

Waxman-Smits 模型关键参数修正及解释应用

——以苏北盆地高邮凹陷沙花瓦地区为例

蒋阿明, 李秋政

(中国石化 江苏油田分公司 勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 泥质粉砂岩储层因其所含黏土矿物的附加导电性而使得含油储层电阻率明显降低, 给储层含油饱和度求取带来很大的不确定性。结合苏北盆地高邮凹陷沙花瓦地区古新统阜宁组三段储层实际资料, 通过大量的实验数据对 Waxman-Smits 模型中的阳离子当量电导值、阳离子交换浓度等关键参数进行了修正, 并利用修正后建立的含油饱和度解释模型开展了精细的储层定量评价, 其含油饱和度计算结果与常规阿尔奇公式相比, 解释精度有了较大幅度的提高, 很好地解决了该区泥质粉砂岩油层识别的难题, 可为老油田精细挖潜提供借鉴。

关键词: 泥质粉砂岩; 泥质校正; Waxman-Smits 模型; 含油饱和度; 油层识别; 苏北盆地

中图分类号: TE19

文献标识码: A

Correction and interpretation application of key parameters of Waxman-Smits model:

A case study of SHW area in North Jiangsu Basin

JIANG Aming, LI Qiuzheng

(Exploration and Production Research Institute, SINOPEC Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Due to the additional conductivity of clay minerals, oil reservoir resistivity decreases obviously in argillaceous siltstone reservoirs, which gives a great uncertainty for the calculation of oil saturation. A combination of the actual data of the 3rd member of Funing Formation in the SHW area of North Jiangsu Basin allowed some key factors of the Waxman-Smits model, such as the equivalent conductivity (B) and the exchange concentration (Q_v) of cations, to be corrected with a large amount of experimental data. A detailed quantitative evaluation of reservoirs was carried out with the corrected oil saturation interpretation model. Compared with the conventional Archie formula, the accuracy of oil saturation calculation was greatly improved, which gave a good solution to the problem of the identification of argillaceous siltstone reservoirs, and provided a reference for the determination of old field potential.

Key words: argillaceous siltstone; shale correction; Waxman-Smits model; oil saturation; reservoir identification; North Jiangsu Basin

对于纯砂岩来说, 传统的阿尔奇公式是测井资料求取含油或含水饱和度的有效手段^[1-5], 其定量评价效果已在准确判断油气层和合理计算储量等方面得到广泛体现。但泥质砂岩因其所含黏土矿物的附加导电性, 其含油饱和度测井评价带有很大的不确定性^[6], 因此, 一直以来也是石油工程师关注的焦点。前人对于泥质砂岩饱和度的解释提出了包含有泥质附加导电的多种解释模型^[7-13], Waxman-Smits 模型(也即 W-S 模型)就是其中的一种^[14]。根据沙埝—花庄—瓦庄(简称沙花瓦)地区阜宁组三段(E_{1f_3})储层实际资料, 利用现场实验数

据对 W-S 模型中关键参数进行了修正, 较好地解决了该区含油饱和度的解释难点, 并在油田勘探开发中取得了明显的效果。

1 研究区地质特征

高邮凹陷是苏北盆地最富油气的凹陷, 北斜坡是该凹陷 3 个勘探开发油气区带之一^[15-16]; 沙花瓦地区油藏富集群位于北斜坡中东部, 与西部韦码地区油藏富集群相遥望。沙花瓦地区含油层系以古近系阜宁组二段、一段($E_{1f_{2+1}}$)和阜宁组三段(E_{1f_3})为主; 韦码地区 E_{1f_3} 无储层和油层^[17]。

收稿日期: 2017-12-05; 修订日期: 2018-03-23。

作者简介: 蒋阿明(1967—), 男, 高级工程师, 从事勘探地质及储量综合研究。E-mail: jiangam.jsyt@sinopec.com。

基金项目: 江苏油田科研项目“沙花瓦地区阜宁组储层四性关系及油层精细识别研究”(JS14009)资助。

苏北盆地 $E_{1f_{2+1}}$ 油层岩性主要是较纯净的细砂岩,利用电阻增大率法容易识别出油层、油水同层和水层,常规阿尔奇公式也能准确获得含油饱和度参数。高邮凹陷北斜坡 E_{1f_3} 岩相属于苏北盆地大型三角洲前缘亚相的残留部分^[18],储油岩石以粉砂岩为主,次为含泥质粉砂岩和泥质粉砂岩;油层深感应电阻率在 $3 \sim 12 \Omega \cdot m$ 之间,电阻率分布跨度较大,尤其出现了许多 $3 \Omega \cdot m$ 左右的低阻油层,与该区非典型的水层电阻率($3 \sim 5 \Omega \cdot m$)比较相似,利用以往的电阻增大率法解释油层和含油饱和度难度极大。

根据该地区 E_{1f_3} 岩心 238 块砂岩样品的 X 衍射化验数据显示,砂岩黏土含量在 $0.4\% \sim 40.1\%$ 之间,平均值为 11%,黏土含量普遍较高。通过黏土附加导电性实验分析(图 1)可以看出:当黏土含量为 25%、阳离子交换浓度(Q_v)为 1.68 meq/cm^3 、含水饱和度(S_w) (包含束缚水饱和度)在 $40\% \sim 60\%$ 之间时,电阻增大率(I)小于 3,表现出油层与水层之间差异不明显;而当黏土含量为 10%、 Q_v 为 0.51 meq/cm^3 、 S_w 为 40% 时, $I = 4$, 表现为常规油层电阻率。由此可见,储层黏土含量的增加(即附加导电性的增加)会导致含油饱和度为 60% 的油层电阻增大率由原来的 4 降到 3,即油层深感应电阻率降低了 25%,明显降低了利用电阻增大率法识别油层的可信度。由此可见,沙花瓦地区储层中由于含有较高的泥质含量,造成了低阻油层的大量存在。这点从沙花瓦地区取心岩石的含油级别与黏土含量之间统计关系得到印证(图 2)。该区含油性较好的储层黏土含量一般小于 10%,但至少要有 20% 的油层,其黏土含量介于 $10\% \sim 20\%$ 之间,展

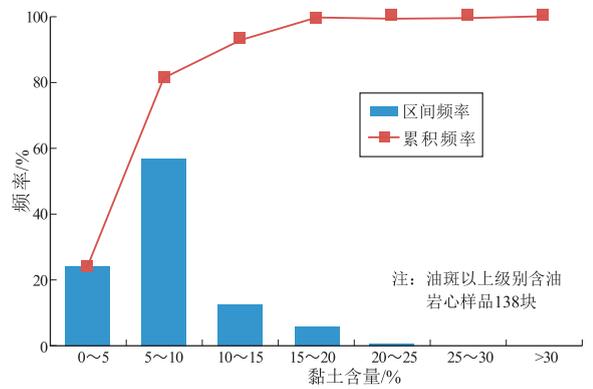


图 2 苏北盆地高邮凹陷沙花瓦地区 E_{1f_3} 含油储层黏土含量频率

Fig.2 Frequency of clay content in E_{1f_3} oil reservoir, SHW area, North Jiangsu Basin

示出这类含泥及泥质粉砂岩具有良好的油气发现前景。

2 W-S 模型关键参数修正

2.1 模型描述

W-S 模型是基于泥质砂岩的阳离子交换作用而建立的电导率解释模型。其基本原理是:在含水为 100% 的储集层岩石中,电导率是由黏土阳离子交换分量和自由电解质溶液并联电导组成,同时采用相同的集合电导率常数,来表征自由电解质及黏土阳离子交换电导对砂岩电导率的贡献大小。因此,泥质砂岩导电模型可以用如下公式表述^[19]:

$$C_o = \frac{1}{F^*} (C_w + B Q_v) \quad (1)$$

$$C_i = \frac{1}{F^* S_w^{-n^*}} (C_w + B Q_v / S_w) \quad (2)$$

式中: C_i 、 C_o 、 C_w 分别是含油储层岩石、100% 含水岩石及地层水的电导率; B 是交换阳离子的当量电导率,也可以用溶液电导率和地层温度的函数形式表示; Q_v 是泥质砂岩单位孔隙体积中可交换阳离子的浓度,其主要受黏土类型及其含量和储层岩石自身的物理性质影响; F^* 、 n^* 分别是泥质砂岩的地层因素、饱和度指数; S_w 是储层岩石的含水饱和度。

为了更好的与阿尔奇公式相对应,公式(1)等式两边分别乘以 R_w 后求倒数、公式(2)等式两边分别乘以 R_o 后求倒数,泥质砂岩的 2 个电导率公式可以写成阿尔奇公式变换形式,即由公式(1)导出公式(3),公式(2)导出公式(4):

$$F = \frac{R_o}{R_w} = a \Phi^{-m^*} \left(\frac{1}{1 + R_w B Q_v} \right) = F^* \left(\frac{1}{1 + R_w B Q_v} \right) \quad (3)$$

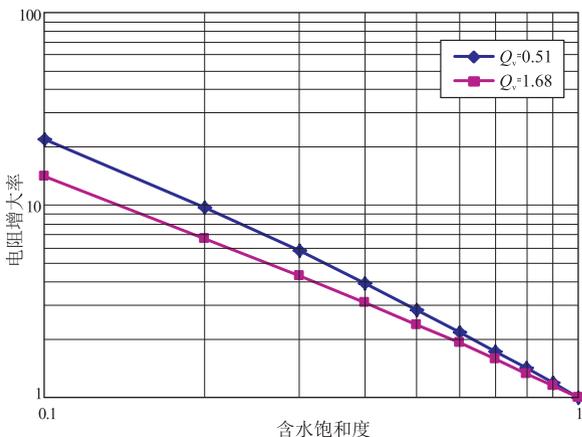


图 1 苏北盆地高邮凹陷沙 68 区块 E_{1f_3} 油藏电阻增大率与含水饱和度的关系

Fig.1 Relationship between I and S_w in E_{1f_3} reservoir of Sha 68 block, Northern Jiangsu Basin

$$I = \frac{R_l}{R_o} = b S_w^{-n^*} \left(\frac{1 + R_w B Q_v}{R_w B Q_v} \right) = I^* \left(\frac{1 + R_w B Q_v}{1 + \frac{R_w B Q_v}{S_w}} \right) \quad (4)$$

式中： R_l 、 R_o 、 R_w 分别为含油储层岩石、100% 含水岩石及地层水的电阻率，分别为 C_l 、 C_o 、 C_w 的倒数； Φ 为储层孔隙度； F 、 I 分别为纯砂岩的地层因素、电阻增大率； I^* 、 m^* 分别为泥质砂岩的电阻增大率和胶结指数； a 、 b 为与岩性有关的系数。在泥质砂岩电阻率性质分析中，一般把上述 4 个带 * 号的变量和参数等同于阿尔奇公式中相应变量和参数。

于是，可以得到 W-S 模型的常用表达式为：

$$S_w = \sqrt[n^*]{\frac{ab R_w}{\Phi^{m^*} \times R_l}} = \sqrt[n^*]{\frac{R_w}{\Phi^{m^*} \times R_l \left(1 + \frac{R_w B Q_v}{S_w} \right)}} \quad (5)$$

2.2 模型中关键参数的修正

2.2.1 阳离子当量电导值 B 的确定

阳离子的电化学当量电导值 B 是溶液电导率和温度的函数，也可以表述为地层温度和地层水矿化度具有极值的增量函数。在相同的地层溶液矿化度条件下，若地层温度越高，则其平衡离子当量电导值就越大，也就表明黏土的附加电导分量越大。同样，当地层温度一致时，其阳离子当量电导率随地层溶液矿化度增加也呈现增大趋势，并逐渐接近某一极限值。并且，当地层水矿化度达到约等于 60 g/L 以后，基本在所有的温度条件下，其平衡离子当量电导值也达到给定温度下的极限值；地层温度越高，其对应的平衡离子当量电导极限值也就越大。这也说明，在含高矿化度地层水的泥质储层中，黏土附加电导分量占有相当高的比例，因而不容忽视。 B 值可以根据其与溶液电导率以及温度的经验公式计算求取，公式如下^[20]：

$$B = (1 - p e^{-\frac{C_s}{\gamma}}) \lambda_{Na}^e = B_{max} - W_A e^{-\frac{C_s}{\gamma}} \quad (6)$$

式中： λ_{Na}^e 为与温度有关的最大交换离子等效离子电导； C_s 为溶液电导率； p 、 W_A 、 γ 为与温度（即 T ，单位为 $^{\circ}C$ ）有关的系数。 B_{max} 、 W_A 、 γ 与温度的关系可用以下经验公式表达。

$$\left\{ \begin{aligned} B_{max} &= 6.930\ 34 + 0.034\ 81T + 0.000\ 37T^2 \\ W_A &= 7.081\ 27 + 0.027\ 88T + 0.00\ 04T^2 \\ \gamma &= 0.867\ 38 + 0.00\ 17T + 0.000\ 13T^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} B_{max} &= 4.510\ 09 + 0.101\ 8T + 2.853\ 68 \times 10^{-5}T^2 \\ W_A &= 4.166\ 51 + 0.097\ 05T + 6.573\ 58 \times 10^{-5}T^2 \\ \gamma &= 1.067\ 44 + 0.016\ 93T + 4.546\ 81 \times 10^{-5}T^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

因此，根据沙花瓦地区 E_1f_3 油藏实际地层温度，采用上述经验公式即可计算求取 B 值。根据测井系列的不同，分 2 种情况：当电阻率取值于侧向电阻率时，使用公式 (7) 获取的参数计算 B 值；当电阻率取值于感应电导率时，使用公式 (8) 获得的参数计算 B 值。

2.2.2 阳离子交换浓度 Q_v 值的确定

阳离子交换浓度 Q_v 是依据其与黏土矿物的阳离子交换容量 (CEC) 的关系式计算而得。 CEC 是指 pH 值等于 7 时黏土矿物所能交换下来的阳离子总量；其中， Q_v 与 CEC 之间的换算关系可以用如下公式表述：

$$Q_v = CEC \frac{(1 - \Phi) \rho_{ma}}{100\Phi} \quad (9)$$

式中： ρ_{ma} 为岩石颗粒密度； CEC 为阳离子交换容量。

当储层的黏土矿物类型稳定不变时，阳离子交换量常常与储层的黏土含量有关，因此可以根据 CEC 实验数据，建立阳离子交换容量与黏土矿物含量 (V_{cl}) 之间的统计模型。在没有 CEC 实验测量的情况下，可以通过 X 衍射实验分析得到的黏土矿物成分，利用公式 (9) 计算出 Q_v 最大值和最小值，再进行加权求取平均 Q_v 值。

选取本区 16 块油迹或油斑泥质粉砂、细砂岩样品，通过盐基分量测量方法测得了储层的实际 CEC 值。测量结果显示， CEC 值在 $(2.67 \sim 18.63) \times 10^{-2}$ mmol/g 之间，其中小于 4×10^{-2} mmol/g 仅有一块，其对应深度样品的 X 衍射黏土含量为 3.8%，而 CEC 最大值对应的黏土含量为 31.5% (图 3a)。因样品较少，且由于储层具有较强的非均质性，因此即使是同一个岩心柱子，也会使得用于分析 CEC 值与做衍射分析的样品位置不完全一致，从而造成二者相关性相对较小，但总体趋势表现为正相关。而经对比分析认为， CEC 实际测量值与泥质含量 (粒径小于 0.0156 mm) 相关性较好 (图 3b)。

根据 Q_v 与 CEC 关系式，并参照主要黏土类型的阳离子交换容量 [蒙皂石为 $(80 \sim 150) \times 10^{-2}$ mmol/g，伊利石为 $(10 \sim 40) \times 10^{-2}$ mmol/g，高岭石为 $(3 \sim 15) \times 10^{-2}$ mmol/g，绿泥石为 $(10 \sim 40) \times 10^{-2}$ mmol/g]，应用 X 衍射黏土含量分析资料计算出的 CEC 最大值和最小值，经与实际测量值比较可以发现，实测值基本处于计算值附近 (图 4)。因此，应用黏土含量计算 CEC 加权平均值可以获得相对准确的 CEC 值，由此计算获得的 Q_v 值与泥质含量

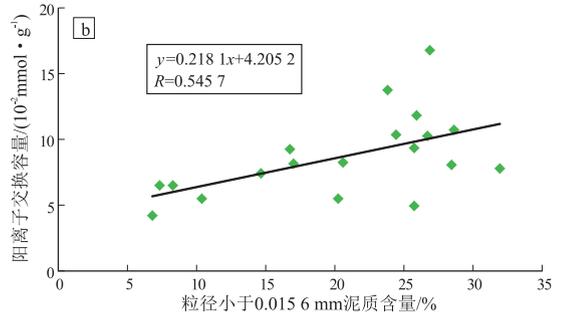
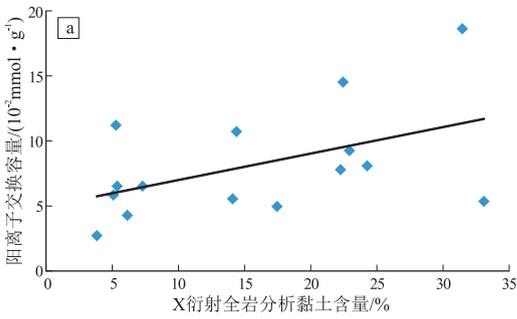


图3 苏北盆地高邮凹陷沙花瓦地区 CEC 实测值与黏土含量、泥质含量的关系

Fig.3 Relationship between measured values of CEC and clay or shale contents in SHW area, North Jiangsu Basin

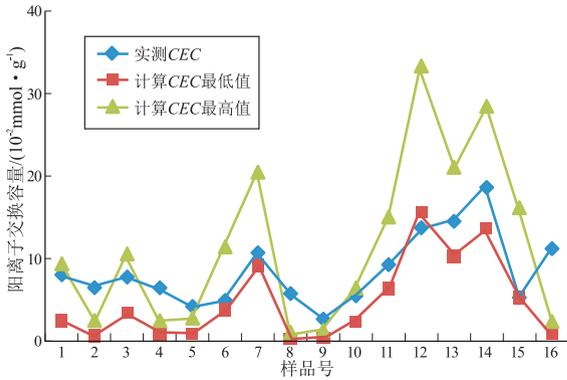


图4 苏北盆地高邮凹陷沙花瓦地区 CEC 实测值与计算值比较

Fig.4 Comparison between measured and calculated CEC values in SHW area, North Jiangsu Basin

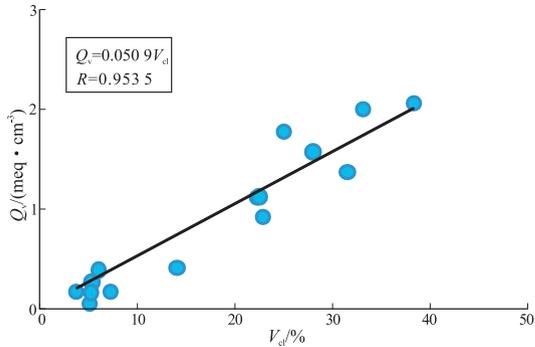


图5 苏北盆地高邮凹陷沙花瓦地区 黏土含量实测值与 Q_v 计算值的关系

Fig.5 Relationship between measured clay content and calculated Q_v in SHW area, North Jiangsu Basin

相关性也较高。通过以上研究分析认为,在无岩心直接测量获得黏土附加导电能力的时候,泥质含量或黏土含量可以视为估算 Q_v 的依据,也就是说可以通过建立 Q_v 与黏土矿物含量之间的关系图版求取 Q_v 值(图5)。实测的 Q_v 值范围在(0.51~1.68) meq/cm³ 之间,泥质(含泥)粉砂岩 Q_v 大于 1 meq/cm³,粉砂岩在 1 meq/cm³ 以下。

2.2.3 m* 和 n* 的确定

按照泥质砂岩导电理论模型,m* 和 n* 值与黏

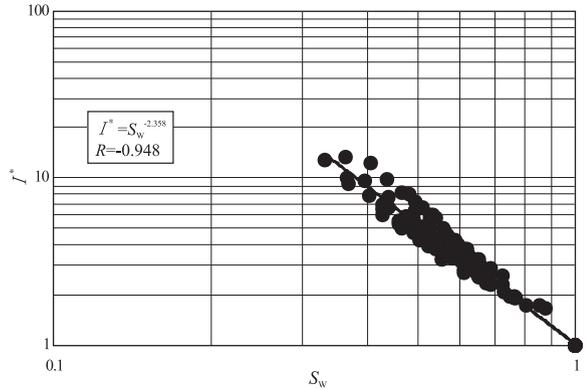


图6 苏北盆地高邮凹陷沙花瓦地区 E₁f₃ 油藏 I* 和 S_w 的关系

Fig.6 Relationship between I* and S_w of E₁f₃ reservoir in SHW area, North Jiangsu Basin

土附加电导无关(即与溶液矿化度及温度无关),而仅仅与储层岩石的孔隙结构特征有关。m* 值求取有 2 种方式:一是通过泥质砂岩样品 C₀-C_w 实验关系式中的直线段斜率 s (F = 1/s) 与对应的孔隙度数据求得;二是用本地区岩电实验得到的 a 强制为 1 时的胶结指数 m 值代替。n* 值是利用公式(4)对实验测定的电阻增大率 I 值经黏土附加导电校正,求取 I* 值,再根据 I* 值与含水饱和度(S_w)的拟合关系得到 n* 值。

根据沙花瓦地区 37 块粉砂岩样品岩电实验资料,m* 值采用所有样品 m 值的平均值为 1.707 3,因为每一块样品在测试的时候,a 值都是等于 1; n* 值为岩电实验得到的 n 值经过 Q_v 校正后,重新拟合取值为 2.358(图6)。

3 应用效果分析

利用本次实验修正的 W-S 模型,对沙花瓦地区 E₁f₃ 泥质砂岩储层进行了精细测井评价。以沙 68 和沙 18-1 断块评价为例,沙 68 井 E₁f₃ 油层电阻率 4.5~5 Ω·m,部分储层取心为泥质粉砂岩,分别利用常规阿尔奇公式与 W-S 模型进行含油饱

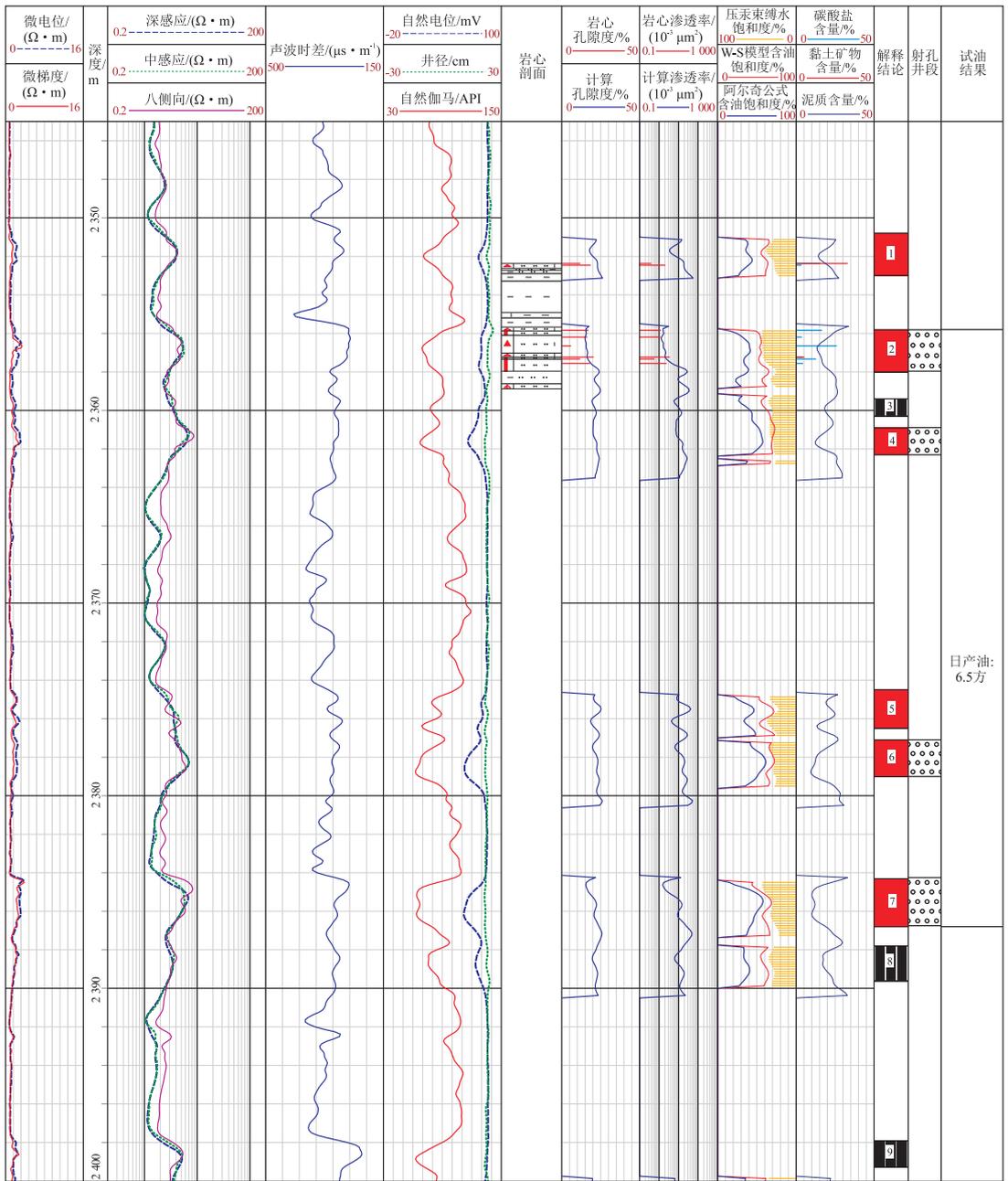


图 7 苏北盆地沙埕油田沙 68 井 E₁f₃“四性”关系

Fig.7 Relationship among “four properties” of E₁f₃ reservoir in well Sha68, SN Oil Field, North Jiangsu Basin

和度计算可以看出(图 7):W-S 解释模型在泥质含量高的层段计算含油饱和度明显提高,其中 2、4、6、7 号层平均含油饱和度增加 13%左右,与岩心压汞分析确定的含油饱和度大致相当,有效消除了泥质含量的影响,提高了含油饱和度解释精度。该井上述 4 个小层投产 24 个月累积生产原油 3 200 t,含水稳定在 2%左右。同时,通过对上述 2 个断块共 80 个试油层进行解释验证,仅 5 层与结论不符,解释符合率达到 94%,取得了明显的效果。

4 结论

(1)实验结果表明,沙花瓦地区中部带 E₁f₃ 储

层主要为泥质粉砂岩,泥质的附加导电性使得含油储层的电阻率降低明显,含油饱和度为 60%的储层,其泥质含量由 10%增加至 25%,油层电阻率降低 25%,影响了油水层的识别和储量评价的精度。

(2)利用实际实验数据对 W-S 模型中阳离子交换浓度等主要关键参数进行修正,建立了适用于泥质粉砂岩储层的解释模型,并经过实际应用,含油饱和度解释精度与常规阿尔奇公式相比效果明显。

参考文献:

[1] 罗娜.阿尔奇公式数值分析及其意义[J].石油学报,2007,28(1):111-114.

- LUO Na. Numerical analysis of Archie formulae and its meanings[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 111-114.
- [2] 邹良志. 阿尔奇公式中参数的影响因素分析[J]. 国外测井技术, 2013(4): 23-27.
- ZOU Liangzhi. Influencing factor analysis of the parameters in Archie equation[J]. World Well Logging Technology, 2013(4): 23-27.
- [3] 王勇, 章成广, 李进福, 等. 岩电参数影响因素研究[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(4): 75-77.
- WANG Yong, ZHANG Chengguang, LI Jingfu, et al. Study on influencing factors of lithological-electrical parameters[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(4): 75-77.
- [4] 殷艳玲. 岩电参数影响因素研究[J]. 测井技术, 2007, 31(6): 511-515.
- YIN Yanling. Study on influencing factors of lithological-electrical parameters[J]. Well Logging Technology, 2007, 31(6): 511-515.
- [5] 韩双, 潘保芝. 孔隙储层胶结指数 m 的确定方法及影响因素[J]. 油气地球物理, 2010, 8(1): 43-47.
- HAN Shuang, PAN Baozhi. Determination methods and influencing factors of the bond index m of the complex reservoir[J]. Petroleum Geophysics, 2010, 8(1): 43-47.
- [6] 廖明光, 唐洪, 苏崇华, 等. W 低阻油藏高不动水饱和度的成因及对低阻油层的影响[J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 353-357.
- LIAO Mingguang, TANG Hong, SU Chonghua, et al. Genesis of high immobile water saturation in the W low resistivity reservoirs and its influence on the low resistivity reservoir[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(4): 353-357.
- [7] 张先平, 陈海红, 张树林. 泥质砂岩油层含水饱和度解释模型探讨: 以南油田夏 52 块沙三中为例[J]. 断块油气田, 2005, 12(1): 34-37.
- ZHANG Xianpin, CHEN Haihong, ZHANG Shulin. Water saturation explanation model of hydrocarbon bearing shaly sands in the middle of the Third Shahejie formation of block Xia-52 in Linnan oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2005, 12(1): 34-37.
- [8] 张菲, 李秋政, 陈同飞, 等. SHW 地区阜三段砂岩储层变参数岩电研究[J]. 复杂油气藏, 2016, 4(3): 1-4.
- ZHANG Fei, LI Qiuzheng, CHEN Tongfei, et al. Study on electric petrophysical property of sandstone reservoir in SHW area by variable parameter[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2016, 4(3): 1-4.
- [9] 张明禄, 石玉江. 复杂孔隙结构砂岩储层岩电参数研究[J]. 测井技术, 2005, 29(5): 446-448.
- ZHANG Minglu, SHI Yujiang. On Archie's electrical parameters of sandstone reservoir with complicated pore structures[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(5): 446-448.
- [10] 李先鹏. 泥质地层中饱和度指数的确定[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(2): 83-85.
- LI Xianpeng. Determination of saturation exponent in shaly formation[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(2): 83-85.
- [11] 范宜仁, 邓少贵, 周灿灿. 低矿化度条件下的泥质砂岩阿尔奇参数研究[J]. 测井技术, 1997, 21(3): 200-204.
- FAN Yiren, DENG Shaogui, ZHOU Cancan. On the parameters of Archie formula for shaly sand with low salinity[J]. Well Logging Technology, 1997, 21(3): 200-204.
- [12] 贾自力, 陈文武, 房育金, 等. 低孔隙度低渗透率泥质砂岩储层中胶结指数 m 和饱和度指数 n 的计算和应用[J]. 测井技术, 2010, 34(2): 108-114.
- JIA Zili, CHEN Wenwu, FANG Yujin, et al. Computation of the formation cementation factor m and the saturation exponent n and its application to shaly sand formation with low porosity and low permeability[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(2): 108-114.
- [13] 沈爱新, 王黎, 陈守军. 油层低电阻率及阿尔奇公式中各参数的岩电实验研究[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(S1): 24-25.
- SHEN Aixin, WANG Li, CHEN Shoujun. Low reservoir resistivity and litho-electric experiment of each parameter in Archie equation[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(S1): 24-25.
- [14] 肖占山, 朱世和, 马静, 等. 岩石电性参数频散特性对阿尔奇公式及 Waxman-Smits 模型的影响[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(2): 248-251.
- XIAO Zhanshan, ZHU Shihe, MA Jing, et al. Influence of dispersion character of rock electric parameters on Archie's formulas and Waxman-Smits model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(2): 248-251.
- [15] 刘玉瑞. 苏北盆地高邮凹陷戴南组物源—坡折控扇研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 23-31.
- LIU Yurui. Sediment sources and slope belt controlling Fan systems in the Dainan Formation in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 23-31.
- [16] 束宁凯, 吴林, 汪新文, 等. 苏北盆地高邮凹陷基底先存断裂成因及其对新生断裂的控制[J]. 石油实验地质, 2017, 39(1): 8-14.
- SHU Ningkai, WU Lin, WANG Xinwen, et al. Origin of pre-existing basement faults and their controls on new fault formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(1): 8-14.
- [17] 郑元财, 吴燕. 高邮凹陷沙—花—瓦地区阜一段异常高压成因机理及分布特征[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(1): 1-5.
- ZHENG Yuancai, WU Yan. Forming mechanism and distribution characteristics of overpressure in the first member of Funing Formation in Sha-Hua-Wa area of Gaoyou Sag[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2016, 9(1): 1-5.
- [18] 刘玉瑞. 苏北后生—同生断陷盆地油气成藏规律研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 721-731.
- LIU Yurui. Petroleum accumulation rules in hystero-genetic reconstructive-syngenic rift basins, North Jiangsu Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6): 721-731.
- [19] 李山生, 黄质昌, 杜蕊, 等. Waxman-Smits 模型中参数 B 和 Q_v 计算方法研究[J]. 测井技术, 2012, 36(3): 244-249.
- LI Shansheng, HUANG Zhichang, DU Rui, et al. Study on computational methods of parameter B and Q_v in Waxman-Smits model[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(3): 244-249.
- [20] 程相志, 周凤鸣, 彭银辉, 等. W-S 模型在泥质砂岩储层含油性评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 313-317.
- CHENG Xiangzhi, ZHOU Fengming, PENG Yinhui, et al. Application of W-S model to oil assessment in argillaceous sandstone reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 313-317.