

准噶尔盆地哈山地区风城组不同岩相储层含油饱和度表征

王敏¹, 周三栋^{2,3,4*}, 耿斌¹, 韩连滨¹, 张伟鑫^{2,3,4}, 刘行^{2,3,4}, 严德天²,
王华²

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 3. 油气勘探开发理论与技术湖北省重点实验室(中国地质大学(武汉)), 湖北 武汉 430074; 4. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 准噶尔盆地哈山地区风城组发育粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相两类岩相, 因受黄铁矿等顺磁性矿物影响, 含油饱和度评价精度受限。以核磁测井和核磁实验为基础, 获取两类岩相储层含油饱和度, 优选常规测井敏感曲线, 建立其测井响应模型。研究表明: 提出基于黄铁矿含量的核磁 T₂ 谱校正新方法, 有效恢复了 T₂ 谱形态。确定 T₂ 截止值分别为 8 ms 和 24 ms, 核磁测井计算两类岩相储层含油饱和度平均相对误差最小, 分别为 4.86% 和 3.87%。基于二维核磁共振解释图版准确表征的粉砂质白云岩相储层含油饱和度, 范围为 40.68%~76.21%, 平均为 54.11%。基于岩相划分构建的含油饱和度测井响应模型, 决定系数均在 0.8 以上, 平均相对误差均小于 8%。研究成果对致密油储量评价提供技术支持。

关键词: 准噶尔盆地; 哈山地区; 风城组; 含油饱和度; 岩相

中图分类号: TE121

收稿日期: 2025-11-17

Characterization of Oil Saturation in Reservoirs of Different Lithofacies in the Fengcheng Formation, Hashan area, Junggar Basin

Wang Min¹, Zhou Sandong^{2,3,4}, Geng Bin¹, Han Lianbin¹, Zhang Weixin^{2,3,4}, Liu Hang^{2,3,4}, Yan Detian², Wang Hua²

(1. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Hubei Key Laboratory of Oil and Gas Exploration and Development Theory and Technology (China University of Geosciences), Wuhan 430074, China; 4. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

基金项目: 中国石油科技创新基金项目 (2024DQ02-0110)

Supported by the CNPC Innovation Found (2024DQ02-0110)

第一作者: 王敏 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事测井信息处理及解释工作, ORCID: 0009-0004-1363-670X, E-mail: wangmin136.slyt@sinopec.com

通讯作者: 周三栋 (1991—), 男, 博士, 教授, 从事非常规油气储层地质学研究。E-mail: zhousandong@cug.edu.cn

Abstract: The Fengcheng Formation in the Hashan area of the Junggar Basin develops two types of lithofacies: silty dolomite facies and dolomitic siltstone facies. Due to the influence of paramagnetic minerals such as pyrite, the accuracy of oil saturation evaluation is limited. Based on nuclear magnetic logging and nuclear magnetic experiments, the oil saturation of two types of lithofacies reservoirs is obtained, the conventional logging sensitivity curve is optimized, and the logging response model is established. The results show that a new method of NMR T_2 spectrum correction based on pyrite content is proposed, which effectively restores the T_2 spectrum morphology. The T_2 cutoff values are determined to be 8 ms and 24 ms, respectively. The average relative error of oil saturation calculated by nuclear magnetic logging is the smallest, which is 4.86% and 3.87%, respectively. Based on the two-dimensional nuclear magnetic resonance interpretation chart, the oil saturation of silty dolomite facies reservoir is accurately characterized, ranging from 40.68% to 76.21%, with an average of 54.11%. The oil saturation logging response model based on lithofacies division has a determination coefficient of more than 0.8 and an average relative error of less than 8%. The research results provide technical support for the evaluation of tight oil reserves.

Key words: Junggar Basin; Hashan area; Fengcheng Formation; Oil Saturation; Lithofacies

0 引言

近年来,随着中国勘探开发技术的不断发展,主要富集在二叠系、三叠系、白垩系以及古近系等地层中的非常规油气探明储量和产量迅速增加(何文渊,2022;赵贤正等,2022;秦德超等,2023;邹才能等,2023)。准噶尔盆地是中国重要的叠合含油气盆地,页岩油地质资源量为 25.14×10^8 t,技术可采资源量为 1.81×10^8 t(孙龙德等,2023;司学强等,2024;宋永等,2024;王金铎等,2024)。玛湖凹陷 MY1 井累产油 5678 m^3 ,平均日产油 22.5 m^3 ,MY1H、M51X、X205X 等井取得了百吨高产的突破(宋永等,2022;刘国平等,2024)。哈拉阿拉特山地区(简称哈山地区)南邻玛湖富烃凹陷,风城组碱湖型优质烃源岩发育,云质混积岩相(夹层及裂缝运移型)和含火山碎屑混积岩相(自生自储型)含油性较好(OSI 值高于 100 mg/g)(张奎华等,2023)。中石化 HS1、HSX1、HQ6、HS5 等多口井在哈山地区风城组钻遇细粒沉积物和碱盐岩沉积,并显示具有较好的生烃潜力和油气显示(刘惠民等,2024)。其中 HQ6 井在云质岩中试油,峰值日产油 6.28 m^3 ,HS5 井压裂试获日产油 95.8 m^3 ,揭示了哈山地区风城组具有较好的致密油勘探前景(贾凡建等,2025)。哈山山前带风城组新增预测储量超 3063 万吨。哈山地区风城组储层深度 $4500 \text{ m} \sim 6000 \text{ m}$,不同井位储层有效孔隙度相近,平均为 3.5%,产油量差异明显(张奎华等,2024)。含油饱和度可能是导致产油量不同的因素之一。

含油饱和度是储量评价和开发方案设计中非常重要的一个参数(闫伟林等,2021)。确定含油饱和度的方法较多,总结起来主要分为岩心实验和测井解释两大类(闫伟林等,2022)。岩心实验中密闭岩心直接测定、高压压汞、核磁共振实验等均可直接或间接获得含油饱和度;测井解释法包括常规测井和特殊测井,通过岩心标定测井的方法来获取含油饱和度(熊雄等,2023)。对于传统砂岩或致密储层,可以通过常规岩石物理实验获得岩电参数,然后利用阿尔奇公式或其他公式计算含油饱和度(毛锐等,2021)。但风城组云质岩储层与常规储层相比具有高白云石含量、纹层页理和纳米孔发育、孔隙结构复杂、实验难度大等特点,在油气运移、赋存方式、

储集空间类型等方面具有较大差异,应用常规储层饱和度评价方法表征含油饱和度精度较低(曹志锋等,2024)。近年部分学者尝试通过改进 Simandoux 模型,通过计算机断层扫描技术配合高精度矿物识别构建三维数字岩心模型,提出了一套确定古龙凹陷页岩储层岩电参数的方法,进而精确表征储层含油饱和度。但风城组云质岩与古龙凹陷页岩存在明显的差异,Simandoux 模型能否适用尚未得到充分论证(李潮流等,2022)。由于风城组储层岩性岩相复杂、顺磁性物质的存在及钻井液影响,导致其含油性常规测井响应规律不清,制约了储层含油饱和度评价的精度。核磁测井需岩石物理实验标定,解释周期长,不能满足快速评价的需求。如何精确地计算含油饱和度,认识富集层段空间分布,评价资源潜力,是致密油勘探取得重大突破的关键。

针对准噶尔盆地哈山地区风城组储层含油饱和度评价难题,本研究综合核磁共振测井与二维核磁共振实验等资料,揭示了顺磁性矿物(黄铁矿)对含油饱和度计算的显著影响。在此基础上,创新性提出了考虑黄铁矿含量的分岩相 T_2 谱校正新方法,建立了分岩相 T_2 截止值法、二维核磁图版法的储层含油饱和度高精度表征体系。基于高精度核磁标定结果,构建了基于常规测井敏感曲线的不同岩相储层含油饱和度测井响应模型。本研究实现了研究区储层含油饱和度的快速准确评价,可有效指导哈山地区含油饱和度解释、储量评价和压裂试油方案制定。

1 区域地质概况

哈山地区隶属于准噶尔盆地北缘哈—德(哈山—德伦山)构造带的西端,位于玛湖凹陷北缘,该区常被划分为玛湖凹陷风城组沉积的北部边界(图 1-a),其沉积相以扇三角洲和湖相沉积为主(于洪洲等,2022)。哈山地区风城组湖相环境被划分为微咸水滨浅湖、微咸水半深湖、咸水半深湖和盐碱湖等次级单元。该区风城组自下而上被划分为风一段(风一下亚段和风一上亚段)、风二段(风二下亚段和风二上亚段)、风三段(李振明等,2023)。以哈深斜 1 井风二上亚段为代表的沉积,主要发育云质页岩、含云页岩、钙质页岩、含钙页岩等(曹正林等,2024;图 1-b)。整体上,风城组是一套封闭—半封闭咸化湖泊环境中沉积的地层,以灰黑色泥岩和白云质泥岩为主,夹粉—细砂岩。烃源岩 TOC 含量一般为 0.12%~5.13%(平均 1.16%),生烃母质以 I 型和 II₁ 型为主,且有机质处于未成熟—低熟演化阶段,具有形成巨量致密油资源的潜力(曾治平等,2023)。

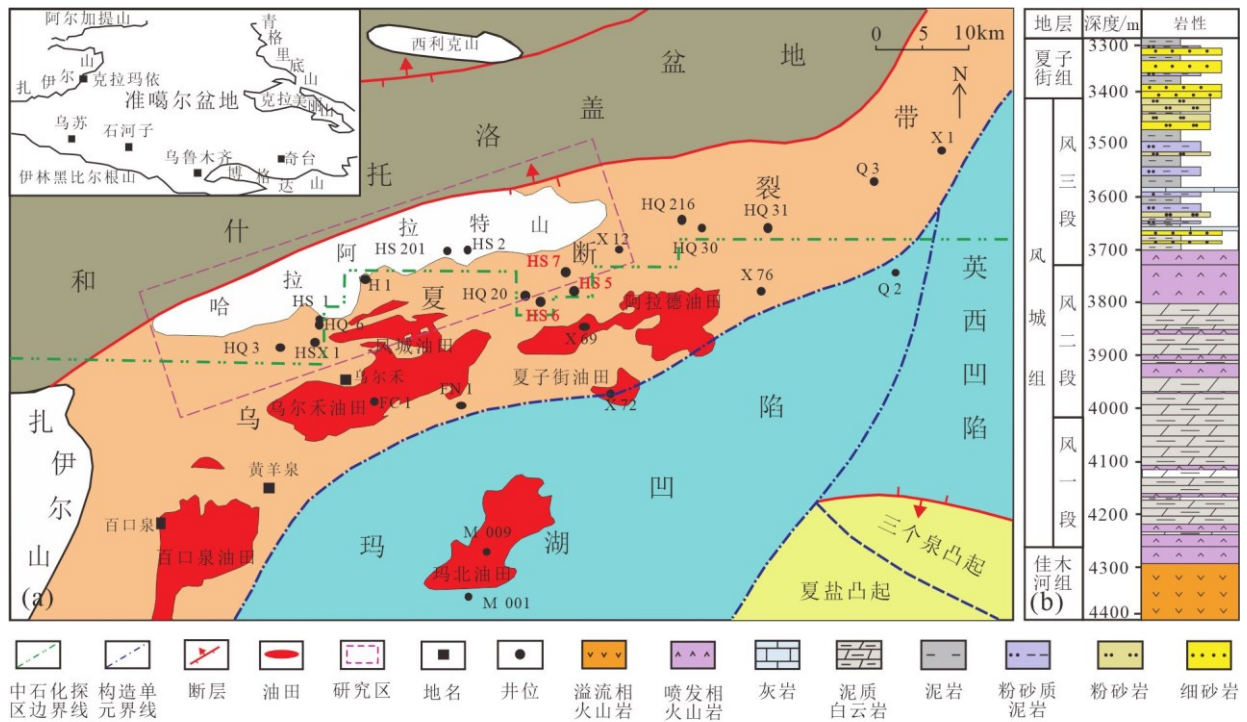


图1 (a) 准噶尔盆地西北缘哈山地区构造位置; (b) 二叠系风城组岩性地层综合柱状图 (修改自刘惠民等, 2024)

Fig.1 (a) The tectonic position of the Hashan area in the northwestern margin of the Junggar Basin; (b) The comprehensive stratigraphic column of the Permian Fengcheng Formation

2 风城组储层含油饱和度评价难点

哈山地区风城组储层岩相受沉积环境控制, 风一下亚段、风二上亚段和风三段以扇三角洲外前缘沉积为主, 主要发育泥质粉砂岩、白云质粉砂岩等。风一上亚段和风二下亚段为滨浅湖沉积, 以粉砂质白云岩、泥质白云岩发育为主 (张奎华等, 2023)。根据不同沉积相发育的岩性组合类型以及矿物成分特征 (图2), 结合 HS6 井 31 块岩心样品观察和薄片鉴定, 总结出哈山地区风城组储层主要发育粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相两类岩相。粉砂质白云岩相主要以滨浅湖沉积为主, 发育在风一上亚段、风二下亚段, 以泥质白云岩、粉砂质白云岩为主, 储集空间发育粒内溶孔、晶间孔、有机质孔等, 显示为暗-中等荧光性。白云质粉砂岩相主要为扇三角洲外前缘沉积, 大量发育在风一下亚段、风二上亚段和风三段, 岩性以白云质粉砂岩、泥质粉砂岩等为主, 发育粒内溶孔、裂缝、粒缘缝 (杜晓宇等, 2024) 等, 具有较强荧光性 (表1)。

粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相都呈现高长英质矿物含量、高碳酸盐矿物含量、低黏土矿物含量的混积特征 (刘惠民等, 2024)。矿物类型包含黏土矿物、陆源碎屑矿物 (石英、斜长石)、碳酸盐矿物 (铁白云石)、黄铁矿等。由于高含量顺磁性矿物 (黄铁矿) 导致核磁共振横向弛豫时间缩短, T_2 谱峰左移使得核磁共振法计算含油饱和度系统性偏大。受顺磁性矿物的影响, 需进一步校正核磁共振横向弛豫时间, 以提高储层含油饱和度解释精度 (庞小娇等, 2024)。

表 1 准噶尔盆地哈山地区风城组储层不同岩相特征对比

Table 1 Comparison of different lithofacies characteristics of Fengcheng Formation reservoir in Hashan area, Junggar Basin

岩相类型	沉积环境	发育层段	主要岩性	储集空间	荧光性	裂缝
粉砂质白云岩相	滨浅湖沉积	风一上亚段、	泥质白云岩、	粒内溶孔、晶间	暗-中等	裂缝、层理
		风二下亚段	粉砂质白云岩	孔、有机质孔		缝、粒缘缝
白云质粉砂岩相	扇三角洲外 前缘沉积	风一下亚段、	白云质粉砂岩、 泥质粉砂岩	粒内溶孔	较强	裂缝、粒缘缝
		风二上亚段、				
		风三段				

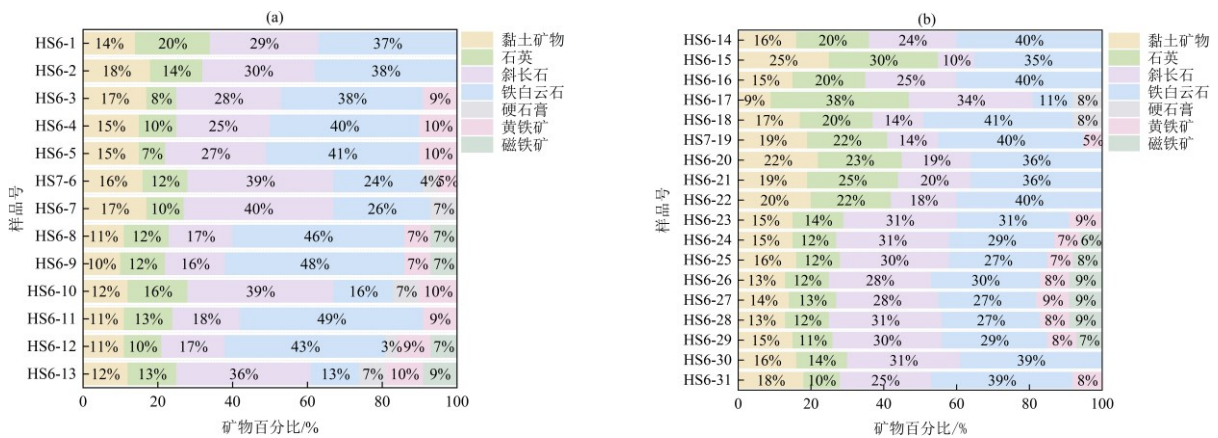


图 2 准噶尔盆地哈山地区风城组两类岩相矿物含量分布：（a）粉砂质白云岩相；（b）白云质粉砂岩相

Fig.2 The content distribution of two kinds of lithofacies minerals in Fengcheng Formation in Hashan area of Junggar Basin; (a) Silty dolomite lithofacies; (b) Dolomitic siltstone lithofacies

3 含油饱和度表征方法

3.1 顺磁性物质影响下核磁 T₂ 谱校正方法

哈山地区风城组粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层在进行核磁共振测试时，由于样品中黄铁矿（FeS₂）等顺磁性矿物会产生内部磁场梯度，从而加速弛豫过程，导致 T₂ 时间缩短。与此同时，两类岩相在矿物成分和孔隙结构等方面存在差异，有必要划分岩相明确黄铁矿含量对核磁共振 T₂ 谱的影响程度，并利用黄铁矿含量对受内部磁场梯度影响而缩短的 T₂ 值进行校正，以恢复真实 T₂ 谱。以 HS6 井风一下亚段和风一上亚段为例，对 11 个粉砂质白云岩相和 10 个白云质粉砂岩相样品进行分析，结果表明，归一化黄铁矿含量与含油饱和度相对误差均呈线性正相关关系，即归一化黄铁矿含量越高，含油饱和度相对误差越大（图 3）。利用归一化黄铁矿含量与含油饱和度相对误差拟合得到校正因子（a，b），进而计算 T₂ 谱校正后含油饱和度。粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相归一化黄铁矿含量与含油饱和度相对误差的拟合公式分别为 $y=1.04x-0.12$ 和 $y=0.79x+0.13$ ，确定

粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层黄铁矿含量校正公式中校正因子（a，b）分别取为 1.04 和 0.12、0.79 和 0.13。

$$e_{\text{饱和度}} = \frac{So_{\text{岩心}} - So_{\text{NMR}}}{So_{\text{岩心}}} \quad (1)$$

式(1)中： $e_{\text{饱和度}}$ 代表含油饱和度相对误差， $So_{\text{岩心}}$ 表示岩心分析含油饱和度， So_{NMR} 表示核磁共振含油饱和度。

$$T_{2,true} = T_{2,measure} \times (\text{Log}_a c + b) \quad (2)$$

式(2)中： $T_{2,true}$ 表示校正后横向弛豫时间，ms； $T_{2,measure}$ 表示实测横向弛豫时间，ms； c 为黄铁矿含量，%； a 与 b 为校正因子，由归一化黄铁矿含量与含油饱和度相对误差拟合得出。

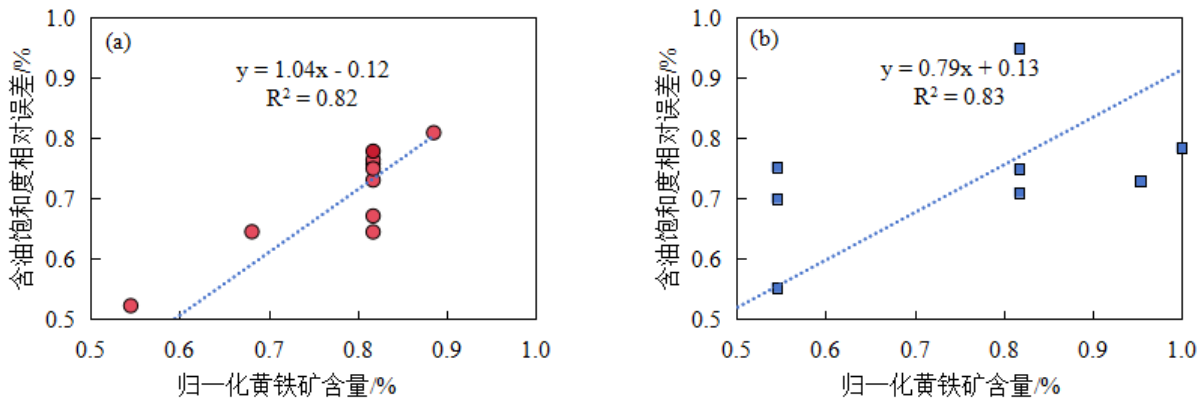


图3 准噶尔盆地哈山地区风城组两类岩相归一化黄铁矿含量与含油饱和度相对误差散点拟合图；（a）粉砂质白云岩相；（b）白云质粉砂岩相

Fig.3 Scatter fitting diagram of relative error between normalized pyrite content and oil saturation of two types of lithofacies in Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin; (a) Silty dolomite lithofacies; (b) Dolomitic siltstone lithofacies

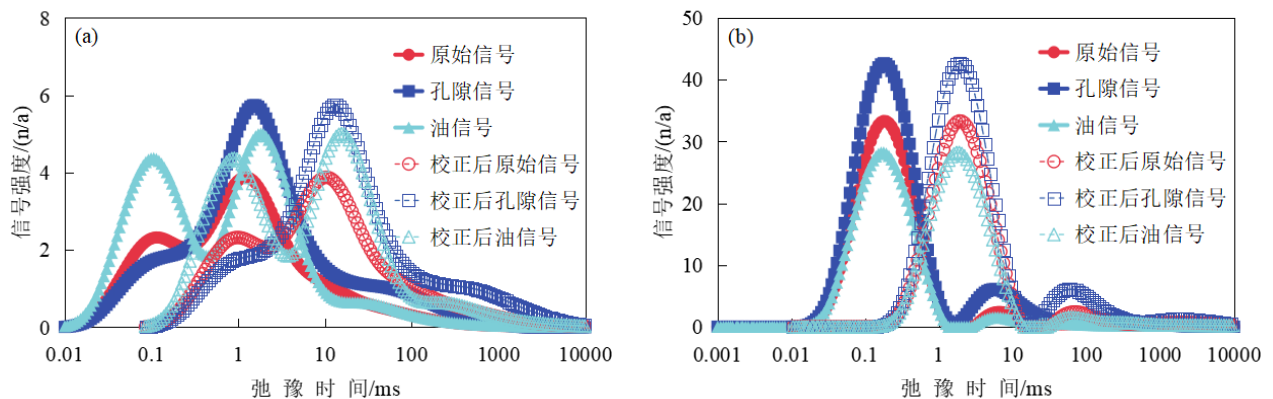


图4 准噶尔盆地哈山地区风城组两类岩相核磁共振 T_2 谱校正前后对比图；（a）粉砂质白云岩相；（b）白云质粉砂岩相

Fig.4 Comparison of two types of lithofacies of Fengcheng Formation reservoir in Hashan area of Junggar Basin before and after nuclear magnetic resonance T_2 spectrum correction; (a) Silty dolomite lithofacies; (b) Dolomitic siltstone lithofacies

将粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相样品校正前与校正后的核磁共振 T_2 谱进行比对,可以发现,原始信号、孔隙信号和油信号均整体向右移动,恢复了黄铁矿对样品核磁共振 T_2 谱的影响,实现了核磁 T_2 谱的校正(图4)。

3.2 核磁测井 T_2 截止值法

核磁共振测井通过测量地层中氢原子的弛豫信号,可以提供与地层岩性无关的孔隙和流体信息。依据核磁共振谱信号分析,在选取合适的 T_2 截止值的情况下,大于或小于该 T_2 截止值对应于孔隙组分的含油孔隙组分和含束缚水孔隙组分,就能提供精确的含油体积,从而实现含油饱和度的高精度获取(刘雅慧等, 2021)。计算含油饱和度的公式如下:

$$S_o = \frac{\int_{T_{2cutoff}}^{T_{2max}} S(T)dt}{\int_{T_{2min}}^{T_{2max}} S(T)dt} \times 100 \quad (3)$$

式(3)中: S_o 为含油饱和度, %; $T_{2cutoff}$ 、 T_{2max} 、 T_{2min} 分别为 T_2 截止值, 最大, 最小横向弛豫时间, ms; $S(T)$ 为横向弛豫时间相关的孔隙度分布函数。

由于粉砂质白云岩相的 T_2 截止值通常小于白云质粉砂岩相,二者在 T_2 截止值选取上存在差异。主要是因为其更复杂的孔隙结构(如晶间孔、溶蚀孔)和更高的束缚水饱和度导致可动流体信号向更短的弛豫时间偏移,所以不同岩相的 T_2 截止值的选取并不相同。以 HS5 井 23 个粉砂质白云岩相和 10 个白云质粉砂岩相样品为例,初步选择 2 ms、4 ms、6 ms、8 ms、10 ms、12 ms 作为不同 T_2 截止值梯度计算风一下亚段和风二上亚段粉砂质白云岩相储层含油饱和度; 8 ms、12 ms、16 ms、20 ms、24 ms、28 ms 作为不同 T_2 截止值梯度计算风一下亚段白云质粉砂岩相储层含油饱和度。如图 5 所示为利用核磁共振测井计算粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层的含油饱和度成果图。图中第 1~6 道分别为 T_2 谱校正后含油饱和度分析结果与不同的 T_2 截止值梯度计算得到的连续含油饱和度曲线。可以看出,核磁共振测井处理得到的含油饱和度与 T_2 谱校正后岩心分析含油饱和度结果趋势一致。以小于 6 ms 和 20 ms 作为 T_2 截止值处理得到的粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层含油饱和度偏大,说明起算时间过小,导致将部分水的信号误认为油的信号;以大于 10 ms 和 28 ms 作为 T_2 截止值得到的粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层含油饱和度偏小,说明起算时间过大,从而忽略了一部分油的信号。以 6 ms~10 ms 和 20 ms~28 ms 作为 T_2 截止值的选取范围,进一步计算不同岩相储层的含油饱和度,并统计每个 T_2 截止值得到的含油饱和度与岩心分析含油饱和度之间的相对误差。相对误差由下式得到:

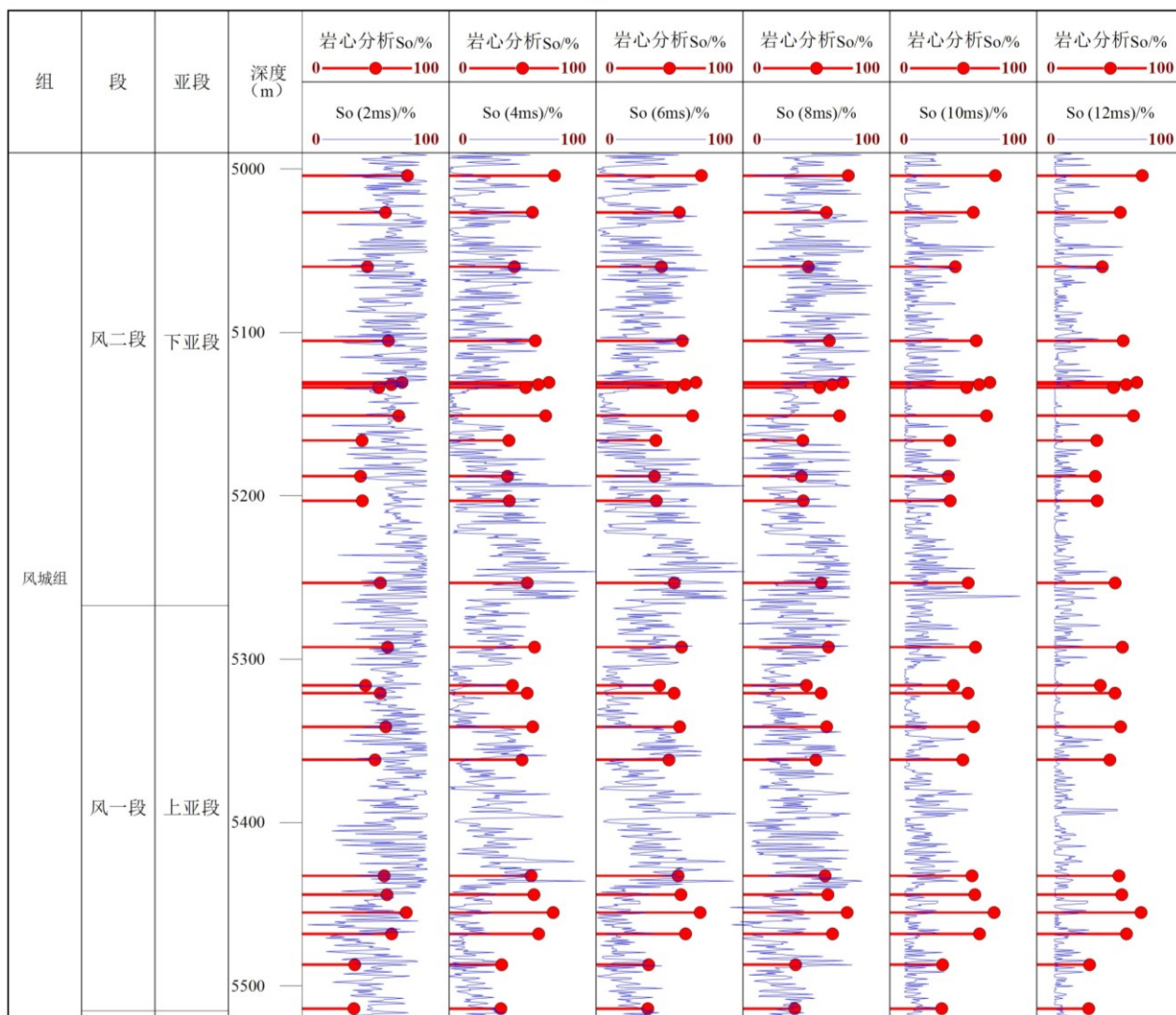
$$\sigma = \frac{S_o \log - S_o \text{ core}}{S_o \text{ core}} \times 100 \quad (4)$$

式(4)中: $S_o \log$ 、 $S_o \text{ core}$ 分别表示核磁共振测井计算和岩心分析含油饱和度。

受岩心运输及实验测量等主客观因素影响,部分油组分可能发生散失,进而导致经 T_2 谱校正后获得的岩心分析含油饱和度低于地层真实含油饱和度。严格而言,基于 T_2 谱校正后计算得到的岩心分析含油饱和度存在偏

低的可能。考虑到需满足计算的含油饱和度基本大于 T_2 谱校正后岩心分析含油饱和度结果的条件，选择在相对误差大于 0 的前提下，选取对应相对误差最小的 T_2 时间作为含油饱和度计算的 T_2 截止值。结果表明，以 8 ms 和 24 ms 作为粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相的 T_2 截止值得到的相对误差范围分别为 0.28~11.96% 和 1.29~8.11%，相对误差平均值分别为 4.86% 和 3.87% 最小，最能反映含油饱和度的真实情况（图 6）。

(a)



(b)

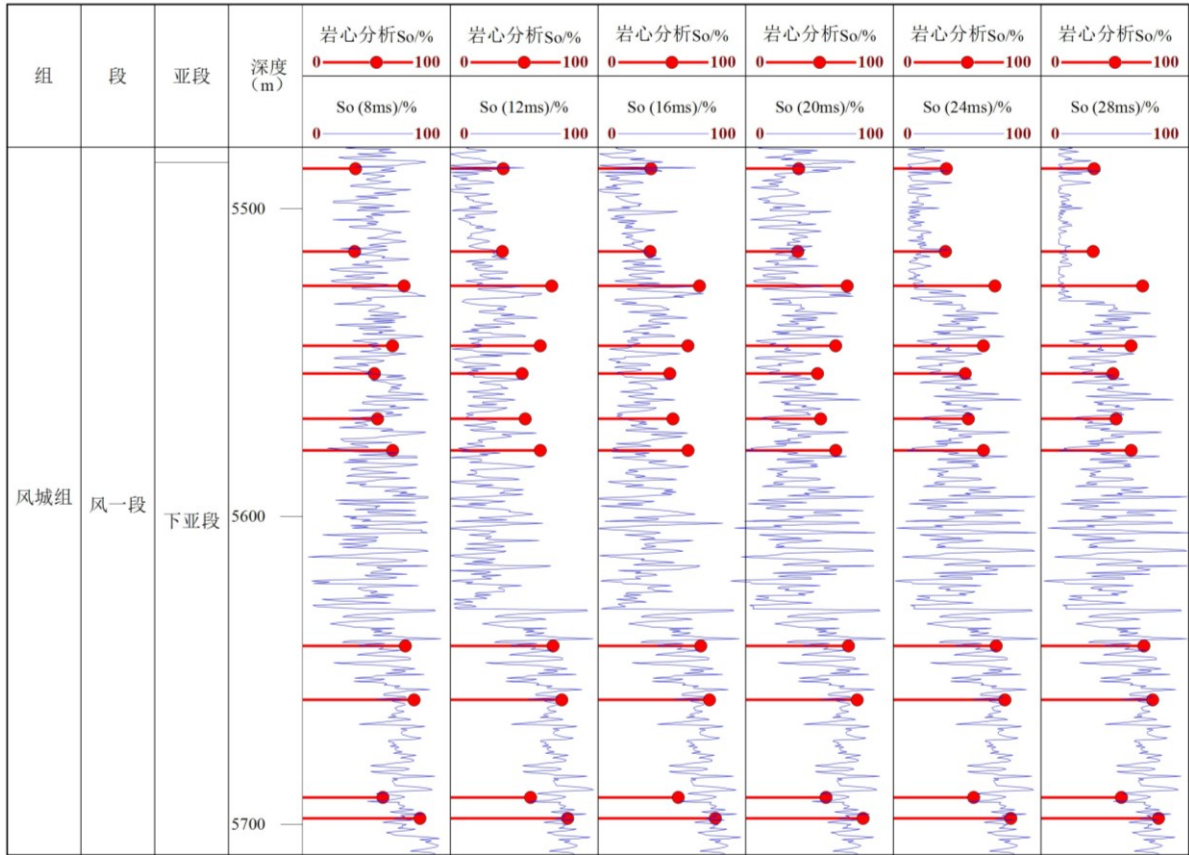


图5 准噶尔盆地哈山地区风城组两类岩相核磁共振测井含油饱和度评价结果；（a）粉砂质白云岩相；（b）白云质粉砂岩相

Fig.5 Evaluation results of oil saturation by nuclear magnetic resonance logging for reservoirs of different lithofacies in the Hashan area of the Junggar Basin; (a) Silty dolomite lithofacies; (b) Dolomitic siltstone lithofacies

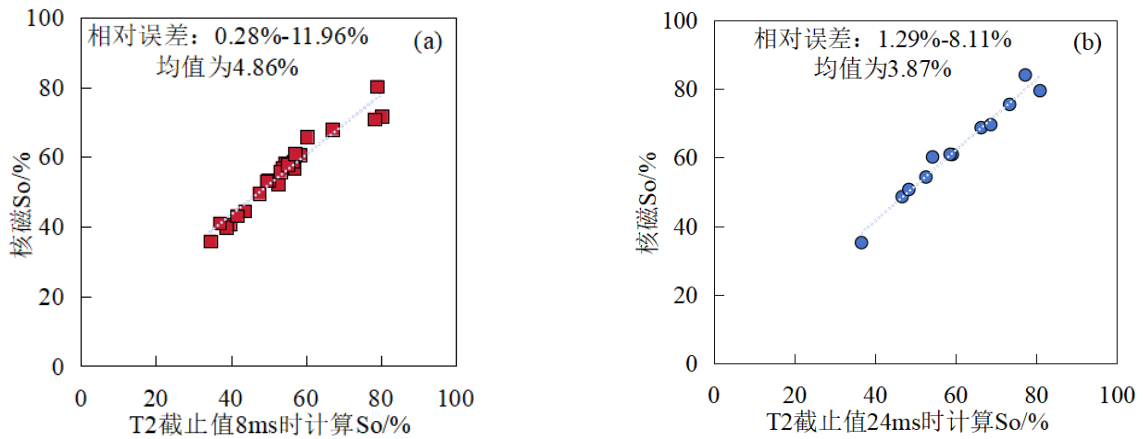


图6 准噶尔盆地哈山地区两类岩相选取 8 ms 和 24 ms 计算含油饱和度与 T₂ 谱校正后岩心分析含油饱和度的拟合图；（a）粉砂质白云岩相；（b）白云质粉砂岩相

Fig.6 Fitting diagram of oil saturation calculated by 8 ms and 24 ms for two types of lithofacies in Hashan area of Junggar Basin and core analysis after T₂ spectrum correction; (a) Silty dolomite lithofacies; (b) Dolomitic siltstone lithofacies

3.3 二维核磁共振图版法

由于不同性质、不同赋存状态流体的横向弛豫时间 T_2 谱互相重叠，直接通过 T_2 谱分析储层的含油性较为困难。相比之下，利用纵向弛豫时间 T_1 谱的差异及 T_1/T_2 比值的变化，能够更准确地评价储层的含油性。二维核磁共振实验可以确定岩样在不同状态下的二维核磁 T_1 - T_2 谱图，包括原始状态、饱和油状态和不含油状态等。通过实验数据，可以建立风城组储层不同性质、不同组分流体的标准模板，利用该模板可以更准确地评价储层的含油性（陈龙川等，2024；丁娱娇等，2020）。含油饱和度计算公式如下：

$$S_o = \frac{V_{OIL} + V_{BHC}}{V_{OIL} + V_{BHC} + V_{IRRW} + V_W} \quad (5)$$

式中， S_o 为含油饱和度，%； V_{OIL} 为游离油体积占比，%； V_{BHC} 为吸附油体积占比，%； V_{IRRW} 为毛细管束缚水体积占比，%； V_W 为游离水体积占比，%；

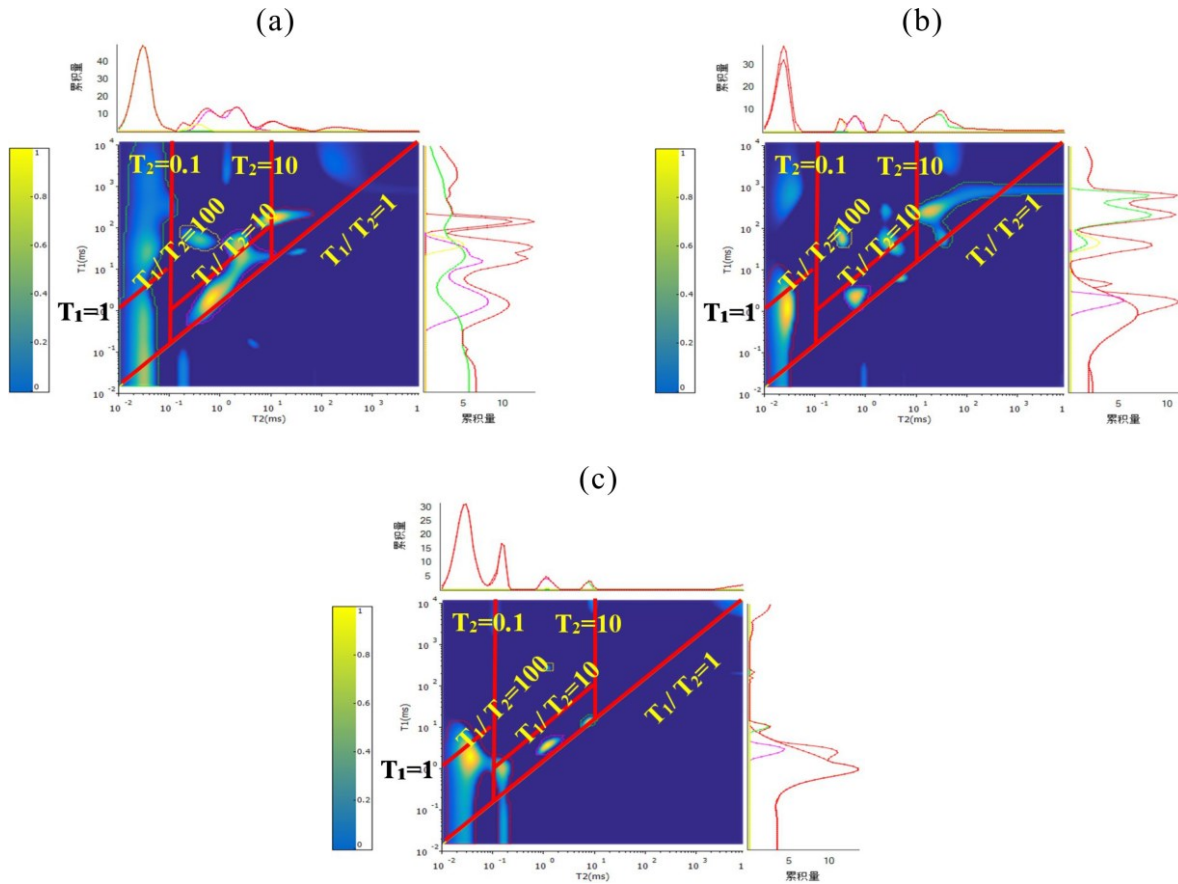


图7 准噶尔盆地哈山地区粉砂质白云岩相储层不同状态岩心样品二维核磁共振谱图；（a）原始含油态；（b）饱和油态；（c）不含油态

Fig.7 Two-dimensional nuclear magnetic resonance spectra of core samples in different states of silty dolomite reservoir in Hashan area, Junggar Basin; (a) Original oil-bearing state; (b) Saturated oil-bearing state; (c) Non oil-bearing state

图 7 展示了 HS6 井风城组 10 个粉砂质白云岩相储层岩心样品的二维核磁共振实验结果。基于原始含油、饱和油和不含油三种状态下岩心样品的二维核磁 T_1 - T_2 图谱，对不同组分在二维核磁 T_1 - T_2 图谱上的位置进行标定。通过含油样品与不含样品谱图对比，确定干酪根、束缚水和游离水的位置；饱和油样品与不含油样品图谱对比，明确吸附油和游离油的位置。综合不同状态谱图的对比结果，最终明确干酪根、束缚水、游离水、吸附油和游离油在二维核磁 T_1 - T_2 图谱中的分布特征。在二维核磁 T_1 - T_2 图谱中， $T_2 < 0.1$ ms 为骨架部分，主要包括束缚水和干酪根； $T_2 > 0.1$ ms 为孔隙流体部分。游离水 T_1/T_2 值较小，位于油信号下方；油 T_1/T_2 值较大，其中吸附油主要分布于 $0.1 \text{ ms} < T_2 < 10 \text{ ms}$ 范围，游离油介于 $T_2 > 10 \text{ ms}$ 的范围。根据建立的二维核磁 T_1 - T_2 图谱模板，依据式（5）计算得到哈山地区风城组粉砂质白云岩相储层含油饱和度为 40.68%~76.21%，均值为 54.11%。

4 含油饱和度测井建模

4.1 测井模型建立

常规测井资料获取便捷、成本较低、测量速度快，是储层评价中最基础且常用的资料类型，在风险探井和开发井中均为必测项目，也是储层参数计算和流体性质识别的重要依据（王欣等，2024）。含油饱和度（ S_o ）作为储层含油性表征的关键参数之一，建立其测井响应模型以实现纵向连续化预测是至关重要的。基于 T_2 截止值法和二维核磁共振图版法获得的含油饱和度数据，以岩性和物性相对稳定的层段为单元，分别统计 HS5 和 HS6 井粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层的含油饱和度及对应测井数据。借助 SPSS 数据处理平台开展多元回归分析，建立了基于常规测井资料的两类岩相储层含油饱和度响应模型。电阻率（RT）、密度（DEN）、声波时差（AC）和中子孔隙度（CNL）是评价含油饱和度的敏感测井参数（蒋云箭等，2023）。采用多元回归分析方法对上述这些测井敏感参数进行耦合建模，以实现含油饱和度的定量表征。

粉砂质白云岩相储层和白云质粉砂岩相储层的含油饱和度测井响应模型分别见式（6）和（式 7）。具体如下：

$$S_o = 12.739 * \text{Lg}(\text{RT}) - 7.034 * \text{DEN} + 0.179 * \text{AC} - 0.083 * \text{CNL} + 42.898 \quad (6)$$

$$S_o = -101.957 * \text{DEN} + 0.184 * \text{AC} + 0.147 * \text{CNL} + 284.945 \quad (7)$$

式（6）和式（7）中： S_o 为含油饱和度，%；RT 为电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；DEN 为密度， g/cm^3 ；AC 为声波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ ；CNL 为中子孔隙度，%。

4.2 模型精度分析

模型建立后，选取 HS7 井对含油饱和度测井响应模型进行可行性验证。粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层含油饱和度与基于声波时差、密度、中子和电阻等测井敏感参数建立的多参数模型计算结果相关性较好，

决定系数(R^2)分别为 0.83 和 0.82。核磁分析含油饱和度与模型计算含油饱和度的相对误差分别为 0.05%~13.42% 和 0.66%~12.67%，相对误差均值分别为 6.01%和 4.73%，满足储量规范要求（图 8）。

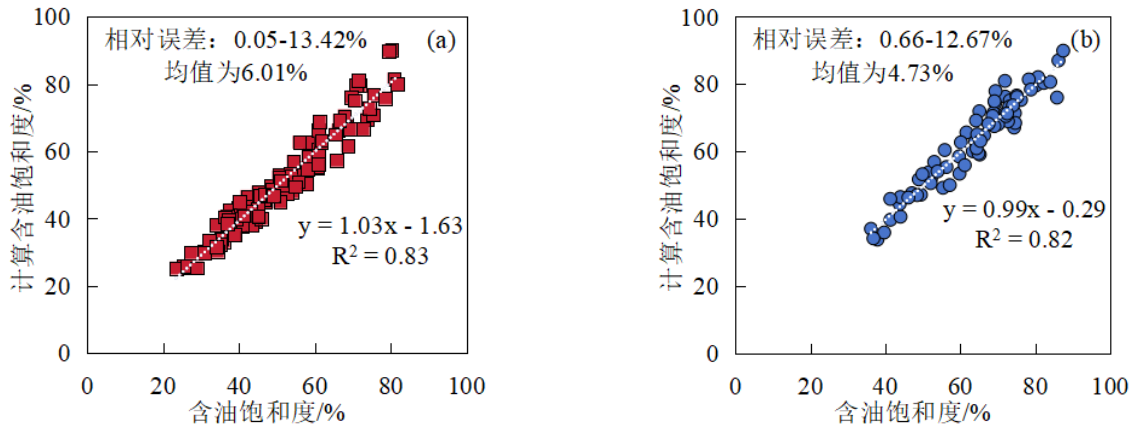


图 8 准噶尔盆地哈山地区 HS7 井风城组两类岩相含油饱和度模型验证散点图；（a）粉砂质白云岩相；（b）白云质粉砂岩相

Fig.8 Scatter diagram for verifying oil saturation model of two types of lithofacies in Fengcheng Formation of well HS7 in Hashan area of Junggar Basin; (a) Silty dolomite lithofacies; (b) Dolomitic siltstone lithofacies

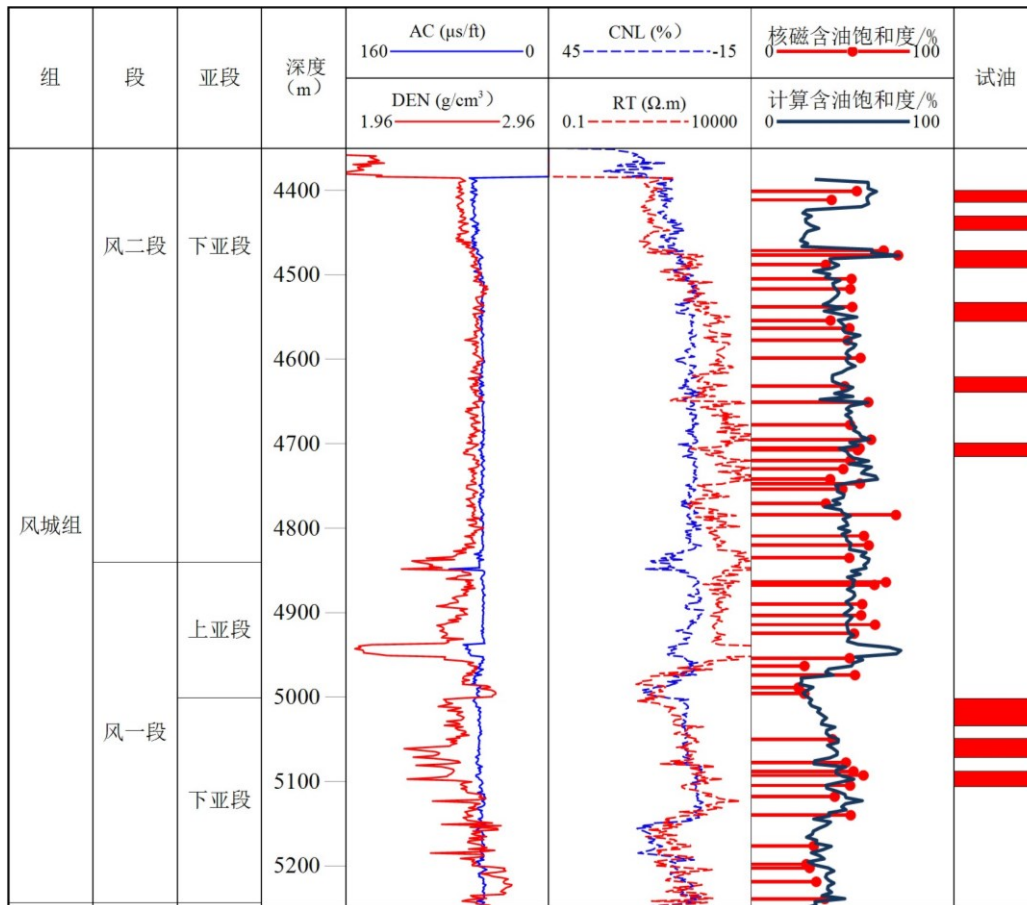


图 9 准噶尔盆地哈山地区 HS7 井风城组储层含油饱和度测井评价结果

Fig.9 Oil saturation logging evaluation results of Fengcheng Formation reservoirs in HS7 well, Hashan area, Junggar Basin

图 9 展示了哈山地区 HS7 井风城组储层的含油饱和度评价成果，结果表明，核磁共振含油饱和度与模型计算结果曲线吻合良好，变化趋势一致，表明该测井响应模型能够有效预测研究区储层含油饱和度。HS7 井风一段目标井段（5002m~5106m）含油饱和度均值为 22%，分 3 段压裂试油后，峰值日产油 3.4 m³，累计产油 98.04 m³；风二段目标井段（4400m~4715m）含油饱和度均值为 48%，分 6 段压裂试油后，峰值日产油 20.04 m³，累计产油 280.96 m³，试油效果好，验证了含油饱和度测井响应模型的准确性。

4.3 应用实例分析

利用上述含油饱和度测井响应模型，对哈山地区风城组储层含油饱和度进行了定量评价。图 10 展示了 HS6 井基于二维核磁共振图版评价得到的含油饱和度与常规测井响应模型计算含油饱和度的对比结果，可以看出核磁分析结果与常规测井评价的含油饱和度吻合较好，变化趋势一致。以高含油饱和度（均值 49%）井段（5431 m~5588 m）为靶层，对 HS6 井实施分四段压裂试油，峰值日产油 24.41 m³，累计产油 254.2 m³，试油效果较好，表明应用上述含油饱和度测井响应模型对研究区储层含油饱和度进行定量评价是可行的。

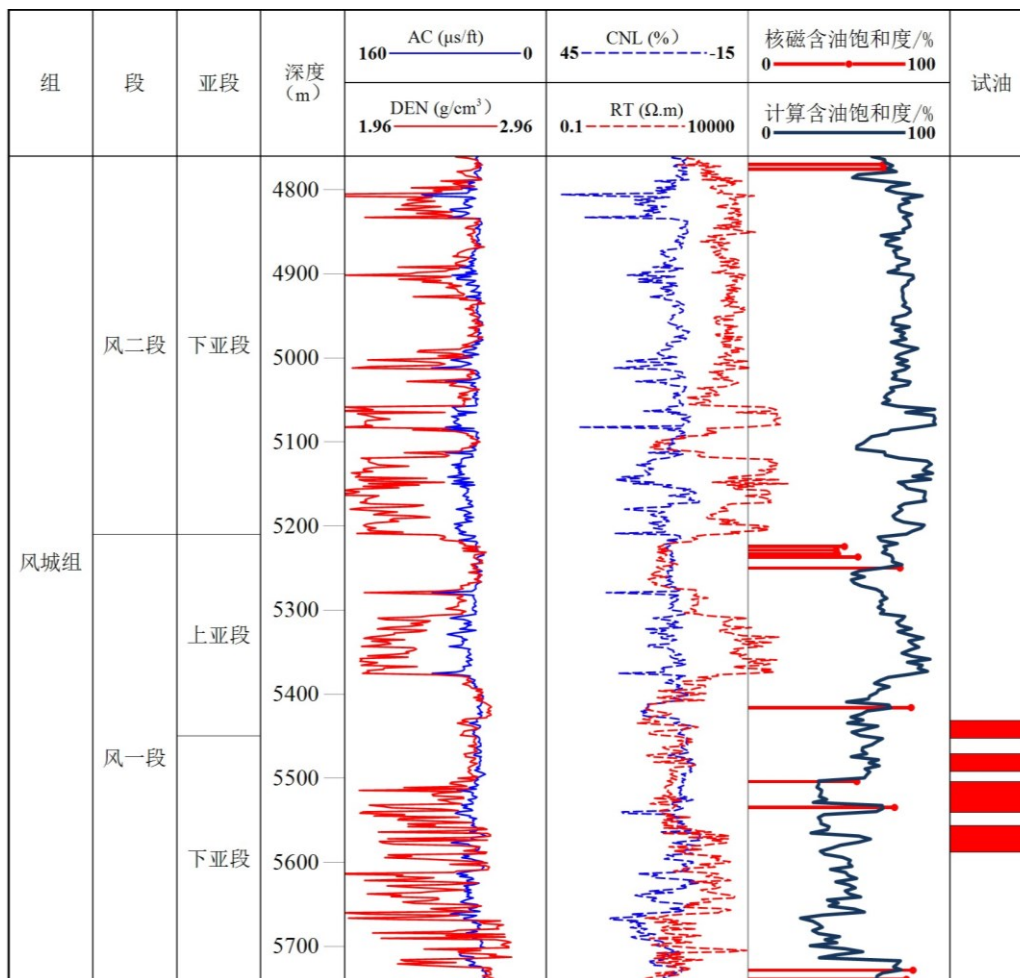


图 10 准噶尔盆地哈山地区 HS6 井风城组储层含油饱和度测井评价结果

Fig.10 Logging evaluation results of oil saturation in Fengcheng Formation reservoirs of HS6 well in Hashan area, Junggar Basin

储量计算所采用的含油饱和度参数满足储量规范要求，为哈山地区致密油预测储量的顺利提交提供了可靠的技术保障。含油饱和度实验和测井的精准表征，为哈山地区井位部署、水平井设计及试验区开发动用提供了技术支持。

5 结论

1) 阐明了哈山地区顺磁性矿物（黄铁矿）对粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层含油饱和度的影响，揭示了归一化黄铁矿含量与含油饱和度相对误差之间的线性正相关关系，拟合公式分别为 $y=1.04x-0.12$ 和 $y=0.79x+0.13$ ，建立了考虑黄铁矿含量的核磁 T_2 谱校正新方法，为含油饱和度的准确表征提供了依据。

2) 通过计算核磁 T_2 谱校正后含油饱和度与核磁测井得到的含油饱和度的相对误差，选择相对误差最小的 T_2 时间作为 T_2 截止值， T_2 截止值为 8 ms 和 24 ms 时得到的粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层含油饱和度相对误差范围分别为 0.28%~11.96%和 1.29%~8.11%，相对误差平均值最小（4.86%和 3.87%），最能反映哈山地区含油饱和度的真实情况。

3) 基于 HS6 井粉砂质白云岩相储层原始含油、饱和油、不含油岩心样品二维核磁共振图谱，建立了哈山地区二维核磁共振含油饱和度解释图版。基于二维核磁共振图版评价了风城组粉砂质白云岩相储层岩心的含油饱和度（40.68%~76.21%，均值 54.11%），为含油饱和度测井建模提供了数据支持。

4) 借助常规测井敏感曲线信息建立了风城组粉砂质白云岩相和白云质粉砂岩相储层含油饱和度测井响应模型，决定系数 (R^2) 均在 0.8 以上，模型验证相对误差均小于 8%。基于测井响应模型优化了单井评价，刻画了作为重点靶层的风一段含油饱和度展布特征，为哈山地区致密油储量提交、单井准确评价和井位部署提供技术支持。

作者贡献度说明

王敏：数据管理，形式分析，撰写初稿；周三栋：监督，项目管理，审阅及修订；耿斌：数据管理，可视化，调查；韩连滨：数据管理，可视化，调查；张伟鑫：数据管理，调查；刘行：方法，验证；严德天：方法，项目管理；王华：监督，项目管理。

致谢

感谢中国石化胜利油田分公司各级领导、各位专家及相关科室有关同志给予了大力支持，感谢审稿专家和期刊编辑的宝贵意见，谨致谢忱。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

References

- Cao, Z. L., Zhou, C. M., Gong, D. Y., et al., 2024. Tectono-Lithofacies Paleogeographic Characteristics and Source Rock Distribution of the Middle-Lower Permian in Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(09): 1349-1371(in Chinese with English abstract).
- Cao, Z. F., Lin, J. Q., Wang, X. H., et al., 2024. Calculation Method of Oil Saturation of Mixed Shale Based on Lithology Classification. *Well Logging Technology*, 48(01): 35-45(in Chinese with English abstract).
- Chen, L. C., Zhang, Z. Q., Zheng, J. D., et al., 2024. Application of NMR Logging in the Evaluation of Gulong Shale Oil. *Well Logging Technology*, 48(01): 110-116(in Chinese with English abstract).
- Ding, Y. J., Li, J. G., Zhu, W. F., et al., 2020. T₁- T₂ Two-Dimensional NMR Method for Detecting Oil-Bearing Property in Shale Oil Reservoirs. *Mud Logging Engineering*, 31(S1): 48-53(in Chinese with English abstract).
- Du, X. Y., Jin, Z. J., Zeng, L. B., et al., 2024. Development Model of Natural Fractures in Continental Shale of the Pingdiquan Formation in the Shuangjingzi Area, Eastern Junggar Basin. *Journal of Earth Science*, 49(09): 3264-3275(in Chinese with English abstract).
- He, W. Y., 2022. Discovery and Significance of Nano Pores and Nano fractures of Clay in Gulong Shale Oil Reservoir in Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 41(03): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Jia, F. J., Wang, J. W., Guo, R. C., et al., 2025. Oil-Bearing Property Evaluation of Fengcheng Formation Shale in Hashan Area of Junggar Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 44(01): 25-34(in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y. J., Liu, H. M., Chai, C. Y., et al., 2023. Logging Evaluation of Shale Oil in Jiyang Depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 30(01): 21-34(in Chinese with English abstract).
- Li, C. L., Yan, W. L., Wu, H. L., et al., 2022. Calculation of Oil Saturation in Clay-Rich Shale Reservoirs: A Case Study of Qing 1 Member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(06): 1168-1178(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. M., Xiong, W., Wang, B., et al., 2023. Fine-Grained Sedimentary Characteristics and Evolution Model of Permian Fengcheng Formation in Hashan Area, Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(04): 693-704(in Chinese with English abstract).
- Liu, G. P., Jin, Z. J., Zeng, L. B., et al., 2024. Natural Fractures and Their Effectiveness in Deep Continental Shale Reservoirs of Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag. *Journal of Earth Science*, 49(07): 2346-2358(in Chinese with English abstract).
- Liu, H. M., Wen, H. G., Zhang, K. H., et al., 2024. Geological Characteristics and Exploration Prospects of Alkaline Lake Shale Oil of the Fengcheng Formation, Hashan area, NW Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography*, 26(05): 1017-1036(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. H., Wang, C. Z., Liu, Z. H., et al., 2021. A Logging Method for Evaluating Oil-Bearing Property of Jimsar Shale Oil: Case Study of Sag in Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(07): 1084-1091(in Chinese with English abstract).
- Mao, R., Shen, Z. M., Chang, Q. S., et al., 2021. Evaluation Method of Reservoir Oil-Bearing Property by NMR Logging of Permian Lower Wuerhe Formation in Mahu Sag, Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(04): 162-172(in Chinese with English abstract).
- Pang, X. J., Wang, G. W., Yue, D. L., et al., 2024. Advances in Well Log-Based Assessments of Fine-Grained Sedimentary Rocks. *Oil & Gas Geology*, 45(04): 954-978(in Chinese with English abstract).
- Qin, D. C., Tang, J. G., Hu, M. L., et al., 2023. Micro-Pore Characteristics and its Main Controlling Factors of Shale in Sha 1 Member of Shahejie Formation in Nanpu Sag of Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 42(05): 47-56(in Chinese with English abstract).
- Si, X. Q., Pang, Z. C., Guo, H. J., et al., 2024. Characteristics and Controlling Factors of High Quality Deep Conglomerate

- Reservoir: A Case from Lower Cretaceous Qingshuihe Formation of Gaoquan Structure Zone in Sikesu Sag, Junggar Basin. *Journal of Earth Science*, 49(10): 3576-3588(in Chinese with English abstract).
- Song, Y., Tang, Y., He, W. J., et al., 2024. New Fields, New Types and Exploration Potentials of Oil-Gas Exploration in Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(01): 52-68(in Chinese with English abstract).
- Song, Y., Yang, Z. F., He, W. J., et al., 2022. Exploration Progress of Alkaline Lake Type Shale Oil of the Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 27(01): 60-72(in Chinese with English abstract).
- Sun, L. D., Zhao, W. Z., Liu, H., et al., 2023. Concept and Application of “Sweet Spot” in Shale Oil. *Acta Petrolei Sinica*, 44(01): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Wang, J. D., Zhang, G. L., Zhuang, X. M., et al., 2024. Research Progress and Potential Directions of Oil and Gas Exploration in Key Fields of Junggar Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 31(04): 24-41(in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Han, J. Q., Zan, L., et al., 2024. Logging Evaluation of Shale Oil in the Second Member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin. *Reservoir Evaluation and Development*, 14(03): 364-372(in Chinese with English abstract).
- Xiong, X., Xiao, D. S., Lei, X. H., et al., 2023. Response of Well Logging and “Sweet Spot” Rapid Evaluation Technology for Shale Oil in the Lucaogou Formation of Jimsar Sag. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 30(04): 35-43(in Chinese with English abstract).
- Yan, W. L., Zhang, Z. Q., Chen, L. C., et al., 2021. New Evaluating Method of Oil Saturation in Gulong Shale Based on NMR Technique. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 40(05): 78-86(in Chinese with English abstract).
- Yan, W. L., Zhang, H. B., Zheng, J. D., et al., 2022. Digital Core-Based Modeling Method and Application of Oil Saturation in Gulong Shale Oil Reservoir. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 41(03): 91-102(in Chinese with English abstract).
- Yu, H. Z., Wang, Y., Zhou, J., et al., 2022. Sedimentary System of Permian Fengcheng Formation in Hashan Area in Northwestern Margin of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 43(04): 396-403(in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z. P., Liu, Z. Q., Zhao, L. Q., et al., 2023. Shale Oil Reservoir Characteristics and Controlling Factors of Permian Fengcheng Formation in Hashan Area, Northwestern Margin of Junggar Basin. *Lithologic Reservoirs*, 35(01): 25-35(in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. H., Sun, Z. L., Zhang, G. L., et al., 2023. Shale Dominant Lithofacies and Shale Oil Enrichment Model of Lower Permian Fengcheng Formation in Hashan Area, Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(04): 593-605(in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. H., Wang, Y., Yu, H. Z., et al., 2024. Difference Analysis of Geological Characteristics of Continental Shale Oil in Eastern and Western China and its Influence on Enrichment Law: A Case Study of Exploration Area of Shengli Oilfield. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 31(04): 42-59(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Z., Zhou, L. H., Pu, X. G., et al., 2022. Theories, Technologies and Practices of Lacustrine Shale Oil Exploration and Development: A Case Study of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(03): 616-626(in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Ma, F., Pan, S. Q., et al., 2023. Formation and Distribution Potential of Global Shale Oil and the Developments of Continental Shale Oil Theory and Technology in China. *Earth Science Frontiers*, 30(01): 128-142(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 曹正林, 周川闽, 龚德瑜, 等, 2024. 准噶尔盆地中一下二叠统构造-岩相古地理特征与烃源岩分布. *石油学报*, 45(09): 1349-1371.

- 曹志锋, 蔺敬旗, 王先虎, 等, 2024. 基于岩性分类的混积页岩油饱和度计算方法. 测井技术, 48(01): 35-45.
- 陈龙川, 张兆谦, 郑建东, 等, 2024. 核磁共振测井在古龙页岩油评价中的应用. 测井技术, 48(01): 110-116.
- 丁娱娇, 李俊国, 朱伟峰, 等, 2020. T1-T2 二维核磁共振页岩油储集层含油性检测方法. 录井工程, 31(S1): 48-53.
- 杜晓宇, 金之钧, 曾联波, 等, 2024. 准噶尔盆地东部双井子地区平地泉组陆相页岩天然裂缝发育模式. 地球科学, 49(09): 3264-3275.
- 何文渊, 2022. 松辽盆地古龙页岩油储层黏土中纳米孔和纳米缝的发现及其意义. 大庆石油地质与开发, 41(03): 1-13.
- 贾凡建, 王建伟, 郭瑞超, 等, 2025. 准噶尔盆地哈山地区风城组页岩含油性评价. 大庆石油地质与开发, 44(01): 25-34.
- 蒋弓箭, 刘惠民, 柴春艳, 等, 2023. 济阳拗陷页岩油测井评价. 油气地质与采收率, 30(01): 21-34.
- 李潮流, 闫伟林, 武宏亮, 等, 2022. 富黏土页岩储集层含油饱和度计算方法——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段为例. 石油勘探与开发, 49(06): 1168-1178.
- 李振明, 熊伟, 王斌, 等, 2023. 准噶尔盆地哈山地区二叠系风城组细粒沉积特征与演化模式. 石油实验地质, 45(04): 693-704.
- 刘国平, 金之钧, 曾联波, 等, 2024. 玛湖凹陷二叠系风城组深层陆相页岩储层天然裂缝及其有效性. 地球科学, 49(07): 2346-2358.
- 刘惠民, 文华国, 张奎华, 等, 2024. 准噶尔盆地西北缘哈山地区风城组碱湖页岩油地质特征与勘探展望. 古地理学报, 26(05): 1017-1036.
- 刘雅慧, 王才志, 刘忠华, 等, 2021. 一种评价页岩油含油性的测井方法——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷为例. 天然气地球科学, 32(07): 1084-1091.
- 毛锐, 申子明, 常秋生, 等, 2021. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系下乌尔禾组核磁共振测井含油性评价方法. 中国石油勘探, 26(04): 162-172.
- 庞小娇, 王贵文, 岳大力, 等, 2024. 细粒沉积岩测井评价研究进展. 石油与天然气地质, 45(04): 954-978.
- 秦德超, 汤济广, 胡美玲, 等, 2023. 渤海湾盆地南堡凹陷沙河街组一段泥页岩微观孔隙特征及其主控因素. 大庆石油地质与开发, 42(05): 47-56.
- 司学强, 庞志超, 郭华军, 等, 2024. 深层优质砂砾岩储层特征及主控因素: 以准噶尔盆地四棵树凹陷高泉构造带白垩系清水河组为例. 地球科学, 49(10): 3576-3588.
- 宋永, 唐勇, 何文军, 等, 2024. 准噶尔盆地油气勘探新领域、新类型及勘探潜力. 石油学报, 45(01): 52-68.
- 宋永, 杨智峰, 何文军, 等, 2022. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖型页岩油勘探进展. 中国石油勘探, 27(01): 60-72.
- 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等, 2023. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论. 石油学报, 44(01): 1-13.
- 王金铎, 张关龙, 庄新明, 等, 2024. 准噶尔盆地重点领域油气勘探研究进展及潜力方向. 油气地质与采收率, 31(04): 24-41.
- 王欣, 韩建强, 咎灵, 等, 2024. 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段页岩油测井评价研究. 油气藏评价与开发, 14(03): 364-372.
- 熊雄, 肖佃师, 雷祥辉, 等, 2023. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油录井响应及“甜点”快速评价技术. 特种油气藏, 30(04): 35-43.
- 闫伟林, 张兆谦, 陈龙川, 等, 2021. 基于核磁共振技术的古龙页岩含油饱和度评价新方法. 大庆石油地质与开发, 40(05): 78-86.
- 闫伟林, 章华兵, 郑建东, 等, 2022. 基于数字岩心的古龙页岩油储层含油饱和度建模方法及其应用. 大庆石油地质与开发, 41(03): 91-102.
- 于洪洲, 王越, 周健, 等, 2022. 准噶尔盆地西北缘哈山地区二叠系风城组沉积体系. 新疆石油地质, 43(04): 396-403.
- 曾治平, 柳忠泉, 赵乐强, 等, 2023. 准噶尔盆地西北缘哈山地区二叠系风城组页岩油储层特征及其控制因素. 岩性油气藏, 35(01): 25-35.
- 张奎华, 孙中良, 张关龙, 等, 2023. 准噶尔盆地哈山地区下二叠统风城组泥页岩优势岩相与页岩油富集模式. 石

油实验地质, 45(04): 593-605.

张奎华, 王越, 于洪洲, 等, 2024. 中国东西部陆相页岩油地质特征差异性分析及其对富集规律影响——以胜利探区为例. 油气地质与采收率, 31(04): 42-59.

赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等, 2022. 湖相页岩型页岩油勘探开发理论技术与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例. 石油勘探与开发, 49(03): 616-626.

邹才能, 马锋, 潘松圻, 等, 2023. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展. 地学前缘, 30(01): 128-142.