围	平均	变化范围	平均	变化范围	平均
渤108	馆3	7.07 ~ 9.23	7.92	3.01 ~ 3.58	3.28	0.43 ~ 0.77	0.60	0.71 ~ 1.38	1.13
渤108	馆4	7.8 ~ 9.9	8.79	2.96 ~ 4.1	3.46	0.18 ~ 0.47	0.34	0.68 ~ 1.02	0.80
渤108	馆5	7.17 ~ 8.63	7.89	2.98 ~ 4.03	3.53	0.17 ~ 0.63	0.33	0.85 ~ 1.17	0.96
渤108	馆6	6.07 ~ 7.67	6.71	3.19 ~ 3.91	3.51	0.41 ~ 0.63	0.52	0.86 ~ 1.37	1.00
中13 -K13	馆4	0.67 ~ 8.83	8.5	3.05 ~ 3.43	3.24	0.5 ~ 0.85	0.69	0.65 ~ 1.43	0.93

图8-11 四个含水阶段储层骨架颗粒接触关系变化示意图





### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化

- 胜坨油田沙二下83时间单元相同能量带各含水阶段毛管压力曲线（图8-12）说明，随着注水开发，阀压逐渐增大，反映了最大孔喉半径减小，渗透率降低。这说明渗透率较低的岩石，其喉道比较细小，高岭石等粘土矿物被打碎、移动后，有些就可能堵塞在微小的喉道窄口上而造成渗透率降低的现象。

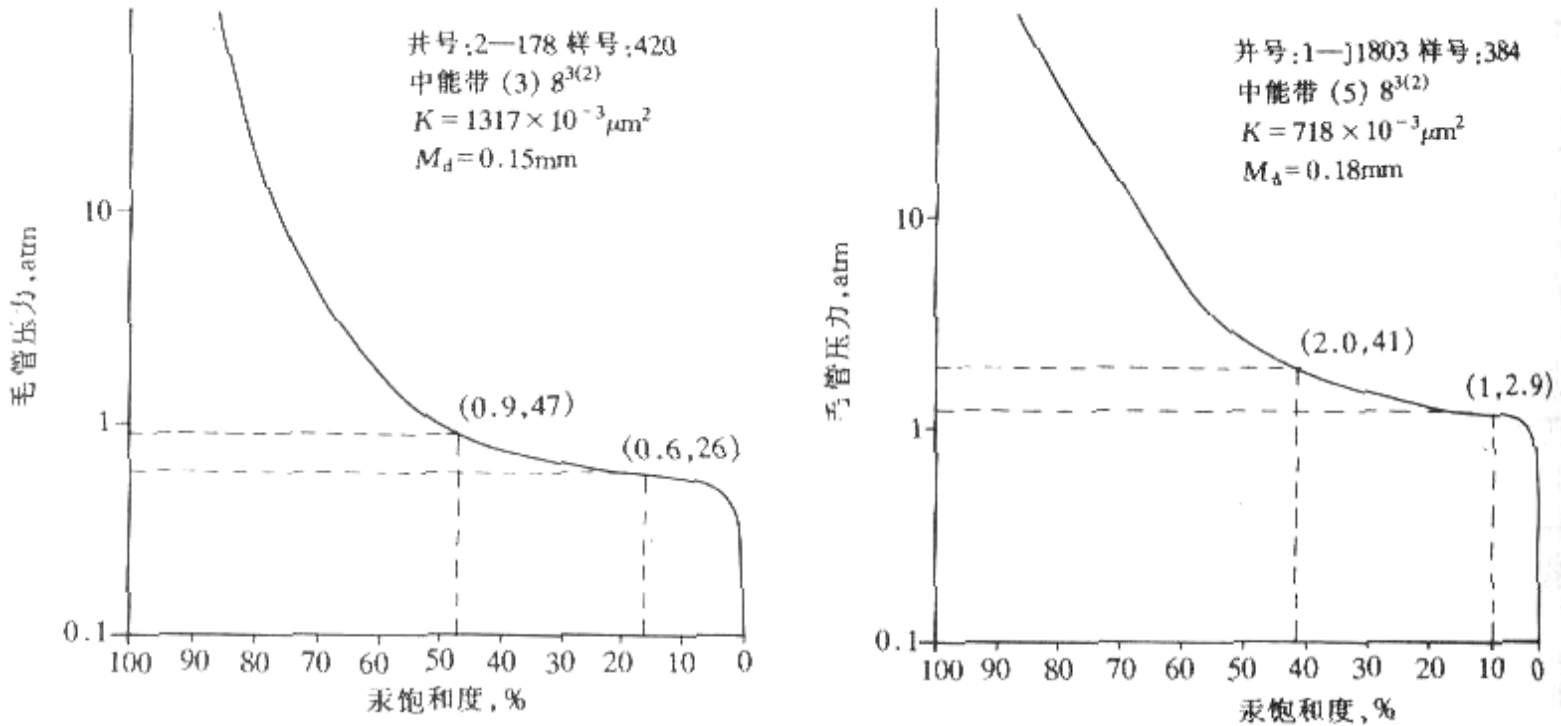


图8-12 胜坨油田胜二区沙二下83时间单元中能带不同含水阶段毛管压力曲线图



## (四) 储层含油性的变化

- 分析孤岛油田馆上段开发初期渤108井（油基泥浆）和特高含水期的中11-检11井（密闭取芯）的饱和度资料，绘制了不同粒径的砂岩含油饱和度的大小分布曲线（图8-13）。

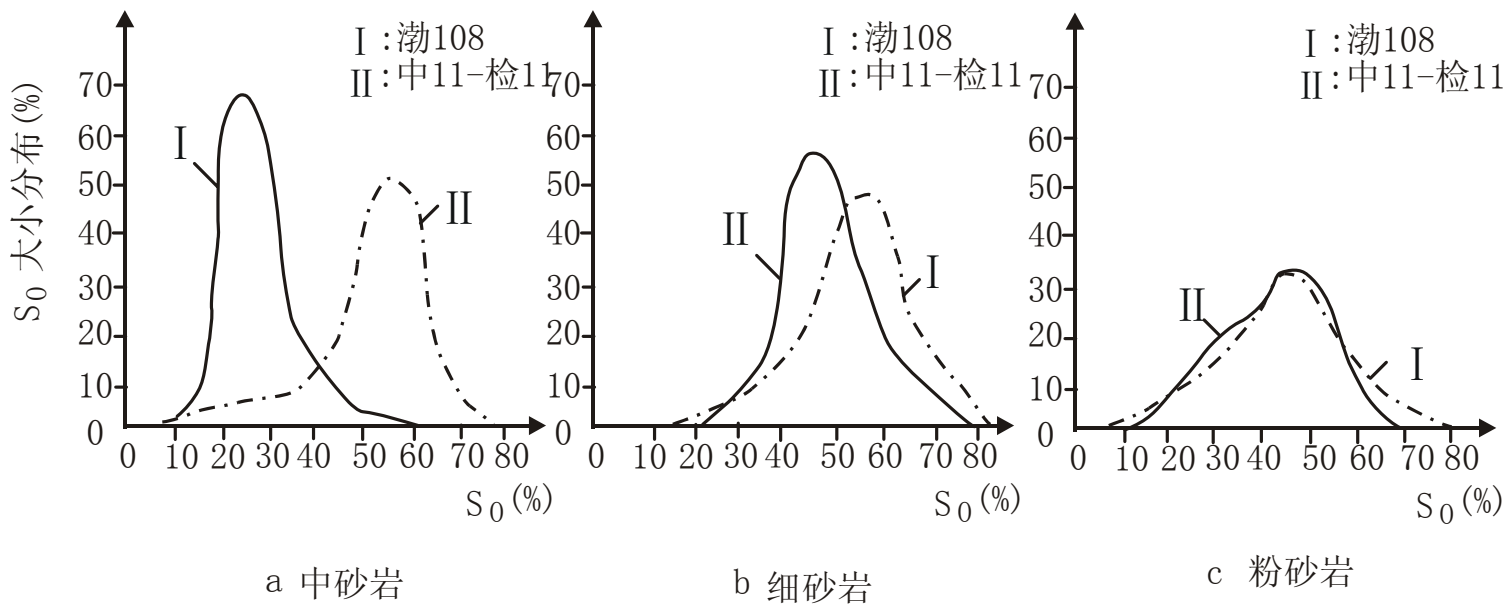


图8-13 渤108井、中11-检11井储层含油饱和度 ( $S_o$ ) 分布曲线



### (五) 储层渗流参数的变化

- 胜坨油田的矿场实际统计资料以及室内长期水冲刷实验资料都表明，注水后一般的规律是亲油的储层向亲水的方向转变，而原来亲水的储层则亲水性更强。

图8-14是胜坨油田胜二区沙二段各砂层组在不同注水开发阶段润湿性对比图。

- 大量的实际资料都表明，当含水饱和度增大至一定程度或含油饱和度减小到一定程度时，润湿性都会向亲水性的方向转变。如胜利油田2-3-169井的统计资料（表8-24）表明，当平均含饱和度降低值在10%以上时，油层的润湿性发生变化；当平均含油饱和度降低值超过20%时，油层润湿性变为强亲水。



# 第三节 开发过程中储层性质的动态变化

China University of Geosciences, Beijing  
Bill Yu

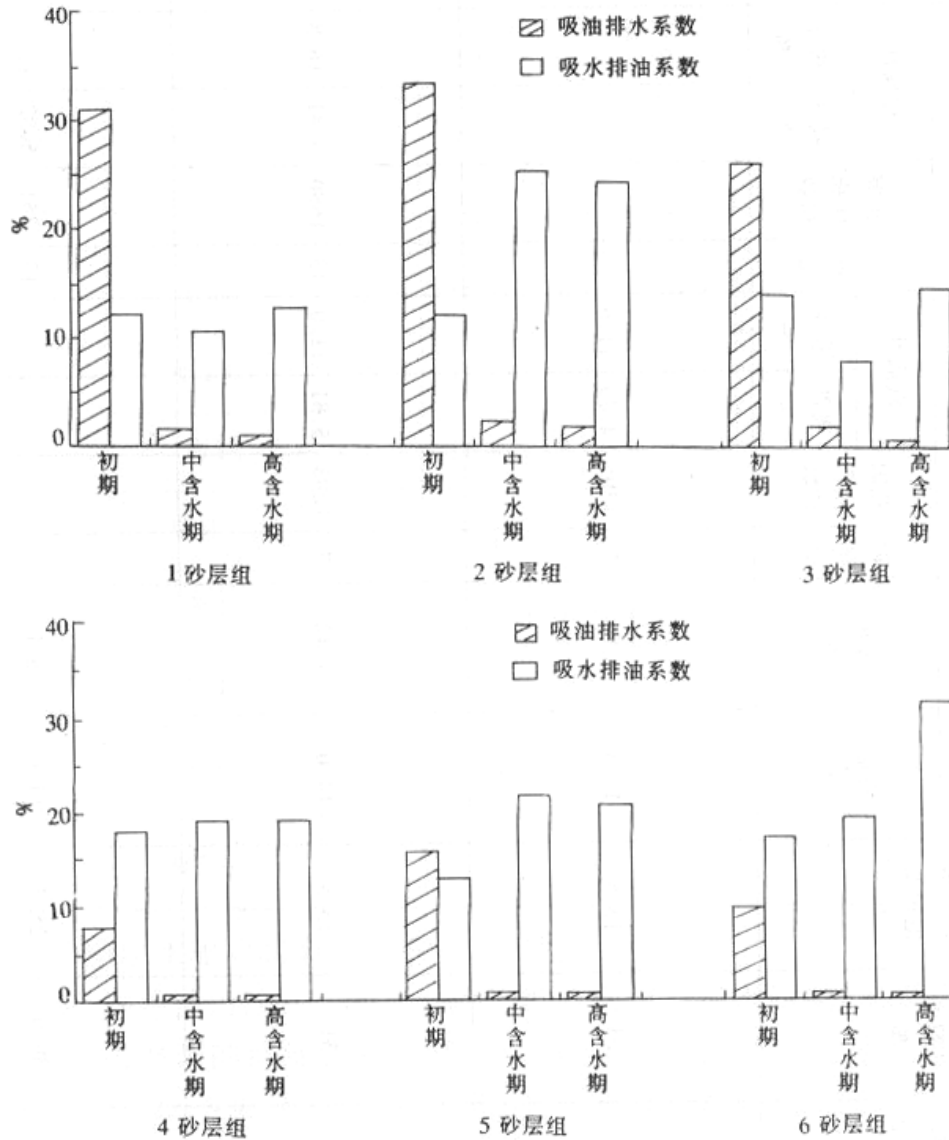


图8-14 胜坨油田胜二区沙二段不同开发时期油层润湿性对比图



### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化



表8-24 胜坨油田原油饱和度变化和润湿特性关系测试统计表

井号	砂层组	样品数	平均原油饱和度和变化值 %	润湿特性			
				润湿指数初值 %	润湿性	润湿指数 %	润湿性
2-3-169	1	4	22.2	-18.9*	亲油	10.8	亲水
		4	13.8	-18.9*	亲油	5.0	弱亲水
	2	4	11.9	-21.4	亲油	-0.8	中性
		4	12.5	-21.4	亲油	30.9	亲水
	3	3	10.4	-12	亲油	5.1	弱亲水
	8	10	10.1	7.4	亲水	22.4	亲水
		6	13.1	7.4	亲水	35.5	亲水

水冲洗后润湿性转变的另一个原因是前面提到过的岩石表面覆盖的粘土矿物容易被水流冲走，此时附着在这些粘土矿物上的油膜也会随之而被一起冲走，从而裸露出更多的亲水表面。



### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化

➤ 长期水冲洗后岩石的孔隙结构及润湿性都有相当的变化，必然会影响到水驱后相对渗透率曲线的形态。胜坨油田沙二下83层初、中、高三个含水阶段的油水相对渗透率曲线对比表明。长期水驱后，残余油饱和度降低，油水两相跨度增加，两相交点饱和度右移，残余油时水相对渗透率降低，无水采收率降低，最终采收率提高（图8-15）。

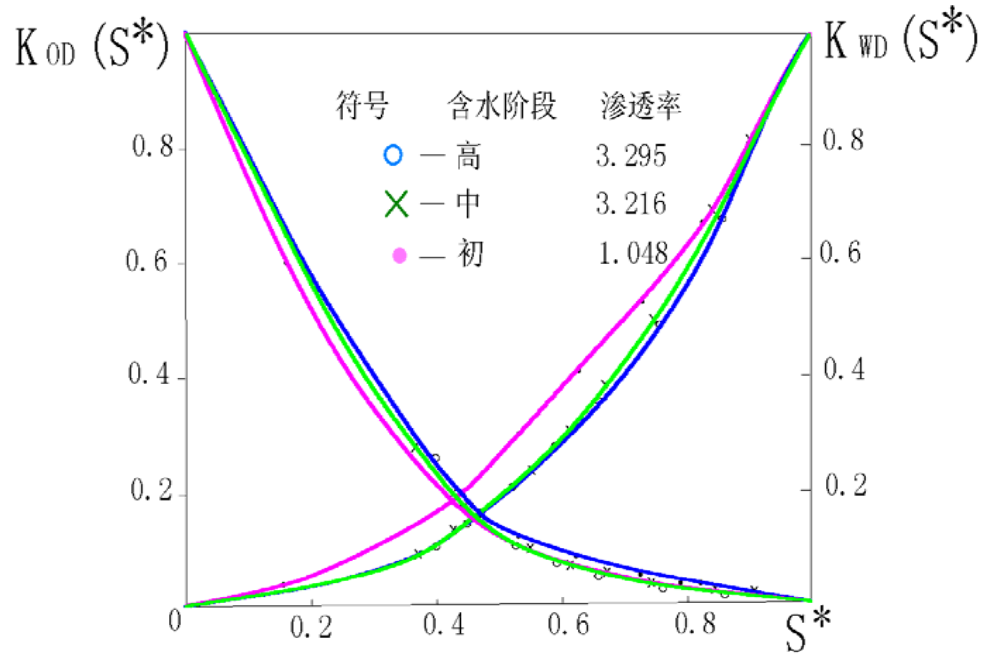


图8-15 胜坨油田不同含水时期油水相对渗透率曲线





### 二、开发过程中储层性质动态变化的研究方法

- 研究开发过程中储层性质变化的方法大体上可分为三种：岩心资料统计法、小井距对子井测井分析和长期水驱实验研究法，近年来甚至发展出了储层三维动态模型研究法。

#### (一) 岩心资料统计法

通常在实验室可以对不同开发时期所取的岩心资料进行粒度分析、常规物性分析、薄片鉴定、铸体图像分析、电镜扫描图像分析、粘土X-衍射、CT层析、压汞、相渗曲线和润湿性等测试（图8-16），对比不同时期样品的测试结果，分析储层性质变化规律。

岩心资料统计法不仅可以对比分析储层孔隙度、渗透率、泥质含量等物性参数的变化规律，更是分析粒度中值、孔隙结构特征、润湿性和相渗等参数变化的最好方法。



### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化

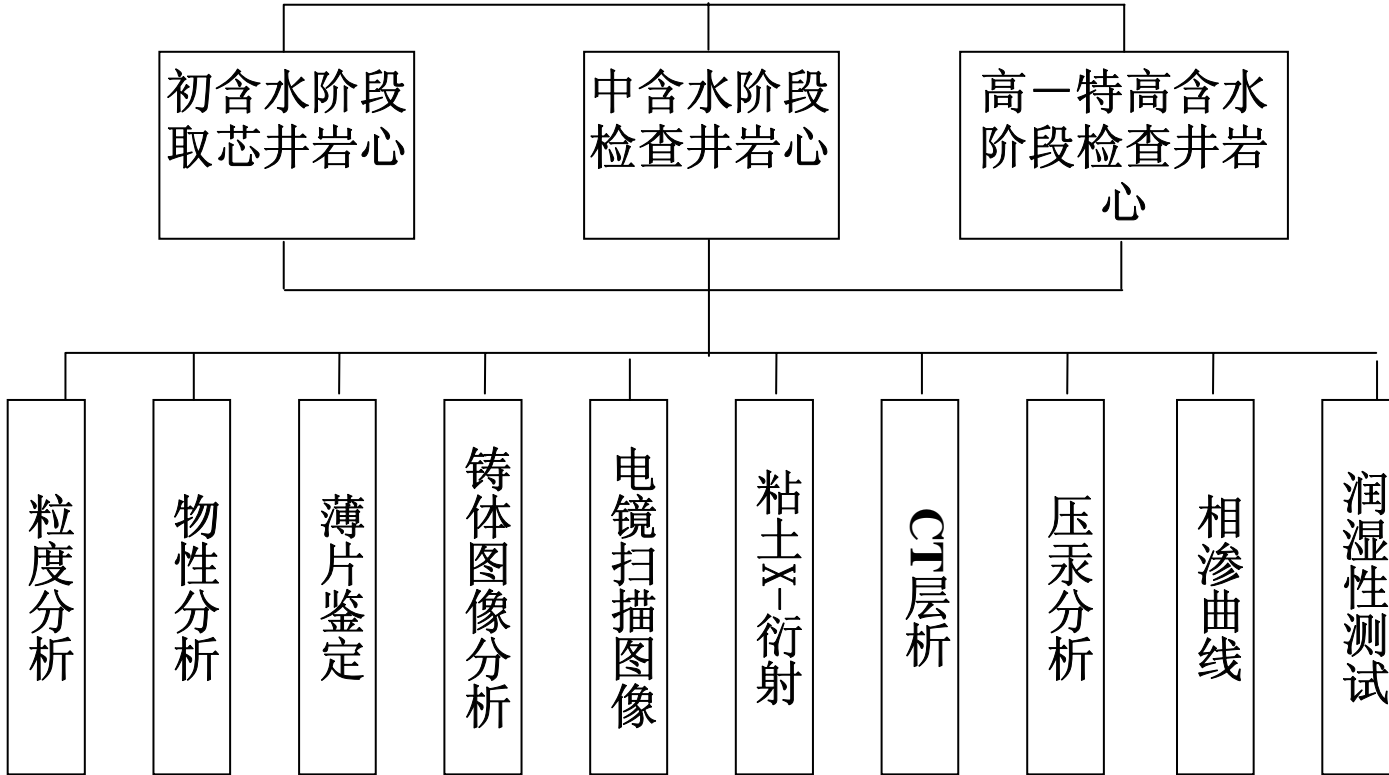


图8-16 岩心资料统计法实验室测试手段



### (二) 小井距对子井测井分析

- 选择在开发初期和高含水期所钻、其井距小于50m的相邻井中的同层位储层，用测井解释方法进行对比，以观察和分析不同含水期储层性质所发生的变化。
- 油田开发过程中，为了完善注采系统，观察油气田地下动态，在原有的老井周围近距离内打了一批新井，这些井与老井形成对子井，相同层位储层特征相近，根据这些对子井的测井解释成果可以很好的反映储层性质的动态变化。如羊14-15井（1971年10和羊新14-15井（1990年6月）（表8-25）。



# 第三节 开发过程中储层性质的动态变化



表8-25 羊三木油田对子井羊新14-15井  
与羊14-15井馆二上储层性质测井解释对比

井号	层位	顶深 m	底深 m	厚度 m	孔隙度 %	渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	含油 饱和度 %	泥质 含量 %	解释 结论
羊新 14-15	馆二上3 <sup>1</sup>	1360.7	1370.0	9.3	35.0	1934.1	42.6	14.6	强水 淹层
羊14-15	馆二上3 <sup>1</sup>	1360.3	1367.0	6.7	33.4	991.6	69.6	12.5	油层
羊新 14-15	馆二上4	1375.9	1383.7	7.8	33.8	1544.4	52.8	14.4	中水 淹层
羊14-15	馆二上4	1375.2	1381.6	6.4	33.7	1039.6	65.4	14.1	油层

## (三) 长期水驱实验研究法

该方法是用油田的天然岩心进行长时期的水驱油实验，观察岩石特性所发生的变化。



### 1、建立实验室注水冲刷物理模型

针对欲研究油藏的实际地质特点，建立相应的实验室注水冲刷物理模型。采用相似理论，对实际的注水矿场进行简化，建立了室内注水冲刷物理模型。

- 1) 以注采井主流线为模拟对象原型
- 2) 不同含水期模拟不同的开发阶段
- 3) 注入量（注水倍数）模拟冲刷量

表8-26为不同含水时期距注水井不同距离单元的注入倍数换算表，室内岩心注水冲刷实验是以此为依据确定注水冲刷量，从而研究不同开发阶段储层参数的变化规律。



# 第三节 开发过程中储层性质的动态变化

China University of Geosciences, Beijing  
Bill Yu

表8-26 假想单元在不同开发期的注入倍数

层位	位置	厚度, m 渗透率 , $10^{-3}\mu\text{m}^2$	距注水井距离	不同开发期注入倍数					
				20%	40%	60%	80%	90%	98%
8 <sup>3</sup>	上	13/2.87	37.5	75.6	111	208.9	488.9	1200	3244
			50	56.7	83.3	156.7	366.7	900	2433
			75	37.8	55.5	104.5	244.5	600	1622
			100	28	43.3	76.7	180	433	1200
	中	8/1.397	37.5	42.2	62.6	115.6	271	666	1822
			50	31.7	46.7	86.7	203.3	500	1366
			75	21.1	31.1	57.8	135.5	333	911.13
			100	16	23.7	43.3	103.3	250	666.7
	下	4/0.198	37.5	5.7	8.93	16.4	38.6	95.1	257.8
			50	4.3	6.7	12.3	29	71.3	193.4
			75	2.87	4.47	8.2	19.3	47.5	128.9
			100	2.2	3.3	6.3	14.5	35.6	96.7
			50	15.2	31	59.3	295.3	1066.6	3633
			75	10.1	20.6	39.5	443	711	2422



## 2、注水冲刷模拟实验的设计思路

岩心长期水驱模拟实验的设计思路见图8-17，实线表示水驱之前的过程，虚线表示水驱之后的过程。岩心长期水驱模拟实验主线是将洗油、烘干的岩样测空气渗透率，饱和水测孔隙度，做相对渗透率实验数据测定，然后进行长期注水冲刷模拟实验，水驱速度控制在临界流速范围内，注水冲刷倍数根据表8-26的要求确定，达到一定的注水倍数后将样品再烘干测渗透率、孔隙度。

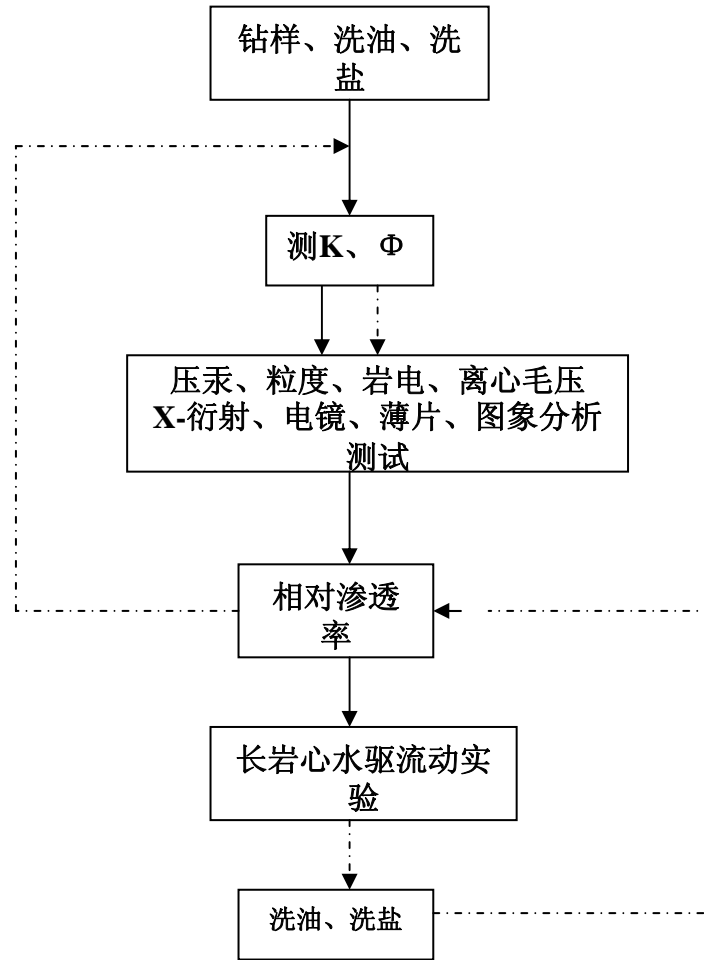


图8-17 岩心注水冲刷及参数测定实验设计（据孙焕泉）



## 3、水驱模拟实验样品的选取

在从胜坨油田二区沙二段选取水驱模拟实验所用的实验样品时，遵循孔隙结构相似、渗透率相近的原则，同时要兼顾高、中、低等不同渗透率级别，从不同位置、不同沉积微相和能量带的岩心中筛选出几组岩心进行不同含水期的注水冲刷物理模拟。

## 4、实验环境确定

- **实验温度：**室内实验模拟温度设定为50度。
- **油水条件：**实验油用20号机械油，模拟油的粘度24.6mPa·s；该地区地层水和注入水的总矿化度分别为25332mg/l和17432mg/l，均为CaCl<sub>2</sub>水型，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量高，在常温下易生成碳酸钙沉淀，在冲刷实验过程中易于堵塞小孔喉，造成渗透率下降。因此为了保证模拟实验的可比性，排除地层水和现场所用污水间发生离子交换反应对测试结果的干扰，实验用3%氯化钾盐水饱和，用3%氯化钠盐水进行长期注水冲刷物理模拟试验。
- **注入速度：**根据不同含水期现场实际注入速度，确定长期注水冲刷物理模拟的实验注入速度。

图8-18为长期水驱模拟实验测试结果，显示在不同注入倍数下渗透率、粒度中值的变化情况。





### 第三节 开发过程中储层性质的动态变化

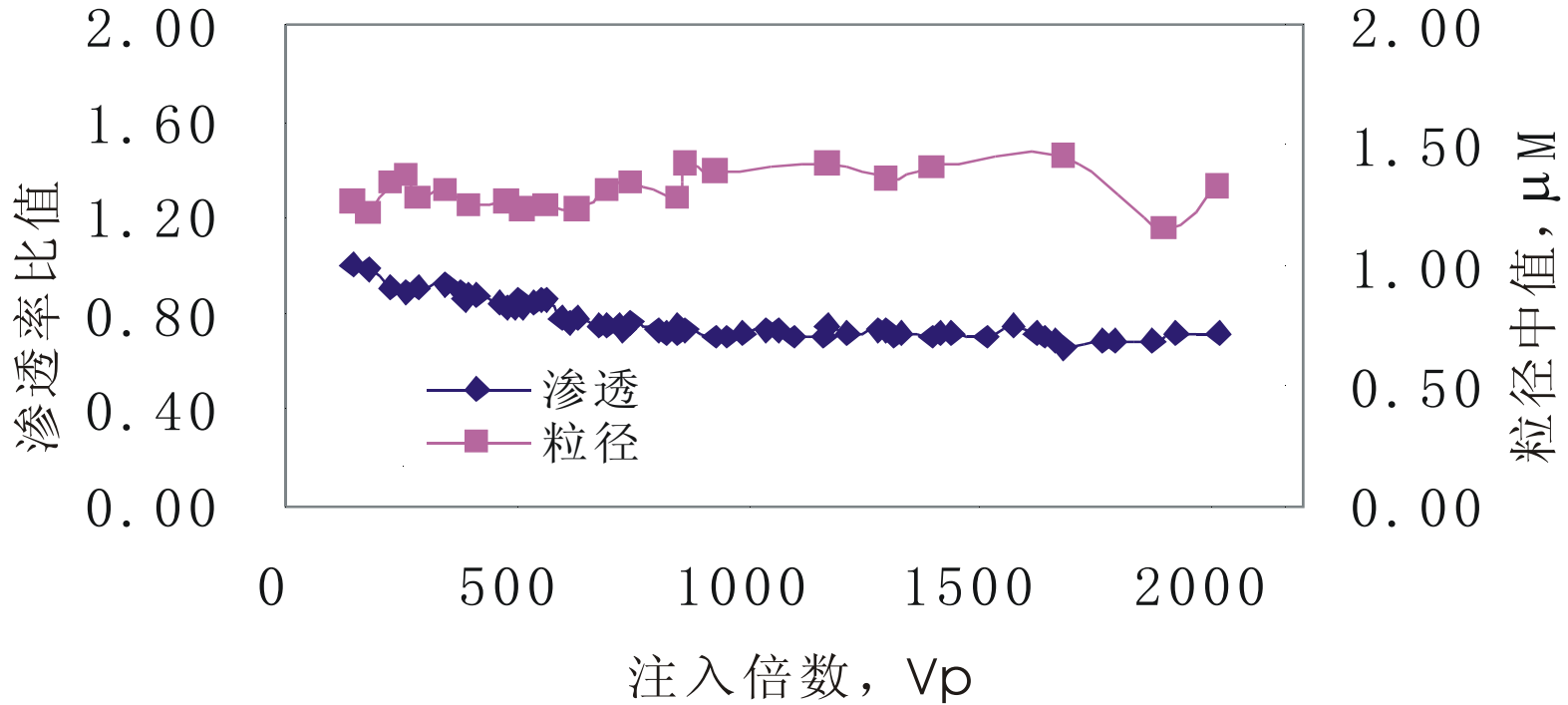
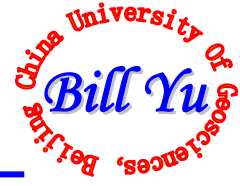


图8-18 渗透率、粒度中值与注入倍数关系图



# 思考题

- 1、什么叫做储层敏感性？储层敏感性包含哪些方面？
- 2、简略概述如何评价储层的敏感性？
- 3、在注水开发过程中储层的性质会有哪些变化？