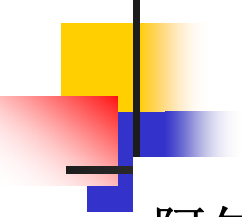


岩石物理—岩石电性

章成广

长江大学
地球物理与石油资源学院



岩石物理-岩电特性

阿尔奇1942年以岩电实验为基础建立的，即以岩石完全含水时的电阻率 R_o 为背景值建立岩石电阻率 R_t 与含水饱和度 S_w 的关系：

电阻增大率

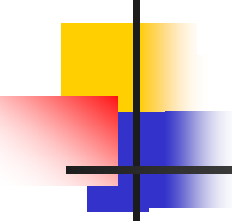
$$I_r = \frac{R_t}{R_o} = \frac{b}{S_w^n} \quad (1)$$

岩石完全含水时的电阻率 R_o 与地层水电阻率 R_w 及岩石的孔隙度 ϕ 有关：

地层因素

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (2)$$

其中 a 、 b 、 m 、 n 为岩电参数，与孔隙结构和流体分布有关。



岩石物理-岩电特性

m值与**a**值的制约关系在不同的孔隙度、渗透率范围内有一定的差异。当孔隙度大于**15%**、渗透率大于 **$100 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$** 时，**m**值与**a**值的相关性良好，其关系式与王曰才教授、褚人杰先生、原海涵先生等的研究成果十分相近，具体为：


$$m = 1.8679 - 1.3199 \log(a) \quad (1)$$

当孔隙度为**10% ~ 15%**，渗透率介于 **$10 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2 \sim 100 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$** 之间时，**m**值与**a**值的关系式为：

$$m = 1.8333 - 0.6038 \log(a) \quad (2)$$

当孔隙度小于**10%**，渗透率介于 **$1 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2 \sim 10 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$** 之间时，**m**值与**a**值的关系式为：

$$m = 1.7044 - 0.5197 \log(a) \quad (3)$$




岩石物理-岩电特性

一般来说，地层条件下（油藏条件）的岩电参数要高于常规下的岩电结果，原因是温度、压力会引起岩石孔隙结构变化，流体性质、油层润湿性又是控制孔隙中油气分布的重要特性。为了符合油藏条件，岩电实验要满足以下条件：

- 1) 油藏条件下的温度、压力；
- 2) 油（气）驱替实验中按油藏高度设计驱替压力，并在驱替中满足毛管压力平衡及流体分布平衡；
- 3) 满足油层实际润湿性与流体性质。

目前多采用无半渗透隔板技术的二电极、四电极测量装置，很难满足毛管压力流体均衡分布，而用半渗透隔板装置毛管压力和电阻率联测技术可望能解决这一问题。



岩石物理-岩电特性

温度、压力对孔隙结构指数 m 的综合影响是随温度和压力增加总的是增加趋势，油藏下 m 值比室内条件下的 m 值大；泥质含量高低对 m 值有很大的影响。

温度、压力对饱和度指数 n 综合影响不是十分明显，两者影响是相反的。岩石润湿性对 n 值有很大的影响，亲油岩石比亲水岩石的 n 值大一些。流体分布是否均衡对 n 值也有很大的影响，一般半渗透隔板法得到的 n 值比常规法得到的结果要大。

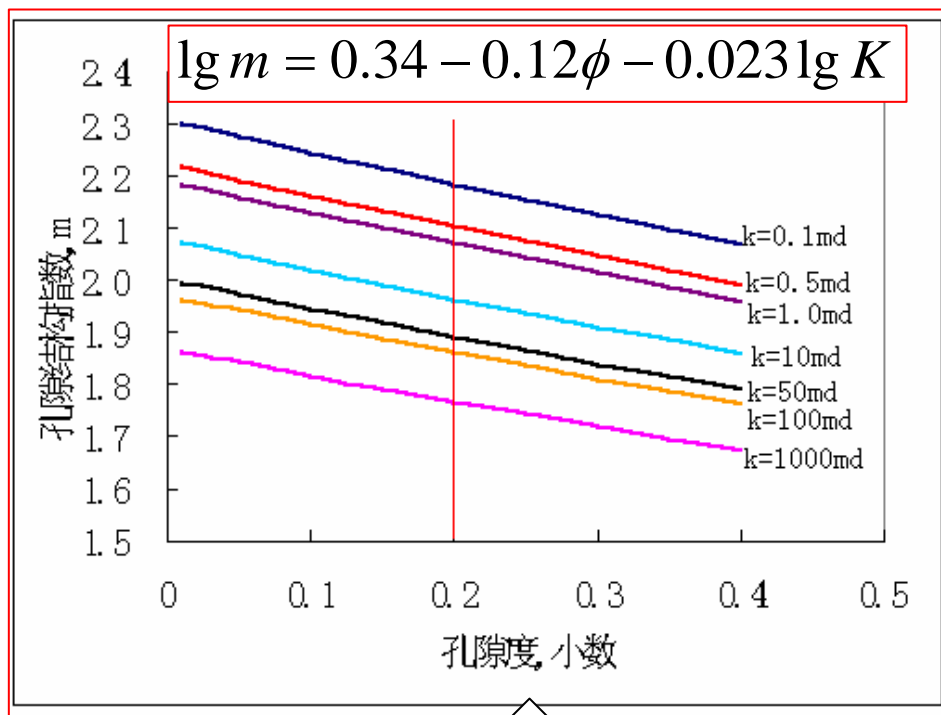


岩电参数的变化规律及控制因素

- 1、岩电参数特点
- 2、岩电参数控制因素
- 3、岩电参数关系式建立和不同储层
类型岩电参数确定

岩电参数的变化规律及控制因素

m值规律

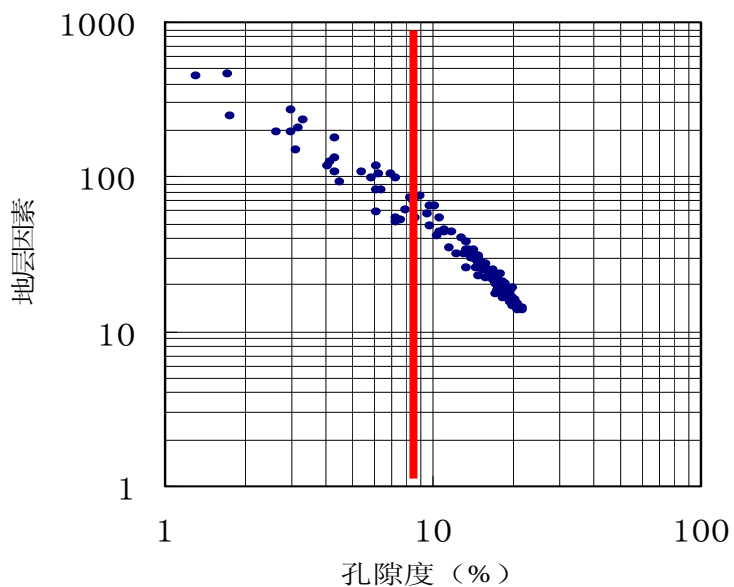


6个油田m值规律

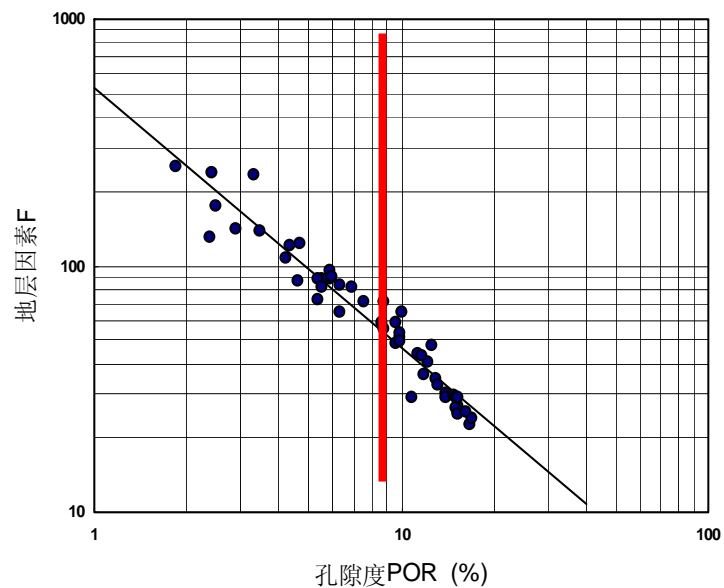
岩电参数m的变化规律及控制因素

m值规律

塔中4井CIII储层中地层因素与孔隙度的关系



塔中47井石炭系地层因素与孔隙度的关系

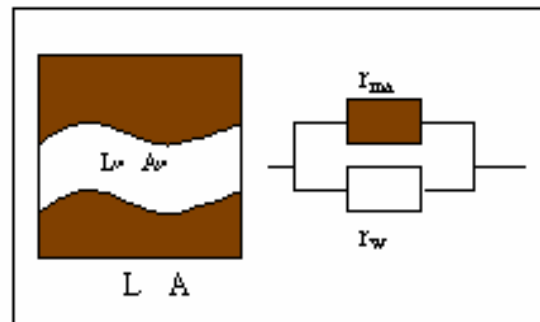


岩电参数的变化规律及控制因素

岩石的电阻就可以看作是岩石骨架、泥质和孔隙流体三个电阻并联的结果，即：

$$\frac{1}{r_t} = \frac{1}{r_{ma}} + \frac{1}{r_{sh}} + \frac{1}{r_f}$$

$$r_{sh} = R_{sh} \frac{L_{sh}}{A_{sh}}$$



对于泥质含量小于**10%**，泥质是以分散形式存在，很难形成导电通路；对于泥质含量大于**10%**，泥质使储层性能变差，很容易形成导电通路。

岩电参数m的变化规律及控制因素

根据毛管理论，孔隙流体的电阻可以看成是许多长度相同而半径不同的含水毛管及含油毛管电阻的并联，即：

$$\frac{1}{r_f} = \sum_{i=1}^N \left(F_i \frac{1}{r_i} \right) \quad r_i = R_f \frac{L_c}{\pi r_{ci}^2}$$

在含水毛管中， R_f 是自由水与束缚水的综合响应，记为 R_{wca} 。它与普通的地层水电阻率不同。根据毛管内荷电粒子的移动规律推得它与普通地层水电阻率、地层水粘度、盐类离子迁移率及毛管粗细等因素有关，具体形式为：

$$R_{wca} = 8 \mu \left(\frac{MR_w}{r_{ci}} \right)^2$$

所有含水毛管电阻：

$$\frac{1}{r_{wf}} = \sum_{i=1}^B \left(F_i \frac{\pi r_{ci}^4}{8 \mu L_c M^2 R_w^2} \right)$$

岩电参数m的变化规律及控制因素

在亲水岩石中，毛管含油后，其中心部分已不再导电。其毛管的电阻等于毛管内束缚水膜的电阻：

$$r_{ofi} = \frac{8 \mu L_c M^2 R_w^2}{\pi [r_{ci}^4 - (r_{ci} - X)^4]}$$

式中 r_{ofi} 岩石中单根含油毛管的电阻； X 含油毛管中束缚水膜的厚度。

岩石中所有含油毛管的电阻：

$$\frac{1}{r_{of}} = \sum_{i=B+1}^N \left(F_i \frac{1}{r_{ofi}} \right) = \sum_{i=B+1}^N \left(F_i \frac{\pi (r_{ci}^4 - (r_{ci} - X)^4)}{8 \mu L_c M^2 R_w^2} \right)$$

岩石的电阻： $\frac{1}{r_t} = \frac{1}{r_{ma}} + \frac{1}{r_{sh}} + \frac{1}{r_f}$

$$\frac{1}{r_t} = \frac{A_{sh}}{R_{sh} L_{sh}} + \frac{\pi}{8 \mu L_c M^2 R_w^2} \left\{ \sum_{i=1}^B (F_i r_{ci}^4) + \sum_{i=B+1}^N [F_i (r_{ci}^4 - (r_{ci} - X)^4)] \right\}$$

岩电参数m的变化规律及控制因素

不含泥质的砂岩储集层饱和水岩石电阻:

$$\frac{1}{r_o} = \frac{\pi}{8\mu L_c M^2 R_w^2} \sum_{i=1}^N (F_i r_{ci}^4)$$

欧姆定律:

$$R_o = r_o \frac{A}{L}$$

不含泥质的砂岩储集层饱和水岩石电阻率:

$$\frac{WTA}{\sum_{i=1}^N (f_i r_{ci}^4)}$$

$W = \frac{8\mu}{\pi} M^2 R_w^2$ ——地层水水性系数;

$T = \frac{L_c}{L}$ ——岩石的孔隙弯曲度;

$A_N = \frac{A}{\sum_{i=1}^N F_i}$ ——毛管视平均截面积;

$f_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^N F_i}$ ——毛管半径为 r_{ci} 的毛管数占全部毛管个数的比例。

岩电参数m的变化规律及控制因素

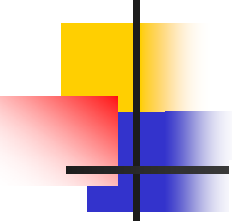
地层因素的定义及地层因素与孔隙度的关系结合有：

$$\frac{a}{\phi^m} = \frac{R_o}{R_w} = \frac{WTA_N}{R_w \sum_{i=1}^N (f_i r_{ci}^4)}$$

令**a=1**，则由上式得：

$$\frac{1}{\phi^m} = \frac{R_o}{R_w} = \frac{WTA_N}{R_w \sum_{i=1}^N (f_i r_{ci}^4)}$$

m值的大小与岩石孔隙度（ ϕ ）、地层水水性系数（**W**）、岩石孔隙弯曲度（**T**）、毛管视平均截面积（**A_N**）及毛管半径的四次方（**r_{ci}**）有关。



岩石物理-岩电特性

岩电参数 m ($a=1$)是孔隙结构指数,与孔隙、喉道大小、分布等有关,塔里木地区:

$$m = 0.817 + 0.319 r - 0.123 \sigma$$

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{K_i}{\phi_i}}$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{\frac{K_i}{\phi_i}} \right)^2$$

$$a = 29.446 \times 0.1385^m$$

这里综合物性参数 m 反映孔隙结构,不同孔隙结构应分别统计。对于好储层 m 值较大,接近2;对于差储层 m 值较低。

岩电参数 n 主要反映了流体性质、分布和岩石的润湿性等,对于一般的砂岩数值为2。

岩电参数n的变化规律及控制因素

不含泥质的砂岩储集层含油和完全含水电阻:

$$\frac{1}{r_t} = \frac{\pi}{8\mu L_c M^2 R_w^2} \left\{ \sum_{i=1}^B (F_i r_{ci}^4) + \sum_{i=B+1}^N [F_i (r_{ci}^4 - (r_{ci} - X)^4)] \right\} \quad \frac{1}{r_o} = \frac{\pi}{8\mu L_c M^2 R_w^2} \sum_{i=1}^N (F_i r_{ci}^4)$$

由欧姆定律及电阻增大系数（电阻率指数）与含水饱和度的关系得:

$$\frac{b}{S_w^n} = \frac{R_t}{R_o} = \frac{r_t}{r_o}$$

b=1.0时，有:

$$S_w^n = \frac{\frac{\pi}{8\mu L_c M^2 R_w^2} \left\{ \sum_{i=1}^B (F_i r_{ci}^4) + \sum_{i=B+1}^N [F_i (r_{ci}^4 - (r_{ci} - X)^4)] \right\}}{\frac{\pi}{8\mu L_c M^2 R_w^2} \sum_{i=1}^N (F_i r_{ci}^4)}$$

$$S_w^n \approx \frac{\sum_{i=1}^B (F_i r_{ci}^4)}{\sum_{i=1}^N (F_i r_{ci}^4)}$$

岩电参数n的变化规律及控制因素

由毛管压力曲线及毛管孔径曲线的变化规律知，毛管孔径与含水饱和度的关系为：

$$r_{ci} = CS \frac{D}{w} \quad r_c = \frac{0.7354}{P_c}$$

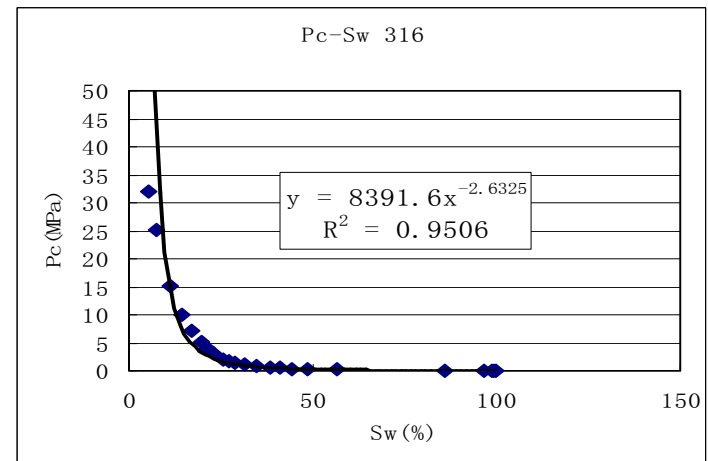
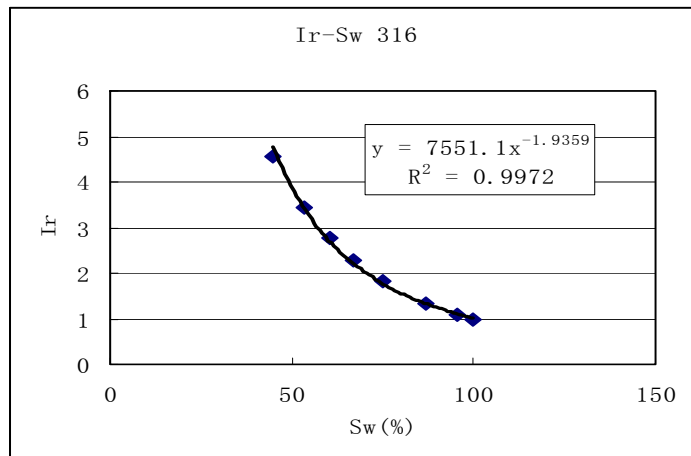
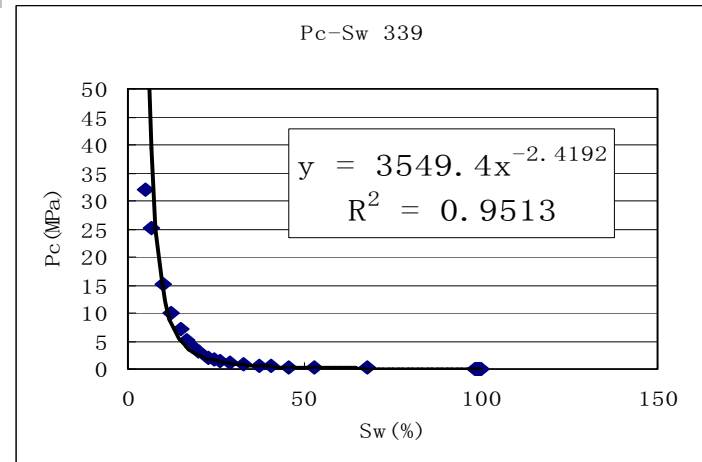
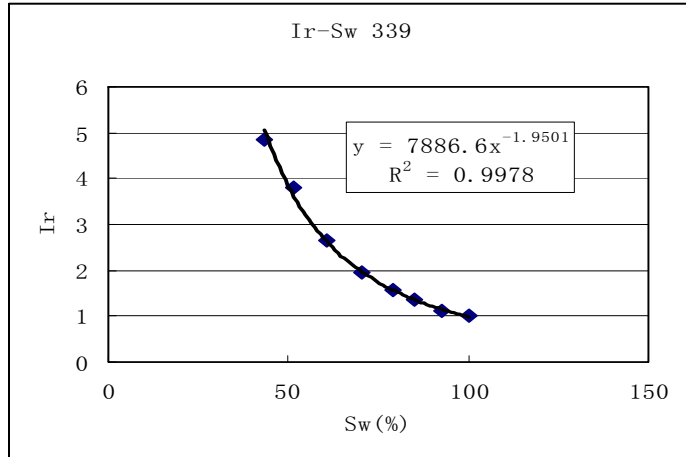
式中 r_{ci} 毛管半径； C 最大毛管孔径参数； D 毛管孔径分布指数。

根据统计学原理和积分原理，推得饱和度指数 n 与毛管孔径分布指数的关系为：

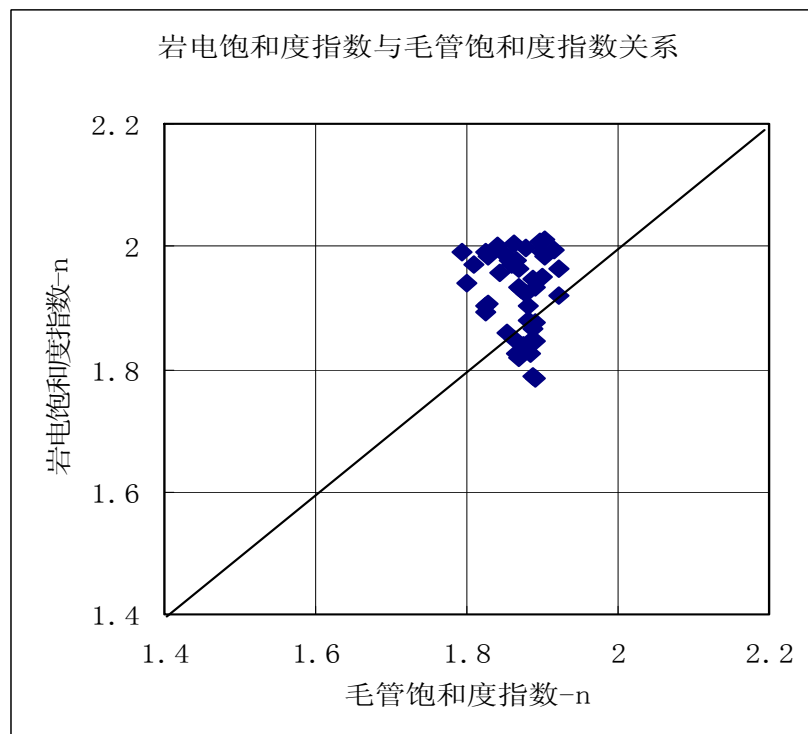
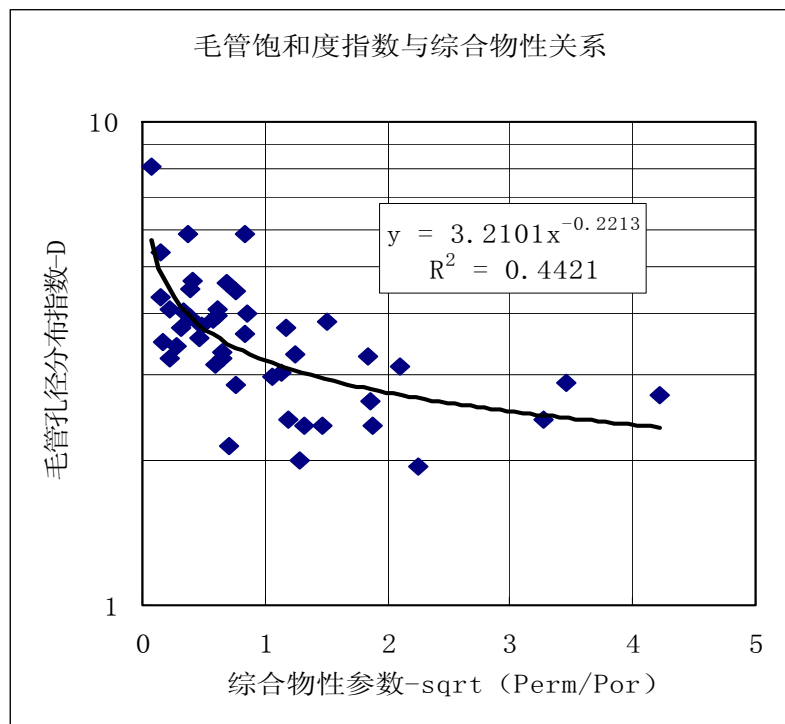
$$n = 2 - \frac{1}{2D + 1}$$

即岩石结构越复杂，毛管孔径分布指数 D 越小， n 值就越小。岩石中泥质的存在一般使 n 值减小。泥质使岩石的孔隙结构变得相对复杂，毛管孔径分布指数 D 减小，从而使 n 值减小。

岩电参数n的变化规律及控制因素



岩电参数n的变化规律及控制因素



岩电参数的变化规律及控制因素

M与温度压力

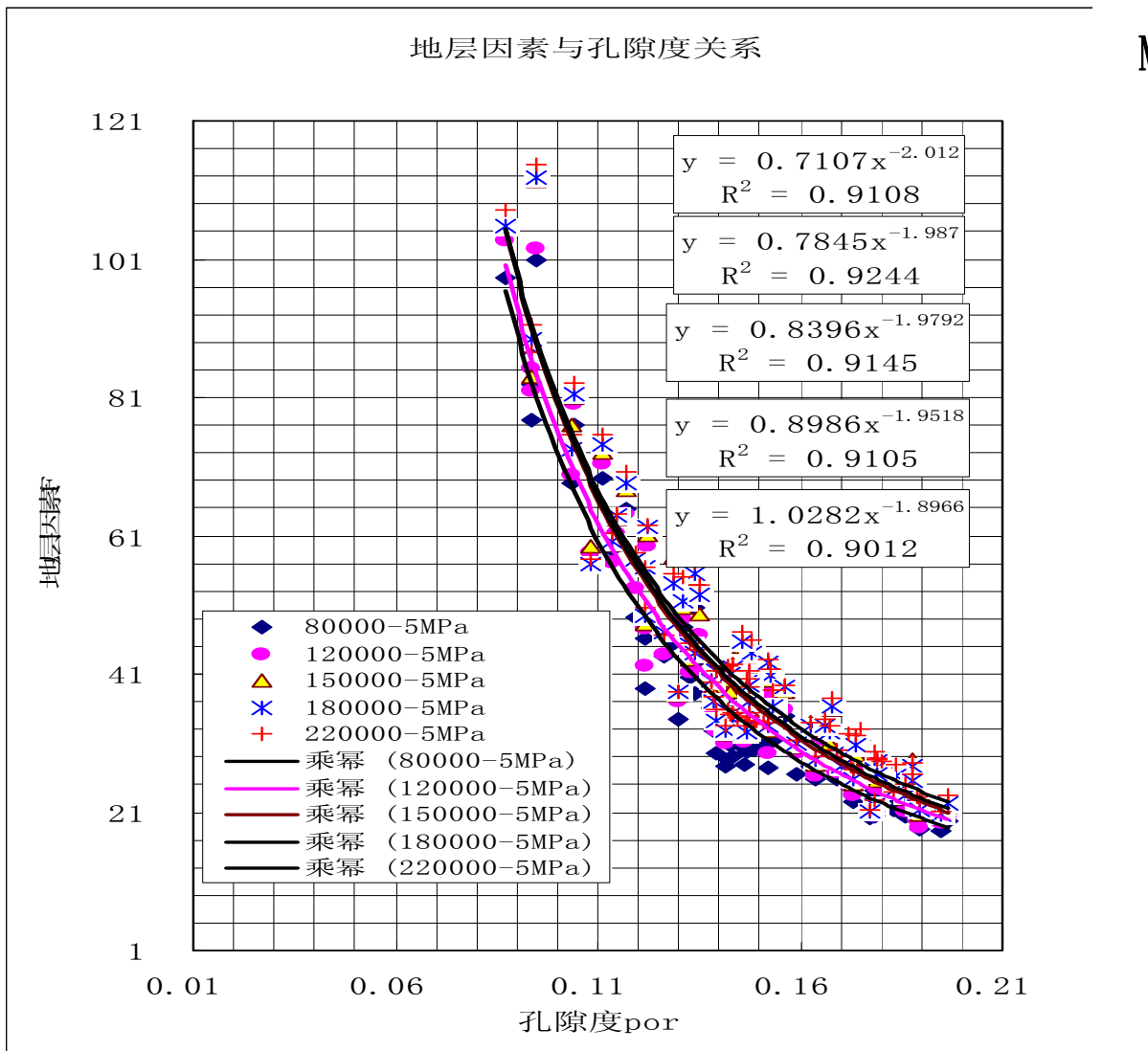
表 2-5 不同矿化度时平均高温高压与常温低压孔隙结构指数比较(a=1)

| 矿化度 mg/L | 渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$ | 孔隙度 % | 孔隙结构指数 5MPa,18°C | 孔隙结构指数 50MPa,100°C | 孔隙结构指数 差值 |
|-------------|-------------------------------|----------|---------------------|-----------------------|--------------|
| 80000 | 49.8272 | 14.2113 | 1.8260 | 1.9191 | 0.0931 |
| 120000 | 55.6385 | 14.8034 | 1.8595 | 1.9224 | 0.0629 |
| 150000 | 54.2646 | 14.7115 | 1.8855 | 1.9375 | 0.0520 |
| 180000 | 54.2646 | 14.7115 | 1.8939 | 1.9447 | 0.0508 |
| 220000 | 55.4905 | 14.8329 | 1.9074 | 1.9598 | 0.0524 |

压力增大，会使孔隙体积发生变化，平均孔喉半径减小，弯曲度变大，渗透性减弱，导致岩样的导电能力减弱，从而使地层因素增加。而温度升高增强了盐水中离子活动能力，使岩石的导电能力增强（泥质附加导电）。

高温高压M比常温常压的稍高，说明克拉2泥质附加导电可忽略，主要受孔隙结构变化的影响。

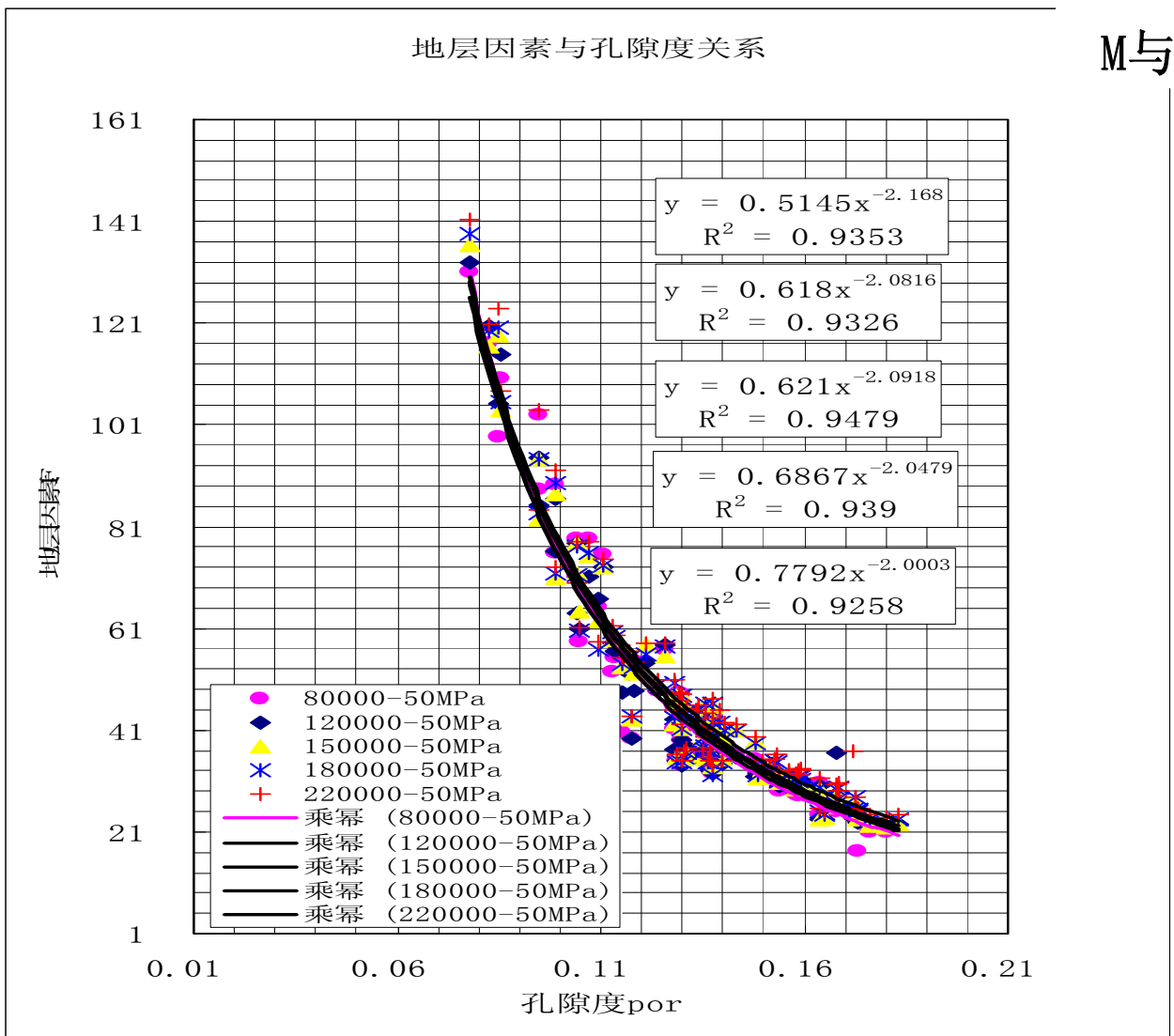
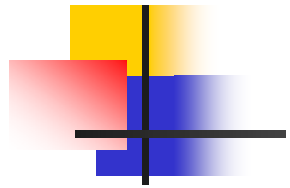
岩电参数的变化规律及控制因素



M与矿化度

常温常压

岩电参数的变化规律及控制因素

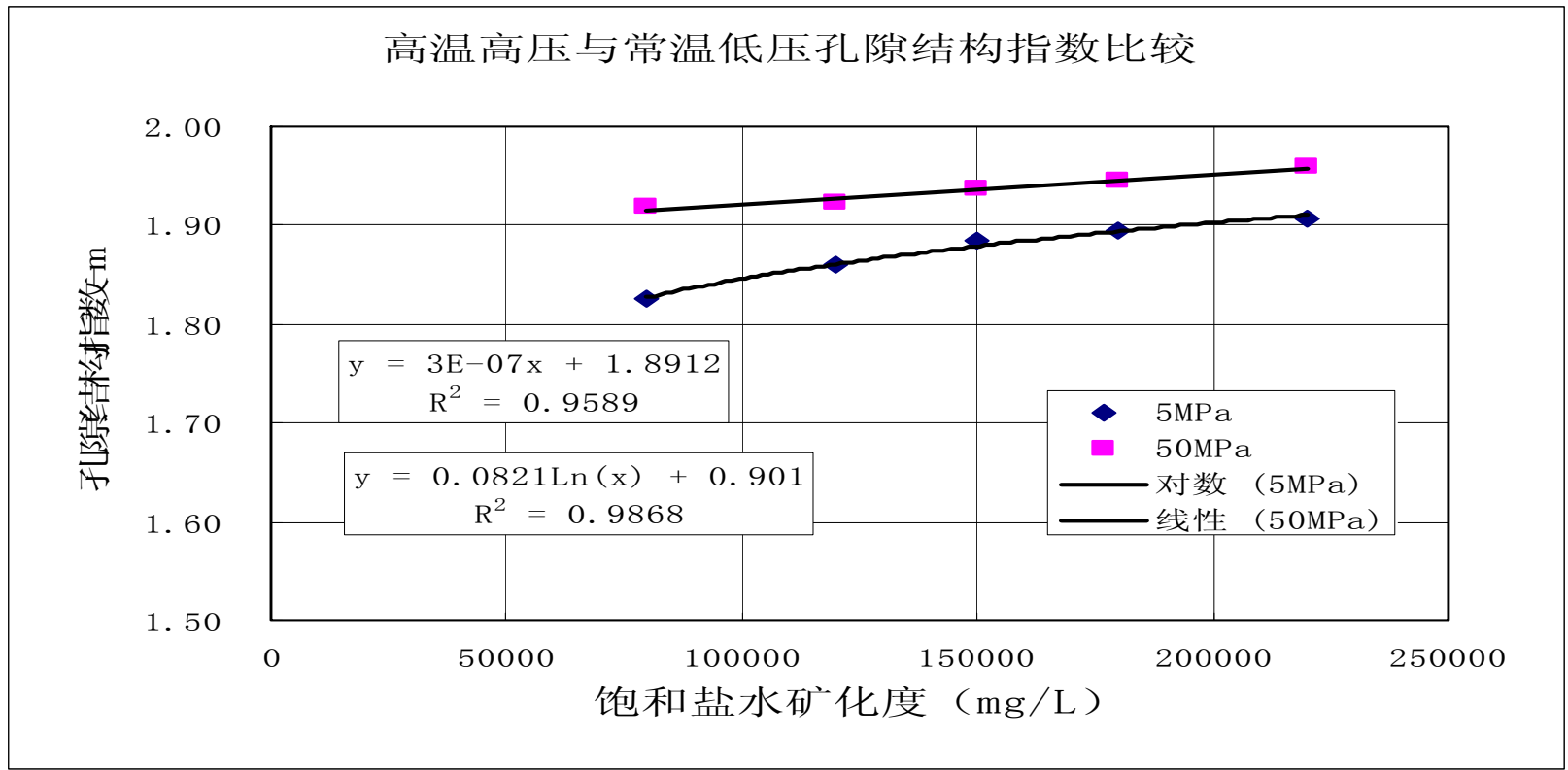


M与矿化度

高温
高压

岩电参数的变化规律及控制因素

M与矿化度

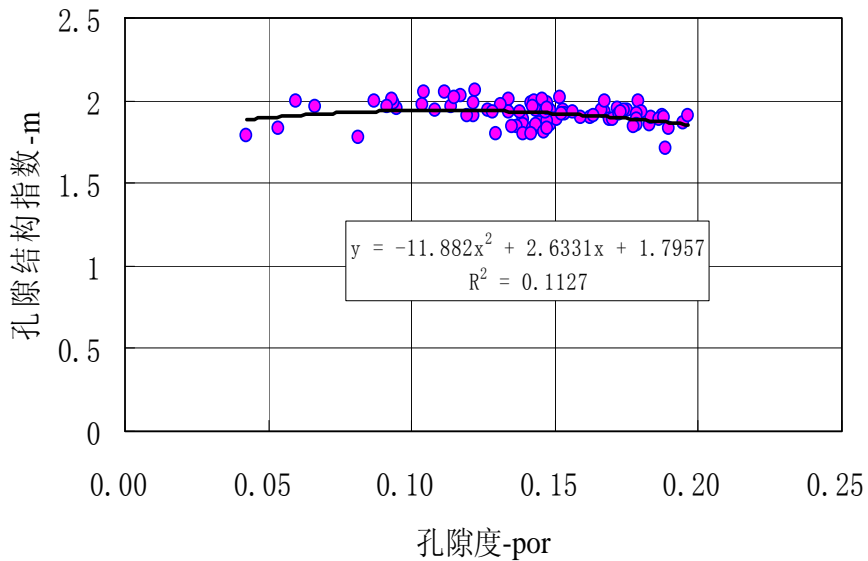


随着饱和盐水矿化度增加，m值增加，常温常压比高温高压增加明显。

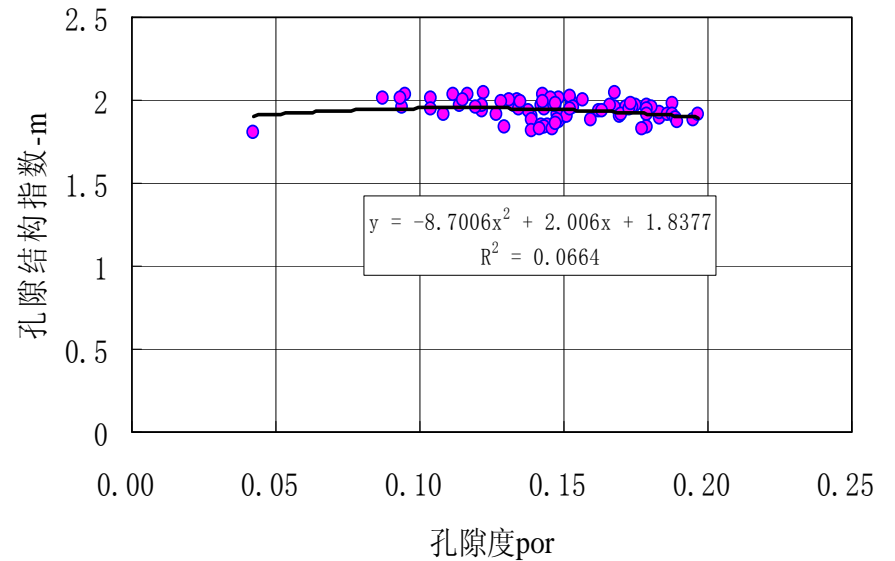
岩电参数的变化规律及控制因素

M与孔隙结构

高温高压孔隙结构指数与孔隙度 (80000mg/l)



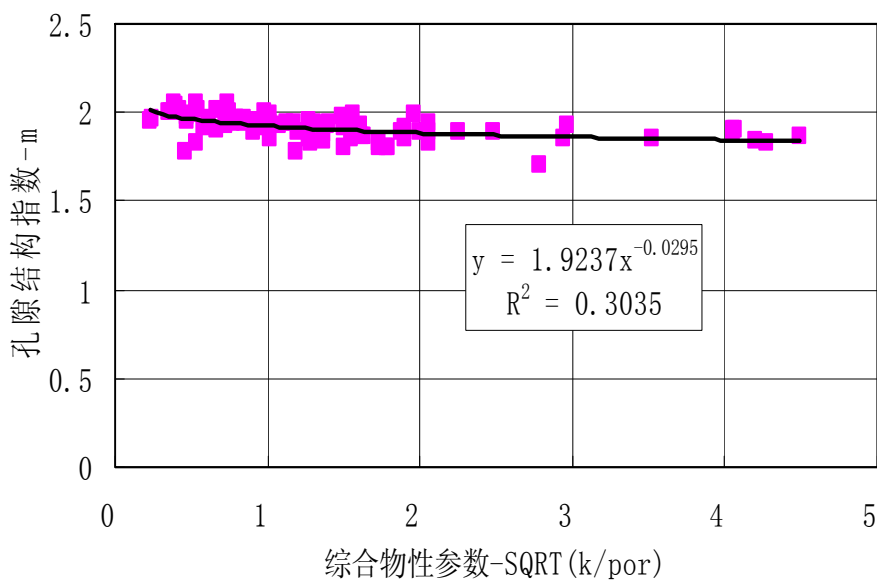
高温高压孔隙结构指数与孔隙度 (150000mg/l)



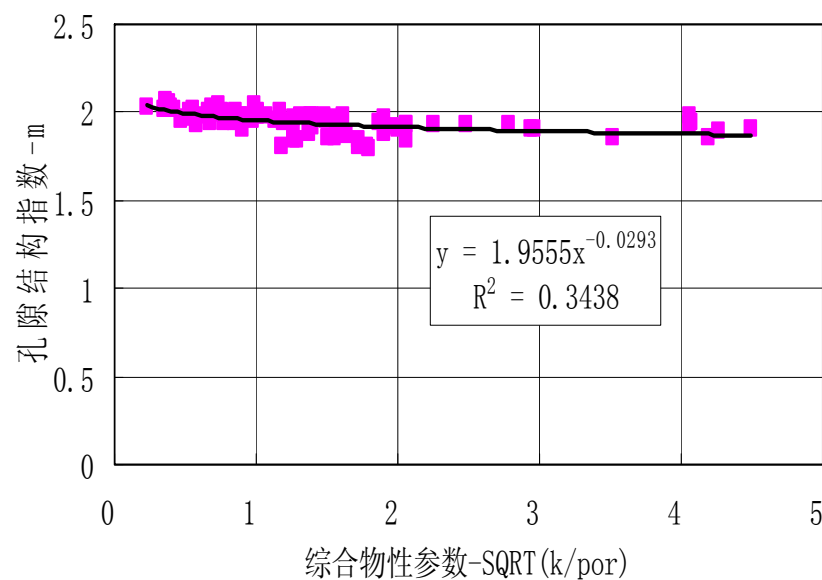
岩电参数的变化规律及控制因素

M与孔隙结构

孔隙结构指数与综合物性参数关系(80000mg/L)



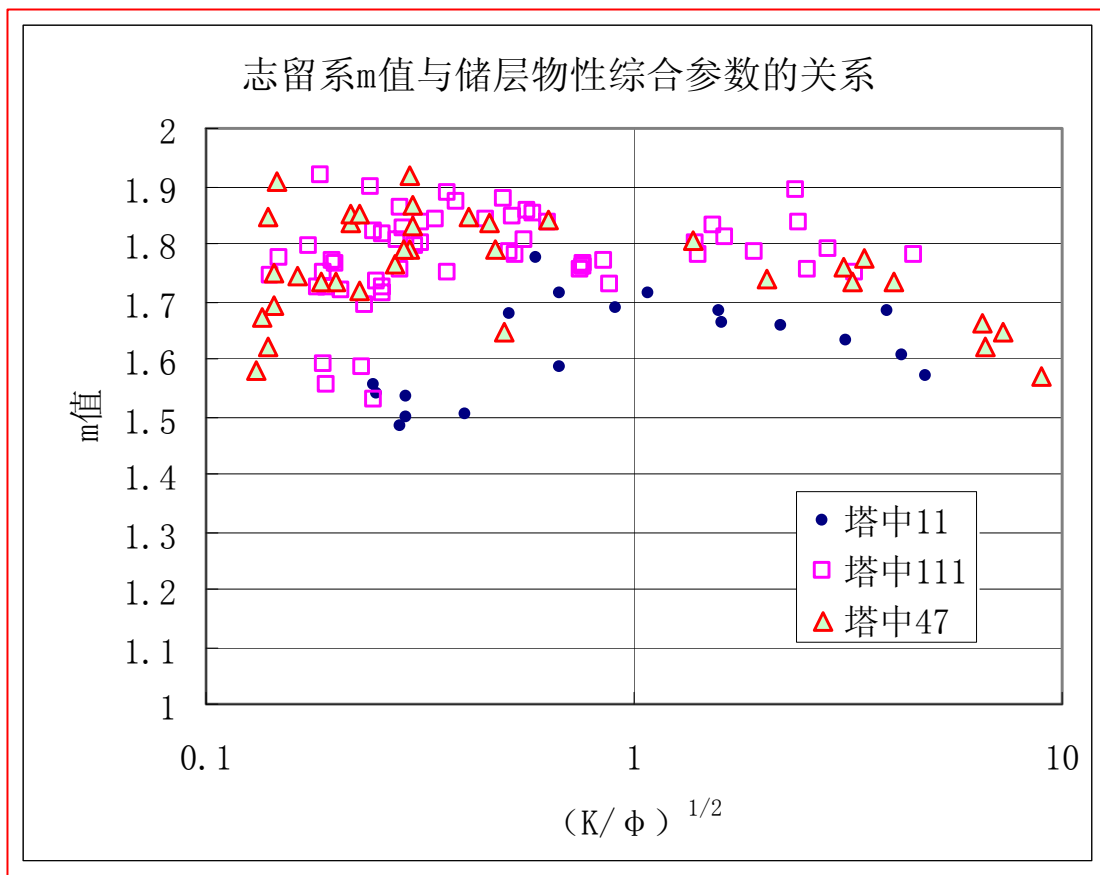
孔隙结构指数与综合物性参数关系(180000mg/L)



不同饱和盐水矿化度实验的m值与孔隙结构有关，
结合储层地质分类，按不同孔隙结构分别建立m值。

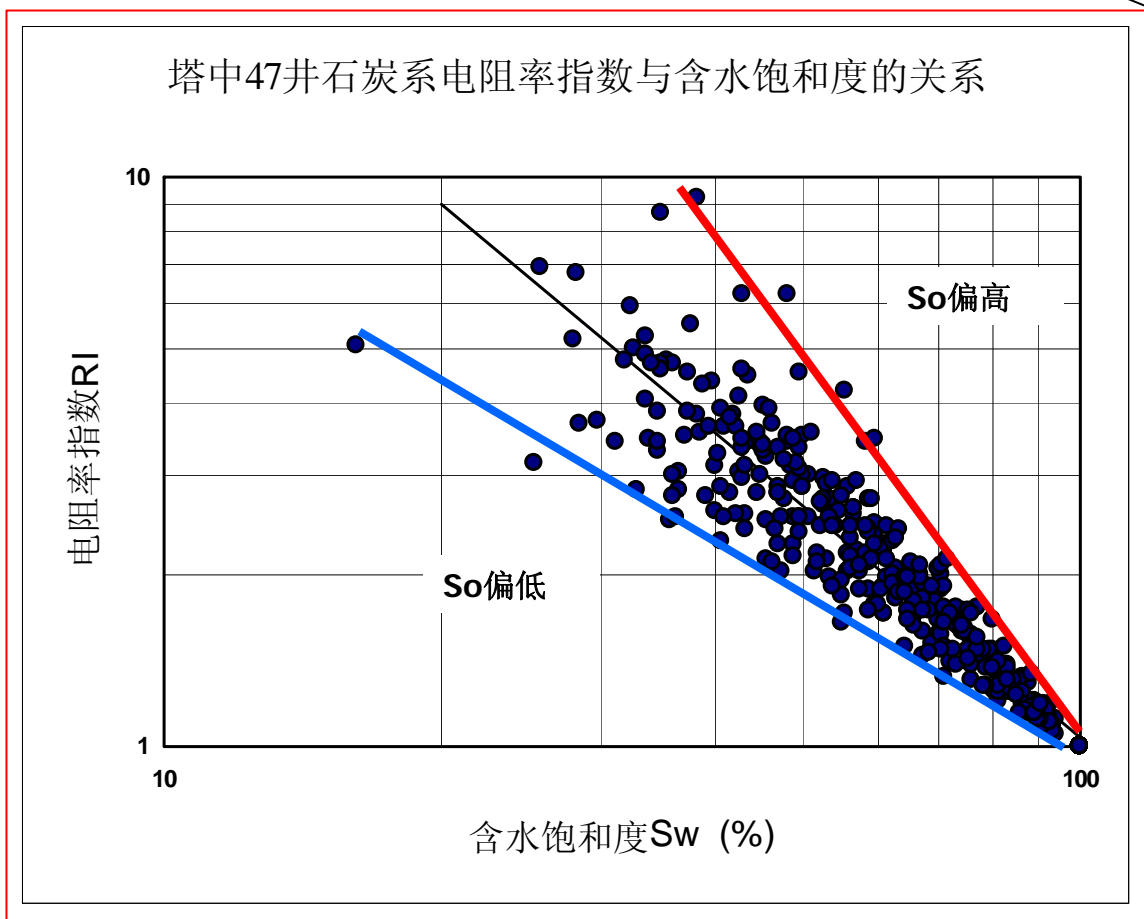
岩电参数的变化规律及控制因素

m值规律



岩电参数的变化规律及控制因素

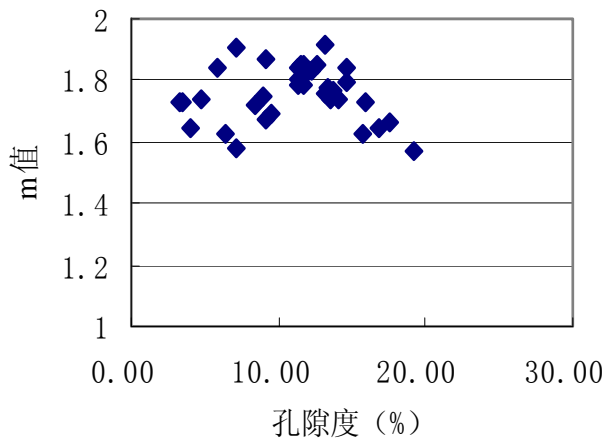
n值规律



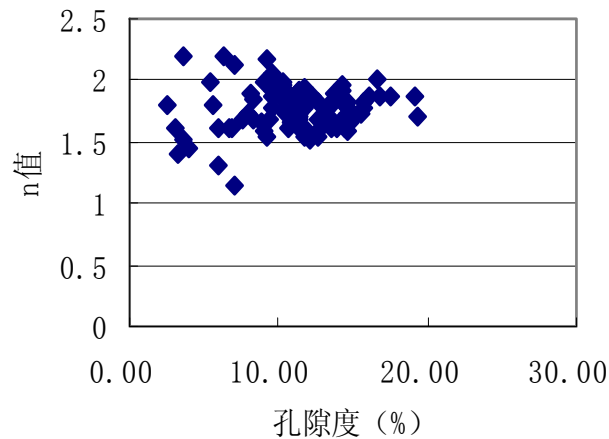
岩电参数的变化规律及控制因素

m、n值控制因素

塔中47井志留系m值与孔隙度的关系



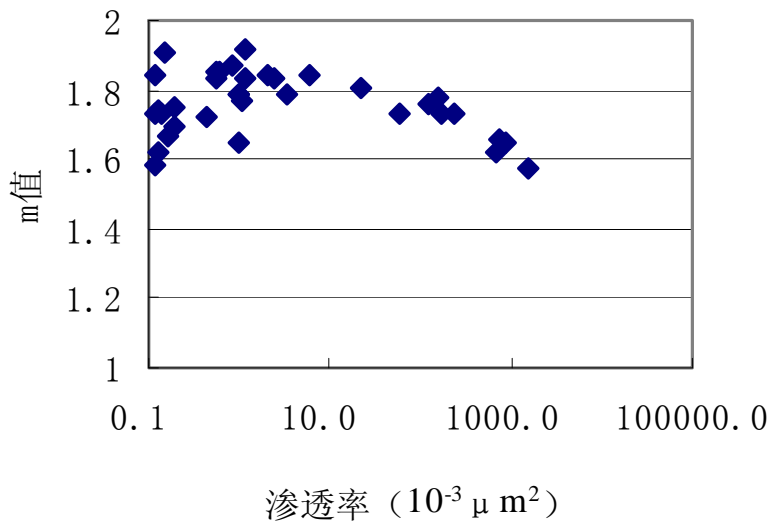
塔中47井志留系n值与孔隙度的关系



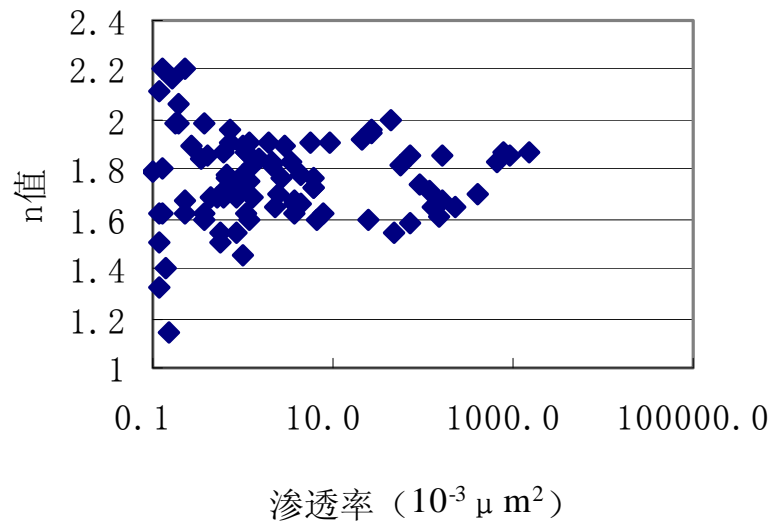
岩电参数的变化规律及控制因素

m、n值控制因素

塔中47井志留系m值与渗透率的关系



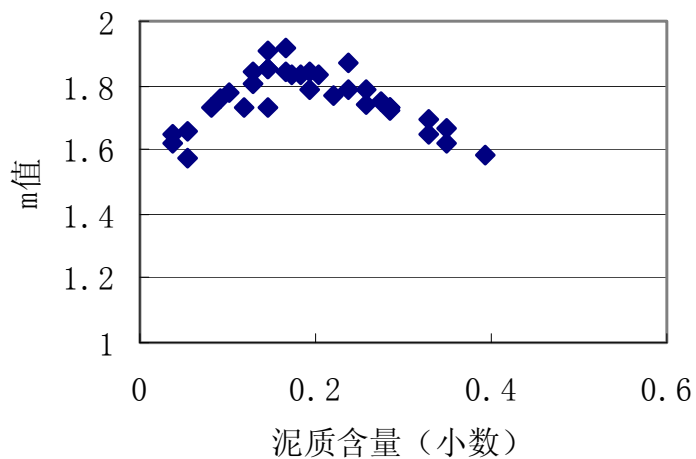
塔中47井志留系n值与渗透率的关系



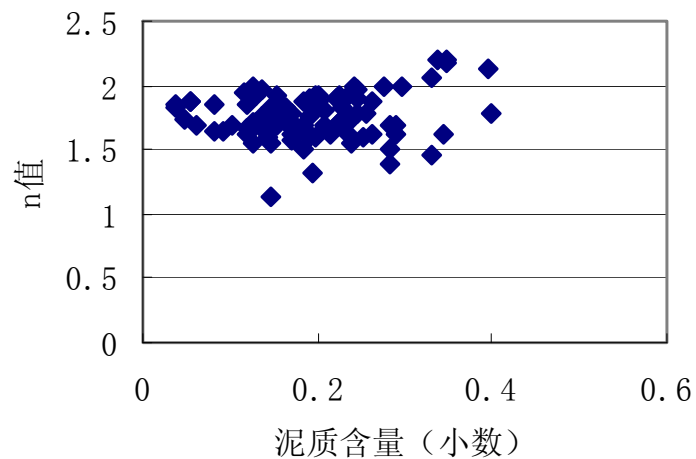
岩电参数的变化规律及控制因素

m、n值控制因素

塔中47井志留系m值与泥质含量的关系



塔中47井志留系n值与泥质含量的关系



岩电参数的变化规律及控制因素

m、n值模型

石炭系

$$m = 1.2666 + 0.0638\phi - 0.0021\phi^2$$

志留系

$$m = 2.0829 - 0.0547 \sqrt{\frac{K}{\phi}} - 1.2132 I_{GR}$$
$$I_{GR} = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}}$$

岩电参数的变化规律及控制因素

石炭系

m、n值模型

$$n = 1.3933 + 0.1156r + (0.5632 - 0.3726r)A$$

$$r = \ln\left(\sqrt{\frac{K}{\phi}}\right)$$

$$A = \frac{I_{GR} - 0.3009 + 0.0521r}{0.0441r - 0.2467}$$

$$I_{GR} = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}}$$

岩电参数的变化规律及控制因素

志留系

m、n值模型

$$n = 1.5033 + 0.1806r + (0.6032 - 0.2376r)A$$

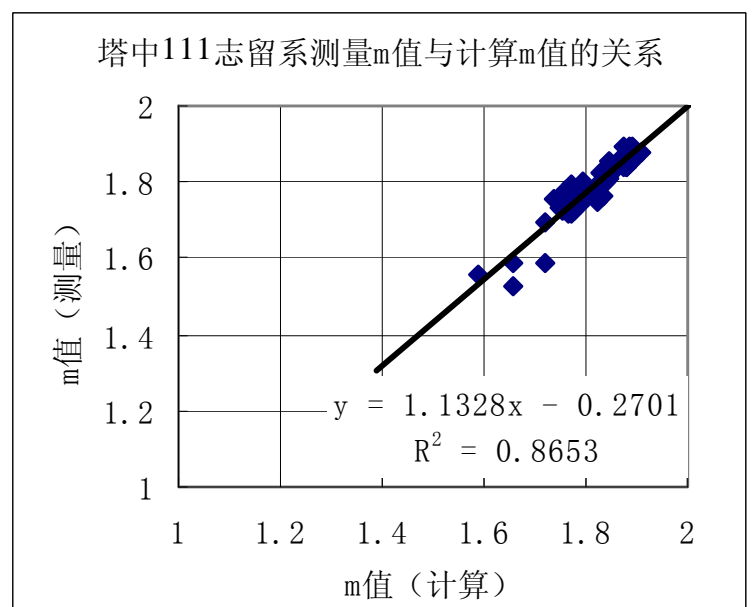
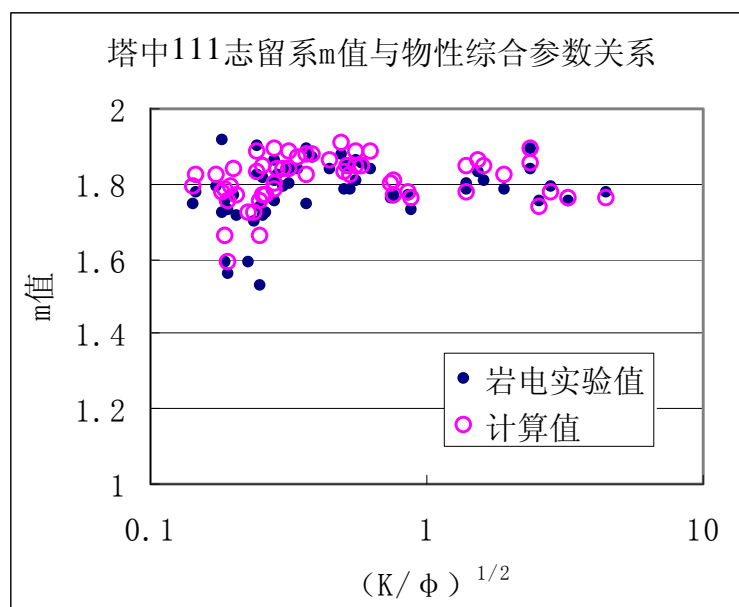
$$r = \ln\left(\sqrt{\frac{K}{\phi}}\right)$$

$$A = \frac{I_{GR} - 0.2742 + 0.0928r}{0.0607r - 0.1733}$$

$$I_{GR} = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}}$$

岩电参数的变化规律及控制因素

m、n值模型验证

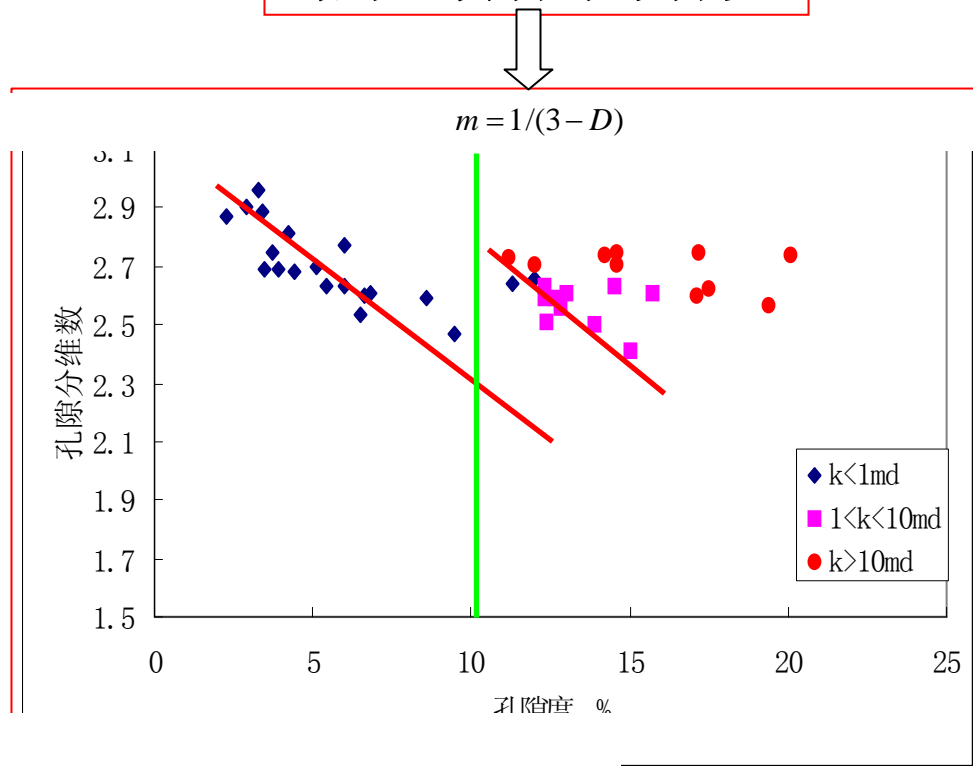


岩电参数的变化规律及控制因素

m值规律

$$\lg S_w = (3 - D) \lg P_{\min} + (D - 3) \lg p_c$$

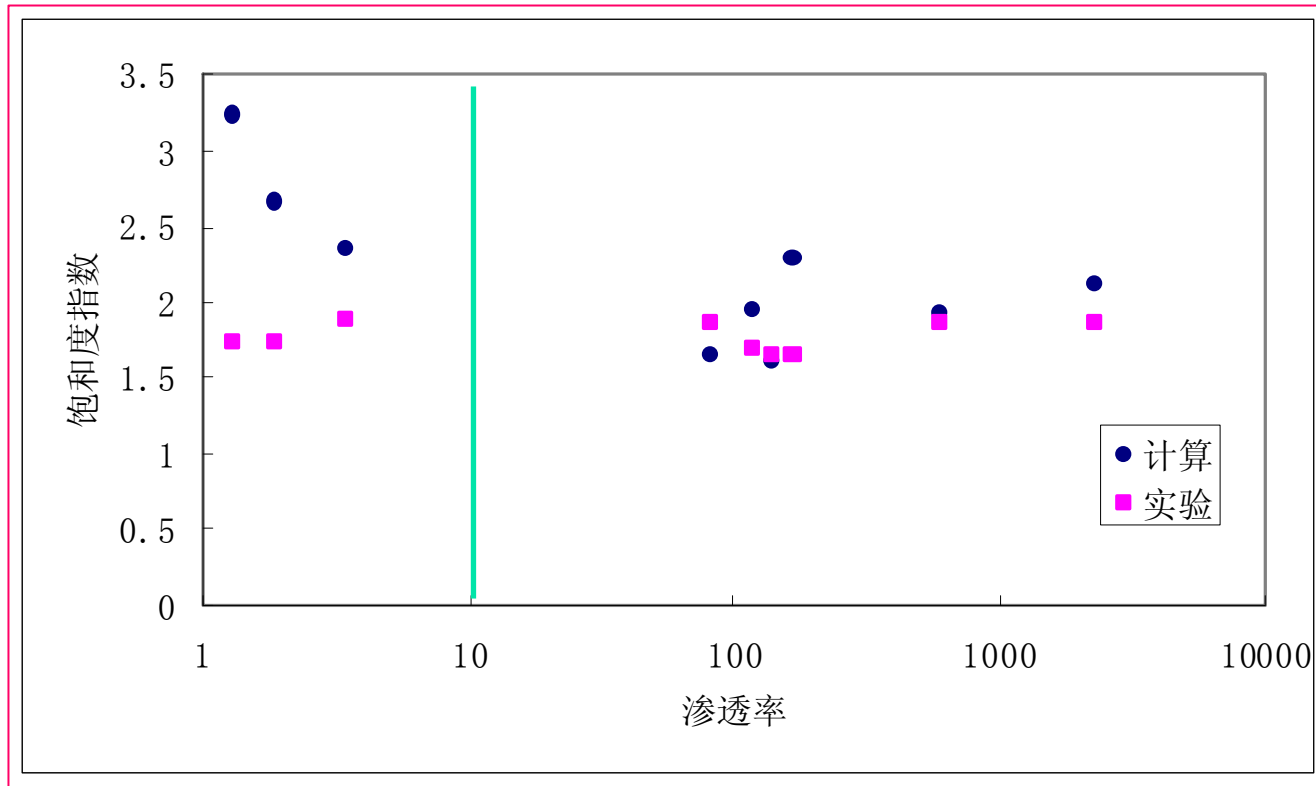
塔中47井分维数分类



$m = 1/(3 - D)$

岩电参数的变化规律及控制因素

n值规律



岩电参数的变化规律及控制因素

岩电分类结果

| 井名/层系 | 储层类别 | 样品数 | a | m | 相关系数 | b | n | 相关系数 |
|--------|------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 塔中 47 | 好储层 | 7 | 1.3098 | 1.6586 | 0.9729 | 1.0116 | 1.8167 | 0.9957 |
| | 中等储层 | 9 | 2.2776 | 1.4132 | 0.9328 | 1.0205 | 1.7868 | 0.9967 |
| | 差储层 | 13 | 2.3376 | 1.3596 | 0.9232 | 1.1007 | 1.5049 | 0.9420 |
| 塔中 111 | 好储层 | 10 | 1.2191 | 1.6064 | 0.9899 | 1.0218 | 1.6992 | 0.9860 |
| | 中等储层 | 8 | 1.9729 | 1.4408 | 0.8845 | 1.0124 | 1.7525 | 0.9929 |
| | 差储层 | 17 | 2.4089 | 1.3451 | 0.9457 | 1.0048 | 1.7132 | 0.9863 |
| 塔中 11 | 好储层 | 6 | 1.4915 | 1.6412 | 0.9210 | 1.0184 | 2.2957 | 0.9810 |
| | 中等储层 | 5 | 3.3247 | 1.4862 | 0.9445 | 0.9978 | 2.5037 | 0.9974 |
| | 差储层 | 9 | 4.6249 | 1.1131 | 0.9808 | 1.0013 | 2.5012 | 0.9977 |
| 志留系 | 好储层 | 23 | 0.9533 | 2.0028 | 0.9544 | 1.0235 | 2.0040 | 0.9764 |
| | 中等储层 | 22 | 2.3454 | 1.6457 | 0.9142 | 0.9982 | 1.9573 | 0.9846 |
| | 差储层 | 39 | 2.9674 | 1.4394 | 0.8755 | 1.0238 | 1.7891 | 0.9433 |

残余油饱和度确定

油驱水岩电实验

表 2-1 常温常压条件下 a、m、b、n 值的统计结果 (矿化度为 240000mg/L)

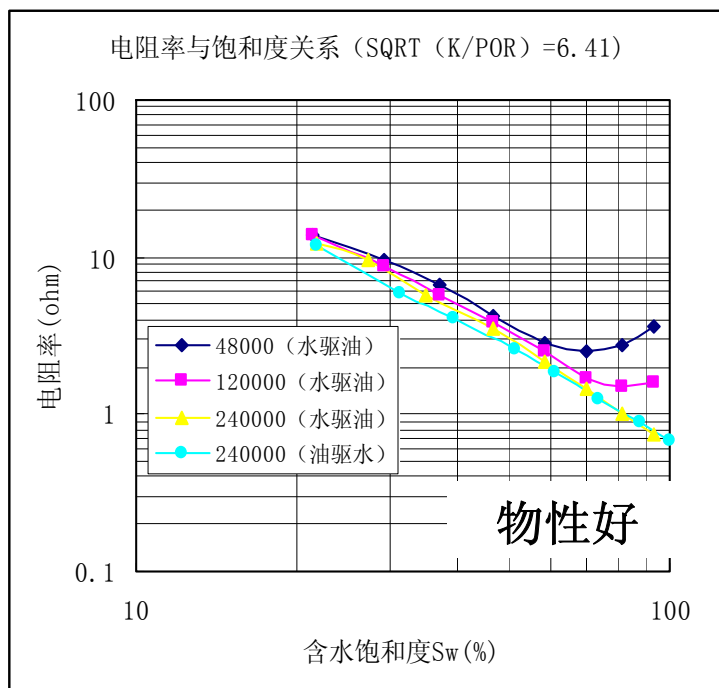
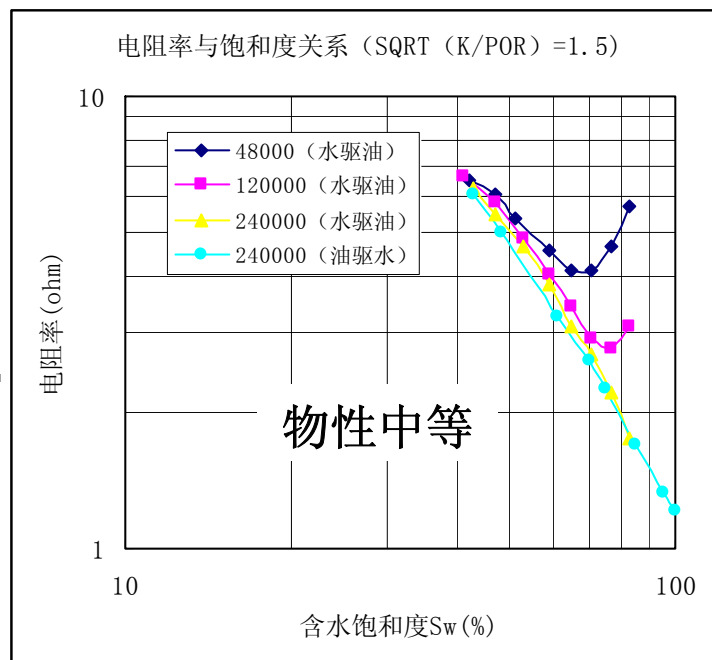
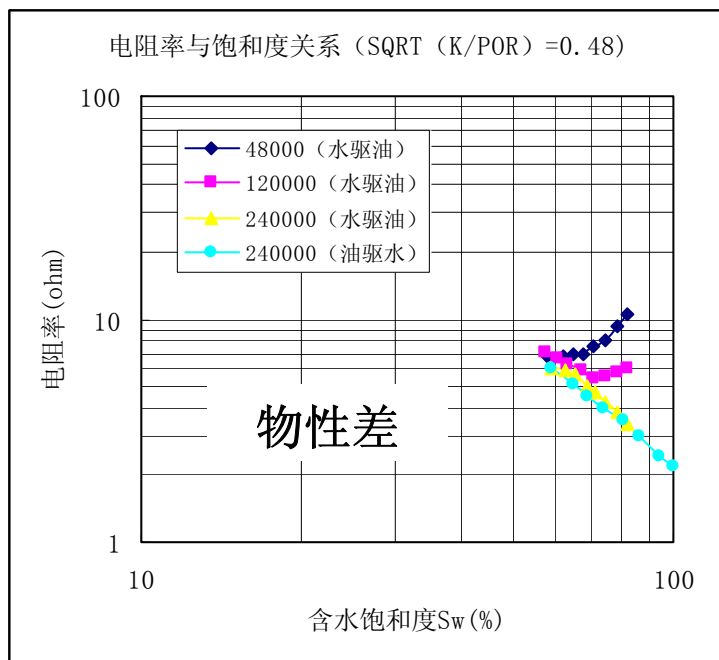
| 井号 | 岩性分类 | a 不强制为 1 时 | | a 强制为 1 时 | | b | n |
|---------|----------------------------|------------|--------|-----------|--------|--------|-------|
| | | a | m | a | m | | |
| DH1-6-9 | 71 块砂岩岩芯 (所有岩芯) | 1.9669 | 1.3148 | 1 | 1.6596 | 1.0219 | 1.883 |
| | 5 块砂岩岩芯 ($\phi < 10\%$) | 1.4134 | 1.4031 | 1 | 1.5250 | 1.0170 | 1.869 |
| | 66 块砂岩岩芯 ($\phi > 10\%$) | 1.4526 | 1.4827 | 1 | 1.6834 | 1.0227 | 1.854 |

水驱油岩电实验

表 2-2 常温常压条件下 a、m、b、n 值的统计结果 (矿化度为 240000mg/L)

| 井号 | 岩性分类 | a 不强制为 1 时 | | a 强制为 1 时 | | b | n |
|---------|----------------------------|------------|--------|-----------|--------|--------|--------|
| | | a | m | a | m | | |
| DH1-6-9 | 65 块砂岩岩芯 (所有岩芯) | 1.7469 | 1.3789 | 1 | 1.6772 | 1.0620 | 1.9380 |
| | 64 块砂岩岩芯 ($\phi > 10\%$) | 1.5135 | 1.4588 | 1 | 1.6826 | 1.0630 | 1.9384 |

1 含水饱和度和模型

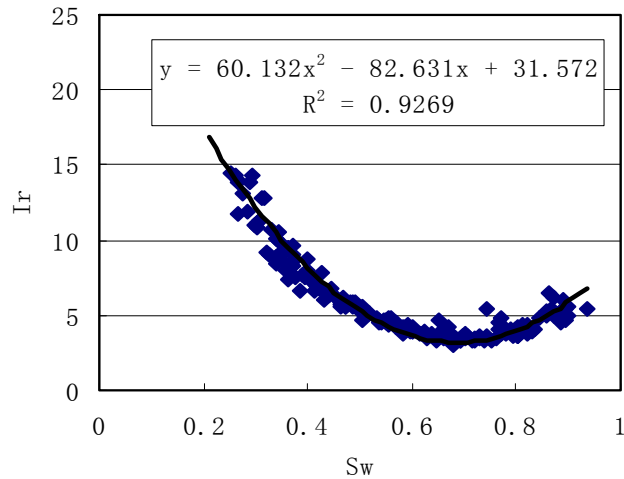


水驱油实验结果:

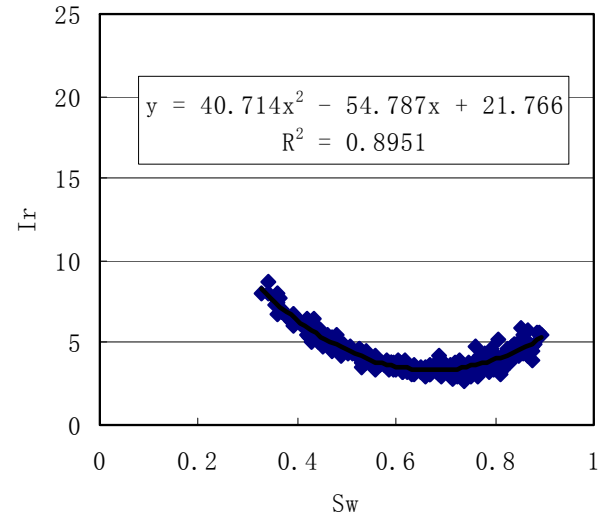
- 1: 当驱替水与原始地层水矿化度相同时, 电阻率变化曲线接近油驱水情形, 但电阻率稍大一些。
- 2: 驱替水矿化度越低, U形越明显。
- 3: 物性好, 曲线拐点处含水饱和度大。

说明不同注入水型、不同物性, 油层水淹特征不一样, 用电阻率求饱和度要用不同模型。

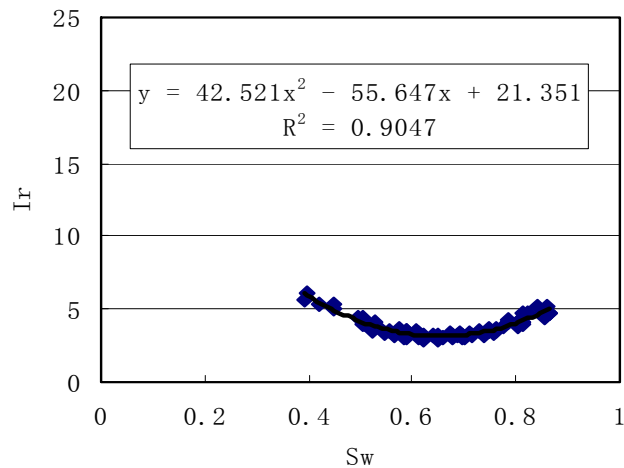
电阻增大系数与含水饱和度关系
(48000mg/L, $R_w=0.04944\text{ohm}$ $k>50\text{md}$)



电阻增大系数与含水饱和度关系
(48000mg/L, $R_w=0.04944\text{ohm}$, $10 < k < 50\text{md}$)



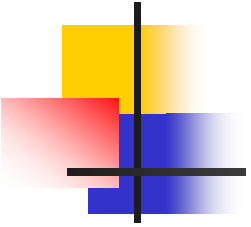
电阻增大系数与含水饱和度关系
(48000mg/L, $R_w=0.04944\text{ohm}$, $k < 10\text{md}$)



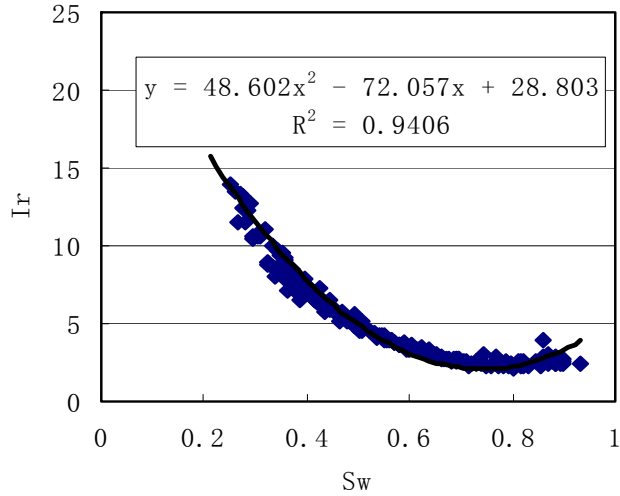
矿化度: **48000mg/L**

按渗透率分类,

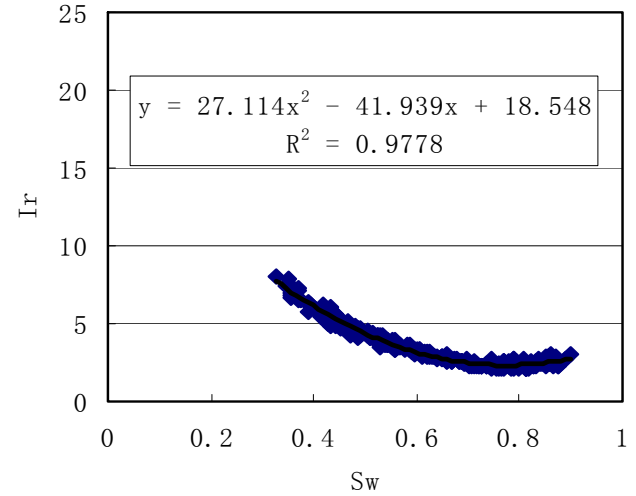
建立不同饱和度模型



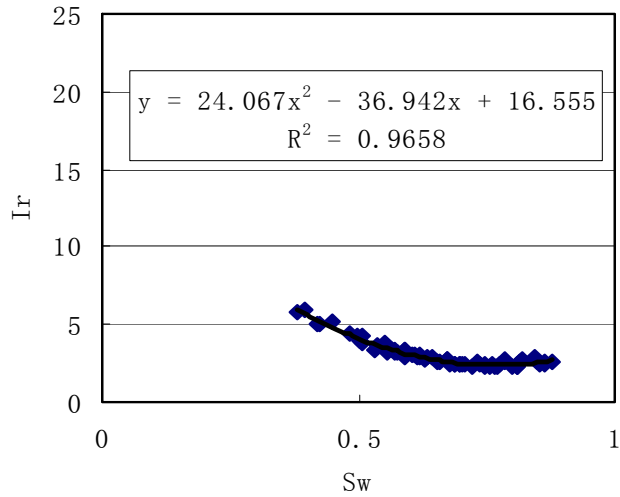
电阻率增大系数与含水饱和度关系
(120000ppm, $R_w=0.08$, $k>50\text{md}$)



电阻率增大系数与含水饱和度关系
(120000mg/L, $R_w=0.08$, $10<k<50\text{md}$)

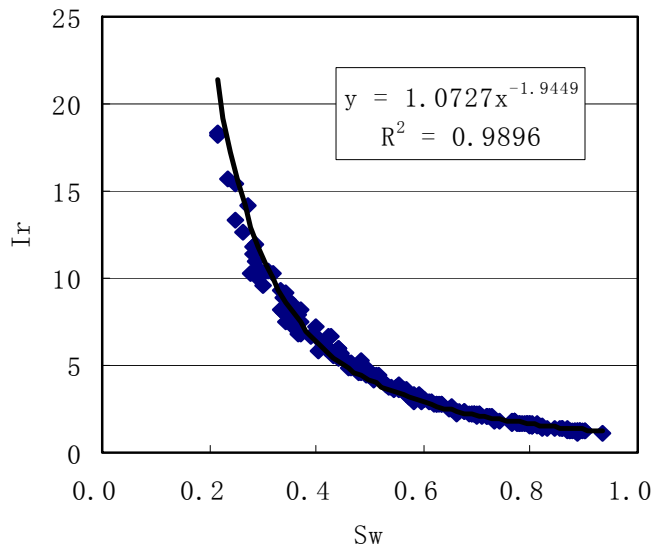


电阻率增大系数与含水饱和度关系
(120000mg/L, $R_w=0.08$, $k<10\text{md}$)

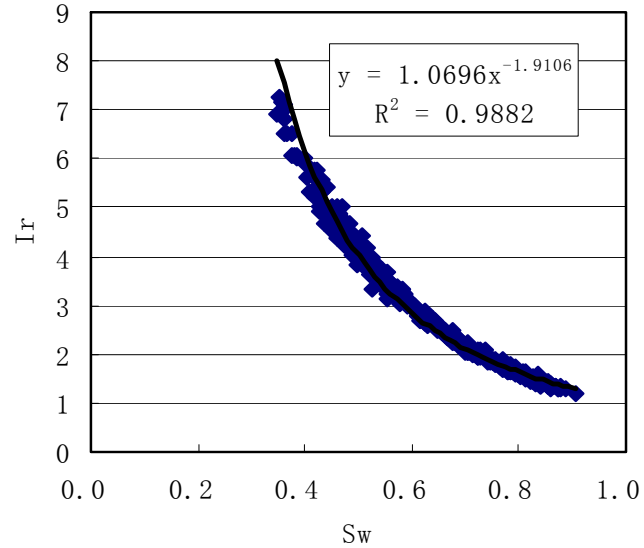


矿化度: 120000mg/L

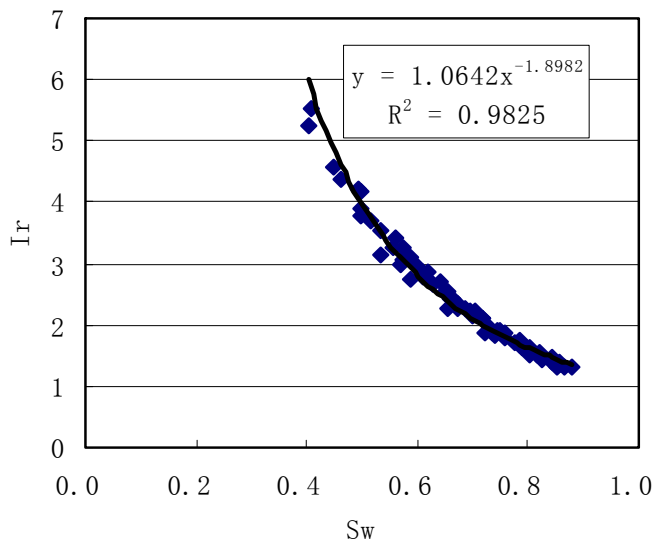
电阻率增大系数与含水饱和度关系
(240000mg/L, $R_w=0.0159\text{ohm}$, $k>50\text{md}$)



电阻率增大系数与含水饱和度关系
(240000mg/L, $R_w=0.0159\text{ohm}$, $10<k<50\text{md}$)



电阻率增大系数与含水饱和度关系
(240000mg/L, $R_w=0.0159\text{ohm}$, $k<10\text{md}$)



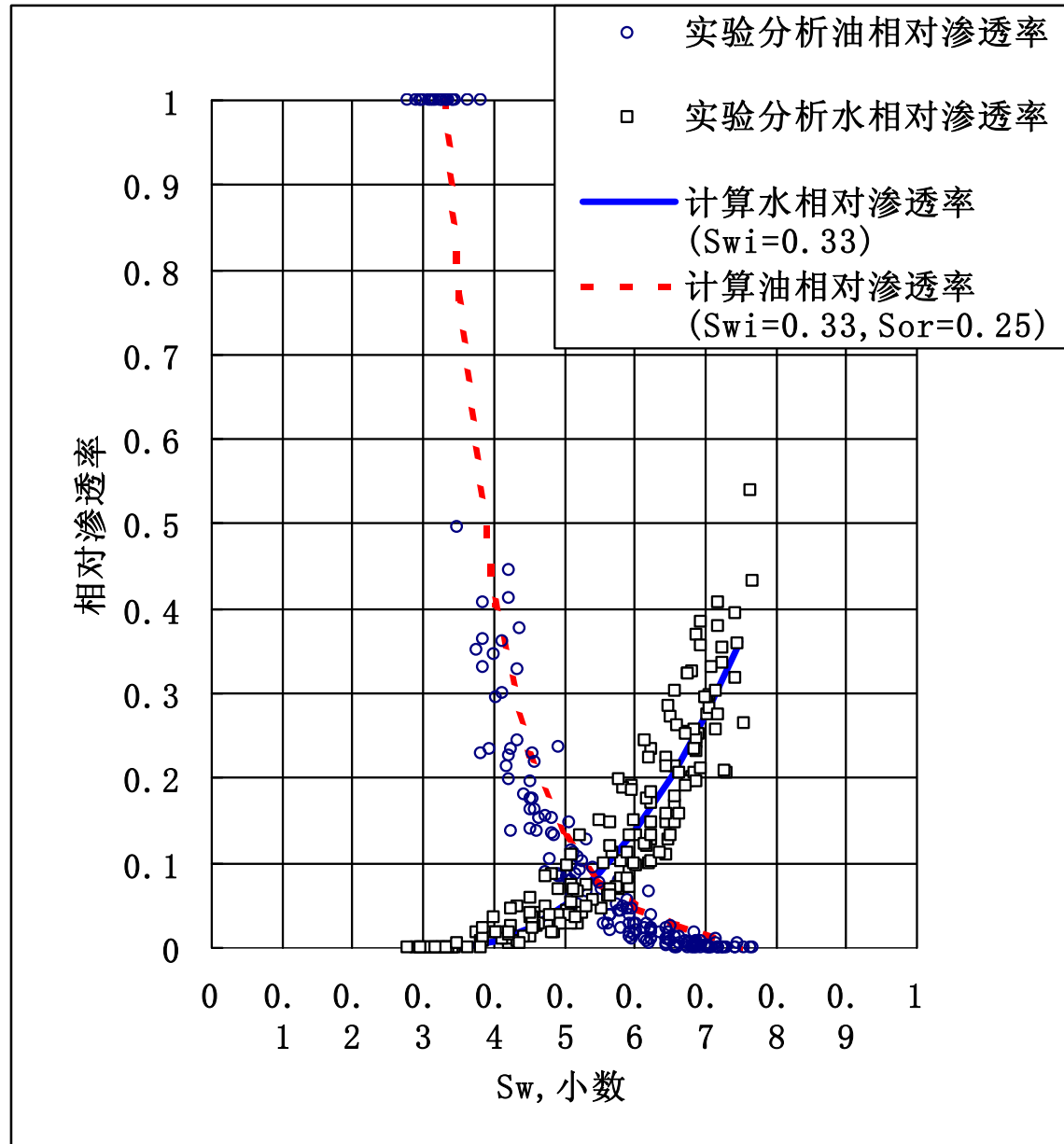
矿化度: **240000mg/L**

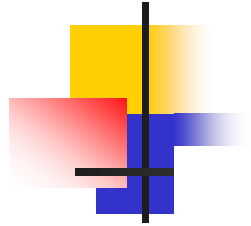
表2-5 东河1 油田地层水总矿化度

| 层系 | 年份 | 样品数 | 平均矿化度 (mg/L) |
|------|-----------|----------|---------------|
| CIII | 1997~1999 | 8 | 109905.4 |
| CIII | 2000 | 13 | 107522.3 |
| CIII | 2001 | 10 | 87546.0 |
| CIII | 2002 | 17 | 100078.8 |
| CIII | 2003 | 28 | 138090.4 |
| CIII | 2004 | 21 | 135339.0 |
| CIII | 2005 | 25 | 146555.6 |
| CIII | 2006 | 14 | 174904.3 |
| 合计 | | 总样品数:136 | 总平均: 124992.7 |

受注水井影响，不同位置生产井矿化度有很大不同。

油水相对渗透率模型





$$K_{rw} = \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right)^{2.1744} \quad R = 0.94$$

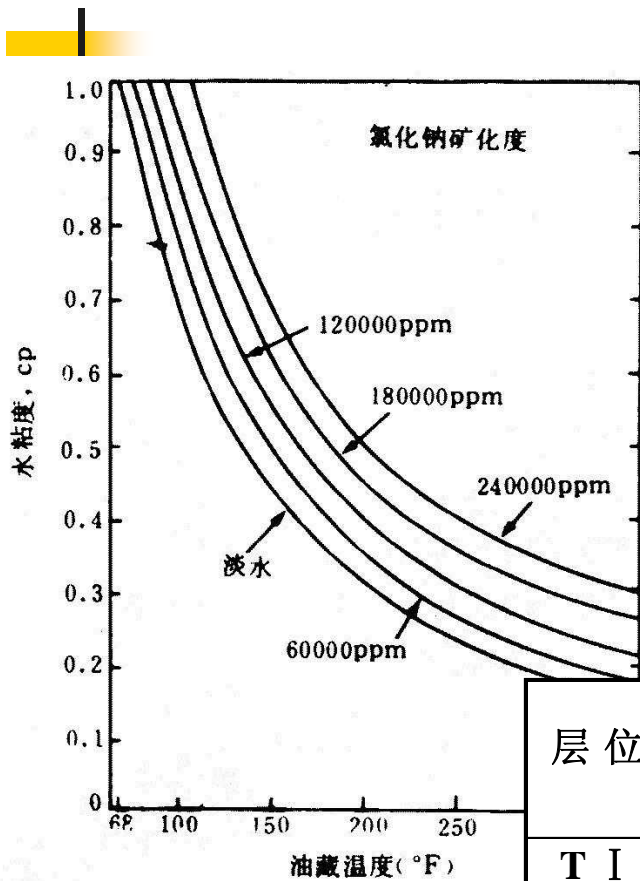
$$K_{ro} = \left(1 - \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \right)^{8.941 - 10.033S_w} \quad R = 0.99$$

含水率

$$F_w = \frac{Q_w}{Q_o + Q_w} = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro}\mu_w}{K_{rw}\mu_o}}$$

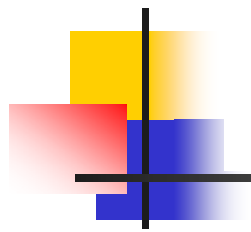
驱油效率

$$\eta = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}}$$



确定地层条件水油粘度比

| 层位 | 地层原油粘度 (m p a . s) | 水、油粘度比 (μ_w / μ_o) |
|-------|-------------------------|-------------------------------|
| T I | 2.385 | 0.154167 |
| T II | 0.95 | 0.389474 |
| T III | 0.57675 | 0.637831 |
| J | 1.75 | 0.19 |



谢 谢!