

# 潜江凹陷新沟咀组三油组成岩 作用对孔隙结构的影响

吴光红 姚小明

(江汉油田勘探开发研究院, 湖北潜江 433124)

成岩作用明显地改变了本区砂岩孔隙结构。压实作用和胶结作用使孔隙由大变小, 成为微孔隙、晶间孔隙, 使喉道由粗变细, 成为片状与管束状, 从而使砂岩许多孔喉变为非渗流孔喉, 储油物性和生产能力降低; 而溶蚀作用则相反, 使孔隙由小变大, 喉道由细变粗, 微孔隙、晶间孔隙变为大孔隙, 片状、管束状喉道变为粗喉道, 多数砂岩孔喉就是渗流孔喉, 储油物性和生产能力增大。

**关键词** 成岩作用 孔隙结构 砂岩 新沟咀组 拖市地区

**第一作者简介** 吴光红 男 36岁 工程师 石油地质

通过对拖市地区新沟咀组三油组 119 块岩芯样品的岩石薄片、铸体薄片、电镜、压汞以及岩石物性分析, 发现溶蚀孔隙大于 5% 与小于 5% 的样品, 其储油物性有较大的差别。因此, 我们把 5% 的溶蚀孔隙作为区分溶蚀型砂岩 (溶蚀孔隙大于 5%) 与非溶蚀型砂岩 (溶蚀孔隙小于 5%) 的界限。然后再根据压实作用和胶结作用对孔隙破坏的相对强度<sup>[1]</sup>来区分压实型砂岩和胶结型砂岩。溶蚀孔隙小于 5%, 胶结作用损失的孔隙百分比 (仅考虑压实和胶结) 大于 50% 的砂岩是胶结型砂岩; 溶蚀孔隙小于 5%, 胶结作用损失的孔隙百分比小于 50% 的砂岩是压实型砂岩。本区溶蚀型砂岩样品有 49 块, 胶结型砂岩和压实型砂岩样品各有 35 块。孔隙结构特征值用矩法求得<sup>[2]</sup>。

## 一、压实作用对孔隙结构的影响

### (一) 孔隙结构特征<sup>[2]</sup>

#### 1. 孔喉形状

压实型砂岩样品在镜下以微孔 (缝) 和片状喉道为特征 (图版 1-1)。大部分样品不具菱形原始孔隙形状, 仅有少量微孔 (三角形孔) 和片状喉道; 部分样品局部可有孔隙和喉道皆缩小了的菱形孔隙。表明压实作用改变了砂岩孔隙和喉道形状。

#### 2. 孔喉大小和分选性

压实型砂岩样品以孔喉小、分选较差为特征 (图 1)。约有 80% 的样品最大孔喉半径 ( $r_d$ ) 小于  $1\mu\text{m}$  (大于  $9\phi$ ), 其分布峰位 (约 65% 以上的样品) 在  $0.5\mu\text{m}$  ( $10\phi$ ) 处; 约有 90%

的样品中值孔喉半径 ( $r_{50}$ ) 小于  $0.5 \mu\text{m}$  (大于  $10\phi$ ), 其分布峰位 (约 60% 以上的样品) 在  $0.5 \mu\text{m}$  ( $10\phi$ ) 处; 约有 90% 以上的样品孔隙喉道均值 ( $\bar{x}$ ) 小于  $0.5 \mu\text{m}$  (大于  $10\phi$ ), 其分布峰位 (50% 以上的样品) 在  $0.1 \mu\text{m}$  ( $12\phi$ ) 处; 约有 90% 的样品孔喉标准差 ( $\sigma$ ) 小于  $2\phi$ , 其分布峰位 (50% 以上的样品) 在  $1.5\phi$  处。表明压实型砂岩的孔喉主要是微孔 (缝), 分选性较差。如果把  $0.691 \mu\text{m}$  作为有效孔隙喉道的下限<sup>[3]</sup>, 则大部分压实型砂岩为非储集岩。

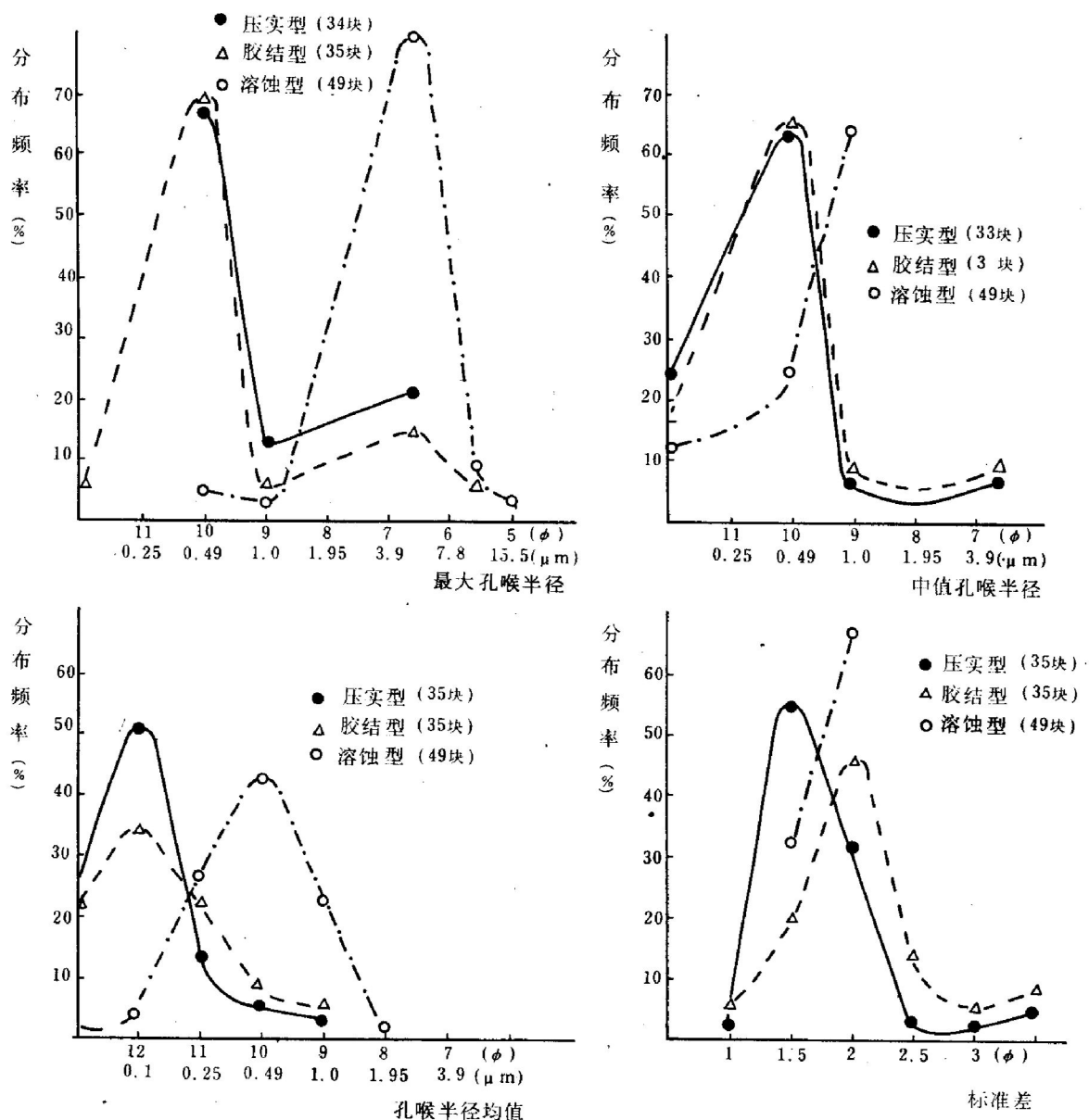


图1 孔喉大小和标准差的频率分布特征

### 3. 歪度 ( $SK$ )

压实型砂岩样品以细歪度 (负值) 为特征 (图 2), 分布范围广。约 85% 以上的样品都为细歪度, 其分布峰位 (约有 45% 的样品) 在  $-2$ — $-4$  处。表明压实型砂岩的孔喉范围较大, 并且主要是微孔缝。

#### 4. 最小非饱和孔隙体积百分数 ( $S_{min}$ )

压实型砂岩样品以较高的  $S_{min}$  为特征 (图 3)。约有 95% 的样品  $S_{min}$  在 5% 以上, 其分布峰位 (约有 40% 以上的样品) 在 15% 处。表明压实型砂岩小孔隙较多, 束缚水饱和度较高, 孔隙连通性较差。

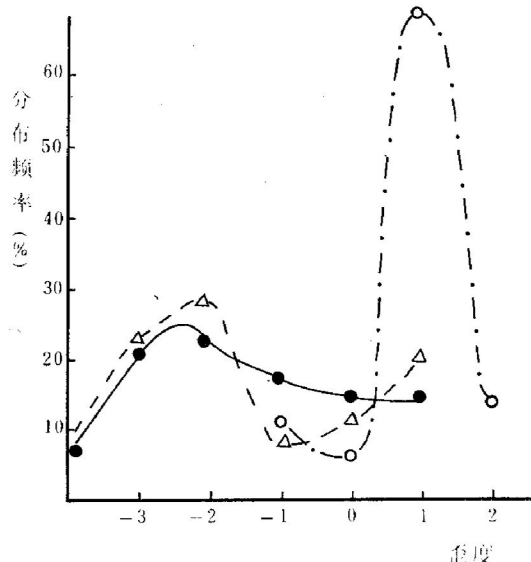


图 2 孔隙度频率分布特征

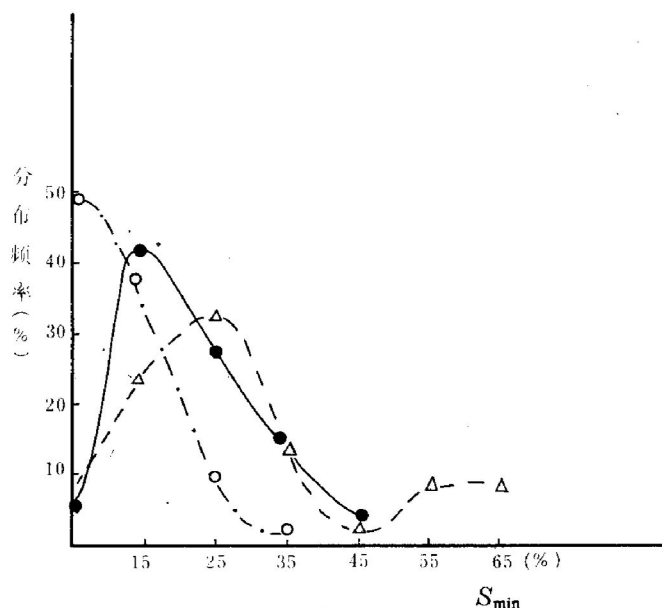


图 3 最小非饱和孔隙体积百分数频率分布特征

#### 5. 孔喉频率分布

本区压实型砂岩仅有一种类型的孔喉柱状频率分布曲线, 具有下述特征 (图 4): (1) 孔喉分布呈单峰型, 半径较小。近 75% 的样品主要孔喉半径 (峰位) 在  $9.5\phi$  以上 ( $0.7\mu m$  以下), 近 70% 的样品主要孔喉半径大于  $10.5\phi$  (小于  $0.35\mu m$ ), 35% 以上的样品主要孔喉半径在  $10.5-11.5\phi$  ( $0.35-0.17\mu m$ ) 之间。(2) 孔喉分布的峰位与渗透率贡献的峰位不一致, 后者位于孔喉分布峰位的左侧。表明砂岩的主要孔隙不是渗流孔隙, 只有少数稍大的孔隙起渗流作用。

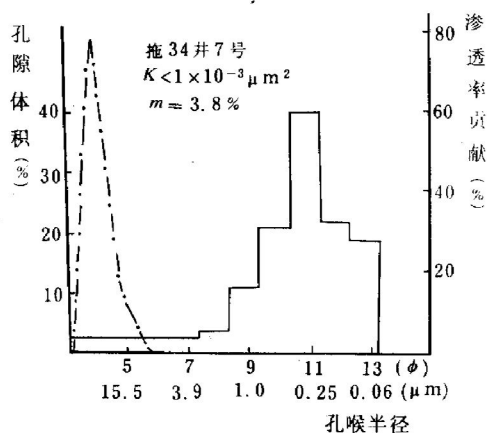


图 4 压实型砂岩典型孔喉分布曲线

#### (二) 对孔隙结构的影响

压实作用对本区砂岩孔隙结构的影响是明显的。镜下观察, 可见不同的压实强度, 不同的颗粒接触方式, 有着不同的孔隙、喉道及孔喉组合关系。当骨架颗粒为线接触时, 砂岩孔隙形状为三角形, 喉道形状为片状, 孔喉组合关系为中小孔隙 (孔隙直径  $d$  在  $5-40\mu m$  内), 细喉道 ( $\bar{X}=9-11\phi$ ); 当骨架颗粒为凹凸接触时, 孔隙形状近似三角形, 喉道形状为弯片状, 孔喉组合关系为微小孔隙 ( $d < 5\mu m$ ) 微细喉道 ( $\bar{X} > 11\phi$ ); 当骨架颗粒为缝合线状接触时, 孔隙喉道消失。压实作用使孔喉变小, 孔喉分选性似乎变好 (图 5)。当压实损失的孔隙超过 15% 时, 砂岩孔喉半径均值接近或小于  $0.5\mu m$ 。压实作用使本区砂岩孔隙结构、储油物性变坏 (平均孔隙度为 7.7%, 平均渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu m^2$ ), 孔隙

连通性变差, 束缚水饱和度变高, 生产能力变低 (需经酸化、压裂等改造措施以后, 才具备一定的生产能力), 砂岩主要孔隙变为非渗流孔隙, 为非储集岩。

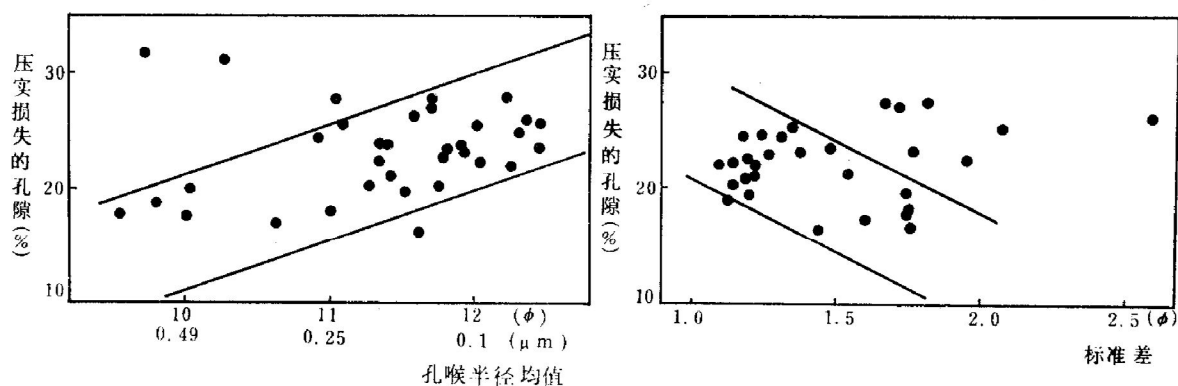


图5 压实作用强度与孔喉半径均值、标准差的关系

## 二、胶结作用对孔隙结构的影响

### (一) 孔隙结构特征

#### 1. 孔喉形状

胶结型砂岩样品以晶间孔与管束状喉道为特征 (图版 1-2)。在镜下, 样品大部分为晶间孔与管束状喉道, 局部有三角形孔、不规则形状孔和漏斗状、片状喉道, 许多样品甚至孔隙和喉道全部消失。胶结作用使本区砂岩孔喉形状发生了很大变化。

#### 2. 孔喉大小和分选性

胶结型砂岩样品以孔喉小、分选性差为特征 (图 1)。约有 80% 的样品最大孔喉半径小于  $1\mu\text{m}$  (大于  $9\phi$ ), 其分布峰位 (近 70% 的样品) 在  $0.5\mu\text{m}$  ( $10\phi$ ) 处; 约有 80% 以上的样品中值孔喉半径小于  $0.5\mu\text{m}$  (大于  $10\phi$ ), 其分布峰位 (60% 以上的样品) 在  $0.5\mu\text{m}$  ( $10\phi$ ) 处; 约有 85% 以上的样品孔隙喉道均值小于  $0.5\mu\text{m}$  (大于  $10\phi$ ), 其分布峰位 (约 35% 的样品) 在  $0.1\mu\text{m}$  ( $12\phi$ ) 处; 约有 70% 以上的样品孔喉标准差小于  $2\phi$ , 其分布峰位 (45% 以上的样品) 在  $2\phi$  处。此外, 胶结型砂岩样品的最大孔喉半径、孔喉半径均值和标准差的分布范围都较压实型砂岩的分布范围大、分散。表明胶结型砂岩的孔喉变化较大, 但主要还是微孔隙, 分选性差。

#### 3. 歪度 (SK)

胶结型砂岩样品以细歪度 (负值) 为特征 (图 2), 其分布范围与压实型砂岩样品相似。胶结型砂岩 80% 的样品为细歪度, 其中 50% 以上的样品歪度小于 -2, 其分布峰位 (25% 以上的样品) 在 -2—-3 处。表明胶结型砂岩孔喉变化较大, 但主要还是细孔喉。

#### 4. 最小非饱和孔隙体积百分数 ( $S_{\min}$ )

胶结型砂岩样品以较高的  $S_{\min}$  为特征 (图 3), 分布范围较广。约有 80% 以上的样品  $S_{\min}$  大于 5%, 其中约有 65% 以上的样品大于 15%, 其分布峰位 (约 30% 以上的样品) 在 25% 处, 此外,  $S_{\min}$  在 35% 以上仍有分布。表明胶结型砂岩小孔隙较多, 孔隙连通性较差且分布不均匀, 束缚水饱和度很高。

## 5. 孔喉频率分布

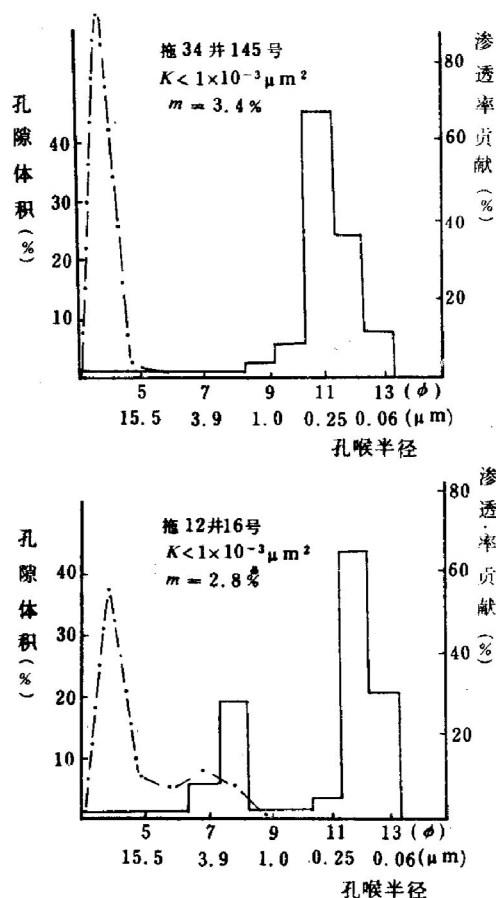


图6 胶结型砂岩典型孔喉分布曲线

胶结型砂岩的孔喉分布特征与压实型砂岩相比,既有相同之处,又有不同之处:(1)孔喉分布具有两种类型,一种为狭窄的单峰型,另一种为宽广的双峰型(图6)。单峰型孔喉分布与压实型砂岩孔喉分布相似,半径较小。约70%的样品主要孔喉半径(峰位)在 $9.5\phi$ 以上( $0.7\mu\text{m}$ 以下),近65%的样品主要孔喉半径大于 $10.5\phi$ (小于 $0.35\mu\text{m}$ ),40%以上的样品主要孔喉半径在 $10.5\text{—}11.5\phi$ ( $0.35\text{—}0.17\mu\text{m}$ )之间。双峰型孔喉分布后峰高,孔喉半径小(多数样品小于 $0.17\mu\text{m}$ ),是砂岩的主要孔喉;前峰低,孔喉半径大(多数样品大于 $0.7\mu\text{m}$ ),是砂岩的次要孔喉。约有70%以上的样品主要孔喉半径在 $9.5\phi$ 以上( $0.7\mu\text{m}$ 以下),约有65%以上的样品主要孔喉半径在 $10.5\phi$ 以上( $0.35\mu\text{m}$ 以下),约有50%以上的样品主要孔喉半径在 $11.5\phi$ 以上( $0.17\mu\text{m}$ 以下)。单峰型孔喉分布与双峰型孔喉分布的相同点是,它们的主要孔喉半径大部分样品大于 $9.5\phi$ (小于 $0.7\mu\text{m}$ );不同点是,在 $9.5\phi$ 以下( $0.7\mu\text{m}$ 以上)双峰型还分布有次要孔喉,并且双峰型曲线约有半数以上的样品主要孔喉半径在 $11.5\phi$ 以上( $0.17\mu\text{m}$ 以下),所占比例较单峰型曲线高,其孔喉分布较单峰型宽广。说明单峰型与双峰型曲线的主要孔隙大部分是微小孔(缝),并且单峰型曲线的孔隙较双峰型曲线的孔隙更小,分布更不均匀,双峰型曲线在小孔隙的背景下局部有稍大孔隙。

(2)孔喉分布的峰位与渗透率贡献的峰位不一致,后者位于孔喉分布峰位的左侧。表明胶结型砂岩与压实型砂岩相似,其主要孔隙是束缚孔隙,不具备渗流能力,少数稍大孔喉具有一定的渗流能力。

## (二) 对孔隙结构的影响

胶结作用与压实作用对本区砂岩孔隙结构的影响既相似又不同。相似之处是,胶结作用和压实作用都使砂岩孔隙喉道变小,储油物性变差(胶结型砂岩平均孔隙度为3.8%,平均渗透率小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ),束缚水饱和度变高,生产能力变低(需经酸化、压裂等改造措施以后,才具备一定的生产能力),砂岩孔隙变为非渗流孔隙,砂岩变为非储集岩。不同之处是,压实作用同时减小孔隙和喉道,产生小孔细喉道;胶结作用则不然,不仅减小孔隙或喉道,形成孤立的搭桥式胶结<sup>[4]</sup>,也可以完全堵塞孔隙和喉道,成嵌晶式胶结(图版I-3),可以造成小孔细喉道,如环绕颗粒边缘产出的胶结物,也可以造成晶间孔管束状喉道,如孔隙充填胶结物;随着胶结作用的逐渐增强,砂岩孔喉逐渐减小,但孔喉分选性无明显变化(图7);当胶结作用损失的孔隙超过20%时,砂岩孔喉接近或大于 $10\phi$ (小于 $0.5\mu\text{m}$ )。胶结型砂岩比压实型砂岩孔喉分布范围更广、更不均匀,孔喉分选性、孔隙连通性更差,束缚水饱和度更高。

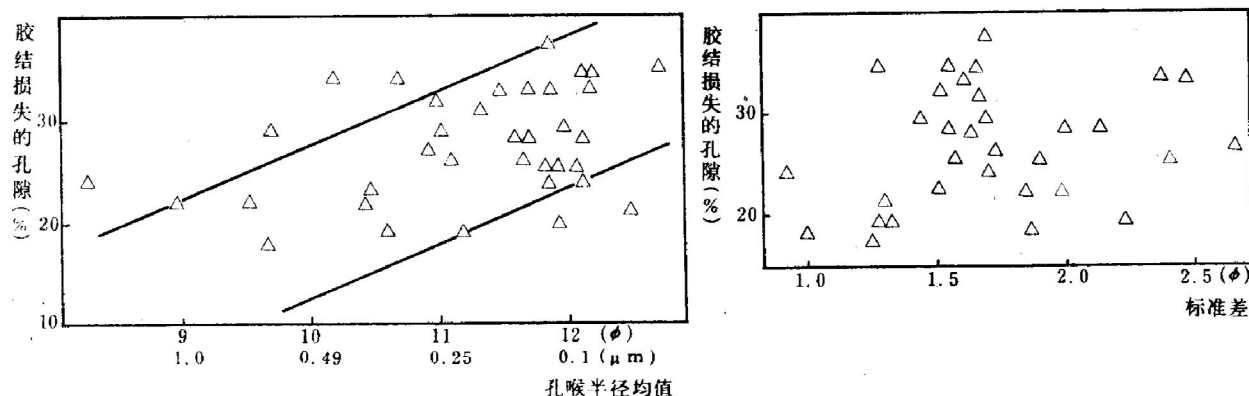


图7 胶结作用强度与孔喉半径均值、标准差的关系

### 三、溶蚀作用对孔隙结构的影响

#### (一) 孔隙结构特征

##### 1. 孔喉形状

溶蚀型砂岩以多种多样的孔喉形状为特征。它可以与原始孔喉形状相同，为菱形、三角形孔隙，管柱状、漏斗状喉道；它也可以与原始孔喉形状不同，为凸形、伸长状、印模孔隙、片状、不规则状喉道<sup>[5]</sup>。溶蚀作用使砂岩孔喉形状发生了极大的变化（图版 I-4）。

##### 2. 孔喉大小和分选性

溶蚀型砂岩样品以孔喉较大、孔喉分选性较差为特征（图 1）。约有 90% 以上的样品最大孔喉半径大于  $1\mu\text{m}$ （小于  $9\phi$ ），其分布峰位（约 80% 以上的样品）在  $5\mu\text{m}$  ( $6.6\phi$ ) 处；约有 90% 的样品中值孔喉半径大于  $0.5\mu\text{m}$ （小于  $10\phi$ ），其分布峰位（约有 60% 以上的样品）在  $1\mu\text{m}$  ( $9\phi$ ) 处；约有 65% 以上的样品孔隙喉道均值小于  $10\phi$ （大于  $0.5\mu\text{m}$ ），其分布峰位（约 40% 以上的样品）在  $10\phi$  ( $0.5\mu\text{m}$ ) 处；100% 的样品孔喉标准差小于  $2\phi$ ，其分布峰位（约 65% 以上的样品）在  $2\phi$  处。表明溶蚀型砂岩样品孔喉半径较大，但孔喉分选性较差。

##### 3. 歪度 (SK)

溶蚀型砂岩以粗歪度（正值）为特征（图 2）。约有 85% 的样品为粗歪度，其分布峰位（约 70% 的样品）在 1 处。表明溶蚀型砂岩主要是大小相近的较粗大孔隙。

##### 4. 最小非饱和孔隙体积百分数 ( $S_{\min}$ )

溶蚀型砂岩样品以较低的  $S_{\min}$  为特征（图 3）。约有 85% 以上的样品  $S_{\min}$  小于 15%，其分布峰位（约 50% 的样品）小于 5%。表明溶蚀型砂岩小孔隙很少，孔隙连通性较好，束缚水饱和度较低。

##### 5. 孔喉频率分布

溶蚀型砂岩的孔喉分布曲线特征明显不同于压实型砂岩和胶结型砂岩（图 8）；（1）孔喉分布呈单峰型，孔喉半径较大。80% 以上的样品主要孔喉半径在  $6.5-9.5\phi$  ( $5.5-0.7\mu\text{m}$ ) 之间，其中 45% 的样品在  $7.5-8.5\phi$  ( $2.8-1.4\mu\text{m}$ ) 之间。（2）孔喉分布的峰位与渗透率贡献的峰位有三种情况。其一，渗透率贡献的峰位与孔喉分布的峰位一致，表明砂岩的主要孔隙就是渗流孔隙，24.5% 的样品属于这种情况。其二，渗透率贡献的主峰位与孔喉分布的峰位

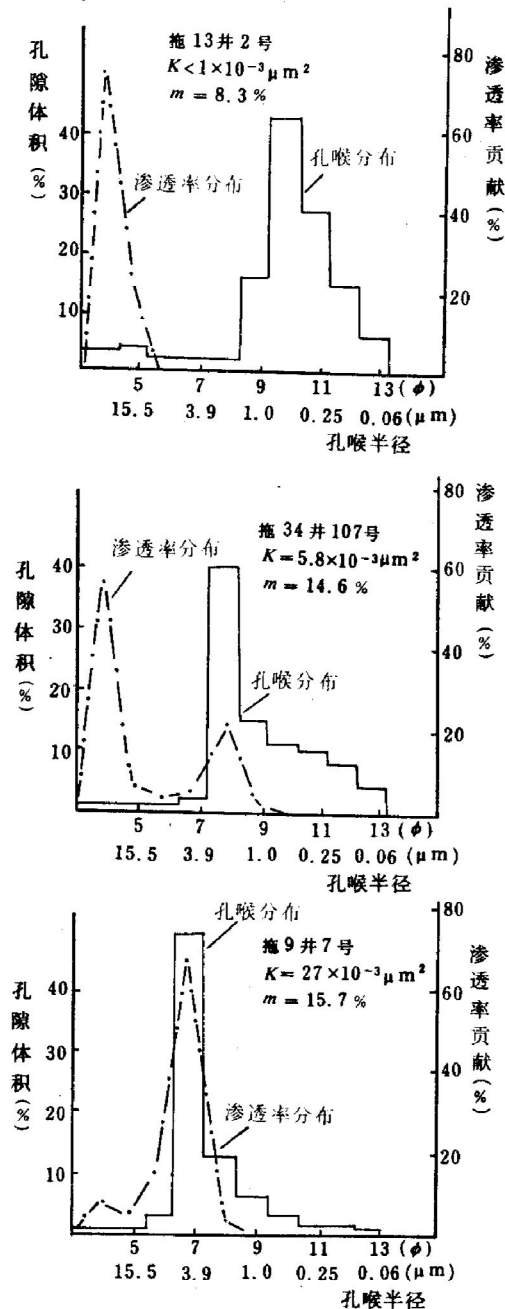


图8 溶蚀型砂岩典型  
孔喉分布曲线

不一致,但次峰位一致,表明岩石非均质性较严重,主要孔隙虽有渗流能力但较差,而少数稍大的孔隙渗流能力较好,44.9%的样品属于这种情况。其三,渗透率贡献的峰位与孔喉分布的峰位不一致,前者位于后者的左侧,表明大部分孔隙是不渗透的束缚孔隙,只有少数稍大的孔隙具有一定的渗流能力,整个岩石的渗透性极低,30.6%的样品属于这种情况。

上述特征说明,溶蚀型砂岩的孔喉半径较大,微孔、束缚孔隙较少,砂岩的主要孔隙大部分都是渗流孔隙。

## (二) 对孔隙结构的影响

溶蚀作用极大地改变了压实和胶结作用后的孔喉形状、大小和分布,可以产生多种多样的孔喉。如果被溶蚀物仅仅是环绕颗粒边缘的胶结物,或粒间胶结物,则次生孔喉的几何形状可能与胶结物析出以前的孔喉形状是一样的,即与未改变的原生孔喉,或(经压实、压溶)残留的原生孔喉的几何形态一样,为菱形、三角形孔隙,管柱状、漏斗状喉道;如果被溶蚀物是粒间胶结物加颗粒边缘或颗粒的次生加大部分,则次生孔喉的几何形状常常变化很大,孔隙可以呈菱形、凸形、三角形,喉道可以呈管柱状、板状、片状以及各种不规则状;如果被溶蚀物是颗粒接触处的交代物,则次生孔喉形状可以呈相互交叉的板状、管柱状、新月状,连通性很好;如果被溶蚀物是碎屑颗粒,则次生孔喉形状可能与颗粒形状相似,也可能呈蜂窝状或其它形状;如果被溶蚀物是颗粒加晶体,则次生孔喉形状随着沉积物而发生变化,孔隙可以是凸形、伸长状、不规则状,喉道可以是片状、不规则状。溶蚀作用使已变差的孔隙结构得到改善,连通性变好,微孔隙、晶间孔隙和束缚孔隙减少,大孔隙增多,物性变好(平均孔隙度为12.4%,平均渗透率为 $6.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),生产能力增高(有一定的自然产能),孔隙变为渗流孔隙,砂岩成为储集岩,然而,溶蚀作用对砂岩孔喉均值与分选性的影响并不明显(图9),表明在溶

蚀形成大孔隙的同时,还有小孔隙存在。只有当溶蚀孔隙达到一定数量,且互相连通时,才能成为有效孔隙。

## 结 论

(1) 成岩作用明显地改变了本区砂岩孔隙结构特征,使砂岩储油物性和生产能力发生了很大的变化。



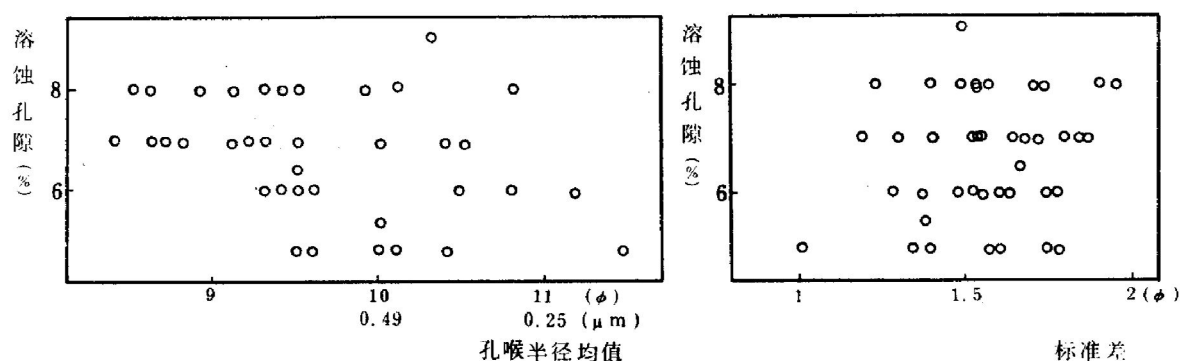


图9 溶蚀作用强度与孔喉半径均值、标准差的关系

(2) 压实作用造成了三角形孔隙和片状喉道；胶结作用造成了晶间孔隙和管束状喉道；溶蚀作用则形成了多种多样的孔隙和喉道形状。

(3) 压实作用和胶结作用使孔隙喉道变小，成为微孔隙、晶间孔隙和束缚孔隙（孔喉半径均值一般小于  $0.5\mu\text{m}$ ），溶蚀作用使孔隙喉道扩大，成为大孔隙粗喉道（孔喉半径均值一般大于  $0.5\mu\text{m}$ ）；压实作用使孔喉分选性变好，溶蚀作用和胶结作用对孔喉分选性的影响则较复杂。

(4) 压实作用和胶结作用造成砂岩孔喉分布峰位与渗透率贡献峰位不一致，主要孔隙不是渗流孔隙；溶蚀作用则可使砂岩孔喉分布峰位与渗透率贡献峰位的一致性得到不同程度的恢复，变不渗流孔隙为渗流孔隙。

参加本项研究的还有叶炎章、徐存金和赵金生三位同志。黄克难同志在镜下观察给予了大力帮助，在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Houseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones. *AAPG Bull.*, 1987, 71 (6): 633—642
- 2 罗塾潭, 王允诚编. 油气储集层的孔隙结构. 北京: 科学出版社, 1986. 21—31, 85—123
- 3 张芳洲, 安光升. 孔隙结构在储层分类评价应用中的研究. 石油勘探与开发, 1981, 8 (5): 51—61
- 4 王行信. 泰康和古龙地区粘土矿物对砂岩储层孔隙结构及产能的影响. 石油与天然气地质, 1985, 6 (2): 187—196
- 5 施密特 V, 麦克唐纳 D A. 砂岩成岩过程中的次生储集孔隙. 陈荷立, 汤锡元译. 北京: 石油工业出版社, 1982. 1—16



## EFFECT OF DIAGENESIS ON PORE STRUCTURE OF THIRD OIL LAYER IN XINGOUZUI FORMATION, QIANJIANG

Wu Guanghong Yao Xiaoming

*(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Jiuquan Oilfield)*

### Abstract

The effect of diagenesis on pore structure of sandstones in third oil layer of Xingouzui Formation in Tuoshi area, Qianjiang Depression is discussed in this paper. The compaction and cementation decreased the pore throat and pore radius of the sandstones in different degrees, and caused the pores to disintegrate into micropores and intercrystal pores, the throats into schistose throats and tubebundle throats in sandstones. The dissolution increased the pore throat and pore radius of sandstones, turned the pores into coarse ones and tubular throat. The compaction resulted in better pore sorting, but the cementation and dissolution made it more complicated.

In sandstones of compaction type and cementation type, the permeability contributed peak position is inconsistent with that of the pore distribution peak position, and their permeability for air is usually less than 1 thousandth of square micron and devoted by few pore spaces with radius bigger than 8 micron. In sandstones of dissolution type, the permeability devoted peak position is usually consistent with that of the pore distribution, thus the main pore spaces of the sandstones are vadose pores.