文章编号:1673-5005(2016)04-0057-09 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.04.007

用 *J* 函数提高致密砂岩气层饱和度测井评价精度

邵才瑞[1,2,3], 张鹏飞[1], 张福明[1,2,3], 郑广全[4], 侯秋元[1,5], 陈伟中[4]

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,山东青岛 266580;3. 中石油测井重点实验室中国石油大学(华东)研究室,山东青岛 266580; 4. 中石油塔里木油田公司勘探开发研究院,新疆库尔勒 841000; 5. 中国石油测井集团公司国际事业部,北京 100101)

摘要:低孔渗致密砂岩储层具有孔隙度小、孔隙结构复杂,泥质含量高、束缚水饱和度大等特点。该类储层阿尔奇岩电参数 m、n 值变化大,电阻率与流体关系复杂,很难用电阻率测井资料据阿尔奇公式求准含气饱和度。通过对致密储层岩样毛管压力曲线形态分类,统计不同毛管压力曲线形态类型的物性特征,最终按孔隙度范围分类建立 J 函数与饱和度的统计关系。实际应用结果表明,该方法与阿尔奇变 m 指数法相比计算精度可提高 1 倍,与孔渗指数方法相比精度也显著提高,且能反映气水界面附近饱和度的变化趋势;为准确求取低孔渗储层饱和度提供了切实可行的测井评价方法,克服了低孔渗储层难以求准饱和度的技术难题。

关键词:测井评价; 低孔低渗储层; 致密砂岩; 毛管压力曲线; J 函数;饱和度

中图分类号: P 631.84 **文献标志码**:A

引用格式: 邵才瑞,张鹏飞,张福明,等. 用 J 函数提高致密砂岩气层饱和度测井评价精度[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016,40(4):57-65.

SHAO Cairui, ZHANG Pengfei, ZHANG Fuming, et al. Improving well log evaluation accuracy of tight sandstone gas saturation using *J* function[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(4):57-65.

Improving well log evaluation accuracy of tight sandstone gas saturation using *J* function

SHAO Cairui[1,2,3], ZHANG Pengfei[1], ZHANG Fuming[1,2,3], ZHENG Guangquan[4], HOU Qiuyuan[1,5], CHEN Weizhong[4]

(1. *School of Geosciences in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *Laboratory for Marine Mineral Resources*, *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology*, *Qingdao* 266580, *China*;
3. *Key Laboratory of PetroChina Well Logging Research Center in China University of Petroleum (East)*, *Qingdao* 266580, *China*;
4. *Tarim Oilfield Exploration and Development Research Institute*, *Korla* 841000, *China*;
5. *International Division of China Petroleum Logging Corporation*, *Beijing* 100101, *China*)

Abstract: The low porosity and low permeability tight sandstone reservoirs are usually characterized as developed small pores, complex pore structures, high shale content and high bound water saturation. The m and n values of the Archie rock electrical parameters can vary significantly and the relationship between resistivity and fluid is complex of this type of reservoirs, resulting in difficulties in getting accurate gas saturation values when applying the Archie formula to resistivity logging data. The physical properties of different types of capillary pressure curve shapes are obtained by classifying the capillary pressure curve shapes of different rock samples. According to the classification and its porosity range, the statistical relation between the J function and sample saturation is established. The application of the relationship on real samples shows that the spread of the calculated saturation can be improved greatly and is nearly half of that of the "variable m rock electrical parameter"

收稿日期:2015-12-10

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05009-003,20112X05046-003)

作者简介:邵才瑞(1966-),男,教授,博士,研究方向为测井理论、方法与技术。E-mail:shaocr@upc.edu.cn。

Archie method. This new method is also better than "permeability/porosity ratio parameter" method, and has the ability to show the saturation changing trend near the gas-water interface. The new method is feasible and can give accuracy saturation estimates for low porosity and low permeability tight sandstone reservoirs.

Keywords: well log evaluation; low porous and permeable reservoir; tight sandstone; capillary pressure curve; J function; saturation

低孔渗致密储层一般指孔隙度小于 10%、渗透率低于 0.1×10^{-3} μm^2 的储层[1],对于气层渗透率可降低到 0.05×10^{-3} μm^2,目前已成为中国主产储层。由于低孔渗储层中流体所占含量少,对测井响应的贡献小,且大多数呈现为低阻特征,因此流体识别和定量计算困难。该类储层一般具有小孔隙发育、孔喉半径小、孔吼结构及润湿性复杂、黏土矿物含量高、束缚水饱和度大、非均质性强等特点[2];其岩电参数 m、n 值变化大、电阻率与流体关系复杂[3-4],难以用 Archie 公式得到较为准确的饱和度参数[5-7]。为此,研究人员对低孔渗储层 m、n 岩电参数的控制因素和规律进行了研究[8],实验表明低孔渗岩心 F 与 Φ 在双对数坐标中呈现明显的非线性关系[9],存在非阿尔奇现象;为提高利用阿尔奇方程计算低孔渗储层饱和度的精度,人们从不同方面进行了研究[10-12],除了提高确定低孔渗储层 Archie 参数精度外[13],主要通过对储层分类采用变 m 指数方法[14]或 Simandoux 公式突出泥质的影响[15]。变 m 指数法揭示了低孔渗储层孔隙大小和结构对岩电参数具有控制作用,然而在实际应用中由于往往难以获得精细的 m 指数变化规律,难以得到很好的效果;同样由于泥质含量难以求准,Simandoux 公式也往往难以应用。为此,笔者结合中国某含油气盆地情况,利用岩心压汞资料,根据不同毛管压力曲线形态,按孔隙度范围分类建立 J 函数与饱和度之间的关系,以提高低孔渗储层饱和度计算精度。

1 研究区储层基本特征

研究区岩性以粉砂岩(34%)和细砂岩(28.46%)为主,其次为泥质粉砂岩(21.58%)。孔隙度分布范围为 2% ~10%,平均约为 6%;渗透率为 $(0.01\sim1)\times10^{-3}$ μm^2,平均值约为 0.1×10^{-3} μm^2,为超低孔渗储层。此外储层还具有电阻率变化大、流体与电阻率关系复杂等特性。

1.1 物 性

岩心资料统计表明,物性好坏受岩性的控制。岩性越纯,颗粒越均匀,泥质含量越少,物性越好(表 1)。分选较差的含砾砂岩和颗粒较细的泥质粉砂岩物性相对较差,而细砂岩和粉砂岩的物性较好,即低孔渗储层物性受颗粒大小、分选程度、泥质含量等因素的影响较为明显。

表 1 不同岩性孔隙度和渗透率范围

Table 1 Porosity and permeability range of different lithology

岩性	孔隙度 φ/%	孔隙度平均值 φ_a/%	渗透率 k/ 10^{-3} μm^2	渗透率平均值 k_a/10^{-3} μm^2
含砾砂岩	1 ~4	2.89	0.01 ~0.1	0.06
泥质粉砂岩	2 ~6	5.30	0.01 ~0.1	0.24
粉砂岩	2 ~12	7.29	0.01 ~1	0.81
细砂岩	2 ~8	5.43	0.01 ~1	0.51

1.2 储层电阻率及不同类型流体测井响应特征

(1)低孔渗储层电阻率变化范围大。统计相同岩性测试产气层段电阻率,发现不同储层段电阻率变化范围较大,电阻率为 3.4 ~28.1 Ω · m(图 1),表明低孔渗储层相同流体、相同岩性情况下不同层段电阻率分布范围大。

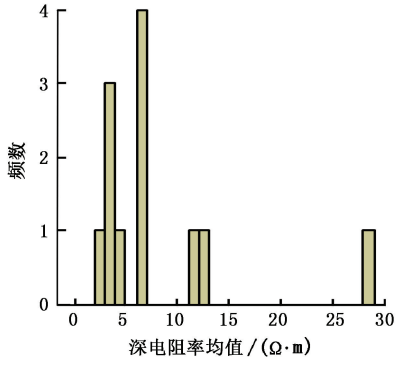


图 1 砂岩储层测试产气层段电阻率分布直方图

Fig. 1 Resistivity histogram of gas sandstone

(2)统计分析实际测井资料发现,由于低孔渗储层流体含量少,对测井值的贡献小,相同岩性不同流体测井响应特征差异不明显(表 2)。

表 2 相同岩性不同流体测井响应特征

Table 2 Logging response characteristics of different fluids in the same lithology

岩性	AC 平均值/ ($\mu s\cdot m^{-1}$)	DEN 平均值/ ($g\cdot cm^{-3}$)	CNL 平均值/%	Rt 平均值/ (Ω · m)
细砂岩水层	212.80	2.558	9.77	3.57
细砂岩气层	217.42	2.546	8.30	5.44
粉砂岩水层	222.70	2.540	12.80	2.38
粉砂岩气层	227.79	2.520	11.53	4.61

(3)岩电参数变化大,呈非阿尔奇现象。在该地区同类岩性岩电实验数据的双对数坐标系交会

(图 2 左)中可以看出地层因子 F 值随孔隙度的变化不仅有明显的分类,而且随孔隙度的降低 F 值数据点重心下移,呈现向下的非线性弯曲现象;对于电阻增大系数 I 不仅有分类趋势,而且随含水饱和度的减小也呈现向下的非线性弯曲现象(图 2 右)。对于不同的实验样本若取 a、b 等于 1,考察 m、n 值随孔隙度的变化情况得到如图 3 所示结果,图中 m、n 值随孔隙度呈线性变化趋势,在孔隙度 7% 左右 m 值呈现分段函数特征,饱和度指数 n 随孔隙度的变化则相对较为杂乱。这些特征说明研究区低孔渗储层岩电规律复杂,呈现非阿尔奇现象,难以用阿尔奇公式据电阻率资料求准饱和度参数。

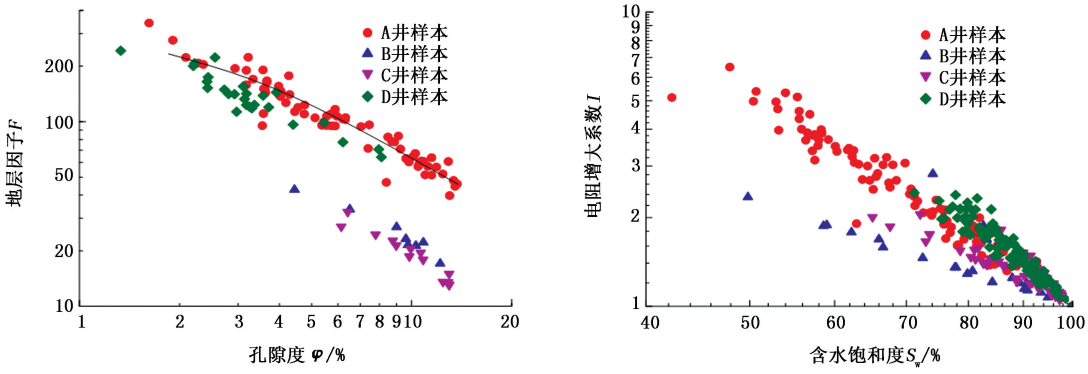


图 2　研究区相同岩性储层岩电参数特征

Fig. 2　Characteristics of rock electrical parameters in the same lithologic formation

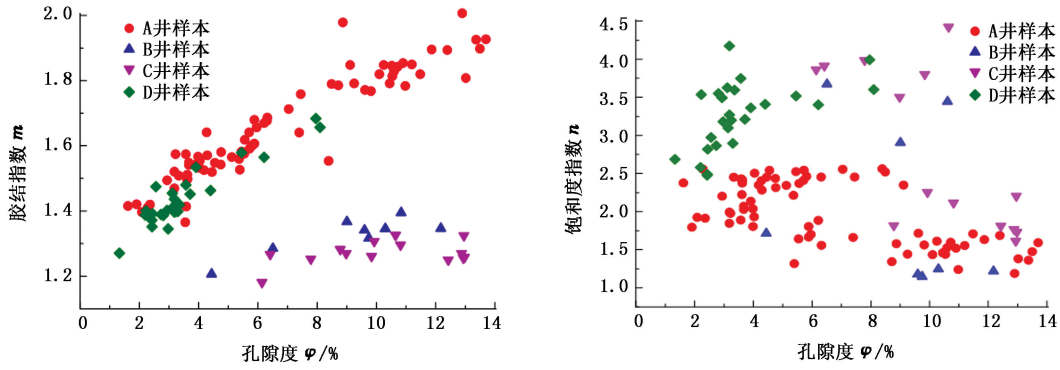


图 3　研究区相同岩性地层 m、n 参数随孔隙度的变化特征

Fig. 3　Variation characteristics of m and n parameters with porosity in the same lithologic formation

2　利用 J 函数计算饱和度

2.1　方法原理

Leverett 把实测岩心毛管压力与计算参考毛管压力的比值定义为岩心的 J 函数[16-17],并通过大量实验证明 J 函数与饱和度之间存在函数关系:

$$J(S_w)=\frac{p_c}{\sigma\cos\theta}\sqrt{\frac{k}{\varphi}}\ . \tag{1}$$

式中,S_w 为含水饱和度;p_c 为实测毛管压力,MPa;σ 为表面张力,mN/m;θ 为湿润角,(°);k 为渗透率,$10^{-3}\ \mu m^2$;φ 为孔隙度;$\sqrt{k/\varphi}$ 通常称为孔渗综合指数,主要反映孔隙结构;$\sigma\cos\theta/\sqrt{(k/\varphi)}$ 为计算参考毛管压力。对于一定埋深储层,可据式(2)得到地层条件下的毛管压力[18]:

$$p_c=H(\rho_w-\rho_g)g/1\,000\ . \tag{2}$$

式中,H 为储层距自由水界面高度,m;ρ_w 和 ρ_g 分别为地层水与储层条件下天然气密度,g/cm^3。

地层条件下的表面张力和湿润角可借用美国岩心公司提供的数据(表 3)。

表 3　美国岩心公司实验数据

Table 3　Experimental data of Cole Lab

条件	系统	湿润角 θ/(°)	表面张力 σ/(mN·m)	$\sigma\cos\theta$
实验室	空气/水银	140	480	367
地层	水/气	0	50	50
地层	油/水	88.35	30	0.866

由于气体在不同压力和温度下密度差异较大,不同埋藏深度的气体密度有所差异,因此对于式(2)中 p_c 采用积分法计算:

$$p_c=\left(H\rho_w-\int_{h_1}^{h_2}\rho_g\mathrm{d}h\right)g/1\,000. \tag{3}$$

式中,h_1 为气层垂深,m;h_2 为自由水界面垂深,m;ρ_g 为储层温度和压力条件下天然气密度,g/cm^3,可利用

气体平衡方程根据标准条件下的密度换算得出。

若能建立饱和度 S_w 与 J 函数之间的关系,就可以克服仅仅利用孔渗指数或毛管压力[19]单一因素计算饱和度的缺点,根据不同深度储层的毛管压力和储层物性参数就可计算出含水饱和度 S_w,从而避开难以用阿尔奇公式计算饱和度的困难。

2.2　按物性特征分类建立的 J 函数与饱和度关系

2.2.1　低孔渗储层孔隙结构分类

储层不同孔喉结构具有不同的毛管压力特征,决定了不同压力下的流体饱和度。因此对低孔渗储层的孔喉结构进行分析,分类建立 J 函数与饱和度之间的关系是提高饱和度计算精度的关键。

(1)不同孔喉结构毛管压力曲线形态类型划分。利用岩心压汞资料得到毛管压力曲线可对孔喉结构类型作出有效的划分[14,20]。分析研究区压汞资料,将毛管压力曲线分为 4 类,如图 4 所示。第Ⅰ类毛管压力曲线具有明显的歪度,排驱压力较低,粒度分选较好,退汞效率较高。第Ⅱ类毛管压力曲线具有一定的歪度,排驱压力稍大,有一定粒度分选和退汞效率。第Ⅲ类毛管排驱压力较高,毛管压力曲线呈单斜状,粒度分选差,退汞效率低。第Ⅳ类毛管压力曲线呈单斜状,排驱压力大,粒度分选很低,退汞效率很低。

(2)不同毛管压力曲线形态类型储层物性特征。统计不同类型毛管压力曲线对应的岩心孔隙度和渗透率物性参数分布特征如图 5、6 所示,汇总不同毛管压力曲线类型岩心特征参数如表 4 所示。第Ⅰ类储层孔隙度较高,渗流能力强,主要是分选好的

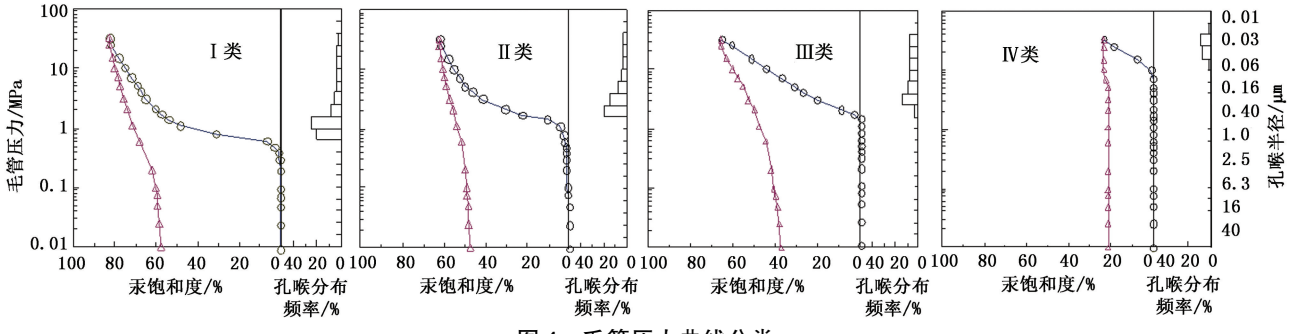


图 4　毛管压力曲线分类

Fig. 4　Different types of capillary pressure curve

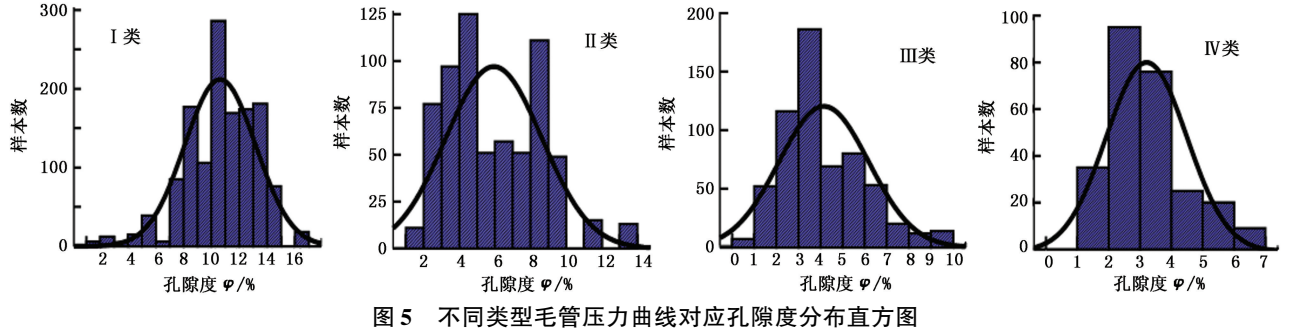


图 5　不同类型毛管压力曲线对应孔隙度分布直方图

Fig. 5　Porosity histogram corresponding to different type of capillary pressure curve

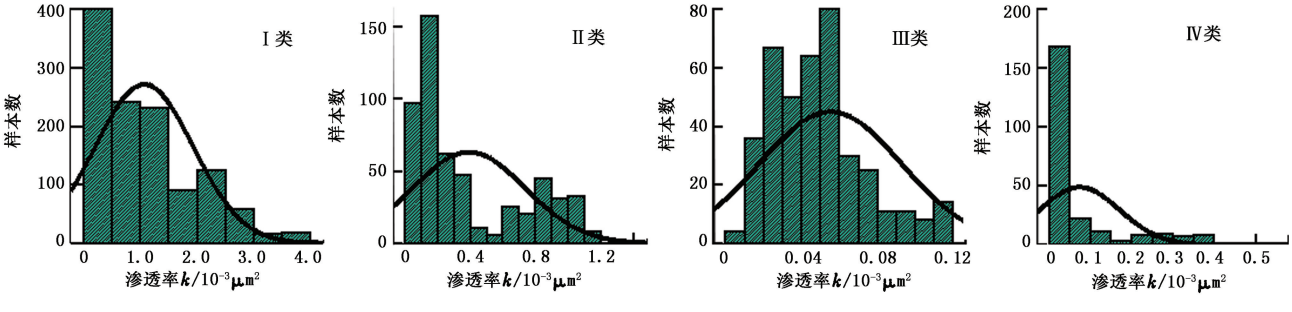


图 6　不同类型毛管压力曲线对应渗透率分布直方图

Fig. 6　Permeability histogram corresponding to different type of capillary pressure curve

表 4　4 类毛管压力曲线岩样特征参数

Table 4　Four types of capillary pressure curve characteristic parameters of rock samples

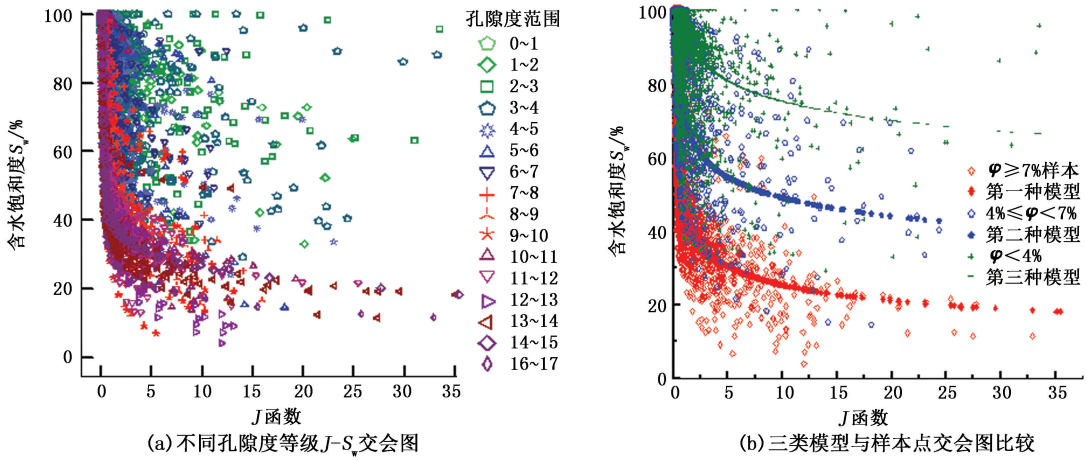
毛管压力曲线类型	孔隙度 φ/%	渗透率 $k/10^{-3}$ μm^2	孔渗指数 $(k/\varphi)^{0.5}$	平均孔喉半径/μm	平均排驱压力/MPa	岩性
Ⅰ类	7 ~ 15, 平均 10.6	0 ~ 2.5, 平均 2.07	1 ~ 5, 平均 3.0	0.56	0.94	分选好的细砂岩和粉砂岩
Ⅱ类	主峰 2 ~ 7, 次峰 7 ~ 10, 平均 5.9	0 ~ 0.4, 0.6 ~ 1.1 双峰, 平均 0.39	0.5 ~ 4, 平均 2.41	0.44	1.48	粉砂岩和细砂岩, 部分为含砾砂岩
Ⅲ类	1 ~ 7, 平均 4.15	0.01 ~ 0.1, 平均 0.09	0.5 ~ 1.5, 平均 1.25	0.15	4.52	含灰细砂岩、灰质粉砂岩、含砾砂岩
Ⅳ类	1 ~ 4, 平均 3.2	0 ~ 0.1, 平均 0.07	0.05 ~ 1.5, 平均 1.39	0.04	9.70	泥质粉砂岩为主, 少量含砾砂岩

细砂和粉砂岩。第Ⅱ类孔隙度和孔隙之间的连通性相对较好,一般是粉砂和细砂岩,部分为含砾砂岩。第Ⅲ类储层孔隙度小,连通性较差,主要为含灰细砂岩、灰质粉砂岩、含砾砂岩。第Ⅳ类储层分选差,孔隙度小,孔隙之间连通性差,以泥质粉砂岩为主,有少量含砾砂岩。

2.2.2　据物性差异分类建立的 J 函数与饱和度的关系

虽然毛管压力曲线可直接反映孔隙结构特征,但常规测井资料难以直接对孔隙结构进行定量评价,因此不能直接根据毛管压力曲线形态类型建立 J 函数与 S_w 之间的关系。文献阐明低孔渗砂岩储层孔隙结构与物性之间存在一定的内在关系[21-22]。分析研究区 4 类毛管压力曲线岩心对应的孔隙度、渗透率及孔渗指数分布范围(表 4),发现 4 类毛管压力曲线与孔隙度分布范围有较好的对应关系,因此可根据不同孔隙度分布范围,分类建立 J 函数与饱和度 S_w 之间的函数关系。

根据不同孔隙等级 J-S_w 交会图(图 7(a)),不同孔隙度范围下将 J 函数与含水饱和度之间的关系建立了 3 种统计关系(图 8,其中 S_w 为离心饱和度),具体回归关系式如表 5 所示。将 3 种统计关系与实验资料得到的 J 函数和 S_w 交会图比较得到如图 7(b)所示结果,可以看出 3 种关系与 J-S_w 交会图 3 个区域的重心线吻合很好,表明很好地表达了样本数据的分类特征,较好再现了研究区 J 函数与 S_w 之间的内在关系。



(a) 不同孔隙度等级 J-S_w 交会图　　(b) 三类模型与样本点交会图比较

图 7　J 函数与 S_w 的交会图

Fig. 7　J function and S_w crossplot

表 5　3 种 S_w-J 函数回归关系

Table 5　Three S_w-J function regression formulas

编号	表达式	相关系数 R	适用条件
一	$\lg S_w = -0.339 - 0.274\lg J$	-0.865	$\varphi \geqslant 7\%$, 主要为第Ⅰ类毛管压力曲线
二	$\lg S_w = -0.16 - 0.159\lg J$	-0.815	$4\% \leqslant \varphi < 7\%$, 主要为第Ⅱ类毛管压力曲线
三	$\lg S_w = -0.025 - 0.105\lg J$	-0.600	$\varphi < 4\%$, 主要为第Ⅲ、第Ⅳ类毛管压力曲线

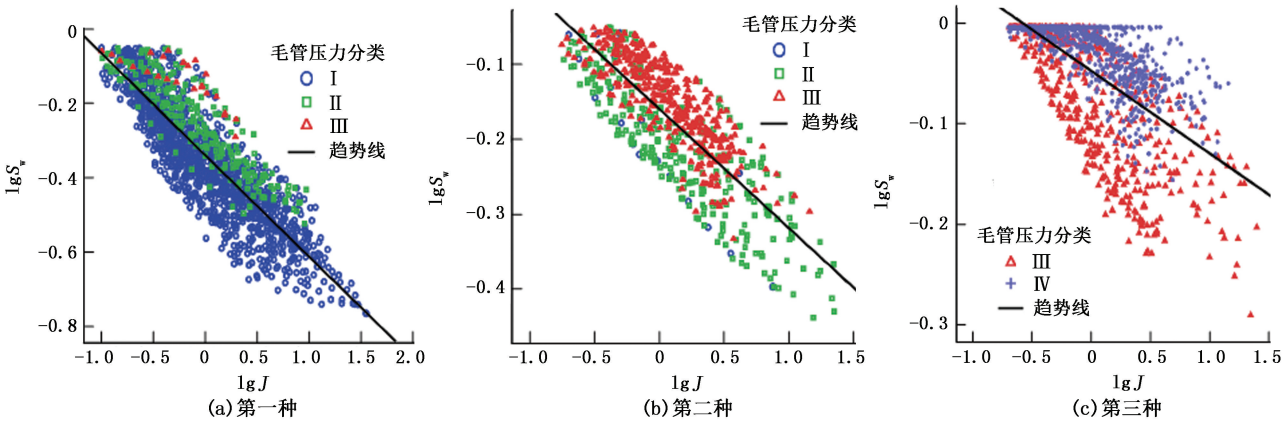


图 8　3 种 S_w–J 函数统计模型

Fig. 8　Three S_w–J function statistical model

3　应用效果分析

3.1　计算精度

对研究区近 30 口井的实际资料处理,以岩心和生产资料为依据,与该研究区已有变 m 指数和孔渗指数法计算结果相比计算精度得以显著提高。

图 9 为有离心饱和度及核磁实验饱和度的井段(左 A 井、右 B 井),与电阻率变 m 指数法和孔渗指数法所求饱和度相比,可以看出 J 函数法没有剧烈的震荡变化,与物性变化趋势更加吻合,与离心及核磁实验饱和度更为接近。统计不同方法计算饱和度与岩心实验饱和的误差(表 6),可以看出由 J 函数算出的饱和度精度与实验数据相比相对误差约 15%,明显高于孔渗指数(相对误差约 20%),与电阻率变 m 指数法(相对误差约 30%)相比精度提高近 1 倍。

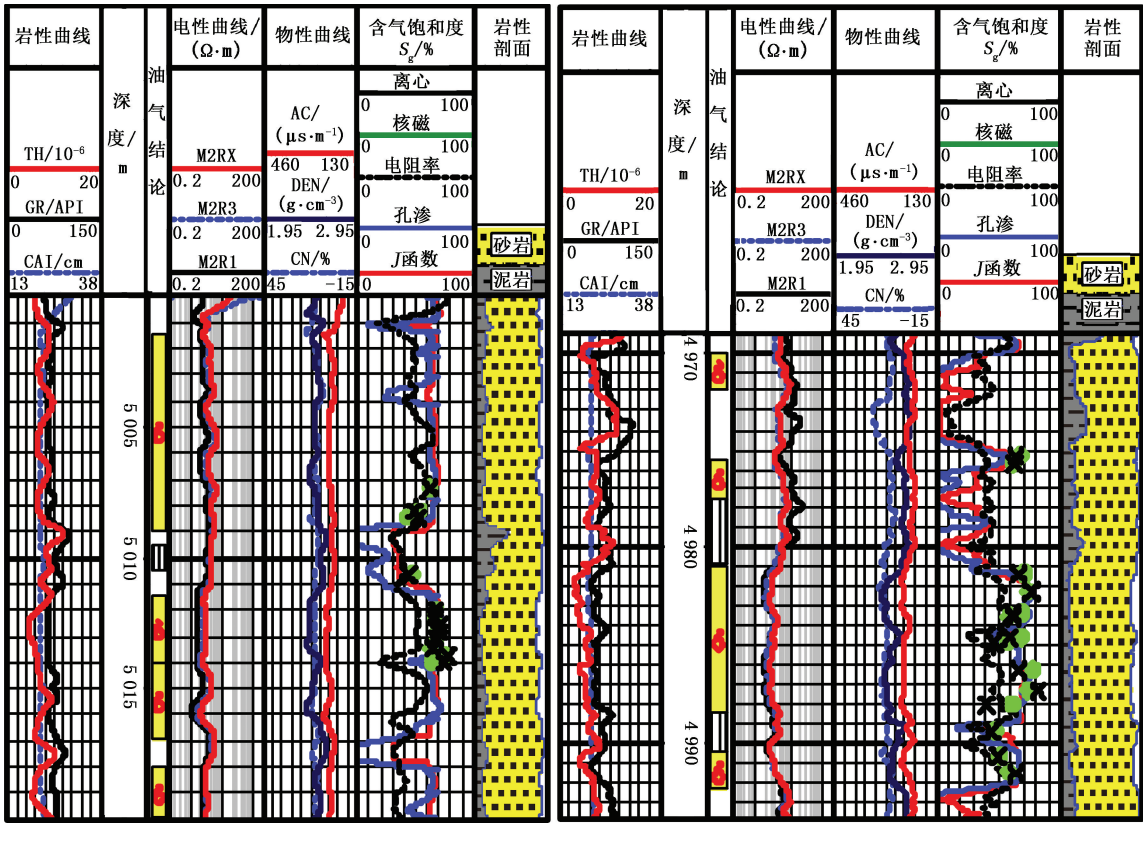


图 9　利用 J 函数计算饱和实例

Fig. 9　Example of using J Function to calculate saturation

表 6　不同方法计算饱和度与岩心核磁及离心饱和度误差对比

Table 6　Different calculating saturation errors compared with core NMR and centrifugal saturation

井名	岩心饱和度	计算饱和度相对误差/%		
		变 m 指数法	J 函数法	孔渗指数法
A	核磁饱和度	26.45	11.525	16.825
B	核磁饱和度	34.25	15.93	19.16
平均	核磁饱和度	30.70	13.90	18.10
A	离心饱和度	24.37	11.24	16.80
B	离心饱和度	30.60	18.77	21.80
平均	离心饱和度	27.70	15.30	19.50
平均	所有	29.19	14.59	18.79

3.2　饱和度的变化

由于孔渗指数法不能反映气藏高度对饱和度的影响,就难以反映气水过渡带饱和度的变化;低孔渗储层流体对电阻率的贡献小、岩电关系复杂,因此用电阻率也难以反映气水界面附近饱和度的变化趋势。而 J 函数是气藏压力和孔渗指数的函数,因此能反映气水界面附近气水过渡带含气饱和度的变化规律。

图 10 为 C 井气水界面附近不同含气饱和度计算方法结果比较。根据由测试井得出的该气藏理想均质地层统一纯气水界面海拔深度,根据测斜数据可算出该井对应测深为 5309.27 m,与图中所示气

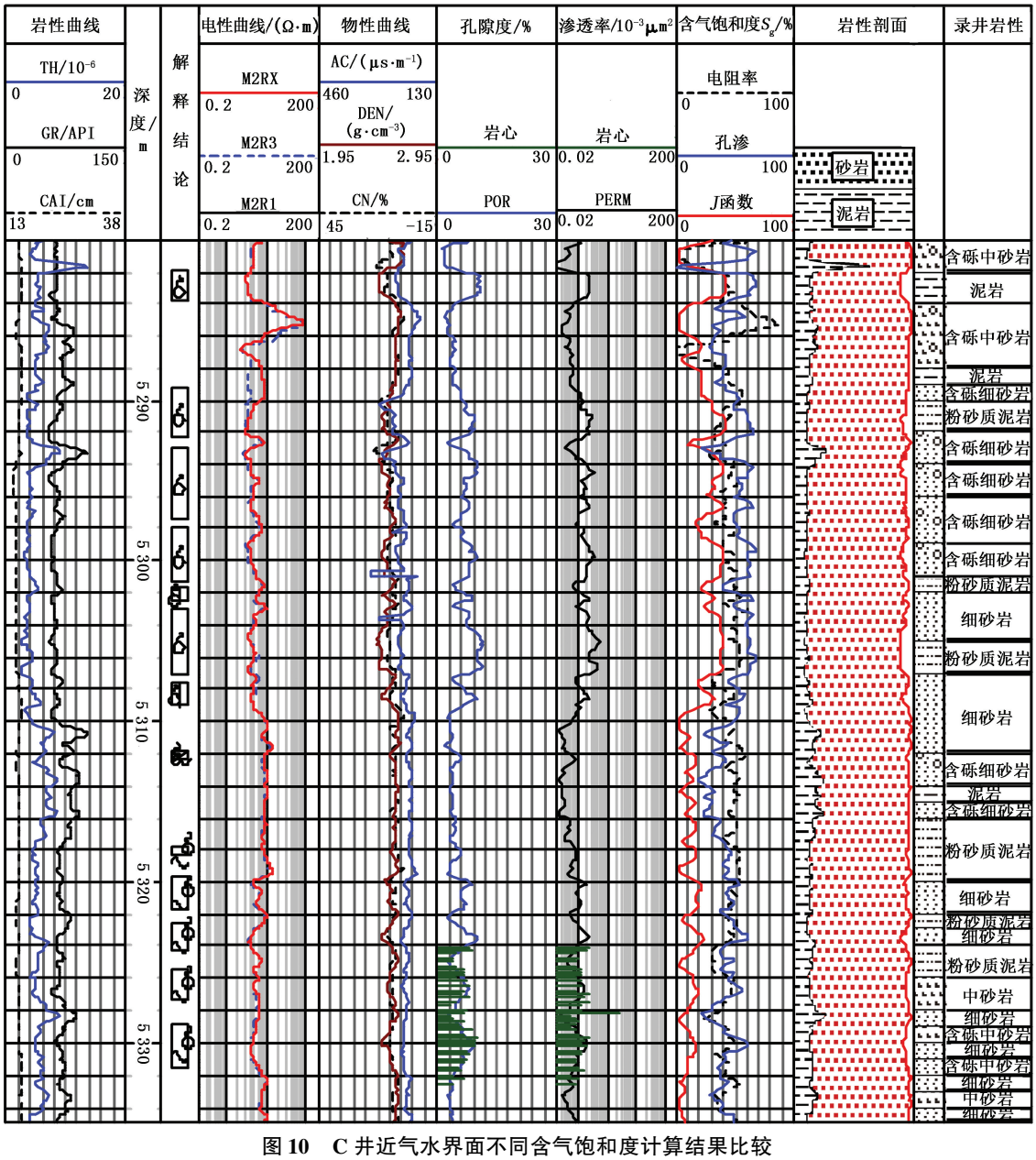


图 10　C 井近气水界面不同含气饱和度计算结果比较

Fig. 10　Comparison of different calculation results nearby gas-water interface of well C

水界面基本吻合,差异应为不同井位地层物性的非均质影响所致。从图 10 中可以看出,无论是利用孔渗指数法还是利用电阻率采用变 m 指数法得到的饱和度都难以反映气水界面附近含气饱和度随气藏高度的变化,唯有利用 J 函数法得到的饱和度呈现明显从上到下、由大到小的过渡带。

4 结 论

(1)该方法与阿尔奇变 m 指数法相比计算精度可提高 1 倍、与孔渗指数方法相比精度也显著提高,而且可反映气水界面附近饱和度的渐变情况。

(2)该方法仅利用岩心常规物性和压汞实验资料,不需要得到 m 指数的变化规律,因此与变 m 指数方法相比可节省大量的岩电参数实验时间和费用。

(3)该方法仅利用常规测井资料就可对低孔渗致密储层求得较高精度的油气饱和度,可降低测井费用。

(4)在具有岩心压汞资料条件下,对于常规测井资料,采用本文中方法利用 J 函数可综合反映孔隙结构和毛管压力的影响,是提高低孔渗致密储层含气饱和度计算精度的首选。不足之处是事先需要综合测井与测试资料对气水界面作出判定,另外还需要注意不同油气藏类型影响因素及区域差异性。

参考文献:

[1] 裘怿楠,薛叔浩,应凤祥. 中国陆相油气储集层[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.

[2] 曾大乾,李淑贞. 中国低渗透砂岩储层类型及地质特征[J]. 石油学报,1994,15(1):38-46.
ZENG Daqian, LI Shuzhen. Types and characteristics of low permeability sandstone reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1994,15(1):38-46.

[3] 孙建孟,王克文,李伟. 测井饱和度解释模型发展及分析[J]. 石油勘探与开发,2008,35(1):101-107.
SUN Jianmeng, WANG Kewen, LI Wei. Development and analysis of logging saturation interpretation models [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008,35 (1):101-107.

[4] 谢然红,肖立志,张建民,等. 低渗透储层特征与测井评价方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006,30(1):47-51,55.
XIE Ranhong, XIAO Lizhi, ZHANG Jianmin, et al. Low permeability reservoir characteristics and log evaluation method[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2006,30(1):47-51,55.

[5] 宋延杰,朱云峰,李庆峰,等. 徐家围子地区深层特低孔渗砂岩储层含气饱和度模型对比[J]. 科学技术与工程,2011,11(9):1912-1916.
SONG Yanjie, ZHU Yunfengi, LI Qingfeng, et al. Comparison of gas saturation models for deep extra-low porous permeable sand reservoir in Xujiaweizi area[J]. Science Technology and Engineering, 2011,11(9):1912-1916.

[6] 周海民,周凤鸣. 油田复杂砂岩储层测井评价对策与实践[J]. 石油学报,2006,27(3):138-142.
ZHOU Haimin, ZHOU Fengming. Countermeasure and practice of logging evaluation for complicated sand reservoirs in Jidong Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3):138-142.

[7] 姚军朋,司马立强. 合川地区低孔渗砂岩储层含水饱和的评价方法[J]. 天然气工业,2010,30(10):22-25.
YAO Junpeng, SIMA Liqiang. Evaluation methods for water saturation of low porosity and low permeability sandstone reservoirs in Hechuan area, middle Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010,30(10):22-25.

[8] ZHANG Chenguang, MAO Zhiqiang, OUYANG Jian, et al. The new technique for evaluation water saturation of the "low resistivity" in J field: proceedings of SPWLA 35th Annual Logging Symposium, 19-22 June, 1994, Tulsa, Oklahoma, SPWLA-1994-JJJ[C]. Houston, TX: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts,1994.

[9] 王黎,沈爱新,万金彬. 低孔低渗砂岩岩电实验结果研究[J]. 江汉石油学院学报,2003,25(增刊):58-59.
WANG Li, SHEN Aixin, WAN Jinbin. Rock-electric experimental result study of low permeability and low porosity sandstone[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003,25(sup A):58-59.

[10] 孙小平,石玉江,姜英昆. 复杂孔隙结构储层含气饱和度评价方法[J]. 天然气工业,2000, 20(3):41-44.
SUN Xiaoping, SHI Yujiang, JIANG Yingkun. Method of evaluating gas saturation in the reservoir with complicated pore structures[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(3):41-44.

[11] 杨超华. 塔巴庙区块上古生界低渗透砂岩气层测井解释技术[J]. 测井技术,2002,26(6): 490-495.
YANG Chaohua. Applications of log interpretation in the upper Paleozoic low permeable sandstone gas reservoir in Tabamiao Block[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(6):490-495.

[12] 宋延杰,王海琦,唐晓敏,等. 南海东部低孔低渗储层测井评价方法[J]. 大庆石油学院学报,2010,34 (6):106-110.
SONG Yanjie, WANG Haiqi, TANG Xiaomin, et al.

Logging evaluation of low porosity and permeability reservoirs in the east of South Sea of China[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute,2010,34(6):106-110.

[13] 伍泽云,王晓光,王浩. 低孔低渗储层中确定 Archie 参数 m 与 a 的改进方法[J]. 石油天然气学报,2009,31(3):76-78,121.
WU Zeyun, WANG Xiaoguang, WANG Hao. Improvement on the method to determine Archie parameters a and m in low porosity and low permeability reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009,31(3):76-78,121.

[14] 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.

[15] 姚军朋,司马立强. 合川地区低孔低渗砂岩储层含水饱和度的评价方法[J]. 天然气工业,2010,30(10):22-25.
YAO Junpeng, SIMA Liqiang. Evaluation methods for water saturation of low porosity and low permeability sandstone reservoirs in the Hechuan area, middle Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(10):22-25.

[16] LEVERETT M C. Capillary behavior in porous solids [J]. Transaction of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers,1941,142:152-169.

[17] TAO Gang, MOHAN K. A more general capillary pressure curve and its estimation from production data[R]. SPE 108180, 2007.

[18] 杨通佑, 范尚炯, 陈元千. 石油及天然气储量计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998:96-102.

[19] 赵国欣,朱家俊,关丽. 用毛管压力资料求取原始含油饱和度的方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(4):38-41.
ZHAO Guoxin, ZHU Jiajun, GUAN Li. Method of applying capillary pressure data to calculate initial oil saturation[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2008,32(4):38-41.

[20] 罗蛰潭, 王允诚. 油气储集层的孔隙结构[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

[21] 张曙光, 石京平,刘庆菊,等. 低渗致密砂岩气藏岩石的孔隙结构与物性特征[J]. 新疆地质, 2004, 22(4):438-441.
ZHANG Shuguang, SHI Jingping, LIU Qingju, et al. Research on pore structure and character of tight sand gas reservoirs[J]. Xinjiang Geology, 2004,22(4):438-441.

[22] 贺承祖,华明琪. 低渗砂岩气藏的孔隙结构与物性特征[J]. 新疆石油地质,2005,26(3):280-284.
HE Chengzu, HUA Mingqi. Characteristics of pore structure and physical property of low permeability sandstone reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(3):280-284.

(编辑　修荣荣)