

松辽盆地北部白垩系储层 粘土矿物特征及其对产能的影响

浙江石油地质研究所

一九八九年一月

登录号	085646
分类号	P618.13
种次号	040

松辽盆地北部白垩系储层
粘土矿物特征及其对产能的影响



5219/30

5219



200304330



编写单位：沉积组
编写人：王行信
参加人员：袁鸿燕



00799744

石油大学
浙江省石油地质研究所
赠书
一九九九年
赠书者：地科系
日期：95.12.18

松辽盆地北部白垩系储层 粘土矿物特征及其对产能的影响

评 审 意 见

该文整理了大庆油田勘探开发重点地区278口井、近4000块样品的粘土矿物分析资料,做了大量的统计工作。并在此基础上,汇编了21个地区的储层粘土矿物纵向图,概略地提出了储层砂岩中粘土矿物纵横向分布特征。在综合了近年来大庆油田有关储层粘土矿物和油层保护的研究结果的基础上,论述了不同埋藏深度下粘土矿物组合及产状特征对油层孔隙结构和产能的影响,以及粘土矿物总量对油层物性和产能的影响,并针对油气勘探开发中与粘土矿物有关的问题,提出了保护油层产能的有益建议。以上工作对于今后深入、全面、系统地研究总结松辽盆地北部白垩系储层粘土矿物分布特征,打下了良好的基础,为各地区油气勘探开发及工程施工设计提供了粘土矿物方面的研究资料,具有一定的参考价值,是一篇在“松辽盆地粘土矿物研究”方面处于领先地位的好文章。

文内对各地区粘土矿物分布特征的统计还需要更详细一些,以便于参考应用;对86年以来粘土矿物绝对含量等分析的新资料还需进行分析总结。

建议该报告评为“优良”。

评审人员:

王衡鉴	高级工程师	大庆管理局勘探部主任工程师
邢顺铨	高级工程师	大庆研究院地质试验室主任工程师
王允良	高级工程师	大庆钻井研究所副所长

前 言

储集砂岩的粘土矿物特征不仅直接影响油层的产能,而且也是防止油层污染、保护油层产能、进行科学钻井和合理开发油田等各项工程设计不可缺少的地质依据。国外从六十年代开始就十分重视储层粘土矿物的研究,七十年代以后,粘土矿物分析已列为设计钻井、完井、油田开发和油层改造等各项工程设计时必须提供的基础资料。我国最近几年来也十分重视粘土矿物对地层损害的影响。1987年,石油部召开了第一次“粘土矿物与地层损害技术座谈会”。会后成立了“粘土矿物与油层保护协调小组”,并列出了四个指导性课题。其中“我国各含油气盆地储层粘土矿物特征及分析方法研究”是一项重要的基础研究项目,旨在搞清各含油气盆地储层粘土矿物特征,使粘土矿物研究更好地为减小地层损害,保护油层产能服务。根据“协调小组”的统一部署,松辽盆地储层粘土矿物特征的研究任务由我所担任。其主要任务是:

1. 搞清储层粘土矿物变化特征及对油层产能的影响。
2. 研究油田勘探开发过程中,储层粘土矿物对地层损害的影响。

为了完成专题研究任务,使研究结果更好地位于大庆油田的开发和外围勘探服务,我们整理了111口井,近4000块样品的粘土矿物分析资料;统计了不同地区各油层的粘土矿物组合特性,并绘制了11个地区(或构造)的储层粘土矿物纵向变化图;它包括了近年来油气勘探的重点地区和已开发的油田,为各个地区的油气勘探和开发的各项工程设计和保护油层研究提供粘土矿物的分析成果。另外,还重点调查了大庆油田近年来有关储层粘土矿物和油层保护研究的各种成果,包括今年我们与研究院地质试验室合作完成的“三肇地区扶、杨油层敏感性评价及油层污染研究”的成果。通过综合研究,论述了大庆油田勘探和开发过程中的储层粘土矿物问题,并提出了四点保护油层产能、提高外围勘探经济效益的建议。希望报告对大庆油田的勘探和开发有所帮助。

在研究过程中始终得到大庆油田研究院领导、地质试验室领导和同志们的关怀和支持,他们为研究工作提供了各种方便条件;特别是粘土组全体同志的通力合作,是使研究工作得以顺利完成的重要保证。在此谨表衷心的感谢。

一、地质概况

松辽盆地位于我国东北部，为一北北东向的菱形盆地，总面积约26万平方公里。地理位置在北纬42°25′—49°23′，东经119°40′—128°24′。地跨黑龙江、吉林和内蒙古自治区一区，是我国东北部大型中生代含油气盆地（图1）。

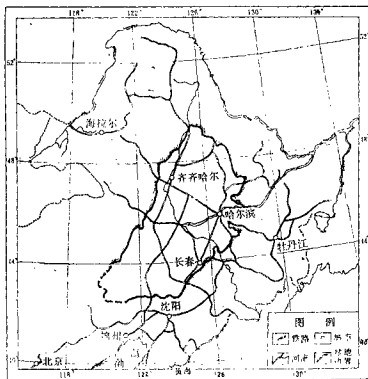


图1 松辽盆地地理位置图

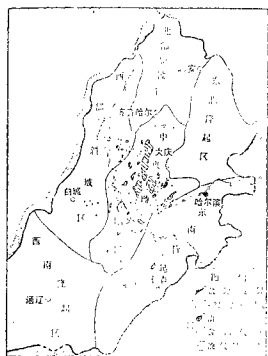


图2 松辽盆地勘探成果图

盆地的基底为古生代和前白垩系变质岩系，属于天山—兴安地槽力西褶皱带的一部分，盆地的沉积层系由侏罗系、白垩系、第三系及第四系组成，最大厚度达2600米。其中白垩系是盆地中最主要沉积层系，厚度达1500—2000米，总厚度达1500—2000米，也是全盆地最主要的含油层系。全盆地白垩系分上下两段，即上白垩统和下白垩统。

上部和下部白垩统含油组合，有八个含油层系，其中已经命名的有七个含油层，它们从下向上是农安油层、扶余油层、扶余油层、高台子油层、葡萄花油层、萨尔图油层和黑帝庙油层（表1）。

三十年来的石油勘探实践表明，松辽盆地蕴藏着极其丰富的油气资源。油气的垂向分布广泛，在基岩上，侏罗系和白垩系各地层组合中都见到了油气显示或工业油气流。纵向上油气分布的井段达3560米。在平面上，全盆地见油气显示面积达7万平方公里，占盆地总面积的27%。到目前为止，在全盆地六个一级构造单元上已发现25个油田和32个获工业油气流的地区（图2）。其中大部分分布在中央拗陷区。

松江盆地白垩系生储盖组合关系表 表1

地层组	地层段	生油层	储油层	盖层	组合名称
明水组	二段		可能油气层		合组
	一段				
四方台组					油部
嫩江组	五段			盖层	浅部
	四段		黑帝庙油层	盖层	
	三段				合组
	二段	生油层		盖层	上部
	一段		萨尔图油层	盖层	
姚家组	二、三段				合组
	一段		葡萄花油层		
青山口组	二、三段	生油层	高台子油层	盖层	中部
	一段				
泉头组	四段		扶余油层		下部
	三段		杨大城子油层		
	二段				合组
	一段		农安油层		
登娄库组	四段				深部
	三段		可能气层		
	二段				合组
	一段				
侏罗系					
基底			可能气层		

盆地的粘土矿物分

析工作主要是配合大庆油田的油气勘探和开发任务进行的。在1975年以前主要采用热分析和透射电子显微镜分析。1975年以后逐步建立了以X射线衍射分析为主,结合扫描电镜、电子探针、X射线荧光光谱、透射电镜、红外光谱、热分析、阳离子交换测定和非晶质成分测定等分析项目在內的粘土矿物分析测试系列。从1975年以来,X射线衍射分析共分析了400余口探井、资料井的3万多块样品。分析层位以白垩系为主;分析地区以中央陷陷区的资料最多,次为西部斜坡区、东北隆起区及东南隆起区的一部分。

这些地区也是我们这次研究地区和范围。

二、储集砂岩的粘土矿物特征

(一) 砂岩的粘土矿物组成

松辽盆地白垩系储层砂岩的粘土矿物主要由蒙皂石(S)、伊利石(I)、高岭石(K)、绿泥石(Ch)、蒙皂石/伊利石(S/I)、蒙皂石/绿泥石(S/Ch)组成。在榆树林的扶余、杨大城子油层和金6井的高台子油层可见蒙皂石和绿泥石的规则混合层—柯绿泥石；在泰康地区的高台子油层中可见少量海绿石；在朝阳沟油田扶余油层的粘土矿物透射电镜分析中还可见微量量的管状多水高岭石，但是，由于含量太少，在X射线衍射分析中往往无法鉴定出来。这些少量矿物只出现在局部地区和层位，并且与其特殊的地质条件有关。如金6井的柯绿泥石，泰康地区的海绿石都有专门的论述，这里不再赘述。以下只讨论主要粘土矿物特性及其对产能的影响。

(二) 粘土矿物在砂岩孔隙中的分布特征

根据粘土矿物在砂岩孔隙中的分布特征及其与砂岩颗粒的相互关系，可将粘土矿物在砂岩孔隙中的产状分为以下三种基本类型：

1. 分散质点式 (图版I-1~3)

粘土矿物以分散质点的形式充填在砂岩的粒间孔隙中，它是自生高岭石在砂岩中的典型产状。蒙皂石和绿泥石含量较多时也可形成分散质点式充填。

2. 薄膜式 (图版I-4~6)

粘土矿物在碎屑颗粒表面呈定向排列，构成连续的粘土薄膜贴在孔隙内壁，就好象在孔隙内壁贴上一层粘土衬层。因此，也有人把它叫做孔隙衬层或颗粒套膜。这种粘土产状最常见的是蒙皂石、绿泥石、伊利石、S/I和S/Ch。它们在碎屑颗粒表面的排列具有明显的方向性，并且绝大多数都是垂直颗粒表面（即孔壁）呈平行排列，这样粘土矿物薄膜的厚度一般都小于 $5\mu\text{m}$ 。

3. 搭桥式 (图版I-7~9)

粘土矿物晶体自孔壁向孔隙空间生长，最终可直达孔隙空间的彼岸，在孔隙空间中形成粘土桥。其中最常见的是各种条片状、纤维状的自生伊利石，它们在孔隙中形成网络状的分布；蒙皂石和混合层粘土也可在喉道处形成粘土桥；高岭石和绿泥石的粘土桥比较少见。

(三) 砂岩粘土矿物组成和产状特征的纵向变化

随着埋藏深度的增加，砂岩中蒙皂石和高岭石要逐渐转变为伊利石和绿泥石。在其转变过程中出现

了 S/I 和 S/Ch 。X射线分析结果表明, 储层中蒙皂石向伊利石或绿泥石转化形成混合层粘土的顶界深度在 1100 ± 200 米; 而混合层粘土转化为绿泥石的顶界深度, 在 1800 ± 200 米。高岭石转化为伊利石或绿泥石的顶界埋深亦在 $1800-2000$ 米左右。

大量的分析数据表明, 储层粘土矿物组成的纵向变化主要受埋藏深度和温度的控制, 而与层位无关。

图3表示泰康—古龙地区扶余油层、葡萄花油层和黑帝庙油层粘土矿物的纵向变化。从图中可见, 在相同的深度下, 不同油层的粘土矿物组合特征基本相似。

砂岩中粘土矿物的成岩变化除受埋藏深度和温度的影响, 还与以下因素有关:

1. 油气的早期进入

油气早期进入砂岩孔隙以后, 会抑制粘土矿物成岩演化的反应速度, 这是某些埋深 $>1111-2111$ 米的储层砂岩中仍有自生高岭石和较好储油物性的重要原因。

2. 沉积环境的影响

不同沉积相带泥岩的有机质丰度不同, 砂泥岩比率不同。因此泥岩粘土矿物成岩反应对砂岩粘土矿物组成的影响不同, 影响的程度也不同。另外, 不同沉积相带, 砂岩的渗透性和连通性不同, 它决定了砂岩孔隙流体与外界的开放程度和交换速率, 因此也直接影响砂岩孔隙中粘土矿物的成岩变化和反应速度。例如, 一些与大庆长垣砂岩体相连通的伸入生油凹陷的砂体, 它不仅较多地受生油凹陷泥岩成岩反应的影响, 而且反应速度也较快, 砂岩中混合层粘土出现或消失的顶界深度往往较其它地区要浅些。

3. 后期构造运动的影响

后期的构造抬升和地层剥蚀打破了砂岩储层体系孔隙流体与矿物之间的物理、化学平衡, 会导致粘土矿物在新的条件下发生新的变化。构造抬升和地层剥蚀使粘土矿物成岩演变时的埋深与目前的井深造成很大差距, 使得在较浅的井深均可见混合层粘土矿物。图4表示各种砂岩粘土矿物组分随井深的纵向变化特征。图中“▲”表示齐家—古龙凹陷的分析结果, “●”表示大庆长垣、西部斜坡带和三肇凹陷的分析结果。从图中可见, 由于构造抬升和地层剥蚀, 大庆长垣、西部斜坡带、三肇凹陷的混合层粘土出现深度均比未遭剥蚀的齐家—古龙凹陷浅。

随着埋藏深度的增加和矿物组成的变化, 粘土矿物的晶体形态和它在孔隙中的分布特征亦发生变化。其中最突出的是伊利石的形态和产状特征的变化。随着埋藏深度的增加, 片状的碎屑伊利石逐步变成条片状、纤维状等各种形态的自生伊利石; 它在孔隙中的产状也由原来的薄膜式变为搭桥式; 伊利石的结晶程度也随着埋藏深度的增加而逐渐变好。

综上所述, 储层粘土矿物特征的纵向变化规律如下:

(1)当埋深 $<1100\pm200$ 米时,砂岩中的粘土矿物以蒙皂石、高岭石和伊利石为主。蒙皂石在孔隙以薄膜胶结为主,局部呈分散质点充填或在孔隙喉道处形成搭桥式胶结。高岭石呈分散质点状集合体,充填在孔隙中;而伊利石则呈碎屑片状,贴附在颗粒表面。

(2)当埋深 $>1100\pm200$ 米, $<1800\pm200$ 米时,储层中的粘土矿物以伊利石、高岭石和混合层粘土为主。在高渗透率的砂岩以高岭石分散质点充填为主。伊利石和 S/I 或 S/Ch 均以薄膜式胶结为主。伊利石的含量较上部地层有明显的增加,其形态也发生了明显变化,开始向孔隙空间生长,局部可形成搭桥式胶结。

(3)当埋深 >1800 米时 油层粘土矿物特征的纵向变化 表2

111米时,砂岩中高岭石含量明显减少甚至消失; S/I 和 S/Ch 分别演变为伊利石和绿泥石。砂岩的粘土矿物以伊利石和绿泥石为特征。伊利石以	最大埋藏深度 (米)	粘土矿物组合	产状特征	油层产能
	$<1100\pm200$	$S、I、K$	薄膜式+分散质点式	高
	$>1100\pm200$ $<1800\pm200$	$I、K、S/I、S/Ch$	分散质点式+薄膜式 少数偶见搭桥式	中
	$>1800\pm200$	$I、Ch、(S/I、S/Ch、K)$	搭桥式+薄膜式	低

条片状、纤维状自生伊利石为特征,呈搭桥式分布。绿泥石在孔隙中呈薄膜式为主,部分可为各种形态的集合体,呈分散质点式充填。表2为粘土矿物组成和产状特征的纵向变化。

4.2.2 砂岩粘土矿物组成的侧向变化

砂岩粘土矿物组成的侧向变化,主要受沉积相带和埋藏深度的影响。

不同的沉积相带,不但砂岩沉积的介质条件有一定的差异,更重要的是如前所述砂泥岩的比例不同,泥岩中的有机质丰度不同。砂体的渗透性和连通性不同。这是影响不同沉积相带砂岩自生粘土矿物组成的最重要因素。以盆地的中部含油组合而言,河流相或三角洲叶状体砂岩以富含自生高岭石为特征;砂岩中的自生高岭石不仅含量高,而且结晶有序度高,晶形粗大,在偏光显微镜下都清晰可辨。而生油凹陷中的透镜状砂体一般不含或很少含自生高岭石,而富含 S/Ch 或绿泥石。

埋藏深度的影响主要表现在相同层位内,盆地边部埋藏深度浅,富含蒙皂石,而向盆地中心,随着埋藏深度的增加逐渐转化为混合层粘土或伊利石和绿泥石。

综上所述,从盆地边缘向拗陷中心,储层砂岩粘土矿物的一级变化规律是:

1. 粘土矿物的绝对含量增加。

2. 蒙皂石和高岭石的含量逐渐减少。

3. 混合层粘土（特别是 $\text{Sm}+\text{Ch}$ ），绿泥石和伊利石的含量增加。

表 3 是近几年来大庆 8 口探井和钻井 3779 块样品的 X 射线衍射分析结果，分别列出了各个油层不同地区砂岩的平均粘土矿物组成特征。图 5、图 6、图 7、图 8 是在大量的分析资料基础上选取 45 口井的 X 射线衍射分析资料，分别表示大庆长垣、三肇凹陷、齐家—古龙凹陷和西部斜坡带 2 个地区（或构造）储层粘土矿物的倾向变化。它包括了目前已开发的油田和近年来盆地北部油气勘探的重点地区。它们不仅反映了各个地区之间储层粘土矿物的倾向变化，而且可以为各个地区油气勘探和开发的各项工程设计和油层保护研究提供重要的地质依据。

三、粘土矿物特征对油层孔隙结构和产能的影响

(一) 粘土矿物在砂岩孔隙中的分布特征 对油层孔隙结构和产能的影响

每种粘土矿物在砂岩孔隙中都有其特征的分布形式，不同成岩阶段的自生伊利石，其在孔隙中的分布特征亦不同。因此，砂岩孔隙中粘土矿物的不同分布特征不仅反映了砂岩粘土矿物组成和形态特征的成岩变化，也直接影响油层的孔隙结构和产能。

1. 对砂岩孔隙结构特征的影响

(1) 孔隙分布曲线特征

图 9 是大庆地区不同粘土矿物产状的砂岩孔隙分布曲线。不同大小孔隙其所占孔隙体积的百分数用直方图表示，它们对岩石渗透率贡献的大小（%）用曲线表示，后者反映样品中渗流孔隙的分布特征。从图中可见，分散粘土质点的砂岩和薄膜式粘土的砂岩，它们的孔隙分布（曲线）具有以下共同特征：

a. 孔隙分布具有前后两峰，前峰低，孔隙半径小（一般 $< 0.5 \mu\text{m}$ ），主要是由粘土矿物充填而造成的粘土矿物晶间孔隙。后峰高，孔隙半径大，是砂岩主要的粒间孔隙。

b. 渗透率贡献的峰位与孔隙分布的后峰位置一致；说明砂岩主要的粒间孔隙即砂岩的主要渗流孔隙。

两类砂岩的主要区别是分散粘土质点式产状的砂岩其主要渗流孔隙半径较大，一般 $> 1 \mu\text{m}$ ；而薄膜式粘土产状的砂岩，其主要渗流半径一般在 $1-1.5 \mu\text{m}$ 。

搭桥式粘土产状的砂岩，其孔隙分布曲线特征与上述两类砂岩相比，具有明显的差别。

a. 孔隙半径小, 分布范围窄, 呈狭窄的单峰型, 主要孔隙半径在 $0.5-1\mu\text{m}$ 。

b. 孔隙分布的峰位与渗透率贡献的峰位不一致, 后者位于孔隙分布峰位的右侧。

上述特征说明, 搭桥式粘土的砂岩大部分孔隙已成为束缚孔隙, 只有少数稍大的孔隙具有一定的渗透性, 整个岩石的渗透性极低。

(2) 孔隙结与参数

a. 孔隙的大小

表4表示不同粘土矿物产状的砂岩,

它们的最大孔隙半径(R_{M})、平均孔隙半径(R)、孔隙半径中值(R_{50})和孔隙半径均值的主要分布范围。图10表示它们的频率分布特征。由于这些样品的粒度大小、

泥质和碳酸盐的含量均相似, 因此可以认为, 表4和图10所反映的差异主要是由于粘土矿物产状不同而引起的。这表明粘土矿物在砂岩孔隙中的产状对孔隙喉道的大小有明显的影响。

b. 结构系数

结构系数反映流体在孔隙中渗流的迂回程度, 结构系数越大, 反映孔隙的弯曲程度越剧, 连通性越差。图11表示不同粘土矿物产状的砂岩它们的结构系数的频率分布特征。从图中可见, 不同粘土矿物产状对砂岩孔隙几何形态的影响是不同的。分散质点式粘土的砂岩和薄膜式粘土的砂岩, 它们的孔隙结构系数频率分布的峰位是一致的, 都在2~4之间, 反映了它们都有较好的连通性。两者的差别在于分散质点式粘土的砂岩孔隙结构系数更小, 84%以上的样品结构系数 <4 , 表明它比薄膜式粘土的砂岩具有更好的渗透性。

搭桥式粘土的砂岩, 绝大部分样品(80%)的结构系数 >8 , 反映了由于粘土在孔隙中的搭桥式生长, 使流体的通道变得更加迂回曲折, 连通性很差的特征。

(3) 孔隙分布和渗透率分布特征

图12分别表示不同粘土矿物产状的砂岩, 它们的主要孔隙半径和主要渗流孔隙半径的分布特征。从图中可见, 分散质点式粘土的砂岩和薄膜式粘土的砂岩, 它们的主要孔隙半径分别 $>6-12\mu\text{m}$ 和 $>3-9\mu\text{m}$ 。另外, 它们的孔隙分布峰位与渗透率分布峰位一致, 说明岩石的主要孔隙就是岩石的主要渗流通道。

搭桥式粘土的砂岩主要孔隙半径很小(65%以上的样品其主要孔隙半径 $<1\mu\text{m}$), 这些孔隙一

一般都是束缚孔隙，对岩石渗透率的贡献很小。其孔隙分布峰位与渗透率分布峰位不一致，砂岩的渗透率贡献主要来自少量半径在 $1-5\text{ }\mu\text{m}$ 之间的孔隙。

渗透率分布的峰值，表示位于渗透率峰位内的主要渗流孔隙对岩石渗透率贡献的大小。从图 1-3 可见，分散质点式粘土的砂岩 60% 以上的样品其渗透率分布的峰值均在 3.5% 以下。反映了这类砂岩渗透流孔隙半径分布范围大，渗透性能好的特征。薄膜式粘土的砂岩，60% 以上的样品其渗透率分布的峰值在 5.0% 以下。渗透率分布峰值的增大反映其渗流孔隙半径分布范围的缩小。搭桥式粘土的砂岩，11% 以上的样品其渗透率分布的峰值在 6.5% 以上，最高可达 9.5% 以上。说明岩石的渗流半径小，渗透孔隙半径分布范围很窄，渗透性极差。

2. 对油层物性和产能的影响

(1) 对砂岩储油物性的影响

图 1-4 是不同粘土矿物产状的砂岩孔隙度—渗透率特征。这些样品的粒度中值、泥质含量相近，碳酸盐含量都 $<1\%$ 。从图中可见：

分散质点式粘土的砂岩，多数样品的空气渗透率在 $511-1000 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ ，孔隙度在 23—35% 之间，储油物性好。薄膜式粘土的砂岩，样品的空气渗透率一般在 $11-111 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ ，孔隙度在 11—17% 之间，储油物性次之。搭桥式粘土的砂岩，样品的空气渗透率都 $<11 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ ，绝大多数 $<1 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ ，孔隙度 $<15\%$ ，储油物性最差。因此，当泥质含量相似时，砂岩的粘土矿物产状类型可以大致反映砂岩储油物性的好坏和油层自然产能的高低。

(2) 毛细管压力曲线特征

图 1-5 是不同粘土矿物产

状砂岩的典型毛细管压力曲线。

从图中可见：不同粘土矿物产

状的砂岩，其毛细管压力曲线

的分布十分有规律：分散质点

式粘土的砂岩，其毛细管压力

曲线偏向图的左下方；搭桥式

粘土的砂岩，其毛细管压力曲

线集中在图的右上方；而薄膜

不同粘土矿物产状的砂岩毛细管压力曲线特征 表 5

项 目 \ 特 征	分散质点式	薄膜式	搭桥式
排驱压力 (a.m)	1.1-1.5	1.9-1.5	11-41
最大喉道半径 (μm)	11-22	6-9	1.2-1.7
饱和度中值压力 (a.m)	1.1-1.5	3-5	30-111
最小非饱和孔隙体积 (%)	8-11	17-25	> 30-65
最大饱和度 (%)	> 11-31	> 70-11	< 71
油层产能	高	中—低	低

式粘土的砂岩，它们的毛细管压力曲线介于两者之间。上述特征反映了不同类型粘土产状砂岩的孔隙结

构和产能的规则变化。它们的特征参数和产能的大小如表 5 所示。

3. 对油层润湿性和相对渗透率的影响

(1) 对油层润湿性的影响

大庆及其外围油田的油层润湿性变化规律表明, 以高岭石分散质点式充填为特征的大庆油田萨尔图、葡萄花油层, 往往具有明显的亲油性。进入高台子油层以后, 随着砂岩中绿泥石或 S/C_h 含量的增加, 砂岩往往表现明显的亲水性。在大庆外围的一些小油田中, 砂岩粘土矿物一般以 S/C_h 的薄膜式胶结为主, 这些油层亦具有明显的亲水性。这些现象说明, 岩石的润湿性是与砂岩的粘土矿物组成、产状和孔隙结构有着密切的关系, 是一个值得进一步深入研究的课题。

粘土矿物产状对相对渗透率曲线的影响 表 6

砂岩的粘土矿物产状	分散质点式		薄膜式		
编 号	243-1	268-2	34-2	龙31	龙23
井 号	北2-5-122	北2-5-122	中14-163	龙134	龙134
层 位	葡12-3	葡13-4	高III	葡13-3	萨II3
空气渗透率 ($10^{-3} \mu m^2$)	1640	940	430	125	79
孔隙度 (%)	28.4	28.05	29.2	22.94	18.7
束缚水饱和度 (%)	12.20	17.36	29.80	46.30	46.60
残余油饱和度 (%)	27.94	27.89	29.70	25.70	18.50
两相交点饱和度 (%)	48.89	47.83	54.20	81.90	66.90
残余油时水相对渗透率	0.54	0.39	0.21	0.12	0.17
润 湿 性	亲 油	亲 油	亲 水	亲 水	亲 水

(2) 相对渗透率特征

表 6 表示不同粘土矿物类型对相对渗透率曲线的影响。从表 6 中可知, 分散质点式粘土的砂岩束缚水饱和度和低, 残余油饱和度高, 油水相对渗透率曲线的交点饱和度 < 50%, 而薄膜式粘土的砂岩束缚水饱和度较高, 残余油饱和度较低, 两曲线交点饱和度 > 50%, 残余油饱和度对应的水相相对渗透率较低。

(二) 伊利石的成岩变化对油层渗透率和孔隙结构的影响

1. 伊利石特征的纵向变化

通过对 16 口井 10 块砂岩样品的 X 射线衍射和扫描电镜分析结果表明 (取样井深 1411.43-1514 米), 齐家凹陷萨、葡、高各油层的砂岩粘土矿物特征基本相似, 以伊利石和绿泥石 (或 S/Ch) 为主, 含少量 S/I , 个别可见少量高岭石。粘土矿物特征的纵向变化主要受深度的控制, 与层位无明显的关系。而且, 砂岩粘土矿物特征的纵向变化除 S/Ch 向绿泥石转化外, 在扫描电镜下最明显的是伊利石形态特征的变化: 在井深 < 1800 米时, 砂岩中的伊利石除局见边缘卷曲现象外, 均以薄膜状附着在颗粒表面为主; 绿泥石的结晶也较细; 在井深 > 1800 米以后, 不但绿泥石结晶变粗, 而且孔隙中伊利石的片状外形发生分裂, 直至变成纤维状自生伊利石; 在此过程中, 粘土矿物在孔隙中的产状亦由薄膜式逐渐向搭桥式过渡, 砂岩的油层物性和孔隙结构特征也发生明显的变化。

2. 对油层渗透率和孔隙结构的影响

图 16 表示细粒砂岩样品渗透率的纵向变化特征。从图中可见, 井深 < 1800 米的样品, 其空气渗透率 $> 111 \times 10^{-3} \mu m^2$; 当样品井深 > 1800 米时, 大多数样品的空气渗透率 $< 111 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。由于这些样品的粒度、泥质含量 ($< 10\%$) 和碳酸盐含量 ($< 1\%$) 相似, 粘土矿物也都是以伊利石和绿泥石为主。所以可以认为, 自生伊利石在孔隙空间的生长和桥塞, 是导致样品渗透率降低的重要原因。图 17 和图 18 分别表示这些样品的平均孔隙半径和结构系数的纵向变化特征。从图中可见, 在井深大于 1800 米以后, 样品的平均孔隙半径明显变小, 而孔隙结构系数明显变大。这些特征正好反映了由于孔隙中自生伊利石的生长和桥塞, 使样品的原始粒间孔隙遭到不同程度的破坏, 致使平均孔隙半径变小, 渗透性变差。

(三) 粘土矿物含量对油层物性和产能的影响

1. 粘土矿物绝对含量对渗透率的影响

在砂岩的粘土矿物组成和产状相同的条件下, 砂岩的粘土矿物含量越高, 油层的渗透率越低, 这是众所周知的。图 19 是松辽盆地不同地区砂岩粘土矿物含量与渗透率的关系。从图中可见, 各地区砂岩的渗透率均随着砂岩中粘土矿物含量的增加而降低。

由于测定砂岩中各种粘土矿物含量是一件十分费时的工作, 所以该项分析至今尚未普遍开展。在这种情况下, 研究粘土含量对油层物性和产能的影响时, 通常都借用粒度分析或薄片分析中的泥质含量做

据。因为在多数情况下，砂岩中泥质含量越高，其所含的粘土矿物含量也越高。但是，必须指出，两者的概念是不同的。泥质中除了含粘土矿物外，还包括一些长石、石英等细粒陆源碎屑物质，而且泥质中粘土矿物与其它碎屑矿物在数量上的比例关系，在不同的沉积条件和成岩作用下是不一样的。这可能是造成研究中某些点比较分散的一个重要原因，但是总的变化趋势不变。

2. 泥质含量对朝阳沟油田油层孔隙结构的影响

表7是朝阳沟油田扶余油层和泰康—古龙地区萨、葡、高油层孔隙特征的比较。扶余油层样品的采样井深均小于1100米，但它们的孔隙结构特征与泰康—古龙地区井深>1800米的搭桥式粘土的砂岩相似。研究其原因是由于多数样品泥质含量均在10—20%。孔隙中大量的泥质充填使孔隙喉道变细，连通性变差，空气渗透率一般在 $1-51 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。

朝长地区扶余油层与泰康—古龙地区砂岩孔隙特征的比较 表7

地区和油层	粘土产状	最大孔隙半径 (μm)	平均孔隙半径 (μm)	孔隙半径中值 (μm)	歪度	结构系数
泰康—古龙地区	分散质点式	> 10 (100%)	> 6 (71%)	4-20 (71%)	0.8-0.9 (71%)	< 4 (71%)
萨、葡、高油层	薄膜式	5-10 (93%)	> 3 (71%)	1-15 (71%)	0.8-0.9 (81%)	< 8 (11%)
	搭桥式	< 1-1 (70%)	< 1 (63%)	1-3 (71%)	0.1-0.5 (75%)	> 8 (11%)
朝—长地区扶余油层	分散质点式	< 1-5 (68.4%)	< 1 (13.2%)	1-3 (36.8%)	0.1-0.5 (77.8%)	4-8 (73%)
	—薄膜式					

注：括号内为对应的样品分布频率

3. 泥质含量对齐家凹陷中部含油组合油层物性和孔隙结构的影响

为了尽量减少粒度大小和碳酸盐含量对油层物性的影响，研究时选取泥质含量不同而碳酸盐含量都<1%的细粒砂岩样品，同时为了区分成岩作用对砂岩物性的影响，根据粘土矿物的纵向变化将井深小于1800米的样品与井深>1800米的样品用不同符号表示，分别进行研究。

(1) 对砂岩孔隙度的影响

图20是砂岩泥质含量与孔隙度的关系。从图中可见：

a. 不论是井深>1800米还是<1800米，砂岩的孔隙度均随泥质含量的增加而减小，两条关系曲线几乎平行，说明在分析井深范围内，泥质对砂岩孔隙度的影响是一样的。

b. 井深<1800米的砂岩，其孔隙度一般>20%；而井深>1800米的砂岩，其孔隙度小

于 20%, 即相同泥质含量的砂岩, 由于埋藏深度和砂岩成岩作用的加强, 其孔隙度明显减小。

(2) 对砂岩渗透率的影响

图 2-1 是砂岩泥质含量与空气渗透率大小的关系图。从图中可见:

a. 井深 < 1800 米的样品, 其空气渗透率高, 大多数样品均 $> 10 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$; 随着泥质含量的增加样品的空气渗透率减小, 两者线性关系较好。说明泥质含量对样品渗透率有明显的影 响。这些样品中, 伊利石的自生长并不明显, 粘土矿物主要以薄膜式分布在砂粒孔隙中。

b. 井深 > 1800 米的样品 (最大井深为金 63 井 2000, 5 米), 其空气渗透率多数 $< 10 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$, 在 $5 \times 10^{-2} \sim 10 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ 之间。另外, 与井深 < 1800 米的样品相比, 泥质含量增加时, 渗透率降低的速度较快, 关系曲线的相关性变差, 点显得比较分散。这反映了随着伊利石自生长在孔隙中搭桥式充填作用的加强, 粘土矿物产状对岩石渗透率的影响逐渐增强。

(3) 对孔隙结构的影响

a. 平均孔隙半径

图 2-2 是砂岩泥质含量与平均孔隙半径大小的关系图。从图中可见:

井深 < 1800 米的样品, 砂岩的平均孔隙半径在 $4 \sim 11 \mu\text{m}$, 其中当泥质含量 < 10% 时, 砂岩平均孔隙半径随泥质含量增加而减少的速度最快; 当泥质含量 > 10% 时, 平均孔隙半径的减少速度变慢。这是因为当泥质含量 < 10% 时, 泥质均以贴附颗粒表面为主, 泥质的增加对孔隙喉道的大小影响较大。当泥质含量 > 10% 时, 部分新增加的泥质较多地充填在粒间孔隙中, 它们对孔隙喉道的大小影响较小, 但是对孔隙的连通性则有明显的影响。

井深 > 1800 米的样品, 当泥质含量 > 6% 时, 其平均孔隙半径均在 $2 \mu\text{m}$ 左右, 不随泥质含量的增加而变化。说明在砂岩孔隙中, 由于自生伊利石在孔隙中的自生长和它对砂岩原始孔隙空间的改造, 使粘土矿物对砂岩孔隙半径的影响程度明显增加。

b. 结构系数

图 2-3 是砂岩的泥质含量与孔隙结构系数的关系图。从图中可见:

井深 < 1800 米的样品, 随着泥质含量的增加, 砂岩的结构系数增大, 有比较明显的线性关系。反映了泥质含量的增加对孔隙的连通性有着明显的不利影响。

井深 > 1800 米的样品, 泥质含量与孔隙结构系数之间没有明显的线性关系。说明由于粘土矿物的成岩变化, 这时影响砂岩连通性好坏的主要因素是粘土矿物对砂岩原始粒间孔隙的改造程度, 而不是泥质含量的多少。

(4) 对最大饱和度的影响

图 2-4 表示泥质含量对砂岩最大饱和度的影响。从图中可见：

a. 井深 < 1800 米的样品，随着泥质含量的增加和泥质对粒间孔隙的充填，砂岩的最大饱和度明显降低。一般当泥质含量 < 10% 时，样品的最大饱和度 > 70%，油层有较高的产能。

b. 井深 > 1800 米的样品，砂岩的最大饱和度与它的泥质含量无明显的关系，同样主要决定于粘土矿物对原始孔隙的改造程度。绝大多数样品的最大饱和度都 < 70%，油层的产液能力降低。其中也有一些样品的最大饱和度 > 70%，这些样品分以下两种情况：

一种情况是含油砂岩，由于油气的早期进入，抑制了粘土矿物的成岩变化。虽然目前的埋藏深度超过了 1800 米，但是粘土矿物的成岩变化和它对砂岩孔隙结构的改造程度要低于目前的深度。因此保持了较高的产液能力。

另一种情况是由于砂岩中的粘土矿物含量很少，这不仅减少了粘土矿物成岩演变对砂岩孔隙结构的影响，而且由于渗透性好，有利于次生溶孔的发育。因此，即使埋藏很深仍可有较好的渗透性。

上述最明显的例子是金 2 井和金 71 井。金 71 井高四段油层，井深 1954—1956 米，由于泥质含量很少，砂岩中次生溶孔发育，渗透率高于其上、下相邻的油层。金 2 井菊花油层，由于泥质含量少（4—6%），在扫描电镜下颗粒表面干净，很少见粘土矿物，加上油气对砂岩粘土矿物成岩作用的抑制，所以，虽然目前井深达 1902—1905 米，但是油层的空气渗透率在 $111 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上，单层日产油 4—8 方，获得较好的产能。

综上所述，随着埋藏深度的增加，砂岩孔隙中粘土矿物产状特征的变化不仅反映了粘土矿物组成和形态特征的变化，而且也反映了粘土矿物对原始粒间孔隙的改造程度。因此，它是影响砂岩储层孔隙结构和产能的最重要因素之一。对埋深 < 1800 ± 200 米、以薄膜式和分散质点式粘土为主的砂岩，随着粘土矿物绝对含量的增加使砂岩的储集性能和产能变差的特征也是十分明显的。但是，随着埋藏深度的增加和自生粘土矿物对原始粒间孔隙改造程度的增强，泥质含量对储层孔隙特征和产能的影响就逐渐减弱。在以自生伊利石搭桥式生长为主的砂岩中，其孔隙特征和产能大小主要决定于它对原始粒间孔隙的充填和改造程度。