

引用格式:耿斌,周德志,王敏,等.胜利油区储层测井评价技术发展及展望[J].油气地质与采收率,2024,31(4):184-195.
GENG Bin, ZHOU Dezhi, WANG Min, et al. Development and prospects of logging evaluation technologies for reservoirs in Shengli Oilfield[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 184-195.

胜利油区储层测井评价技术发展及展望

耿斌,周德志,王敏,王永刚,王善江,孟蕾,张园园

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:胜利油区油气资源丰富,储层类型众多,测井评价在勘探开发工作中发挥了重要的作用。值此建院60周年之际,系统回顾储层测井评价技术发展历程和特色技术,总结经验,展望未来,对于测井专业领域的发展和应用有着积极的意义。根据储层特点和评价难点,系统梳理了常规砂岩、复杂类型和非常规3种类型储层中形成的系列成熟测井评价技术。常规砂岩储层,系统地形成了适用性强的油层标准确定方法,创新了多层合试条件下的岩性、含油性下限约束的电性标准建立方法,开创性地提出了依据不同成岩带划分的储层参数解释技术;复杂类型储层,先后形成了陡坡带砂砾岩岩性测井识别、低渗透砂岩储层有效性评价、低电阻率油层识别及评价等技术;非常规储层,以评价储集性和含油性为主要目的,初步形成了基于二维核磁共振实验的储层参数测井评价技术。这些不同类型储层测井评价技术,都体现了井筒资料与地质认识的结合、岩石物理与测井模型的综合,展现了测井为地质、为油藏服务的能力,并取得了良好的应用效果。展望未来,剩余资源主要分布在隐蔽油气藏及深层,为满足勘探开发的发展和需求,有必要加强实验资料、气测录井和测试生产资料的分析,加强测井评价与地质结合,加强随钻测井、成像、核磁等测井新技术的应用,开展综合研究与评价,从评价目标上拓展产层性质评价和产量预测,从研究手段上,在常规技术的基础上,充分依托专家经验做好样本选取,深化大数据人工智能应用,一定会取得良好效果。

关键词:测井评价;储层;孔隙度;饱和度;有效厚度;页岩油

文章编号:1009-9603(2024)04-0184-12

DOI:10.13673/j.pgre.202405014

中图分类号:TE357.46

文献标识码:A

Development and prospects of logging evaluation technologies for reservoirs in Shengli Oilfield

GENG Bin, ZHOU Dezhi, WANG Min, WANG Yonggang, WANG Shanjiang, MENG Lei, ZHANG Yuanyuan

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company,

SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Shengli Oilfield has abundant oil and gas resources, with multiple types of reservoirs, and logging evaluation plays an essential role in exploration and development. The development history and the characteristics of logging evaluation technologies for reservoirs were systematically reviewed to celebrate the institute's 60th birthday. Summarizing experience and predicting the future have positive significance for the development and application in the professional logging field. A series of mature evaluation technologies formed in three types of reservoirs, including conventional sandstone reservoirs, complex reservoirs, and unconventional shale reservoirs, were systematically summarized according to the characteristics and evaluation difficulties of reservoirs. For conventional sandstone reservoirs, a highly applicable identification technology for oil layers was systematically developed, and an innovative method for establishing electrical standards constrained by the lower limits of lithology and oil potential was developed un-

收稿日期:2024-05-12。

作者简介:耿斌(1972—),男,山东淄博人,高级工程师,博士,从事测井评价和油气储量研究与估算工作。E-mail:gengbin638.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化前瞻课题“陆相页岩电性控制因素及导电机理研究”(P24184),中国石化科技攻关项目“济阳拗陷低电阻率油层识别评价及应用技术研究”(P04020),胜利油田分公司科技项目“低渗透砂岩油藏储层有效性测井评价技术研究”(YKY1803)、“碎屑岩油藏含油饱和度解释模型系统研究”(YKK0606)。

der multi-layer joint testing conditions. In addition, a pioneering logging modeling technology was proposed based on different diagenetic zones. Various technologies were developed for complex reservoirs, including logging identification of sandstone lithology in steep slope zones, effectiveness evaluation of low-permeability sandstone reservoirs, and identification and evaluation of oil layers with low resistivity. For unconventional shale reservoirs, a logging evaluation technology of reservoir parameters was preliminarily developed to evaluate the storage properties and oil potential mainly based on two-dimensional nuclear magnetic resonance experiments. These logging evaluation technologies for different types of reservoirs reflected the combination of wellbore data and geological understanding, as well as the integration of rock physics and logging models, and they demonstrated the ability of logging to serve geology and reservoirs and achieved good application results. In the future, the remaining resources will mainly be distributed in hidden oil and gas reservoirs and deep layers. In order to meet the needs of exploration and development, it is necessary to strengthen the analysis of experimental data, gas logging, and testing production data, combine logging evaluation and geology, intensify the application of new logging technologies such as logging while drilling, imaging, and nuclear magnetic resonance, carry out comprehensive research and evaluation, and expand the evaluation and prediction of production capacity of oil layers from the perspective of evaluation objectives. Moreover, it is necessary to fully rely on expert experience to select samples and deepen the application of big data/artificial intelligence on the basis of conventional technologies, which will definitely achieve good results.

Key words: logging evaluation; reservoir; porosity; saturation; effective thickness; shale oil

测井广泛应用于石油地质和油田勘探开发全过程,可评价地层储集能力、评估油气储量及其产量、分析油气层地质特征。胜利油区具有丰富的油气资源和多种油气藏类型,堪称石油地质“大观园”,含油层系多、储层类型多、岩性及物性差异大,对应的油气层在测井响应特征上呈现出多样性特点:既有低电阻率油气层,也有低孔、特低渗透、中高电阻率油气层,以岩性变化的薄互层和储层物性变化的非均质互层使油气层的测井响应特征变得更加复杂。伴随着胜利油田的发现和成长,测井评价在勘探开发工作中发挥了重要的作用。值此建院60周年之际,系统回顾储层测井评价技术发展历程和特色技术,总结经验,展望未来,对于测井专业领域的发展和运用有着积极的意义。结合胜利油区储层测井评价实践,针对油气层的识别、储层参数定量解释与评价,根据储层特点和评价难点,系统梳理了常规砂岩、复杂类型和非常规3种类型储层中形成的系列成熟测井评价技术,并对未来的发展方向和技术要求进行了展望。

1 发展历程

胜利油田自发现以来,油气勘探开发经历了由浅层到深层再到超深层,油气藏类型由构造油气藏到隐蔽岩性油气藏,储层类型由常规砂岩储层到砂砾岩、滩坝砂等复杂类型储层再到非常规(页岩油)储层等。为适应油田勘探开发各阶段地质条件变化的不断发展,裸眼井测井系列不断充实完善,经历了从以电阻率测井为主的横向测井、声波-感应组合测井到三电阻率三孔隙度测井再到声电成像测

井、核磁共振测井等新技术的发展阶段,为各类储层的解释评价提供了丰富的信息。

按照胜利油区储层特点和评价难点,大致可以分为常规砂岩、复杂类型和非常规3种类型储层。常规砂岩储层是指岩性为中高孔、中高渗透砂岩储层,储集空间类型为孔隙型,储层相对均质,常规技术能够经济开采油气^[1];复杂类型储层主要包括岩性复杂、孔隙结构复杂、地层水性质复杂、储集空间复杂等储层;非常规储层是指地层中油气难以自然流动,常规技术不能经济开采油气的储层^[1],主要指页岩油储层。

在常规砂岩储层方面,基于体积模型的威利公式和 Archie 公式进行有效孔隙度、饱和度解释,开创性提出了依据不同成岩带划分的储层参数解释技术;在以“四性”关系研究为基础建立油气层标准的应用实践中,总结了适用性强的油层标准确定方法,并针对近年来大段压裂、多层合试的情况,创新了岩性、含油性下限约束的电性标准建立方法,均得到了广泛的应用,取得了良好的效果。在复杂类型储层方面,针对各类储层的不同特点,结合重点区块油藏开展攻关,先后形成了陡坡带砂砾岩岩性测井识别、低渗透砂岩储层有效性评价、低电阻率油层识别及评价等技术,有力支撑了复杂类型储层的油气层解释和油藏储量上报。紧跟非常规油藏的勘探开发步伐,以评价储集性和含油性为主要目的,初步形成了基于二维核磁共振实验的储层参数测井评价技术。这些不同类型储层的测井评价技术,都体现了井筒资料与地质认识的结合、岩石物理与测井模型的综合,展现了测井为地质、为油藏服务的能力。

2 特色技术

2.1 常规砂岩储层

2.1.1 储层参数解释技术

传统是以体积模型为基础,利用威利公式和 Archie 公式来解释储层参数,在胜利油区得到了广泛应用,平面上分油田、分构造带,纵向上分层系系统建立解释图版,取得了良好效果。从测井学原理分析,影响岩石声学属性和岩电参数的主要因素是其碎屑成分、岩石结构等岩石学特征,岩石结构包括碎屑颗粒的形状、大小、分选性、胶结与支撑类型以及颗粒的接触关系。对于矿物成分相同、岩石结构相近的砂岩,其有效孔隙度与声波时差符合威利公式所表达的线性关系,这也是建立特定目标层系声波孔隙度解释模型的基础,对于岩电参数也是相近的。胜利油田济阳坳陷不同成因类型砂岩主要由较低成分成熟度和较高结构成熟度的长石类砂岩组成^[2],其矿物成分相对稳定,而岩石结构中颗粒形状、大小和分选性等原生结构由沉积条件决定,对于胶结类型、支撑类型、接触关系和孔隙特征,成岩作用的改造会引起强烈的变化。成岩作用是造成岩石结构显著变化的主要原因^[3],由此提出并建立了考虑不同成岩带的有效孔隙度与饱和度测井解释技术。

根据埋深、成岩作用、固结程度和颗粒接触关系的不同,济阳坳陷第三系碎屑岩的埋藏成岩期可划分为浅成岩带、中成岩带、深成岩带和超深成岩带(表1)。

分不同成岩带建立了有效孔隙度解释模型(表2),确定了岩电参数(表3),解释精度均达到了规范要求,同时拓展了不同模型和参数的适用范围,对于未取心油藏的储层参数提供了解释依据。

对于有效孔隙度解释,往往把砂岩骨架声波时差作为验证声波时差-有效孔隙度线性模型是否正确的一个重要标准,实际上,砂岩的岩石结构在纵向上随成岩深度变化应该是连续变化的,对应的有效孔隙度与声波时差的关系也应该是连续变化的(图1),不同成岩带的储层都具有一定的有效孔隙度分布区间,当储层砂岩固结到一定程度,颗粒接触致密,其骨架声波时差值才约为砂岩骨架声波值(55.5 $\mu\text{s}/\text{ft}$)。

为了把不同成岩带的有效孔隙度与声波时差的关系有机结合起来,引入了声波地层因素 AFF 方程:

$$\Phi = 1 - \left(\frac{AC_{ma}}{AC} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (1)$$

式中: Φ 为有效孔隙度,小数; AC_{ma} 为砂岩骨架声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; AC 为砂岩储层声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; x 为岩性特征指数,无量纲。

表1 不同成岩带储层特征

Table1 Characteristics of reservoirs in different diagenetic zones

成岩带	埋深/m	成岩作用	固结程度	颗粒接触关系
浅	<1 700	机械压实为主,化学变化很弱	固结性极差	“漂浮”状为主,少部呈点状接触
中	1 700~2 100	机械压实为主,化学变化有所增加	半固结状态	“漂浮”状及点状接触
深	2 100~3 200	化学胶结作用(或溶解作用)为主,压实作用逐渐退居次要地位	完全固结	点接触和线状接触为主
超深	>3 200	化学胶结和交代作用为主	强烈固结	线状及凹凸状接触

表2 不同油田与不同油藏埋深有效孔隙度解释模型汇总(部分)

Table2 Effective porosity interpretation models for different oilfields and reservoirs with different burial depths (part)

油田	模型类型	埋深/m	解释模型	相关系数
胜坨	线性统计	<2 200	$\Phi=0.323\ 8AC-2.336\ 8$	0.904
	线性统计	>2 200	$\Phi=0.537\ 7AC-24.666$	0.976
林樊家	线性统计	<1 100	$\Phi=0.359\ 6AC-10.89$	0.83
尚店	线性统计	<1 200	$\Phi=0.337\ 3AC-8.275\ 3$	0.966
	线性统计	>1 400	$\Phi=0.597\ 1AC-35.008$	0.911
林樊家、尚店	线性统计	>1 400	$\Phi=0.342\ 2AC-8.807$	0.934
平方王	线性统计	>1 500	$\Phi=0.541AC-28.578$	0.886
滨南	线性统计	>2 500	$\Phi=0.690AC-36.992$	0.884
	线性统计	<2 500	$\Phi=0.362\ 5AC-8.66$	0.914

表3 济阳坳陷不同凹陷不同成岩带砂岩电参数回归结果(部分)

Table3 Regression results of electrical parameters of sandstone in different sags and diagenetic zones in Jiyang Depression (part)

凹陷	成岩带	层位	埋深/m	$F-\Phi$ 公式	有效孔隙度	$I-S_w$ 公式
东营 凹陷	浅	$E_2s_4-N_1g$	905.85~1 731.7	$F=0.679 4/\Phi^{1.638}$	0.145 7~0.450 8	$I=1.065 2/S_w^{1.988}$
	中	$E_3s_2-E_3s_1$	1 724.52~2 298.53	$F=0.246 3/\Phi^{2.639}$	0.195 4~0.358 6	$I=1.032 1/S_w^{2.005}$
	深	$E_2s_4-E_3s_3$	2 000.3~3 504.8	$F=0.713 4/\Phi^{2.017}$	0.061 9~0.342 4	$I=1.048 3/S_w^{1.801}$
沾化 凹陷	浅	E_3d-N_1g	1 117.7~1 486.26	$F=0.419 3/\Phi^{2.030}$	0.203 1~0.450 7	$I=1.049 1/S_w^{1.867}$
	深	$E_2s_4-N_1g$	1 703.06~3 634.11	$F=1.283 1/\Phi^{1.663}$	0.115 8~0.373 9	$I=0.992 1/S_w^{1.751}$

注: F 为地层因素,无量纲; I 为电阻增大率,无量纲; S_w 为含水饱和度,小数。

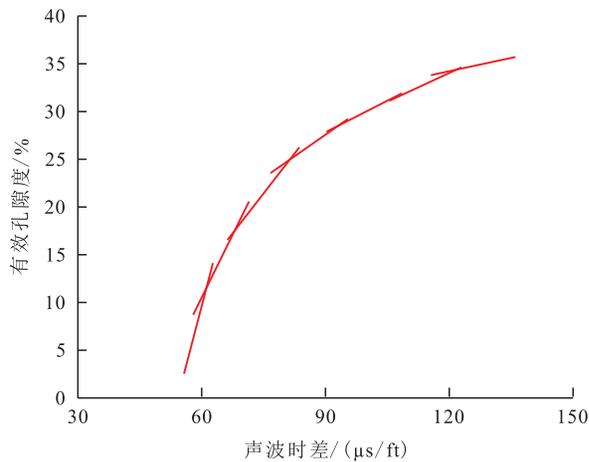


图1 随成岩深度变化的有效孔隙度与声波时差的趋势
Fig.1 Variation of effective porosity and interval transit time with diagenetic depth

与威利公式相比,AFF方程的主要特点是不需要作压实校正,也不需要流体声波时差,避免这2个参数引起的误差^[4]。方程在提出的时候,作为一种对客观存在规律的理解,从物理学和测井学的角度阐述其物理意义:表示弹性波通过非均质介质中的两点间所需要的传播时间较短(由记录首波测出的传播时间),可表示为弹性波只在速度较快的一部分介质(岩石骨架)中传播,其传播路径受该部分介质的相对体积的影响,从而表现为不同程度的弯曲。 x 值越大,表明岩石越致密,骨架中高声速的组分越多。通过胜利油区的研究实践,认为AFF方程不仅仅是一个数学方程,而且具有明确的岩石物理意义,将不同成岩带的解释模型有机地统一起来,方程中 x 是砂岩纵向上成岩作用的综合反映。其应用对象是具有连续成岩演化过程的砂岩储层,具有明确的地质成因,从而真正地体现出声波地层因素的意义^[5]。

2.1.2 油层标准确定方法

油层标准是判别与划分油井地质剖面中具有为工业油流提供可动油层段的某些界限或截止值,只有达到一定标准界限的储层厚度才能划为有效厚度。油层标准包括判别油、水、干层的岩性、含油

性、物性及电性标准,实际工作中,电性标准是划分有效厚度的主要依据。通过多年的测井评价实践,总结形成了胜利油区的油层标准确定方法,并创立了针对多层合试情况的岩性、含油性标准约束的电性标准建立方法。

2.1.2.1 常规油层标准确定方法

岩性、含油性标准的确定是通过仔细观察岩心,在研究岩性、含油性、物性、电性基础上,在取心井的纯含油层段内,选取一定数量的岩心收获率高、岩性含油性均匀、有效孔隙度和渗透率具有代表性的界限层进行单层试油,分析岩性、含油性、物性与产油能力的关系,明确什么岩性、含油性的储层能达到储量起算标准,即可得出油层的岩性、含油性下限。

有效厚度物性标准即有效孔隙度、渗透率和含油饱和度3个参数的下限。含油饱和度是基础,只有具有一定含油饱和度才具有产油能力。由于难以求准油层原始含油饱和度,常采用有效孔隙度、渗透率反映物性标准,随着开发工艺的提高,标准值是可以降低的。一般根据油田实际资料及其地质条件选用取心井单层试油法、测试法、含油产状法、束缚水饱和度法、泥浆侵入法等多种方法综合研究,确定物性标准(表4)^[6-10]。

有效厚度电性标准一般包括油水层的判别标准(饱和度、电阻率、电阻增大率等标准)、干层标准及夹层扣除标准等。根据油田实际资料及其地质条件,利用单试层测井资料制作各种电性的交会图、概率图等,根据单试层测试结论确定各种电性的有效厚度下限。

2.1.2.2 多层合试层电性标准建立方法

随着开采技术和工艺不断改进提高,使得更低物性储层的油气可以开采,这类低物性储层大多需要多层合采才能达到工业油流,单层试油资料少,缺少下限层的单层试油资料,因此提出并形成了多层合试层电性标准建立方法:将岩心或岩屑录井的

表4 有效厚度物性下限确定方法简表
Table4 Methods for determining lower limit of physical properties of effective thickness

确定方法	基本原理	备注
取心井单层试油法	根据取心井分析有效孔隙度、渗透率等与日产油能力的关系，直接确定有效储层物性下限	需取心分析的下层单独试油
每米采油指数法(测试法)	每米采油指数近似为0时的有效孔隙度、渗透率值为有效储层物性下限值	单层试油资料较多,受每米采油指数与有效孔隙度、渗透率等相关性和下层附近资料多少的影响
含油产状法	油层段的岩心含油级别与有效孔隙度、渗透率等大小有关,在确定的岩性、含油性标准基础上,采用正逆累积、有效孔隙度-渗透率交会图等确定有效储层物性下限	需剔除含气、含水层段样品;非有效样品和有效样品数量都不能太少
经验统计法	以岩心分析有效孔隙度和渗透率资料为基础,以低孔渗累积储渗能力丢失占总累积的5%左右为界限	有大量取心分析资料,不受含气、含水层段的影响
束缚水饱和度法	束缚水饱和度大于一定数值的储层,其储集空间主要为渗流能力差的微孔隙,对应的有效孔隙度、渗透率等值为有效储层物性下限	受束缚水饱和度与有效孔隙度、渗透率等相关性和下层附近资料多少影响
最小流动孔喉半径法	根据最小流动孔喉半径与有效孔隙度、渗透率等的关系确定有效储层物性下限,确定最小流动孔喉半径的方法有:压汞资料与油基泥浆取心资料对比法、核磁实验法、水膜实验法、累积渗透率贡献值法等	受孔喉半径与有效孔隙度、渗透率相关性的影响
泥浆侵入法	油层段水基泥浆取心泥浆侵入与不侵入的渗透率界限(含水饱和度和渗透率等关系的拐点)即为有效储层物性下限	不适用于低渗透和稠油油藏

岩性和含油产状与试油资料相结合,在多层合试层中选择符合岩性、含油性、物性标准的层参与建立有效厚度电性标准。

以阿拉德油田八道湾组三段为例(图2),其岩性下限为细砂岩,含油性下限为油斑,物性下限有效孔隙度为17.5%,缺少单层,电性标准建立步骤包括:①提取试油层段中岩心录井有含油显示的小层数据作为建立电性标准的基础数据。②通过已经确定的岩性标准,将电性图版中未达到区块最低岩性标准的数据(VII)剔除。③通过已经确定的含油性标准,将所建立的电性图版中未达到区块最低含油性标准的数据(VI)剔除。④通过已经确定的物性标准作为有效厚度电性图版中的物性下限(有效孔隙度下限为17.5%,对应声波时差下限为85.6 μs/ft),并结合生产及气测等资料对界限数据点进行分析,确定最终的电性标准。

2.2 复杂类型储层

复杂类型储层是指在现有的认识水平和技术水平下,尚未完全认识的、相对复杂的储层类型,常规技术能够经济开采油气,由于认识水平和技术水平的限制,对这类储层的分布规律、形成机制等未彻底了解^[11],胜利油区复杂储层类型多样,其中碳酸盐岩和火成岩储层可通过薄片分析和测井曲线交会确定矿物骨架,依据体积模型解释有效孔隙度具有较高精度,依据岩心描述、常规双侧向测井以及FMI成像等资料可以定量识别与解释裂缝。本文重点针对砂砾岩、低渗透砂岩和低阻油层的测井

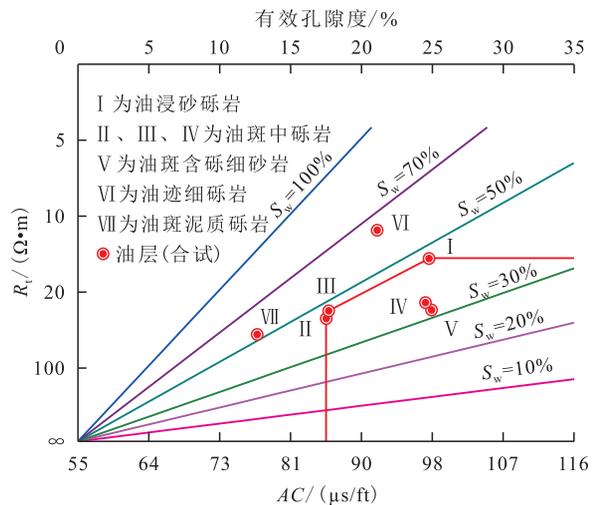


图2 阿拉德油田八道湾组三段有效厚度电性标准图版
Fig.2 Standard electrical chart for effective thickness of third section of Badaowan Formation in Arad Oilfield

评价技术进行总结。

2.2.1 砂砾岩岩性测井识别

快速沉积的砂砾岩粒径变化剧烈,按粒径大小可分为砾岩、砾状砂岩、含砾砂岩和泥岩,利用常规测井曲线对岩性识别存在很大难度,更为储层识别和参数定量解释带来很大不确定性。客观准确地进行砂砾岩的岩性识别,是砂砾岩储层评价和油层识别的基础,也能为沉积旋回、地层层序划分提供强有力的支持^[12-13]。

利用岩心精细描述后不同的岩性刻度FMI成像测井,建立成像测井的岩性识别模式,开展成像岩性识别,通过成像测井识别的岩性,总结不同岩

性在常规测井曲线上的响应特征,从各种常规测井曲线的测量原理入手,进行测井曲线的岩性敏感性分析,选取岩性在响应特征上有显著反映的测井曲线构建岩性识别曲线,经岩心和FMI成像岩性识别结果刻度,得到不同岩性识别曲线的划分标准,结合多种资料进行岩性识别划分。

以盐家油田沙四段上亚段砂砾岩为例,其岩性测井识别具体步骤包括:①以岩心精细描述的岩性刻度FMI成像测井,利用成像测井确定无取心段的岩性。②开展测井曲线的岩性敏感性分析,岩性的差别在测井响应特征上有显著变化的主要有三孔隙度(中子、密度、声波时差)曲线、自然伽马(GR)和深探测电阻率(R_t)。③利用中子-密度交会初步计算有效孔隙度,根据威利公式反算 AC_{ma} , AC_{ma} 对岩

性有良好的反映。④统计并分别绘制 AC_{ma} 与 GR 和 R_t 的交会图(图3)。随着 AC_{ma} 值的增大、 GR 值的减小、 R_t 值的减小,岩石的粒序逐渐变细。根据以上关系,采用骨架声波时差引入自然伽马和深探测电阻率建立岩性识别曲线LIC,明显提高了岩性区分的精度,与岩心和FMI成像测井所反映的岩性图像有着非常好的对应性。LIC由高到低,代表着粒序逐渐变细,岩性也由砾岩逐步过渡为砾状砂岩、含砾砂岩和泥岩(图4)。

对比盐家油田沙四段上亚段砂砾岩储层LIC的岩性识别结果与岩心和FMI成像测井的岩性识别结果,砾岩的符合率为65%,砂砾岩的符合率为83%,泥岩的符合率为95%。该方法基本能够满足科研生产需要。岩性的识别划分主要应用在2个方面:①

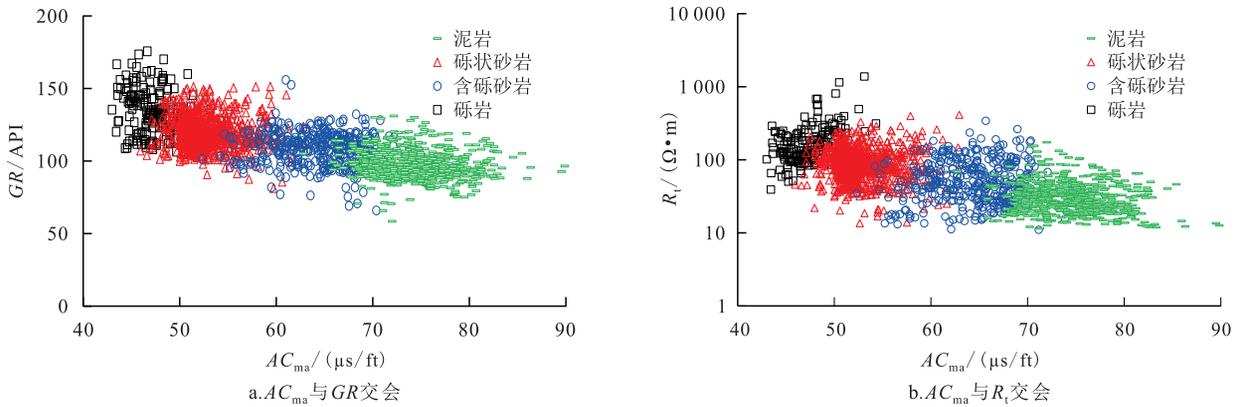


图3 AC_{ma} 与 GR 、 R_t 交会
Fig.3 Intersection of AC_{ma} with GR and R_t

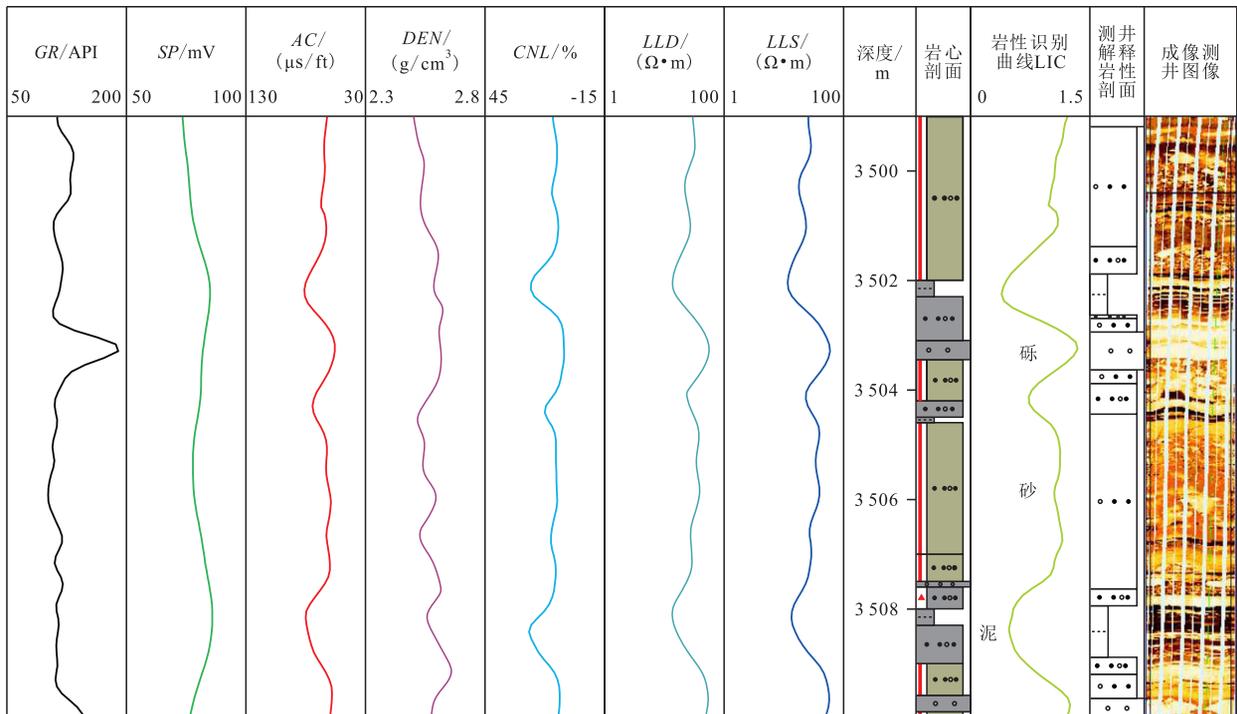


图4 岩性识别曲线LIC对应粒序变化
Fig.4 Lithological identification curves of corresponding grain size

通过“四性”关系研究确定含油岩性主要为含砾砂岩和砾状砂岩,砾岩和泥岩为非储层,通过LIC的岩性识别剔除非有效岩性,为储层划分和流体识别奠定了扎实的基础。②岩性识别曲线能够较好地反映粒序的变化,帮助确定岩性突变面和沉积旋回,进行沉积旋回期次和砂砾岩扇体期次的精细划分,为砂层组的划分和储量计算单元的确定提供依据。

2.2.2 低渗透砂岩储层有效性评价

济阳坳陷低渗透砂岩油藏主要有滩坝砂油藏和浊积体砂岩油藏,滩坝砂主要为滨浅湖相的滩、坝亚相沉积,岩性以(粉)砂岩为主;浊积体主要为断陷湖盆缓坡带、洼陷区浊流成因的扇体、透镜体砂岩。低渗透砂岩储层普遍具有孔喉微细、结构复杂、非均质性强等特征^[14-15],应用常规储层有效性评价方法具有较大的误差。针对低渗透砂岩储层参数解释难、储层有效性判识难的问题,从微观孔隙结构入手,通过微观与宏观相结合对低渗透砂岩储层进行测井相类研究,建立储层分类方法,在不同测井相类储层含油差异性及其渗流能力分析的基础上,优化相控下的有效孔隙度、渗透率、饱和度等参数的解释技术,提高低渗透砂岩储层有效性评价的解释精度,达到能客观识别和精细评价低渗透砂岩

储层的目的。

以东营凹陷南坡沙四段滩坝砂储层为例。首先开展微观孔隙结构分类研究,分析不同微观孔隙结构类型的沉积特征和孔渗关系等。按照孔喉半径分布区间(可动性)和0.1 μm以上孔喉进汞饱和度(可充满度)将孔隙结构分为I、II、III类,I类孔喉相对大孔喉、粗粒度,II类孔喉相对中孔喉、中粒度,III类孔喉相对小孔喉、细粒度。按照孔喉分布及毛管压力曲线形态将孔隙结构分为A、B、C型,A型孔喉(偏粗型)对应下拱型毛管压力曲线,B型孔喉(均衡型)对应斜线型毛管压力曲线,C型孔喉(偏细型)对应上拱型毛管压力曲线,从A型到C型,水动力由强转弱,分选由好转差再转好。其次根据微观孔隙结构与宏观沉积微相关系的研究,将孔隙结构分类、沉积微相与测井曲线对应,根据砂层厚度、岩性、孔隙结构类型(对应孔渗关系、岩电关系)、测井响应等特征,按照以下原则进行测井相分类:①测井曲线上易于区分;②应具相似的孔隙结构(孔渗关系及岩电关系);③岩性(及其组合)相近;④具有相同(相近)的砂层厚度。根据测井相的分类原则,主要依据单一韵律段厚度及其组合关系划分测井相,滩坝砂储层测井相分类如表5所示。

表5 滩坝砂储层测井相分类
Table5 Classification of logging facies for beach-bar sandstone reservoirs

测井相类	电性特征	宏观特征				微观特征	
		主要沉积微相类型	砂层厚度/m	岩性	粒度/分选		沉积环境能量
I类	单一韵律段厚度大,厚度一般大于2 m;GR或SP曲线幅度大,箱型、柱形,光滑、微齿	坝	>2	粉砂岩、细粉砂岩	粒度相对大、分选较好	高能、较高能	孔喉半径较大,主要为I、II类A、B型孔隙结构储层,孔渗关系曲线较陡
II类	单一韵律段厚度小,厚度一般小于2 m;GR或SP曲线幅度较低,齿形、指形、棱形或扁漏斗形	滩	<2	粉砂岩、灰质粉砂岩、泥质粉砂岩	粒度相对小、分选差	较低能、低能	孔喉半径较小,主要为II、III类B、C型孔隙结构储层,孔渗关系曲线较缓
III类	GR高值,SP曲线低或无幅度差	滩/坝间	/	泥岩	/	弱	

不同测井相由于沉积环境能量高低不同,粒度粗细不同,砂层厚度不同,微观孔隙结构和导电能力存在差异,分测井相建模可以消除微观孔隙结构差异和砂层厚度对测井响应的影响,提高有效孔隙度、渗透率、饱和度的解释精度,分测井相建立孔渗饱解释模型比不分测井相的解释精度有较大提高。

2.2.3 低电阻率油层识别及评价

低电阻率油层是指油层电阻率相对于邻近水层而言,电阻率值偏低并引起油水层解释困难。低电阻率油层在济阳坳陷各凹陷均有分布,尤以东营、惠民凹陷古近系和新近系最为发育。由于对其

机理成因、分布规律缺乏认识,隐蔽性强,制约了该类油层的勘探开发^[16]。

济阳坳陷低电阻率油层按主要内在控制因素可分为高矿化度地层水型、高含水饱和度型、黏土附加导电型和导电矿物型(分布较少)4类^[17-20]。按外在影响因素分为盐水泥浆侵入型和薄互层型。高矿化度地层水型低电阻率油层与地层水的矿化度密切相关,济阳坳陷沙四段具有高矿化度地层水环境和生油层,因此该类油层在沙四段广泛发育,受构造运动影响,高矿化度地层水沿大断层运移,因此在靠近大断层的地层中也利于形成该类型的低电阻率油层;高含水饱和度型低电阻率油层可分

为高束缚水型和高自由水型低电阻率油层。高束缚水型低电阻率油层需要地层水矿化度中等以上,储层岩性细,微孔隙发育,多为三角洲前缘席状砂、三角洲滑塌浊积扇沉积。高自由水型低电阻率油层一般具有中等以上有效孔隙度,多为河流相沉积,储层埋深浅、构造幅度低;黏土附加导电型低电阻率油层形成需要具备3个条件:①距离黏土矿物母岩区(火山口)近,储层黏土含量高;②地层水矿化度低;③具有较好的成藏条件;导电矿物型低电阻率油层需要地层含有黄铁矿、菱铁矿、铁方解石、铁白云石等导电矿物,且导电矿物呈条带状或连续

块状分布;盐水泥浆侵入型低电阻率油层是在钻井泥浆矿化度较高且浸泡井壁时间较长时,侵入带宽度增大,形成低侵,使得油层视电阻率小于储层的真电阻率,在电性曲线上显示低电阻率;薄互层型低电阻率油层是由于测井仪器纵向分辨率低造成的,储层单层厚度薄。

地层水是储层中重要的导电路径,对储层视电阻率有着至关重要的影响,地层水电阻率的准确与否直接影响到饱和度的解释精度和低电阻率油层的判识,地层水电阻率可以通过多种方法确定^[21-23](表6)。

表6 地层水电阻率确定方法
Table6 Methods for determining formation water resistivity

确定方法	基本原理	适用条件及影响因素
实际水分析资料确定	直接测定地层水电阻率或将地层水化学分析结果通过校正转化为等效NaCl矿化度,利用溶液电阻率与温度及溶液浓度关系图版,得到地层水电阻率	取得合格的地层水样品
阿尔奇公式法	利用阿尔奇公式推导出地层水电阻率与深电阻率、有效孔隙度、含油饱和度之间的关系,选取已知含油饱和度的层段(如纯水层),读取相关测井曲线参数,求取地层水电阻率	有已知含油饱和度的层段,有效孔隙度、饱和度模型及测井曲线读值可靠
自然电位曲线确定	自然电位主要是在含盐浓度梯度引起的离子扩散中产生的,能反映地层水含盐浓度的变化,在可知泥浆滤液电阻率的情况下可用来计算地层水电阻率	自然电位受测量环境(层厚、泥质含量、含油气等)影响较大,泥浆滤液电阻率准确求取难
水层深、浅电阻率曲线确定	在有泥浆侵入的纯水层段 $S_w=S_{w0}=1$,故 $R_w/R_{mf}=R_l/R_{s0}$,通过已知 R_{mf} 可求出 R_w	能准确求取对应 R_{s0} 的泥浆滤液电阻率 R_{mf}
泥岩电阻率曲线确定	泥岩中赋存的束缚水与邻近砂岩中的地层水性质相同,因此泥岩的电阻率变化间接表明了地层水性质的变化规律	建立地区经验公式。泥岩电阻率受矿物成分、压实程度等的影响
地区统计规律确定	同一地区地层水电阻率在平面上和纵向上呈规律性变化	建立地区经验公式且符合该规律

应用录井、地化、气测、电法测井、核磁测井等多项资料,将各项资料中油层的有效识别信息与相应类型的低电阻率油层匹配,建立了一套济阳拗陷低电阻率油层识别与评价技术(表7)。应用于新老井油水层识别、试油试采和储量估算中,取得了良好的勘探开发效果。

以东辛油田浅层低电阻率油层为例,东辛油田浅层(馆陶组、东营组)均属于河流相沉积,储层均为常规砂岩,油层物性同属高孔高渗透储层。东辛油田浅层油藏为二次成藏,成藏动力相对较低,油层物性较好,油气运移泄压快,在砂体边部物性差的部位或构造幅度小的砂体内油气驱替地层水的程度较低,含水饱和度高;地层水总矿化度为14 996~24 547 mg/L,导电性较强;储层结构成熟度低,胶结疏松,泥质含量为1%~27%,岩石亲水,这些因素的存在使得该油田浅层发育电阻率绝对值为 $4 \Omega \cdot m$ 左右的高自由水型低电阻率油层。针对该油田浅层储层和电阻率曲线特征,采用水层 R_0 预测及 R_l/R_0 的方法,充分利用大量试油试采资料制定有效厚度

下限标准,加强井间对比工作进行老井复查,复查东辛油田老井1 700余口井,在1 378口井中解释低电阻率油层累积厚度为1 894.4 m。

2.3 非常规(页岩油)储层

非常规储层是指地层中油气难以自然流动、常规技术不能经济开采油气的储层,主要指页岩油储层。胜利页岩油研究始于2008年,截至目前经历了探索、创新、突破3个阶段。从最初的北美经验借鉴,到技术攻关研究,创新理论认识,再到勘探开发实践,理论技术再突破,胜利页岩油经历了一个又一个的转变,最终形成了陆相断陷盆地页岩油创新理论与技术体系,实现了页岩油突破。多年来,针对储层在哪儿,如何找到有效储层、常规测井解释方法的适用性等一系列问题,依托国家页岩油“973”研究、页岩油专项研究,进行了测井评价技术攻关,围绕页岩油“七性”评价,基于系统取心刻度测井,常规测井与新技术测井并用,建立了矿物组分划分技术、地化参数评价技术、储集物性评价技术、孔隙连通性评价技术、地层压力预测技术、薄夹

表 7 济阳坳陷低电阻率油层识别与评价技术
Table 7 Identification and evaluation technologies for oil layers with low resistivity in Jiyang Depression

低阻类型	识别技术			评价技术	
	地质特征	曲线特征	气测地化	解决方法	饱和度评价方法
高矿化度水型	多在沙四段或临近大的断裂构造	淡水泥浆 SP 曲线幅度大		①水层 R_0 预测; ② R_t/R_0	阿尔奇公式
高含水饱和度型	高束缚水型	沙三段为主, 岩性细, 强亲水, 成岩作用强, 微孔隙发育	微电极曲线幅度差小; 油层三侧向电阻率基本重合, 水层明显分开	①侵入特征分析法; ②CMR 可动流体分析; ③双孔隙水模型求 S_w	双孔隙水模型
	高自由水型	埋深浅, 成藏动力弱、构造幅度低	R_t 曲线呈倒三角形; R_t -SP 月牙状		
黏土附加导电型	埋深浅, 多在沙一段、沙二段, 近物源靠近火山口	高 GR 值	气测: 全烃最大 > 1%, 乙烷以上含量 > 0.01%, 可能含油	W-S 模型求 S_w	W-S 模型
导电矿物型	黄铁矿等导电矿物主要来源于岩浆岩碎屑物, 济阳坳陷第三系储层中多为点状或团块状分布, 对储层的电阻影响极小	/	地化: 含油气总量 > 2 mg/L 储层可能含油; 含油气总量 > 10 mg/L 储层含油	/	/
外因类型	盐水泥浆侵入型	中孔中渗透、盐水泥浆钻井、钻井周期长	SP 曲线反向, 延时测井侵入明显	泥浆侵入电阻率反演	阿尔奇公式
	薄互层型	砂泥岩互层沉积, 滨浅湖相	R_t 曲线锯齿状, 微电极曲线幅度差明显	薄层电阻率反演	阿尔奇公式

层识别技术、可压裂性评价技术、页岩裂缝识别技术等 8 要素测井评价技术系列。

一直以来,页岩储层有效孔隙度和含油饱和度的测井表征是测井评价的难点,其解释精度通常难以达到较高要求,为此加强了二维核磁共振实验在评价页岩含油饱和度和有效孔隙方面的探索,建立了页岩不同含氢流体组分二维核磁划分图版(图 5)^[24]。根据干酪根、含吸附态油干酪根、不同含水状态下的黏土矿物、页岩、抽提烘干后页岩、饱和油、饱和油离心、饱和水、饱和水离心等状态下的核磁共振 T_1 - T_2 谱特征,总结了湖相页岩中的各含氢流体组分在核磁共振 T_1 - T_2 谱上的分布范围。二维核磁共振实验评价有效孔隙度和饱和度的关键在于 4

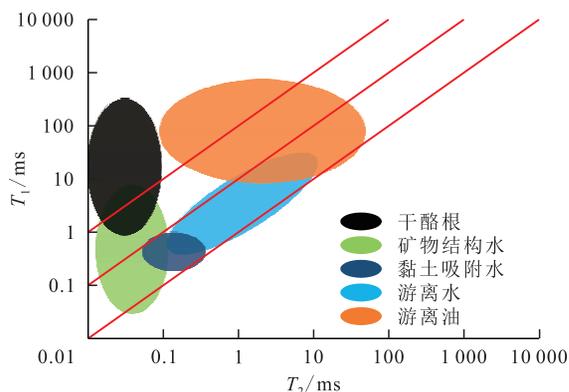


图 5 页岩不同含氢流体组分二维核磁划分图版 (据文献[24]修改)

Fig.5 Classification of 2D nuclear magnetic plate for different hydrogen-containing fluid components in shale (Revised according to reference [24])

个方面:①岩心密闭效果的评价,若含氢流体组分散失,则测量有效孔隙度降低;②对于页岩含氢流体组分的准确识别和划分;③对有效孔隙截止值的合理确定,通过多种方法的对比,截止值定为 0.3 ms;④核磁信号量与真实油水量的转换关系的确定^[25]。上述 4 个方面取得了突破性进展,实现了基于二维核磁共振实验评价页岩有效孔隙度和含油饱和度的目的。

在岩心核磁实验与核磁测井的温度和频率转换关系研究基础上,基于常规测井曲线敏感参数建立了有效孔隙度解释的 M - N 方程法和多元回归法解释模型(图 6),相对误差均小于 $\pm 12\%$ 。在含油饱和度的测井表征方面,通过岩心刻度测井,建立了基于多元回归法及 Simandoux 方程法的饱和度测井解释模型(图 7),绝对误差小于 $\pm 5\%$ 。

3 下步展望

经过 60 余年的实践和积累,胜利油区常规砂岩储层的识别和解释评价相对成熟,基本形成和建立了系统化的评价方法、标准和模型库。但复杂油气藏勘探面临的剩余资源主要分布在隐蔽油气藏及深层,在复杂岩性、复杂储集空间和深层油气藏勘探中,测井评价面临的主要技术问题还有砂砾岩储层油气评价、低电阻率油层识别、具有复杂储集空间的碳酸盐岩储层评价、侵入岩、变质岩裂缝性油气藏有效储层的识别与评价、深层油气藏、凝析油

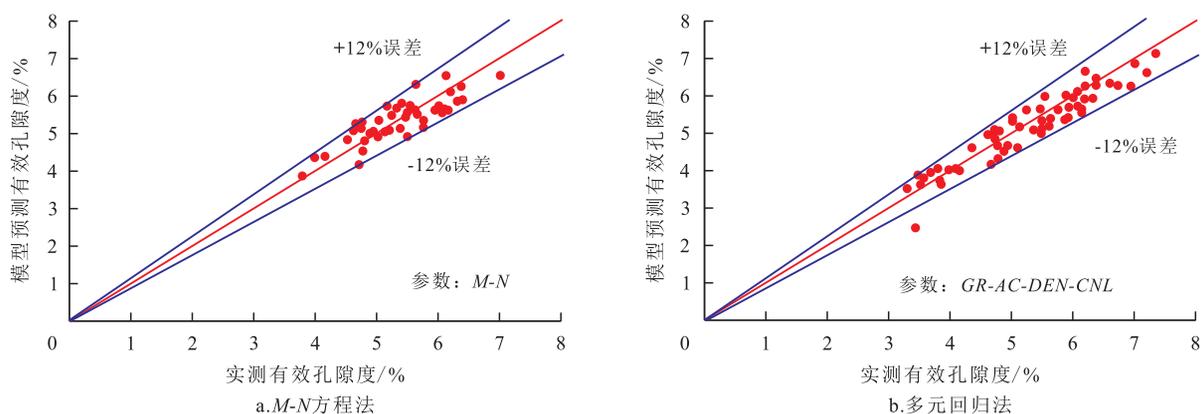


图6 常规测井计算有效孔隙度模型及精度分析

Fig.6 Models and accuracy analyses of conventional logging for calculating effective porosity

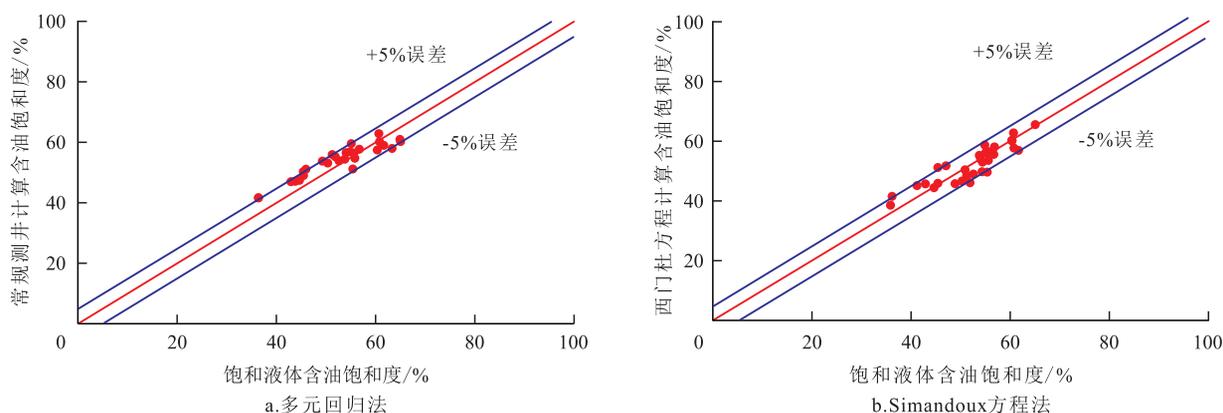


图7 常规测井计算含油饱和度模型及精度分析

Fig.7 Models and accuracy analyses of conventional logging for calculating oil saturation

气藏的油气层评价以及滩坝砂为主要目的层的薄互油层的评价。随着非常规领域页岩油藏勘探开发的进一步深入,对页岩油储层含油性评价为代表的“七性”评价,对矿物成分、有效孔隙度、含油饱和度等参数的解释以及产能的评价预测等方面都提出了更高的要求。为满足勘探开发的发展和需求,测井评价有必要在以下几方面加强应用、研究和攻关。

研究领域方面,对于常规砂岩储层,加强现有技术在新区块、新层系测井评价中的应用,不断丰富和完善评价方法、标准和模型库;对于复杂类型储层,包括砂砾岩类的岩性复杂、滩坝砂储层的孔隙结构复杂、低阻油层的地层水性质复杂、碳酸盐类的储集空间复杂等,针对目标对象的复杂性,在岩石体积模型的基础上,加强实验资料、气测录井和测试生产资料的分析,加强测井评价与地质结合,加强随钻测井、成像、核磁等测井新技术的应用,开展综合研究与评价;对于页岩油储层为代表的非常规领域,以丰富的岩心、多项类的实验分析、测井资料为基础,探索构建页岩油储层特殊的岩石

物理体积模型,为测井评价赋予更多的岩石物理意义,实现页岩油储层有效孔隙度、含油饱和度、含油量等关键参数的测井精细评价。

研究目标方面,目前的测井评价普遍用以划分井孔地层剖面,确定岩层厚度和埋藏深度,确定岩性、划分储层并识别油气水层,进行区域地层对比,确定地层主要矿物成分、有效孔隙度、渗透率、油气饱和度、裂缝、断层、构造特征和沉积环境与砂体的分布等;对于深-超深层的储层,受骨架的影响,油-水、油-气的差异性很小,很难区分和识别,因此要从第一手资料和新方法测井入手,重点加强这类储层的含油气性研究;各种测井系列蕴含丰富的储层信息,充分利用测井在内的各类资料,在产层的评价方面开展攻关,力争实现产层性质的准确判别和产油气量、产水量的合理预测。

评价手段方面,目前中外测井解释软件功能齐全、种类繁多,促进了解释技术的进步,也提高了测井解释水平, Techlog、Geolog、Forward等测井解释软件在胜利油田也得到了广泛的应用。人工智能技术的快速发展为解决测井评价中的多解性、不确

定性等难题提供了新的思路和手段,可以弥补传统解释方法的不足,帮助测井分析人员摆脱大量低层次的分析工作,对于复杂储层和页岩油储层,充分依托专家经验做好样本选取,深化大数据人工智能应用,相信会取得良好效果。

4 结论

(1)胜利油区油气资源丰富,储层类型众多,伴随着评价目标的复杂,紧跟测井技术的发展,基于岩石物理基础,结合不同类型储层的特点和评价难点,发展形成了系列的成熟测井评价技术,在勘探开发工作中发挥了重要的作用。

(2)针对常规储层的以岩性、含油性下限约束的多层合试层的电性标准建立方法和依据不同成岩带划分的储层参数解释技术,以陡坡带砂砾岩岩性测井识别、低渗透砂岩储层有效性评价、低电阻率油层识别及评价等为代表的复杂储层测井评价技术,以及基于二维核磁共振实验的页岩储层参数测井评价技术,都体现了胜利油区的特色,并取得了良好的应用效果。

(3)未来剩余资源主要分布在隐蔽油气藏及深层,有必要加强测井评价与地质、实验、测试等资料的结合,拓宽目标领域,常非并重,决战深层,锚定产层性质评价和产量预测,深化大数据人工智能等新的技术手段,更大更好地发挥测井评价的作用。

参考文献

- [1] 杨智,邹才能.论常规-非常规油气有序“共生富集”——兼论常规-非常规油气地质学理论技术[J].地质学报,2022,96(5):1635-1653.
YANG Zhi, ZOU Caineng. Orderly “symbiotic enrichment” of conventional & unconventional oil and gas—discussion on theory and technology of conventional & unconventional petroleum geology [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(5): 1635-1653.
- [2] 王玥蕴,于炳松,沈臻欢.砂岩孔喉结构复杂性定量表征及其对渗透率的影响——以东营凹陷沙河街组为例[J].油气地质与采收率,2022,29(5):39-48.
WANG Yueyun, YU Bingsong, SHEN Zhenhuan. Quantitative characterization of complexity of sandstone pore-throat structure and its influence on permeability: a case study from Shahejie Formation of Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(5): 39-48.
- [3] 何庆斌,张继红,李金凤.松辽盆地大安油田葡萄花油层特低渗储层成岩相特征与孔隙演化[J].大庆石油地质与开发,2023,42(2):1-12.
HE Qingbin, ZHANG Jihong, LI Jinfeng. Diagenetic facies and porosity evolution of ultra-low permeability reservoir in Putaohua Reservoir in Da'an Oilfield in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(2): 1-12.
- [4] 孙伟.溱潼凹陷西斜坡阜三段储层测井解释方法及应用初探[J].油气藏评价与开发,2020,10(3):121-125.
SUN Wei. Log interpretation method and application for 3rd member of Funing Formation in west slope of Qintong sag [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 121-125.
- [5] 耿斌,才巨宏.一种考虑成岩作用的砂岩孔隙度解释方法[J].石油学报,2004,25(5):44-47.
GENG Bin, CAI Juhong. An interpretation method for sandstone porosity based on diagenesis effect [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 44-47.
- [6] 王少龙,杨斌,魏杰,等.YD油田有效储层下限的确定方法[J].国外测井技术,2018,39(3):39-41.
WANG Shaolong, YANG Bin, WEI Jie, et al. Method for determining the lower limit of effective reservoir in YD oilfield [J]. World Well Logging Technology, 2018, 39(3): 39-41.
- [7] 王艳忠,操应长,宋国奇,等.东营凹陷古近系深部碎屑岩有效储层物性下限的确定[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(4):16-21.
WANG Yanzhong, CAO Yingchang, SONG Guoqi, et al. Determination of physical property lower limit of deep clastic effective reservoirs of Paleogene in Dongying depression [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2009, 33(4): 16-21.
- [8] 代金友,林立新,王洋,等.四种储层物性下限的理论探讨与实例分析[J].油气地质与采收率,2022,29(3):29-35.
DAI Jinyou, LIN Lixin, WANG Yang, et al. Theoretical discussion and case analysis of four lower limits of reservoir physical properties [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(3): 29-35.
- [9] 高阳,蒋裕强,杨长城,等.最小流动孔喉半径法确定低渗储层物性下限[J].科技导报,2011,29(4):34-38.
GAO Yang, JIANG Yuqiang, YANG Changcheng, et al. Minimum flow pore throat radius for determination of the lower limits of parameters in low permeability reservoir [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(4): 34-38.
- [10] 李焱,司马立强,闫建平,等.低孔、低渗致密砂岩储层物性下限值的确定——以川中P地区须二段气藏为例[J].天然气工业,2014,34(4):52-56.
LI Ye, SIMA Liqiang, YAN Jianping, et al. Determination of petrophysical property cutoffs of tight sandstone gas reservoirs: a case study of T₃x² gas reservoirs in P area of central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 52-56.
- [11] 李雄炎,秦瑞宝,曹景记,等.复杂储层连通孔隙度评价与渗透率定量计算方法[J].石油地球物理勘探,2022,57(2):377-385.
LI Xiongyan, QIN Ruibao, CAO Jingji, et al. Method of connected porosity evaluation and quantitative permeability calculation for complex reservoir [J]. Oil Geophysical Prospecting,

- 2022, 57(2): 377-385.
- [12] 方正伟,张立强.砂砾岩体精细划分与对比新探索[J].断块油气田,2015,22(3):314-319.
FANG Zhengwei, ZHANG Liqiang. New approach to fine division and comparison of glutenite [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2015, 22(3): 314-319.
- [13] 郑丽娟,操应长,姜在兴,等.东营凹陷民丰北带古近系砂砾岩体孔隙度量化表征[J].石油学报,2015,36(5):573-583.
ZHENG Lijing, CAO Yingchang, JIANG Zaixing, et al. Quantitative characterization of porosities of Paleogene glutenites in the northern Minfeng sub-sag of Dongying sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(5): 573-583.
- [14] 耿斌,胡心红.孔隙结构研究在低渗透储层有效性评价中的应用[J].断块油气田,2011,18(2):187-190.
GENG Bin, HU Xinhong. Application of pore structure study in effectiveness evaluation of low permeability reservoir [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(2): 187-190.
- [15] 邹敏,夏东领,庞雯,等.致密砂岩储层微观孔喉结构表征方法及其应用——以鄂尔多斯盆地红河地区长8层为例[J].西安石油大学学报:自然科学版,2019,34(2):46-53.
ZOU Min, XIA Dongling, PANG Wen, et al. Characterization method of micropore-throat structure of tight sandstone reservoir and its application: taking Chang 8 reservoir of Honghe area, southern Ordos Basin as an example [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2019, 34(2): 46-53.
- [16] 刘昕,张如玉,孙琦,等.基于大数据驱动的低阻油层精准识别方法[J].油气地质与采收率,2022,29(1):30-36.
LIU Xin, ZHANG Ruyu, SUN Qi, et al. Accurate identification method of low-resistance oil layers driven by big data [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(1): 30-36.
- [17] 朱家俊.济阳坳陷低电阻率油层的微观机理及地质成因[J].石油学报,2006,27(6):43-46.
ZHU Jiajun. Geologic origin and microcosmic mechanism of low-resistivity layers in Jiyang Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(6): 43-46.
- [18] 朱家俊.东营凹陷与地层水运移相关的低电阻率油层[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2007,29(3):39-41.
ZHU Jiajun. Low resistivity pay zones related with formation water migration in Dongying Depression [J]. *Journal of Oil and Gas Technology: Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2007, 29(3): 39-41.
- [19] 朱家俊.陆相断陷盆地地层水化学场变化规律分析[J].测井技术,2010,34(4):352-355.
ZHU Jiajun. Analysis on the changes of formation water chemical field in land facies fault basin [J]. *Well Logging Technology*, 2010, 34(4): 352-355.
- [20] 鲁国明.浅谈储层微孔隙与低电阻率油层的关系——以济阳坳陷东营凹陷沙三段高、低阻油藏为例[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2010,32(6):418-420.
LU Guoming. On the relationship between reservoir micro-pore and low-resistivity reservoirs-by taking Es₃ high and low resistivity reservoirs in Jiyang Depression for example [J]. *Journal of Oil and Gas Technology: Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2010, 32(6): 418-420.
- [21] 白松涛,郭笑错,曾静波,等.基于电成像测井的视地层水电阻率谱方法在低对比度储层评价中的应用[J].长江大学学报:自科版,2016,13(26):18-23.
BAI Songtao, GUO Xiaokai, ZEN Jingbo, et al. Application of evaluation method of low-contrast reservoir based on imaging apparent formation water resistivity spectrum in the evaluation of reservoirs with low contrast level [J]. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2016, 13(26): 18-23.
- [22] 李霞,谭成任,何璇,等.地层水电阻率的计算方法优选及实际应用[J].石油化工应用,2014,33(1):85-88.
LI Xia, TAN Chengqian, HE Xuan, et al. Calculation methods optimization of formation water resistivity and practical application [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2014, 33(1): 85-88.
- [23] 白松涛,王金彬,杨锐祥,等.地层水电阻率评价方法综述[J].地球物理学进展,2017,32(2):566-578.
BAI Songtao, WAN Jinbin, YANG Ruixiang, et al. Summary on formation water resistivity evaluation methods [J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(2): 566-578.
- [24] 李进步.页岩油赋存机理及可动性研究——以济阳坳陷沙河街组为例[D].青岛:中国石油大学(华东),2020.
LI Jinbu. Study on occurrence mechanism and mobility of shale oil: a case study of Shahejie Formation in Jiyang Depression [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [25] 李进步,LU Shuangfang, CHEN Guohui, et al. A new method for measuring shale porosity with low-field nuclear magnetic resonance considering non-fluid signals [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 102(1): 535-543.

编辑 单体珍