

W-S 模型在泥质砂岩储层含油性评价中的应用

程相志, 周凤鸣, 彭银辉, 赵凌风

(中国石油冀东油田勘探开发研究院, 河北唐山 063004)

摘要: W-S 模型是计算泥质砂岩储层含油饱和度的有效方法, 具体表述为饱含水泥质砂岩和含油泥质砂岩电导率方程为: $C_o = \frac{1}{F'}(C_w + BQ_v)$, $C_t = \frac{S_w^{n'}}{F'}(C_w + B \frac{Q_v}{S_w})$ 。B 是模型中极重要的参数, 根据其随溶液电导率 C_w 和温度 T 的变化关系可以计算求得; m' 和 n' 是计算泥质砂岩储层含油饱和度的重要参数, 它们均随岩性的不同而变化, 岩性细, m' 和 n' 指数小, 岩性粗, m' 和 n' 指数大; Q_v 和 R_w 是 W-S 饱和度评价模型的基本参数, 运用激发极化电位测井资料法、常规测井资料法、水分析法及正自然电位曲线法亦可分别求取。这些参数确定后, 即可将 W-S 模型应用于常规的数字处理。应用效果表明, 对于泥质砂岩储层, W-S 模型能够提供可靠的储层饱和度, 进行烃与非烃储层的判断。

关键词: W-S 模型; 参数; 饱和度; 储层含油性; 应用

第一作者简介: 程相志, 男, 30 岁, 工程师(硕士), 石油测井

中图分类号: P618.130.2⁺1 文献标识码: A

大量的实验数据显示, 在低矿化度(1 000~10 000 mg/l) 地层水的环境下, 泥质砂岩储层的阳离子交换量引起的粘土附加电导, 对电性的影响非常突出, 使得泥质砂岩储层电阻率明显降低, 因此, 以高阳离子交换能力粘土矿物为主要胶结物的泥质砂岩储层就可能出现大量的低电阻率油气层^[1]。以泥质砂岩储层为主的老爷庙油田就是最明显的实例, 为此, 我们选择了体现粘土附加电导的 W-S 模型作为泥质砂岩储层饱和度的计算公式, 对泥质砂岩储层进行油气水层评价。

1 模型简述

1968 年, Waxman 和 Smits^[2] 根据他人的实验结果, 经过分析, 提出了著名的 W-S 饱和度评价模型。该模型较成功地描述了泥质砂岩岩石电阻率与含油饱和度及孔隙度的复杂关系, 它具体表述为饱含水泥质砂岩电导率方程和含油泥质砂岩电导率方程

$$C_o = \frac{1}{F'}(C_w + BQ_v) \quad (1)$$

$$C_t = \frac{S_w^{n'}}{F'}(C_w + B \frac{Q_v}{S_w}) \quad (2)$$

类似纯砂岩地层, $F' = \frac{a}{\Phi^{m'}}$

式中 C_o 、 C_t 、 C_w 为含油岩石、饱和溶液、饱含水岩石电导率; B 为平衡阳离子的电化学当量电导; Q_v 为阳离子交换量; S_w 为含水饱和度; F' 为泥质砂岩的地层电阻率因数; n' 、 m' 为泥质砂岩的饱和度指数、胶结指数; Φ 为储层孔隙度; a 为常数。

在这个饱和度模型中, B 是极其重要的一个参数, 它体现了该模型对粘土附加电导的校正, 是溶液电导率和温度的函数, Waxman 和 Smits 将其描述为

$$B = (1 - P e^{-\frac{C_w}{Y}}) \lambda_{\text{Na}}^{\infty} \quad (3)$$

式中 $\lambda_{\text{Na}}^{\infty}$ 为与温度有关的最大交换离子等效离子电导; P 和 Y 为与温度有关的常数; 其余参数同前。

2 B 参数的计算

在对 15 块泥质砂岩岩芯样品 4 种温度 8 种矿化度条件下的实验数据进行分析处理的基础上, 得到了 W-S 模型中 B 参数随溶液电导率 C_w 和温度 T 的变化关系, 由此, 就可以计算地层条件下的 B 参数, 进行储层饱和度的定量计算。

2.1 B 与 C_w 的关系

图 1 是根据上述实验研究得到的不同温度下

* Waxman M H, Smits L J M. Electrical conductivities in Oil Bearing Shaly Sands. SPE 1863-A. 1968. 107~122

收稿日期: 1999-04-30

的阳离子当量电导 B 值随溶液电导率 C_w 的变化关系图, 该图显示, 随溶液电导率的增大, B 值增大。虽然不同温度下 B 的大小不同, 但其随矿化度的变化趋势是相似的, 类似于 Waxman 和 Smits 对 B 参数的描述, 按指数规律变化, 即

$$B = (1 - P e^{-\frac{C_w}{\gamma}}) \lambda_{\text{Na}}^c = B_{\text{max}} - W_A e^{-\frac{C_w}{\gamma}} \quad (4)$$

式中 B_{max} 是最大的阳离子当量电导; $W_A = P \lambda_{\text{Na}}^c = P B_{\text{max}}$; γ 是常数。这 3 个参数都是温度的函数, 随着温度的变化而变化。

2.2 B 与 T 的关系

通过对图 1 中 4 种温度下的 B 参数与 C_w 进行拟合, 可以得到 4 组参数 B_{max} , W_A , γ 。图 2~ 4 展示了 3 个参数随温度的变化规律。由此我们利用拟合的 3 个参数与温度建立经验关系式(5)~ (7)。

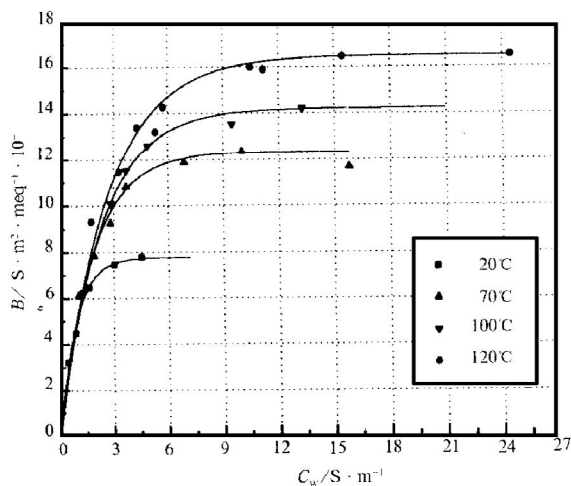


图 1 参数 B 与溶液电导率 C_w 的关系图

Fig. 1 Relationship between parameter B and solution conductivity C_w

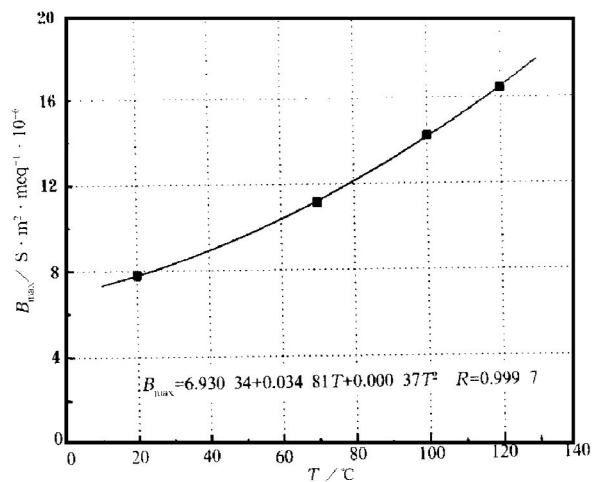


图 2 参数 B_{max} 与温度 T 的关系图

Fig. 2 Relationship between parameter B_{max} and temperature T

$$B_{\text{max}} = 6.93034 + 0.03481T + 0.00037T^2 \quad (5)$$

$$W_A = 7.08127 + 0.02788T + 0.00047T^2 \quad (6)$$

$$\gamma = 0.86738 + 0.00177T + 0.00013T^2 \quad (7)$$

W-S 模型的 B 参数不仅是溶液电导率函数, 而且也是温度的函数, 关系式(4)~ (7)很好地描述了这种函数关系。因此, 我们可以通过实际地层水电阻率及其温度较为准确的计算出 W-S 模型的 B 值, 客观地计算泥质砂岩储层含油饱和度, 进而评价泥质砂岩储层的含油性。

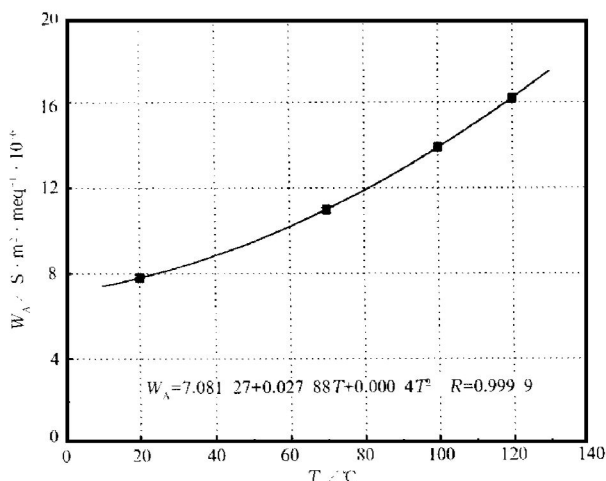


图 3 W_A 与温度 T 的关系图

Fig. 3 Relationship between W_A and temperature T

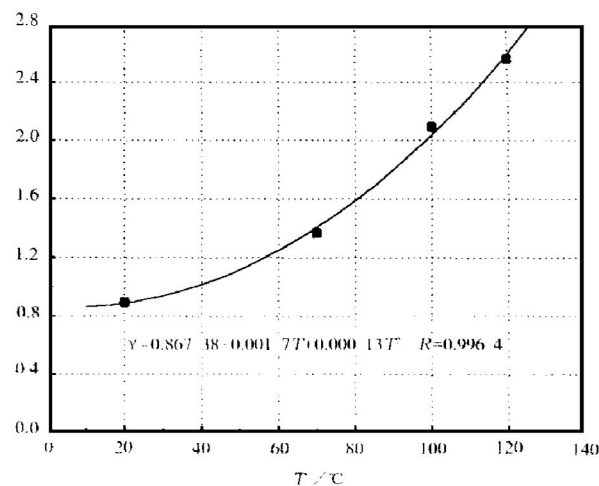


图 4 γ 与温度 T 的关系图

Fig. 4 Relationship between γ and temperature T

3 参数的选取

3.1 m'

Waxman 和 Smits 认为, 泥质砂岩 $C_o \sim C_w$ 关系曲线是一指数函数形式, 在其直线段部分具有和纯砂岩相似的阿尔奇公式特性, 即 $F' = a \Phi^{m'}$ 。因此, m' 和 a 的求取可以通过 F' 和 Φ 的关系曲线得到。

通过对实验数据的处理与分析得到了饱含水

岩石电导率与溶液电导率关系曲线直线段的斜率 I/F' , 因此, 可以做出 $F'-\Phi$ 关系图及其 $F'-\Phi$ 关系曲线, 从而得到 m' 和 a 。

研究发现 m' 指数相当于纯砂岩的胶结指数, 是岩石本身固有的特性, 它不随外界条件的变化而改变, 只随着岩石岩性的不同而变化, 岩性细, m' 指数小, 岩性粗, m' 指数大。在本次研究的岩样岩性变化范围内, a 值的变化区间为 1.003~1.088, 取值为 1; m' 指数的变化范围大致为 2~2.3。因此, 在实际应用过程中, 应该根据储层岩性粗细的变化适当调整 m' 指数的大小。

3.2 n'

由电阻增大率定义及 W-S 模型关于岩石电阻率的描述可以得到下述关系式

$$I = \frac{C_0}{C_t} = S_w^{-n'} \left(\frac{C_w + BQ_v}{C_w + BQ_v/S_w} \right)$$

式中 I 为实验室测量的泥质砂岩电阻增大率, 为了简化 I 与 S_w 的这种关系, 将 I 简单的转换为不受粘土附加电导影响的电阻增大率 I' , 即

$$I' = \frac{I(C_w + BQ_v/S_w)}{(C_w + BQ_v)}$$

于是 I 与 S_w 的复杂关系就转化为了 I' 与 S_w 的简单关系, 即 $I' = S_w^{-n'}$, 因此 n' 的求取可以通过 I' 与 S_w 的关系曲线得到。

通过对 90 块岩样的实际测量数据进行校正处理及拟合, 得到饱和度指数 n' (表 1)。由表 1 知, 随着岩性的变化, n' 指数也不同, 岩性细, n' 指数小, 岩性粗, n' 指数大。在实验岩芯的岩性变化范围内, n' 指数的变化范围大致为 1.9~2.3。因此, 同选取 m' 指数一样, 在应用过程中, 也应该根据储层岩性粗细的变化适当调整 n' 指数的大小。

表 1 不同层位饱和度指数 n' 随岩性变化数据表

Table 1 Data of saturation indices of different horizons varying with lithology

层位	岩性	n' 指数
明化镇-馆陶组	细砂岩	1.905
	中-粗砂岩	2.006
东营组一段	粉-细砂岩	1.898
	中砂岩	2.089
东营组二段	中-细砂岩	1.955
	粗砂岩	2.305
东营组三段	细砂岩	1.934
	中-粗砂岩	2.307

3.3 Q_v 与 R_w

阳离子交换量 (Q_v) 及地层水电阻率 (R_w) 是

W-S 饱和度评价模型的基本参数, 也是影响 W-S 模型应用效果的重要参数。我们采用两种途径来计算阳离子交换量: 一是通过对极化率和自然电位曲线的预处理逐层获取 Q_v ; 二是由常规测井资料提取地层阳离子交换量 Q_v 。地层水电阻率采用 3 种方法来选取: 一是通过对极化率和自然电位曲线的预处理获取地层水矿化度 SC_w , 然后换算为电阻率 R_w ; 二是水分析法确定 R_w ; 三是利用正自然电位确定 R_w 。

3.3.1 激发极化电位测井资料法

控制电化学(自然电位和激发极化电位等)测井的地层参数主要是地层水离子浓度(矿化度)和离子类型, 对于泥质砂岩还有粘土形成的阳离子交换量^[2]。因此, 理论上用如下的函数形式来表达自然电位和激发极化电位

$$SP = f(Q_v, SC_w)$$

$$U_{IP} = f(Q_v, SC_w)$$

每一个函数表达式中都有许多待定常数。本次研究中, 以理论为依据, 以本地区的实验数据为基础, 利用优化方法确定两个表达式中的每一个待定常数, 由此建立了适合本地区的极化率及自然电位理论解释模型*。

在建立了极化率及自然电位理论解释模型后, 通过对极化率及自然电位曲线的预处理, 利用优化方法逐层提取地层的阳离子交换量 Q_v 和地层水矿化度 SC_w , 然后再将矿化度转化为地层水电阻率 R_w 。

3.3.2 常规测井资料法

实验数据表明, 本地区上、下第三系储层的粘土矿物成分有很大差异, 相应其阳离子交换能力也不尽相同, 由此形成了常规测井资料响应特征的不同。因此, 通过研究分析阳离子交换量与常规测井资料间的关系, 分别建立了利用常规测井资料求解阳离子交换量的如下经验关系式

$$\text{上第三系: } Q_v = 10^{0.0263 - 4.378025\Phi^2 + 0.7851105\Delta GR^2}$$

$$\text{下第三系: } Q_v = 10^{0.8002 - 12.62169\Phi + 24.56086\Phi^2 + 0.7329012\Delta GR^2}$$

式中 Q_v 为阳离子交换量; Φ 为孔隙度; ΔGR 为自然伽马相对值。

在没有极化率测井资料时, 我们可以利用上述两个经验关系式通过常规测井资料估算地层阳

* 程相志, 周灿灿, 周凤鸣, 等. 冀东油田老爷庙地区低矿化度复杂油藏测井定量分析方法研究, 1999: 37~42

子交换量 Q_v 。由于分析样品的局限性(大部分样品为中-细砂岩),所以经验关系式的应用也受一定条件的制约,即在中-细岩性储层变化范围内,这种方法计算的 Q_v 具有相当高的精度,而对于泥岩和砂砾岩计算的 Q_v 则有一定的误差。

3.3.3 水分析法及正自然电位曲线法

对于地层水有规律变化的地区,通过整理分析水分析资料,可以确定纵向不同层段的地层水电阻率;对于存在淡水水淹、地层水变化为非常规的地区,利用常规测井曲线中唯一反映地层水电阻率的自然电位曲线,可以较为准确的估算不同层段的地层水电阻率。

4 应用效果

W-S 模型中 B, Q_v, m', n', R_w 等参数确定以后,就可将 W-S 模型应用于常规的数字处理。目前,利用该饱和度模型在本地区已成功地处理解释了 50 余井次,应用效果良好。以下通过两口井的数字处理成果来说明 W-S 模型的应用效果情况。

图 5 给出了 X 井 W-S 模型计算结果。该井的 A、B 两层均为泥质砂岩储层,岩芯分析以及处

理结果均显示这两层的泥质含量均在 14% 以上。对 A、B 两层的投产证实,该两层顶部为油层、底部为水层,顶部电阻率 9~10 $\Omega\cdot m$,电阻增大率为 1.2。该层段的相渗分析资料表明,纯油层含油饱和度应大于 53%,水层含油饱和度小于 30%。关于 A 层顶部, W-S 模型计算含油饱和度为 60%,在纯油层范围,底部的含油饱和度在 30% 以下,为明显水层,这与相渗分析资料以及投产资料相符合; B 层与 A 层具有类似的情况。依据 W-S 模型的饱和度以及其它相关资料,将 A 层油水界面确定在 2 822.8 m, B 层油水界面确定在 2 844.8 m(表 2)。

表 2 W-S 模型计算结果与实际资料对比表

Table 2 Comparison between W-S model calculated

results and actual data							
井号	层号	孔隙度 / %	泥质含量 / %	含油饱和度 / %	解释结论	试油或投产结论	备注
X	A 顶	22.0	18.4	60.0	油层	油水同层	两层合投,射孔井段过长
	A 底	21.0	14.0~18.0	20.0~30.0	水层		
	B 顶	21.8	17.0~26.0	62.0	油层		
	B 底	20.0	14.0~40.0	13.0~42.0	水层		
Y	A	19.0	9.5~11.0	62.0	油层	油层	单层试油
	B	19.5	25.0~47.0	68.0	油层		

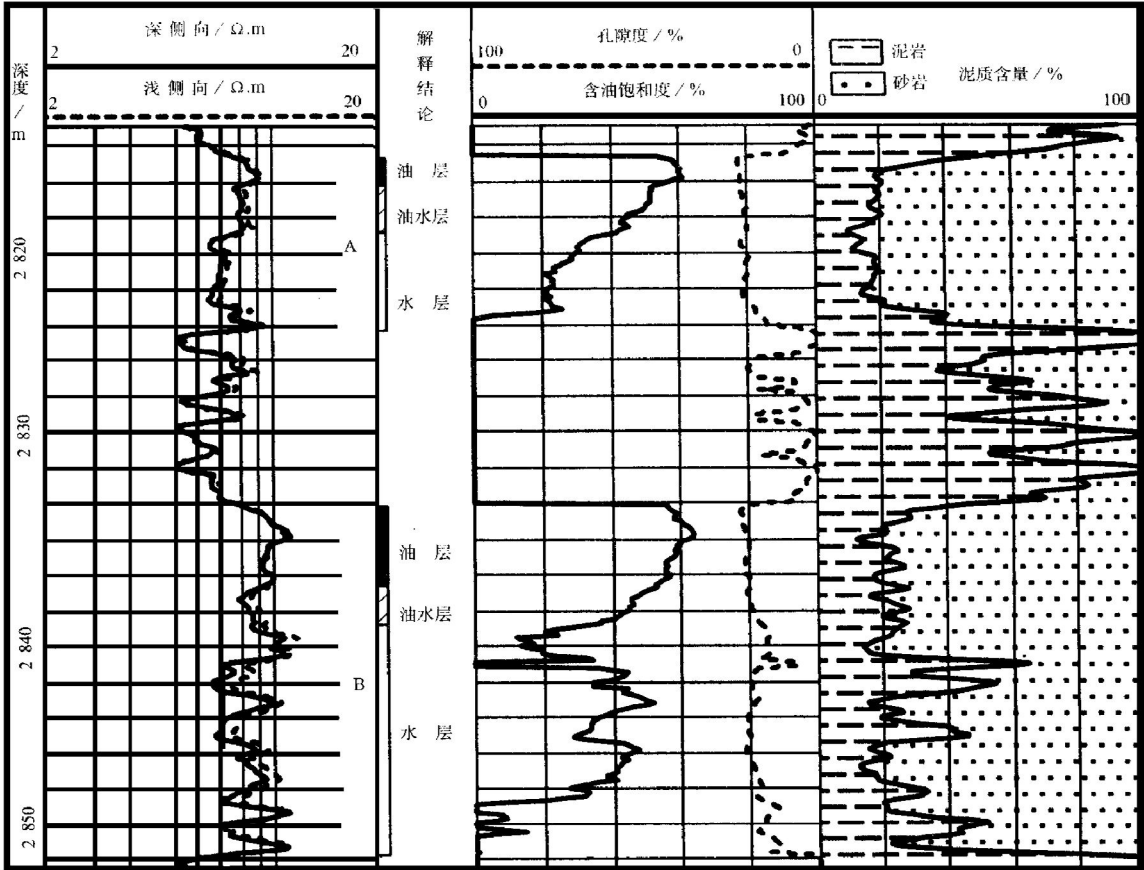


图 5 W-S 模型在 X 井的应用

Fig. 5 Application of W-S model to X- Well

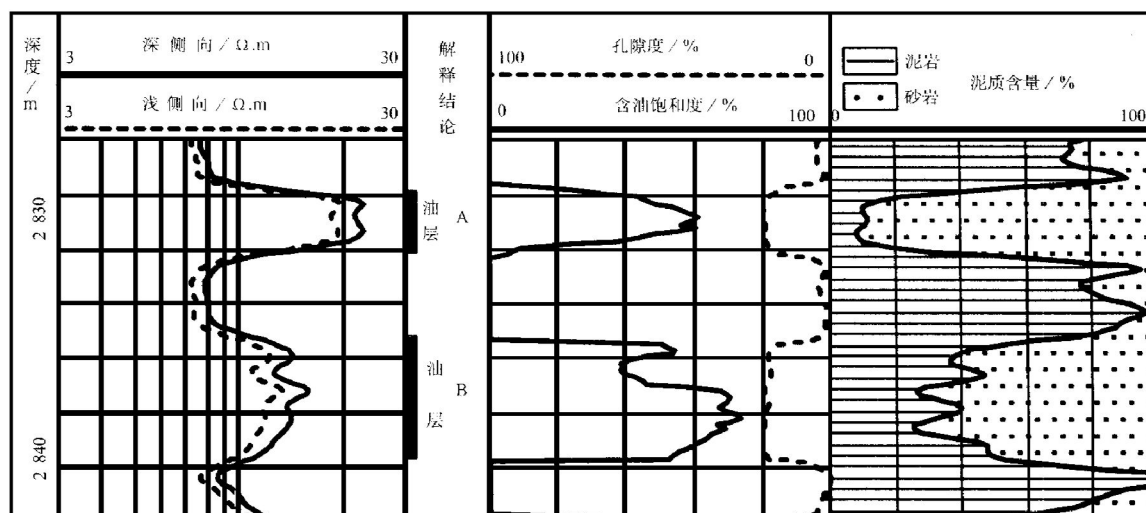


图6 W-S模型在Y井的应用

Fig. 6 Application of W-S model to Y-Well

图6为Y井W-S模型计算结果图。图中的A, B两层均为泥质砂岩储层, B层岩性更细。处理结果显示该层泥质成分较重, 泥质含量在25%以上, 其电阻率为15 Ω·m, 比顶部的A层(油层, 泥质含量为10%左右)低7 Ω·m, 为明显的低电阻率储层。W-S模型处理结果显示: B层计算含油饱和度为68%, 比A层高6%, 试油证实B层为油层, 日产油67 m³, 计算结果与试油结论比较吻合(表2)。

X, Y两口井的对比分析表明, 对于泥质砂岩储层, W-S模型计算的饱和度即与实际的岩芯资料相匹配, 又与实际的试油或投产资料相吻合, 比较

符合客观实际。因此, 在实际的生产中, 将W-S模型投入到泥质砂岩储层的常规测井数字处理工作, 能够提供可靠的储层饱和度, 进行烃与非烃储层的判断。

参 考 文 献

- 1 曾文冲. 油气藏储集层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991. 100~127
- 2 姜恩承, 王敬农, 孙宝佃, 等. 电化学测井理论研究及其应用的进展(上、下)[J]. 测井技术, 1999, 23(4~5): 258~263, 327~333

APPLICATION OF W-S MODEL TO OIL ASSESSMENT IN ARGILLACEOUS SANDSTONE RESERVOIRS

Cheng Xiangzhi Zhou Fengming Peng Yinhui Zhao Lingfeng

(Institute of Exploration and Development, Jidong Oilfield Company of China Petroleum, Tangshan, Hebei)

Abstract: W-S model could be used to calculate the oil saturation of argillaceous sand stone reservoir. The equation is as follows:

$$C_o = \frac{1}{F'} (C_w + BQ_v); C_t = \frac{S_w^{n'}}{F'} (C_w + B \frac{Q_v}{S_w})$$

B is an important parameter and could be calculated according to the relation between solution conductivity C_w and temperature T ; m' and n' are parameters that vary with lithology; Q_v and R_w are basic parameters of W-S model, and could be calculated by using excited polarizing potential log data, conventional log data, formation water analysis and positive spontaneous potential curve respectively. Then use W-S model to process these parameters and the oil saturation of argillaceous sandstone reservoir could be calculated. The results are proved to be reliable and could be used to distinguish between hydrocarbon reservoir and nonhydrocarbon reservoir.

Key Words: W-S model; parameter; saturation; oil possibilities; reservoir; application