

引用本文:刘军,钟洁,倪振,等.基于机器学习的低含油饱和度砂岩储层参数预测——以准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区下克拉玛依组为例[J].石油实验地质,2024,46(5):1123-1134.DOI:10.11781/sydz2024051123.

LIU Jun, ZHONG Jie, NI Zhen, et al. Machine learning-based prediction of low oil saturation sandstone reservoir parameters: a case study of Lower Karamay Formation in Xia 77 well block of Xiazijie Oilfield, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 1123-1134. DOI: 10.11781/sydz2024051123.

基于机器学习的低含油饱和度砂岩储层参数预测

——以准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区下克拉玛依组为例

刘军¹, 钟洁¹, 倪振², 王庆国¹, 冯仁蔚³, 贾将³, 梁岳立³

1. 中国石油新疆油田公司 风城油田作业区, 新疆 克拉玛依 834000;

2. 中国石油新疆油田公司 开发事业部, 新疆 克拉玛依 834000;

3. 西南石油大学, 成都 610500

摘要:准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区块下克拉玛依组(简称克下组)特低孔特低渗油藏油水关系复杂、产量低、储层含水高,且具有低含油饱和度、孔渗相关性差、储层参数与测井响应关系不清晰、油层识别困难等特征,常规储层参数评价及预测方法适用性差。通过对岩性、物性、含油性分析,明确了克下组储层岩性为砂砾岩、砂质砾岩,黏土矿物以伊蒙混层为主;储层为以原生粒间孔和残余粒间孔为主要储集空间的低孔隙度、特低渗透率储集层。通过建立含油饱和度解释模型,确定了本区油藏属于低饱和度油藏,含油饱和度一般为 36%~55%。砂砾岩储层物性和含油性优于中细砂岩,储层物性控制含油性,呈现低饱和度特征,电性受含油性和岩性双重影响。通过低含油饱和度油藏形成机理研究,认为储层微观孔隙结构是形成低含油饱和度的主要原因。通过对敏感参数优选,基于自然伽马、电阻率和声波时差测井等资料,引入基于机器学习的 BP 神经网络技术,对夏子街油田夏 77 井区块克下组油藏进行了孔隙度、渗透率和含水饱和度的计算及预测,储层参数预测精度均高于 80%,相关结论及方法可为低含油饱和度致密砂岩储层的物性参数预测提供依据和参考。

关键词:低含油饱和度;砂岩储层;测井解释;机器学习;下克拉玛依组;三叠系;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

DOI:10.11781/sydz2024051123

Machine learning-based prediction of low oil saturation sandstone reservoir parameters: a case study of Lower Karamay Formation in Xia 77 well block of Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

LIU Jun¹, ZHONG Jie¹, NI Zhen², WANG Qingguo¹, FENG Renwei³, JIA Jiang³, LIANG Yueli³

1. Fengcheng Oilfield Operation Area of PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. Development Business Department of PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China;

3. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract: The Lower Karamay Formation in the Xia 77 well block of the Xiazijie Oilfield in the Junggar Basin features a complex oil and water relationship in its ultra-low porosity and ultra-low permeability reservoirs. These reservoirs are characterized by low production, high water content, low oil saturation, poor correlation between porosity and permeability, unclear relationship between reservoir parameters and logging responses and difficult identification of oil and water layers. Conventional methods for evaluating and predicting reservoir parameters are poorly suited for this block. Through the analysis of lithology, physical properties and oil-bearing characteristics, it was determined that the reservoir lithology of the Lower Karamay Formation is dominated by glutenite and gravelly

收稿日期(Received):2024-02-18;修订日期(Revised):2024-08-17;出版日期(Published):2024-09-28.

作者简介:刘军(1986—),男,硕士,工程师,从事油气藏地质及油田开发研究。E-mail:feij3@petrochina.com.cn.

通信作者:冯仁蔚(1982—),男,博士,工程师,从事油气地质研究。E-mail:70873990@qq.com.

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2019E-2602)资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

sandstones, with mixed-layers of illite and smectite as the dominant clay mineral. The reservoirs are characterized by low porosity and ultra-low permeability with primary intergranular and residual intergranular pores as the main storage space. By establishing an oil saturation interpretation model, it was confirmed that the reservoirs in this area are low oil saturation reservoirs, with oil saturation generally ranging between 36%–55%. The physical properties and oil content of glutenite reservoirs are superior to those of medium to fine sandstones, with reservoir physical properties controlling oil content and exhibiting low saturation characteristics. Electrical properties are influenced by both oil content and lithology. Through studying the formation mechanism of low oil saturation oil reservoirs, it was found that the microscopic pore structure of the reservoirs is the main cause of low oil saturation. By selecting sensitive parameters and utilizing data from natural gamma, resistivity, and acoustic time difference logging, BP neural network technology based on machine learning was introduced to calculate and predict porosity, permeability, and water saturation for the Lower Karamay Formation in Xia 77 well block. The prediction accuracy of reservoir parameters exceeded 80%. The conclusions and methods derived from this study can provide a basis and reference for the prediction of physical parameters in low oil saturation tight sandstone reservoirs.

Key words: low oil saturation; sandstone reservoir; logging interpretation; machine learning; Lower Karamay Formation; Triassic; Junggar Basin

低饱和度砂岩油藏在我国陆相盆地,例如准噶尔^[1-3]、吐哈^[4]和松辽^[5]等盆地普遍存在,前人针对低饱和度油气层的储层特征与识别^[6-8]、测井解释技术^[9-10]、低饱和度机理^[4-5,11]及产能预测^[12]等方面取得了丰富的研究成果。低饱和度油气藏的测井响应特征复杂,开展细致的储层四性关系分析是低饱和度油气藏成因分析、测井识别和储层参数定量评价的重要基础^[13-15]。李雪英等^[16]认为电阻曲线和自然电位曲线对于新肇油田低饱和度油藏含油性较为敏感,通过选择深侧向电阻率与自然电位曲线交会可以判别油水层。尚映润^[7]认为准噶尔盆地 WEH 油田克下组电测曲线对储集性能的反映主要表现在自然电位及声波时差上。徐倩茹等^[11]在四性关系研究的基础上提出玛湖凹陷斜坡区侏罗系八道湾组地层的物性是低饱和度油层主控因素。何澳庭等^[17]针对准噶尔盆地某油田单一砂岩体内不同含油级别的条带频繁互层的特点研究了低饱和度砂岩储层四性关系。近年来,随着人工智能理论方法迅猛发展,也涌现出了一系列基于机器学习的储层参数预测方法。肖晓等^[18]基于 LightGBM 算法开展了川南地区页岩气储层甜点参数的预测;曲端刚^[19]也同样利用 BP 神经网络和随机森林等方法对松辽盆地青山口组页岩的储层参数进行了预测。此外,基于机器学习的储层参数预测方法在准噶尔盆地^[20]、莺歌海盆地^[21]和渤海湾盆地^[22]等地区也都取得了良好的应用效果。目前,准噶尔盆地夏子街油田克下组低饱和度油藏还没有开展系统的研究。本文以夏 77 井区克下组低饱和度油藏四性关系研究为基础,明确了低饱和度油藏形成机理,在此基础上建立了一套针对该类油

藏的机器学习储层识别方法,以期为深化油藏认识和滚动勘探部署提供依据。

1 基本地质特征

准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区块构造位于乌夏断裂带东部(图 1),地理位于新疆维吾尔自治区和布克赛尔蒙古自治县,距乌鲁木齐区东北约 35 km,平均地面海拔 475 m。夏 77 井区块三叠系克下组油藏勘探潜力较大,石油地质储量超过 800×10^4 t。克下组地层沉积较为稳定,平均厚度 270 m,自上而下分为 $T_2k_1^1$ 、 $T_2k_1^2$ 、 $T_2k_1^3$ 三套砂层组,油气显示活跃,油层均有发育。夏子街油田构造位置有利,是油气运移的有利指向区。夏 77 井区块三叠系克下组整体表现为断背斜构造,位于玛湖生烃凹陷的上倾方向,油源丰富^[23];克下组储层岩性、物性及含油性特征在横向分布上有一定差异,背斜高部位已获工业油流,南部受断裂分隔,东西部储层逐渐尖灭,油气主要沿深大断裂及三叠系与二叠系不整合面运移^[24],在三叠系构造有利位置且储层发育区聚集成藏。综合认为,该区油藏类型为受断裂控制的构造—岩性油藏。本次研究选取夏 77 井区块内克下组油藏 8 口取心井共 1 011 块样品的化验分析资料(粒度、物性、岩石薄片、扫描电镜、铸体薄片、X-衍射、压汞等)及其测井资料和试油、试采等资料,开展储层“四性”关系研究。

2 储层四性关系分析

2.1 岩性特征

夏 77 井区克下组岩性以砂砾岩、砂质砾岩为主(图 2),其次为砾岩、含砾细中粒长石岩屑砂岩。

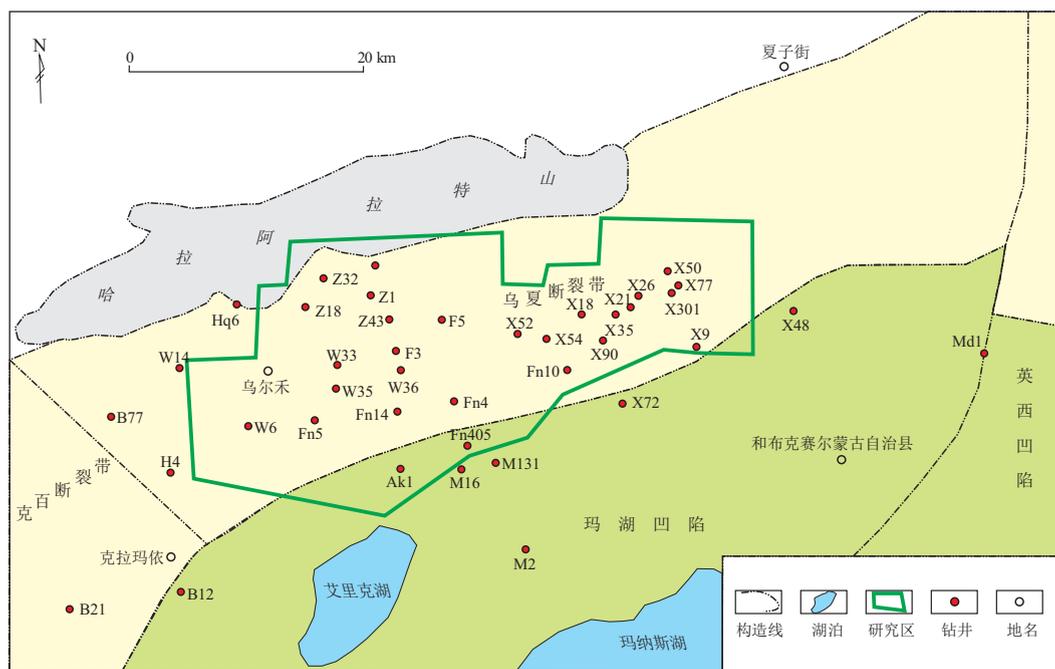
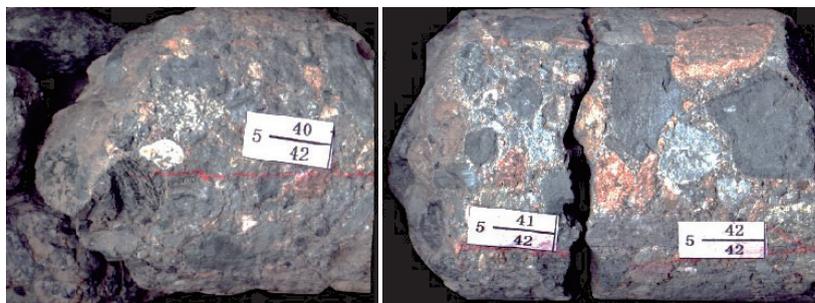


图 1 准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区块地理位置

Fig.1 Geographical location of Xia 77 well block in Xiaziye Oilfield, Junggar Basin



a.夏35井, 井段1 709.64~1 709.92 m, 油迹、油斑砂砾岩



b.夏35井, 井段1 694.59~1 694.97 m, 油斑砂砾岩

图 2 准噶尔盆地夏子街油田夏 35 井下克拉玛依组岩心

Fig.2 Core of Lower Karamay Formation of Xia 35 well in Xiaziye Oilfield, Junggar Basin

砾石最大砾径 40 mm×100 mm, 一般为 2~20 mm, 砂屑粒径 0.1~1 mm(图 3)。砾石约占整个岩块的 60%~80%, 中粗砂岩占比 10%~15%, 少量粉细砂岩。不同砂砾岩颗粒粒径表现出多组分, 砾石级别的分布呈现多峰特征。细粒级的颗粒含量少且成分复杂, 均质程度差。砾石成分以变质岩块为主, 火成岩块次之^[25]。火成岩成分包括凝灰岩、流纹岩、安山岩、花岗岩等。砂粒成分以长石、岩屑为主, 石英次之, 部分颗粒表面泥化严重, 常见次生加

大; 岩石分选性差, 支撑类型为颗粒支撑, 接触方式以线接触和点一线接触为主; 胶结类型主要为压嵌式, 砾石颗粒间具相互压实嵌入, 并具塑变; 杂基成分见绿泥石、高岭石; 胶结物成分见方解石、铁质, 粒间方解石胶结物均匀分布, 交代泥质杂基现象明显, 颗粒间黏土杂基具较强的绿泥石化和水云母化。本区黏土矿物以伊蒙混层为主, 含量平均为 42%, 伊蒙混层比平均为 57.8%; 高岭石含量次之, 平均含量为 28.7%; 绿泥石和伊利石含量分别为

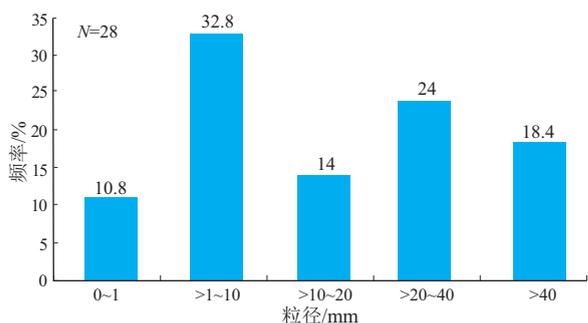


图 3 准噶尔盆地夏子街油田夏 301 井下克拉玛依组(1 688.73 m) 粒度级分布直方图

Fig.3 Grain size distribution histogram of Lower Karamay Formation(1 688.73 m) of Xia 301 well in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

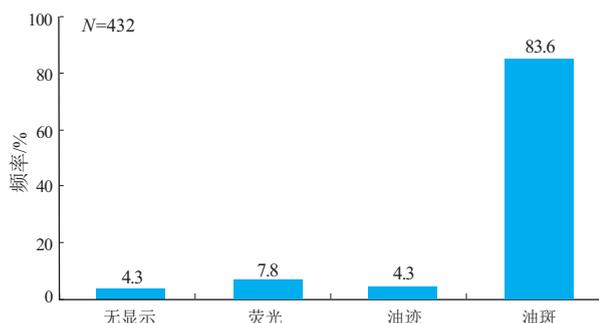


图 5 准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区下克拉玛依组岩心含油级别统计结果

Fig.5 Statistical results of oil-bearing grade of rock cores in Lower Karamay Formation of Xia 77 well block in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

15.6%和 13.6%。

2.2 物性特征

克下组储集空间以原生粒间孔和残余粒间孔为主,少量微裂缝。毛管压力曲线形态为偏细歪度,孔隙分选较差;最大孔喉半径为 0.66~23.30 μm ,平均 4.51 μm ;饱和度中值压力为 1.07~20.01 MPa,平均 11.82 MPa;饱和度中值半径为 0.04~0.69 μm ,平均 0.14 μm ;排驱压力为 0.03~1.11 MPa,平均 0.39 MPa;毛管半径为 0.14~6.49 μm ,平均 1.09 μm 。储层孔隙度为 6%~12%,平均 10.5%;渗透率为 $(0.1\sim 100)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $12\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于特低孔、特低渗储层(图 4)。

2.3 含油性特征

根据本区的岩心描述,如图 5 所示,储层含油性主要为油斑、油迹和荧光等含油级别,油浸级别的含油显示甚少。研究显示,本区含油饱和度一般分布在 36%~55%之间,多数含油饱和度为 40%~50%,说明该油藏属于低饱和度油藏。

2.4 岩性与物性关系

根据夏 77 井区三叠系克下组储层岩性与物性关系(图 6)可以看出,各种岩性孔隙度差异性小、渗透率差异较大;在同等孔隙度下,细砂岩的

渗透率明显小于含砾砂岩的渗透率,但是同一岩性局部则因溶蚀孔及微裂隙发育,而导致渗透率明显增大。

2.5 岩性与电性关系

夏 77 井区克下组岩性与电性分区明显(图 7),测井可以识别出泥岩、泥质砂岩、砂砾岩 3 种岩性(因细砂岩、含砾砂岩、砂砾岩、砂质不等粒砾岩、砂质砾岩、砾岩识别效果差,统一合并为砂砾岩)。几种岩性的电性分区如下:泥岩 $AC>80 \mu\text{s}/\text{ft}$ 且 $RT<12 \Omega \cdot \text{m}$;泥质粉砂岩 $AC>75 \mu\text{s}/\text{ft}$ 且 $RT<20 \Omega \cdot \text{m}$;砂砾岩 $AC\leq 75 \mu\text{s}/\text{ft}$ 且 $RT\geq 20 \Omega \cdot \text{m}$ 或 $12\leq RT<20 \Omega \cdot \text{m}$ 。

各砂层组非储层具有电阻率低、补偿中子高、声波时差大、井眼易垮塌的特征;储层具有电阻率值明显高、声波时差小、补偿中子低、井眼规则等特征;油层具有相对高电阻率、高声波时差的特点。

夏 77 井区孔隙度测井曲线主要为声波时差测井,部分井进行了密度和中子测井。声波时差和密度测井很好地反映了储层的孔隙度。克下组砂砾岩储层物性差,反映到密度和声波时差测井曲线上,表现的声波时差一般分布在 67~70 $\mu\text{s}/\text{ft}$,密度测井值一般分布在 2.50~2.55 g/cm^3 ;储层物性好

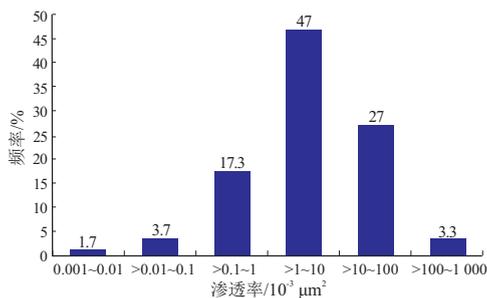
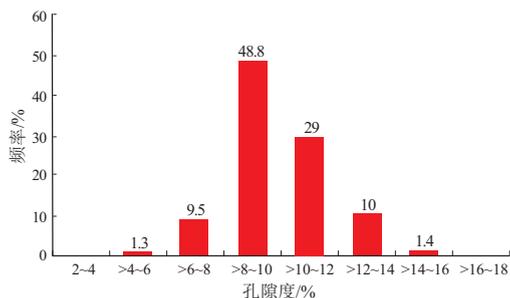


图 4 准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区下克拉玛依组孔隙度和渗透率直方图

Fig.4 Histogram of porosity and permeability of Lower Karamay Formation in Xia 77 well block in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

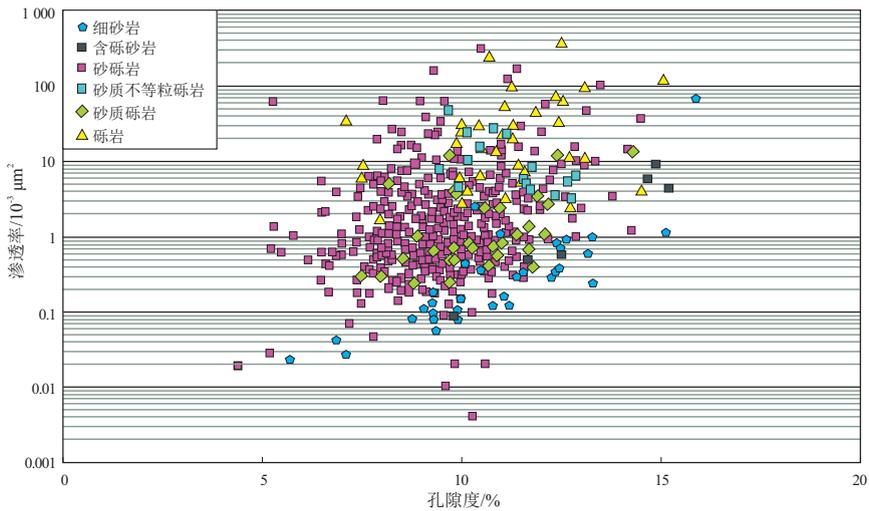


图 6 准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区下克拉玛依组岩性与物性关系

Fig.6 Relationship between lithology and physical properties of Lower Karamay Formation in Xia 77 well block in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

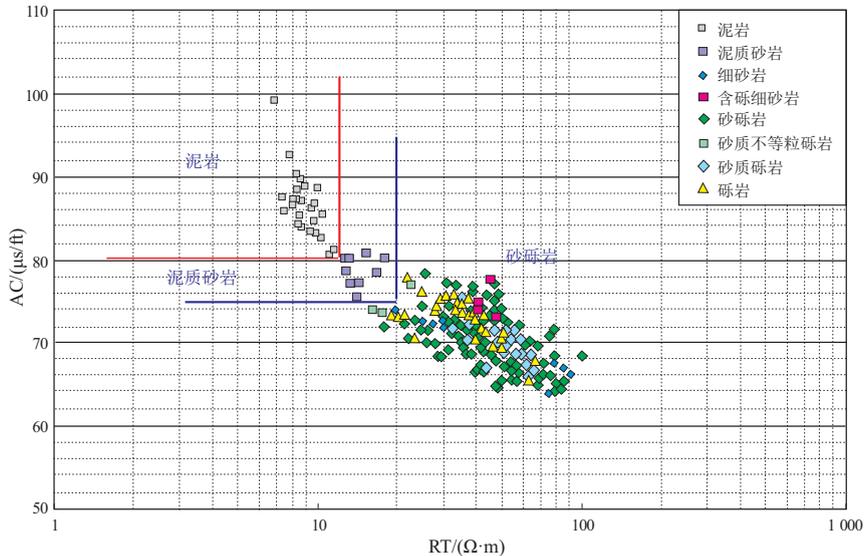


图 7 准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区下克拉玛依组岩性与电性关系

Fig.7 Relationship between lithology and electrical properties of Lower Karamay Formation in Xia 77 well block in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

的层段,声波时差一般分布在 70~78 $\mu\text{s}/\text{ft}$,密度测井值一般分布在 2.45~2.52 g/cm^3 ;致密层的声波时差一般小于 68 $\mu\text{s}/\text{ft}$,密度值大于 2.52 g/cm^3 (图 8)。从当前的测井系列分析,如此低的孔隙度,密度测井和声波时差测井反应均不够敏感,孔隙度解释精度有限。另外由于孔喉配置的复杂性,即微观孔隙结构非均质性,导致利用孔隙度求取渗透率的精度下降。

2.6 岩性与含油性关系

根据克下组砂层组的岩性与含油性的统计(图 9),含油级别主要为无显示、荧光、油迹和油斑 4 个含油级别。含砾砂岩的含油性最好,以油斑显示为主;其次是砂砾岩、砂质砾岩、细砂岩,含油最

高级别为油斑级;不等粒砂质砾岩、砾岩含油性较差,含油最高级别为荧光级。

2.7 物性与含油性关系

根据岩心描述及物性分析,建立了岩心分析孔隙和油气显示关系交会图(图 10),可见物性与含油性的规律性较差,表明含油性好坏与物性相关性小,但是整体都含油。储层随着物性的变好含油性总体变好,局部受构造因素影响物性较好但含油性变差;以油斑为含油级别下限,物性下限为孔隙度大于 7.5%、渗透率大于 $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.8 四性关系总结与低含油饱和度成因分析

通过对目的层的岩性、物性、电性和含油性分析认为,夏 77 井区的“四性”关系复杂,必须分析

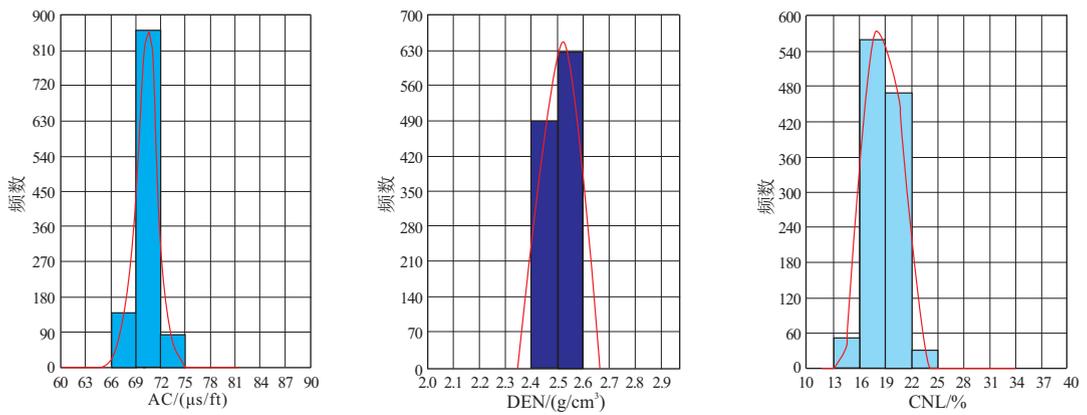


图 8 准噶尔盆地夏子街油田下克拉玛依组三孔隙度测井曲线分布直方图

Fig.8 Histogram of distribution of three porosity logging curves in Lower Karamay Formation in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

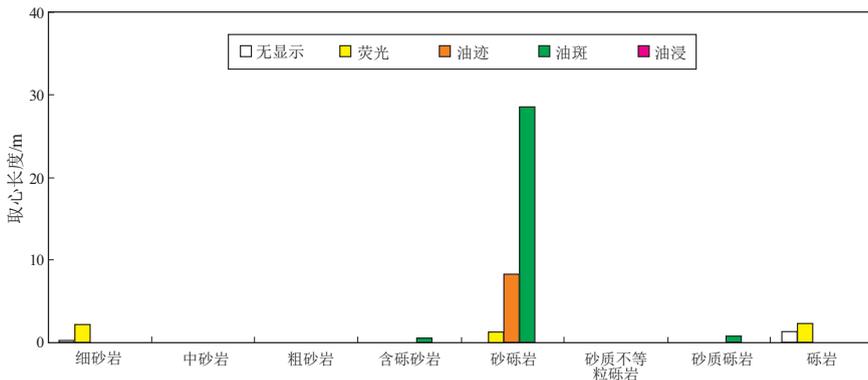


图 9 准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区下克拉玛依组岩性与含油性统计直方图

Fig.9 Statistical histogram of lithology and oil content of Lower Karamay Formation in Xia 77 well block in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

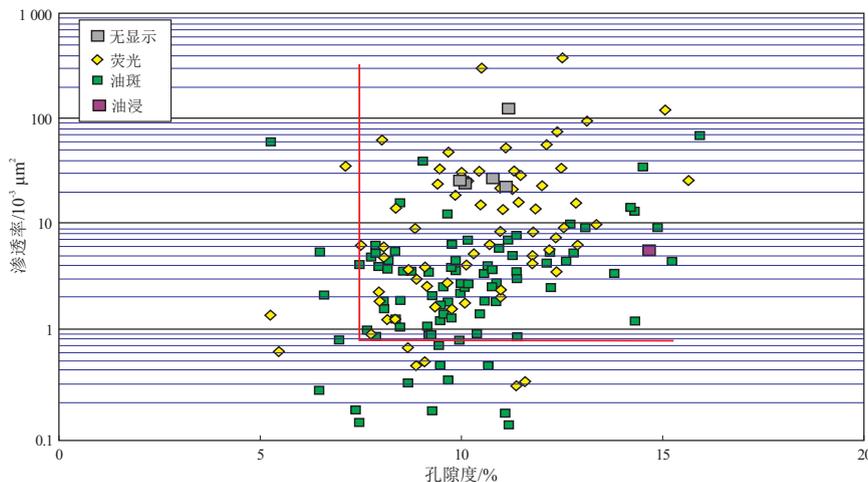


图 10 准噶尔盆地夏子街油田夏 77 井区下克拉玛依组物性与含油性关系

Fig.10 Relationship between physical properties and oil content of Lower Karamay Formation in Xia 77 well block in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

不同的岩性、物性与电阻率之间的影响和制约关系。整体上,储层的岩性控制物性,物性控制含油性。泥质和钙质胶结物少的砂砾岩物性最好,含油性也最好。发育泥质胶结物、砾石有绿泥石化现象的储层,虽然物性好,但电阻率低;而相对致密的砂

砾岩储层,物性差,基本不含油气。这种复杂的四性关系,主要是由储层的岩矿特征决定。泥质杂基和砾石黏土化导致油层电阻率降低,钙质胶结的储层致密,声波时差测井值降低,密度测井值增高;胶结物含量少的纯净砂砾岩,储层物性好,声波时差

测井值高,密度测井值低。

岩心观察分析表明,储层为孔隙性含油,岩心含油级别主要为油斑和油迹级别,油斑级别的含油显示是在观察岩心截面有 40%~5% 面积见到原油,含油部分呈现星斑状、条带状分布。这说明,岩心中的油气只聚集在部分孔渗条件好的孔隙内,而物性差的储层基本不聚集油气,整体岩心含油性变差。从试油、试采动态资料分析,油层段试油直接射孔均无油气产出,呈现干层或微量水动态反应;只有压裂后,油水同出,部分井层出纯油,产液量和产油量都不是很高。如此厚的连续性较好的块状砂砾岩,大型压裂后的产液量为油水同出,并且产量较低,一是说明储层物性差,二是说明储层含油性较差、含油饱和度较低。油气运移动力大于毛细管阻力以及油气运移时只能进入较大孔隙中,是导致低含油饱和度的原因。

从区域成藏研究成果分析,克下组油藏的油源主要来自下部乌尔禾组烃源岩生成的油气,通过断层和不整合面向上运移到上部地层中聚集成藏。储层的储集空间是由众多的大小不一的孔隙和连通孔隙的喉道组成,在复杂孔隙系统中油气要克服毛细管阻力才能实现运移和聚集。毛细管阻力大小与界面张力、喉道半径有关;毛细管阻力与界面张力、润湿角余玄值成正比,与喉道半径成反比。针对特定的油气藏,界面张力和润湿角基本是定值;而喉道半径变化大,喉道半径越小,产生的毛细管阻力越大,当喉道半径小于一定值时,形成的毛细管阻力阻止了油气进入孔隙。根据这一原理,该区油气在聚集过程中,当运移的油气动力无法克服毛细管阻力时,储层孔隙中仍然富集原生水。所以,克下组的储层孔隙结构的非均质性导致油气只能进入较大孔隙连通的孔隙中,而较小孔隙连通的孔隙油气无法进入,从而保留着原生水存在。岩心上的油斑和油迹级含油显示能证明,储层表现为低含油饱和度特征。这种低含油饱和度油藏,与油水二相流体共同赋存在孔隙系统中而形成的低含油饱和度有明显不同,前者是油气无法进入更小孔隙中,后者是油气进入孔隙系统中但油水分离、油水二相共存而导致。

3 机器学习识别储层参数

研究区克下组属特低孔、特低渗砂砾岩储层,四性关系复杂,孔渗相关性差,油气水关系混乱,储层参数与测井响应关系不清晰,常规储层参数测井评价与预测方法适用性不强。为此,引入 BP 神经网络开展研究区储层参数的预测。

3.1 BP 神经网络

神经网络模型均由输入层、隐含层和输出层三部分组成,其中输入层有一个,隐含层有一个或若干个,输出层有一个,且各层均由若干个节点组成。虽然上下层节点之间是相互连接的,但同层的节点不连接(图 11)。神经网络模型中每个神经元均代表着一种特定的激励函数,每 2 个神经元之间的交接点为权重。BP 神经网络模型是多层前馈神经网络,它是按照误差逆向传播算法进行训练。网络的学习需要经历信息正向传播和误差反向传播两个循环过程^[26]。

BP 神经网络模型的训练流程如下:(1)特征变量的选取。通过制作交会图,将与岩心孔隙度、岩心渗透率和含油饱和度相关性最强的测井信息输入到神经网络中。(2)归一化及标准化处理。为保证预测的准确性和可靠性,将训练集和测试集均进行归一化处理,并删除错误及无效数据。(3)划分训练集和测试集。通常采用交叉验证的思路,将数据集按照 7:3 或者 8:2 划分为训练集和测试集,并循环多次,直到所有数据集、所有样本均被预测一次则停止循环,分别记录测试集和验证集的误差平方。(4)网络模型的构建。根据样本数据,选择最优的隐含层及节点数,避免训练模型时出现过拟合或欠拟合的现象。(5)模型的再优化。正向传播计算 BP 网络模型参数下的误差、反向传播计算每个节点权重的梯度来调整模型参数,使预测结果向实际结果无限逼近,循环迭代直至小于初始误差则训练停止,最终得到符合要求的模型。以上 5 个训练流程中,如何去选取合适的特征参数、网络模型的隐含层数及节点数,对模型最终的训练效果影响极大,一般需要多次实验和反复验证来确定^[27-28]。

3.2 BP 神经网络预测储层参数

3.2.1 数据处理

本次所用数据采集于夏子街油田夏 77 井区,

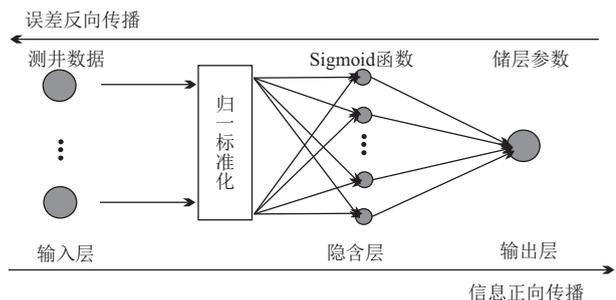


图 11 准噶尔盆地夏子街油田三层 BP 神经网络结构

Fig.11 Structure of 3-layer BP neural network in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

共计 225 个数据样本,其中,自然伽马和声波时差 2 个特征存在缺失值,深双侧向电阻率存在异常值。自然伽马缺失值低于 5%,缺失值较少,声波时差缺失值较多,将近 10%;深双侧向电阻率异常值低于 3%。目前,缺失值的处理方法主要有删除和填充 2 种办法。为保证数据量,采用均值填充的方式处理缺失值。由于异常值较少,故为保证数据集的准确性,将异常值删除,最终数据集为 218 个样本。为从有限的数据中获取尽可能多的有效信息及其问题,本文采用 K 折交叉验证的方式进行数据集的训练及预测。其中,K 的取值,通常根据经验选择 $K=5$ 或 $K=10$,但为避免出现 K 越大而出现强相关性导致最终测试错误具有更大方差的问题,K 取 5。采用 MSE(评价数据的变化程度,MSE 的值越小,说明预测模型描述实验数据具有更好的精确度)、MAE(平均绝对误差能更好地反映预测值误差的实际情况)作为评价指标,为避免机器学习在一定程度上出现数据过拟合和欠拟合的现象,采用 5 次运行结果后,取各项预测平均值的方式评价模型好坏。

3.2.2 模型对比

基于 MATLAB 编写随机森林、BP 神经网络和支持向量机对夏子街油田夏 77 井区 218 个数据集

样本进行建模分析。将原有的数据进行归一化处理,分别利用随机森林、BP 神经网络和支持向量机对实测的孔隙度、渗透率和含油饱和度进行训练,得到最优化模型,对数据进行预测,预测结束后,进行反归一化处理得到预测值。

引入 BP 神经网络对储层孔隙度进行预测,将自然伽马、深双侧向电阻率、声波时差作为响应变量,设置特征维度为 3、终止迭代次数为 100、训练集召回率为 99%,预测准确率为 99%。图 12 所示为夏 038 井孔隙度模型的训练和预测结果。

继续将测井解释数据按照 7:3 划分为训练集和测试集,引入 BP 神经网络对储层渗透率进行预测,将自然伽马、深双侧向电阻率、声波时差作为响应变量,设置特征维度为 3、终止迭代次数为 100、训练集召回率为 95%,预测准确率为 85%。图 13 所示为夏 038 井渗透率模型的训练和预测结果。

将测井解释数据按照 7:3 划分为训练集和测试集,引入 BP 神经网络对储层含油饱和度进行预测,将自然伽马、深双侧向电阻率、声波时差作为响应变量,设置特征维度为 3、终止迭代次数为 100、训练集召回率为 88%,预测准确率为 87%。图 14 所示为夏 038 井含油饱和度模型的训练和预测结果。

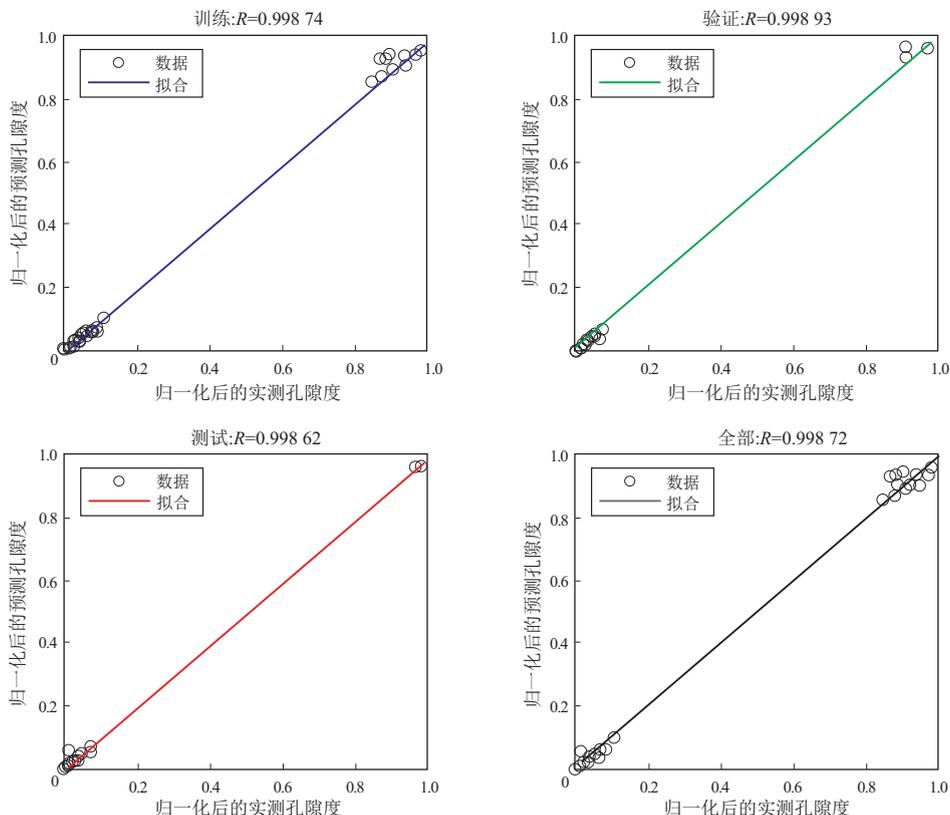


图 12 准噶尔盆地夏子街油田 BP 神经网络对孔隙度训练及预测结果

Fig.12 Training and prediction results of BP neural network for porosity in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

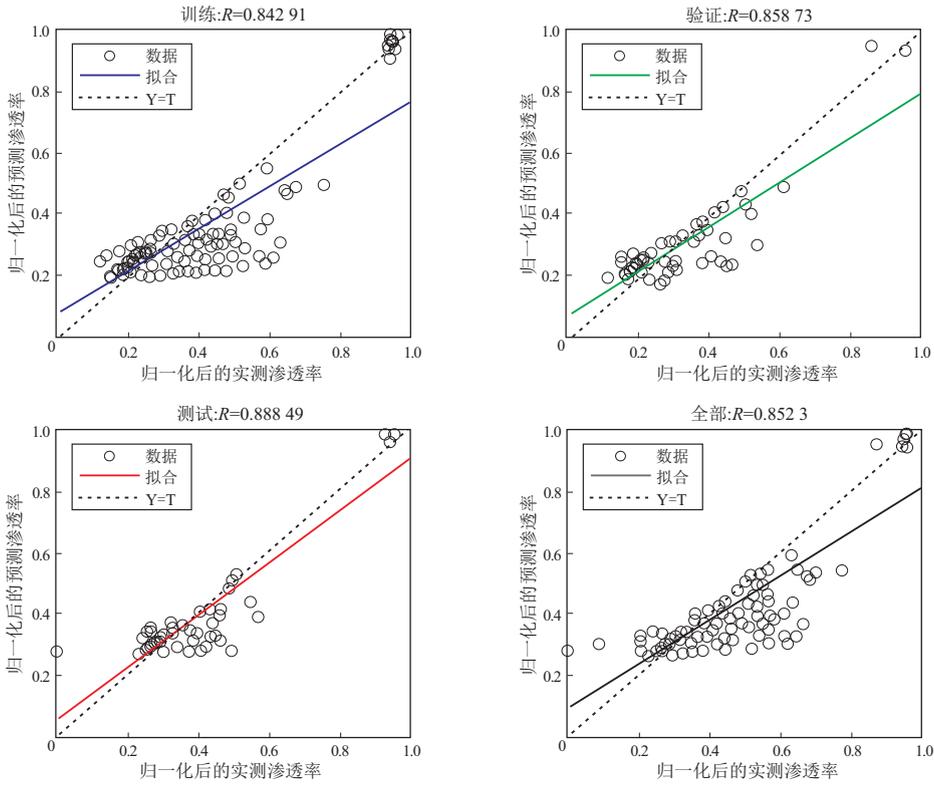


图 13 准噶尔盆地夏子街油田 BP 神经网络对渗透率的训练及预测结果

Fig.13 Training and prediction results of BP neural network for permeability in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

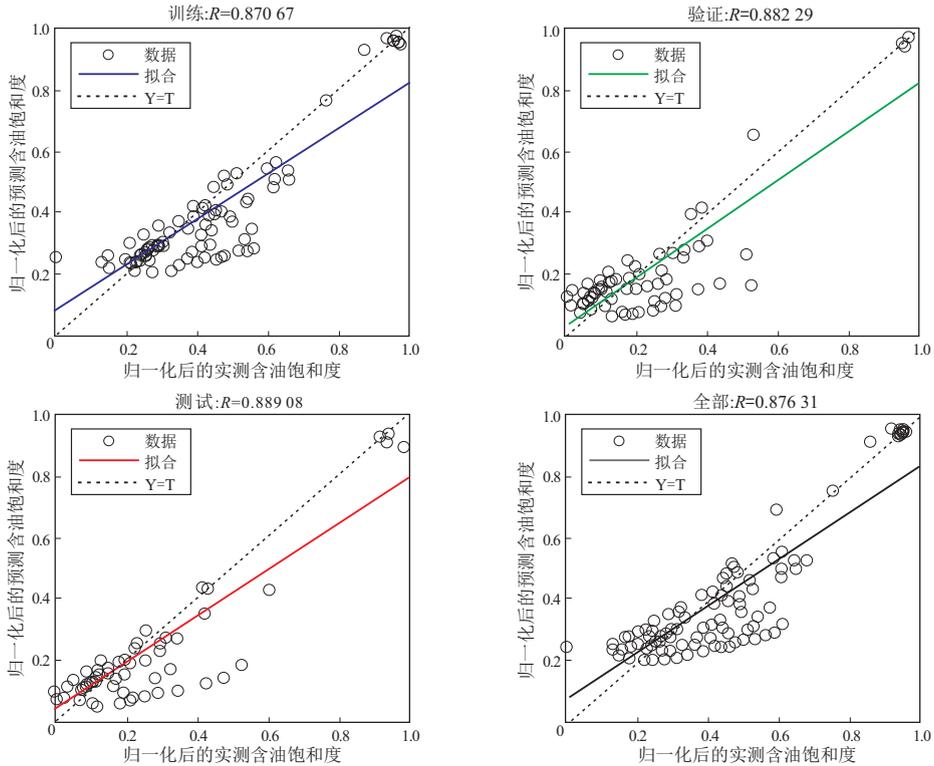


图 14 准噶尔盆地夏子街油田 BP 神经网络对含油饱和度的训练及预测结果

Fig.14 Training and prediction results of BP neural network for oil saturation in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

分别采用随机森林和支持向量机重复以上 BP 神经网络预测孔隙度、渗透率和含油饱和度的步骤,得到如表 1 所示的 3 种机器学习算法评价指标

总结。均方误差和平均绝对误差值越小则代表模型越好,说明预测模型描述实验数据具有更好的精确度。由表1可知,BP神经网络训练3种参数的

表 1 准噶尔盆地夏子街油田 3 种机器学习算法评价指标总结
Table 1 Summary of evaluation indicators for three machine learning algorithms in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

评价模型	MSE(均方误差)			MAE(平均绝对误差)		
	孔隙度	渗透率	含油饱和度	孔隙度	渗透	含油饱和度
BP 神经网络	0.33	0.45	0.35	0.15	0.14	0.17
随机森林	0.86	0.86	0.84	1.20	1.80	1.10
支持向量机	0.81	0.82	0.79	0.92	0.81	0.99

评价指标的值均最小,故 BP 神经网络预测孔隙度、渗透率和含油饱和度的性能最好。

3.2.3 应用效果分析

采用预测性能最好的 BP 神经网络对夏 038 井进行实例验证。表 2 为利用 BP 神经网络训练预测的夏 038 井孔隙度、渗透率和含油饱和度的结果与解释结论的对比。依据解释结论,根据敏感参数采用机器学习方法进行储层参数预测,训练得出具有可行性的 BP 神经网络,孔隙度、渗透率和含油饱和度的预测精度均高于 80%。

4 结论与认识

(1)通过“四性”对比关系研究,认为研究区储集层岩性为含砂砾岩、砂砾岩,储层厚度大,砂砾岩储层物性和含油性好于中细砂岩;储层物性属于特低孔、特低渗储层;储层含油性主要为油迹和油斑级别,储层物性控制含油性,呈现低饱和度特征;电性受含油性和岩性双重影响。

(2)克下组复杂的四性关系,主要受储层的岩矿特征决定。泥质杂基和砾石黏土化导致油层电阻

表 2 准噶尔盆地夏子街油田夏 038 井 BP 神经网络预测结果

Table 2 Prediction results of BP neural network for Xia 038 well in Xiazijie Oilfield, Junggar Basin

序号	深度/m	自然伽马/ API	深电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	声波时差/ ($\mu s/ft$)	岩性密度/ (g/cm^3)	孔隙度/ %	预测孔 隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	预测渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	含油饱 和度/%	预测含油 饱和度/%
1	2 338.4	87.55	34.11	71.98	2.49	10.51	10.84	0.14	0.15	39.69	39.63
2	2 347.5	73.52	43.26	70.03	2.52	9.29	10.69	0.07	0.06	41.11	42.67
3	2 352.2	78.63	39.07	70.69	2.49	9.70	9.08	0.09	0.06	40.10	42.10
4	2 447.0	88.72	54.13	67.30	2.55	8.88	9.01	0.06	0.07	45.71	44.00
5	2 451.9	93.78	48.80	67.21	2.51	8.79	8.57	0.06	0.03	42.07	41.28
6	2 455.4	98.74	65.70	66.73	2.54	8.48	8.84	0.04	0.04	49.21	48.06
7	2 462.6	89.87	46.50	68.67	2.56	9.87	9.62	0.10	0.09	45.80	42.75
8	2 466.4	86.04	44.38	67.45	2.56	8.95	8.88	0.06	0.05	40.17	43.11
9	2 467.2	83.85	35.55	70.54	2.58	11.18	11.48	0.21	0.27	43.30	41.32
10	2 472.1	89.05	36.64	69.14	2.56	10.16	10.52	0.11	0.11	40.24	41.58
11	2 473.9	80.42	47.44	69.16	2.53	10.23	9.98	1.32	0.06	47.24	44.95
12	2 483.4	84.94	53.35	65.28	2.59	7.36	7.86	0.02	0.03	44.49	43.41
13	2 484.0	87.07	51.17	67.28	2.54	8.85	8.85	0.06	0.06	51.89	51.55
14	2 491.8	91.87	57.07	66.71	2.55	8.44	8.53	0.05	0.08	52.68	54.37
15	2 496.2	81.68	51.65	67.08	2.56	8.70	8.75	0.05	0.05	51.67	51.08
16	2 501.5	81.29	49.38	67.13	2.56	8.73	8.81	0.05	0.05	50.75	50.49
17	2 506.2	83.05	43.70	67.76	2.56	9.18	9.57	0.07	0.09	49.91	46.11
18	2 514.2	88.60	48.23	66.56	2.55	8.31	8.82	0.04	0.05	47.81	46.71
19	2 515.6	86.09	54.25	66.70	2.55	8.43	8.88	0.05	0.06	51.17	51.72
20	2 522.4	94.75	50.73	67.20	2.53	8.79	8.65	0.06	0.05	51.57	51.30
21	2 524.6	91.54	48.69	66.70	2.56	8.41	8.53	0.04	0.05	48.51	47.14
22	2 527.1	76.79	40.23	68.16	2.56	9.46	9.98	0.08	0.06	49.33	45.05
23	2 530.0	80.97	37.49	69.81	2.55	10.65	10.79	0.16	0.14	52.80	53.18
24	2 532.9	87.18	40.81	66.63	2.56	8.32	8.75	0.04	0.05	43.28	46.89
25	2 533.5	84.83	37.38	68.12	2.57	9.41	9.45	0.08	0.08	47.18	47.21
26	2 535.4	81.69	38.29	68.02	2.61	9.34	9.53	0.07	0.07	47.51	45.63
27	2 541.0	80.20	42.77	67.73	2.55	9.15	9.57	0.07	0.07	49.13	51.47

率降低;钙质胶结的储层致密,声波时差测井值降低,密度测井值增高;胶结物含量少的纯净砂砾岩,储层物性好,声波时差测井值高,密度测井值低。

(3)开展了低含油饱和度成因分析,认为储层微观孔隙结构是形成低含油饱和度的主要原因;同时分析了油藏的含油性变化规律。夏77井区克下组油藏油气往往不是呈现连续相分布在储层中,只有加大油层改造力度,制造裂缝沟通富集油气的孔隙,油气才可以流动并提高产量。

(4)3种机器学习算法评价指标对比显示,BP神经网络预测孔隙度、渗透率和含油饱和度的性能最好。通过优选参数,引入BP神经网络预测储层参数的方案是可行而可靠的,孔隙度、渗透率和含油饱和度的预测精度均高于80%。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

刘军、冯仁蔚参与论文的构思;钟洁、冯仁蔚、贾将、梁岳立完成论文写作和修改;倪振、王庆国参与文章审查。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

LIU Jun and FENG Renwei participated in the conception of the paper. ZHONG Jie, FENG Renwei, JIA Jiang, and LIANG Yueli completed the writing and revision of the paper. NI Zhen and WANG Qingguo participated in the article review. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] 王林生,赵晓东,刘文锋,等.准噶尔盆地玛西斜坡低饱和度油藏微观赋存状态及高含量胶质和沥青质成因[J].地质科学,2023,58(4):1325-1339.
WANG Linsheng,ZHAO Xiaodong,LIU Wenfeng,et al.Microcosmic occurrence state of low saturation reservoir and origin of high content of resin and asphaltene in Maxi slope,Junggar Basin[J].Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica),2023,58(4):1325-1339.
- [2] 王爱霞,徐怀宝,耿梅,等.玛湖凹陷YB4井区百口泉组低饱和度油藏成因及勘探方向分析[J].特种油气藏,2023,30(2):44-50.
WANG Aixia,XU Huaibao,GENG Mei,et al.Analysis of the genesis and exploration direction of low-saturation reservoirs in the Baikouquan Formation,wellblock YB4,Mahu Sag[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2023,30(2):44-50.
- [3] 杨朝洪,司马立强,王亮,等.准噶尔盆地莫索湾凸起八道湾组低饱和度油藏成因分析[J].特种油气藏,2022,29(5):42-48.
YANG Chaohong,SIMA Liqiang,WANG Liang,et al.Genesis analysis of low saturation oil reservoirs in Badaowan Formation of Mosuowan Bulge in Junggar Basin[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2022,29(5):42-48.
- [4] 郑佳奎,王波,徐传艳,等.丘陵油田西山窑组低饱和度油藏成因分析[J].新疆石油天然气,2017,13(3):11-14.
ZHENG Jiakui,WANG Bo,XU Chuanyan,et al.Genetic analysis of low oil saturation reservoir of Xishanyao Formation in Qiuling Oilfield[J].Xinjiang Oil & Gas,2017,13(3):11-14.
- [5] 许秀才.古龙凹陷葡萄花油层低饱和度油藏成因[J].断块油气田,2017,24(3):320-323.
XU Xiucui.Genesis of low oil-saturated reservoir of Putaohua oil layer in Gulong Sag[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2017,24(3):320-323.
- [6] 左卿伶.克拉玛依油田七中区克下组砾岩储层特征及三维地质建模[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
ZUO Qingling.The reservoir characteristics and 3D geological modeling of the Lower Karamay Group in the 7th central region of Karamay Oilfield[D].Beijing:China University of Petroleum (Beijing),2018.
- [7] 尚映润.准噶尔盆地WEH油田克下组储层孔隙结构及控制因素研究[J].科技创新与应用,2018(35):61-62.
SHANG Yingrun.Research on pore structure and control factors of Kexia Formation reservoir in WEH oilfield of the Junggar Basin[J].Technology Innovation and Application,2018(35):61-62.
- [8] 许小龙.新疆H6井区克下组油藏综合地质研究[D].西安:西北大学,2017.
XU Xiaolong.Comprehensive geological research on the Kexia Formation oil reservoir in the H6 well area of Xinjiang[D].Xi'an:Northwest University,2017.
- [9] 马小林.青西油田砂砾岩储层测井评价方法研究[D].成都:西南石油大学,2020.
MA Xiaolin.Research on logging evaluation method for sand stone and conglomerate reservoirs in Qingxi Oilfield[D].Chengdu:Southwest Petroleum University,2020.
- [10] 张川,欧阳云丽,王旭,等.九二区清水河组砂砾岩储层测井精细评价[J].中外企业家,2020(17):251.
ZHANG Chuan,OUYANG Yunli,WANG Xu,et al.Fine logging evaluation of the Qingshuihe Formation sand and gravel reservoir in the Jiu2 area[J].Chinese & Foreign Entrepreneurs,2020(17):251.
- [11] 徐倩茹,谢义林,杨星星,等.强非均质性低饱和度油层成因机理与油气层发现测井技术支持[C]//2022油气田勘探与开发国际会议论文集I.西安:中国石油新疆油田分公司(新疆砾岩油藏实验室),西安石油大学,2022.
XU Qianru,XIE Yilin,YANG Xingxing,et al.Formation mechanism of highly heterogeneous low saturation reservoir and support of reservoir discovery logging technology[C]//Proceedings of the 2022 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development I.Xi'an:PetroChina Xinjiang Oilfield Branch (Xinjiang Conglomerate Reservoir Laboratory),Xi'an Shiyou University,2022.
- [12] 万乔升.低饱和度油藏自然产能预测方法研究[D].大庆:东北石油大学,2021.
WAN Qiaosheng.Study on prediction method of natural productivity in low saturation reservoirs[D].Daqing:Northeast University of Petroleum,2021.

- [13] 冯利娟,钱川川,李勇,等.克拉玛依油田七西区三叠系下克拉玛依组储层微观非均质性定量评价[J].科学技术与工程,2023,23(16):6792-6801.
FENG Lijuan, QIAN Chuanchuan, LI Yong, et al. Quantity evaluation on micro-heterogeneity of reservoirs in Triassic Lower Karamay Formation of Qixi region in Karamay Oilfield[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6792-6801.
- [14] 董磊,李庆峰,许淑梅,等.A盆地C组低饱和度油层解释方法[C]//2022油气田勘探与开发国际会议论文集Ⅱ.西安:中国石油新疆油田分公司(新疆砾岩油藏实验室),西安石油大学,2022:8.
DONG Lei, LI Qingfeng, XU Shumei, et al. Interpretation method of low saturation oil layers in C Formation, A Basin[C]//Proceedings of the 2022 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development II. Xi'an: Petro China Xinjiang Oilfield Branch (Xinjiang Conglomerate Reservoir Laboratory), Xi'an Shiyou University, 2022: 8.
- [15] 陈少云,杨勇强,邱隆伟,等.致密砂岩孔喉结构分析与渗透率预测方法:以川中地区侏罗系沙溪庙组为例[J].石油实验地质,2024,46(1):202-214.
CHEN Shaoyun, YANG Yongqiang, QIU Longwei, et al. Analysis of pore throat structure and permeability prediction method in tight sandstone: a case study of the Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 202-214.
- [16] 李雪英,万乔升,王福霖,等.低饱和度油藏油水层解释方法: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 Gu628 block of Xinzhao Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1088-1094.
- [17] 何澳庭,闫建平,李志鹏,等.低饱和度砂岩储层含油非均质性与岩性、物性、电性的关系[C]//第十七届全国古地理学及沉积学学术会议摘要集:专题6测井地质学在非常规油气沉积储层评价中的应用.青岛:中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会,2023:1.
HE Aoting, YAN Jianping, LI Zhipeng, et al. The relationship between oil bearing heterogeneity and lithology, physical properties, and electrical properties of low saturated sandstone reservoirs[C]//Summary of the 17th National Conference on Paleogeography and Sedimentology - Topic 6: Application of well logging geology in unconventional oil and gas sedimentary reservoir evaluation. Qingdao: Lithofacies Paleogeography Professional Committee of the Chinese Society of Mineral, Rock and Geochemistry, 2023: 1.
- [18] 肖晓,闫建平,郭伟,等.基于LightGBM算法的页岩气储层甜点参数预测方法[J].中国煤炭地质,2023,35(10):28-37.
XIAO Xiao, YAN Jianping, GUO Wei, et al. A prediction method for sweet spot parameters of shale gas reservoirs based on Light GBM Algorithm[J]. Coal Geology of China, 2023, 35(10): 28-37.
- [19] 曲端刚.松辽盆地B井区青山口组页岩储层参数预测方法研究[D].大庆:东北石油大学,2023.
QU Duangang. Research on the method of predicting shale reservoir parameters in the Qingshankou Formation of well B area in the Songliao Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [20] 唐俊方,熊熊,刘向君,等.玛湖凹陷风城组岩石力学参数自适应权重组合预测[J].石油地球物理勘探,2024,59(1):1-11.
TANG Junfang, XIONG Jian, LIU Xiangjun, et al. Adaptive weight combination forecast of rock mechanical parameters in the Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(1): 1-11.
- [21] 刘仕友,曲福良,周凡,等.基于地震属性约简的深度学习储层物性参数预测:以莺歌海盆地乐东区为例[J].CT理论与应用研究,2022,31(5):577-586.
LIU Shiyu, QU Fuliang, ZHOU Fan, et al. Deep learning reservoir parameter prediction based on seismic attribute reduction: take Ledong area of Yinggehai Basin as an example[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2022, 31(5): 577-586.
- [22] 罗博峰.基于机器学习的核磁共振测井数据预测地层渗透率方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2022.
LUO Bofeng. The reservoir permeability prediction based on machine learning and NMR logging data[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.
- [23] 宫博识.准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组湖相云质岩形成机理[D].成都:成都理工大学,2014.
GONG Bozhi. Forming mechanism of Fengcheng Formation of lacustrine hydrothermal dolomite in the Junggar Basin in Urho[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [24] 孙浩.玛北斜坡区复杂油气藏储层预测方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016.
SUN Hao. Prediction methods of complex reservoirs in Mabei slope[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [25] 冯亚琴,刘俊田,李楠,等.马朗凹陷三叠系砂砾岩油藏特征及主控因素[J].石油地质与工程,2021,35(3):25-29.
FENG Yaqin, LIU Juntian, LI Nan, et al. Geological characteristics and main controlling factors of the Triassic glutenite reservoirs in Malang Sag[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(3): 25-29.
- [26] 王志豪,周明顺,魏新路,等.BP神经网络算法在页岩气饱和度评价的应用[J].工程地球物理学报,2022,19(2):216-222.
WANG Zhihao, ZHOU Mingshun, WEI Xinlu, et al. Application of BP neural network algorithm in shale gas saturation evaluation[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(2): 216-222.
- [27] 王祥,马劲风,王飞龙,等.渤海湾盆地渤中凹陷西南部深层烃源岩有机相预测[J].石油实验地质,2022,44(6):1070-1080.
WANG Xiang, MA Jinfeng, WANG Feilong, et al. Prediction of organic facies in deep source rocks in the southwest of Bozhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(6): 1070-1080.
- [28] 王猛,董宇,蔡军,等.基于BP神经网络的储层渗透率预测及质量评价方法[J].地球物理学进展,2023,38(1):321-327.
WANG Meng, DONG Yu, CAI Jun, et al. Method for reservoir permeability prediction and quality evaluation based on BP neural network[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(1): 321-327.