

胜坨油田沙河街组二段复杂断块 油藏水淹层测井解释研究

陈宁宁, 杨少春, 黄建廷

(中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

摘要: 以胜坨油田发育的典型复杂断块油藏为例, 利用密闭取芯井资料建立判别关系和测井解释模型, 进行沙河街组二段 1-3 砂组复杂断块油藏水淹层测井解释。首先介绍了该水淹层测井响应特征, 接着应用多项式趋势面分析方法对测井数据进行标准化处理, 并选择测井资料齐全、质量可靠、有钻井取芯和录井、试油资料的井为关键井, 结合试油试采、岩芯分析资料建立测井解释模型。结果表明: 胜坨油田沙河街组二段 1-3 砂组复杂断块油藏已经进入高含水阶段, 水淹层发生明显的自然电位曲线基线偏移、地层电阻率降低、自然伽马降低、声波时差增大等现象; 选择沙二段顶部的高阻白云岩段(厚度为 8~12 m)作为标准层进行标准化处理; 声波时差三次趋势面分析效果较好, 拟合度达到 22.6%, 平均校正量为 $14 \mu\text{s}/\text{m}$; T4j17、T2-121 井取芯井段较长且采收率较高, 分析化验资料较丰富, 测井资料齐全且质量较好, 能够反映沙二段 1-3 砂组复杂断块油藏储层特征, 被选为关键井; 建立泥质体积分数、粒度中值、孔隙度、渗透率、含水饱和度等解释模型。最后, 通过对水淹层的测井资料进行逐井处理、计算机逐点或按层输出主要储层参数等 3 个方面检验解释模型, 定量评价了测井解释模型的应用效果。结果表明: 测井解释结果与岩芯物性和生产数据吻合较好, 获得了较为可靠的地区储层地质分析结果, 可为注水开发调整提供有效的参考。

关键词: 测井解释; 复杂断块; 水淹层; 沙河街组; 胜坨油田

中图分类号: P631.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)04-0355-08

Study on Log Interpretation for Water Flooded Layer of the Complex Fault Block Oil Reservoir in the Second Member of Shahejie Formation of Shengtuo Oilfield

CHEN Ning-ning, YANG Shao-chun, HUANG Jian-ting

(School of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China)

Abstract: Based on the data of sealed core well, taking the typical complex fault block reservoir in Shengtuo Oilfield as an example, log interpretation model was built to interpret the well logging for water flooded layer of the complex fault block oil reservoir in the 1-3 sandstone group of the Second Member of Shahejie Formation. Firstly, response characteristic of the water flooded layer was introduced; secondly, log data was standardized by the method of polynomial trend surface analysis; thirdly, the key well with complete log data, dependable quality, drilling core and logging and test oil data was selected; fourthly, log interpretation model was built according to oil testing and extraction and drill core data. The results showed that the complex fault block oil reservoir in the 1-3 sandstone group of the Second Member of Shahejie Formation of Shengtuo Oilfield had been in the stage of high water cut, baseline of self potential curve shifted, formation resistivity and natural gamma decreased, and acoustic time increased in water flooded layer; high resistant dolomite segment (thickness was 8-12 m) in the top of the Second Member of Shahejie Formation was selected as a key bed for standardization; the method of cubic trend surface analysis for acoustic time was acceptable, the degree of fitting was 22.6%, the average correcting value was $14 \mu\text{s}/\text{m}$; T4j17 and T2-121 were selected as key wells in which core well section and recovery of core were optimal and

收稿日期: 2010-01-28

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金项目(2007)

作者简介: 陈宁宁(1984), 女, 山东陵县人, 工学硕士研究生, 从事储层地质学及油藏描述研究。E-mail: chenningning-0116@163.com

related data were abundant with high quality, to show the characteristics of the complex fault block oil reservoir in the 1-3 sandstone group of the Second Member of Shahejie Formation; the log interpretation models built were shale volume fraction, median size, porosity, permeability, water saturation, and so on. Finally, log interpretation data was used to export the main parameters by means of well-by-well, point-by-point and layer-by-layer, and verify the models, in order to evaluate the effect of log interpretation models. The results showed that compared with physical property of core and related observation, the simulation of log interpretation models had good agreement with the observed data, and could provide an effective reference for improving waterflood development.

Key words: log interpretation; complex fault block; water flooded layer; Shahejie Formation; Shengtuo Oilfield

0 引言

胜坨油田一区位于胜坨油田的西部高点,北面以 7 号大断层为界与坨 15 断块相接,东面以东西两高点的鞍部为界与胜坨油田二区相连,西面和南面与广阔的边水相接,属辫状河沉积体系。胜坨油田一区沙河街组二段(简称“沙二段”)1-3 砂组断层多,不同性质、不同级次的正断层呈盆倾断裂系统,沉积特征比较复杂,砂体侧向变化快,储层非均质性强,是典型的复杂断块油藏。沙二段 1-3 砂组复杂断块油藏于 1964 年 6 月投产,1966 年 7 月实施注水开发,目前已进入特高含水期,1998 年 4 月开展了聚合物驱三次采油试验,处于后续水驱阶段,油藏递减加快、油藏稳产难度进一步加大等问题已愈发突出。

复杂断块油藏模拟难度大,优化测井资料的处理解释是提高复杂断块油藏水淹层研究精度的基础^[1-3]。笔者首先定性介绍了胜坨油田沙二段 1-3 砂组复杂断块油藏水淹层测井响应特征,接着对测井数据进行标准化处理,并选择测井资料齐全、质量可靠、有钻井取芯和录井、试油资料的井为关键井进行研究,随后建立定量测井解释模型,最后量化探讨了测井解释模型的应用效果。

1 水淹层基本特征

通过研究发现,沙二段 1-3 砂组复杂断块油藏水淹层测井响应特征有以下特点:

(1) 油层水淹后,自然电位曲线基线偏移(图 1)。在油层界面,自然电位上部基线偏移,表明油层上部水淹;自然电位下部基线偏移,表明下部水淹。自然电位基线偏移越大,表明水淹程度越高。若地层的中部或全部均匀水淹,自然电位基线不偏移,但幅度下降。

(2) 随着注入水的推进,混合液的矿化度不断降低,原油被不断采出,地层的含油饱和度降低,含水饱和度增加,使得地层电阻率降低。

(3) 随着注入水的波及,地层吸附放射性物质能力下降,导致自然伽马降低(图 1),自然伽马涨落现象减弱,从而导致自然伽马曲线变得平滑。

(4) 注水开发过程中,同一油层声波的传播速度有较明显的衰减,测井纪录的声波时差增大。强水洗区孔隙度、渗透率升高^[4]。

2 测井数据标准化

储层评价主要依赖于地质岩芯分析及测井资料。由于测井资料受到测井系列、仪器刻度、人为操作等多种因素影响,使得测井资料在一定程度上存在误差。为了提高测井资料质量,需对测井资料进行标准化,使研究区测井数据统一在同一刻度标准下,而标准化的关键在于选择合理标准层^[5]。通过地层对比分析,选择沙二段顶部的高阻白云岩段(厚度为 8~12 m)作为标准层,该白云岩段在全区分布,电性特征明显,测井曲线数值呈规律性变化。研究区断块内部地质背景、构造发育较为复杂,沉积体分布不均一,故选用多项式趋势面分析方法^[6]对处理影响较大和系统误差较大的声波时差和感应电导率等测井曲线进行标准化。

根据选取的标准层做各井标准层的频率分布直方图,确定相应的特征峰值,各标准层声波时差均呈现正态分布特征。利用趋势面分析程序,对声波时差、感应电阻率曲线进行标准化处理。应用效果表明,声波时差三次趋势分析效果较好,拟合度较高(图 2),可达到 22.6%,平均校正量为 14 $\mu\text{s}/\text{m}$ 。校正后,不同井的测井特征具有可对比性,为储层识别分析奠定基础。

3 关键井研究

测井解释评价与关键井的选择有很大关系^[7-8]。选择测井资料齐全、质量可靠,有钻井取芯和录井、试油资料的井作为关键井进行综合研究。研究区共有取芯井 5 口,根据各取芯井的资料状况,选取 T4J17、T2-121 作为关键井,这两口井取芯井段较长

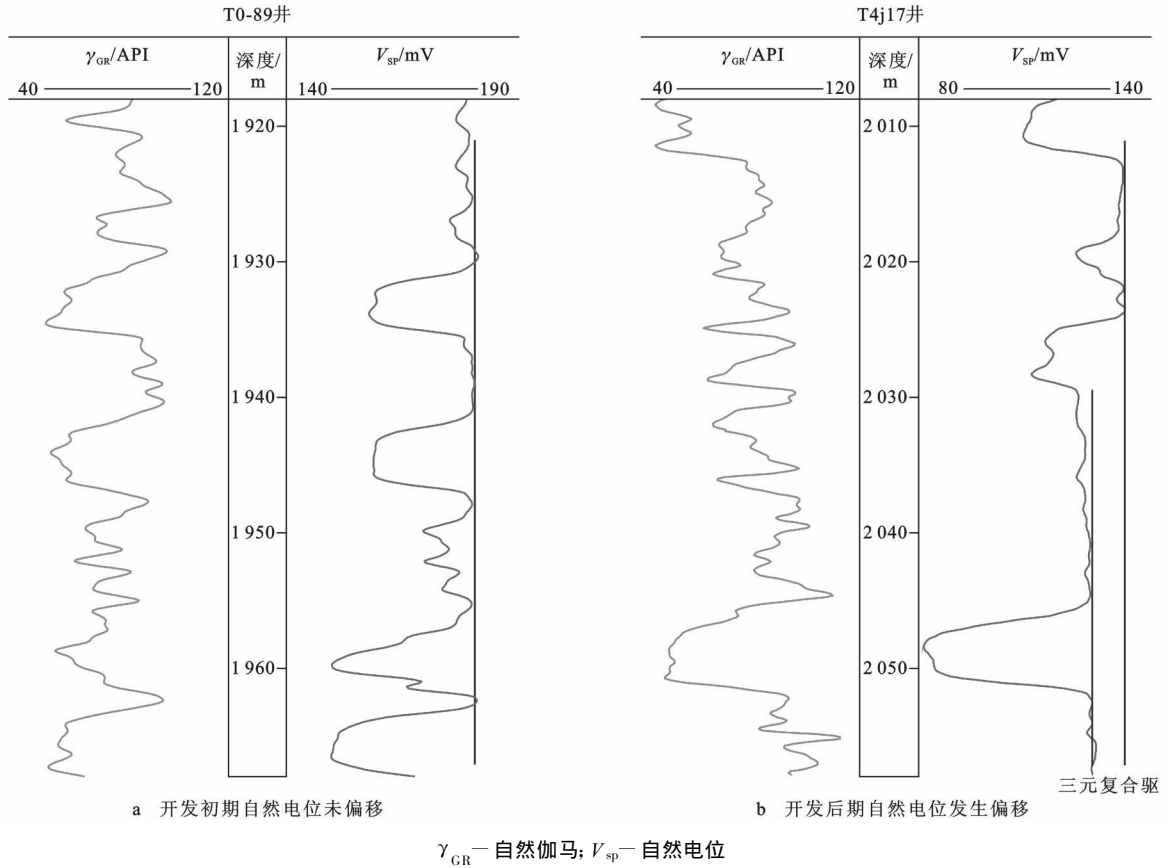


图 1 水淹层自然伽马与自然电位曲线特征

Fig. 1 Properties of Natural Gamma and Self Potential of Water Flooded Layer

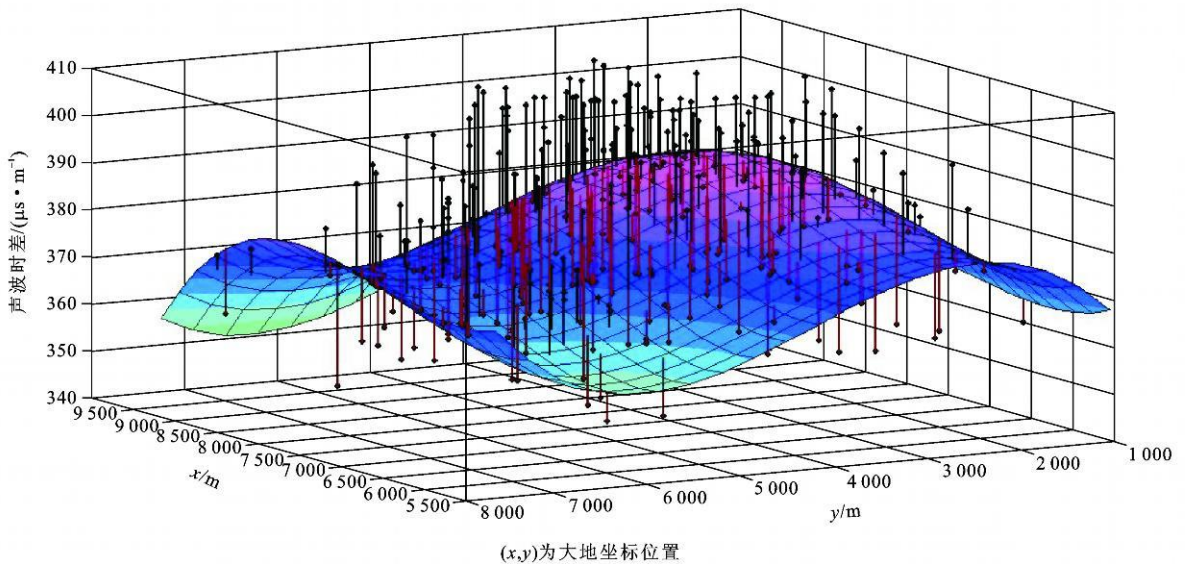


图 2 标准层声波时差趋势面

Fig. 2 Trend Surface of Acoustic Time of Index Bed

且收获率较高, 分析化验资料较丰富, 测井资料齐全且质量较好, 能够反映沙二段 1-3 砂组复杂断块油藏储层特征。为了保证所建模型的精度及便于在计算机自动处理以及确定岩芯分析数据和测井数据间的相关性, 需进行数据校正和岩芯归位, 以提高岩芯

数据的准确性。岩芯归位后, 发现研究区目的层泥质体积分数(粒径小于 0.01 mm 的岩石体积分数)与粒度中值的相关系数为 0.78; 孔隙度与渗透率的相关系数为 0.84; 孔隙度和声波时差的相关性较好, 超过 0.90; 孔喉半径平均值与孔隙度和渗透率

的相关系数也均在 0.80 以上。总体来看,岩性、物性(表 1)、电性关系较好,可用地质信息刻度测井信息,最终达到用测井信息还原地质信息的目的。

表 1 岩性与物性参数相关系数

Tab. 1 Related Coefficient Between Lithologic and Physical Parameters

项目	孔隙度	渗透率	泥质体积分数	粒度中值
孔隙度	1.000 0	0.838 2	0.674 2	0.670 5
渗透率		1.000 0	0.724 3	0.808 8
泥质体积分数			1.000 0	0.784 7
粒度中值				1.000 0

4 定量测井解释模型的建立

在测井资料处理解释以及岩芯分析、准确归位后,进行测井储层评价的关键是建立岩石物性与测井数据之间的关系^[9]。不同类型油藏有着不同的地质特点^[10],复杂断块油藏沉积体系多变、储层类型多样、油水关系复杂,对应的测井响应特征也有其特殊的变化规律。因此,针对研究区断块油藏特征建立能够定量表征其变化的解释模型。研究区测井资料多为声感组合测井系列,年限跨度大,系统误差较大,经预处理校正及标准化,资料的可信度增加。在储层“四性”关系分析结果的基础上,结合生产动态资料和经验公式,建立适合研究区复杂断块油藏储层岩性、物性、含油性评价参数的测井解释模型。

4.1 泥质体积分数 (V_{sh})和粒度中值 (d_m)解释模型

研究区泥质体积分数的计算主要利用自然电位曲线。解释模型为

$$V_{sh} = \frac{2^{\theta R_{sp}} - 1}{2^{\theta} - 1} \quad (1)$$

式中: R_{sp} 为自然电位曲线测井响应值的相对值; θ 为经验系数,研究区取 3.7。岩芯数据分析发现,粒度中值与泥质体积分数相关系数可达 0.78,由泥质体积分数可获得粒度中值的计算模型(图 3),即

$$d_m = 0.3176 \times V_{sh}^{0.4828} \quad (2)$$

4.2 孔隙度 (φ)和渗透率 (k)解释模型

孔隙度计算模型中用到的样本数据,主要是岩芯归位后的岩芯分析数据和标准化的测井数据^[11-12],主要用声波时差测井确定(图 4)

$$\varphi = 0.16961 \Delta t_{AC} - 23.364 \quad r = 0.91 \quad (3)$$

式中: Δt_{AC} 为声波时差($\mu s/m$); r 为相关系数。然而,在研究区个别井缺少声波测井资料的情况下,孔隙度的计算模型主要采用关键井岩芯分析孔隙度与粒度中值的回归公式

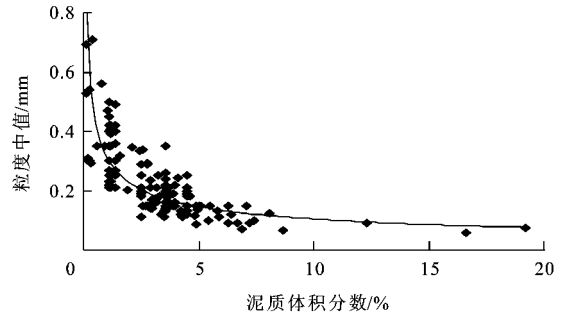


图 3 粒度中值与泥质体积分数关系

Fig. 3 Relationship Between Median Size and Shale Volume Fraction

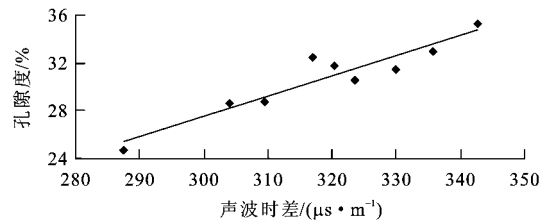


图 4 孔隙度与声波时差关系

Fig. 4 Relationship Between Porosity and Acoustic Time

$$\varphi = 1 / (0.0268 + 0.0012 / d_m) \quad r = 0.81 \quad (4)$$

可利用常规井资料及其导出参数与渗透率的经验关系来预测渗透率^[13]

$$\lg k = 4.764 \lg \varphi + 2.17876 \lg d_m - 2.3235 \quad r = 0.87 \quad (5)$$

4.3 含水饱和度 (S_w)解释模型

水淹层岩石物理实验表明,水淹层岩石的电阻率指数与含水饱和度在双对数坐标中为一直线,且岩芯分析表明,胜坨油田一区沙二段储层岩性多为较纯的细砂岩和粉砂岩,可以采用以纯砂岩为骨架模型的阿尔奇公式计算含油饱和度,因此可利用阿尔奇公式来计算水淹层的含水饱和度。其解释模型为

$$S_w = [abR_w / (\varphi^m R_t)]^{1/n} \quad (6)$$

式中: R_w 为地层水电阻率($\Omega \cdot m$); R_t 为地层真电阻率($\Omega \cdot m$); a, b, m, n 值是通过取样模拟地下条件进行岩电实验获取的参数,其值分别为 0.490 4、1.014 7、2.392 6、1.919 9。

4.4 束缚水饱和度 (S_{wi})、残余油饱和度 (S_{or})解释模型

束缚水饱和度对于确定储层的流体性质、揭示储层的原始含油气饱和度、分析水淹状况以及估算储层的相对渗透率和含水率都有重要意义。束缚水饱和度与孔隙度具有较好的相关关系,而孔隙度是用测井信息容易求取的地层参数^[14]。根据相对渗透率分析资料进行回归分析,得到利用孔隙度求解束缚水饱和度的解释模型

$$S_{wi} = 236.43 \times e^{-0.075 1^p} \quad r = 0.79 \quad (7)$$

根据相对渗透率公式得知束缚水饱和度与残余油饱和度之间存在关系, 从而回归得到残余油饱和度解释模型

$$S_{or} = -0.309 7S_{wi} + 35.596 \quad r = 0.79 \quad (8)$$

4.5 油水相对渗透率(k_{ro} 、 k_{rw})解释模型

实验室测定结果表明, 相对渗透率是储层含水饱和度、束缚水饱和度和残余油饱和度的函数。其中含水饱和度由阿尔奇公式得出。根据这一实验结果及研究区相渗分析资料, 通过拟合得到适合研究区且计算精度较高的相对渗透率解释模型

$$k_{ro} = 3.871 9(1 - S_w - S_{or})^2 - 0.324 6(1 - S_w - S_{or}) + 0.033 4 \quad r = 0.87 \quad (9)$$

$$k_{rw} = 0.216 9(S_w - S_{wi}) / (1 - S_{wi} -$$

$$S_{or})^{1.402 1} \quad r = 0.86 \quad (10)$$

式中: k_{ro} 为油相对渗透率; k_{rw} 为水相对渗透率; S_w 的计算采用阿尔奇公式。

4.6 含水率(F_w)解释模型

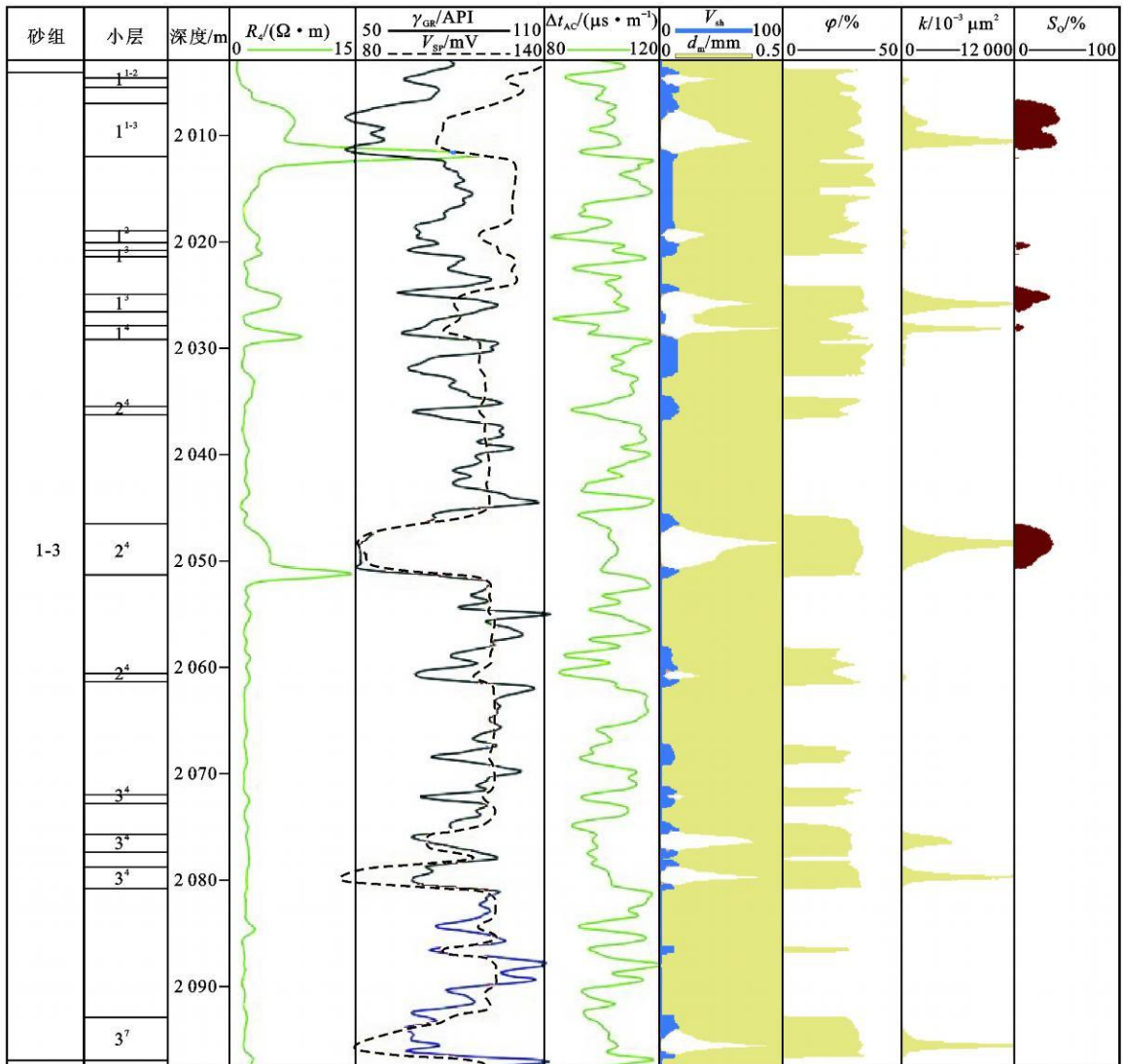
在得到油水相对渗透率之后, 一般采用以下近似公式计算水淹层判别参数含水率

$$F_w = 1 / [1 + (k_{ro} \mu_w) / (k_{rw} \mu_o)] \quad (11)$$

式中: μ_w 、 μ_o 分别为地层水和石油的黏度(MPa·s)。

5 应用效果分析

对研究区复杂断块油藏各测井资料进行逐井处理, 计算机逐点或按层输出孔隙度、泥质体积分数、渗透率、粒度中值、含油饱和度、含水饱和度等各种主要储层参数以及取芯井的测井解释结果图(图 5)。



R_t -4 m 梯度电阻率; S_o -含油饱和度; 开发特高期

图 5 T4j17 井测井解释结果

Fig. 5 Log Interpretation Results of Well T4j17

单井处理与解释结果的准确与否,直接关系到所建模型的准确性^[15-16]。因此,利用数理统计方法,将处理出的参数与岩芯分析比较,实现处理效果的定量分析。最终处理效果(表 2)表明,孔隙度的平均绝对误差为 1.13%,平均相对误差为 3.64%,渗透率的平均相对误差为 21.0%。总体看来,各类误差在规定误差范围内,效果较为理想。

表 2 岩芯分析与测井解释数据误差

Tab. 2 Errors of Core Analysis and Log Interpretation Data

井号	井段/m	孔隙度/%				渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$					
		样品数	岩芯分析结果	测井解释结果	绝对误差	相对误差	样品数	岩芯分析结果	测井解释结果	绝对误差	相对误差
T2-121	1 963.1~1 967.6	33	31.0	30.07	0.93	3.00	33	2 276	1 455	821	36.1
	1 986.4~1 989.9	16	31.9	29.86	2.04	6.39	16	1 711	1 306	405	23.6
	1 998.8~2 000.0	6	33.9	32.54	1.36	4.00	6	5 237	4 404	834	15.9
T4j17	2 009.0~2 014.0	16	31.9	31.79	0.11	0.34	5	6 607	3 443	3 164	47.8
	2 020.9~2 022.1	8	25.9	23.73	1.17	4.70	3	326	396	70	21.6
	2 026.9~2 028.6	6	31.9	34.53	1.63	4.95	5	6 866	6 719	147	2.14
	2 048.5~2 053.3	3	31.7	32.37	0.67	2.11	25	4 709	4 717	38	0.17
	平均				1.13	3.64				783	21.0

对所求得的储层参数进行小层集总并勾绘平面图,揭示了各小层储层参数的平面变化规律。例如 1² 小层北部断层附近有很好的含油性,孔隙度、渗透率在 T2-531、T5-15、T2-154 等井处明显较高,物性较好(图 6、7)。这些分布规律与注水开发测试结果基本吻合,亦从另一方面对解释模型加以验证。

含水率参数可表征水淹层的水淹程度或级别,

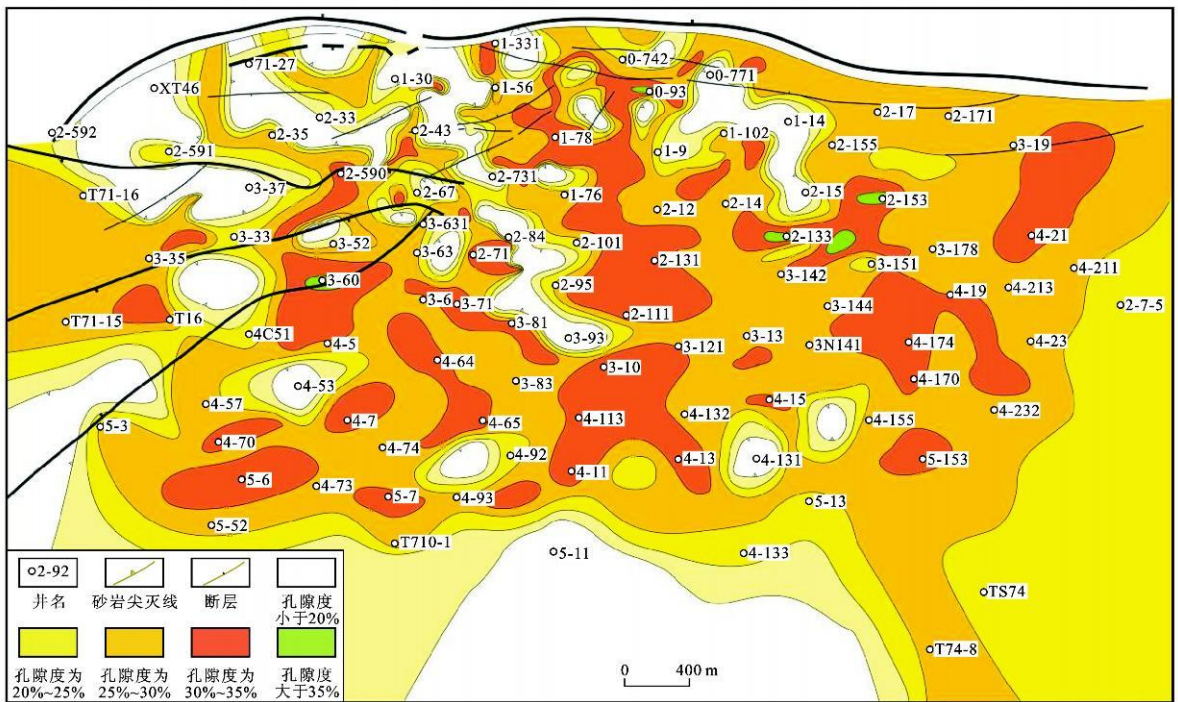


图 6 沙二段 1-3 砂组孔隙度分布

Fig. 6 Distribution of Porosity of 1-3 Sandstone Group in the Second Member of Shahejie Formation

在开发调整、井网布置和决策等方面起着重要作用。表 3 反映了测井解释的含水率与试油试采含水率的误差情况。通过 9 口井 11 个单层误差分析表明,测井解释符合 7 个层,符合率为 63.6%,符合率并不高,主要因为在注水过程中,个别井未能连续注水,井间不均衡注水使得该参数的验证应用效果不理

想,但在一定程度上也说明了解释模型和参数的一致性。

6 结语

(1) 胜坨油田一区沙二段 1-3 砂组复杂断块油藏已经进入高含水阶段,水淹层发生明显的自然电

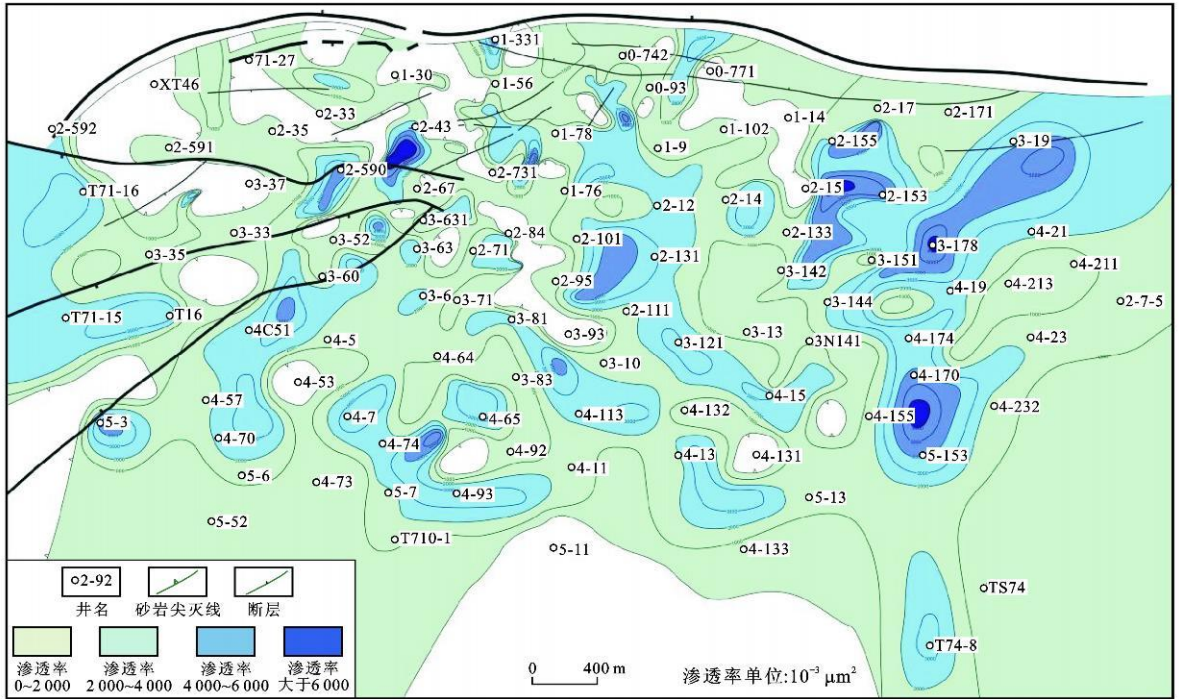


图 7 沙二段 1-3 砂组渗透率分布

Fig. 7 Distribution of Permeability of the 1-3 Sandstone Group in the Second Member of Shahejie Formation

表 3 沙二段 1-3 砂组含水率误差

Tab. 3 Error of Water Ratio of the 1-3 Sandstone Group in the Second Member of Shahejie Formation

序号	井号	层位	测井处理与解释			试油试采 含水率/ %	含水率 误差/ %	符合 情况
			含油饱 和度/%	含水率/ %	水淹 级别			
1	T716	2 ³⁻⁵	0	99.00	强水淹	92.40	6.60	不符合
2	T4-74	2 ¹⁻²	52.32	72.00	中水淹	93.40	21.40	不符合
3	T4-74	2 ¹⁻³	50.98	85.00	强水淹	87.80	2.80	符合
4	T4-67	2 ²⁻³	45.31	89.00	强水淹	96.50	7.50	不符合
5	T4-64	2 ²⁻⁴	45.78	91.00	强水淹	86.70	4.30	符合
6	T4-64	2 ²⁻⁶	5.79	99.00	强水淹	96.40	2.60	符合
7	T4-6	2 ¹⁻¹	39.72	88.00	强水淹	91.00	2.00	符合
8	T4-54	2 ²⁻⁶	31.68	96.00	强水淹	95.00	1.00	符合
9	T3x38	2 ²⁻²	45.19	90.00	强水淹	99.00	9.00	不符合
10	T2-122	2 ²⁻⁴	39.36	85.00	强水淹	88.80	3.80	符合
11	T0-83	2 ³⁻⁴	51.97	88.00	强水淹	87.00	1.00	符合

注: 对比试油试采单层 11 层, 符合 7 层, 解释符合率 63.6%

位曲线基线偏移、地层电阻率降低、自然伽马降低、声波时差增大等现象。

(2)通过地层对比分析,选择沙二段顶部的高阻白云岩段(厚度为 8~12 m)作为标准层,该段在全区分布,电性特征明显,测井曲线数值呈规律性变化;选用多项式趋势面分析方法对处理影响较大和

系统误差较大的声波时差和感应电导率等曲线进行标准化;声波时差三次趋势分析效果较好,拟合度达到 22.6%,平均校正量为 14 μs/m;校正后不同井的测井特征具有可对比性。

(3)根据各取芯井资料状况,选取 T4j17、T2-121 作为关键井,这两口井取芯井段较长且收获率较高,分析化验资料较丰富,测井资料齐全且质量较好,能够反映沙二段 1-3 砂组复杂断块油藏储层特征。

(4)结合生产动态资料和经验公式,建立泥质体积分数、粒度中值、孔隙度、渗透率、含水饱和度等解释模型。

(5)从对测井资料进行逐井处理、计算机逐点或按层输出主要储层参数等 3 个方面检验解释模型,发现孔隙度的平均绝对误差为 1.13%,平均相对误差为 3.64%,渗透率的平均相对误差为 21.0%,各类误差在规定误差范围以内,效果较为理想;各小层储层参数的平面变化规律与注水开发测试结果基本吻合;对 9 口井 11 个单层误差分析,解释模型符合 7 个层,符合率为 63.6%,符合率不高的主要原因是在注水过程中,个别井未能连续注水,井间不均衡注水影响了该参数的验证应用效果。

(6)总体来说,测井解释结果与岩芯物性和生产数据吻合较好,获得了较为可靠的地区储层地质分析结果,可为注水开发调整提供有效的参考。

参考文献:

- [1] 涂兴万, 陈林媛, 莫文丽, 等. 高含水期复杂断块油藏剩余油分布及挖潜[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(1): 39-41.
- [2] 郑福先, 王 波, 王丽娜, 等. 扶余油田高含水期水淹层测井解释方法[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(增刊): 140-143.
- [3] 胡书勇, 胡仁权, 刘启国. 复杂断块油藏流动单元与剩余油分布研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(5): 93-96.
- [4] 张伟峰, 刘守军, 李拥安, 等. 孤岛馆陶组注水开发储层性质动态变化特征研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 51-53.
- [5] 谈德辉, 王 燕, 陈洪雁. 鄂尔多斯盆地东部榆林地区测井资料标准化研究[J]. 国外测井技术, 2007, 22(2): 10-13.
- [6] 赵旭东. 石油数学地质概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [7] 谭仲平, 商国庆, 杨 渭. 利用密闭取心井资料建立饱和度解释模型研究[J]. 断块油气田, 1999, 6(4): 42-44.
- [8] 林承焰, 薛玖火, 王友净. 乐安油田草 4 块 Es₄ 稠油油藏测井解释模型研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(4): 1-5.
- [9] 宋子齐. 测井多参数的地质应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1993.
- [10] 王 平, 李纪辅, 李幼琼. 复杂断块油田详探与开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [11] 江春明, 胡兴中, 张晓武, 等. 冷家油田低阻储层测井二次解释模型研究[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(2): 59-61.
- [12] 王建国, 何顺利, 刘婷婷, 等. 榆林气田山 2 段低渗砂岩储层测井综合评价[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2007, 29(1): 54-56.
- [13] 陈德元, 谭成仟, 徐振永, 等. 基于岩性划分的渗透率预测模型研究[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(2): 158-161.
- [14] 高楚桥, 袁云福, 吴洪深, 等. 莺歌海盆地束缚水饱和度测井评价方法研究[J]. 天然气工业, 2003, 23(5): 38-40.
- [15] 孙培安, 朱忠宽. 准噶尔盆地中部 X 区块非均质砂岩储层的测井解释评价[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(1): 54-56.
- [16] 滕宝刚, 米乃哲, 邓 涛, 等. 测井约束反演技术在老河口油田老 163 井区的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(4): 420-424.
- [3] Pyle L J, Narbonne G M, Nowlan G S, et al. Early Cambrian Metazoan Eggs, Embryos, and Phosphatic Microfossils from the Northwestern Canada[J]. Journal of Paleontology, 2006, 80(5): 811-825.
- [4] Xiao S H, Zhang Y, Knoll A H. Three-dimensional Preservation of Algae and Animal Embryos in a Neoproterozoic Phosphonite[J]. Nature, 1998, 391: 553-558.
- [5] Donoghue P C J, Bengtson S, Dong X P, et al. Synchrotron X-ray Tomographic Microscopy of Fossil Embryos[J]. Nature, 2006, 442: 680-683.
- [6] Raff E C, Villinski J T, Rudolf-Turner F, et al. Experimental Taphonomy Shows the Feasibility of Fossil Embryos[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(15): 5846-5851.
- [7] Bailey J V, Joye S B, Kalanetra K M, et al. Palaeontology: Undressing and Redressing Ediacaran Embryos (Reply)[J]. Nature, 2007, 446: E10-E11.
- [8] 华 洪, 陈 哲, 张录易. 陕南早寒武世磷酸盐化囊胚期及原肠胚期动物化石[J]. 科学通报, 2004, 49(2): 177-180.
- [9] Steiner M, Li G X, Qian Y, et al. Lower Cambrian Small Shelly Fossils of Northern Sichuan and Southern Shaanxi (China), and Their Biostratigraphic Importance[J]. Geobios, 2004, 37(2): 259-275.
- [10] Steiner M, Zhu M Y, Li G X, et al. New Early Cambrian Bilateral Embryos and Larvae from China[J]. Geology, 2004, 32(10): 833-836.
- [11] 刘云焕, 李 勇, 邵铁全, 等. 陕南早寒武世早期磷酸盐化 *Punctatus* 奇异星状口盘的发现及其形态功能分析[J]. 微体古生物学报, 2006, 23(1): 62-69.
- [12] 刘云焕, 李 勇, 邵铁全, 等. 陕西宁强地区早寒武世磷酸盐化 *Punctatus* 新材料[J]. 古生物学报, 2006, 45(1): 95-101.
- [13] 刘云焕, 李 勇, 邵铁全, 等. 瓮安生物群与宽川铺生物群中球形类化石研究[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(1): 5-13.
- [14] 陈 方, 董熙平. 应用同步加速器 X 射线层析扫描显微(技术)揭示早寒武世化石胚胎 *Olivoides* 的内部结构[J]. 科学通报, 2009, 54(1): 67-72.
- [15] Brusca R C, Brusca G J. Invertebrates[M]. 2nd Edition. Sunderland: Sinauer Associates, 1990.
- [16] 李 朋, 华 洪, 张录易, 等. 陕南早寒武世磷酸盐化的 *Punctatus* 及其个体发育序列[J]. 科学通报, 2007, 52(18): 2153-2160.

(上接第 354 页)