

基于挖掘效应与密度-中子耦合机制的泥质砂岩非电法含气饱和度评价方法

申波^{1,2}, 汤翟³, 吴勃翰³, 吴一雄³, 蓝汶智^{1,2}, 马秀斌^{1,2}, 王超^{1,2}, 朱瑞^{1,2}, 明钟榜^{1,2}

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 长江大学 地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430010; 3. 中海石油有限公司 海南分公司, 海南 海口 570311)

摘要:含气饱和度评价是测井解释的关键任务之一,也是指导油气藏勘探与开发方案制定的重要依据。作为表征储层中不同流体性质分布状态的重要参数,含气饱和度的准确性直接影响储量估算、产能预测及开发效果评估。以阿尔奇公式为基础的电法含气饱和度解释模型已取得了广泛应用和显著成效,但该方法的有效性依赖于岩样选取是否具有代表性。对于非均质性较强的泥质砂岩储层,单一、固定的岩样电性(岩电)参数难以全面反映复杂储层的导电机制,进而导致预测结果可能存在较大误差,限制了测井解释的精度与可靠性。在分析泥质砂岩储层含气“挖掘效应”的基础上,根据密度和中子测井相关性原理的分析定义了“密度-中子分离度”的概念,应用数值模拟方法对比分析了不同含气饱和度、泥质含量和孔隙度条件时密度-中子分离度的响应特征,从而形成一种基于密度-中子分离度的非电法含气饱和度定量评价新方法。T盆地G组泥质砂岩含气饱和度评价效果分析表明,由于目的层的非均质性较强,统一岩电参数的阿尔奇模型和印度尼西亚模型的适用性受到一定限制,而密度-中子分离度法则具有更高的适应性与预测精度,对于非均质性较强的泥质砂岩含气饱和度评价具有一定的借鉴意义。

关键词:挖掘效应;密度-中子分离度;非电法;含气饱和度;泥质砂岩;储层评价

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

A non-electrical assessment method for gas saturation of argillaceous sandstones based on the excavation effect and density-neutron log coupling mechanism

SHEN Bo^{1,2}, TANG Di³, WU Bohan³, WU Yixiong³, LAN Wenzhi^{1,2}, MA Xiubin^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, ZHU Rui^{1,2}, Ming Zhongbang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430010, China; 2. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430010, China; 3. Hainan Branch of CNOOC Ltd., Haikou, Hainan 570311, China)

Abstract: Gas saturation assessment represents a key task in log interpretation and offers a critical basis for guidance on developing schemes for the exploration and exploitation of hydrocarbon reservoirs. Gas saturation is a crucial parameter for characterizing the distribution of fluids with various properties in reservoirs, and its accuracy directly affects the reserves estimation, productivity prediction, and development outcome assessment of reservoirs. Currently, the gas saturation interpretation models based on Archie's equation and electrical methods have seen wide application, with significant results being achieved. However, their effectiveness depends heavily on the representativeness of the collected rock samples. For argillaceous sandstone reservoirs with strong heterogeneity, it is difficult to comprehensively reflect their electroconductivity mechanism using fixed electrical parameters from individual rock samples. This limitation may lead to significant errors in prediction results, thereby reducing the accuracy and reliability of log interpretation. In this study, by analyzing the excavation effect observed in gas-bearing argillaceous sandstone reservoirs, we induce the parameter of density-neutron separation degree (DC), defined as the degree of separation

收稿日期:2025-05-27;修回日期:2025-11-12。

第一作者简介:申波(1981—),男,副教授、硕士研究生导师,复杂储层测井评价、岩石力学和地应力评价。E-mail: shhd151@126.com。

通信作者简介:明钟榜(2004—),男,硕士研究生,复杂储层测井评价。E-mail: 18327067978@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41504103)。

between the density and neutron log curves, based on the density-neutron logging correlation. The response characteristics of the density-neutron separation degree under different gas saturation levels, shale contents, and porosities are compared through numerical simulation. Accordingly, a novel non-electrical method for the quantitative assessment of gas saturation is established based on the density-neutron separation degree. Analysis of the assessment results of gas saturation in the argillaceous sandstone reservoirs of the G Formation, T Basin indicates that the conventional models based on Archie's and Indonesian equations, which employ unified electrical parameters, are less suitable due to the strong heterogeneity of the target strata. In contrast, the proposed method based on the density-neutron separation degree shows greater adaptability and higher prediction accuracy. This method provides a reference for the gas saturation assessment of argillaceous sandstone reservoirs with strong heterogeneity.

Key words: excavation effect, density-neutron separation degree (DC), non-electrical method, gas saturation, argillaceous sandstone, reservoir evaluation

引用格式:申波,汤翟,吴勃翰,等. 基于挖掘效应与密度-中子耦合机制的泥质砂岩非电法含气饱和度评价方法[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(2): 674-685. DOI: 10. 11743/ogg20260220.

SHEN Bo, TANG Di, WU Bohan, et al. A non-electrical assessment method for gas saturation of argillaceous sandstones based on the excavation effect and density-neutron log coupling mechanism[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(2): 674-685. DOI: 10. 11743/ogg20260220.

在储层测井评价过程中,含气饱和度起着至关重要的作用,是储层品质表征的核心指标之一。获取准确的含气饱和度能够为储层品质分级、储层生产潜力评估及高效开发方案制定与优化提供有力保障和依据。壳牌石油工程师阿尔奇根据墨西哥湾油田岩心电阻率实验及前人研究分析结果,发现了含水饱和度、岩石电阻率以及孔隙度之间的变化规律^[1-4],进而奠定了基于电法测井定量评价含气饱和度的基础。针对油气藏不同的地质条件和储层特征,阿尔奇公式及各种变形模型的应用为电法测井评价含气饱和度的完善和发展提供了大量实践经验^[5-14]。在非电法测井方面,核磁共振测井,特别是二维核磁共振测井,凭借其独有的测量方式和特性在含烃饱和度评价领域中取得了卓有成效的应用效果^[15-25],但由于其测量成本较高等客观因素的影响,使得该方法难以在油气田勘探和开发过程中得到大范围应用和推广。

对含气储层来说,挖掘效应是传统非电法测井在含气性评价中最常用的手段,但其应用主要在流体类型定性识别方面^[26-31],含气性定量表征则受到诸多客观因素的制约。其中,泥浆侵入是影响含气饱和度评价可靠性最关键的因素。由于泥浆滤液与孔隙原生流体的交换,导致流体性质发生改变。受限于探测范围的约束,基于挖掘效应的密度与中子曲线交互特性表征含气性的可靠程度也受到影响,而侵入程度的差异更是加大了含气饱和度定量评价的难度。然而,随钻测井技术的出现大大降低了这两者受侵入影响的程度,使得基于密度和中子测井预测含气饱和度的可靠性得以保障。本文在分析挖掘效应与含气饱和度相关

性的基础上,基于含气时密度与中子测井的耦合机制提出了密度-中子分离度的表征参数。通过数值模拟方式明确了密度-中子分离度与泥质含量、孔隙度和含气饱和度等因素的变化规律。根据不同泥质含量和孔隙度条件下,气层与非气层的密度-中子分离度响应特征建立了泥质砂岩储层含气饱和度评价新方法,实际资料应用结果验证了该方法的可行性和有效性,拓展了非电法测井在含气性定量表征中的应用领域。

1 储层特征

本文涉及到T盆地G组泥质砂岩储层,该层位岩性主要为粉砂岩和泥质粉砂岩(图1),磨圆为次棱角状-次圆状。岩石铸体薄片分析结果表明:碎屑颗粒包括石英、长石和岩屑,石英以单晶石英为主(平均含量为50.6%),少量多晶石英(平均含量为5.7%);长石包括钾长石(平均含量为5.7%)和斜长石(平均含量为0.6%);岩屑包括岩浆岩、变质岩和沉积岩岩屑,平均岩屑含量为9.8%。

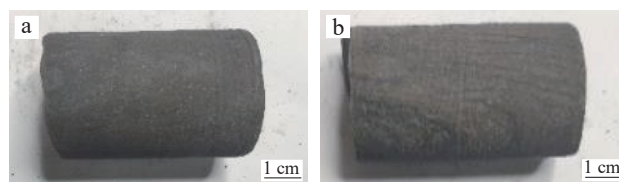


图1 T盆地DFX3井G组岩心照片

Fig. 1 Cores photos of the G Formation in well DFX3, T Basin

a. 深灰色粉砂岩,埋深2 991.0 m; b. 深灰色泥质粉砂岩,埋深2 948.5 m

根据物性分析统计,岩心分析孔隙度为5.9%~18.1%,平均值为12.6%;岩心分析渗透率为 $0.05 \times 10^{-3} \sim 12.90 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,几何平均值为 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,整体上呈现中-低孔、低渗储层特征。图2展示了研究区目的层129块岩心样品的孔隙度与渗透率响应关系。虽然孔隙度与渗透率整体呈现正相关趋势,但数据点分布较为分散,特别是在孔隙主要分布范围内(孔隙度10%~15%),储层品质具有明显的非均质性。前期研究成果表明,储层非均质性主要体现在泥质含量和粒度两方面。泥质含量分布在1%~44%,平均值达到30%。粒度中值分布在50~120 μm ,当粒径中值在100 μm 以上时,镜下面孔率可达到10%~18%。随着泥质含量的降低,粒度增大,储层物性逐渐变好。

2 挖掘效应

在气层定性识别方面,密度与中子测井曲线重叠是较常采用的方法,挖掘效应是这种依靠曲线幅度差异有效识别气层的依据。Segesman和Liu的研究表明^[32],中子的挖掘效应是基于含氢指数估算的孔隙度与减速长度估算的孔隙度之差。因而在含气储层条件下,中子测井孔隙度会小于其真实孔隙度,并定义了挖掘效应表达式[公式(1)]。

$$\Delta\Phi_{\text{Nex}} = \Phi_{\text{NH}} - \Phi_{\text{NS}} \quad (1)$$

式中: $\Delta\Phi_{\text{Nex}}$ 为挖掘效应校正值,无量纲; Φ_{NH} 为基于含氢指数估算的孔隙度,小数; Φ_{NS} 为基于减速长度估算的孔隙度,无量纲。

根据体积物理模型,进一步推出含烃储层的实际

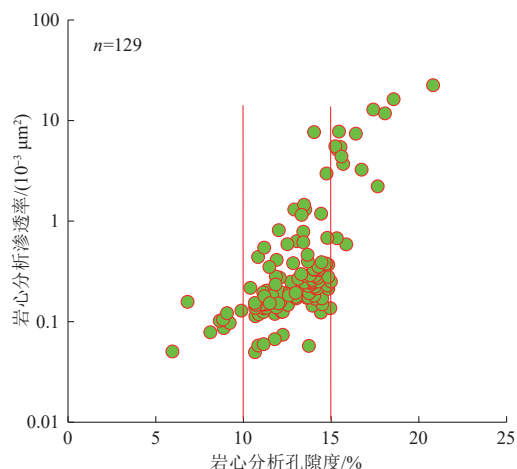


图2 T盆地G组岩心分析孔隙度与渗透率关系

Fig. 2 Relationship between core-derived porosity and core-derived permeability of core samples from the G Formation, T Basin
(n 为样品个数。)

含氢指数表达式[公式(2)]。

$$\Phi_{\text{NH}} = \Phi[S_{\text{XO}}H_{\text{w}} + (1 - S_{\text{XO}})H_{\text{h}}] \quad (2)$$

进一步推导可得公式(3):

$$S_{\text{WH}} = S_{\text{XO}}H_{\text{w}} + (1 - S_{\text{XO}})H_{\text{h}} \quad (3)$$

式中: Φ 为孔隙度,无量纲; S_{WH} 为孔隙流体含氢量的等效含水饱和度,无量纲; S_{XO} 为冲洗带含水饱和度,无量纲; H_{w} 为水的含氢指数,取1,无量纲; H_{h} 为烃类含氢指数,无量纲。油与水的含氢指数(即含氢量)接近,而含气后氢原子密度指数与体积密度明显小于油和水,导致气的含氢指数降低。

Segesman和Liu在研究挖掘效应校正值与孔隙流体含氢量关系时,为确定其主要影响因素而将气体含氢指数设置为0,简化了不同气体组分的干扰,此时 $S_{\text{WH}} = S_{\text{XO}}$ 。等效含水饱和度 S_{WH} 即含水饱和度 S_{w} ,接下来的数值模拟计算结果为与原文献做对比,仍称为等效含水饱和度。

图3展示了在不同孔隙度条件下,纯砂岩气藏等效含水饱和度与挖掘效应校正值之间的关系。储层完全含水时,不存在挖掘效应,校正值为0;当孔隙度固定时,在等效含水饱和度从0逐步增加至100%的过程中,挖掘效应校正值并非单调性变化,而是呈现出先升高、后降低的曲线变化特征,在等效含水饱和度约为50%时达到峰值;当孔隙度不同时,随着孔隙度的增加,挖掘效应显著增强,挖掘效应校正值呈现出逐渐加剧的趋势,表明对于纯砂岩储层而言,孔隙度是影响挖掘效应强度的首要因素。因此,用挖掘效应表征纯砂岩气藏含气饱和度时,必须考虑孔隙度差异的影响,而非单调性的挖掘效应校正值的规律更是加大了定量评价含气性的难度和可靠性。

图4为研究区目的层不同流体性质典型测井响应特征。当储层含气后,密度(DEN)与中子(CNL)测井值同时减小,当中子曲线在密度曲线右侧时以黄色充填,突出挖掘效应的测井响应特征。对于储层物性较好、厚度较大的气层(图4a),自然伽马(GR)测井值较低,电阻率显著升高(图4中第三道),明显大于 $10 \Omega \cdot \text{m}$,且存在明显的幅度差异,密度与中子减小后形成的包络面积较大。随着砂体厚度的减小和含气性的降低,挖掘效应的响应特征趋于减弱(图4b),密度与中子测井曲线的包络面积也逐渐减小,两者分离程度减小或曲线接近重合;而典型水层的密度曲线在中子曲线右侧(图4c)。因此,在其他储层条件相当时,密度与中子曲线的位置关系以及分离程度可作为流体性质判断依据,但若定量表征含气性还需进一步分析密度与中子曲线分离程度的其他影响因素。

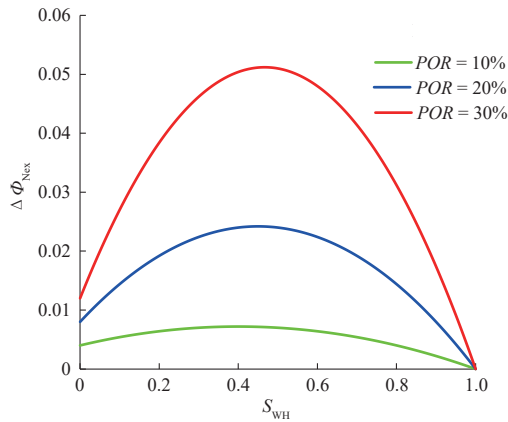


图3 T盆地G组纯砂岩气藏不同孔隙度条件下等效含水饱和度与挖掘效应校正值关系图版

Fig. 3 Relationship between the equivalent water saturation and corrected excavation effect under varying porosities for pure sandstone gas reservoirs of the G Formation, T Basin
 $\Delta\Phi_{Nex}$: 挖掘效应校正值; S_{WH} : 孔隙流体含氢量的等效含水饱和度;
 POR: 孔隙度

3 密度-中子分离度

密度测井与中子测井均是在石灰岩中进行刻度

的。其中,密度测井的原理来源于康普顿效应,该效应描述了中等能量伽马光子与地层相互作用的物理过程,康普顿吸收系数取决于介质的原子核类型及其体积密度。而中子测井主要反映地层介质的减速能力和俘获特性,其中氢元素是最强的减速剂,通常以水或烃类形式存在于孔隙中。根据相关文献理论推导可知^[33]:

$$\rho_e = \rho_b + \frac{1}{9} IH \quad (4)$$

式中: ρ_e 为电子密度指数, g/cm^3 ; ρ_b 为体积密度, g/cm^3 ; IH 为含氢指数,无量纲。

公式(4)表明,电子密度指数与含氢指数存在明确的相关性。由于密度测井对电子密度指数的表征作用,再加上中子测井主要反映含氢指数,因此含油气盆地中岩石矿物的密度测井与中子测井呈现显著的协同变化规律^[34]。为了直观展示这两种测井方法之间的关系,定义表征参数:密度-中子分离度(DC,无量纲),用于量化密度测井与中子测井曲线之间的分离程度,其计算公式为[公式(5)]:

$$DC = \frac{DEN - DENL}{DENR - DENL} - \frac{CNL - CNLL}{CNLR - CNLL} \quad (5)$$

式中: DEN 和 CNL 分别为密度(g/cm^3)和中子测井值

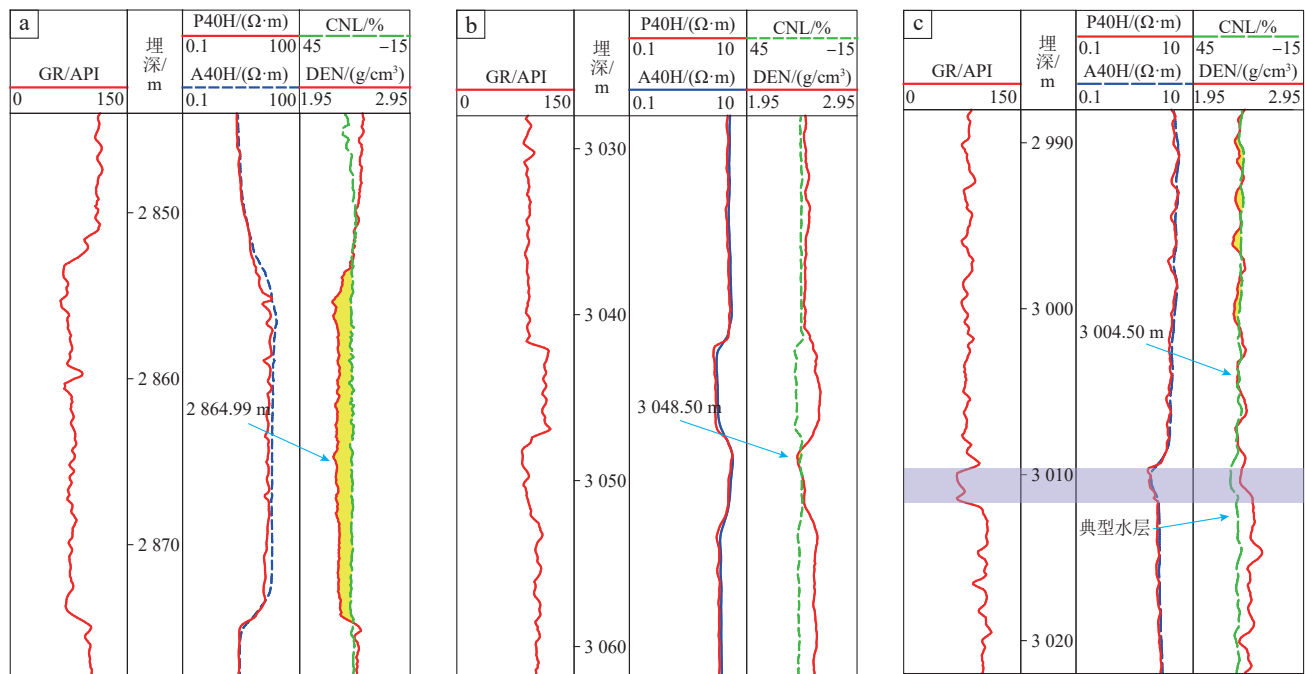


图4 T盆地G组不同性质流体典型测井响应特征

Fig. 4 Typical log response characteristics of various fluid properties in the G Formation, T Basin

a. 电缆地层测试取样获取纯气,泵抽220 min获取气体样品693 761.6 cm^3 , DFX1井,埋深2 864.99 m; b. 电缆地层测试取样获取纯气,泵抽39 min获取气体样品58 530.0 cm^3 , DFX2井,埋深3 048.50 m; c. 电缆地层测试取样获取纯气,泵抽123 min获取气体样品96 250.0 cm^3 , DFX3井,埋深3 004.50 m

(GR为自然伽马测井值;P40H为相位电阻率测井值;A40H为幅度电阻率测井值;CNL为中子测井值;DEN为密度测井值。)

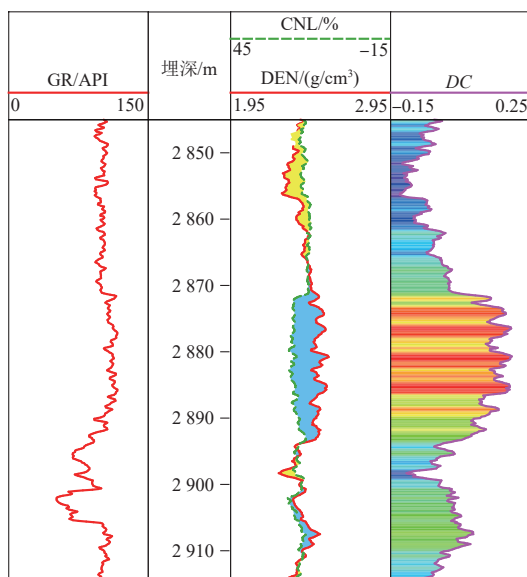


图5 T盆地DFX4井G组密度-中子分离度(DC)纵向分布
Fig. 5 Schematic diagram showing the density-neutron separation degree of the G Formation in well DFX4, T Basin

(小数); $DENL$ 和 $DENR$ 分别为密度测井曲线左、右刻度边界,即 1.95 g/cm^3 和 2.95 g/cm^3 ; $CNLL$ 和 $CNLR$ 分别为中子测井曲线左、右刻度边界,即45和-15。

图5为DC的示意图。当密度曲线在中子曲线右侧时,DC为正值(蓝色填充区域),反之则为负值(黄色填充区域)。当储层含气时,由于挖掘效应导致中子测井值偏小,中子曲线向右偏移,密度曲线向左变化,形成了黄色填充的包络现象,这种密度与中子相互位置的变化就是识别气层最常用的测井方法。图中第四道的DC则是定量表征含气性的参数,该值越小表示含气可能性越大。

对于含气纯砂岩储层,可根据公式(6)计算得到密度测井值,进而确定DC。

$$\rho_a = (1 - \Phi)\rho_{ma} + \Phi(S_{XO}\rho_w + S_g\rho_{gas}) \quad (6)$$

式中: ρ_a 为密度, g/cm^3 ; ρ_{ma} 为纯砂岩骨架密度,取 2.65 g/cm^3 ; ρ_w 为水的密度,取 1.00 g/cm^3 ; S_g 为含气饱和度,无量纲; ρ_{gas} 为气体密度,取 0 g/cm^3 。上述测井参数取值按Segesman和Liu数值模拟挖掘效应的参数设置^[29]。

图6反映了DC与孔隙流体含氢量的等效含水饱和度的变化规律。对比图3和图6可知,DC与等效含水饱和度呈单调性变化趋势,该特征较挖掘效应校正值的非单调性变化规律具有更明确的可解释性。含气饱和度越大,孔隙流体等效含水饱和度值越小,DC越小,此时密度位于中子测井曲线左侧的幅度越大。反之,DC越大,含气饱和度越小。

然而,不考虑孔隙发育程度直接建立DC与含气

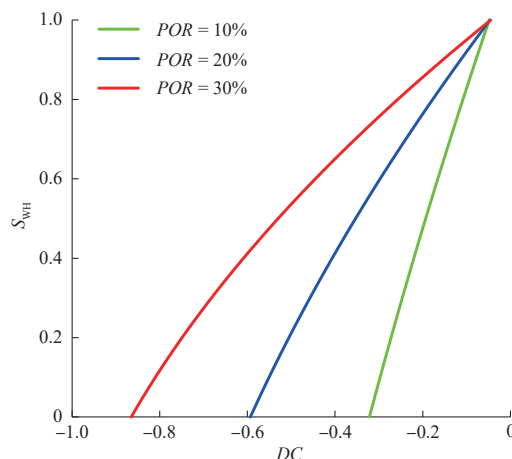


图6 T盆地G组纯砂岩储层不同孔隙度(POR)条件下密度-中子分离度(DC)与等效含水饱和度(S_{wh})关系图版

Fig. 6 Relationship between the density-neutron separation degree (DC) and equivalent water saturation (S_{wh}) under varying porosities (POR) for pure sandstone reservoirs in the G Formation, T Basin

饱和度的关系存在明显的局限性。如图6所示,当含气饱和度相同时,纯砂岩孔隙度越大,DC越小,密度与中子曲线的“伪含气”特征越明显。当砂岩储层非均质性强、物性差异较大时,仅高孔隙度也可能形成密度与中子曲线交互的响应特征。因此,仅从测井曲线交互定性判断流体性质存在不确定性,而定量预测含气饱和度的可靠性更是难以保证。此外,当储层100%饱含水时,无论纯砂岩储层孔隙度大或小,其DC几乎都相同(孔隙度10%,20%和30%时对应的DC分别为-0.048,-0.047和-0.045),即物性差异带来的只是密度和中子测井值的不同,但这两条测井曲线之间的距离基本保持不变。此外,图中显示纯气层与纯水层的DC均小于0,即密度曲线均出现在中子曲线左侧,这是由于未考虑泥质的结果。因此,对于泥质砂岩气藏,还需要从泥质含量和孔隙度的角度进一步开展DC的影响因素分析。

4 密度-中子分离度影响因素

对于泥质砂岩气藏,DC是泥质含量、孔隙度和含气饱和度等耦合因素的综合响应。通过阿尔奇公式,建立了电阻率与孔隙度等参数的联系。同样,若要根据DC定量表征含气饱和度,也应先明确其与不同储层参数间的变化规律。

4.1 密度-中子分离度与泥质含量关系

对于泥质砂岩储层来说,可通过公式(7)计算密度

测井值。

$$\rho_a = (1 - V_{sh} - \Phi)\rho_{ma} + \Phi(S_{XO}\rho_w + S_g\rho_{gas}) + V_{sh}\rho_{sh} \quad (7)$$

式中: V_{sh} 为泥质含量, 小数; ρ_{sh} 为泥岩密度, 取 2.4 g/cm^3 [29]。

泥质砂岩储层可根据公式(8)计算挖掘效应校正值 [29]。

$$\Delta\Phi_{Nex} = K(2.0\Phi'^2 S_{WH}' + 0.4\Phi')(1 - S_{WH}') \\ = (\rho_{ma}/2.65)^2 (2.0\Phi'^2 S_{WH}' + 0.4\Phi')(1 - S_{WH}') \quad (8)$$

式中: 岩性为砂岩、石灰岩和白云岩时, K 分别取 1.000, 1.046 和 1.173, 无量纲; S_{WH}' 和 Φ' 分别为泥质校正后的等效含水饱和度和孔隙度, 小数, 其计算方法见公式(9)和公式(10) [29]:

$$\Phi' = \Phi + V_{sh}\Phi_{Nsh} \quad (9)$$

$$S_{WH}' = (\Phi S_{WH} + V_{sh}\Phi_{Nsh}H_w)/\Phi' \quad (10)$$

式中: Φ_{Nsh} 为泥岩中子测井值, 取 0.4 [29]。

图7模拟了不同泥质含量与孔隙度条件下, DC 与等效含水饱和度的变化规律。泥质含量相同时, 无论孔隙度如何变化, 100% 饱水点 (即 $S_{WH}'=1$) 的 DC 保持不变, 但泥质含量的增加会造成饱水点 DC 变大。纯砂岩的饱水点 A 点 $DC < 0$, 此时中子曲线在密度曲线的右侧; 但当泥质含量增至 30%, 饱水点移动由 A 点移至 B 点。此时 DC 由负值变为正值, 中子曲线变换到密度曲线左侧。因此, 仅靠 DC 的正、负值判断水层会导致误判, 特别是对高泥质含量形成的低含气饱和度气藏。

当不含泥质时, $S_{WH} = S_{WH}'$; 而泥质的存在会导致纯气层 ($S_{WH}'=0$) 的“消失”。当泥质含量为 30% 时, 随着孔隙度由 10% 增至 30%, S_{WH}' 的最高值从 54% 降到 29%, 即含气饱和度最高值由 45% 增至 71%。

根据图8中 $S_{WH}'=100\%$ 的纯水线变化特征可知, 饱水点 DC 不受孔隙度影响; 孔隙度 10% 和 30% 时纯水线重合, 饱水点对应的 DC 只随泥质含量的升高而变大; 纯砂岩 ($V_{sh}=0$) 100% 饱含水时的 $DC < 0$, 随着泥质含量的增加, DC 逐渐增大为正值, 且该变化趋势不受孔隙度影响。随着泥质含量进一步升高, 泥质砂岩逐渐变为砂质泥岩, 最后成为泥岩。因此, 泥岩与纯水层泥质砂岩在理论上, 其泥质含量与 DC 应存在共线性特征。

孔隙度一定时, 随着等效含水饱和度的减小, DC 逐渐降低, 这种降低程度同样受到泥质含量的影响。当等效含水饱和度从 100% 减小到 55% 时, 泥质含量越高, DC 降低程度越明显。此外, 若泥质含量和等效含水饱和度相同, 高孔隙度的泥质砂岩对应的 DC 明显更小。当储层孔隙度与等效含水饱和度分别为 30% 和

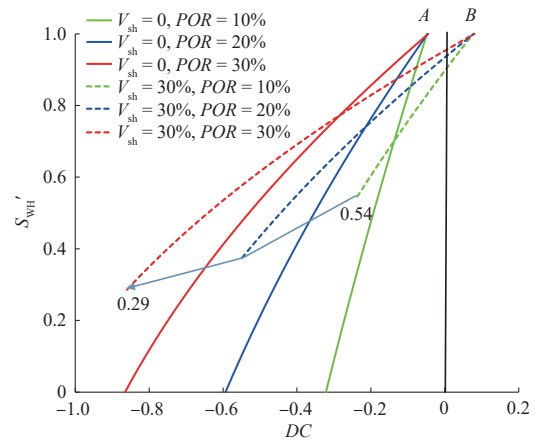


图7 T盆地G组不同孔隙度纯砂岩 ($V_{sh}=0$) 与泥质砂岩 ($V_{sh}=30\%$) 密度-中子分离度 (DC) 与泥质校正后的等效含水饱和度 (S_{WH}') 关系对比

Fig. 7 Comparison of the density-neutron separation degree (DC) and equivalent water saturation (S_{WH}' ; corrected based on shale content and reflecting the hydrogen content in pore fluids) between pure sandstones ($V_{sh}=0$) and argillaceous sandstones ($V_{sh}=30\%$) in the G Formation, T Basin

(V_{sh} 为泥质含量; POR 为孔隙度。A 和 B 分别为 $V_{sh}=0$ 和 $V_{sh}=30\%$ 时的饱水点。)

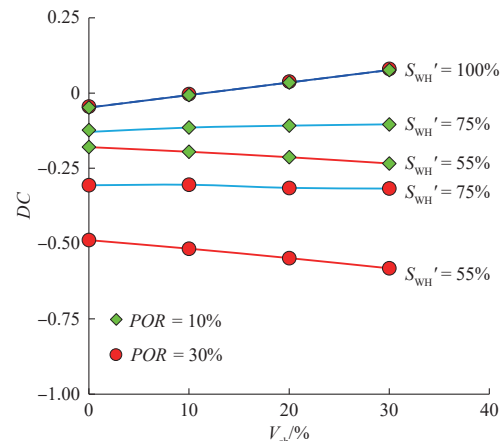


图8 T盆地G组不同孔隙度、不同含水饱和度条件下泥质含量 (V_{sh}) 和密度-中子分离度 (DC) 关系图版

Fig. 8 Relationship between shale content (V_{sh}) and density-neutron separation degree (DC) under varying equivalent water saturation levels for the G Formation, T Basin
 POR : 孔隙度; S_{WH}' : 泥质校正后的等效含水饱和度

75% 时 (图8), 其 DC 甚至比孔隙度与等效含水饱和度分别为 10% 和 55% 时更小。上述现象表明, 不考虑孔隙度差异是无法直接应用 DC 预测含气饱和度的。

4.2 密度-中子分离度与孔隙度关系

当泥质含量一定时, 等效含水饱和度 100% 的纯

水线对应的 DC 均保持不变(图9)。只是泥质含量较高时, DC 为正值。反之,则为负值。因此,纯水层泥质砂岩 DC 由泥质含量决定,与孔隙度无关。需要指出的是,这种纯水层 DC 受泥质含量影响的正负值差异特征只是数值模拟计算的结果。在实际进行流体识别时,还需从气藏特征、矿物特征和孔隙结构等方面开展具体分析。

随含气量增加, DC 对孔隙度表现出极大的敏感性。等效含水饱和度相同时, DC 随孔隙度的增大急剧降低。因此,物性改善会导致“伪含气”的测井响应特征。而当孔隙度和等效含水饱和度相同、泥质含量不同时, DC 的变化量随含气量增加呈现相反的变大趋势。如等效含水饱和度为100%时, DC 随泥质含量降低而减小;等效含水饱和度为55%时, DC 随泥质含量降低而增大。这是由于泥质含量和含气量的增大对 DC 的影响趋势是相反的。理论计算上来说,泥质含量较高的砂岩需要更小的 DC 才能与纯砂岩具有相同的含气饱和度。

5 方法原理

图10显示的是研究区DFX3井泥质含量随 DC 的变化规律。与数值模拟结果相同(图8),泥岩同典型水层的数据样本具有明显的共线性特征。 DC 随泥质含量的增大而逐渐变大,数据位于该趋势线的储层测井不受挖掘效应影响。因此,可将该趋势线视为气藏

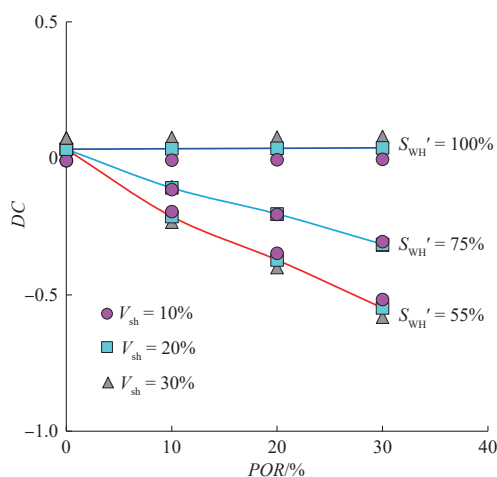


图9 T盆地G组不同泥质含量、不同等效含水饱和度条件下孔隙度(POR)和密度-中子分离度(DC)关系图版

Fig. 9 Relationship between porosity (POR) and density-neutron separation degree (DC) under varying equivalent water saturation levels for the G Formation, T Basin

V_{sh} : 泥质含量; S_{wh}' : 等效含水饱和度

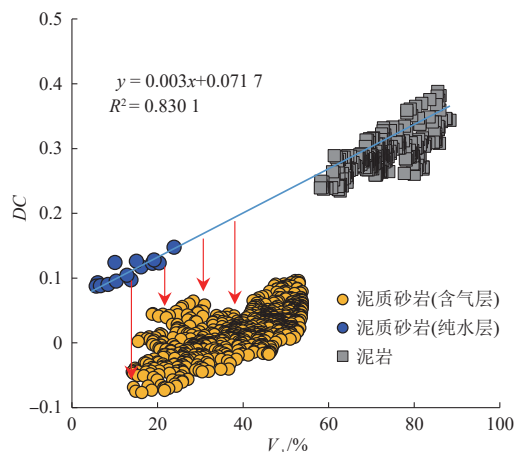


图10 T盆地DFX3井G组泥质含量(V_{sh})与密度-中子分离度(DC)关系图版

Fig. 10 Relationship between shale content (V_{sh}) and density-neutron separation degree (DC) for the G Formation in well DFX3, T Basin

形成前泥质砂岩 DC 与泥质含量的变化规律。后期随着气体驱替地层水聚集于孔隙,饱含水的泥质砂岩由纯水层的趋势线经图中红色箭头向下移动,逐渐变为含气泥质砂岩。由于储层品质以及距油-水界面高度等方面的差异,泥质砂岩数据相对于水线的下移幅度不同,形成不同的 DC 差值。泥质含量相同时,移动的距离受控于孔隙度和含气饱和度的大小。此时, DC 由水线向下移动的幅度差值可视作孔隙度与含气饱和度的函数。

这里定义图10中水线上密度-中子分离度(DC_{w1} , 小数),计算公式(11)为:

$$DC_{w1} = 0.0030V_{sh} + 0.0717 \quad (11)$$

含气泥质砂岩到图10中水线的距离(ΔD_1 , 小数)可表示为公式(12):

$$\Delta D_1 = DC - DC_{w1} \quad (12)$$

孔隙度与 DC 的响应特征存在类似的响应特征(图11)。相同孔隙度时,含气泥质砂岩距水线密度-中子分离度的幅度受泥质含量和含气饱和度共同影响。对比图11和图9,实际井资料与纯水线数值模拟的结果存在一定差异。图9中纯水层孔隙度与 DC 基本成水平直线, DC 不受孔隙影响,这是由于数值模拟是在假设泥质砂岩为饱含水,完全不含残余气时的计算结果。

据图11可确定水线基于孔隙度变化影响的密度-中子分离度响应关系(DC_{w2} , 小数),同时可得到分离度差值(ΔD_2 , 小数),相关表达式为公式(13)和公式(14)。

$$DC_{w2} = -0.0014POR + 0.3439 \quad (13)$$

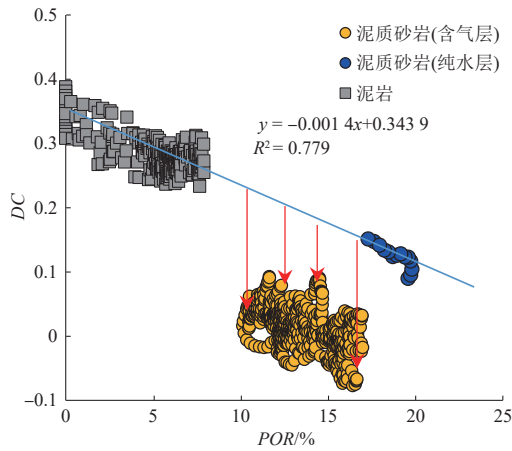


图11 T盆地DFX3井G组孔隙度(POR)与密度-中子分离度(DC)关系图版

Fig. 11 Relationship between porosity (POR) and density-neutron separation degree (DC) for the G Formation in well DFX3, T Basin

$$\Delta D_2 = DC - DC_{w2} \quad (14)$$

根据数值模拟结果(图8和图9),应用 DC 预测含气饱和度需明确泥质含量和孔隙度的影响规律。这里定义含气校正指数为 I_c (无量纲),含气饱和度则为 DC 差值校正后的结果,其预测模型见公式(15)。

$$S_g = I_c (\Delta D_1 + \Delta D_2) \quad (15)$$

式中: S_g 为含气饱和度,小数。

需要指出的是,在海洋客观环境条件下,很难像陆上一样开展密闭取心实验数据验证含气饱和度预测精度。根据DFX3井为箱体钻取的水平井DFXH井生产时的平均日产气量为 $16.5 \times 10^{-4} \sim 21.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3$,且光纤测井测试结果未见产水的信号,同时结合DFX3井电缆地层测试取样的结果,可判断取样地层为纯气层。因此,以DFX3井高压压汞实验确定的束缚水饱和度作为岩样含水饱和度,进而间接确定含气饱和度,再结合实验样本的 DC 差值得到含气校正指数。分析实际资料可知(图12,图13),含气校正指数的自然对数随泥质含量的增大而减小,随孔隙度的增大而增大,且具有高度线性相关特征。

综上可得含气校正指数表达式[公式(16)],并确定基于 DC 的含气饱和度预测模型。

$$I_c = e^{0.219POR + 0.001V_{sh} - 3.145} \quad (16)$$

6 应用效果

图14为DFX3井含水饱和度测井解释成果图。图中第1道为自然伽马值(GR),第2道为相位电阻率(P40H)和幅度电阻率(A40H),第3道为深度,第4道

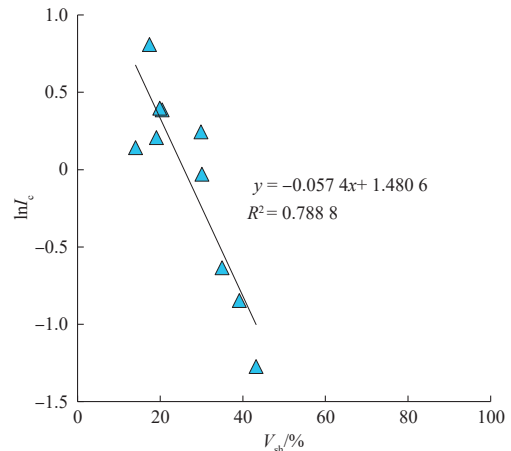


图12 T盆地G组泥质含量(V_{sh})与含气校正指数自然对数($\ln I_c$)的关系

Fig. 12 Relationship between shale content (V_{sh}) and the natural logarithm of gas saturation correction index ($\ln I_c$) for the G Formation, T Basin

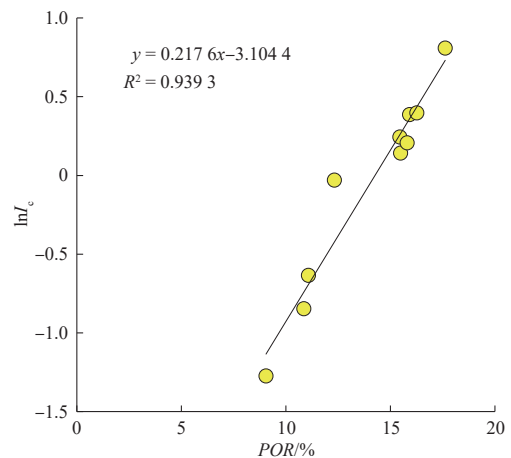


图13 T盆地G组孔隙度(POR)与含气校正指数自然对数($\ln I_c$)的关系

Fig. 13 Relationship between porosity (POR) and the natural logarithm of gas saturation correction index ($\ln I_c$) for the G Formation, T Basin

为密度(DEN)与中子(CNL),第5道为密度-中子分离度(DC),第6—第8道为含水饱和度测井解释结果和高压压汞实验分析的含水饱和度(CS_w),其中不同含水饱和度模型分别为印度尼西亚模型(S_w -Indonesia)、阿尔奇模型(S_w -Archie)和密度-中子分离度模型(S_w - DC),最后一道为测井解释的流体性质类型。对比印度尼西亚模型和阿尔奇模型解释结果,对于底部含气饱和度较高的气层,印度尼西亚模型较阿尔奇模型解释结果与高压压汞分析数据更为吻合;而对顶部物性较差的气层,则阿尔奇模型适用性更好,预测结果与岩心分析数据误差更小。

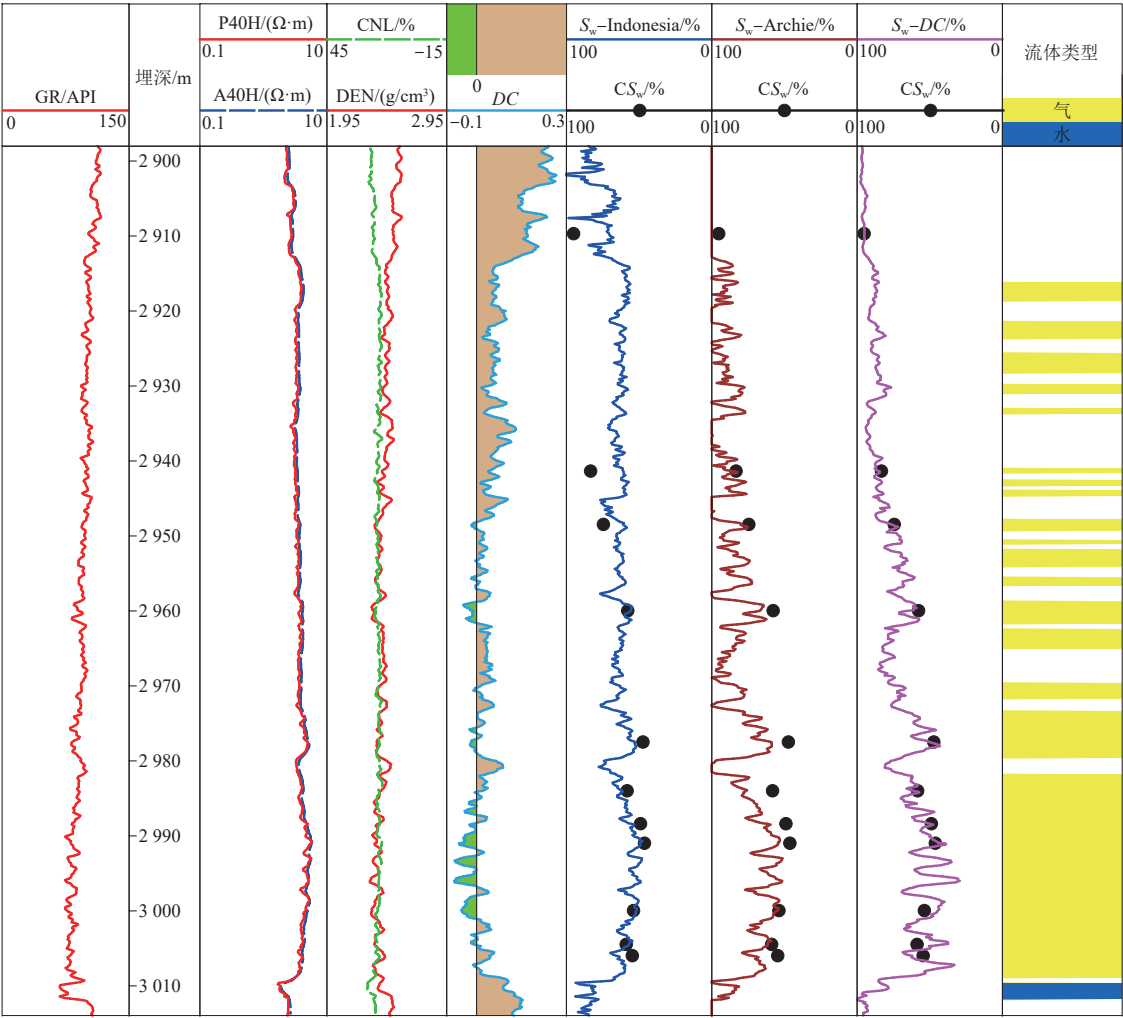


图14 T盆地DFX3井G组不同含水饱和度模型解释结果对比

Fig. 14 Comparison of the interpretation results from different water saturation models of the G Formation in well DFX3, T Basin
 S_w -Indonesia. 印度尼西亚模型解释的含水饱和度值; S_w -Archie. 阿尔奇模型解释的含水饱和度值; S_w -DC. 密度-中子分离度模型解释的含水饱和度值; CS_w . 高压压汞实验分析的含水饱和度值

岩样和电性(岩电)实验结果分析表明(图15),含水饱和度与电阻率指数(RI,无量纲)趋势一致(图15a),幂函数规律明显且收敛,岩样电阻率增大的变化趋势基本稳定,表明比例系数 b 值和饱和度指数 n 值可信度高。而孔隙度和地层因素数据点相对较为分散(图15b),表明储层品质差异较大,岩性系数 a 值与胶结指数 m 值为不同储层样本的平均响应。因此应用固定岩电参数难以获取精度较高的含气饱和度预测结果。

基于DC的含气饱和度解释方法本质是根据挖掘效应定量表征含气性,由于含气后密度和中子测井值都变小,变化的幅度与含气饱和度的关系及储层品质密切相关。泥质含量和孔隙度是泥质砂岩重要的储层品质表征参数。因此无论是物性较差的顶部地层,还是含气性更好的底部气层,基于泥质含量和孔隙度修正的DC均能较好地反映泥质砂岩储层含气性,且预

测精度更高(表1),显示了该方法在处理非均质较强的泥质砂岩储层含气饱和度方面的有效性和可靠性。

尽管本研究所提出的基于DC的非电法饱和度评价方法在泥质砂岩气藏中表现出良好的适应性和预测精度,但其适用范围仍具有一定的不确定性。比如对于碳酸盐岩或火山岩等复杂岩性储层,由于矿物成分复杂多变、孔隙类型与结构类型多样,以及测井响应的非线性特征显著增强,密度和中子测井之间的响应关系可能发生显著偏离,进而影响“纯水线”模型的构建及其与含气点距离的可解释性。因此,该方法在其他岩性储层中的适应性尚需深入探索,后续可通过岩心实验、测井响应模拟与多岩性储层实测数据验证等手段,进一步拓展该方法的通用性,为复杂岩性的非电法饱和度评价提供更广阔的技术路径。

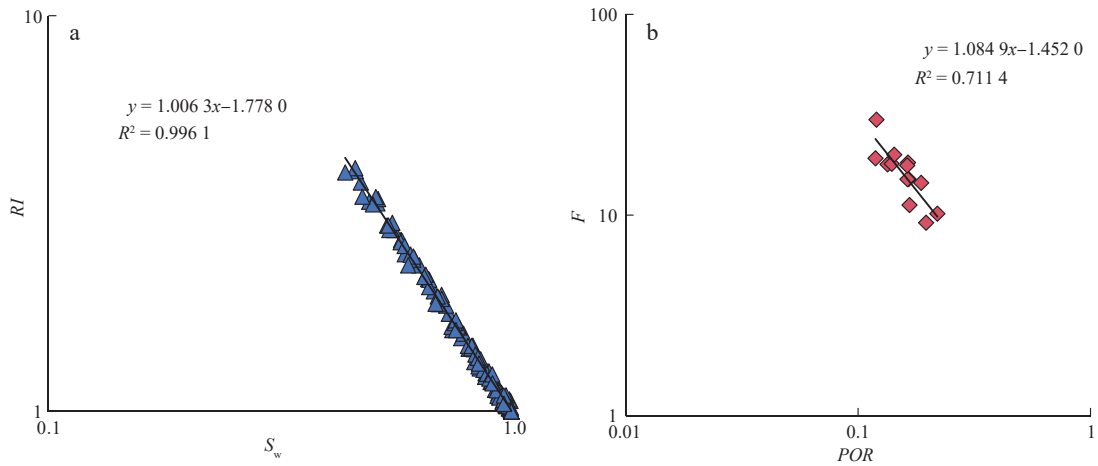


图15 T盆地G组岩石电阻率增大实验数据分析结果

Fig. 15 Experimental data analysis results of an increase in the resistivity of rock samples from the G Formation, T Basin

a. 含水饱和度(S_w) vs. 电阻率指数(RI); b. 孔隙度(POR) vs. 地层因素(F)

表1 T盆地G组不同含气饱和度模型计算误差统计

Table 1 Statistics of the calculation errors of various models for the gas saturation of the G Formation, T Basin

含气饱和度模型	S_w -Archie/%	S_w -Indonesia/%	S_w -DC/%
平均值	70.98	58.35	63.02
绝对误差	9.16	-3.48	1.19
相对误差	14.81	5.63	1.93

7 结论

1) 对于泥质砂岩气藏,密度与中子曲线分离的程度是含气饱和度、泥质含量和孔隙度等储层参数的耦合作用的结果。在其他条件相当时,呈现出“低分离-高含气”的变化规律。

2) 数值模拟分析表明,含气砂岩密度-中子分离度随着孔隙度的增加而减小。而在纯水层,密度-中子分离度与孔隙度无关,只随泥质含量增加而变大,

3) 根据不同流体性质与岩性的组合可构建纯水线的密度-中子分离度响应方程,含气点到水线的距离受控于含气饱和度、孔隙度和泥质含量。应用含气校正指数可建立基于密度-中子分离度的含气饱和度预测模型。

4) 实际资料处理结果表明,本文提出的方法充分考虑了不同储层特征的差异,具有较好的适用性和可靠性,对于非均质性较强的泥质砂岩气藏具有一定的参考价值。

致谢:本文感谢中海石油有限公司海南分公司提供资料数据!感谢张亚雄副主编和许诺编辑在投稿以及校对过程中提供的细心指导和帮助!感谢所有审稿

专家提出的宝贵意见!

参 考 文 献

- [1] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 54-62.
- [2] ARCHIE G E. Electrical resistivity an aid in core-analysis interpretation[J]. AAPG Bulletin, 1947, 31(2): 350-366.
- [3] MARTIN M, MURRAY G H, GILLINGHAM W J. Determination of the potential productivity of oil-bearing formations by resistivity measurements[J]. Geophysics, 1938, 3(3): 258-272.
- [4] JAKOSKY J J, HOPPER R H. The effect of moisture on the direct current resistivities of oil sands and rocks[J]. Geophysics, 1937, 2(1): 33-54.
- [5] WINSAUER W O, MCCARDELL W M. Ionic double-layer conductivity in reservoir rock [J]. Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(5): 129-134.
- [6] SIMANDOUX P. Dielectric measurements on porous media: Application to the measurement of water saturation: study of the behaviour of Argillaceous formations [J]. Revue de L. Institut Franais du Petrole, 1963, 18(S1): 193-215.
- [7] POUPON A, LOY M E, TIXIER M P. A contribution to electrical log interpretation in shaly sands [J]. Journal of Petroleum Technology, 1954, 6(6): 27-34.

- [8] WAXMAN M H, SMITS L J M. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands[J]. SPE Journal, 1968, 8(2): 107-122.
- [9] CLAVIER C, COATES G, DUMANOIR J. Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands[J]. SPE Journal, 1984, 24(2): 153-168.
- [10] BASSIOUNI Z, SILVA P L. Statistical evaluation of the S-B conductivity model for water-bearing shaly formations[J]. The Log Analyst, 1986, 27(3): 9-19.
- [11] 李宁. 电阻率-孔隙度-电阻率-含油(气)饱和度关系的一般形式及其最佳逼近函数类型的确定(I) [J]. 地球物理学报, 1989, 32(5): 580-592.
LI Ning. General forms of the resistivity-porosity and resistivity-oil/gas saturation relations, as well as the determination of their optimum approximating function types (I) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1989, 32(5): 580-592.
- [12] 钟兴水, 张超漠. 一种泥质砂岩层的电阻率——含水饱和度新方程的探讨[J]. 测井技术, 1990, 14(1): 11-15.
ZHONG Xingshui, ZHANG Chaomo. An approach to a new equation of resistivity and water saturation in shaly sands[J]. Well Logging Technology, 1990, 14(1): 11-15.
- [13] 黄毅, 赵军, 程鹏飞, 等. 利用核磁共振资料改善低孔低渗油藏饱和度模型的精度[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 390-394.
HUANG Yi, ZHAO Jun, CHENG Pengfei, et al. Enhancing accuracy of saturation model of low-porosity and low-permeability reservoirs by using nuclear magnetic resonance logging data [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(3): 390-394.
- [14] 宋延杰. 混合泥质砂岩通用电阻率模型综合研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2006.
SONG Yanjie. Comprehensive research on generalized resistivity models in laminated and dispersed shaly sands [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2006.
- [15] ORTIZ A, MOSSE L, BERNHARDT C, et al. Characteristics of Vaca Muerta formation revealed by NMR T_1 - T_2 logging at large scale [C]//SPWLA 58th Annual Logging Symposium, Oklahoma City, 2017. Houston: Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2017: SPWLA-2017-VVV.
- [16] VENKATARAMANAN L, EVIRGEN N, ALLEN D F, et al. An unsupervised learning algorithm to compute fluid volumes from NMR T_1 - T_2 Logs in unconventional reservoirs[J]. Petrophysics, 2018, 59(5): 617-632.
- [17] KAUSIK R, FELLAH K, RYLANDER E, et al. NMR relaxometry in shale and implications for logging [J]. Petrophysics, 2016, 57(4): 339-350.
- [18] FLEURY M, ROMERO-SARMIENTO M. Characterization of shales using T_1 - T_2 NMR maps [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 137: 55-62.
- [19] KHATIBI S, OSTADHASSAN M, XIE Z H, et al. NMR relaxometry a new approach to detect geochemical properties of organic matter in tight shales[J]. Fuel, 2019, 235: 167-177.
- [20] MUKHAMETDINOVA A, HABINA-SKRZYNIARZ I, KAZAK A, et al. NMR relaxometry interpretation of source rock liquid saturation—A holistic approach [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 132: 105165.
- [21] 王敏, 傅爱兵, 李进步, 等. 基于二维核磁确定博兴注陷页岩可动油饱和度[J]. 地质论评, 2021, 67(增刊1): 265-266.
WANG Min, FU Aibing, LI Jinbu, et al. Movable oil saturation determination of shale in Boxing Depression based on 2-D NMR [J]. Geological Review, 2021, 67(S1): 265-266.
- [22] 闫伟林, 张兆谦, 陈龙川, 等. 基于核磁共振技术的古龙页岩含油饱和度评价新方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(5): 78-86.
YAN Weilin, ZHANG Zhaoqian, CHEN Longchuan, et al. New evaluating method of oil saturation in Gulong shale based on NMR technique [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 78-86.
- [23] 葛新民, 曾炳丁, 李楠, 等. 核磁共振饱和度指数及其在储层流体饱和度计算中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 64-72.
GE Xinmin, ZENG Bingding, LI Nan, et al. NMR saturation index and its application to fluid saturation estimation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(5): 64-72.
- [24] 白龙辉, 柳波, 迟亚奥, 等. 二维核磁共振技术表征页岩所含流体特征的应用——以松辽盆地青山口组富有机质页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1389-1400.
BAI Longhui, LIU Bo, CHI Yaa, et al. 2D NMR studies of fluids in organic-rich shale from the Qingshankou Formation, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1389-1400.
- [25] 黄涛. 核磁及密度测井耦合的致密砂岩低阻气层饱和度评价方法——以鄂尔多斯盆地临兴神府致密砂岩储层为例[J]. 中国海上油气, 2023, 35(2): 78-84.
HUANG Tao. Saturation evaluation method of tight sandstone low resistivity gas reservoir based on the coupling of NMR and density logging: Taking Linxing-Shenfu tight sandstone reservoir in Ordos Basin as an example [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2): 78-84.
- [26] 徐星, 赵丽敏, 田中元, 等. 高气油比油层测井挖掘效应定量计算及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(5): 151-155.
XU Xing, ZHAO Limin, TIAN Zhongyuan, et al. Quantitative calculation and application of the logging excavation effect for high-GOR oil reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development

- in Daqing, 2015, 34(5): 151-155.
- [27] 张攀, 刘红岐, 王伟俊, 等. 常规测井—气测资料在H油田K油藏碳酸盐岩储层流体识别中的应用[J]. 地质科技通报, 2022, 41(3): 140-149.
- ZHANG Pan, LIU Hongqi, WANG Weijun, et al. Application of conventional logging and gas logging data to fluid identification of carbonate reservoirs in K reservoir of H Oilfield [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3): 140-149.
- [28] 王伟俊, 刘红岐, 朱光亚, 等. 碳酸盐岩油藏储层测井挖掘效应的综合分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(1): 43-54.
- WANG Weijun, LIU Hongqi, ZHU Guangya, et al. Comprehensive analysis of logging and excavation effects in carbonate reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(1): 43-54.
- [29] 雷文智, 陈冬霞, 王永诗, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷东部深层砂砾岩多类型油气藏成藏机理及模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 113-129.
- LEI Wenzhi, CHEN Dongxia, WANG Yongshi, et al. Accumulation mechanism and model of multi-type deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the eastern Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 113-129.
- [30] 李明瑞, 史云鹤, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界本溪组8煤岩煤岩气与致密砂岩气主要气藏特征对比[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1590-1604.
- LI Mingrui, SHI Yunhe, FAN Liyong, et al. Comparison of main reservoir characteristics between deep coal-rock gas of the No. 8 coal seam of the Upper Paleozoic Benxi Formation and tight sand gas reservoirs, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1590-1604.
- [31] 边瑞康, 孙川翔, 聂海宽, 等. 四川盆地东南部五峰组-龙马溪组深层页岩气藏类型、特征及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1515-1529.
- BIAN Ruikang, SUN Chuanxiang, NIE Haikuan, et al. Types, characteristics, and exploration targets of deep shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1515-1529.
- [32] SEGESMAN F, LIU O. The excavation effect [C]//SPWLA 12th Annual Logging Symposium. Houston: Society of Petrophysicists & Well Log Analysts, 1971: SPWLA-1971-N.
- [33] MAO Zhiqiang. The physical dependence and the correlation characteristics of density and neutron logs [J]. Petrophysics, 2001, 42(5): 438-443.
- [34] 毛志强, 谭廷栋. 密度测井和中子测井的相关性及其在识别天然气层中的应用[J]. 地球物理学报, 1996, 39(1): 126-132.
- MAO Zhiqiang, TAN Tingdong. The correlativity of density log and neutron log and its application in identifying gas formations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(1): 126-132.
- 引文样式: 石油与天然气地质 1
- (编辑 许诺)