



吴伟,毛超杰,张新臣等. 2020. 基于线性回归的饱和度校正法改进. 地球物理学进展, 35(5): 1888-1893, doi: 10.6038/pg2020DD0368.

WU Wei, MAO Chao-jie, ZHANG Xin-chen, et al. 2020. Improvement of saturation correction method based on linear regression. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 35(5): 1888-1893, doi: 10.6038/pg2020DD0368.

基于线性回归的饱和度校正法改进 Improvement of saturation correction method based on linear regression

吴伟¹, 毛超杰², 张新臣³, 刘灏亮³, 张峰³, 王浩帆³, 李赫楠²

WU Wei¹, MAO Chao-jie², ZHANG Xin-chen³, LIU Hao-liang³, ZHANG Feng³, WANG Hao-fan³, LI He-nan²

1. 中国石油集团测井有限公司测井应用研究院, 西安 710000

2. 中国石油玉门油田分公司勘探开发研究院, 酒泉 735000

3. 中国石油玉门油田分公司钻采工程研究院, 酒泉 735000

1. *Research Institute of Logging Application, CNPC Logging Company Limited, Xi'an 710000, China*

2. *Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Yumen Oilfield Company, Jiuquan 735000, China*

3. *Research Institute of Drilling and Production Engineering, PetroChina Yumen Oilfield Company, Jiuquan 735000, China*

摘要 线性回归是校正测量数据系统误差最有效的方法之一,亦被学者应用在取心分析饱和度校正上。传统手段是对地面实测饱和度进行线性拟合,通过拟合线的归一化使饱和度之和为100%,实质是将测量误差用系统误差校正方式处理。但是由于两相流体挥发率的不同等因素影响,岩心取至地面后油、水拟合线的斜率会逐渐发生变化,因此该方法简便但不够严谨。本文提出一种改进的校正方法,首先利用相渗资料计算油、水剩余率,代替传统方法中假设的流体剩余率,将地面测量值拟合线的斜率还原成地下原始状态,然后再用经典的线性回归法进行校正。该方法不但综合考虑了两相流体的渗流特性,而且发挥了线性回归校正法的简便优势,有推广应用价值。

关键词 饱和度; 分析化验; 校正; 密闭取心; 相渗实验

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg2020DD0368

Abstract Linear regression is one of the most effective methods to correct the systematic error of measurement data, and it is also applied to the saturation correction of coring analysis by scholars. The traditional method is the linear fitting of the measured ground saturation, and the sum of the saturation is 100% by the normalization of the fitting line. In essence, the measurement error is processed by the system error correction. However, due to the different volatilization rate of two-phase fluid and other factors, the slope of oil and water fitting line will gradually change after the core is taken to the ground, so this method is simple but not rigorous enough. In this paper, an improved correction method is proposed. First, the residual rate of oil and water is calculated by using the infiltration data, instead of the fluid residual rate assumed in the traditional method, the slope of the fitting line of the surface measurement value is reduced to the original underground state, and then the classical linear regression method is used for correction. This method not only takes into account the seepage characteristics of two-phase fluid, but also gives full play to the simple advantages of linear regression correction method, which is worth popularizing and applying.

Keywords Saturation; Analytical test; Correction; Closed coring; Relative permeability experiment

0 引言

长期以来,取心饱和度的校正一直是人们研究的热点。诸多学者以溶解气驱和渗流力学原理为指导,分别计算覆压孔隙校正量、孔隙及油水体积校正量、降压脱气校正量、油水损失量等,最后相加得到总校正量。程会明等(2012)、王玉环(2014)、涂彬和李杰(2018)建立了理论推导法数学模型;管耀等(2018)针对模型中分流率计算参数复杂的问题,提出了一种改进的经验表达式;马勇新等(2016)引入了应力敏感效应公式,对模型进一步完善;孙佩等(2012)分孔隙类型

对校正系数进行研究。以上方法有严格的数学和物理学理论,但公式复杂参数多。对数量级较小的数据,难免会将误差放大。

大量的岩心分析资料表明,地面测量油、水饱和度之和虽然低于100%,但测量值仍然有较好的相关性。赵富贞和陈淦(1996)、马名臣和李建树(1993)基于此统计规律,较早的提出了用线性回归的方式进行饱和度误差校正,即对地面实测值进行线性拟合,通过拟合线的归一化使饱和度之和为100%。该方法最大的优点是仅利用常规饱和度分析资料便可完成校正,且原理简洁易懂。但是存在以下不足:没有考虑

收稿日期 2019-11-27; 修回日期 2020-06-19.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金项目(41372103)和中国石油天然气股份公司专项(2018D-0704)联合资助。

第一作者简介 吴伟,男,1985年生,硕士,工程师,从事测井储层综合评价的研究工作。E-mail: wuwei_cpl@cnpc.com.cn

岩心在地面长期搁置后,由于流体挥发速率不同,测量数据拟合线的斜率会逐渐发生变化。

而诸如覆压孔隙校正、孔隙及油水体校正等,此类损失量对斜率无明显影响,在线性回归校正法中作为系统误差,无需计算推导,均可通过线性归一化校正。

由此可见,线性回归校正法可操作性更强、更易于实际应用,但需要稍作改进。鉴于此,本文在前人研究成果基础上,提出了一种基于相渗资料分析的改进线性回归校正法。

1 线性回归校正法原理

1.1 方法简述

在油、水两相流体条件下,地层的原始油水饱和度之和为100%。由于岩心从地下到地面受各种因素影响,所测油水饱和度之和小于100%。

当油层中不存在游离气时,原始地层油、水饱和度应符合:

$$S_w + S_o = 1 \quad (1)$$

式中, S_w 为原始地层含水饱和度; S_o 为原始地层含油饱和度。

假设油、水的剩余率分别为 α 、 β , 则地面测量油、水饱和度应符合:

$$\frac{S'_o}{\alpha} + \frac{S'_w}{\beta} = 1 \quad (2)$$

换算成:

$$S'_w = \beta - \frac{\beta}{\alpha} S'_o \quad (3)$$

式中, S'_w 为地面测量含水饱和度; S'_o 为地面测量含油饱和度; α 、 β 分别为油、水的剩余率。

根据实验数据,对 S'_w 、 S'_o 进行线性回归,得到:

$$S'_w = a + bS'_o \quad (4)$$

式中, a 、 b 为系数,由实验拟合公式得到。

由式(3)、(4)可知:

$$a = \beta \quad b = -\frac{\beta}{\alpha} \quad (5)$$

因此可得:

$$S_o = \frac{S'_o}{\alpha} \quad S_w = \frac{S'_w}{\beta} \quad (6)$$

传统线性回归校正法通过拟合得到油、水剩余率,即校正系数,完成归一化校正。

1.2 不足之处分析

从式(2)可知,方法假设了油、水的剩余率分别为 α 、 β , 但岩心取至地面搁置后,流体的挥发率是不同的,油水剩余率 α 、 β 必然与相渗有关。从校正过程看,计算得到的 α 、 β 基本相同,且各约占1/2,即油、水的剩余率一致。因此,传统方法中 α 、 β 仅为校正系数,而非剩余率。

为了进一步说明,用图1示意。从图1看出,实测饱和度经归一化处理,曲线斜率没有变化。可见,校正之后油、水饱和度之和虽然为100%,但油、水饱和度的剩余分量校正结果是不准确的。

1.3 方法改进思路

考虑流体相渗之后,改进的回归校正法分为3步进行:

①基于相渗方法计算油、水剩余率,代替传统方法中式(2)

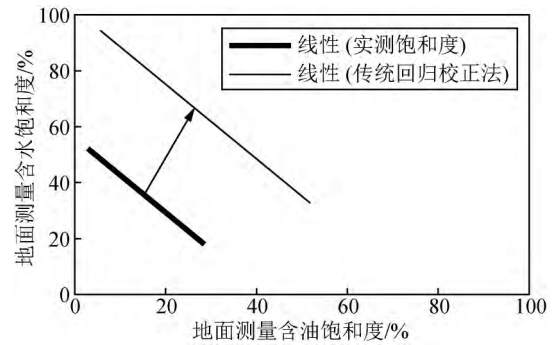


图1 传统方法校正过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of traditional method correction process

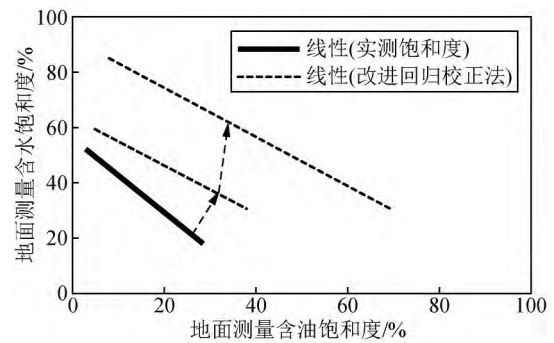


图2 改进的方法校正过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of improved method correction process

的剩余率 α 、 β ; ②进行损失率(损失量)校正,完成测量饱和度拟合线的斜率还原; ③再进行系统误差校正,使得油、水饱和度之和为100%。通过改进,校正后的油、水剩余分量差异明显,这更加符合地层真实情况,过程如图2示意。

2 改进校正法应用实例

2.1 实例样品分析

以酒泉盆地营尔凹陷酒东油田白垩系 K_1g_1 砂岩油藏为研究对象; K_1g_1 油藏以砂、泥薄互层为主,纵向上储层非均质性强,多套油水系统共存。另外, K_1g_1 地层物性非均质性强,储层渗流能力差别较大。油藏密闭取心含油饱和度分布范围12%~80%,含水饱和度分布范围3%~67%,总饱和度分布范围23%~95%,饱和度之和误差最高达77%,资料失去利用价值。油藏内C19井、C20井地面测量饱和度如图3所示。

图3中,C19井的测量结果为第1~2组,C20井的测量结果为第3~5组。图中饱和度测量值有以下3个特征: ①数据分布在45°线左下侧,说明分析饱和度之和整体偏低; ②数据有较好的相关性,说明满足线性回归校正的基本条件; ③呈现多组合拟合线,是储层非均质性及层内物性非均质性引起的; ④拟合线斜率不同,这是油、水损失的比例不一样。

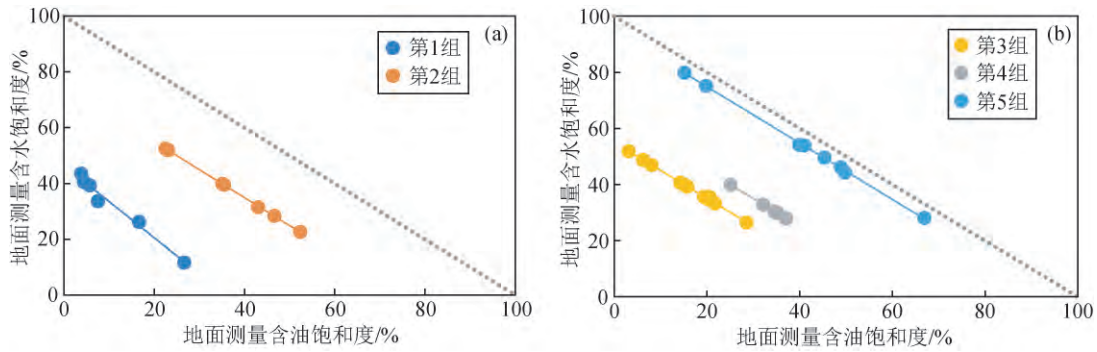


图3 C19井(a)、C20井(b)岩心地面测量油水饱和度交会图

Fig. 3 Oil-water saturation intersection diagram of core surface measurement in Well C19(a) and C20(b)

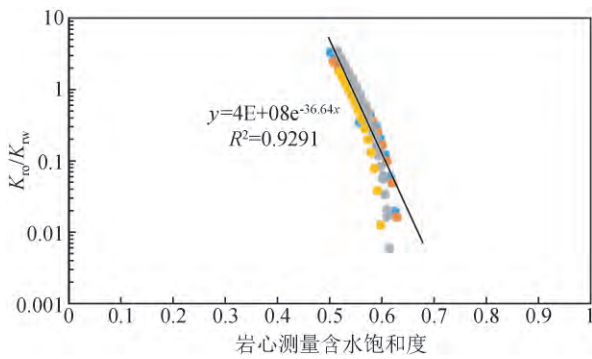


图4 酒东油田白垩系 K_{1g1} 砂岩油藏相渗曲线

Fig. 4 Relative permeability curve of Cretaceous K_{1g1} sandstone reservoir in Jiudong Oilfield

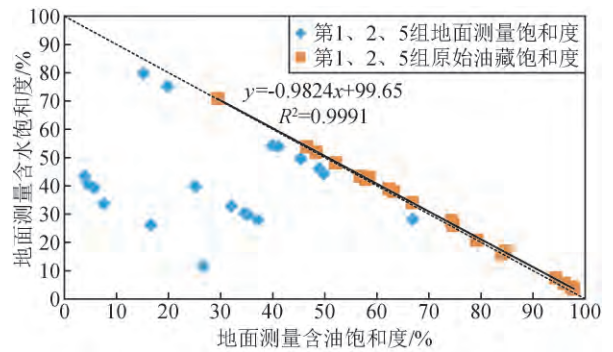


图6 岩心测量饱和度校正前后对比

Fig. 6 Comparison of saturation correction in core measurement

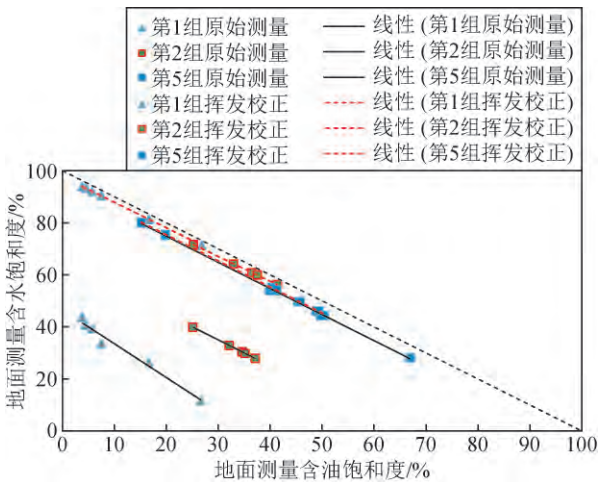


图5 岩心测量饱和度挥发校正前后对比

Fig. 5 Comparison of saturation volatilization correction before and after correction

引起的, 该比例与岩心的总饱和度相关。

通常认为, 油藏原始状态下油、水的挥发比例相等且为0, 所以拟合线斜率应无限接近于-1。以第1和第5组为例: 第1组饱和度之和较小并且斜率小于-1, 说明这组数据的

系统误差较大, 同时岩样中油的挥发效率高于水。第5组饱和度之和接近于45°线并且斜率基本等于-1, 说明系统误差较小, 同时油、水的挥发比例基本相等。因此, 传统校正法中剩余率的确定, 必须要考虑流体本身的渗流特性, 分别计算不同流体的挥发损失。

2.2 改进的校正过程

(1) 第一步 校正油、水的挥发量

假设油、水的挥发量分别为 ΔS_o 、 ΔS_w , 不考系统误差的情况下, 有:

$$S'_{wr} = S'_w + S_w, S'_{or} = S'_o + S_o, \quad (7)$$

式中 S'_{wr} 、 S'_{or} 为进行挥发量校正后的测量饱和度; ΔS_o 、 ΔS_w 为油、水的挥发校正量。关于 ΔS_o 、 ΔS_w 理论推导法大量文献都做了详细的推导, 此处只引用关键结果。需要补充说明的是, 前人文献中 ΔS_w 为校正总量, 包括孔隙体积变化校正量、流体体积变化校正量、挥发脱气校正量之和。此处仅表示挥发脱气校正量:

$$\begin{cases} \Delta S_o = \frac{1 - S'_w B_w - S'_o B_o}{1 + \frac{\mu_o}{\mu_w} \frac{K_{rw}}{K_{ro}}} \\ \Delta S_w = \frac{1 - S'_w B_w - S'_o B_o}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{K_{ro}}{K_{rw}}} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 B_o 、 B_w 为油、水的体积系数; μ_o 、 μ_w 为油、水的黏度, $mP_a \cdot S$; K_{ro} 、 K_{rw} 为油、水的相渗。其中 B_o 、 B_w 、 μ_o 、 μ_w 由 PVT

实验数据获得, 取值为 1.22、1.1、3.47 和 0.6172。\$K_{ro}\$、\$K_{rw}\$ 由 6 块岩样的相渗实验数据获得。

式中 \$K_{ro}/K_{rw}\$、\$K_{ro}/K_{ro}\$ 是 \$S_w'\$ 的函数, 以 \$K_{ro}/K_{rw}\$ 为例, 如图 4 所示。

从图 4 中可得:

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = 4 \times 10^8 e^{-36.64S_w'} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)便可得 \$\Delta S_o\$、\$\Delta S_w\$ 及 \$S_{wr}'\$、\$S_{or}'\$。对于对比校正前后的变化, 特别是针对斜率的还原, 选择具有代表性的第 1、2、5 组数据为例说明, 计算如表 1 所示。

表 1 挥发校正后测量饱和度计算表

Table 1 Calculating table of measurement saturation after volatilization correction

实验编号	井深 (m)	层位	拟合线	孔隙度 (%)	视密度 (g/cm ³)	\$S_o'\$ (%)	\$S_w'\$ (%)	\$\Delta S_o\$ (%)	\$\Delta S_w\$ (%)	\$S_{wr}'\$ (%)	\$S_{or}'\$ (%)
1	4242.2	\$K_1 g_1\$	第 1 组	13.6	2.26	43.5	3.8	50.3	0	93.8	3.8
2	4298.2	\$K_1 g_1\$		13.1	2.28	40.5	4.5	52.8	0	93.3	4.5
3	4297.1	\$K_1 g_1\$		10.8	2.34	39.3	5.7	52.8	0	92.1	5.7
4	4338.1	\$K_1 g_1\$		10.1	2.35	33.6	7.5	56.8	0	90.5	7.5
5	4410.7	\$K_1 g_1\$		9.4	2.38	26.2	16.6	55.0	0	81.3	16.6
6	4339.4	\$K_1 g_1\$		4.0	2.52	11.6	26.6	59.8	0.2	71.4	26.8
7	4233.6	\$K_1 g_1\$	第 2 组	4.6	2.53	39.9	25.1	31.8	0.1	71.7	25.2
8	4412.4	\$K_1 g_1\$		7.5	2.44	32.9	32.1	31.3	0.8	64.2	32.9
9	4330.0	\$K_1 g_1\$		4.5	2.51	30.4	34.6	30.4	1.9	60.8	36.5
10	4411.9	\$K_1 g_1\$		8.9	2.39	29.8	35.2	30.1	2.3	59.9	37.5
11	4412.7	\$K_1 g_1\$		7.2	2.45	27.9	37.1	28.4	4.3	56.3	41.4
12	4298.7	\$K_1 g_1\$	第 5 组	12.9	2.29	79.8	15.2	0.3	0	80.1	15.2
13	4333.4	\$K_1 g_1\$		10.9	2.34	75.2	19.8	0.3	0	75.5	19.8
14	4236.4	\$K_1 g_1\$				54.2	39.9	1	0.4	55.2	40.3
15	4334.3	\$K_1 g_1\$		7.9	2.45	53.9	41.1	0.3	0.2	54.2	41.3
16	4329.5	\$K_1 g_1\$		4.1	2.55	49.6	45.4	0.1	0.4	49.7	45.8
17	4292.6	\$K_1 g_1\$		2.9	2.6	46.1	48.9	0	0.5	46.1	49.4
18	4285.4	\$K_1 g_1\$				44.3	49.8	0.1	1.4	44.4	51.2
19	4413.8	\$K_1 g_1\$		4.2	2.53	28.1	66.9	0	0.6	28.1	67.5

(2) 第二步, 对 \$S_{wr}'\$、\$S_{or}'\$ 进行拟合, 完成斜率还原

经过油、水挥发量的计算, 测量饱和度之和增大, 同时拟合线的斜率发生了变化, 流体的挥发校正前后对比如图 5 所示。从表 1 和图 5 看出, 总体油的挥发量高于水的挥发量; 第 5 组挥发校正量比较小, 第 1、2 组挥发量校正比较大; 经校正, 第 1 组的斜率发生了较大变化, 校正后与其他 2 组斜率基本相同。3 组数据经挥发校正后, 测量饱和度之和已经接近 100%, 说明样品误差主要是挥发量损失, 特别是油的挥发量。

考虑挥发量误差之后, C19 井和 C20 井 3 组饱和度校正结果如下:

第 1 组校正前: \$S_w' = 46.497 - 1.2977S_o'\$, 其中: \$a = -1.2977\$, \$b = 46.497\$;

第 1 组校正后: \$S_w' = 97.666 - 0.9788S_o'\$, 其中: \$a = -0.9788\$, \$b = 97.666\$;

第 2 组校正前: \$S_w' = 65 - S_o'\$, 其中: \$a = -1\$, \$b = 65\$;

第 2 组校正后: \$S_w' = 95.625 - 0.9523S_o'\$, 其中: \$a = -0.9523\$, \$b = 95.625\$;

第 5 组校正前: \$S_w' = 94.925 - 1.0039S_o'\$, 其中: \$a =

\$-1.0039\$, \$b = 94.925\$;

第 5 组校正后: \$S_w' = 95.413 - 1.0026S_o'\$, 其中: \$a = -1.0026\$, \$b = 95.413\$。

(3) 第三步, 对校正后的 \$S_{wr}'\$、\$S_{or}'\$ 进行归一化处理

由第一步可知, \$S_{wr}'\$、\$S_{or}'\$ 是不考虑系统误差的, 之和小于 100% (图 5)。由式(2)~式(6), 用线性回归法对 \$S_{wr}'\$、\$S_{or}'\$ 进行系统误差校正, 完成归一化。需要注意的是, 系统误差的校正要对每组趋势线逐一校正。

以第 1 组为例, 假设校正系数为 \$\eta_1\$、\$\eta_2\$, 则有:

$$\frac{S_{or}'}{\eta_1} + \frac{S_{wr}'}{\eta_2} = 1 \text{ 即: } S_{wr}' = \eta_2 - \frac{\eta_2}{\eta_1} S_{or}' \quad (10)$$

结合第 1 组挥发校正后的回归式, 得: \$\eta_1 = 95.166\$, \$\eta_2 = 95.413\$。因此, 经过挥发误差校正和系统误差校正后, 第 1 组测量数据的地层原始饱和度为

$$S_o = \frac{S_{or}'}{95.166} \times 100, S_w = \frac{S_{wr}'}{95.413} \times 100 \quad (11)$$

同理可得其余 2 组校正后的地层原始饱和度, 校正结果如表 2 所示。

表2 3组数据校正后饱和度数据表

Table 2 3 sets of saturation data tables after data correction

实验编号	井深 (m)	层位	拟合线	地面测量饱和度		地面总饱和度(%)	原始油藏饱和度		原始油藏总饱和度(%)
				S_w (%)	S_o (%)		S_w (%)	S_o (%)	
1	4242.2	K_1g_1	第1组	43.5	3.8	47.3	97.8	3.5	101
2	4298.2	K_1g_1		40.5	4.5	45.0	97.3	4.2	102
3	4297.1	K_1g_1		39.3	5.7	45.0	96.0	5.5	102
4	4338.1	K_1g_1		33.6	7.5	41.1	94.4	7.4	102
5	4410.7	K_1g_1		26.2	16.6	42.8	84.7	17.0	102
6	4339.4	K_1g_1		11.6	26.6	38.2	74.3	27.7	102
7	4233.6	K_1g_1	第2组	39.9	25.1	65.0	74.6	26.0	101
8	4412.4	K_1g_1		32.9	32.1	65.0	66.8	34.1	101
9	4330.0	K_1g_1		30.4	34.6	65.0	63.2	37.9	101
10	4411.9	K_1g_1		29.8	35.2	65.0	62.3	38.9	101
11	4412.7	K_1g_1	第5组	27.9	37.1	65.0	58.5	43.0	102
12	4298.7	K_1g_1		79.8	15.2	95.0	84.0	16.0	100
13	4333.4	K_1g_1		75.2	19.8	95.0	79.1	20.8	100
14	4236.4	K_1g_1		54.2	39.9	94.1	57.9	42.4	100
15	4334.3	K_1g_1		53.9	41.1	95.0	56.8	43.4	100
16	4329.5	K_1g_1		49.6	45.4	95.0	52.1	48.2	100
17	4292.6	K_1g_1		46.1	48.9	95.0	48.3	51.9	100
18	4285.4	K_1g_1		44.3	49.8	94.1	46.5	53.8	100
19	4413.8	K_1g_1	28.1	66.9	95.0	29.5	71.0	100	

从表2看出,地面总饱和度校正前最大误差为61.7%,经过3步校正,值基本等于100%。校正前后对比如图5所示。校正后:

$$S_w = 99.65 - 0.9824S_o, R^2 = 0.9991, \quad (12)$$

原始油藏总饱和度绝对误差范围为0~2%,精度符合生产需求,达到校正目的。

3 结论

(1) 理论校正公式繁多,在实际应用中不便于操作。线性回归校正法在校正测量饱和度系统误差时优势明显,但对流体剩余率的计算不够准确。

(2) 改进后的方法既发挥了传统方法的优势,又充分利用了理论推导法的精确模型,使得校正结果更加合理可信。

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- CHENG H M, LI C L, CHENG C. 2012. Research on Saturation Correction Method for Closed Coring [J]. Science and Technology and Engineering (in Chinese), 12(20): 4892-4895.
 GUAN Y, FENG J, SHI L. 2018. An improved method for saturation

correction of sealed coring [J]. China Offshore Oil and Gas (in Chinese), 30(2): 78-84.

- MA M C, LI J S. 1993. Core oil and water saturation correction method for sealed coring wells [J]. Petroleum exploration and development (in Chinese), (4): 102-105.
 MA Y X, LI W H, ZHU S F. 2016. A new saturation correction model for sealed coring [J]. Offshore Oil and Gas of China (in Chinese), 28(2): 78-82.
 SUN P, CUI S T, LIU J Q, et al. 2012. A method for saturation correction of sealed coring based on pore structure research [J]. lithologic reservoirs (in Chinese), 24(3): 88-92.
 TU B, LI J. 2018. Dynamic model for saturation correction of sealed coring and analysis of influencing factors [J]. Petroleum drilling and production technology (in Chinese), 40(04): 460-467.
 WANG Y H. 2014. Closed coring saturation correction method based on oil-water flow principle [J]. Science and technology and engineering (in Chinese), 14(9): 39-43.
 ZHAO F Z, CHEN G. 1996. A Correction Method for Saturation Data of Core Analysis [J]. Petroleum Geology of Xinjiang (in Chinese), (1): 68-69.

附中文参考文献

- 程会明,李传亮,程呈. 2012. 密闭取心饱和度校正方法研究 [J]. 科学技术与工程, 12(20): 4892-4895.
 管耀,冯进,石磊. 2018. 一种改进的密闭取心饱和度校正方法 [J]. 中国海上油气, 30(2): 78-84.
 马名臣,李建树. 1993. 密闭取心井岩心油、水饱和度校正方法 [J]. 石油勘探与开发, (4): 102-105.

- 马勇新,李文红,朱绍鹏. 2016. 密闭取心饱和度校正新模型[J]. 中国海上油气, 28(2): 78-82.
- 孙佩,崔式涛,刘佳庆,等. 2012. 基于孔隙结构研究的密闭取心饱和度校正方法[J]. 岩性油气藏, 24(3): 88-92.
- 涂彬,李杰. 2018. 密闭取心饱和度校正动态模型及影响因素分析[J]. 石油钻采工艺, 40(04): 460-467.
- 王玉环. 2014. 基于油水分流原理的密闭取心饱和度校正方法[J]. 科学技术与工程, 14(9): 39-43.
- 赵富贞,陈淦. 1996. 岩心分析饱和度资料的一种校正方法[J]. 新疆石油地质, (1): 68-69.