

doi: 10.11720/wtyht.2023.1481

张丽华,潘保芝,单刚义,等.基于复电阻率—核磁联测实验的三水模型新形式[J].物探与化探,2023,47(4):1018–1023. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1481>

Zhang L H, Pan B Z, Shan G Y, et al. A new three-water model based on the complex resistivity-NMR joint survey experiment[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(4): 1018–1023. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1481>

基于复电阻率—核磁联测实验的三水模型新形式

张丽华, 潘保芝, 单刚义, 阿茹罕, 张鹏济
(吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘 要: 三水模型在碎屑岩储集层解释中的应用比较广泛,但是三水模型参数较多,部分参数很难确定,且确定方法多数都是根据研究地区很多实验数据统计而定。为了解决三水模型应用中的多参数问题,本文提出基于复电阻率数据计算阳离子交换容量的新方法,在此基础上提出了三水模型的新形式,并且提出了核磁数据结合遗传最优化算法,确定三水模型的参数值。根据这些参数计算的岩样 100% 含水时的电阻率与实验测量得到的电阻率相对误差为 0.341 7。本文提出的方法简单易用,不需要依赖太多的实验数据,只要有复电阻率和核磁实验数据就可以应用。该方法可以为其他地区确定新三水模型参数提供参考和借鉴。

关键词: 三水模型; 三水模型参数; 复电阻率; 阳离子交换容量; 最优化算法; 核磁

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)04-1018-06

0 引言

地质上常按成因和岩性把储集层划分为三类碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层和其他岩类^[1]。世界上大约有 40% 的油气储量来自碎屑岩储集层,主要包括砂岩、粉砂岩、砂砾岩和砾岩。在测井剖面中常常是砂岩和泥岩交替,测井解释称之为砂泥岩剖面^[2]。对于砂泥岩剖面的解释,通常是应用阿尔奇公式,或是在此基础上发展起来的各种导电模型,主要有:①考虑泥质对岩石电阻率影响的 VSH 型的导电模型,最有代表性的是 Poupon 公式^[3]和 Simandoux 公式^[4];②考虑双电层对岩石电阻率影响的 QV 型的导电模型,代表性的有 Waxman-Smits 公式^[5]和双水模型^[6];③综合导电模型,如 CRMM 低阻导电模型^[7]、扩展的阿尔奇方程^[8]和三水模型^[9]。三水导电模型综合了前人对岩石导电机理的认识,既考虑了双水模型中自由水和束缚水电导率的区分,又考虑了微孔隙水电对岩石整体电导率的贡献,已经在多个地区应

用并取得了较好的效果^[10-14]。但是三水模型的参数较多,其确定方法多数都是根据地区相关资料统计而定,需要很多实验数据做基础,比如压汞、相渗、孔隙度、渗透率、核磁、阳离子交换容量以及粒度分析等^[15-16],这些实验既要花费很多时间,又需要大量的经费投入。为了找到一个尽量依赖较少的实验数据来确定三水模型参数的简单、易用的方法,本文基于复电阻率数据计算阳离子交换容量,提出了三水模型的新形式,然后利用核磁实验数据联合遗传优化算法确定模型中的参数。

1 三水模型和 3 种水的划分

1998 年,李舟波教授和莫修文博士^[9]运用传统的体积模型,认为岩石的导电路径是由自由孔隙水、微毛细孔隙水以及黏土束缚水 3 部分组成(图 1),而且微孔隙和黏土孔隙中的地层水是不能流动的,烃只能进入自由孔隙,这样,岩石的整体电阻率可以视为 3 种孔隙形成的电阻率相并联的结果,从而提出了三水模型。张丽华等^[16]对三水模型进行了改

收稿日期: 2022-09-21; 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42072323)

第一作者: 张丽华(1974-),女,博士,正高级工程师,现从事石油地球物理测井的处理与解释研究工作。Email: zhanglh@jlu.edu.cn

通讯作者: 单刚义(1970-),男,博士,高级工程师,现从事地震数据处理与解释研究工作。Email: shangangyi@jlu.edu.cn

进,提出了新三水模型。新三孔隙水导电模型公式按电导率可写成如下形式:

$$C_t = C_f + C_i + C_c = \frac{S_{wf}^n \varphi_f^{m_f} C_w}{a_f} + \frac{\varphi_i^{m_i} C_w}{a_i} + \frac{\varphi_c^{m_c} C_{wc}}{a_c}, \tag{1}$$

当岩样 100% 含水时,式(1)可写为:

$$C_0 = \frac{\varphi_f^{m_f} C_w}{a_f} + \frac{\varphi_i^{m_i} C_w}{a_i} + \frac{\varphi_c^{m_c} C_{wc}}{a_c}, \tag{2}$$

式中: C_t 为新三水模型中岩石的电导率; C_0 为饱和水岩样的电导率; C_w 为地层水的电导率; C_{wc} 为黏土水的电导率; S_{wf} 为自由流体的含水饱和度; φ 为孔隙度; m 为胶结指数; a 为岩性指数; 角标 f、i、c 分别代表自由流体孔隙、微孔隙以及黏土孔隙。

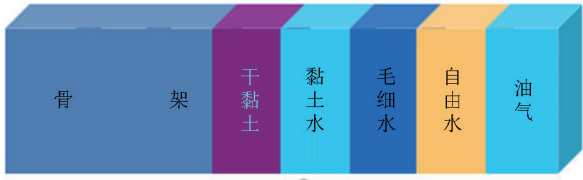


图 1 三水模型示意

Fig. 1 Schematic diagram of three water model

目前,核磁测井已经得到了广泛应用,多数地区的钻井都有核磁测井。核磁共振 T_2 谱是对多段回波串信号衰减过程曲线的数学反演^[17-18]。自旋回波串的衰减是测量样品中氢原子核的数量和分布,随着测试时间的增加,幅度逐渐减小,因而可使用衰减信息确定孔隙含量和孔径分布。核磁共振 T_2 谱中谱峰面积大的样品的孔隙度可能大,多峰特征代表岩样孔隙结构特征复杂多样化^[19-21],因此可以应用核磁的测量结果计算 3 种水的孔隙。在饱含水岩样的核磁共振 T_2 谱图上(图 2),以 $T_2 = 0.5\text{ ms}$ 和 $T_2 = 3\text{ ms}$ 为界,分为 3 部分,分别表示岩样中的黏土水、微毛细水和自由水部分。

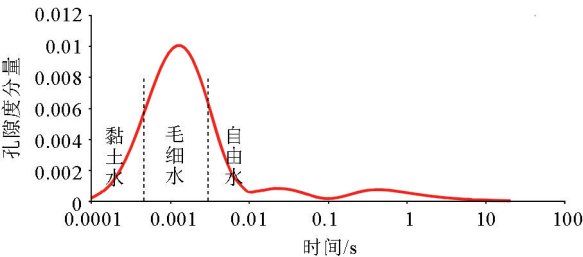


图 2 T_2 谱上 3 种水的分布示意

Fig. 2 Distribution of three kinds of water on T_2 spectrum

2 实验样品和步骤

本次实验的 9 块岩石样品取自 QHD 油田。QHD 油田位于渤海中部海域。渤海湾盆地自上而下发育第四系平原组、新近系明化镇组和馆陶组、古近系东营组和沙河街组地层。储层岩石成分以长石砂岩为主,中—细砂岩及粉砂岩,填隙物主要为泥质^[22-23]。本次实验所用仪器有岩石电阻率测量系统、分析天平和核磁测量系统。实验步骤如下:

- 1) 岩样烘干,测量几何参数与干重;配置相应地层水矿化度的模拟盐水。
- 2) 将岩样饱和地层水,进行核磁测试,获得饱水岩样的 T_2 谱;测量 20 Hz 和 1 kHz 频率下饱水岩样电阻率。
- 3) 离心过程中,测量 20 Hz 和 1 kHz 频率下不同饱和度下的岩样电阻率。
- 4) 离心结束,测量离心后的束缚水饱和状态的岩样 T_2 谱。

3 遗传优化算法求取模型参数

遗传优化算法是通过模拟自然进化过程搜索全局最优解的方法^[24-25]。具体步骤如下:

- 1) 种群初始化。用随机生成的方式来创建一个数量为 100~500 的种群,采用二进制将一个染色体(解)编码为基因型,然后将二进制基因型用十进制转化成十进制的表现型。
- 2) 适应度计算。直接将目标函数值作为个体的适应度。
- 3) 选择操作。根据个体适应度大小,将适应度高的个体从当前种群中选择出来。
- 4) 交叉运算。用一定的交配概率阈值来控制是否采取单点交叉,多点交叉等方式生成新的交叉个体,阈值一般是 0.4~0.99。
- 5) 变异运算。先随机产生变异点,再根据变异概率阈值将变异点的原有基因取反,阈值一般为 0.0001~0.1。
- 6) 终止判断。如果满足条件(迭代次数一般为 200~500)则终止算法,否则返回步骤 2。

图 3 给出了遗传算法基本流程。

如果采用 N 块岩样的实测电阻率 R_0 最优确定 m_f 、 a_f 、 m_i 、 a_i 、 m_c 、 a_c ,则是将 N 块岩样的数据

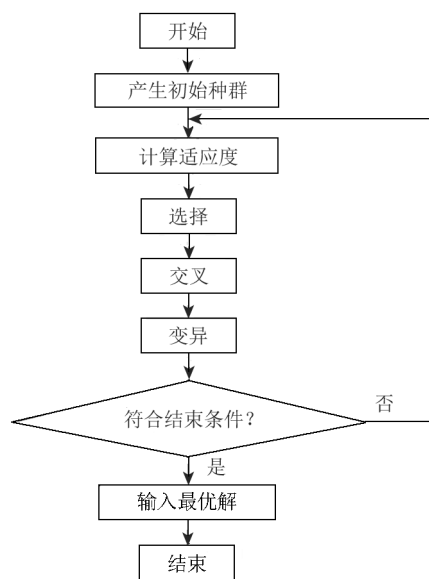


图 3 遗传算法基本流程

Fig. 3 Basic flow chart of genetic algorithm

代入式(1),得到如下方程组:

$$\frac{1}{R_{01}} = \frac{\varphi_{f1}^{m_f}}{a_f R_w} + \frac{\varphi_{i1}^{m_i}}{a_i R_w} + \frac{\varphi_{c1}^{m_c}}{a_c R_{wc}}, \tag{3}$$

$$\frac{1}{R_{02}} = \frac{\varphi_{f2}^{m_f}}{a_f R_w} + \frac{\varphi_{i2}^{m_i}}{a_i R_w} + \frac{\varphi_{c2}^{m_c}}{a_c R_{wc}}, \tag{4}$$

⋮

$$\frac{1}{R_{0N}} = \frac{\varphi_{fN}^{m_f}}{a_f R_w} + \frac{\varphi_{iN}^{m_i}}{a_i R_w} + \frac{\varphi_{cN}^{m_c}}{a_c R_{wc}}。 \tag{5}$$

式中: $R_{01} \sim R_{0N}$ 是三水模型计算的 N 块岩样的电阻率; φ_{fj} 、 φ_{ij} 、 φ_{cj} 分别是核磁测量得到的第 j 块岩样的自由水孔隙度、微毛细水孔隙度和黏土水孔隙度。

采用遗传最优化算法,得到 QHD 油田 X 井的 m_f 、 a_f 、 m_i 、 a_i 、 m_c 、 a_c 的值分别是 1.000 0、1.090 7、1.000 0、1.000 0、1.343 0 和 2.946 5。图 4 给出了最优化结果与实测 R_0 的对比结果,相对误差为 0.828 1。

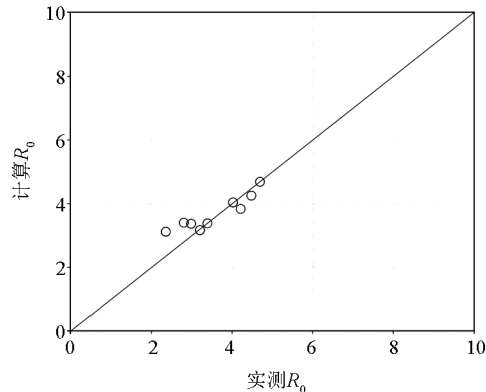


图 4 QHD 油田 X 井 6 个参数最优化结果与实测 R_0 对比

Fig. 4 Comparison between optimization results of 6 parameters and measured R_0

4 基于复电阻率的 Q_v 的求取方法

通常,单位孔隙体积的阳离子交换量 Q_v 通过 CEC 求得:

$$Q_v = \frac{CEC \cdot (1 - \varphi_T) \cdot \rho_g}{\varphi_T}, \tag{6}$$

式中: ρ_g 为岩石平均颗粒密度; φ_T 为总孔隙度;CEC 为每单位质量干岩样交换钠离子的摩尔或毫摩尔数,mmol/g。

测量阳离子交换容量 CEC 的步骤非常繁琐,具体参见中华人民共和国石油天然气行业标准《SY/T5395-91 黏土阳离子交换容量及盐基分量测定方法》。而测定复电阻率的方法相对简单。当岩石中有不同频率的电流通过时,不仅岩石电阻率的幅度发生变化,相位同时也发生变化,这时岩石电阻率不能用实数表示,而要用复数表示,称为岩石复电阻率。岩石的复电阻率可以提供丰富的地层信息。泥质含量对岩样电阻率的影响主要反映在阳离子交换量上,泥质的附加导电特性不仅使岩样复电阻率的实部降低,也改变了复电阻率的虚部。李建军等^[26]的研究结果表明复电阻率的实部和虚部都随着 CEC 的增大而减小,据此建立了矿化度为 1 g/L、频率为 20 Hz 的复电阻率的实部 R 和虚部 X 与阳离子交换量 CEC 的关系式:

$$R = \frac{203.999\,934}{\exp(-CEC/0.715\,31)} + 42.959\,76, \tag{7}$$

$$X = \frac{10.694\,9}{\exp(-CEC/0.478\,84)} + 5.406\,27。 \tag{8}$$

Vinegar 和 Waxman^[27] 对 20 块泥质砂岩进行了测试,发现这 20 块岩样的阳离子交换量 Q_v 范围在 0.03~0.95 meq/ml;他们提出了一种适用于泥质砂岩地层的经验公式——V-W 模型,将复电阻率分为同相电导率与异相电导率两部分。基于以上研究,本次实验测量了复电阻率,应用复电阻率的实部 σ' 和虚部 σ'' 联合求取 Q_v :

$$\sigma' = \frac{1}{F}(\sigma_w + BQ_v), \tag{9}$$

$$\sigma'' = \frac{1}{F_q} \lambda Q_v, \tag{10}$$

$$F_q = F \cdot \varphi, \tag{11}$$

式中: σ_w 为流体的电导率; B 为黏土的等效阳离子电导率; λ 为等效的正交电导率; F 代表地层因素;

φ 为孔隙度。

5 三水模型的新形式

如果黏土的电导率不是用公式 $C_c = \frac{\varphi_c^{m_c} C_{wc}}{a_c}$ 来计算,而是用

$$C_c = \frac{BQ_v}{F} \tag{12}$$

计算,则式(2)中只有 m_f 、 a_f 、 m_i 、 a_i 4 个未知参数。采用遗传最优化算法,得到 QHD 油田 X 井的这 4 个参数值分别是 0.565 5、1.937 9、1.087 19 和 0.649 8。图 5 给出了最优化结果与实测 R_0 的对比结果,相对误差为 0.341 7。

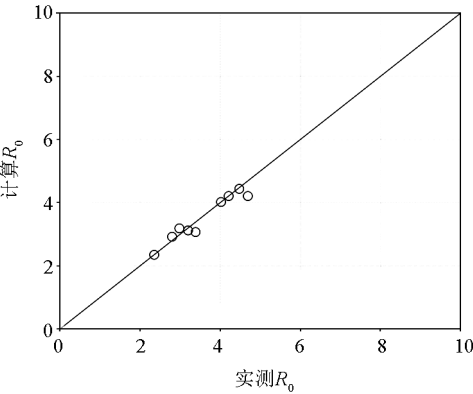


图 5 QHD 油田 X 井 4 个参数最优化结果与实测 R_0 对比

Fig. 5 Comparison between optimization results of four parameters of well X in QHD oilfield and measured R_0

对比图 4 和图 5,图 5 的误差更小。因此,最终采用如下的三水模型新形式计算含水饱和度。

当岩石含有油气时:

$$C_t = \frac{S_{wf}^{n_f} \varphi_f^{m_f} C_w}{a_f} + \frac{\varphi_i^{m_i} C_w}{a_i} + C_c ; \tag{13}$$

当岩石 100% 含水时:

$$C_0 = \frac{\varphi_f^{m_f} C_w}{a_f} + \frac{\varphi_i^{m_i} C_w}{a_i} + C_c . \tag{14}$$

由于很难确定饱和度指数 n ,因此根据

$$I = \frac{R_t}{R_0} = \frac{b}{S_w^n} = \frac{C_0}{C_t} , \tag{15}$$

将含水饱和度方程变换为

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{b \cdot C_t}{C_0}} , \tag{16}$$

式中: b 为岩性系数。参数 b 、 n 可通过 1 kHz 下复电阻率的实部得到(图 6)。

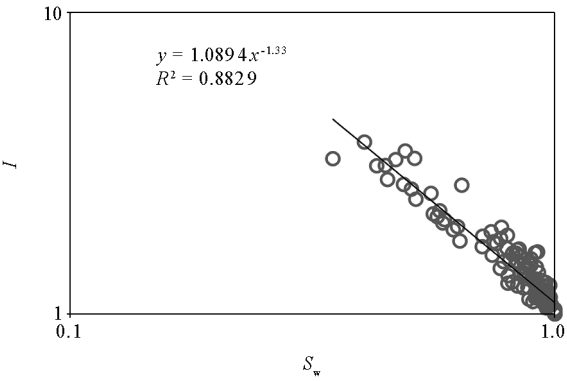


图 6 $I-S_w$ 关系

Fig. 6 Relationship of $I-S_w$

6 结论

1)应用测量的岩样复电阻率数据,计算了阳离子交换容量,提出了三水模型的新形式,节省了实验测量阳离子交换容量的时间和费用。

2)基于核磁实验数据,结合遗传最优化方法,得到了三水模型新形式下的参数,即自由孔隙、束缚孔隙的胶结指数和岩性指数 m_f 、 a_f 、 m_i 、 a_i 的值分别是 0.565 5、1.937 9、1.087 2 和 0.649 8。根据这些参数计算的岩样 100% 含水时的电阻率与实验测量得到的电阻率相对误差为 0.341 7。

3)本文所提方法应用起来相对简单,不需要太多的实验数据,只要有核磁数据和复电阻率实验数据就可以确定三水模型新形式中的参数。

4)本文所提方法为应用新三水模型计算含水饱和度提供了基本参数的求取方法,其他地区可以参考借鉴。

参考文献(References):

[1] 李舟波. 地球物理测井数据处理与综合解释[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2003.
Li Z B. Geophysical logging data processing and comprehensive interpretation [M]. Changchun: Jilin University Press, 2003.
[2] 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.
Zeng W C. Logging evaluation technology of oil and gas reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
[3] Poupon A, Leveaux J. Evaluation of water saturations in shaly formation [J]. The Log Analyst, 1971, XII(4): 3-8.
[4] Simandoux P. Dielectric measurements on porous media: Application to measurement of water saturation; Study of the behavior of argillaceous formation [C]//SPWLA 4th Annual Logging Symposi-

- um, 1963.
- [5] Waxman M H, Smits L J M. Electrical conductivities in oil bearing shaly sands [C]// SPE, 1968: 107-122.
 - [6] Clavier C, Coates G, Dumanoir J. The theoretical and experimental bases for the electric dual-water model for interpretation of shaly sands [J]. SPE Journal, 1984, 24(2): 153-168.
 - [7] Givens W W. A conductive rock matrix model (CRMM) for the analysis of low-contrast resistivity formation [J]. The Log Analyst, 1987, 28(2): 138-151.
 - [8] Crane S D. Impacts of micro porosity, rough pore surface and conductive minerals on saturation calculations from electric measurements: An extended Archie's law [C]// West Lafayette: SPWLA 31th Annual Logging Symposium, 1990.
 - [9] 莫修文. 低阻储层导电模型的建立及解释方法研究 [D]. 长春: 长春科技大学, 1998.
Mo X W. Study on the establishment and interpretation of conductivity model of low resistivity reservoir [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 1998.
 - [10] 莫修文, 贺铎华, 李舟波, 等. 三水导电模型及其在低阻储层解释中的应用 [J]. 长春科技大学学报, 2001(1): 92-95.
Mo X W, He D H, Li Z B, et al. The application of three-water conduction model in the interpretation of low-resistivity reservoir [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001(1): 92-95.
 - [11] 张奉东, 潘保芝. 三水模型在腰英台油田储层测井解释中的应用 [J]. 世界地质, 2009, 28(2): 226-232.
Zhang F D, Pan B Z. Application of three water model in reservoir log interpretation in Yaoyingtai oilfield [J]. World Geology, 2009, 28(2): 226-232.
 - [12] 张丽华, 潘保芝, 李宁, 等. 基于三水模型的储层分类方法评价低孔隙度低渗透率储层 [J]. 测井技术, 2011, 35(1): 31-35.
Zhang L H, Pan B Z, Li N, et al. Reservoir Classification Method Based on Three Water Model to Evaluate Low Porosity and Low Permeability Reservoir [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(1): 31-35.
 - [13] 郭宇航, 潘保芝, 蒋必辞, 等. 苏里格地区三水模型与数学方法结合的致密砂岩储层评价 [J]. 石油物探, 2015, 54(5): 621-626.
Guo Y H, Pan B Z, Jiang B C, et al. Tight sandstone reservoir evaluation by the combination of three-water model and mathematical method in Sulige Area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(5): 621-626.
 - [14] 丁永浩. 泥质砂岩三孔隙导电模型测井解释方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
Ding Y H. Study on shaly sand three-pore conductivity model log interpretation method [D]. Changchun: Jilin University, 2005.
 - [15] 付晨东, 汪爱云. 新三水模型的改进与参数确定方法 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2022, 52(2): 654-661.
Fu C D, Wang A Y. Improvement of new three-water model and determination of its parameters [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2022, 52(2): 654-661.
 - [16] 张丽华, 潘保芝, 李舟波, 等. 新三水导电模型及其在低孔低渗储层评价中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 431-435, 472, 318.
 - [17] 王赞惟. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区盒 8 段储层微观孔隙结构及渗流特征 [J]. 非常规油气, 2020, 7(1): 59-64.
Wang Z W. Microscopic pore structure and the seepage characteristics in tight sandstone reservoir of the 8th member of lower shihezi formation in Linxing area of east Ordos Basin [J]. Unconventional Oil & Gas, 2020, 7(1): 59-64.
 - [18] 李楚雄, 申宝剑, 卢龙飞, 等. 松辽盆地沙河子组页岩孔隙结构表征—基于低场核磁共振技术 [J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(3): 468-476.
Li C X, Shen B J, Lu L F, et al. Pore structure characterization of Shahezi Formation shale in Songliao Basin: Based on low-field nuclear magnetic resonance technology [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 468-476.
 - [19] 谭茂金, 赵文杰. 用核磁共振测井资料评价碳酸盐岩等复杂岩性储集层 [J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 489-493.
Tan M J, Zhao W J. Description of carbonate reservoirs with NMR log analysis method [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 489-493.
 - [20] 白松涛, 程道解, 万金彬, 等. 砂岩岩石核磁共振 T2 谱定量表征 [J]. 石油学报, 2016, 37(3): 382-391.
Bai S T, Cheng D J, Wan J B, et al. Quantitative characterization of sandstone NMR T2 spectrum [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 382-391.
 - [21] 梁志凯, 李卓, 姜振学, 等. 基于 NMR 和 SEM 技术研究陆相页岩孔隙结构与分形维数特征—以松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩为例 [J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(3): 313-328.
Liang Z K, Li Z, Jiang Z X, et al. Characteristics of pore structure and fractal dimension in continental shale based on NMR experiment and SEM image analyses: A case study of Shahezi Formation Shale in Changling Fault Depression of Songliao Basin, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(3): 313-328.
 - [22] 朱文森. 秦皇岛 32-6 和绥中 36-1 油田水驱后砂岩储层变化规律研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
Zhu W S. Research on the variation law of sandstone reservoir after water flooding in QHD32-6 and SZ36-1 oilfields [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
 - [23] 张平. 以大庆油田模式虚拟开发秦皇岛 32-6 油田的数值模拟研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
Zhang P. Numerical simulation of virtual development of Qinhuangdao 32-6 Oilfield with the mode of Daqing Oilfield [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
 - [24] 周明, 孙树栋. 遗传算法理论及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
Zhou M, Sun S D. Theory and application of genetic algorithm [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
 - [25] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
Wang X P, Cao L M. Genetic algorithm: Theory application and

software implementation [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.

[26] 李建军,邓少贵,范宜仁,等. 岩样复电阻率影响因素研究[J]. 测井技术,2005(1): 11-14,90.

[27] Vinegar H J, Waxman M H. Induced polarization of shaly sands [J]. Geophysics,1984,49(8):1267-1287.

Li J J, Deng S G, Fan Y R, et al. Study on influential factors on Core's complex resistivity [J]. Well Logging Technology, 2005 (1):11-14,90.

A new three-water model based on the complex resistivity-NMR joint survey experiment

ZHANG Li-Hua, PAN Bao-Zhi, SHAN Gang-Yi, A Ru-Han, ZHANG Peng-Ji
(College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Three-water(free water, microcapillary water, and clay water) models are widely used in the interpretation of clastic reservoirs. However, these models involve many parameters, some of which are difficult to determine. The methods for determining these parameters are mostly based on the statistics of a large amount of experimental data in study areas. To solve the multi-parameter problem in the application of three-water models, this study proposed a new method to calculate the cation exchange capacity based on the complex resistivity data. Accordingly, it built a new three-water model. Then, it determined the parameter values of the three-water model using nuclear magnetic resonance (NMR) data combined with the optimal genetic algorithm. The resistivity of the completely water-saturated rock samples calculated from these parameters had a relative error of 0.3417 compared to the resistivity obtained from experimental measurements. The method proposed in this study is simple and easy to use. Moreover, this method does not rely on too many experimental data but requires only complex resistivity and NMR experimental data. Therefore, this method can be used as a reference for determining the parameters of new three-water models of other areas.

Key words: three-water model; three-water model parameters; complex resistivity; cation exchange capacity; optimization algorithm; NMR

(本文编辑:沈效群)