

# 成岩作用对砂岩储层孔隙结构的影响<sup>1)</sup>

朱国华 裘亦楠

(长庆油田勘探开发研究院, 庆阳) (石油部勘探开发研究院, 北京)

砂岩储油物性的优劣不仅和沉积作用有关, 而且和成岩作用有密切关系。本区延<sub>10</sub>砂层组中一些特殊孔隙结构和流体运动特征, 及储油物性的变化, 并不是沉积期形成的, 而是成岩改造的产物。研究工作表明: 成岩作用不仅改造了砂岩储层的孔隙结构和储油物性, 而且在构成油藏圈闭条件和油藏边界区的低渗透带等方面起了重要作用。

工作中对马岭油田及其外围146口井的2000余块岩心作了肉眼和薄片观察, 部分岩心作了电镜扫描、铸体薄片、毛管压力曲线和粘土矿物分析。研究区内延<sub>10</sub>砂层组的埋藏深度是相似的。

## 一、延<sub>10</sub>砂层组的沉积环境和岩性特征

延<sub>10</sub>砂层组系限制性河谷充填沉积。

经过印支运动, 三叠系延长统地层被剥蚀为广泛的沟谷地形, 呈东西向的甘陕古河谷为主干的河谷, 最深达240多米, 宽20—30公里, 宽/深比可大于200, 坡降一般仅1°或更小。其它近南北向的支谷或更次一级的支谷, 其深度和宽度依次减小(图1)。在这种古地貌背景上, 延<sub>10</sub>砂层组开始沉积, 初期以干旱气候的间歇性河谷充填为主, 充填物为粗的和混杂的砂砾; 后期气候渐趋潮湿, 河谷变宽、变浅。随着宽深比的增加, 开始发育为瓣状河流, 河道砂岩分布面积扩大, 砂岩粒度比早期河谷充填物细, 分选也变好。图2是本区延<sub>10</sub>砂层组的代表性剖面, 具下列特征。

1. 碎屑物自下而上由粗变细, 组成一个大的正旋回, 沉积构造由中下部的层理不明显的块状构造、大型斜层理, 向上出现纹层构造, 反映水流强度的逐步减弱。

2. 早期河谷充填物以砾岩、砾状砂岩等粗碎屑为主, 分选差, 砂砾共存, 形成“粗杂”地层, 尤以母岩物质中的软矿物、岩屑成份较多的马岭油田南区为典型。

其沉积构造为比较单调的斜层理, 岩心中观察到的层系厚度一般有几厘米, 倾角20°左右(图版I, 1), 这种斜层理在一个单元砂层中变化不大, 反映了短暂急流的快速堆积。

部分地区在下部充填物中有泥质砾岩, 是早期干旱暴雨条件下的泥石流沉积。

3. 砂层的每个小韵律单元一般厚1米左右, 说明当时水浅流急的特征。这些小韵律结束于出现一些仅数厘米厚的粉砂质泥岩或泥质粉砂岩时, 其中可见水平纹层, 属河流

1) 本文曾在1982年加拿大第11届国际沉积学会上宣读。

枯水期的悬移质充填物。每个小单元砂层与上下泥质夹层都是突变接触，砂层内部正向渐变的韵律性不明显，是洪水期的非常短暂快速废弃的表现。

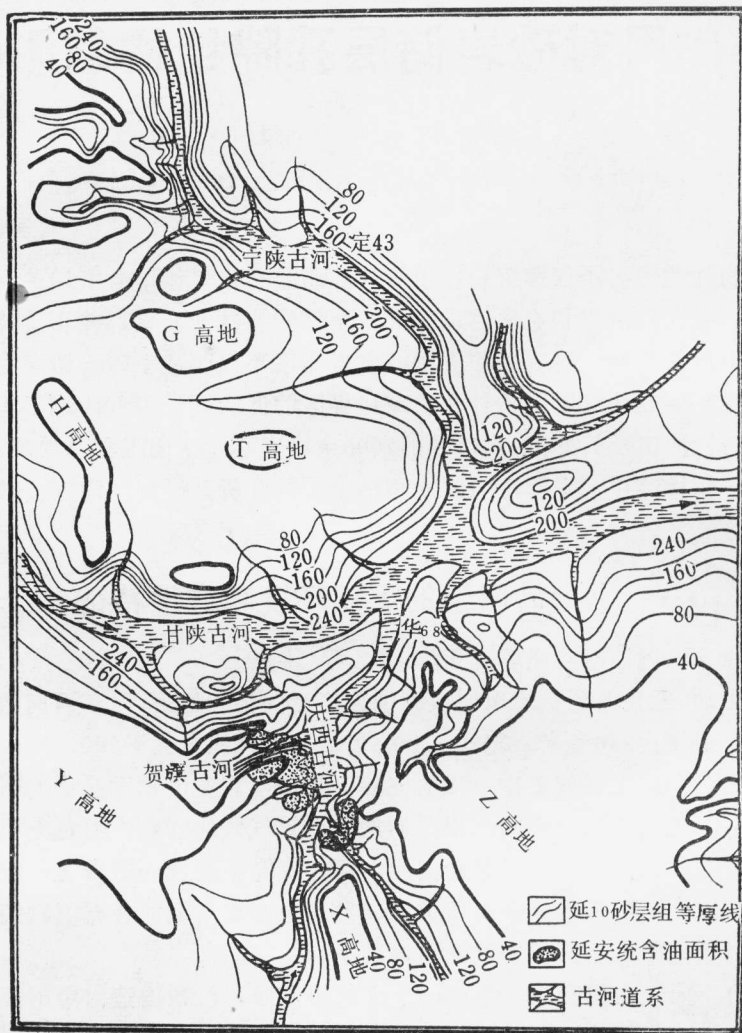


图1 陕甘宁盆地南部前侏罗纪古地貌图

Fig. 1 Paleomorphologic map (prejurassic) of the south region in Shanxi-Gansu-Ningxia Basin

4. 后期河谷充填物由于河谷宽深比的扩大，逐渐向瓣状河发展，表现在砂岩粒度变细，泥质夹层增厚，说明河道摆动幅度增大，导致河漫滩沉积加厚。砂岩中出现有明显的平行层理（图版 I，2），可见剥理线理（Parting. Lineation），说明仍属水浅流急的上部流态（Upper flow Regime）应属瓣状河的特征。

砂岩成岩作用是在沉积作用形成的砂体特征的基础上进行的。本区不同河道砂岩的成岩特点不同，正是由它的基本沉积条件所决定的。这就是限制性河谷充填沉积导致了各条河流完全可以有各自不同的物源区和各自的沉积作用而互不影响。

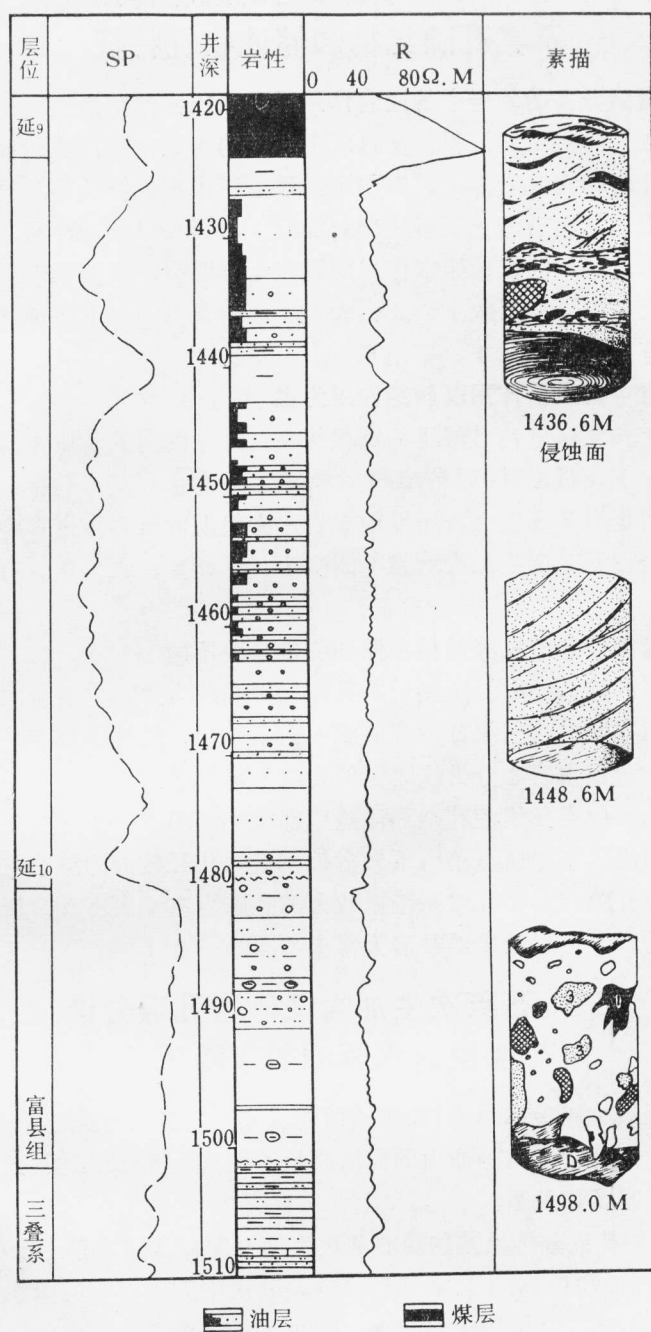
图2 延<sub>10</sub>砂岩组柱状剖面(马岭油田68井)

Fig. 2 Typical column of Yan-10 sandstones Maling oil field, well 68

## 二、不同物源河道砂岩的成岩作用特点 及其孔隙结构和储油物性特征

### 1. 含柔性碎屑组分多的砂岩中的成岩作用以机械压实作用为主

马岭油田南区延<sub>10</sub>砂层组的沉积物来自近南北向的庆西古河, 流向自南而北(图1)。母岩以古老结晶片岩和岩浆岩为主, 因而延<sub>10</sub>砂层组中含各类长石和岩屑达30—40%(其中柔性低级变质岩屑和绢云母化长石达15—20%), 石英仅60—70%。由于软硬组分混杂, 所以中成岩未成熟期的机械压实作用的影响十分明显, 主要表现在颗粒形变嵌合和原生粒间孔隙被大量破坏(图版I, 3、表1), 由长石的地下溶蚀和高岭石化所产生的次生溶孔较发育(图版I, 4、5、6, 表1)。

### 2. 纯石英砂岩中的成岩作用以胶结作用为主

马岭油田中区和北区延<sub>10</sub>砂层组的沉积物来自近东西向的贺旗古河和甘陕古河, 流向自西而东(图1), 母岩以沉积岩为主, 形成了一套含石英(包括燧石)达98%左右的纯石英砂岩。由于石英硬度大, 所以中成岩未成熟期的压实作用影响小, 其原生粒间孔隙的损失主要是由石英次生加大所致(图版I, 7、8, 表1)。有少量石英溶蚀而成的次生溶孔。

### 3. 两种不同类型砂岩的孔隙结构和储油物性显著不同

含柔性组分多的砂岩经成岩压实后的孔隙以微孔隙为主, 主要分布于低级变质岩屑, 绢云母化长石以及由这些组分形变而成的假杂基中。此外, 尚有较多长石溶孔和自生高岭石晶间孔, 所以用岩心分析仪测定的孔隙度仍然较高, 但孔径较大的原生粒间孔保存极少(表1)。此类砂岩的孔喉和渗透率都极小(图3—1)。石英砂岩经过以石英次生加大为主的成岩作用后, 仍留下较多被改造的孔径较大的剩余粒间孔隙, 由于石英颗粒本身缺少微孔隙, 整个孔隙系统以较大的孔隙为主(表1), 所以孔喉和渗透率要比孔隙度相似的含柔性组分多的砂岩大得多(图3—2)。

## 三、石英次生加大使砂岩孔喉分选 变差, 水驱油效率降低

本区延<sub>10</sub>砂层组中渗透率小于160毫达西的岩样, 其孔喉分选随渗透率的增大而变差, 与我国大庆、河南、玉门等油田的储层相反(图4、5)。这与延<sub>10</sub>砂岩中的石英次生加大特别发育有密切关系。

1. 延<sub>10</sub>砂层组中孔喉分选最差的是石英次生加大发育含陆源粘土少的渗透性较好的砂岩(图5—1的曲线31-2-1, 4-15-8), 其次生加大石英的体积一般达岩石总体积的5—15%(表1)。从图版I, 7、8中可见: 石英次生加大改造了砂岩的孔隙结构, 使很多颗粒间成嵌合接触, 将原来具连通性, 分选性良好的孔喉系统切割成一系列大小不等的孔喉系统, 大大降低了其孔喉的分选程度。而那些石英次生加大不发育、含陆源粘土较高的低渗透性砂岩(图版II, 1), 由于其石英次生加大量甚微(小于1%), 对孔喉的改造几乎不起作用, 所以其孔喉的分选性反而较好(图5—1的曲线29-1, 12-2)。

表 1 中成岩各阶段砂岩中孔隙的损失和产生

Table 1 Loss and gain of pore in sandstone during each stage of mesodiagenesis

井 名	井 深 M	砂 岩 类 别  岩 性	伊 利 石 含 量 %	未成熟阶段			次成熟阶段		成熟阶段早期		成熟阶段晚期		次生溶 孔总量 %	剩 余 粒 间 孔 %	岩 心 分 析 孔 隙 度 %
				压 实 损 失 的 孔 %	自 生 利 膜 的 孔 %	伊 利 石 损 失 的 孔 %	石 英 大 粒 间 孔 %	加 失 间 孔 %	自 生 石 英 大 粒 间 孔 %	高 沉 淀 的 粒 间 孔 %	碳 酸 盐 结 晶 的 粒 间 孔 %	盐 类 沉 淀 的 粒 间 孔 %			
南70井	1403.51	砾状长石岩屑 质石英砂岩	3	36.06	0	1.19	1.24	0.16					5.51	1.42	16.2
南70井	1445.73	粗粒长石岩屑 质石英砂岩	3	31.78	0	2.67	2.44	1.65					4.06	1.67	14.7
中80井	1373.90	中-细粒纯 石英砂岩	1	8.09	0	13.10	1.43	1.28					2.23	17.27	21.9
中 8 井	1623.17- 1623.62	细-中粒纯 石英砂岩	2	10.32	0	15.74	5.88	5.46					1.78	2.71	12.9
北150井	1669.24	中粒纯 石英砂岩	3	14.32	2.51	0	5.17	0					1.70	17.5	22.4
北150井	1669.88	粗-中粒纯 石英砂岩	3	17.49	0.69	0	2.15	0					0.65	19.67	25.5
岭35井	1542.84	粗-中粒长石 质石英砂岩	1	18.93	0	8.67	0.40	1.41					2.76	11.50	19.3
华68井	1248.20	中粒石英砂岩	3	18.73	0	7.64	1.44	7.06					1.51	12.68	18.5
元15井	1419.70	中粒石英砂岩	2	19.55	0	4.90	3.26	1.55					3.25	11.74	/
定43井	1766.02- 1766.20	中粒岩屑质 长石砂岩	3	29.54	0	1.79	4.80	0.54					4.28	3.41	18.0

2. 与河南油田储层的沉积结构（陆源粘土含量、颗粒分选等）和渗透率相似；但河南南下第三系砂岩储层中的石英次生加大极不发育，因而二者相比较时，本区延<sub>10</sub>中等渗透性砂岩的孔喉分选要差得多（图 5—1 曲线 32-2~1、4-15-8，图 5—2 曲线 25、68、116）。

综上所述，石英次生加大与砂岩孔喉分选的关系是十分明显的。我国很多油田砂岩储层的石英次生加大极不发育，其毛管压力曲线、孔喉分选和渗透率的关系都与河南油田相似而不同于本区的延<sub>10</sub>砂岩。

石英次生加大破坏了孔喉的分选性，也改变了流体在孔道中的渗流方式，流体往往沿少数大孔道渗流。本区延<sub>10</sub>砂岩中的中等渗透层由于孔喉分选差，所以其室内水驱油效率反而低于孔喉分选较好的低渗透层（表 2），用退汞法测定的汞退出率也低于低渗透层（图 5—1 数据）。渗透砂层水驱油效率的降低意味着原油采收率的降低，所以石英强烈次生加大会降低油藏的采收率，这是一个不利的因素。本区延<sub>10</sub>渗透性油层注水见效后含水率上升快，是石英次生加大对孔隙结构进行了改造的缘故。

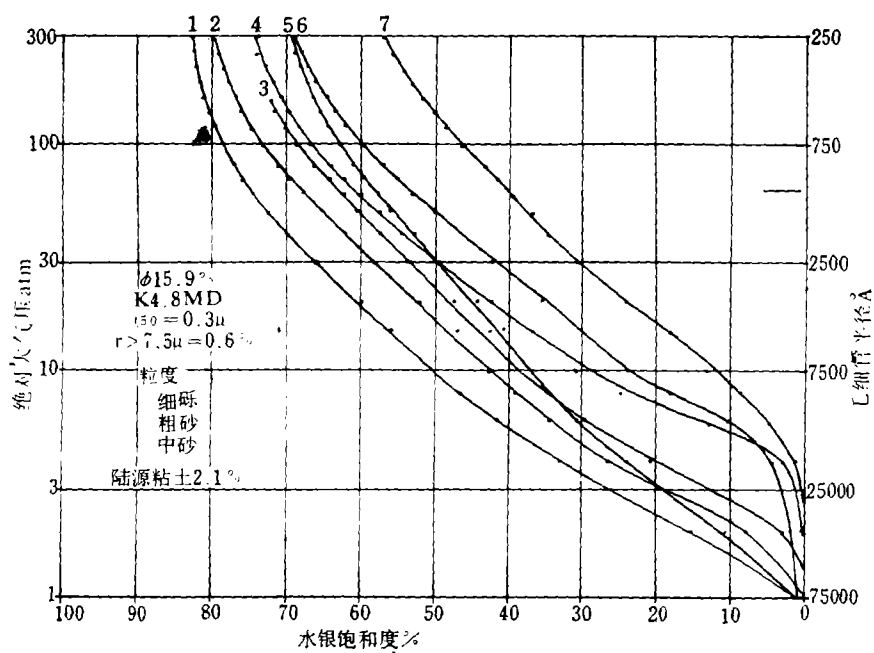


图 3—1 马岭油田南区延<sub>10</sub>砂层组毛细管压力曲线

Fig. 3—1 Capillary pressure plots of Yan-10 sandstones in the south area of Maling oil field

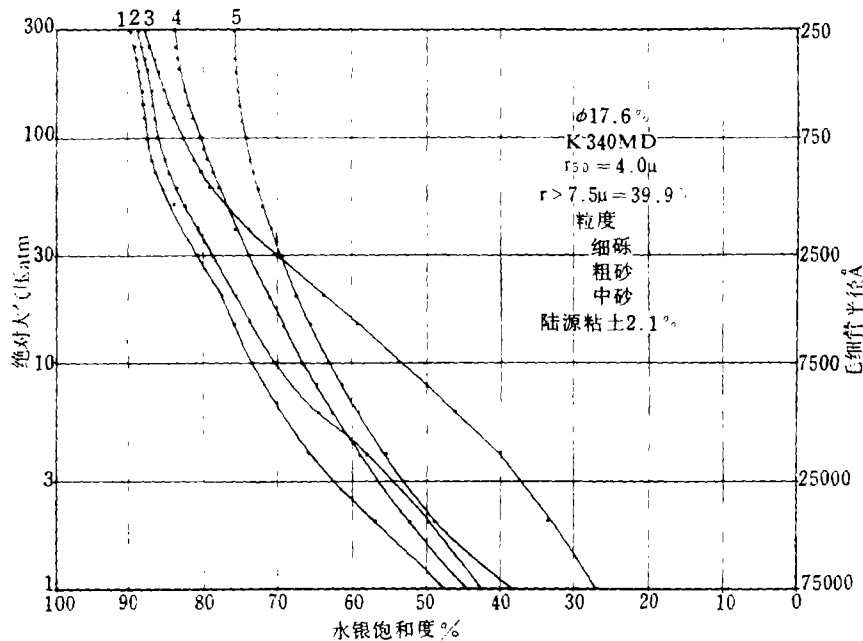


图 3—2 马岭油田中区延<sub>10</sub>砂层组毛细管压力曲线

Fig. 3—2 Capillary pressure plots of Yan-10 sandstones in the middle area of Maling oil field

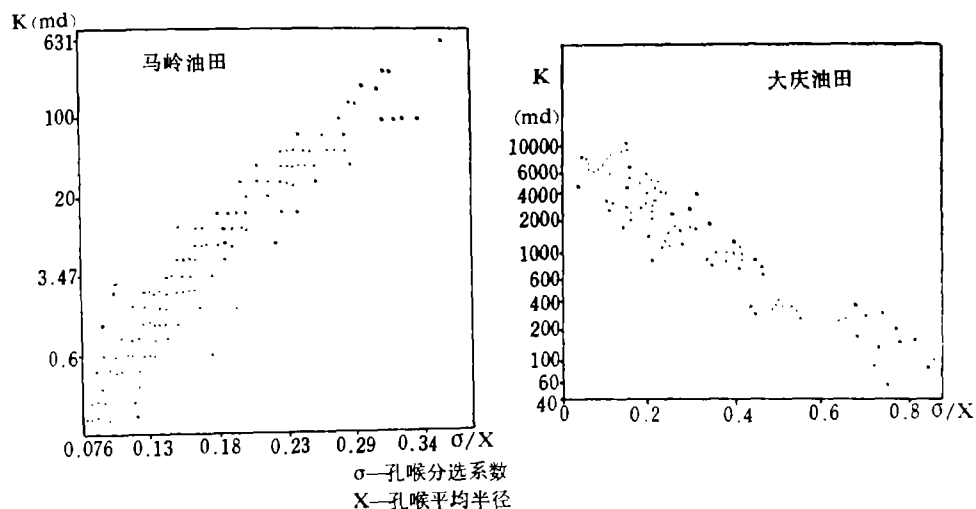


图 4 渗透率与孔喉分选系数间的关系

Fig. 4 Relationship between permeability and pore throat sorting coefficient

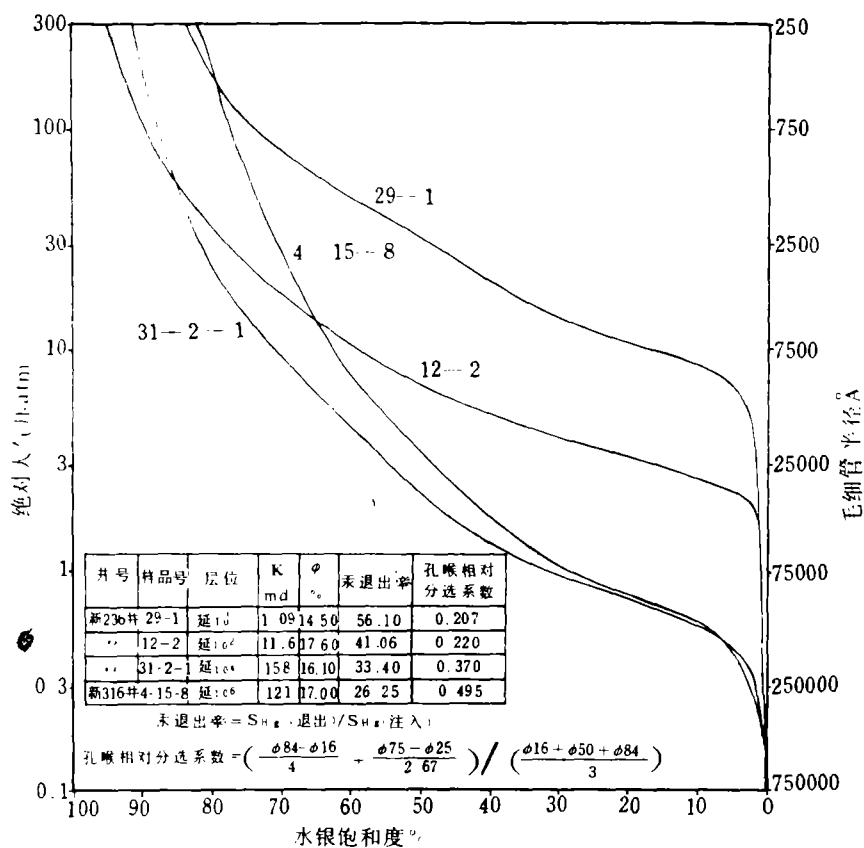


图 5-1 马岭油田延10砂层组毛细管压力曲线

Fig. 5-1 Capillary pressure plots of Yan-10 sandstones Maling oil field

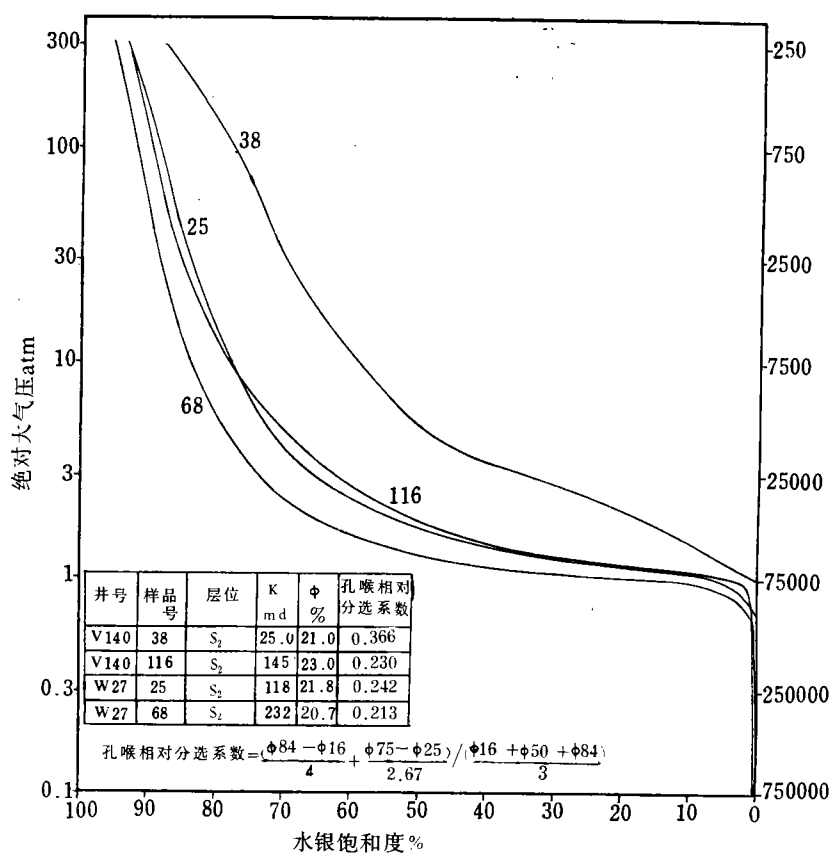


图 5—2 河南油田毛细管压力曲线

Fig. 5—2 Capillary pressure plots, Henan oil field

表 2 马岭油田岩心水驱油试验数据

Table 2. Water drive test data, Maling oil field

井 号	样 号	层 位	气测K 毫达西	φ %	束缚水饱 和 度 %	残余油饱 和 度 %	无水期驱 油 效 率 %	含水95% 时驱 油 率 %	含水98% 时驱油 效率 %	含水100% 时驱油 效率 %
新岭236井	29-4	延 <sub>10</sub> <sup>1</sup>	1.04	16.81	19.08	24.86	48.91	53.90	59.60	68.51
新岭236井	12-4	延 <sub>10</sub> <sup>2</sup>	12.0	17.20	18.18	15.91	44.44	59.50	68.10	80.56
新岭236井	31-2-2	延 <sub>10</sub> <sup>4</sup>	166	16.30	17.10	27.10	30.04	50.00	52.50	67.38
新岭316井	4-15-7	延 <sub>10</sub> <sup>6</sup>	119	17.00	29.35	34.78	36.92	41.50	43.40	50.77

#### 四、延<sub>10</sub>砂岩中的次生溶孔

延<sub>10</sub>砂层组中的次生溶孔分布广泛,对改善砂岩储层的储集性起了良好作用。

##### 1. 次生溶孔的成因及其形成阶段



延<sub>10</sub>砂岩中主要的次生溶孔是由长石被溶蚀或高岭石化所形成的（图版 I，4、5、6）。从 4、5 可见，具次生溶孔的长石，其残晶的光性方位仍保持一致，溶孔也保存完好，说明这些溶孔形成于沉积物固结成岩之后。长石的溶蚀和高岭石化是在低 pH 值水的作用下进行的，成岩期地下水中的 CO<sub>2</sub> 主要来源于沉积剖面中有机质在中成岩成熟期的去羧基作用。本区延<sub>10</sub>砂层组合炭化植物碎片和炭质条带，其上紧邻厚煤层和炭质页岩，其下有三叠系延长统富含有机质的页岩（图 2），这些有机质在中成岩成熟期的去羧基作用，使地层水中富集了 CO<sub>2</sub> 而成为低 pH 的水，使砂岩中的长石强烈溶蚀和高岭石化<sup>1)</sup>而形成很多次生溶孔。

由于延<sub>10</sub>砂岩中缺少中成岩成熟期前的碳酸盐，所以长石类陆源矿物就成了酸性水溶蚀的主要对象，这就是本区延<sub>10</sub>砂岩中的次生溶孔主要由长石溶蚀和高岭石化而成的原因。

## 2. 次生溶孔改善了砂岩储层的储、渗条件

在本区经受强烈压实作用，原生粒间孔隙极不发育的砂岩（图版 I，3）中，次生溶孔不但在数量上超过了残留的原生粒间孔隙（表 1），而且孔径也远大于粒间不可压缩的孔隙和杂基间的微孔隙，油水过渡区含沥青砂岩中的沥青，普遍充填于次生溶孔（图版 I，2）中，但未在不可压缩的孔隙和微孔隙中出现这一事实，证明了次生溶孔具有一定的孔径，足以使油气在其中渗流。显微镜下实测的自生高岭石晶间孔一般达 1—10 微米，长石溶孔则要大得多，其上限可达长石的粒径，这是本区的低渗透油层仍具有一定生产能力的重要原因。反之，在高渗透性石英砂岩中，由于原生粒间孔隙保存良好，次生溶孔无论在数量上（表 1）和孔径上都不能与发育的原生粒间孔隙相比拟，所以它在改善此类砂岩的储、渗条件上是无关紧要的。

## 3. 次生溶孔的分布和预测

次生溶孔的丰度与砂岩类型有关，其含量在富含长石和长石质岩屑的砂岩中可达 4.06—5.51%，在纯石英砂岩中只有 0.65—2.23%（表 1），可以根据这种关系，预测盆地内有利的次生溶孔分布区。研究区内已知的次生溶孔发育区是马岭油田南区和宁陕古河东北侧的定 43 井一带（图 1），结合沉积物源研究所预测的次生溶孔发育区在宁陕古河东北侧广大地区和马岭油田南区以南的庆西古河两侧（图 1），在这些地区内延<sub>10</sub>砂岩的沉积物源来自富含长石的母岩区从而富含长石。位于宁陕古河西南及甘陕古河流域的广大地区内，延<sub>10</sub>砂岩的沉积物来自富含石英的沉积岩母岩区，因而成为延<sub>10</sub>石英砂岩分布区（图 1），不利于次生溶孔的发育。

# 五、成岩期自生矿物和沥青在砂岩体中的差异析出及其地质意义

在沉积条件相似，岩性均一的砂岩体中，自生矿物的差异析出主要受孔隙流体的控制。因为自生矿物在砂岩体中的析出必须在水介质的参与下进行，所以孔隙中一旦被油气充满，就会停止析出自生矿物，砂岩体的含油部位，由自生矿物析出而引起的胶结作

1) 钾长石高岭石化后体积缩小 53%。

用往往比砂岩体的含水部位弱一些,就是这种原因造成的。

### 1. 成岩圈闭的形成

马岭油田南一区东部在现今构造上是向东缓慢抬升(斜率1/100)的单斜,但油气富集于低部位的南57,84井一带(图6),这与向东上倾方向86井一带延<sub>10</sub>砂岩中大量铁白云石和沥青的析出所形成的低渗透带有密切关系。

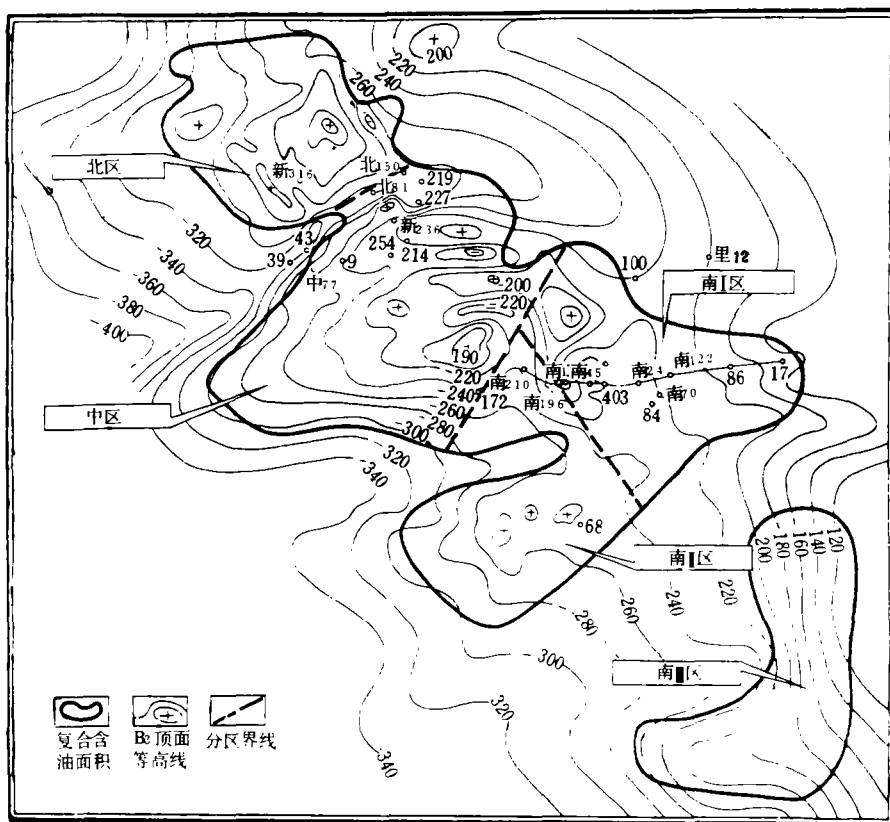


图6 马岭油田B<sub>3</sub>煤层顶面构造图

Fig. 6 Structure contour map, Maling oil field (Top of B<sub>3</sub> coal-bed)

本区侏罗系油藏形成于侏罗纪末至早白垩世,油气首先沿延长统古侵蚀面向本区西部构造高部位(86井、南122井以西)运移,并进入延<sub>10</sub>砂层组,向西的上倾方向受岩性和不整合面遮挡,形成了油藏,并停止析出自生矿物,因而作为本区主要的自生矿物——铁白云石,在本区西部的砂岩体中含量极低,一般低于2%。白垩纪开始,本区东侧逐渐抬升,使原先形成于西侧的油藏因构造幅度的减小而部分地被破坏,油藏低部位的原油缓慢向东转移,由于构造平缓,这一油藏破坏,原油转移和油水垂向分异的过程十分缓慢,又因无构造圈闭条件,所以86井一带的延<sub>10</sub>砂岩体长期未被油气充满,有利于自生矿物和沥青的析出,86井延<sub>10</sub>砂层组上部含油段中铁白云石含量达6.5%,并有大量沥青堵塞孔隙,因而渗透率仅0.76毫达西。其它如向东北上倾方向的100井、里12井的相应层段中也有较多的沥青析出,渗透率分别为0.60和0.80毫达西,这一自生矿物和沥青大

量析出所形成的低渗透带成了油田南一区向东上倾方向的重要圈闭因素——成岩圈闭。

构造条件相似的G古高地东侧(图1)则未发现此类圈闭。研究工作证明,该区是高渗透性富含石英的砂岩分布区,迄今所发生过的成岩作用还不能在如此大面积的高渗透性砂岩中造成低渗透带,因而未能形成圈闭条件。

从上述两地区对比中得到的启示是,在压实作用强烈的低渗透性砂岩分布区(如马岭油田南一区)或邻近沉积成因的低渗透性砂岩区,较易形成成岩圈闭。

## 2. 油藏边界地区低渗透带的形成

位于马岭油田中、北区之间的构造低部位即油水边界区,位于油水边界含水一侧的219井、227井、北81井、39井、43井一带(图6)的延<sub>10</sub>砂岩中,石英强烈次生加大成嵌合状(图版Ⅰ, 4),有的砂岩中还有大量成岩过程中形成的硬石膏和沥青析出,这些砂岩的孔隙度和渗透率极低,这一地区是成岩作用形成的低渗透砂岩分布区,形成于油气聚集之后,是砂岩体中含油部位和含水部位自生矿物和沥青差异析出的产物。

油藏边界外围的低渗透带,会在油田开发过程中阻止边水的推进和影响边外注水的效果,马岭油田边外注水效果远不及边内注水的原因可能即与此有关,值得进一步研究。

# 六、粘土矿物及其成岩作用对砂岩储层的影响

## 1. 延<sub>10</sub>砂岩中的主要粘土类型及其产状

1) 伊利石 陆源伊利石一般均匀散布于砂粒间(图版Ⅰ, 1)或构成砂岩中的泥质纹层,压实作用影响明显,无良好晶形,自生伊利石一般成孔隙衬边(pore lining)型(图版Ⅰ, 5),有的成须状从颗粒表面伸向粒间孔或其它颗粒(图版Ⅰ, 6)。无论那种伊利石,在砂岩中均呈网格状连续分布,微孔隙发育而缺少较大孔隙。

2) 高岭石 由长石在成岩过程中高岭石化或从孔隙水中直接析出而成,一般成互不连接的散点状分布于砂岩中(图版Ⅰ, 2、7),晶形呈假六边形,集合体成“书”状,晶间孔发育,孔径可达1—10微米(图版Ⅰ, 8)。

## 2. 伊利石对砂岩储层的性质影响最大

通过马岭油田中北区37口井78个各类油、水层的研究,有以下认识:

1) 粘土矿物对砂岩储层孔隙度、渗透率的影响 在粒度相似的各类油、水层中,随着伊利石含量的增加,渗透率急剧下降,从276.5毫达西降至15.9毫达西,但对孔隙度则几乎没有影响(表3),这与伊利石的产状和成岩作用有密切关系。伊利石产状的特点是均匀分布于粒间和孔喉部位(图版Ⅰ, 7, 8),缩小了砂岩的孔喉,所以对渗透率的影响特别大;伊利石的存在和压实形变起了缩小砂岩孔隙度的作用,但它能起阻止石英次生加大的作用,含伊利石稍多的砂岩中的石英一般均无次生加大(图版Ⅰ, 1);而那些含伊利石少的砂岩中,因石英次生加大而损失的孔隙就比较多(图版Ⅰ, 7、8;Ⅱ, 3, 4),所以伊利石的含量与砂岩孔隙度无明显关系。自生高岭石析出于沉积物固结成岩以后,未经受压实形变,晶间孔发育,以及其在砂岩中成散点状分布的产状,对喉道的影响极小,加之它在各类油、水层中的含量变化不大(表3),所以对砂岩储层的孔隙度和渗透率无明显影响。

## 2) 粘土矿物和砂岩油层含水饱和度的关系

在粒度相似的砂岩油层中, 随着伊利石含量的增加含水饱和度也相应增加(表3)。

表3 粘土矿物与砂岩储层储油性油水饱和度电性的关系

Table 3 Middle and north area of Maling oil Field relation among clay mineral and petrophysical properties, water, oil saturation, resistivity of sandstone reservoir

层 类	低阻油层	中阻油层	高阻油层	水 层
项目	< 7 欧姆	7—12 欧姆	> 12 欧姆	< 7 欧姆
伊利石含量%	6.0—12.8 (7.8)	2.7—7.7 (4.4)	0—4.0 (2.1)	0.5—5.0 (2.5)
高岭石含量%	4.8—10.6 (6.9)	6.0—10.8 (7.6)	1.0—11.8 (5.3)	2.0—11.0 (6.0)
粒 度	中-细砂岩为主			
地层水矿化度	100,000毫克/公升±			
孔 隙 度 %	15.1—19.8 (16.8)	13.6—18.2 (16.4)	13.6—22.3 (17.4)	12.3—18.8 (15.8)
渗 透 率 (毫达西)	1.1—16.3 (15.9)	1.63—72.6 (17.3)	4.1—1638.0 (276±)	5.1—403.1 (64.2)
视含油饱和度 %	30.0—60.0 (47.1)	54.0—82.0 (65.8)	58.0—89.0 (71.1)	30.0—60.0 (46.0)
岩心分析含水 饱和度%	43.3—63.8 (50.1)	36.1—50.1 (44.9)	29.0—49.3 (39.0)	34.0—61.9 (50.9)
含 水 率 SW·φ	6.4—10.0 (8.4)	5.5—8.7 (7.4)	6.0—7.9 (6.7)	5.5—10.2 (8.0)

( ) 内数据代表平均值。

陆源碎屑伊利石经成岩期压实后, 质点间的孔隙度变得极小; 自生伊利石由于其须状的结晶习性, 其质点间的孔隙也十分微小。由于毛细管力的作用, 油气运移期油驱水过程中很难排出伊利石微孔隙中的水, 所以富含伊利石的砂岩油层中的含水饱和度较高。

3) 粘土矿物与低电阻油层 马岭油田中北区延<sub>10</sub>砂层中有一种电阻率与水层相似的低电阻(2.6—6.4欧姆)油层, 与正常中高电阻油层相比, 粒度和地层水矿化度是相似的, 含水饱和度和油层单位体积含水量稍高, 从表3, 图7—1中可知。

(1)  $R_t$ 一般由2.5→25欧姆(10倍), 相应的 $SW \cdot \phi$ 由0.10—0.05(2倍)。

(2) 曲线(A)上的一类是中高阻油层, 其 $R_t$ 明显受油层含水量制约, 这是含伊

伊利石很少的纯砂岩油层的规律。曲线(B)上的一类是伊利石含量高的低阻油层,与纯砂岩油层相比,含水量高得不多,但其电阻率则比纯砂岩油层低3—5倍,与水层有相同的电阻率。

粒度、地层水矿化度都不是造成低阻油层的主要因素,油层含水量的微小差别也不足以说明低阻油层与中高阻油层间电阻率的巨大差别。

通过详细的岩石学研究,发现油层中伊利石含量的增高是促使油层电阻率下降的主要因素,从图7-2可知。

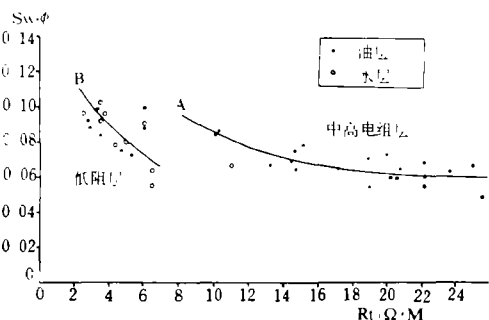


图7-1 马岭油田中区和北区  
 $Sw \cdot \phi - Rt$ 关系图

Fig. 7-1 Relationship between  $Sw \cdot \phi - Rt$  in the middle and north area of Maling oil field

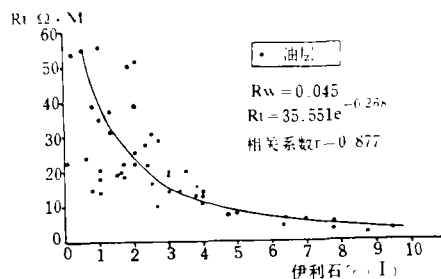


图7-2 马岭油田中区和北区油层  
中伊利石含量与电阻率关系

Fig. 7-2 Relationship between illite content and  $R_t$  in the middle and north areas of Maling oil field

(1) 伊利石含量 $< 3\%$ ,  $R_t$ 一般 $> 18$ 欧姆。

(2) 伊利石含量 $> 5\%$ ,  $R_t$ 一般 $< 6$ 欧姆。

低阻油层由于伊利石含量较高而含水量稍高于中高阻油层,这是造成低阻油层的因素之一,但主要的因素应是伊利石在油层中的产状。从图7-1可知,有部分低阻油层的含水量与中高阻油层是相同的(0.06—0.08),但电阻率比中高阻油层低3—5倍,这与由伊利石引起的油层水的产状有极大关系,伊利石的多孔性和微孔性,导致有很大一部分油层水与其伴生,伊利石在油层中那种连续式的、孔隙衬边型的产状,大大增加了油层中薄膜水的厚度<sup>1)</sup>,这些薄膜水与油层小孔隙中的水相连通,成为电解质离子导电系统均匀的通道,使油层电阻大大降低。伊利石含量很少的中高阻油层中,砂粒表面的薄膜水由于缺少伊利石而得不到加厚,油层水集中分布于小孔隙和散点状分布的自生高岭石晶间,油层水所形成的导电系统又远不如低电阻油层中均匀,因而,电阻率就较大,所以当贫伊利石的油层和富伊利石的油层的含水量相同时,后者的电阻率比前者低得多。

1) 本区延10砂层组为亲水油层。

## 七、结 论

1. 受古地貌起伏分隔的古河道中形成的砂岩体, 由于物源和沉积作用的差异而有各不相同的成分和结构, 这种差异对沉积期后成岩作用的方向和特点有很大影响。

2. 成岩作用对砂岩储层的孔隙结构起着显著的改造作用, 本区延<sub>10</sub>砂岩中一些特殊的孔隙结构就是成岩改造的产物, 它影响着流体的渗流方式和油藏的采收率。

3. 次生溶孔在延<sub>10</sub>砂岩中的形成和分布受沉积作用和成岩作用的控制, 有明显的规律性, 可以通过沉积物源、沉积相、成岩作用的研究, 预测有利的次生溶孔发育区。

4. 成岩期自生矿物在砂岩体含油部位和含水部位的差异析出, 往往能形成油藏的圈闭条件和油水边界地区的低渗透带。

5. 粘土矿物及其成岩作用对砂岩储层性质有很大影响, 研究这种影响时不但要注意砂岩储层中粘土的含量和类型, 更要注意粘土的产状特征。

(收稿日期: 1982年10月4日)

## 参 考 文 献

H. 布拉特等, 1980, 沉积岩成因, 科学出版社, 230—263页。

朱国华, 1980, 成岩作用对砂岩储层储油物性的影响及其地质意义, 国际石油工程会议论文集, 1982年, 石油工业出版社。

汪世杰等, 1979, 复杂泥质低阻油层测井解释方法探讨, 中国石油学会石油地质学会石油地质论文集, 油气田测井专辑。

L.F. Brown, Jr., Cratonic Basin; Terrigenous Clastic models《Sandstone Seminar》,  
Edited by Mobil Res. and Dev. Corp.

V. Schmidt and D.A. McDonald, 1980, Secondary reservoir Porosity in the course of sandstone diagenesis, A.A.P.G. Continuing education notes series No.12.

## EFFECTS OF VARIOUS KINDS OF DIAGENESIS ON PORE TEXTURE OF RESERVOIR SANDSTONES

Zhu Guohua

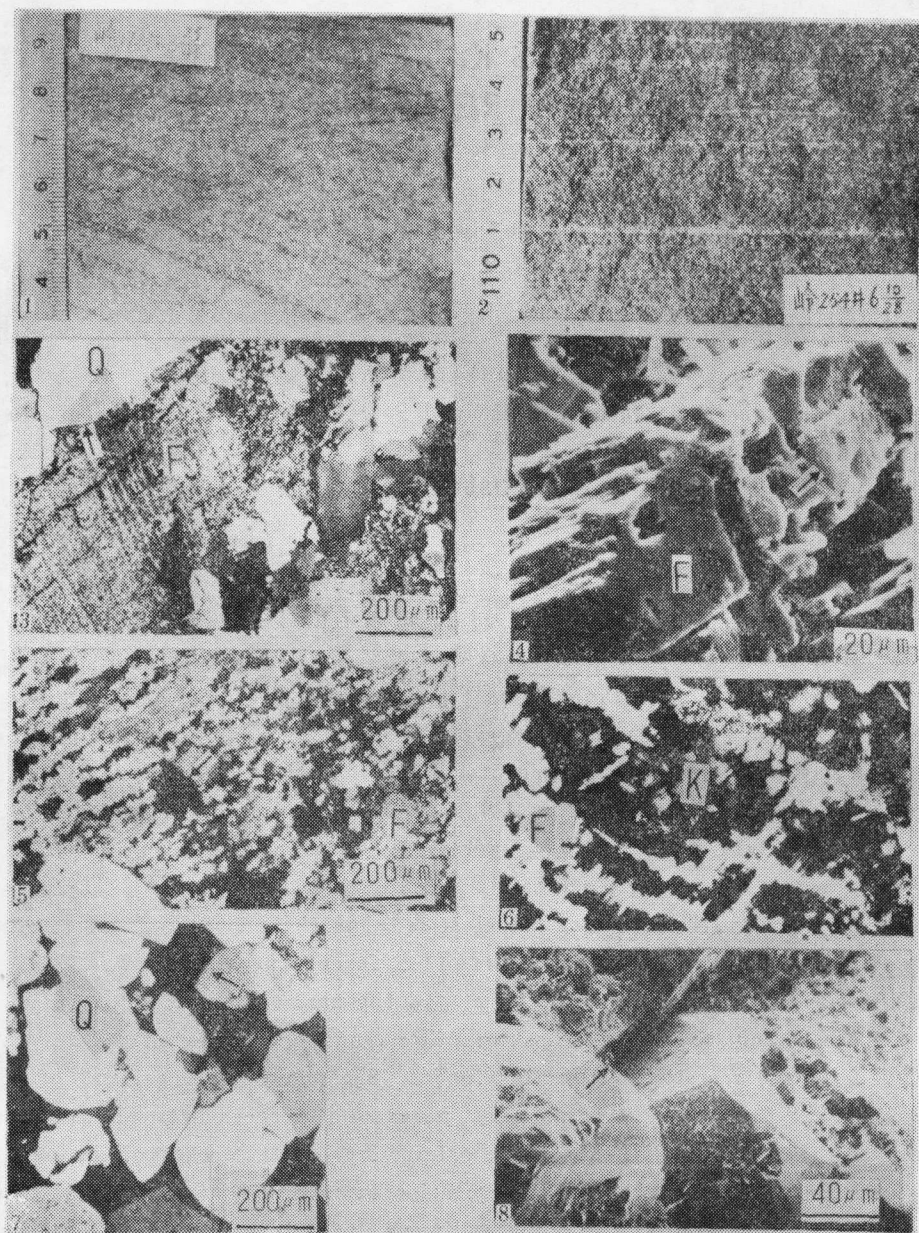
(Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and Development of the  
Changqing Oil Field)

Qiu Yinan

(Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing)

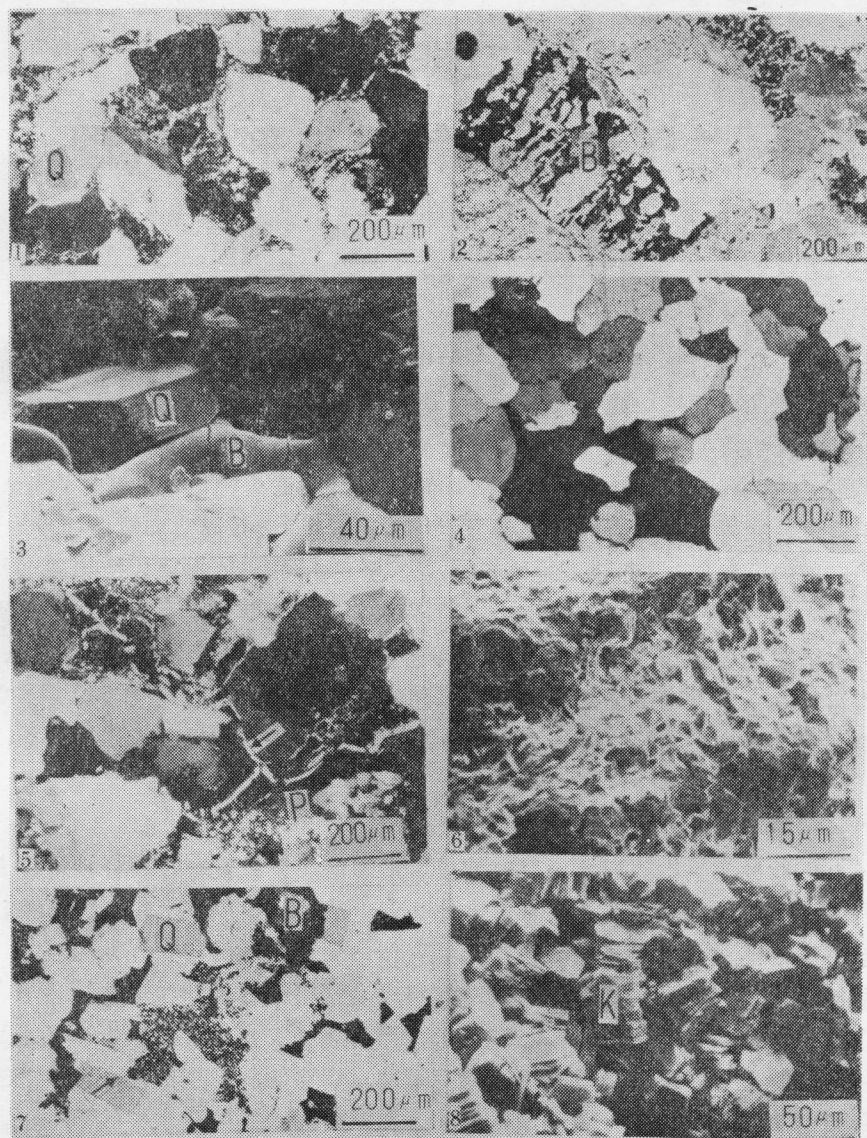
### Abstract

The main reservoir sandstones in the Maling oil field and its periphery in Shan Xi-Gansu-Ningxia Basin, Northwest China—Yan-10 sandstones of lower Jurassic (including Fuxian formation) are referred to as confined valley fill deposits. The difference of mineral compositions of the sandstone bodies deposited in different paleochannel systems leads to the different processes of diagenesis and then results in the difference of pore textures and reservoir properties of sandstones thus formed. Mechanical compaction during the immature period of mesodiagenesis seriously damages the primary intergranular pores of sandstones with more flexible components, but only slightly hits the intergranular pores in the quartzose sandstones. Cementation subsequent to the compaction usually and more easily occurs in the quartzose sandstone but not in the sandstone with more flexible clastics. When these two kinds of sandstones have undergone the process of diagenesis of different characters and reduced their porosity to the same level, the pore-throat and the permeability of quartzose sandstones would be much larger than those of other sandstones because the intergranular pores in the former are still better developed. Secondary enlargement of quartz would destroy the homogeneity of primary pores and pore-throats of sandstones. Secondary solution porosity of subsurface origin improves the reservoir properties of Yan-10 sandstones. The differential precipitation of authigenic minerals and asphalts in sandstone bodies create the trapping conditions up dip to the east of the South Area 1 in the Maling Oil field as well as the low permeability zone bordering the oil pool between the Middle and North Areas of the Field. The effects of clay minerals of different origin and their diagenesis on reservoir property of sandstones and on oil and water saturation and electric response of the reservoir rocks are different. And the effect of illite is far greater than that of the authigenic kaolinite.



1. 急流型斜层理, 延<sub>10</sub> 2. 急流型平行层理, 延<sub>10</sub> 3. 深度绢云母化长石压实变形并与其它颗粒相互嵌合, 粒间孔被破坏F——绢云母化长石, Q——石英, —→绢云母化长石与石英间相嵌合之周界。南70, 延<sub>10</sub>, 交光正偏。 4. 长石中的次生溶孔F——长石残晶。—→溶蚀孔隙, 404→, 延<sub>10</sub>。 5. 长石中的次生溶孔F——长石残晶——溶蚀孔隙, 南19-22井, 延<sub>10</sub>, 单偏光 6. 高岭石化长石中, 长石残晶的光性方位保持一致, F——长石残晶。K——高岭石。南70井, 延<sub>10</sub>, 正交偏光。 7. 石英次生加大后成晶体形态, Q——石英, —→粒间孔隙, 延<sub>10</sub>正交偏光 8. 石英次生加大后成晶体形态——→粒间孔隙, 211井, 延<sub>10</sub>。





1.陆源伊利石充填于砂粒间,它阻止了石英次生加大Q——石英,209井,延<sub>10</sub>,正交偏光 2.充填于长石溶孔和高岭石晶间孔中的沥青,B——长石溶孔中的沥青,南45井,延<sub>10</sub>,斜交偏光。 3.充填于粒间孔的沥青,Q——石英,B——沥青,华68井,延<sub>10</sub> 4.石英强烈次生加大后成嵌合状,北81井,延<sub>10</sub>,正交偏光。 5.砂岩中成孔隙衬边型分布的自生伊利石,P——粒间孔隙,——伊利石,北150井,延<sub>10</sub>,正交偏光。 6.砂岩中须状,网格状自生伊利石,68,延<sub>10</sub>。 7.充填于砂岩粒间孔和高岭石晶间孔中的沥青,Q——石英,B——沥青,——高岭石,中77井,延<sub>10</sub>,单偏光。 8.砂岩孔隙中的自生高岭石晶体,K——高岭石,井84,延<sub>10</sub>。