

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.101



歧口凹陷歧北斜坡带沙二段致密砂岩储层流体识别与评价

刘一茗^{1,2}, 叶加仁^{1,2*}, 张 飞^{1,2}, 林学春³, 祁爱平³, 李玮龙⁴, 赵 军³

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
3. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280
4. 中国石油大港油田公司第五采油厂, 天津 300280

摘要: 为了解决歧口凹陷歧北斜坡带古近系沙二段致密砂岩储层流体识别效果差、精度低等问题, 在储层“四性”关系分析, 测井系列优选, 测井曲线标准化, 岩电和核磁共振实验的基础上, 建立储层参数及流体饱和度测井解释模型, 采用定性-半定量-定量的方法对储层流体进行识别与评价。沙二段致密砂岩储层“四性”关系复杂, 测井解释模型相关系数高, 在 0.75~0.95; 重叠图法可以定性区分高阻油层与水层, $I_{wa}-\Phi$ 及 I_a-I_{wa} 交会图版可以有效区分油层、油水层及水层, 公式法可以定量划分油层、油水层、水层, 计算出三者的含水饱和度区间分别为 35.5%~91.4%、60.5%~96.5%、77.2%~90.9%, 束缚水饱和度区间分别为 30.3%~89.9%、58.2%~90.1%、62.1%~64.4%。本次流体识别及评价精度比原方法提高了 25%, 为研究区油气勘探开发提供了可靠的技术支持。

关键词: 歧北斜坡带; 致密砂岩; 岩电实验; 核磁共振; 测井评价; 油气地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2022)05-1762-15

收稿日期: 2022-03-21

Fluid Identification and Evaluation of Tight Sandstone Reservoir in Es₂ of Qibei Slope Belt in Qikou Sag

Liu Yiming^{1,2}, Ye Jiaren^{1,2*}, Zhang Fei^{1,2}, Lin Xuechun³, Qi Aiping³, Li Weilong⁴, Zhao Jun³

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China
4. The Fifth Oil Production Plant of PetroChina Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China

Abstract: In order to solve the poor effect and low accuracy of fluid identification of Es₂ tight sandstone reservoir in Qibei slope belt, logging interpretation model of reservoir and fluid saturation is established, based on the analysis of reservoir characteristics

基金项目: 大港油田横向协作项目(No. DGYT-2020-JS-37); 构造与油气资源教育部重点实验室开放课题项目(No. TPR-2020-11); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. G1323521043)。

作者简介: 刘一茗(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要从事油气藏测井地质综合研究。ORCID: 0000-0002-8424-7718. E-mail: liuyiming12@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 叶加仁, ORCID: 0000-0001-5699-8074. E-mail: jrye@cug.edu.cn

引用格式: 刘一茗, 叶加仁, 张飞, 林学春, 祁爱平, 李玮龙, 赵军, 2022. 歧口凹陷歧北斜坡带沙二段致密砂岩储层流体识别与评价. 地球科学, 47(5):1762-1776.

Citation: Liu Yiming, Ye Jiaren, Zhang Fei, Lin Xuechun, Qi Aiping, Li Weilong, Zhao Jun, 2022. Fluid Identification and Evaluation of Tight Sandstone Reservoir in Es₂ of Qibei Slope Belt in Qikou Sag. *Earth Science*, 47(5):1762-1776.

and “four natures” relationship, optimization of logging series, standardization of logging curve, combined with petro-electric and NMR experimental results, with an integrated approach of qualitative, semi-qualitative and quantitative methods to identify and evaluate the fluid in tight sandstone reservoir. The relationship between “four natures” of tight sandstone reservoir in E_{s_2} is complex, and the correlation coefficient of logging interpretation model is high, ranging between 0.75 and 0.95. Overlapping-map method can qualitatively distinguish high resistivity oil layer and water layer. Cross-plot method ($I_{wa}-\Phi$ and I_a-I_{wa}) can effectively distinguish oil layer, oil-water layer and water layer. The water saturation interval of oil layer, oil-water layer, water layer calculated by the legal quantity of the formula is 35.5%–91.4%, 60.5%–96.5%, and 77.2%–90.9%, respectively, and the irreducible water saturation interval of oil layer, oil-water layer, water layer calculated by the legal quantity of the formula is 30.3%–89.9%, 58.2%–90.1%, and 62.1%–64.4%, respectively. The coincidence rate of logging fluid identification and evaluation results is 25% higher than the original logging interpretation, and it provides reliable technical support for oil and gas exploration and development in the study area.

Key words: Qibei slope belt; tight sand stone; rock-electric experiment; NMR experiment; logging evaluation; petroleum geology.

0 引言

歧口凹陷位于渤海湾盆地黄骅拗陷中部,夹持在沧县隆起与埕宁隆起之间,总体上呈北断南超的构造格局,面积为 6 640 km²。以歧口主凹为中心自北向南逆时针方向依次发育北塘、板桥、歧北、歧南和埕北 5 个斜坡构造带(赵贤正等,2016),其中歧北斜坡带位于歧口主凹与孔店凸起之间,面积为

450 km²,是歧口凹陷致密油富集区(韩国猛等,2014)。古近系始新统沙河街组二段(以下简称沙二段)为歧北斜坡带最重要的砂岩储层(刘金库等,2016),以扇三角洲、辫状河滩坝、河口坝及席状砂等砂体为主(Wang *et al.*, 2017),岩性主要为细砂岩、泥质粉砂岩以及灰质粉砂岩(Cui *et al.*,2021),属于致密砂岩储层(图 1)。

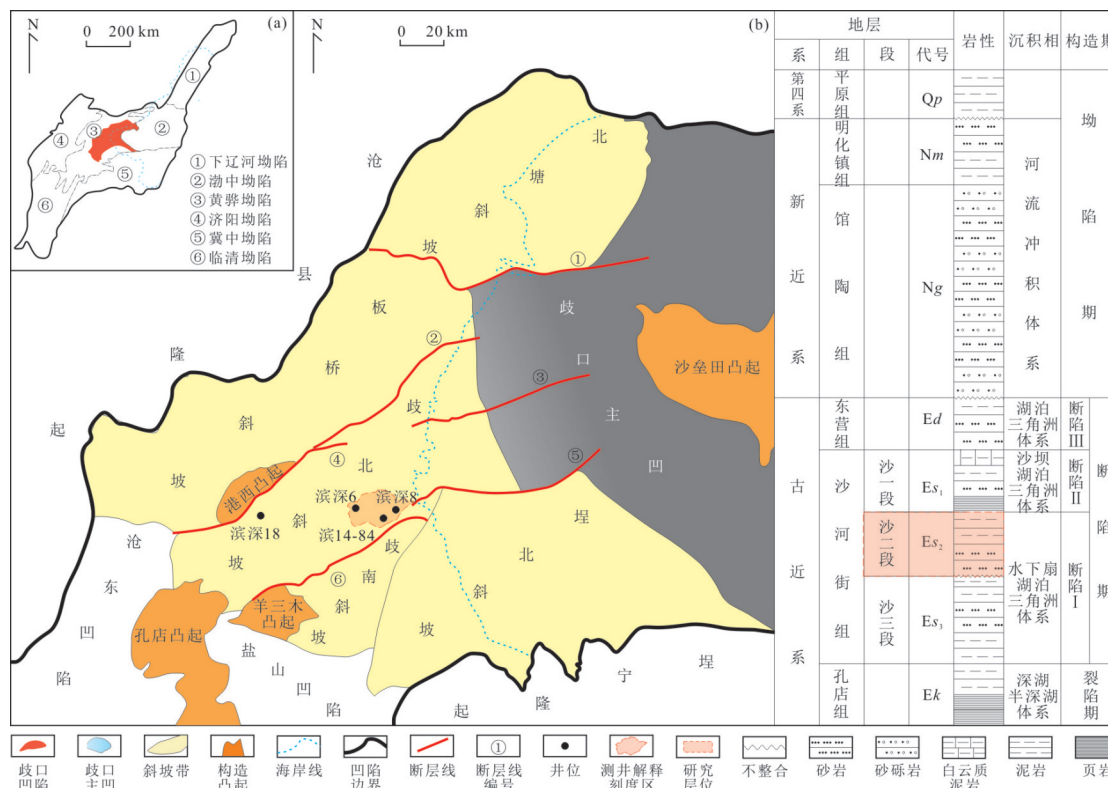


图 1 歧口凹陷歧北斜坡带构造位置、构造单元划分及沉积充填

Fig.1 The structure location, structure units and stratigraphy of Qibei slope belt in Qikou sag

据 Zhang *et al.*(2014)修改。①为海河-新港断层;②为滨海断层;③为歧中断层;④为港东断层;⑤为歧东断层;⑥为南大港断层

我国的陆相致密砂岩储层具有岩性致密且复杂,薄砂岩与泥岩频繁互层,非均质和各向异性强等特点(贾承造等,2012)。因此,常规储层测井流体识别方法对致密砂岩往往难以奏效(成家杰等,2017)。目前,致密砂岩储层测井识别系列主要包括岩性测井系列(自然电位 SP ,自然伽马 GR)、孔隙度测井系列(声波 AC ,密度 DEN ,中子 CN)、电阻率系列(双侧向 LLS/LLD ,微侧向 MLL ,八侧面 $LL8$,微球形聚焦 $MSFL$,方位电阻率 ARI 及阵列感应 AIT)以及工程测井系列(井径 CAL ,井斜方位 DEV)(赵军龙等,2017)。为了精准恢复致密砂岩储层中的流体信息,必须进行测井系列优选和测井曲线标准化处理(高春云等,2020)。

岩电和核磁共振实验是定量评价致密砂岩储层流体的重要手段。岩电实验所测定的胶结指数 m 、饱和度指数 n 、岩性系数 a 和 b 等 4 个关键参数,可以利用 Archie 公式将岩石电阻率与含水饱和度联系起来,定量评价地层流体含量(Archie, 1942)。核磁共振主要基于岩石孔隙中不同流体纵向弛豫时间的差异性来评价流体性质及含量(司马立强等,2019; Wang *et al.*, 2019)。致密砂岩测井流体识别与评价应遵循定性-半定量-定量的流程,其中,定性方法是基于测井曲线特征对地层含流体性质进行直观的判断(毛克宇,2016),半定量方法是基于不同测井参数的交会图版识别油水层(冉冶等,2016),定量方法则是基于测井饱和度解释模型定量计算流体饱和度(刘洪平等,2017)。

前人对歧北斜坡带沙二段致密砂岩储层做了大量的测井评价工作,在储层测井响应(丁娱娇等,2019;冯冲等,2020)、地震-测井联动评价(王瑀等,2012)、低阻油藏成因(胡瑞波等,2010;李俊国等,2012)等方面进行了深入的研究。由于缺乏系统的实验分析,特别是岩电实验的缺失,导致研究区测井评价精度较低,油水层划分欠精细(初广震等,2017)。本次研究从储层“四性”关系分析入手,优选测井识别系列,建立测井解释模型,定性-半定量刻画流体性质,并结合岩电和核磁实验成果对流体饱和度进行定量评价。在此基础上,探索建立了适用于研究区流体识别及评价的方法技术体系,提高了致密油藏测井解释符合率,同时为研究区油气勘探及开发提供技术支撑。

1 储层“四性”关系

1.1 岩性

歧北斜坡带沙二段储层埋深在 3 000~4 500 m,地层厚度在 50~200 m,岩性以细砂岩、粉砂岩、泥质砂岩为主,其次为泥质白云岩、灰质白云岩、泥岩。纵向上以砂泥岩薄互层为主,横向上砂体变化大,非均质性较强(Pu *et al.*, 2020)。粒度集中在 0.03~0.25 mm,圆度以圆状-次棱角状为主,分选性中等,胶结类型以钙质和泥质胶结为主(薛宗安等,2015)。岩石类型以长石砂岩为主,少部分为岩屑长石砂岩。储层孔隙类型以次生粒间孔和颗粒内溶孔为主,部分发育颗粒铸模孔(刘金库等,2016)。

1.2 物性

8口井 94个岩心样品测试结果统计显示,沙二段储层孔隙度主体分布在 7.38%~13.80%之间,平均值为 11.30%(图 2a),渗透率主体分布在 $0.58 \times 10^{-3} \sim 3.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $2.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 2b)。基于 25块岩心样品的压汞实验结果,对压汞曲线进行分类,并可将沙二段储层孔隙结构可划分为 3类(图 2c),且以 III类(细孔-细喉型)为主,其平均孔喉半径和最大孔喉半径均小于 $0.50 \mu\text{m}$,排驱压力为 1.34 MPa,最大进汞饱和度低于 38%。

1.3 含油性

11口井 16个原油物理性质统计分析表明(表 1),歧北斜坡带沙二段原油具有低密度、中粘度、中凝固点、高蜡量、低硫量及低胶质等特征,以轻质中粘原油为主。地层水以氯化钙型(CaCl_2)为主,少部分为重碳酸钠型(NaHCO_3),矿化度在 4 967~32 635 mg/L,集中分布在 18 000 mg/L 左右(侯中帅等,2021)。

基于 11口录井资料,并结合试油结论表明,干层仅发现油迹,频数为 1;水层可发现油浸、油斑、荧光,频数分别为 1、1、5;含油层可发现油浸、油斑、油迹、荧光,频数分别为 10、5、3、9;油层可发现油浸、油斑、油迹、荧光,频数分别为 7、5、3、1(图 3)。

1.4 电性

10口井 95个试油层 GR 、 AC 、 RT 等测井参数统计分析揭示,歧北斜坡带沙二段储层电性复杂,不同流体电性特征差别较大(表 2),油层表现为 GR 低、 AC 中等、 RT 高,油水层表现为 GR 高、 AC 低、 RT 中等,水层则表现为 GR 中等、 AC 高、 RT 低。

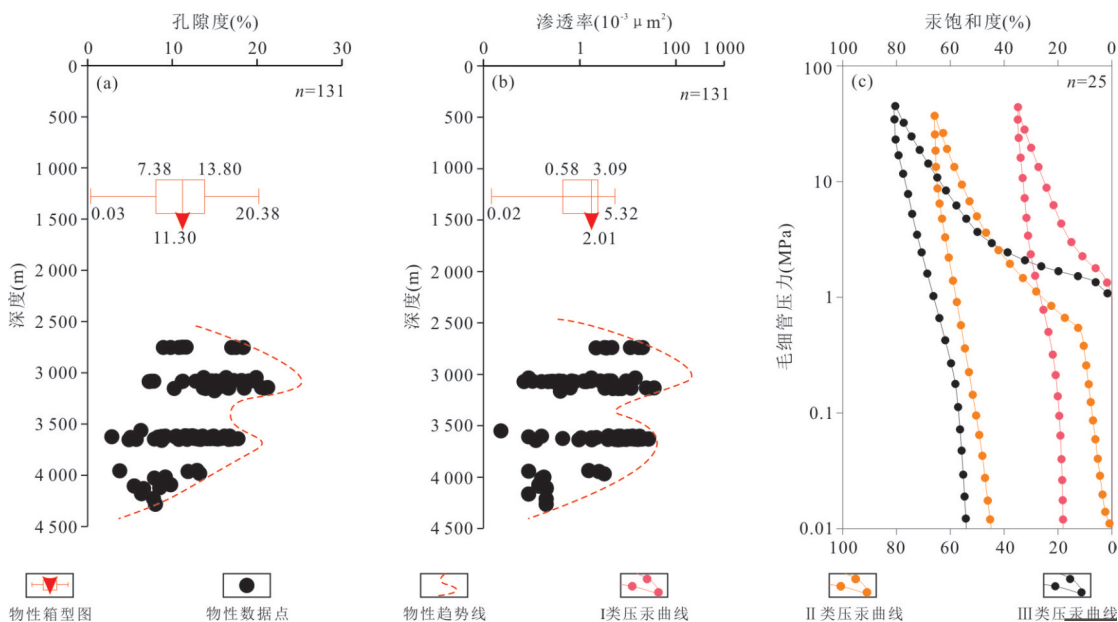


图 2 歧北斜坡带沙二段储层孔隙度-深度(a)、渗透率-深度(b)及压汞曲线(c)分布图

Fig.2 Porosity-depth (a), permeability-depth (b), mercury injection curve (c) of E_{s2} reservoirs in Qibei slope belt

表 1 歧北斜坡带沙二段储层原油物性统计表

Table 1 Statistics of physical properties of crude oil of E_{s2} reservoirs in Qibei slope belt

原油物性参数	最小值	最大值	平均值	样本数
密度(20℃)	0.81	0.89	0.85	16
粘度(50℃)	2.4	21	9.8	16
凝固点(℃)	16	39	26.7	16
含蜡(%)	7.78	21.3	14.7	16
含硫(%)	0.04	0.43	0.14	16
含胶量(%)	2.73	29.7	16.3	16

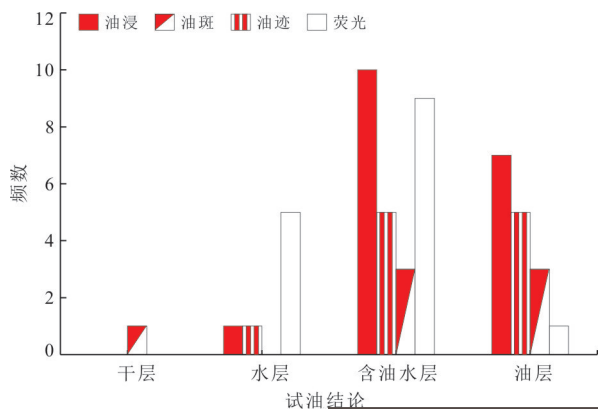


图 3 歧北斜坡带沙二段储层含油性特征

Fig.3 Oilness of E_{s2} reservoirs in Qibei slope belt

1.5 “四性”关系

基于 12 口井 64 对数据,分析储层岩性-物性、岩性-电性、岩性-含油性及物性-含油性之间的内

在联系(图 4)。就岩性-物性关系而言(图 4a),细砂岩相对较好,孔隙度在 8%~16%,渗透率在 $0.08 \times 10^{-3} \sim 12 \times 10^{-3} \mu m^2$;粉砂岩和泥质砂岩的物性相对较差,且二者难以区分,孔隙度在 4%~12%,渗透率在 $0.10 \times 10^{-3} \sim 11 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。岩性-电性关系上(图 4b),细砂岩、粉砂岩及泥质砂岩的电性(AC、RT)区别不大。对比分析不同岩性的含油性(图 4c),显然,细砂岩的含油性较好,试油揭示多为油层和油水层,未见干层;粉砂岩及泥质砂岩的含油性较差,试油结论以油水层和水层居多,不存在油层,并见干层。物性-含油性关系上,二者之间未见明显的相关性。

2 测井解释模型

影响致密储层流体识别的参数众多,主要包括泥质含量、孔隙度、渗透率、地层水电阻率、含水饱和度、束缚水饱和度等。歧北斜坡带沙二段储层致密,次生孔隙发育,导致流体分布混乱,储层参数及流体饱和度模型的准确建立显得尤为重要。

2.1 测井系列优选

歧北斜坡带沙二段致密砂岩储层测井响应复杂,为了准确识别储层流体性质,需优选出适用的测井系列。岩性测井系列方面,GR 与地层流体性质无关,仅与地层沉积环境有关,对岩性识别效果较好,但不同粒级碎屑岩 GR 响应不同,需标准化后才

表 2 歧北斜坡带沙二段储层不同流体电性响应特征

Table 2 Electrical response characteristics of different fluids of Es₂ reservoirs in Qibei slope belt

试油 结论	GR(API)			AC(μs/m)			RT(Ω·m)			层数
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	
油层	57.38	102.97	73.94	199.45	325.26	243.58	2.53	43.69	13.02	52
油水层	67.29	103.68	84.63	214.21	300.61	239.65	4.92	11.33	8.14	16
水层	58.04	105.26	81.12	227.27	333.21	274.38	2.35	7.16	3.83	27

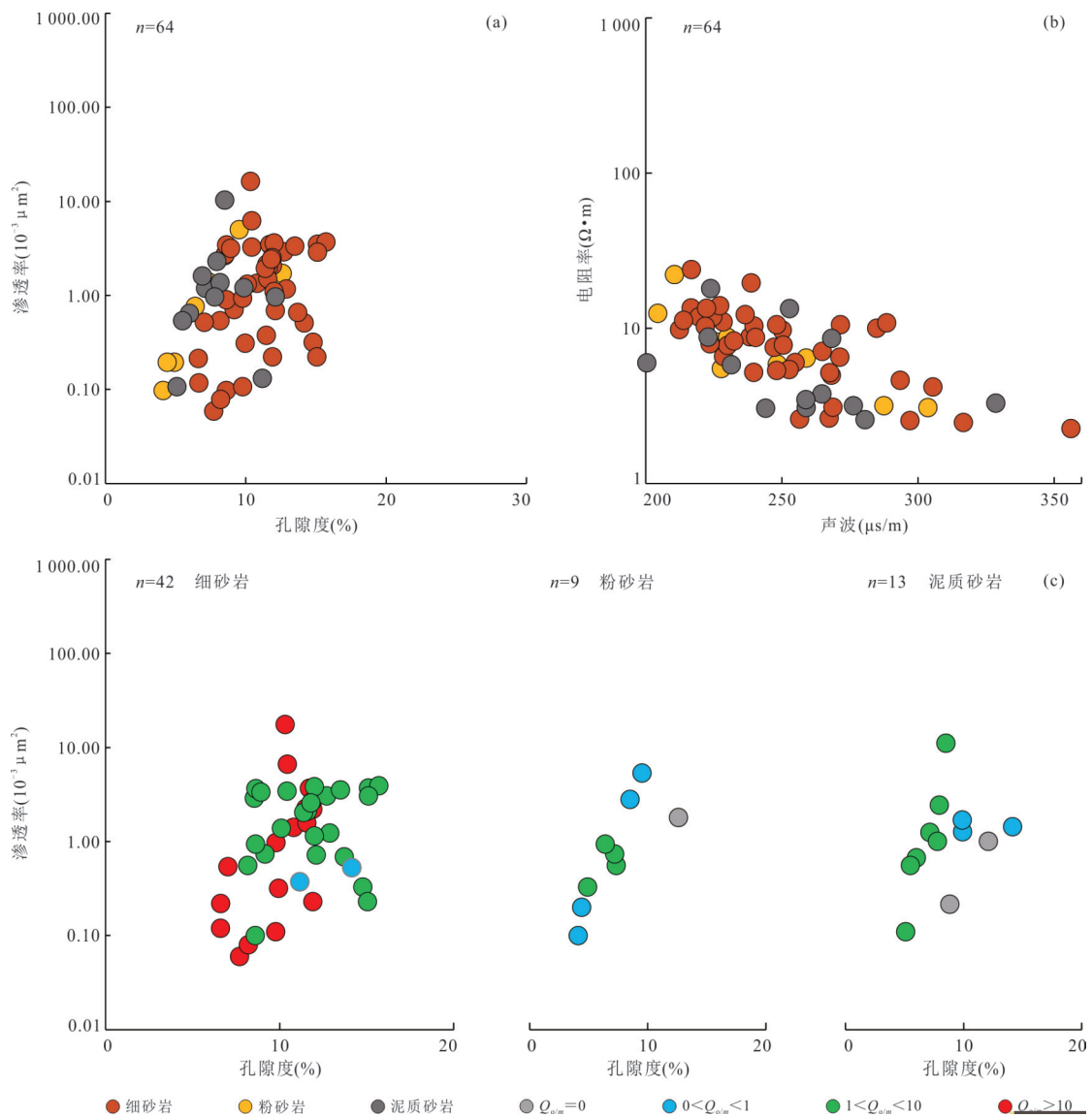


图 4 歧北斜坡带沙二段储层岩性-物性(a)、岩性-电性(b)及岩性-物性-含油性关系(c)分析图

Fig.4 Lithology-physical properties (a), lithology-electricity (b) and lithology-physical properties-oiliness (c) analysis diagrams of Es₂ reservoirs in Qibei slope belt

$Q_{o/m}$ 为产厚比, $Q_{o/m}=0$ 为干层, $0 < Q_{o/m} < 1$ 为水层, $1 < Q_{o/m} < 10$ 为油水层, $10 < Q_{o/m}$ 为油层

能使用. 另外, 前人研究表明(颜崇安等, 2019), SP对沙二段致密砂岩储层识别效果较差, 仅能作为岩性识别的辅助曲线. 孔隙度测井系列方面, AC、DEN和CN等对沙二段储层渗透性均有

较好识别, 但由于AC受地层压力的影响较大, 也需标准化后才能使用. 电阻率测井系列方面, 本次研究采用AIT测井系列, 选用纵向探测深度2英尺、横向探测深度分别为10、20、30、60、

90及120英寸等6条曲线的组合,该系列不仅可以很好地计算地层真电阻率,还可以通过二维电阻率图像直观显示侵入带电阻率的变化。

2.2 测井曲线标准化

为了消除环境及工程作业对测井曲线的影响,需对相关测井曲线进行标准化处理.本文以滨深6井为标准井,以该井沙二段稳定的大套泥岩段为校正标准层,分别开展GR和AC曲线标准化处理.根据标准井中标准层的GR值对目标井测井曲线进行调整,包括平移和伸缩运算(Quartero *et al.*, 2014),标准化后的GR值在70~90 API,主峰值为85 API,符合GR曲线标准化的精度和原则.研究区AC曲线总体呈周波跳动,且随埋深增大而减小,采用趋势面法对AC曲线进行标准化校正(赵晓明等,2010),标准化后的AC值在270~350 $\mu\text{s}/\text{m}$,且随埋深增大而减小的趋势更加明显。

2.3 储层参数模型

在储层“四性”关系分析及测井系列优选的基础上,采用岩心刻度测井法(李浩等,2016),分别建立泥质含量(V_{sh})、孔隙度及渗透率等储层参数定量评价模型。

沙二段致密砂岩储层的 V_{sh} 与GR具有明显的正相关性(图5),因此,以GR值为自变量建立储层泥质含量预测模型。

为了提高模型的精度,本次研究以 ΔGR 值代替GR值:

$$\Delta\text{GR} = \frac{\text{GR} - \text{GR}_{\min}}{\text{GR}_{\max} - \text{GR}_{\min}}, \quad (1)$$

式中, ΔGR 为自然伽马相对值,无量纲; GR_{\min} 、 GR_{\max} 分别为自然伽马最小值与最大值,API。

利用上式计算出 ΔGR 值后,即可预测沙二段储层的泥质含量:

$$V_{\text{sh}} = \frac{2^{c\Delta\text{GR}} - 1}{2^c - 1}, \quad (2)$$

式中, V_{sh} 为泥质含量,小数; c 为希尔奇系数,无量纲,本文沙二段取值为2。

孔隙度和渗透率是表征储层物性的重要参数,也是测井饱和度模型的基础参数.沙二段储层孔隙度与AC、CN有较好的正相关性,与DEN有较好的负相关性,相关系数分别为0.88、0.63及0.70.为了减小测井参数读取所产生的误差,本文采用多元线性回归的方法建立孔隙度与AC、CN、DEN的拟合关系式:

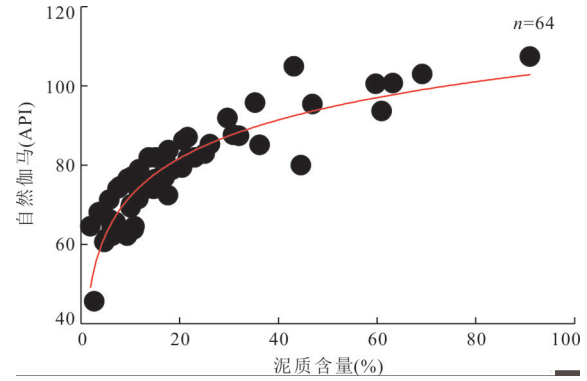


图5 歧北斜坡带沙二段储层GR- V_{sh} 交会图

Fig.5 GR- V_{sh} cross-plot of Es_2 reservoirs in Qibei slope belt

$$\Phi = 0.094\text{AC} - 18.457\text{DEN} + 1.338\text{CN} + 18.359, \quad (3)$$

式中, Φ 为预测孔隙度,%; AC 为声波时差值, $\mu\text{s}/\text{m}$; DEN 为密度值, g/cm^3 ; CN 为中子值,%。相关系数达0.95。

基于64块岩心样品的物性测试资料,沙二段储层渗透率与孔隙度具明显的对数-线性正相关关系,相关系数达0.79.因此,基于式3及孔-渗关系,可相应地建立渗透率与测井参数的定量关系(表3)。

2.4 流体饱和度模型

饱和度模型是测井流体定量评价的核心.本文基于地层水电阻率解释模型,结合岩电和核磁共振实验成果,建立沙二段储层流体饱和度模型。

利用水分析资料确定地层水电阻率(R_w)是最直接有效的方法(白松涛等,2017).基于地层水总矿化度,利用等效NaCl矿化度图版可查得地层水电阻率(雍世和和张超谟,2007),但该方法速度慢,效率低.本次研究采用公式法计算等效NaCl溶液电阻率:

$$R_w = \frac{3 \times 10^5 \rho^{-0.9524} + 1}{1.8T + 39}, \quad (4)$$

式中, R_w 、 ρ 、 T 分别为等效NaCl溶液的电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)、质量浓度(10^{-6})及温度($^{\circ}\text{C}$)。

Archie公式能有效计算具有颗粒孔隙的纯地层或泥质含量较少的储层含水饱和度,但对裂缝型或泥质含量较多的储层不太适用(张志松,2020).歧北斜坡带沙二段圈闭多为岩性型,断裂活动对储层影响较小;另外,沙二段储层泥质含量较低,平均值为9.97%。因此,选用Archie公式计算沙二段储层含水饱和度。

Archie公式涉及胶结指数 m 、饱和度指数 n 、岩性系数 a 和 b 等4个关键参数的获取和计算.采集滨

表 3 歧北斜坡带滨深 6-滨深 8 井区沙二段储层参数模型及流体饱和度模型

Table 3 Reservoir parameter model and fluid saturation model of Es₂ reservoirs of Binshen 6 and Binshen 8 well zones in Qibei slope belt

参数	模型	R	样本数
泥质含量(V_{sh})	$V_{sh}=0.67 \cdot 4^{\Delta GR}-0.33$	0.88	64
孔隙度(Φ)	$\Phi=0.3075 \cdot AC-61.907$	0.88	57
	$\Phi=0.8965 \cdot CN-1.4923$	0.63	57
	$\Phi=-50.466 \cdot DEN+135.64$	0.70	57
	$\Phi=0.094 \cdot AC+1.338 \cdot CN-18.457 \cdot DEN+18.359$	0.95	57
渗透率(K)	$K=0.0027 \cdot e^{0.3703\Phi}$	0.79	64
地层水电阻率(R_w)	$R_w=(3 \times 10^5 p^{-0.9524}+1)/(1.8T+39)$	0.75	13
含水饱和度(S_w)	$S_w=[(5.33R_w)/(\Phi^{1.3} \cdot RT)]^{1/1.857}$	0.95	23
束缚水饱和度(S_{wi})	$S_{wi}=84.745e^{(-5.37\sqrt{K/\Phi})}$	0.92	10

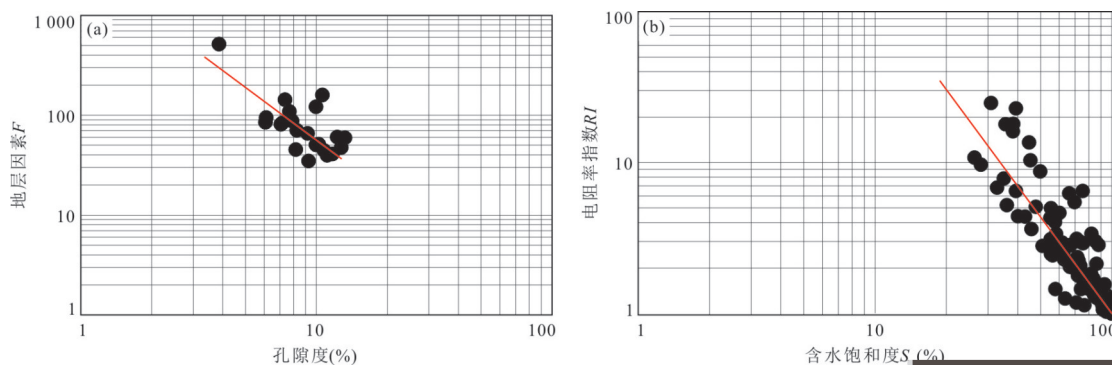


图 6 歧北斜坡带沙二段地层因素与孔隙度(a)、电阻率增大率与含水饱和度(b)关系图

Fig.6 The relationship of formation factor and porosity (a), resistivity index and water saturation (b) of Es₂ reservoirs in Qibei slope belt

14-84井23块沙二段致密砂岩样品,采用二极法测量岩样电阻率值和油水出液量,结合地层水电阻率 R_w ,求地层因素 F ,并通过回归分析法得到 m 值和 a 值;采用离心法测量不同离心转速下的饱和度和电阻率,通过电阻率系数与含水饱和度交会,建立幂函数关系式,从而确定 n 值和 b 值(图6)。

地层因素(F)与孔隙度(Φ)的关系式为:

$$F = -1.3\Phi + 0.73(5), R=0.65,$$

电阻率指数(RI)与含水饱和度 S_w (%)的关系式为:

$$RI = -1.857S_w, R=0.95, \quad (6)$$

得出 m 、 n 、 a 、 b 参数值分别为1.3、1.857、5.33和1。

束缚水饱和度是致密砂岩储层流体评价的关键参数。目前获取束缚水饱和度的方法主要有岩心实验法和测井预测法两种。岩心实验法可以直接测定束缚水饱和度,但由于取心井段通常不连续,且实验价格昂贵,因此应用较少(朱林奇等,

2016)。应用核磁共振测井计算束缚水饱和度是现阶段常用的方法,其具有信息丰富、精度高、反应灵敏以及无损样品等优点(赵彦超等,2006)。

本次研究采集滨14-84井10块沙二段致密砂岩储层样品,测量其孔隙度、渗透率后,进行岩心核磁共振实验,厘定 T_2 截止值,计算束缚水饱和度值(表4)。实验及计算结果表明,沙二段致密砂岩储层束缚水饱和度较高,在62.03%~82.64%,平均值为74.41%。

基于核磁实验计算的束缚流体饱和度,可建立其与储层孔隙结构指数($\sqrt{K/\Phi}$)的关系式(图7):

$$S_{wi} = 84.745e^{-5.37\sqrt{K/\Phi}}, R=0.92, \quad (7)$$

式中, S_{wi} 为核磁实验计算所得的束缚水饱和度,%; K 为渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; Φ 为孔隙度,%。

3 流体识别及定量评价

选择测井系列齐全且有岩电和核磁实验数据(滨14-84井)的滨深6-滨深8井区作为歧北斜坡带

表 4 滨 14-84 井岩心核磁共振实验结果

Table 4 Core NMR experimental results of well Bin14-84

岩样 编号	深度 (m)	直径 (cm)	长度 (cm)	孔隙度 (%)	渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	T_2 截止值 (ms)	束缚水饱和度 (%)
1	3 813.37	2.53	4.08	12.59	0.24	84.5	81.01
2	3 813.38	2.53	5.63	12.63	0.26	82.4	80.57
3	3 821.15	2.53	4.13	11.22	0.07	93.1	82.64
4	3 821.16	2.53	5.73	12.58	0.07	90.6	82.57
5	3 824.36	2.53	5.63	13.12	0.09	91.4	80.14
6	3 838.67	2.53	5.91	14.39	0.94	92.3	62.03
7	3 838.68	2.53	3.96	12.68	0.31	93.4	74.67
8	3 842.02	2.53	6.06	12.75	0.35	87.3	73.89
9	3 846.11	2.53	4.05	13.95	0.53	86.9	64.41
10	3 846.12	2.53	6.42	14.06	0.74	85.7	62.13

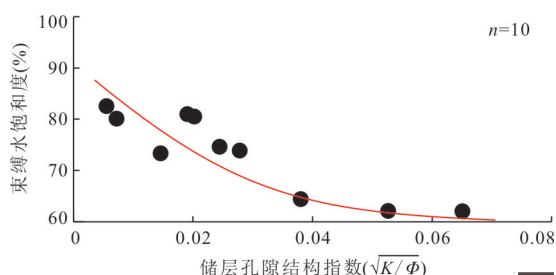


图 7 滨 14-84 井束缚水饱和度与孔隙结构指数关系

Fig.7 Relationship between irreducible water saturation and pore structure of well Bin14-84

测井流体识别与定量评价的刻度区,建立储层参数模型及流体饱和度模型(表 3),分别采用重叠图法、交会图法和公式法对沙二段致密砂岩储层流体进行识别及定量评价.

3.1 重叠图法

重叠图法是指将不同测井系列曲线或者数据进行重叠,按曲线幅度差对流体进行定性识别的一种方法(黄薇等,2015).本次研究选取大套非渗透层泥岩段,将 RT-GR、RT-AC 及 AC-GR 等 3 组测井曲线调至重合,依据测井曲线重叠幅度对沙二段致密砂岩储层油水层进行定性识别. RT-GR 重叠幅度差在一定程度上可以反映储层含油性及物性条件,含油性越好,RT 值越高;物性条件越好,GR 值越低. RT-AC 重叠幅度差同样可以较好地反映储层含油性及物性条件,含油性越好,RT 值越高;孔渗条件越好,AC 值越高. AC-GR 重叠幅度差可以判定储层物性好坏,物性越好,AC 值越高,GR 值越低,曲线重叠幅度差越大. 上述 3 种重叠图法可以定性识别储层流体性质,含油性越好,幅度差越大;若储层为水层或干层,两条曲线

之间的幅度差则很小或几乎无幅度差.

试油成果揭示,滨 14-84 井在 3 832~3 852 m 共有 2 套油层(图 8a),其 RT-GR、RT-AC 及 AC-GR 等 3 组测井曲线重叠幅度均较大,为典型油层特征;滨深 6 井在 3 555~3 575 m 共有 5 套油层(图 8b),这 5 套油层 RT 均偏小,导致 RT-GR 和 RT-AC 测井曲线重叠幅度均较小,3 561~3 562 m 井段的 RT-AC 测井曲线几乎重叠,而 AC-GR 测井曲线重叠幅度仍较大,为典型低阻油层特征;滨 39 井在 3 625~3 645 m 共有 3 套水层(图 8c),RT-GR 测井曲线重叠幅度均较小,RT-AC 测井曲线几乎完全重合,为典型水层特征. 显然,RT-GR、RT-AC 及 AC-GR 等 3 组测井曲线重叠可以较好地地区分高阻油层与水层,但对低阻油层与水层则无法区分.

3.2 交会图法

交会图法指优选测井参数对,绘制交会图版,划分流体性质. 如上所述,GR、RT 及 AC 等测井参数可以区分油水层,可依此建立交会图版,半定量判识沙二段致密储层流体性质.

3.2.1 RT-GR RT-GR 交会图版对油层、油水层及水层的总体区分度不高(图 9). 其中,GR 对油层、油水层及水层没有区分度,RT 显示大部分油层和油水层具有高阻($>10 \Omega \cdot \text{m}$)的特征,但也有部分油层 $<10 \Omega \cdot \text{m}$,表现为低阻,说明研究区存在低阻油层,水层则全部为低阻,均 $<6 \Omega \cdot \text{m}$.

3.2.2 RT- Φ RT- Φ 交会图版揭示(图 10a),由于低阻油层的存在,该图版对油层、油水层及水层的识别效果均较差,不满足测井流体识别图版的要求.

3.2.3 $I_a/I_{wa}-\Phi$ 研究表明,自然电位差值、电阻增大率以及电阻率比值等参数可以消除地层水矿化

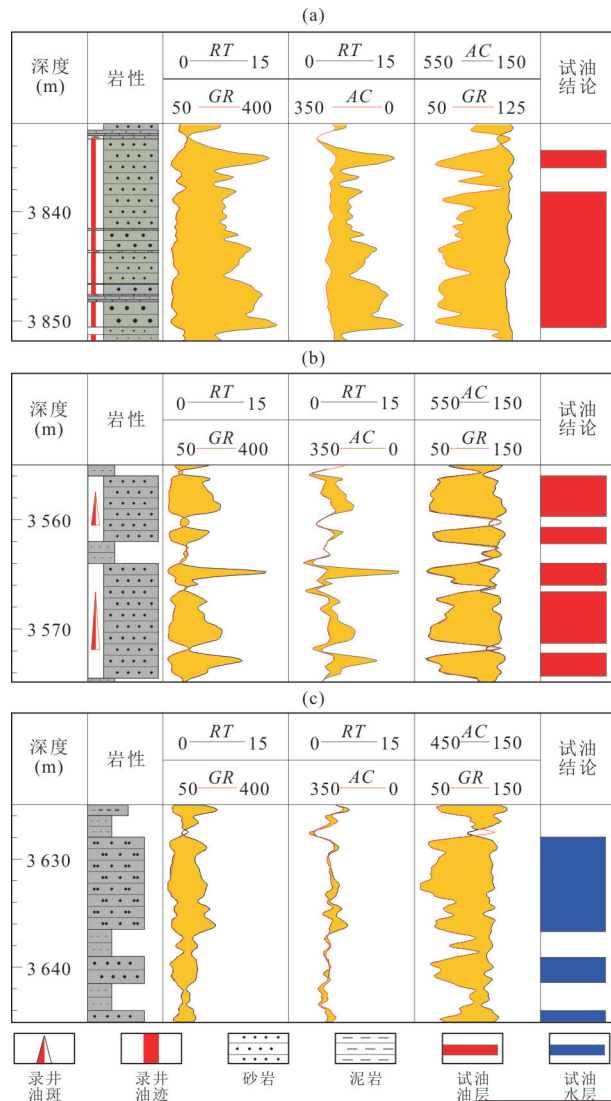


图8 滨深6-滨深8井区测井曲线重叠特征

Fig.8 Overlapping characteristics of logging curves in Binshen 6-Binshen 8 well zones

a为滨14-84井;b为滨深6井;c为滨39井

度对油层识别精度的影响,避免低阻油层在交会图版中的干扰,能够有效地识别低阻油层.由于研究区自然电位识别效果较差,因此仅选取电阻增大率(I_a)和电阻率比值(I_{wa})两个参数制作交会图版.另外,这两个参数仅与含水饱和度(S_w)有关,与储层孔隙度(Φ)无关,而孔隙度对储层含油性评价至关重要.因此,在重叠图法识别的标准油层、油水层及水层的基础上,分别建立电阻增大率、电阻率比值与孔隙度交会图版,识别储层流体性质.

电阻率增大率为含油储层电阻率与储层百分含水电阻率的比值(雍世和张超谟,2007):

$$I_a = \frac{RT}{R_o}, \quad (8)$$

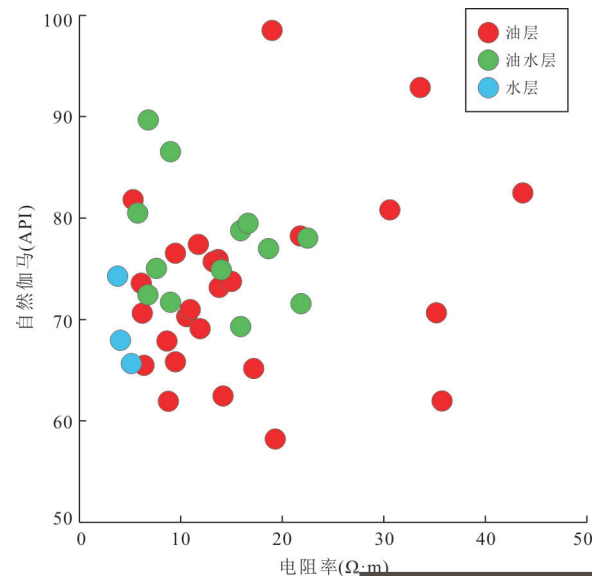


图9 滨深6-滨深8井区沙二段储层自然伽马与电阻率交会图

Fig.9 Cross-plot of GR-RT in Binshen 6-Binshen 8 well zones

式中, I_a 为电阻率增大率,无量纲; RT 为储层真电阻率, $\Omega \cdot m$; R_o 为岩石含水100%电阻率, $\Omega \cdot m$.

电阻率比值为含油储层电阻率与含淡水储层电阻率的比值(杨克兵和曹程程,2020):

$$I_{wa} = \frac{RT}{R'_o}, \quad (9)$$

式中, I_{wa} 为电阻率比值; RT 为储层真电阻率, $\Omega \cdot m$; R'_o 为含淡水地层电阻率, $\Omega \cdot m$.

结果表明(图10), $I_a-\Phi$ 交会图版可以较好地地区分含油层(油层、油水层)与水层(图10b),但在 $I_a < 3.5$ 时,对油层与油水层的区分度不高. $I_{wa}-\Phi$ 交会图版对油层、油水层及水层的区分效果较好(图10c),当 $I_{wa} > 2$ 时,储层流体均为油层; $I_{wa} < 2$ 时,储层流体均为含水层(油水层、水层),通过孔隙度可以将含水层中的油水层和水层进行区分,其中 $\Phi > 11\%$ 储层流体为水层, $\Phi < 11\%$ 储层流体为油水层.

另外,建立电阻增大率与电阻率比值交会图版,发现 I_a-I_{wa} 交会图版同样对油层、油水层及水层具有较好的区分度(图10d),具体划分3个区域:①油层区, I_a 在2.0~11.3, I_{wa} 在1.6~8.5;②油水层区, I_a 在1.6~2.8, I_{wa} 在1.1~1.9;③水层区, I_a 与 I_{wa} 均小于1.

3.3 公式法

交会图版仅能半定量识别致密砂岩储层的流体性质,不能定量计算储层流体饱和度的大小.本次研究基于岩电和核磁实验所建立的饱和度参数

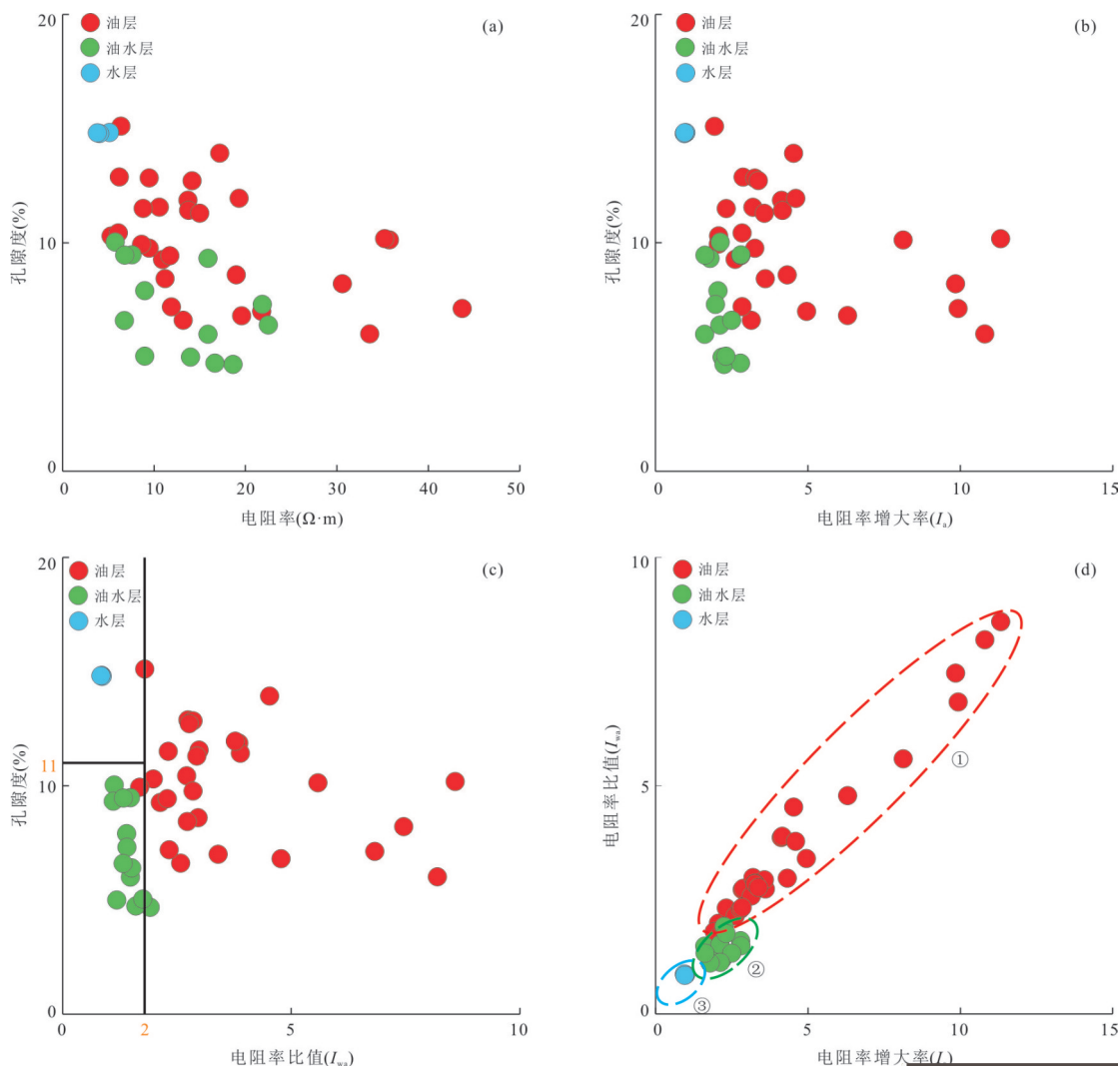


图 10 滨深 6-滨深 8 井区沙二段储层电阻率测井流体识别交会图

Fig.10 Fluid identification cross-plot of resistivity logging of Es₂ reservoirs in Binshen 6-Binshen 8 well zones
a.RT-Φ 交会; b.I_r-Φ 交会; c.I_{w_a}-Φ 交会; d.I_{w_a}-I_r 交会

表 5 滨深 6-滨深 8 井区沙二段致密砂岩储层测井流体饱和度验证表

Table 5 Verification of logging fluid saturation of tight sandstone reservoir in Binshen 6-Binshen 8 well zones

试油结论	含水饱和度 (%)	含油饱和度 (%)	束缚水饱和度 (%)	可动流体饱和度 (%)	样本数
油层	35.5~91.4(65.5)	8.6~64.5(34.5)	30.3~89.9(61.5)	10.1~69.7(38.5)	42
油水层	60.5~96.5(81.3)	3.5~39.5(18.7)	58.2~90.1(70.9)	9.9~41.8(29.1)	13
水层	77.2~90.9(85.4)	9.1~22.8(14.6)	62.1~64.4(63.2)	35.6~37.9(36.8)	3

注:最小值-最大值(平均值).

模型,定量计算含水饱和度、含油饱和度、束缚水饱和度以及可动流体饱和度等饱和度(Amiri *et al.*, 2012),并与试油结论进行对比,建立刻度区油层、油水层及水层的评价标准(表 5).

结果表明,油层的含水饱和度和束缚水饱和度低,平均值分别为 65.5% 和 61.5%,相应的含油饱

和度和可动流体饱和度高,平均值分别为 34.5% 和 38.5%;油水层的含水饱和度中等,平均值为 81.3%,相应的含油饱和度同样中等,平均值为 18.7%,但束缚水饱和度高,平均值为 70.9%,对应的可动流体饱和度低,平均值为 29.1%;水层的含水饱和度低,平均值为 85.4%,对应的含油饱和度低,

表 6 滨深 18 井孔隙度、渗透率及饱和度测井计算结果与实测数据对比

Table 6 Comparison between calculated results of porosity, permeability and saturation model and measured data of Binshen 18 well

层号	井段 (m)	层厚 (m)	孔隙度 (%)		渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)		含水饱和度 (%)	试油数据 (t/d)
			绝对误差	相对误差	绝对误差	相对误差		
①	4 038.5~4 043.0	4.5	+0.18	+2.74%	+0.18	+9.13%	52.3	9.16
②	4 071.2~4 073.1	1.9	+0.53	+5.45%	-0.06	-5.28%	44.2	10.54
③	4 078.8~4 088.9	10.1	+0.11	+1.19%	-0.07	-4.37%	64.9	9.61
④	4 188.2~4 189.5	1.3	-0.24	-3.91%	+0.04	+2.34%	85.4	1.74
⑤	4 193.7~4 197.3	3.6	+0.42	+6.29%	+0.02	+2.19%	84.6	0.94
⑥	4 198.0~4 201.5	3.5	-0.32	-5.03%	+0.03	+3.67%	91.3	1.78
⑦	4 203.7~4 205.5	1.8	+0.58	+7.72%	-0.06	-3.49%	73.9	1.62

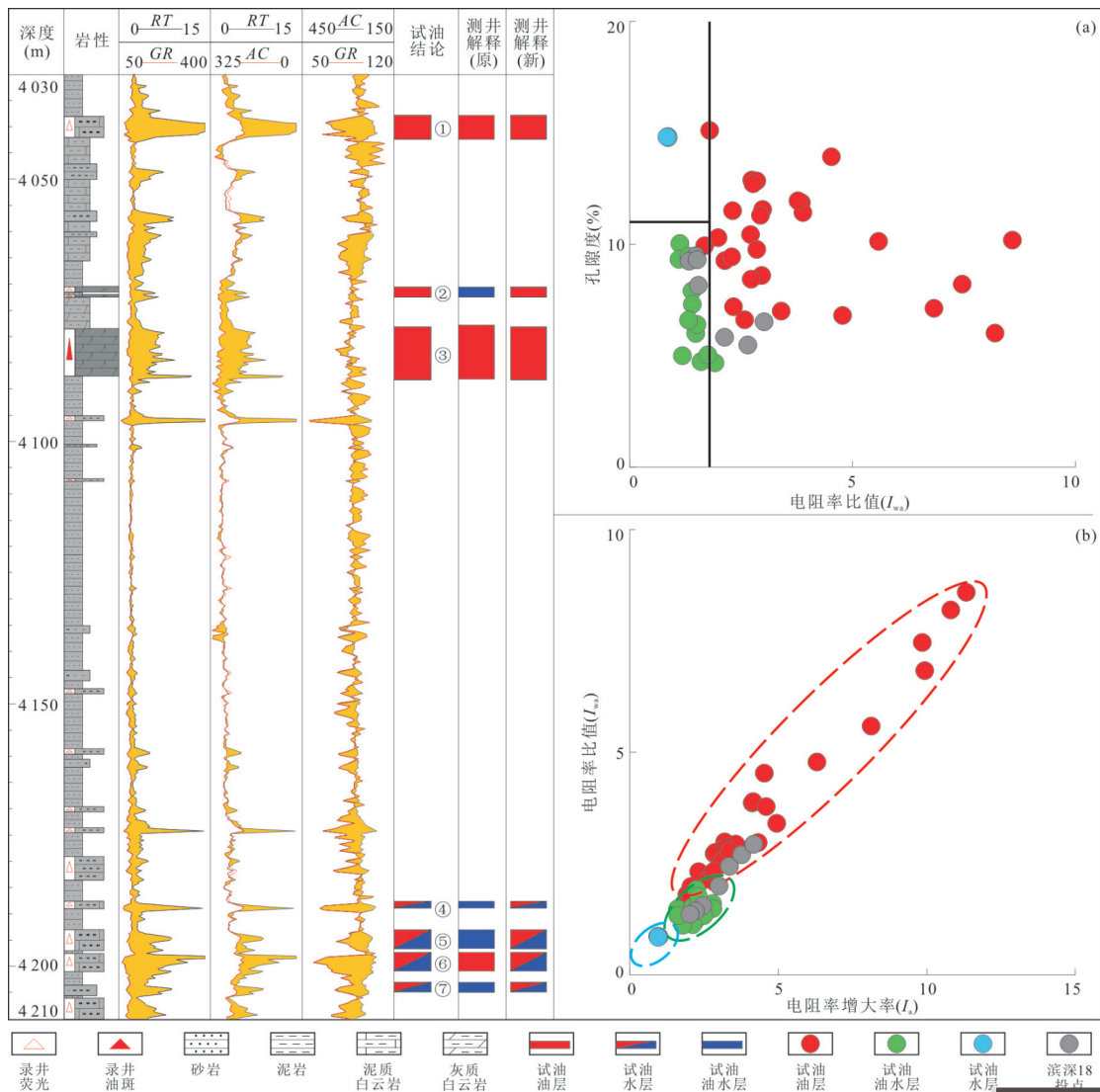


图 11 滨深 18 井沙二段储层测井流体识别成果图

Fig.11 Logging fluid identification results of Es₂ reservoirs in Binshen 18 well

平均值为 14.6%，束缚水饱和度中等，平均值为 36.8%。
 平均值为 63.2%，对应的可动流体饱和度高，平

4 应用效果评价

利用在刻度区所建立的模型和流体识别方法对评价区(滨深6-滨深8井区除外)6口井计37个渗透层参数与流体开展了解释、识别与验证.对比储层参数测井解释结果与岩心实测值及试油数据,其中有31层相符合,而原结果仅22层符合,符合率提高了25%.

以评价区滨深18井为例,①~⑦层的孔隙度测井解释值与实测值间的绝对误差小于 $\pm 0.60\%$,相对误差(绝对误差/实测值 $\times 100\%$)小于 $\pm 10\%$;渗透率绝对误差小于 $0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,相对误差也小于 10% .①~③层含水饱和度 $< 65\%$,属于油层,试油获日产油10 t左右;④~⑦层含水饱和度在85%左右,为油水层,试油获日产油 < 2 t.显然,测井解释孔隙度、渗透率及饱和度参数值与岩心实测值、试油结果吻合度高.

另外,通过定性-半定量-定量的流体识别及评价方法,对滨深18井进行复查评价.该井在4 030~4 210 m共试油7层,原测井识别结果仅2层符合试油结论,现解释结果7层均与试油结论一致.先利用重叠图法对①~⑦层流体进行定性识别(图11),发现②、⑤、⑦层RT-GR和RT-AC测井曲线重叠幅度较小,⑦层的RT-AC测井曲线几乎重叠,而AC-GR测井曲线重叠幅度仍较大,具有低阻特点,但尚不明确其流体性质;然后,利用 $I_{wa}-\Phi$ 和 I_a-I_{wa} 两套交会图版对①~⑦小层流体进行半定量识别(图11a, 11b),①、②、③层投点在油层区,结合重叠图法识别,①、③为标准油层,②为低阻油层,另外④、⑤、⑥、⑦层投点在油水层区,为标准油水层;最后,利用公式法分别计算①~⑦层的含水饱和度(表6),结果表明3套油层和4套油水层均在该地区测井流体饱和度的标准区间内(表5),说明复查结果真实可信,本次建立的测井流体识别及定量评价技术与方法合理可行,在歧北斜坡带沙二段致密砂岩储层测井流体识别评价中效果好,精度高,值得推广应用.

5 结论

(1)歧北斜坡带沙二段储层岩性以砂泥岩薄互层为主,物性差,非均质性强,电性特征复杂,含油性以油浸最多,仅通过“四性”关系难以对储层流体进行有效区分和评价.

(2)通过优选得到GR、AC、DEN、CN、AIT

等测井系列,并对GR和AC曲线进行标准化处理,建立的泥质含量、孔隙度、渗透率、含水饱和度及束缚水饱和度等测井解释模型相关系数高,应用效果好,满足歧北斜坡带沙二段储层流体精细识别与评价的要求.

(3)应用RT-GR、RT-AC及AC-GR等重叠图法能有效区分高阻油层与水层, $I_{wa}-\Phi$ 及 I_a-I_{wa} 交会图法可精细识别油层(包含低阻油层)、油水层、水层,公式法定量计算的储层流体饱和度与试油结果相吻合.

(4)定性(重叠图)-半定量(交会图法)-定量(公式法)的方法技术体系在歧北斜坡带沙二段致密砂岩储层流体识别及评价中取得了良好的应用效果,建议进一步推广应用.

References

- Amiri, M., Yunan, M. H., Zahedi, G., et al., 2012. Introducing New Method to Improve Log Derived Saturation Estimation in Tight Shaly Sandstones—A Case Study from Mesaverde Tight Gas Reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 92/93: 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.014>
- Archie, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(1): 54–62.
- Bai, S.T., Wan, J.B., Yang, R.X., et al., 2017. Summary on Formation Water Resistivity Evaluation Methods. *Progress in Geophysics*, 32(2): 566–578 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, J.J., Wang, W.W., Hou, Z.X., et al., 2017. Application of Conventional Log Data to Productivity Evaluation of Tight Sandstone Gas Reservoirs. *Well Logging Technology*, 41(3): 325–330 (in Chinese with English abstract).
- Chu, G.Z., Wang, H.Z., Zhou, Z.L., et al., 2017. The Method of Logging Evaluation and Identification for Deep & Low Permeability Oil and Gas Reservoir in Binhai Slope of Qikou Sag. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 14(6): 640–647 (in Chinese with English abstract).
- Cui, J.W., Yuan, X.J., Wu, S.T., et al., 2021. Rock Types and Reservoir Characteristics of Shahejie Formation Marl in Shulu Sag, Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. *Journal of Earth Science*, 32(4): 986–997. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1092-5>
- Ding, Y.J., Li, J.N., Li, J.G., et al., 2019. Log Evaluation

- Technology of Permian Clastic Reservoirs in Dagang Exploration Area. *Well Logging Technology*, 43(4): 416—422 (in Chinese with English abstract).
- Feng, C., Dai, L.M., Liu, X.J., et al., 2020. Logging Classification and Recognition of Lacustrine Mixed Sedimentary Reservoirs in First and Second Members of Shahejie Formation in Bohai Sea. *Earth Science*, 45(10): 3677—3692 (in Chinese with English abstract).
- Gao, C.Y., Zhou, L.F., Lu, P., 2020. Review of the Development of Well Log Normalization. *Progress in Geophysics*, 35(5): 1777—1783 (in Chinese with English abstract).
- Han, G.M., Zhou, S.Y., Tang, L.L., et al., 2014. Geological Conditions for Lower Es₁ Tight Sandstone Oil in Qibei Slope of Qikou Depression. *China Petroleum Exploration*, 19(6): 89—96 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.S., Zhou, L.H., Jin, F.M., et al., 2021. Hydrothermal Fluid Activity and Its Reformation on Reservoirs in Qikou Depression. *Earth Science*, 46(1): 200—214 (in Chinese with English abstract).
- Hu, R.B., Hang, G.M., Shi, Q.R., et al., 2010. Logging and Geological Comprehensive Study for Low Resistivity Layer in the Shahejie Formation of Coastal Step Area in Qikou Sag. *Natural Gas Geoscience*, 21(4): 589—593 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W., Zhang, X.L., Zhao, J.Y., 2015. Fluid Identification of Tight Reservoir in Chang 9 Formation, Ordos Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 45(5): 811—818 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C.Z., Zou, C.N., Li, J.Z., et al., 2012. Assessment Criteria, Main Types, Basic Features and Resource Prospects of the Tight Oil in China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(3): 333—350 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Liu, S.L., Chai, G.Q., et al., 2016. Logging Geologic Analysis Method Based on Core Calibration. *Progress in Geophysics*, 31(1): 225—231 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.G., Wu, S.Q., Su, P.Q., et al., 2012. Distribution Law of Low-Resistivity Oil and Gas Layers in Qikou Sag. *Mud Logging Engineering*, 23(4): 69—73, 84 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.P., Luo, Y., Zhao, Y.C., et al., 2017. Effects of Diagenetic Facies on Rock Electrical Properties in Tight Gas Sandstones. *Earth Science*, 42(4): 652—660 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.K., Sun, Y.L., Jiao, X., et al., 2016. The Genesis of Low Permeability of High-Quality Reservoirs in Deep-Buried Clastic Rock Reservoirs and Its Development Mechanism: A Case Study of Es₂ Formation in the Slope Area of Qikou Sag. *Natural Gas Geoscience*, 27(5): 799—808 (in Chinese with English abstract).
- Mao, K.Y., 2016. Logs Fluid Typing Methods and Adaptive Analysis of Tight Sandstone Reservoir of Yingcheng Formation in Lishu Fault. *Advances in Earth Science*, 31(10): 1056—1066 (in Chinese with English abstract).
- Pu, X.G., Zhao, X.Z., Wang, J.H., et al., 2020. Reservoirs Properties of Slump-Type Sub-Lacustrine Fans and Their Main Control Factors in First Member of Paleogene Shahejie Formation in Binhai Area, Bohai Bay Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5): 977—989.
- Quartero, E.M., Bechtel, D., Leier A.L., et al., 2014. Gamma-Ray Normalization of Shallow Well-Log Data with Applications to the Paleocene Paskapoo Formation, Alberta. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 51(5): 452—465.
- Ran, Y., Wang, G.W., Lai, J., et al., 2016. Quantitative Characterization of Diagenetic Facies of Tight Sandstone Oil Reservoir by Using Logging Crossplot: A Case Study on Chang 7 Tight Sandstone Oil Reservoir in Huachi Area, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(4): 694—706 (in Chinese with English abstract).
- Sima, L.Q., Yin, R., Wang, L., et al., 2019. Determining Methods of the Irreducible Water Saturation of Low-Resistivity Oil Layers in Toutunhe Formation, Junggar Basin. *Well Logging Technology*, 43(2): 122—128 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Chen, S., Huang, C.Y., et al., 2017. Architecture of Sandstone Bodies of Paleogene Shahejie Formation in Northern Qikou Sag, Northeast China. *Journal of Earth Science*, 28(6): 1078—1085. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0937-4>
- Wang, X.J., Wang, Z.L., Feng, C., et al., 2019. Predicting Oil Saturation of Tight Conglomerate Reservoirs via Well Logs Based on Reconstructing Nuclear Magnetic Resonance T₂ Spectrum under Completely Watered Conditions. *Journal of Geophysics and Engineering*, 17(2): 328—338.
- Wang, Y., Qian, M.L., Yu, C., et al., 2012. Study and Discussion on Reservoir Prediction Technology for Binhai Area of Qikou Depression. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 19(6): 35—39, 142 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Z.A., Zhao, Y.H., Wu, Y.P., et al., 2015. Characteristics and Forming Mechanisms of Reservoirs in the

- Shahejie Formation of Qibei Slope, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 36(2): 280–287 (in Chinese with English abstract).
- Yan, C. A., Wang, X. M., Guo, Q. S., et al., 2019. Well Logging Evaluation of Favorable Reservoirs of Middle and Deep Clastic Rocks in Qibei Slope Area. *Mud Logging Engineering*, 30(3): 99–105, 188 (in Chinese with English abstract).
- Yang, K. B., Cao, C. C., 2020. Development and Application of Resistivity Ratio Method for Evaluating Oil-Water Layers. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 13(3): 6–11 (in Chinese with English abstract).
- Yong, S. H., Zhang, C. M., 2007. Logging Data Processing and Comprehensive Interpretation. China University of Petroleum Press, Dongying, 203–213 (in Chinese).
- Zhang, D. D., Liu, C. Y., Huang, Y. J., et al., 2014. Cenozoic Fault Distribution Characteristics and Evolution in Qikou Sag of Bohai Basin, China. *Journal of Earth Science*, 25(4): 701–712. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0458-y>
- Zhang, Z. S., 2020. Theoretical Roots of Archie Formulas. *Progress in Geophysics*, 35(4): 1514–1522 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. L., Liu, J. J., Zhang, Q. H., et al., 2017. Overview of Geophysical Exploration Methods and Technical of Tight Sandstone Gas Reservoirs. *Progress in Geophysics*, 32(2): 840–848 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. M., Wu, S. H., Yue, D. L., et al., 2010. The Pre-Processing and Reconstruction Technique for Shallow Layer Acoustic Curve in Old Oil-Field. *Oil Geophysical Prospecting*, 45(4): 559–564, 624, 469 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Z., Zhou, L. H., Xiao, D. Q., et al., 2016. Hydrocarbon Accumulation and Exploration Practice of Slope Area in Qikou Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 37(S2): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. C., Chen, S. H., Guo, Z. H., 2006. Application of Nuclear Magnetic Resonance Technology to Pore Structure in Tight Sandstone: A Case from Third Member of Shihezi Formation Upper Paleozoic in Daniudi Gas Field, Ordos Basin. *Geological Science and Technology Information*, 25(1): 109–112 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, L. Q., Zhang, C., Shi, W. R., et al., 2016. Study on the Method of Prediction of Irreducible Water Saturation by Combining Mercury Intrusion and NMR Logging Data. *Science Technology and Engineering*, 16(15): 22–29 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 白松涛, 王金彬, 杨锐祥, 等, 2017. 地层水电阻率评价方法综述. *地球物理学进展*, 32(2): 566–578.
- 成家杰, 王文文, 侯振学, 等, 2017. 常规测井资料在致密砂岩储层产能评价中的应用. *测井技术*, 41(3): 325–330.
- 初广震, 王怀忠, 周宗良, 等, 2017. 歧口凹陷滨海斜坡深层低渗油气层测井评价与识别方法. *工程地球物理学报*, 14(6): 640–647.
- 丁娱娇, 李嘉宁, 李俊国, 等, 2019. 大港探区二叠系碎屑岩储层测井评价技术. *测井技术*, 43(4): 416–422.
- 冯冲, 代黎明, 刘晓健, 等, 2020. 渤海海域沙一二段湖相混积岩储层测井分类与识别. *地球科学*, 45(10): 3677–3692.
- 高春云, 周立发, 路萍, 2020. 测井曲线标准化研究进展综述. *地球物理学进展*, 35(5): 1777–1783.
- 韩国猛, 周素彦, 唐鹿鹿, 等, 2014. 歧口凹陷歧北斜坡沙一下亚段致密砂岩油形成条件. *中国石油勘探*, 19(6): 89–96.
- 侯中帅, 周立宏, 金凤鸣, 等, 2021. 歧口凹陷热液流体活动及其对储集层的改造. *地球科学*, 46(1): 200–214.
- 胡瑞波, 韩国猛, 石倩茹, 等, 2010. 歧口凹陷滨海台阶带沙河街组低阻油层测井地质综合研究. *天然气地球科学*, 21(4): 589–593.
- 黄薇, 张小莉, 赵进义, 2015. 鄂尔多斯盆地志丹地区长9致密储层流体识别. *西北大学学报(自然科学版)*, 45(5): 811–818.
- 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等, 2012. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景. *石油学报*, 33(3): 343–350.
- 李浩, 刘双莲, 柴公权, 等, 2016. 基于岩心刻度的测井地质分析方法. *地球物理学进展*, 31(1): 225–231.
- 李俊国, 吴淑琴, 苏沛强, 等, 2012. 歧口凹陷低电阻率油气层分布规律研究. *录井工程*, 23(4): 69–73, 84.
- 刘洪平, 骆杨, 赵彦超, 等, 2017. 致密砂岩气层中成岩相对岩电特征的影响. *地球科学*, 42(4): 652–660.
- 刘金库, 孙永亮, 焦旭, 等, 2016. 碎屑岩储层低渗成因及优质储层发育机理——以歧口凹陷歧北斜坡沙二段储层为例. *天然气地球科学*, 27(5): 799–808.
- 毛克宇, 2016. 梨树断陷营城组致密砂岩测井流体识别方法及其适应性分析. *地球科学进展*, 31(10): 1056–1066.
- 冉冶, 王贵文, 赖锦, 等, 2016. 利用测井交会图法定量表征致密油储层成岩相——以鄂尔多斯盆地华池地区长9致密油储层为例. *沉积学报*, 34(4): 694–706.
- 司马立强, 殷榕, 王亮, 等, 2019. 准噶尔盆地头屯河组低电阻率油层束缚水饱和度确定方法. *测井技术*, 43(2): 122–128.
- 王瑀, 钱茂路, 于超, 等, 2012. 歧口凹陷滨海地区储层预测技术研究与探讨. *特种油气藏*, 19(6): 35–39, 142.

- 薛宗安, 赵玉宏, 吴义平, 等, 2015. 渤海湾盆地歧北斜坡沙河街组储层特征及形成机理. 石油与天然气地质, 36(2): 280—287.
- 颜崇安, 汪晓敏, 郭青松, 等, 2019. 歧北斜坡区中深层碎屑岩有利储集层测井评价. 录井工程, 30(3): 99—105, 188.
- 杨克兵, 曹程程, 2020. 电阻率比值法评价油水层的发展及应用. 复杂油气藏, 13(3): 6—11.
- 雍世和, 张超谟, 2007. 测井数据处理与综合解释. 东营: 中国石油大学出版社, 203—213.
- 张志松, 2020. 阿尔奇公式的理论本原. 地球物理学进展, 35(4): 1514—1522.
- 赵军龙, 刘建建, 张庆辉, 等, 2017. 致密砂岩气藏地球物理勘探方法技术综述. 地球物理学进展, 32(2): 840—848.
- 赵晓明, 吴胜和, 岳大力, 等, 2010. 老油田浅层声波曲线的预处理与重构技术. 石油地球物理勘探, 45(4): 559—564, 624, 469.
- 赵贤正, 周立宏, 肖敦清, 等, 2016. 歧口凹陷斜坡区油气成藏与勘探实践. 石油学报, 37(S2): 1—9.
- 赵彦超, 陈淑慧, 郭振华, 2006. 核磁共振方法在致密砂岩储层孔隙结构中的应用——以鄂尔多斯大牛地气田上古生界石盒子组 3 段为例. 地质科技情报, 25(1): 109—112.
- 朱林奇, 张冲, 石文睿, 等, 2016. 结合压汞实验与核磁共振测井预测束缚水饱和度方法研究. 科学技术与工程, 16(15): 22—29.