

致密砂岩储层复杂油水层成因分析与测井评价 ——以鄂尔多斯盆地宁县地区延长组 6 段为例

姚东华¹, 陈言², 许承武¹, 孙先达¹, 潘毅¹

(1. 东北石油大学 陆相页岩油气成藏及高效开发教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; 2. 苏州冠德能源科技有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要:致密砂岩储层非均质性强, 孔隙结构复杂, 微弱地质信号增加测井解释的多解性, 油水层识别难度大。以鄂尔多斯盆地宁县地区延长组 6 段砂岩储层为研究对象, 采用岩性、物性、孔隙结构、流体性质及其赋存状态实验, 分析研究区复杂油水层成因; 采用 BP 神经网络法建立储层物性、含油性测井解释模型, 采用交会图版法和随机森林法建立流体性质识别模型。结果表明: 黏土矿物附加导电、碳酸盐胶结物和炭质沥青堵塞孔隙、原油以束缚态和半束缚态形式存在, 是研究区延长组 6 段致密油储层油水关系复杂的主要因素; 采用 BP 神经网络法建立的储层物性、含油性测井解释模型, 可提高储层参数计算精度; 采用交会图版法可有效识别油层、油水同层和水层(包括含油水层); 采用随机森林法建立的流体性质识别模型, 可精确区分油层、一类油水同层(日产油 2 t 以上)、二类油水同层(日产油 2 t 以下)及水层(包括含油水层), 提高测井解释符合率。该结果为鄂尔多斯盆地宁县地区延长组 6 段储层的经济开发和有效动用提供支持。

关键词:致密砂岩; 复杂油水层; 孔隙结构; BP 神经网络; 随机森林; 延长组 6 段; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122; P624 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2025)02-0060-11

0 引言

中国油田的勘探目标逐渐由中、高孔渗储层向构造低洼、构造交接或构造边缘的低孔低渗储层转移^[1-2]。鄂尔多斯盆地西南缘宁县地区延长组 6 段广泛发育规模致密砂岩油藏, 试油、试采资料显示区块范围内的储层油水关系复杂, 低阻油层、高阻水层广泛发育, 油藏普遍含水, 油水同层产油量差异大, 界限层流体识别和油水同层分级评价难度大, 测井解释符合率仅为 74%。准确分析油水层成因、提高储层参数计算精度、建立流体性质识别方法是致密砂岩储层增储上产的关键。

近年来, 人们对复杂油水层成因进行研究, 孙建孟等^[3]、邹辰等^[4]将低阻油层成因总结为内因和外因两类; 赵阳等^[5]认为孔隙中残余的沥青质及绿泥石吸附残余油是导致水层电阻率偏高的主要原因; 吴健等^[6]、虞成等^[7]认为致密储层微观孔隙结构特征造成原油差异富集, 直接影响储层储集和渗滤油气的的能力。在分析复杂油水层成因的基础上, 通常采用重叠图版法或交会图版法定性识别油水层^[8-9], 或建立 Archie、等效岩石元素和有效介质对称导电等饱和度模型^[10-14]定量解释油水层。交会图版法通常在纯岩性条件下能较好地反映储层含油性与物性的变化规律, 各饱和度模型也需精确获取模型参数保证计算精度。为提高致密油藏流体性质识别符合率, 需要建立多个交会图版或新的饱和度模型, 解释效率低、工作量大。机器学习在石油工程等领域得到广泛应用, 史鹏宇等^[15]融合多个机器学习算法识别致密砂岩储层流体, 庞兰苏等^[16]采用卷积神经网络算法预测天然气井短期内的产气量, 张东等^[17]采用 BP 神经网络法预测水平井可采储量。BP 神经网络和随机森林法能够高效挖掘测井响应特征间的非线性关系, 广泛应用于测井解释, 基于 BP 神经网络法, 张晗等^[18]建立复杂岩性致密储层的 TOC 计算模型, 陈科贵等^[19]分类识别杂卤石, 蔺景龙等^[20]对储层的微观孔隙结构进行分类; 基于随机森林法, 赖强等^[21]划分火成岩岩性, 王民等^[22]、肖航等^[23]识别泥页岩岩相和煤体结构。

为分析鄂尔多斯盆地宁县地区延长组 6 段致密砂岩油水层成因, 以及解决流体性质对测井响应影响认识不清、储层参数计算精度和流体性质判准率低等问题, 采用岩性、物性、孔隙结构、流体性质及其赋存

收稿日期: 2024-08-13; 编辑: 陆雅玲

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172163)

作者简介: 姚东华(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事测井资料综合解释、人工智能算法测井应用及岩石物理实验等方面的研究。

状态实验,分析复杂油水层成因,分别采用BP神经网络法、常规图版法和随机森林法建立储层参数测井解释模型和流体性质识别模型,提高测井解释符合率,为研究区致密砂岩储层的经济开发和有效动用提供支持。

1 区域地质概况

甘肃省宁县地区位于鄂尔多斯盆地西南缘,区域构造为一平缓的西倾单斜,断层发育较少。目的层位于三叠系延长组6段,紧邻盆地主要烃源岩(延长组7段),重力流水道砂体受沉积相带控制,纵向叠置,横向复合连片,为良好的储集层。储层岩性以细砂岩为主,砂岩粒度较细,分选中等,磨圆度以次圆状和次棱角状为主,颗粒间接触关系以点一线、线一点接触方式为主,胶结类型主要为孔隙型。储层砂岩类型主要为细粒岩屑长石砂岩,碎屑颗粒平均占比为88%。储层黏土矿物质量分数在4.2%~27.1%之间,碳酸盐矿物质量分数在2.6%~14.8%之间。储层孔隙度在1.5%~15.0%之间,平均为9.6%,渗透率在 $(0.01 \sim 0.90) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于致密砂岩储层。

2 复杂油水层成因分析

2.1 岩性影响

根据XRD全岩分析资料,研究区延长组6段储层岩性较纯,黏土矿物和碳酸盐矿物质量分数较低。黏土矿物以伊/蒙混层为主,平均占比为49%。阳离子交换量多数大于6 mmol/100 g,表明黏土矿物附加导电性是油层电阻率下降的主要因素之一^[24]。薄片鉴定显示,碳酸盐矿物主要以碎屑颗粒及胶结物形式分布。一方面,较高的碳酸盐矿物质量分数增大储层电阻率,与黏土矿物对电阻率的影响相反,储层电阻率受岩性影响复杂;另一方面,碳酸盐胶结物堵塞孔隙,导致储层孔隙结构变差,孔隙度和渗透率下降。

2.2 孔隙结构影响

研究区延长组6段砂岩储层储集空间(见图1)以溶孔为主,孔径小,粒间溶孔分布相对集中,粒内溶孔连通性差。受非均质性影响,储层孔渗低且相关关系差,孔隙结构复杂,微观孔隙结构对储层的储集和渗流能力具有重要影响,不同孔隙结构岩石的导电路径不同,引起储层电阻率差异。

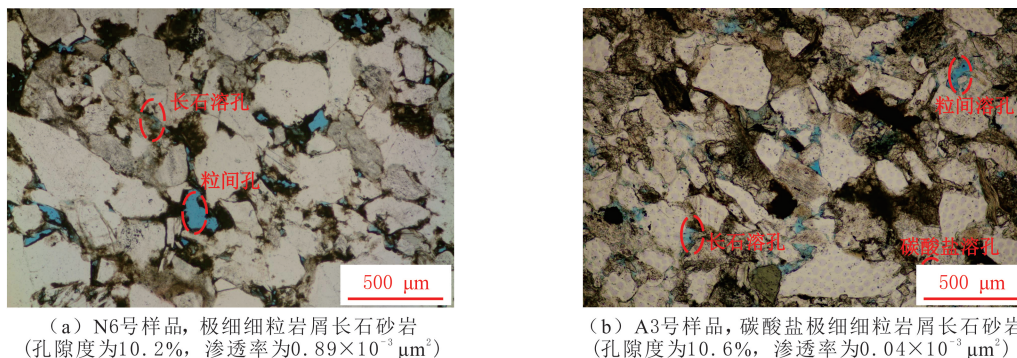


图1 研究区延长组6段致密砂岩铸体薄片

Fig. 1 The casting thin sections of tight sandstones in the 6th member of Yanchang Formation in the study area

高压压汞实验(见图2、表1)显示,研究区砂岩毛细管压力曲线形态差异较大,储层孔隙结构可分为三类:I类储层进汞毛细管压力曲线呈“下凹状”,排驱压力和中值压力低,储集性能好,对油的渗滤能力强,具有较高的生产能力;孔径分布范围大,以大孔喉为主,最大连通孔喉半径和平均孔喉半径大,连通性好。III类储层进汞毛细管压力曲线呈“斜直状”,排驱压力和中值压力高,储集性能差,生产能力低;只发育微小孔喉,最大连通孔喉半径和平均孔喉半径小,连通性差。II类储层进汞毛细管压力曲线形态为I类和III类储层曲线的过渡状态,储集性能、生产能力、孔径大小、连通性等介于I类和III类储层之间。

2.3 流体赋存状态及流体性质

较传统荧光显微镜技术,激光共聚焦技术在研究流体赋存状态方面具有荧光颜色反差大、以三维图像

呈现油水微观分布等优点^[25-27]。首先采用冷冻制模技术制片,将有机质和水保持在原始状态中;再由激光扫描共聚焦显微镜对薄片进行透色光和荧光断层扫描;最后由 3D 成像和建模技术实现图像的叠合和三维重建。N12 号样品 5 个视域下的激光扫描共聚焦图像见图 3。由图 3 可知,原油主要赋存在粒缘缝和颗粒溶蚀孔隙内,少量赋存在颗粒间夹角处或吸附在颗粒碎屑中;原油赋存的孔径范围在 100 μm 以内,主要集中在 15~20 μm 之间,喉道宽度集中分布在 7 μm 左右,类型为狭缝状、颗粒吸附状、角隅状和孔隙中心沉淀状。对 N12 号样品进行低场(0.5 T)高频(20 MHz)二维核磁共振测试,根据 T_1-T_2 二维弛豫谱分析,可有效区分岩石中不同相态、不同赋存空间的氢核^[28-30](见图 4)。由图 4 可知,原油主要以束缚态和游离态形式赋存在中、小孔隙中,水以游离态和束缚态形式分布在大、中、小孔隙中,样品中赋存一定量的沥青质。储层流体在粒间孔、粒内孔及微裂缝中的分布是测井难以识别油水层的主要原因,原油主要以束缚态和半束缚态分布,且炭质沥青阻碍孔隙间的连通是试油产水量高的根本原因。

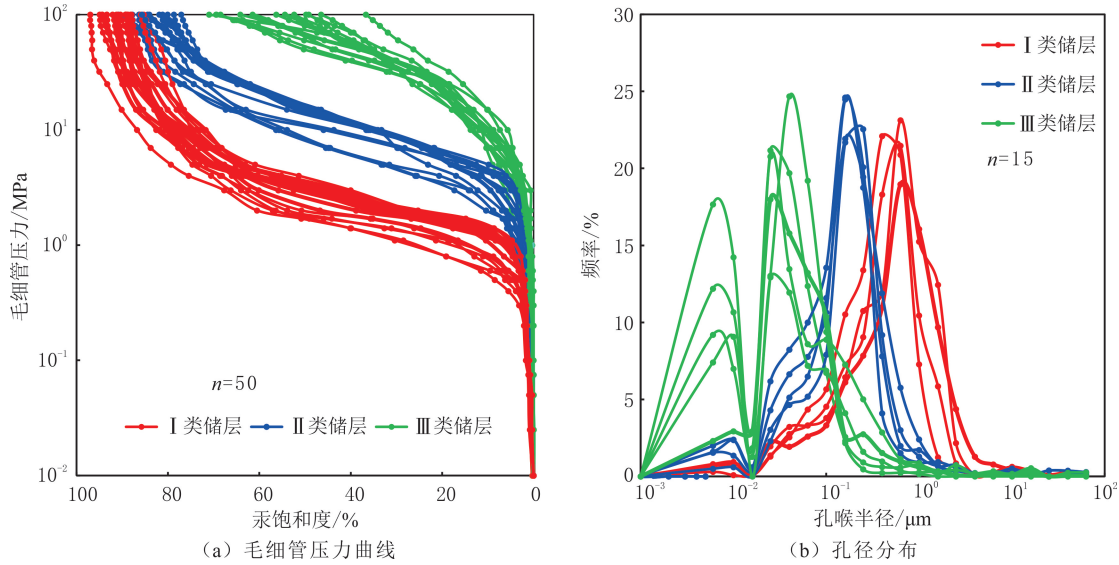


图 2 研究区延长组 6 段致密砂岩高压压汞实验结果

Fig. 2 The experimental results of high pressure mercury injection of tight sandstones in the 6th member of Yanchang Formation in the study area

表 1 鄂尔多斯盆地宁县地区延长组 6 段致密砂岩储层分类

Table 1 The comprehensive classification of tight sandstone reservoirs in the 6th member of Yanchang Formation in Ningxian Area, Ordos Basin

储层类别	RQI	气测		高压压汞			
		孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	排驱压力/ MPa	中值压力/ MPa	平均孔喉半径/ μm	最大连通孔喉半径/ μm
I	≥ 0.005	8.62~15.00 12.03	0.17~0.24 0.20	0.24~1.59 1.13	0.82~4.50 3.25	0.37~1.59 0.58	0.32~1.02 0.64
II	0.003 ~0.005	8.77~14.16 10.78	0.11~0.20 0.16	2.00~4.37 2.90	4.51~18.87 9.68	0.12~0.53 0.28	0.11~0.37 0.29
III	≥ 0.003	1.51~10.39 6.89	0.03~0.11 0.09	5.50~21.71 13.33	30.8~83.01 62.59	0.03~0.29 0.15	0.05~0.22 0.09

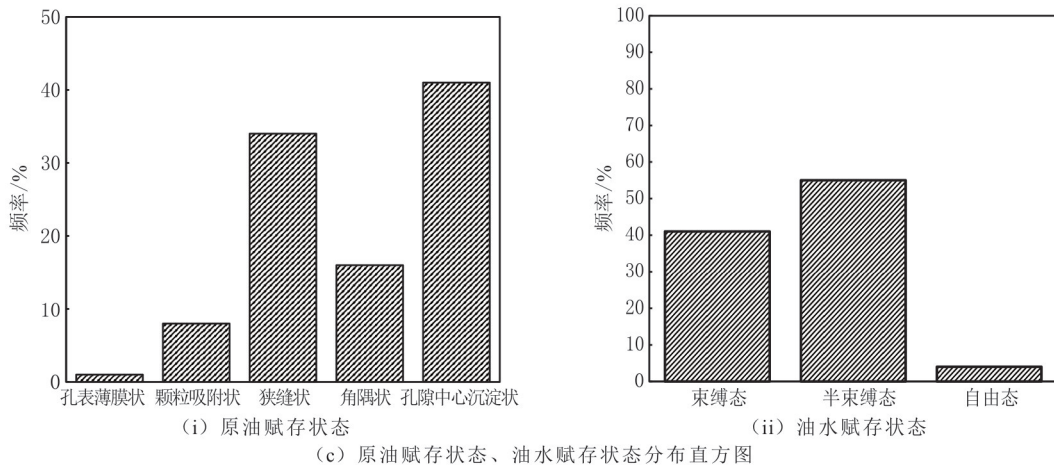
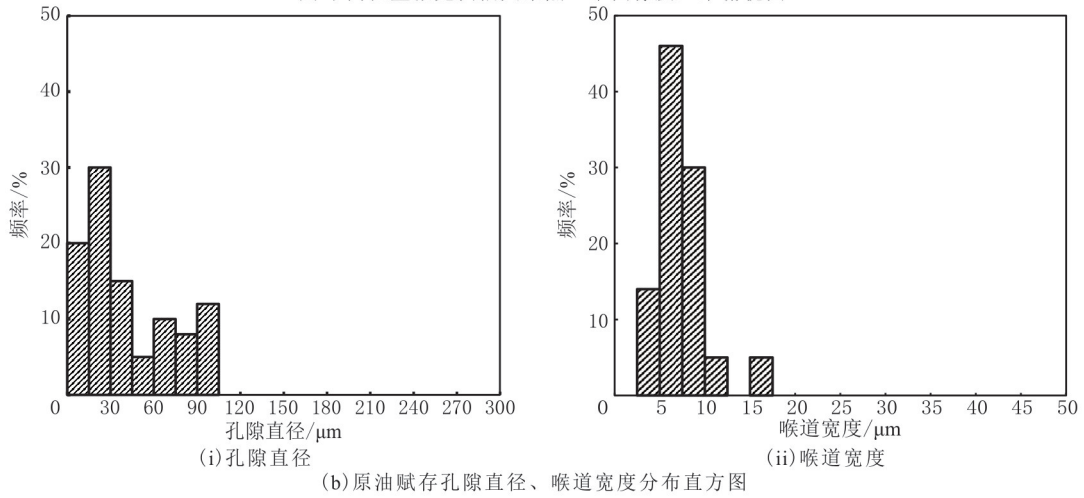
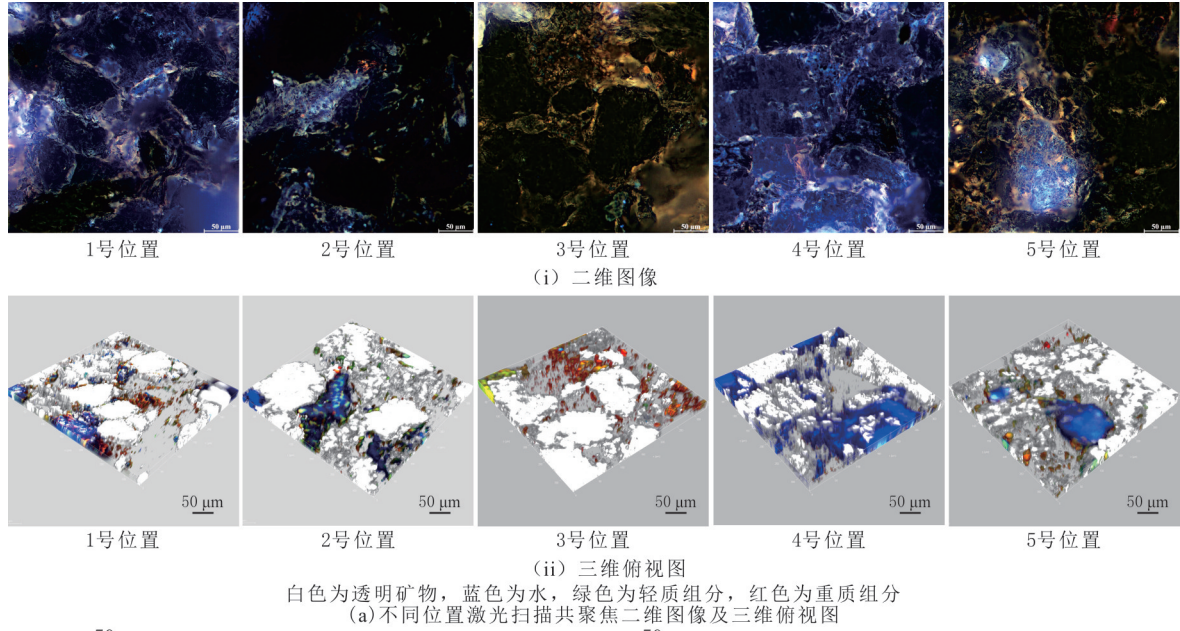
注: RQI 为储层品质因子, $RQI = \sqrt{\frac{K}{\phi}}$, K 为渗透率, ϕ 为有效孔隙度; 最小~最大/平均。

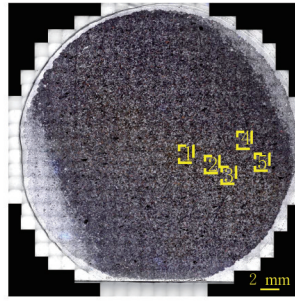
3 储层参数测井解释及流体性质识别模型

在明确致密砂岩油藏复杂流体性质成因后,针对主控因素开展测井评价。一方面,可以采用传统方法,在测井曲线岩性校正的基础上,分类建立储层参数测井解释模型,由图版法识别油水层;另一方面,可以采用人工智能方法,充分挖掘敏感测井曲线的隐含信息,建立储层参数和流体性质识别模型。

3.1 储层参数测井解释模型

研究区致密砂岩储层普遍含泥、含钙,在求取储层孔渗参数和构建饱和度模型前,建立泥质、钙质计算模型,对测井曲线进行岩性校正^[8]。考虑储层宏观和微观特征,先采用 SPSS 快速聚类法,根据岩性校正后的测井曲线将储层划分为三类(见表 1);后采用多元回归法建立孔隙度和渗透率测井解释模型。研究





(d)全貌及扫描定位透色光图

图 3 N12 号样品激光扫描共聚焦图像结果

Fig. 3 Laser scanning confocal image and result analysis of sample N12

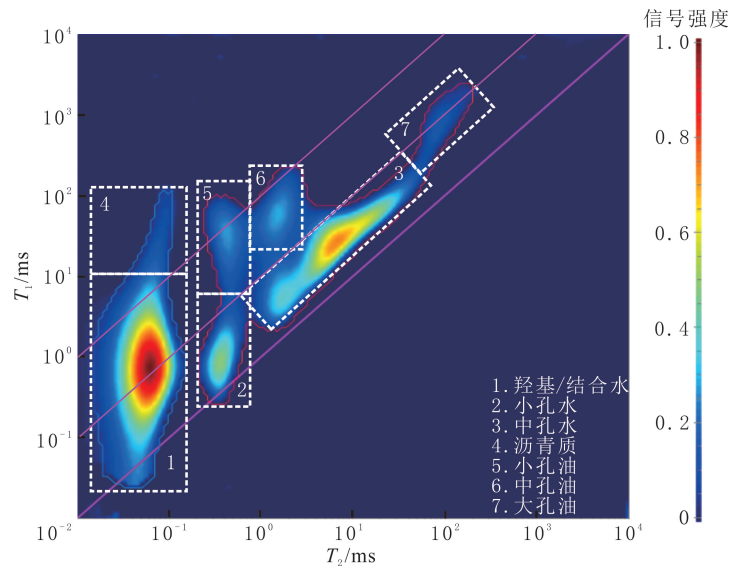


图 4 N12 号样品二维(T_1-T_2)核磁共振谱

Fig. 4 Two-dimensional(T_1-T_2) nuclear magnetic resonance spectra of sample N12

区储层导电规律受泥质、钙质及孔隙结构三种因素影响,非阿尔奇关系明显,建立适合研究区储层特征的导电模型,根据有效介质对称导电理论考虑泥质、钙质的导电性,根据等效岩石元素理论考虑孔隙结构,在孔隙结构分类基础上,利用最优化技术和岩电实验确定模型参数^[14]。

研究区核磁测井资料较少,根据常规测井资料进行储层分类精确度不高,岩性校正和储层参数计算模型存在误差,与岩心分析相比,导致分类多元回归法计算的孔隙度、渗透率较直接多元回归法仅提高 11.31%和 14.90%,致密砂岩模型计算的含水饱和度较阿尔奇模型仅提高 4.74%,不能满足精细测井解释评价需求(见表 2)。

BP 神经网络是一种基于梯度下降法的多层前向反馈神经网络,增加隐层节点数获得较低误差的训练效果比增加隐层数更容易实现,优先考虑 3 层网络。通常隐层节点数与输入层节点数、输出层节点数有关,为减少训练时间,避免出现“过拟合”现象,保证足够高的网络性能,先确定隐层节点数的大致区间,再采用 5 折交叉验证法获得最优隐层节点数^[31]。

以孔隙度为例,样本质量对神经网络模型的泛化能力影响很大。先分析经标准化处理和剔除非地质因素影响井段的测井曲线与输出层变量(120 个岩心)的相关关系,确定输入层变量(岩性密度、补偿中子、声波时差和自然伽马);后采用 5 折交叉验证法考虑模型的学习和泛化能力,确定最优隐层节点数为 7(见图 5)。由表 2 可知,采用 BP 神经网络法计算的孔隙度、渗透率及含水饱和度等储层参数,与岩心分析结果的相对误差分别为 7.83%、19.85%和 9.95%,较分类多元回归模型计算的结果分别提高 7.63%、

8.62%和 9.00%,有效减少由测井曲线岩性校正、储层分类和岩电模型等带来的累积误差,满足储层参数测井精细解释评价需求,为储层流体性质识别和储量计算提供基础。

表 2 不同模型预测储层参数与岩心分析结果误差

Table 2 The error comparison of reservoir parameters predicted by different models and core analysis results

方法	孔隙度			渗透率			含水饱和度		
	样品数/ 个	绝对 误差/ %	相对 误差/ %	样品数/ 个	绝对 误差/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	相对 误差/ %	样品数/ 个	绝对 误差/ %	相对 误差/ %
直接多元回归法	120	1.73	26.77	120	—	43.37	—	—	—
分类多元回归法	120	1.24	15.46	120	—	28.47	—	—	—
阿尔奇模型	—	—	—	—	—	—	39	10.43	23.69
致密砂岩模型	—	—	—	—	—	—	39	8.60	18.95
BP 神经网络法	120	0.82	7.83	120	—	19.85	39	4.92	9.95

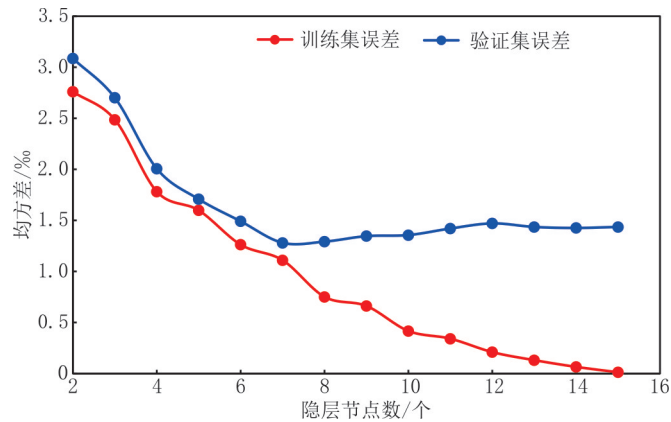


图 5 孔隙度隐层节点数与模型误差关系

Fig. 5 The relationship between the number of hidden layer nodes of porosity and the model error

3.2 流体性质识别模型

通常采用交会图版法判别储层流体性质。根据油水层成因分析,结合试油和试采资料,选取由 BP 神经网络法计算的孔隙度和含油饱和度建立交会图版(见图 6)。采用交会图版法可较好识别油层、油水同层和水层(包括含油水层),整体判准率为 84.3%,其中油层判准率为 89.1%,油水同层判准率为 82.6%,水层判准率为 88.2%。

研究区延长组 6 段试油井多为油水同产,产油量差异较大,需要细分油水同层。根据勘探开发生产现状,将日产油 2 t 以上的油水同层定义为一类油水同层,日产油 2 t 以下的定义为二类油水同层。致密砂岩含油性受多种因素影响,仅采用交会图版法很难实现流体性质的精细识别。此外,研究区油水同层相对油层和水层(包括含油水层)占比高,数据不平衡,采用随机森林法建立流体性质精细识别模型。

随机森林法是一种集成学习算法,采用随机有放回抽取样本集和随机无放回选取特征子集,不做特征选择,相比 BP 神经网络、K 邻近等机器学习算法,在处理维度高、数据集不平衡样本方面具有不易过拟合、预测精度和容错率高、鲁棒性和泛化性强等优点^[32]。为降低模型复杂性,提升算法效率,首先将所有常规测井曲线作为特征变量,以试油、试采结果(油层、一类油水同层、二类油水同层、水层(包括含油水层))作为标签,将 235 个试油层段按照 7:3 随机划分为训练集和测试集,由基尼指数评估特征变量重要性(见图 7),筛选重要性大于 0.08 的自然电位 SP、阵列感应电阻率 AT10、AT30、AT60、AT90 和岩性密度 DEN 6 个变量作为最终输入特征。

随机森林模型的准确性和泛化性受超参数取值影响较大,在多超参数中,决策树个数决定整个分类预测结果的准确性和稳定性,决策树最大深度和最小分离样本数决定决策树的主要性能。为降低模型复杂程度,在满足精度的前提下获得最佳性能,首先对决策树个数、决策树最大深度和最小分离样本数 3 个超参数的范围进行划定;然后采用网格搜索和 5 折交叉验证选出 3 个超参数的最优值(决策树个数为 8、决策树最大深度为 14、最小分离样本数为 9),其中评价标准选择 F1 分数,是精确度和召回率的调和平均数,捕捉少数类的同时兼顾多数类的准确率(见图 8)。使用最优超参数对测试集进行预测,整体判准率为 93.6%,其中油层判准率为 91.3%,一类油水同层判准率为 99.0%,二类油水同层判准率为 89.0%,水层(包括含油水层)判准率为 88.2%,流体性质判准率高于交会图版法的,且可精细划分油水层。

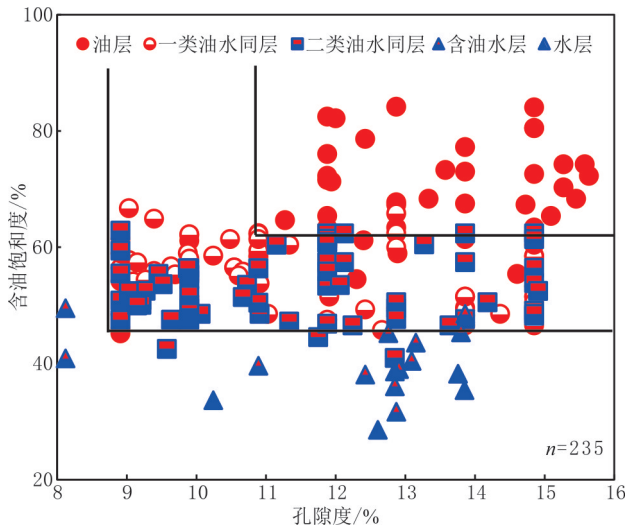


图 6 孔隙度—含油饱和度交会图版

Fig. 6 Intersection chart of porosity and oil saturation

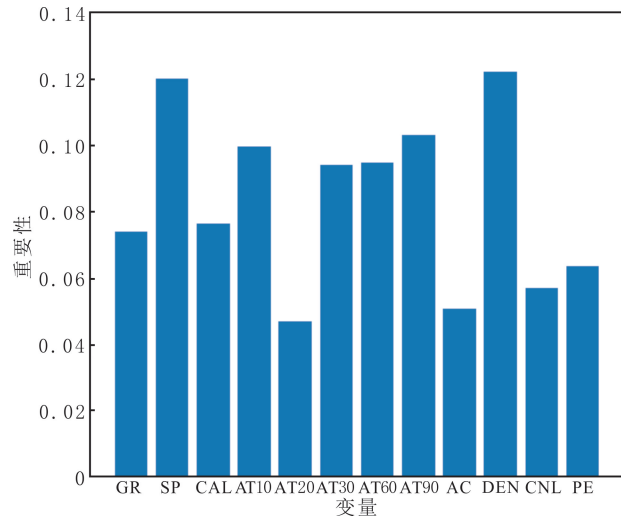
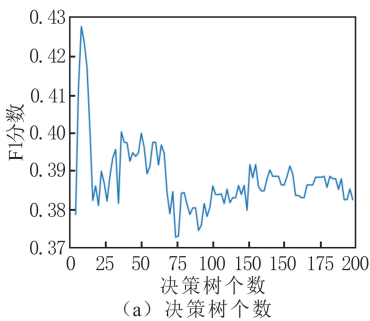
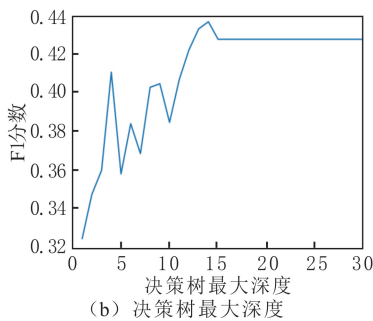


图 7 特征变量重要性分析

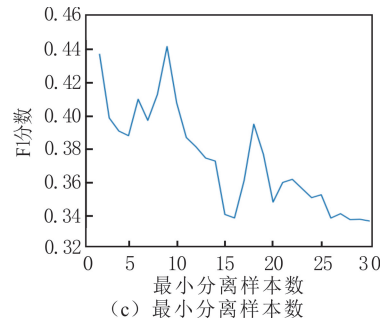
Fig. 7 Importance analysis of characteristic variables



(a) 决策树个数



(b) 决策树最大深度



(c) 最小分离样本数

图 8 网格搜索、5 折交叉验证超参数最优值

Fig. 8 Grid search and 5-fold cross-validation confirm the optimal value of hyperparameters

4 应用分析

采用建立的储层参数解释模型和流体性质识别模型,评价研究区延长组 6 段新近试油井。37 个试油层段流体性质判准率为 97.3%,其中油层判准率为 100%,一类油水同层判准率为 100%,二类油水同层判准率为 90%,水层(包括含油水层)判准率为 100%。以 A 井为例,测井曲线显示试油段深度为 1 617.7~1 623.9 m,中部含泥,上部和下部岩性较纯、物性好,对应物性好处的电阻率高,将 81 和 83 号层解释为纯油层,82 号层解释为干层(见图 9)。实际试油日产油 2.5 t,日产水 6.5 t,测井解释结论与试油结果不符。采用建立的 BP 神经网络储层参数解释模型对储层参数进行计算,孔隙度、渗透率与岩心分析结果吻合较好。采用建立的随机森林流体性质识别储层参数解释模型判断的 81 和 83 号层为一类油水同层,与试油结果一致,验证模型的有效性和泛化性。

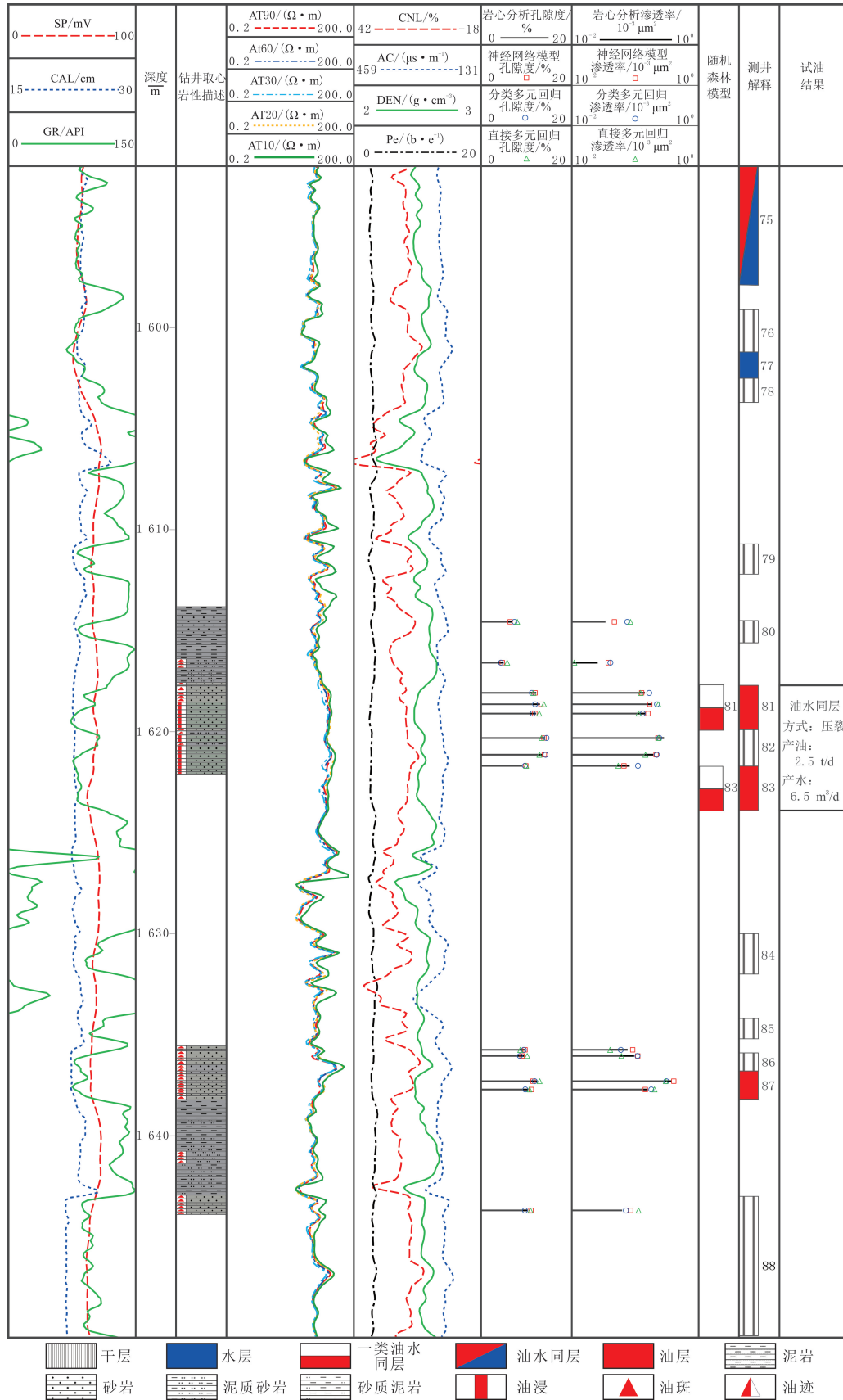


图 9 A 井测井解释结果
Fig. 9 Log interpretation results of well A

5 结论

(1)受黏土矿物附加导电、碳酸盐胶结物和炭质沥青堵塞孔隙、原油以束缚态和半束缚态形式存在等因素影响,鄂尔多斯盆地宁县地区延长组6段致密砂岩储层表现为低阻油层、高阻水层及油水同产但产油量差异大。碳酸盐胶结物和炭质沥青堵塞孔隙导致岩石微观孔隙结构复杂是主要原因。

(2)建立的储层参数解释模型和流体性质识别模型,可提高储层参数计算精度和流体性质判准率,精细划分油水层,为研究区储量计算和有效动用提供支持。

参考文献(References):

- [1] 张磊,乔向阳,张亮,等.鄂尔多斯盆地旬邑探区延长组储层特征和开发效果[J].石油学报,2020,41(1):85-95.
ZHANG Lei, QIAO Xiangyang, ZHANG Liang, et al. Reservoir characteristics and development performance of Yanchang Formation in Xunyi Exploration Area, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020,41(1):85-95.
- [2] 解馨慧,邓虎成,胡蓝霄,等.沉积环境对细粒沉积岩微观结构的影响:以鄂尔多斯盆地延长组7段页岩为例[J].东北石油大学学报,2024,48(1):1-12.
XIE Xinhui, DENG Hucheng, HU Lanxiao, et al. Effects of sedimentary environment on microstructures of fine-grained rocks: a case study of the Yanchang Formation 7 Member shale in the Ordos Basin as an example[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(1):1-12.
- [3] 孙建孟,陈钢花,杨玉征,等.低阻油气层评价方法[J].石油学报,1998,19(3):83-88.
SUN Jianmeng, CHEN Ganghua, YANG Yuzheng, et al. Low contrast resistivity reservoir evaluation method[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998,19(3):83-88.
- [4] 邹辰,吴永辉,章超,等.渝西地区龙马溪组页岩低阻主控因素及有利区预测[J].东北石油大学学报,2023,47(2):81-90.
ZOU Chen, WU Yonghui, ZHANG Chao, et al. Main controlling factors of the low resistivity Longmaxi Formation shale and prediction of favorable area in Yuxi Area[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023,47(2):81-90.
- [5] 赵阳,段毅.华庆地区长8段油层组高阻水层成因分析[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):118-122.
ZHAO Yang, DUAN Yi. Analysis on water layers with high resistivity of Chang 8 Oil Formation in Huaqing Area[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020,10(1):118-122.
- [6] 吴健,张恒荣,胡向阳,等.北部湾盆地复杂孔隙结构含砾砂岩低阻油层综合评价方法[J].特种油气藏,2023,30(5):67-76.
WU Jian, ZHANG Hengrong, HU Xiangyang, et al. Comprehensive evaluation method of low-resistivity reservoirs in gravelly sandstone with complex pore structure in Beibuwan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023,30(5):67-76.
- [7] 虞成,张超漠,张占松,等.海陆过渡相页岩低阻成因分析及饱和度计算:以川东南A地区龙潭组为例[J].东北石油大学学报,2022,46(5):55-67.
YU Cheng, ZHANG Chaomo, ZHANG Zhansong, et al. Analysis of low-resistivity genesis and saturation calculation of marine-continental transitional shale: a case study of the Longtan Formation in a area from southeast of Sichuan Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(5):55-67.
- [8] 李雪英,万乔升,王福霖,等.低饱和度油藏油层解释方法:以新肇油田古628区块葡萄花油层为例[J].地球物理学进展,2021,36(3):1088-1094.
LI Xueying, WAN Qiaosheng, WANG Fulin, et al. Interpretation method of oil-water layer in low oil-saturation reservoirs: a case study in Putaohua reservoirs in Gu 628 Block of Xinzhao Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2021,36(3):1088-1094.
- [9] 薛凤玲,李中冉,王亚茹,等.测井储层流体识别方法及其在低渗透油藏描述中的应用[J].大庆石油学院学报,2004,28(6):92-94.
XUE Fengling, LI Zhongran, WANG Yaru, et al. Log reservoir fluid identification method and its application to low permeability reservoir description[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2004,28(6):92-94.
- [10] 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.
- [11] SIMANDOUX P. Dielectric measurements on porous media, application to the measurements of water saturation: study of behavior of argillaceous formations[J]. Revue de L'institut Francais du Petrole, 1963,18(Supp.):193-215.
- [12] SHANG B Z, HAMMAN J G, CALDWELL D H. Improved water saturation estimation using equivalent rock element model and application to different rock types[C]//SPE Europec featured at EAGE Conference and Exhibition. SPE, 2008:SPE-113342-MS.
- [13] 张丽华,潘保芝,李舟波,等.新三水导电模型及其在低孔低渗储层评价中的应用[J].石油地球物理勘探,2010,45(3):431-435.
ZHANG Lihua, PAN Baozhi, LI Zhoubo, et al. New three-water conduction model and its application in evaluation of low porosity and low permeability reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010,45(3):431-435.

- [14] 唐晓敏,宋延杰,付健,等.含泥含钙致密砂岩导电规律与导电模型[J].地球物理学进展,2016,31(4):1660-1669.
TANG Xiaomin, SONG Yanjie, FU Jian, et al. Conductance mechanism and conduction model for tight shale-rich and calcite-rich sands[J]. Progress in Geophysics, 2016,31(4):1660-1669.
- [15] 史鹏宇,徐思慧,冯加明,等.基于改进 Stacking 算法的致密砂岩储层测井流体识别[J].地球物理学进展,2024,39(1):280-290.
SHI Pengyu, XU Sihui, FENG Jiaming, et al. Log identification of fluid types in tight sandstone reservoirs using an improved Stacking algorithm[J]. Progress in Geophysics, 2024,39(1):280-290.
- [16] 庞兰苏,王杨,蒋薇,等.基于机器学习的短生产周期碳酸盐岩气井产量预测研究[J].特种油气藏,2023,30(2):134-141.
PANG Lansu, WANG Yang, JIANG Wei, et al. Research on yield prediction of carbonatite gas well with a short production cycle based on machine learning[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023,30(2):134-141.
- [17] 张东,孙恩慧,杨东东,等.基于数据挖掘的底部水油藏开发预测新方法[J].石油化工高等学校学报,2021,34(3):84-89.
ZHANG Dong, SUN Enhui, YANG Dongdong, et al. A new method of bottom-water reservoir development prediction based on data mining[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2021,34(3):84-89.
- [18] 张哈,卢双舫,李文浩,等. ΔLogR 技术与 BP 神经网络在复杂岩性致密层有机质评价中的应用[J].地球物理学进展,2017,32(3):1308-1313.
ZHANG Han, LU Shuangfang, LI Wenhao, et al. Application of ΔLogR technology and BP neural network in organic evaluation in the complex lithology tight stratum[J]. Progress in Geophysics, 2017,32(3):1308-1313.
- [19] 陈科贵,刘利,陈愿愿,等. BP 神经网络在钻井测井资料分类识别杂卤石中的研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(4):66-72.
CHEN Kegui, LIU Li, CHEN Yuanyuan, et al. Research on classification and discrimination of polyhalite with drilling and logging data by BP neural network[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016,40(4):66-72.
- [20] 蔺景龙,聂晶,李鹏举,等.基于 BP 神经网络的储层微孔隙结构类型预测[J].测井技术,2009,33(4):355-359.
LIN Jinglong, NIE Jing, LI Pengju, et al. Micropore structure type identification based on BP neural network[J]. Well Logging Technology, 2009,33(4):355-359.
- [21] 赖强,魏伯阳,吴煜宇,等.基于随机森林的 K-近邻算法划分火成岩岩性[J].特种油气藏,2021,28(6):62-69.
LAI Qiang, WEI Boyang, WU Yuyu, et al. Classification of igneous rock lithology with K-nearest neighbor algorithm based on Random Forest[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021,28(6):62-69.
- [22] 王民,杨金路,王鑫,等.基于随机森林算法的泥页岩岩相测井识别[J].地球科学,2023,48(1):130-142.
WANG Min, YANG Jinlu, WANG Xin, et al. Identification of shale lithofacies by well logs based on Random Forest algorithm[J]. Earth Science, 2023,48(1):130-142.
- [23] 肖航,张占松,郭建宏,等.基于随机森林结合地球物理测井资料的煤体结构识别方法及应用[J].科学技术与工程,2021,21(24):10174-10180.
XIAO Hang, ZHANG Zhansong, GUO Jianhong, et al. Coal structure identification method based on Random Forest combined with geophysical logging data and its application[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(24):10174-10180.
- [24] 孙佩.志丹油田长 6 油层组低孔低渗储层测井评价[D].西安:西北大学,2011:60-61.
SUN Pei. Low porosity and low permeability reservoirs logging evaluation of Chang 6 Oil-bearing Formation in Zhidan Oilfield[D]. Xi'an: Northwest University, 2011:60-61.
- [25] SUN X D, ZHAO M Q, FAN X Q, et al. Study on micro production mechanism of corner residual oil after polymer flooding[J]. Polymers, 2022,14(5):878-883.
- [26] 孙先达,李宜强,戴琦雯.激光扫描共聚焦显微镜在微孔隙研究中的应用[J].电子显微学报,2014,33(2):123-128.
SUN Xianda, LI Yiqiang, DAI Qiwen. Laser scanning confocal microscope in micropores study[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2014,33(2):123-128.
- [27] 刘春,张荣虎,张惠良,等.致密砂岩储层微孔隙成因类型及地质意义:以库车前陆冲断带超深层储层为例[J].石油学报,2017,38(2):150-159.
LIU Chun, ZHANG Ronghu, ZHANG Huiliang, et al. Genetic types and geological significance of micro pores in tight sandstone reservoirs: a case study of the ultra-deep reservoir in the Kuqa foreland thrust belt, NW China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017,38(2):150-159.
- [28] 王民,李明,李进步,等.页岩含油率多种测试方法对比[J].石油学报,2022,43(12):1758-1769.
WANG Min, LI Ming, LI Jinbu, et al. Comparative analysis of test methods for shale oil content[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022,43(12):1758-1769.
- [29] LI Jinbu, HUANG Wenbiao, LU Shuangfang, et al. Nuclear magnetic resonance T_1 - T_2 map division method for hydrogen-bearing components in continental shale[J]. Energy Fuels, 2018,32(9):9043-9054.

- [30] SEYEDALIREZA K, OSTADHASSAN M, HARRY X Z, et al. NMR relaxometry a new approach to detect geochemical properties of organic matter in tight shales[J]. *Fuel*, 2019,235(1):167-177.
- [31] 夏克文,李昌彪,沈钧毅. 前向神经网络隐含层节点数的一种优化算法[J]. *计算机科学*, 2005,32(10):143-145.
XIA Kewen, LI Changbiao, SHEN Junyi. An optimization algorithm on the number of hidden layer nodes in feed-forward neural network[J]. *Computer Science*, 2005,32(10):143-145.
- [32] 张少龙,闫建平,郭伟,等. 基于岩石物理相的深层页岩气地质—工程甜点参数测井评价方法:以四川盆地 LZ 区块五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2023,58(1):214-227.
ZHANG Shaolong, YAN Jianping, GUO Wei, et al. Logging evaluation method of geological-engineering sweet spot parameters for deep shale gas based on petrophysical facies: a case study of the Wufeng-Longmaxi Formation in LZ Block of Sichuan Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2023,58(1):214-227.

.....

(上接第 45 页)

- [60] 李春光,王水林,郑宏,等. 多孔介质孔隙率与体积模量的关系[J]. *岩土力学*, 2007,28(2):293-296.
LI Chunguang, WANG Shuilin, ZHENG Hong, et al. Relationship between bulk modulus and porosity of porous medium[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007,28(2):293-296.
- [61] LUO J, STEVENS R. Porosity-dependence of elastic moduli and hardness of 3Y-TZP ceramics[J]. *Ceramics International*, 1999,25(3):281-286.
- [62] TAO M, YECHAO Y, JIE C, et al. Investigation on the permeability evolution of gypsum interlayer under high temperature and tri-axial pressure[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017,50(8):2059-2069.

.....

(上接第 59 页)

- [29] 朱必清,陈世加,白艳军,等. 鄂尔多斯盆地甘泉地区延长组长 8 段原油地球化学特征及来源[J]. *现代地质*, 2022,36(2):742-754.
ZHU Biqing, CHEN Shijia, BAI Yanjun, et al. Geochemical characteristics and source of crude oil in Chang 8 Member of Yanchang Formation, Ganquan Area, Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 2022,36(2):742-754.
- [30] PETERS K E, MOLDOWAN J M. *The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments*[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993:352.
- [31] 周勇水,彭君,李红磊,等. 成熟度对甾萜类化合物组成特征的影响:以银额盆地查干凹陷为例[J]. *东北石油大学学报*, 2020,44(6):103-113.
ZHOU Yongshui, PENG Jun, LI Honglei, et al. Effects of maturity on the compositional characteristics of steranes and terpanes: a case study of Chagan Sag in Yingen-Ejinaqi Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020,44(6):103-113.
- [32] HUANG Difan, LI Jinchao, ZHANG Dajiang. Maturation sequence of continental crude oils in hydrocarbon basins in China and its significance[J]. *Organic Geochemistry*, 1990,16(1/2/3):521-529.
- [33] 孙雷,莫少武,宗文明,等. 大兴安岭北部拉布达林盆地中生代烃源岩生物标志物特征及其意义[J]. *东北石油大学学报*, 2019,43(6):73-82.
SUN Lei, MO Shaowu, ZONG Wenming, et al. Characteristics and implications of biomarker compounds of the Mesozoic source rock in Labudalin Basin, Northern Daxing'anling Mountains[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2019,43(6):73-82.
- [34] 郭瑞超,王千军,王建伟,等. 准噶尔盆地西北缘阿拉德油田油源对比与成藏模式[J]. *东北石油大学学报*, 2021,45(3):54-61.
GUO Ruichao, WANG Qianjun, WANG Jianwei, et al. Oil-source correlation and stages of reservoir formation Alade Oilfield in northwestern of Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021,45(3):54-61.
- [35] 余寒雷,何光洪,任江波,等. 鄂南镇泾地区延长组原油轻烃组成及地球化学特征[J]. *非常规油气*, 2018,5(1):43-47.
YU Hanlei, HE Guanghong, REN Jiangbo, et al. Composition and geochemical behavior of light hydrocarbons of crude oil from Yanchang Formation in Zhenjing Area, Southern Ordos Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2018,5(1):43-47.