



唐晓敏,殷雪松,吕亚娟,等. 2023. 基于孔隙结构储层分类的中低孔特低渗储层渗透率确定——以 B 区块 S 油层为例. 地球物理学进展, 38(1):0271-0284, doi:10.6038/pg2023GG0082.

TANG XiaoMin, YIN XueSong, LÜ YaJuan, et al. 2023. Determination of permeability of medium-low porosity and extra-low permeability reservoirs based on pore structure reservoir classification; a case study of S reservoir in block B. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 38(1):0271-0284, doi:10.6038/pg2023GG0082.

基于孔隙结构储层分类的中低孔特低渗储层渗透率确定——以 B 区块 S 油层为例

Determination of permeability of medium-low porosity and extra-low permeability reservoirs based on pore structure reservoir classification: a case study of S reservoir in block B

唐晓敏^{1,2}, 殷雪松^{1,2}, 吕亚娟³, 宋延杰^{1,2}, 陈学洋³, 易俊³

TANG XiaoMin^{1,2}, YIN XueSong^{1,2}, LÜ YaJuan³, SONG YanJie^{1,2}, CHEN XueYang³, YI Jun³

1. 东北石油大学地球科学学院, 大庆 163318

2. 非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地, 大庆 163318

3. 大庆油田有限责任公司第九采油厂地质研究所, 大庆 163853

1. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

2. Accumulation and Development of Unconventional Oil and Gas, State Key Laboratory Cultivation Base Jointly-Constructed by Heilongjiang Province and the Ministry of Science and Technology, Daqing 163318, China

3. Institute of Geology, No. 9 Oil Production Company, Daqing Oilfield Limited Company, Daqing 163853, China

摘要 针对 B 区块 S 油层含泥含钙中低孔特低渗储层渗透率计算精度低的难题, 分析岩性、物性、孔隙结构对储层渗透率的影响, 明确了孔隙度、泥质含量、钙质含量、孔隙结构是影响 B 区块 S 油层特低渗储层渗透率的主要因素, 其中, 孔隙结构是影响特低渗储层渗透率的关键因素。综合运用压汞曲线、孔喉半径分布特征以及流动单元指数反映特低渗储层孔隙结构变化, 将特低渗储层按不同孔隙结构划分成 3 种类型, 建立了特低渗储层类型的判别标准。利用中子测井、密度测井、声波测井、微球形聚焦测井、深浅侧向电阻率测井差值的绝对值等 5 个储层类型识别的敏感测井响应及参数, 使用决策树法、最邻近结点法、BP 神经网络法和支持向量机法建立了 4 种基于机器学习的储层判别方法, 储层类型判别准确率依次提高, 其中, 基于支持向量机的储层类型判别方法判别准确率最高 92.2%, 且对 3 种类储层判别效果均很好。针对 3 类储层分别建

Abstract In order to solve the problem of poor calculation accuracy of permeability of shaly and calcareous formation with medium-low porosity and extra-low permeability in S reservoir in block B, the influences of lithology, physical property and pore structure on permeability of the reservoirs are analyzed. The results show that porosity, shale content, calcium content and pore structure are the main factors, and the pore structure is the key factor that affect the permeability of extra-low permeability reservoirs in S reservoir in block B. Based on combination of mercury injection curve, distribution characteristics of pore-throat radius and flow unit index representing the change of pore structure, the extra-low permeability reservoir can be divided into three types according to different pore structure, and the standard for determining the type of extra-low permeability reservoir is established. After neutron log, density log, acoustic log, microspherically focused log, and absolute value of difference between deep and shallow laterolog are selected as sensitive logging response and parameter, identification methods of reservoir type are proposed based on four kinds of machine learning algorithms including decision tree method, K-Nearest Neighbor method, BP neural network method and Support Vector Machine (SVM) method. The

收稿日期 2022-05-22; 修回日期 2022-10-10.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 黑龙江省省属本科高校基本科研业务费项目(HBHZX202003)资助。

第一作者简介 唐晓敏, 女, 1981 年生, 博士, 副教授, 从事测井资料解释方法研究。E-mail: txmdqi@163.com

立了渗透率计算公式. 实际井解释结果表明, 基于机器学习储层分类的渗透率模型计算 B 区块 S 油层特低渗透层渗透率精度明显高于储层分类前渗透率计算精度, 其中, 基于支持向量机储层分类计算的渗透率精度最高.

关键词 中低孔特低渗透层; 含泥含钙; 渗透率; 孔隙结构; 储层类型; 机器学习

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10. 6038/pg2023GG0082

discriminant accuracy of reservoir type is all improved and increases in the order with four kinds of machine learning algorithms. Also, the accuracy of discriminant method of reservoir type is the highest at 92.2%, and the discriminant result for three types of reservoirs is all best based on SVM. The permeability calculation formula is established respectively for three types of reservoirs. The interpretation results for wells show that the accuracy of permeability calculated with machine learning reservoir classification is significantly higher than that of permeability calculated on unclassified reservoir, and the accuracy of permeability calculated with SVM reservoir classification is the highest for S reservoir in block B.

Keywords Medium-low porosity and extra-low permeability formation; Shaly and calcereous; Permeability; Pore structure; Reservoir types; Machine learning

0 引言

渗透率是衡量储层渗流能力好坏和预测储层产能大小的重要参数, 其求取精度直接关系到储层产能计算的准确性(王清辉等, 2021; 赵军等, 2021). B 区块 S 油层储层岩性以粉砂岩、泥质粉、钙质粉砂岩为主, 泥质含量主要分布区间为 8% ~ 18%, 钙质含量主要分布区间为 0.22% ~ 20%, 孔隙度介于 5% ~ 19% 之间, 渗透率介于 $(0.03 \sim 30) \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 之间, 属于含泥含钙中低孔特低渗透层. 因此, 建立一种适用于 B 区块 S 油层特低渗透层渗透率的计算方法, 以提高渗透率计算精度, 是十分有必要的.

渗透率的求取主要有两大类方法, 第一类是基于岩石的微观孔隙结构特征, 将孔隙空间等效为不同的物理模型, 从而推导出岩石渗透率计算公式(荆万学, 2002; 景成等, 2013; 谢伟彪等 2014), 该方法具有较好的数学物理意义(于华等, 2020), 但岩石内部结构复杂多变, 等效的物理模型并不能反应真实的岩石内部结构, 因此, 建立的渗透率预测模型精度有限(孙建孟和闫国亮, 2012). 第二类是利用岩心分析岩性物性参数或测井参数, 采用统计分析方法, 建立岩石渗透率计算公式(楚泽涵和谢京, 1994; 杜超等, 2013), 这种方法简便、实用, 对于中高孔渗透层, 渗透率计算精度较高, 但对于低孔渗透层, 由于复杂孔隙结构往往成为影响储层渗透率主要因素(何胜林等, 2017), 故导致渗透率计算误差较大. 为了提高低孔渗透层渗透率计算精度, 可根据孔隙结构好坏对储层进行分类, 按不同储层类型建立渗透率计算公式(程梦薇, 2016). 压汞法是研究岩石孔隙结构最常用和直接方法, 根据毛管压力曲线形态和孔喉半径分布特征以及排驱压力、中值压力等参数可实现储层分类(李彦山等, 2009; 王剑峰

等, 2010; 李郑辰等, 2013; 杨玲等, 2014; 韩博华等, 2021; 崔改霞等, 2021), 但压汞法建立的储层类型判别标准多是定性的, 即使有定量标准, 其参数也需根据毛管压力曲线获得, 而利用常规测井资料很难获取储层的毛管压力曲线, 故该方法实用性较差. 岩石孔隙度与渗透率关系好坏在一定程度上能够反映孔隙结构影响, 利用岩心分析孔渗数据, 根据 Kozeny-Carman 方程, 计算岩石流动单元指数, 而流动单元指数能够描述岩石孔隙结构特征, 故根据流动单元指数值可以建立储层类型划分标准(宋宁等, 2013; 高颖等, 2019). 在实际应用中, 可以建立测井参数与流动单元指数关系式, 求取流动单元指数, 进而依据划分标准, 判断储层类型(高颖等, 2019; 鲁健康等, 2021; 王猛等, 2021); 也可以利用 Fisher 判别、概率法判别、BP 神经网络判别、决策树判别等机器学习算法直接判别储层类型(司马立强等, 2012; 干磊等, 2019; 代玲和赵澄圣, 2021), 因此, 该方法实用性强.

针对 B 区块 S 油层特低渗透层特征, 分析岩性物性孔隙结构对储层渗透率的影响, 确定主要影响因素. 结合压汞曲线形态和孔喉半径分布特征与流动单元指数综合划分储层类型, 并建立储层类型划分标准. 应用 4 种机器学习算法对储层类型进行判别, 优选出最佳判别方法. 根据不同储层类型, 建立渗透率计算公式, 以提高 B 区块 S 油层特低渗透率的计算精度.

1 中低孔特低渗透层渗透率主控因素分析

1.1 物性与岩性影响

利用 B 区块 S 油层 92 块岩心孔渗数据, 绘制研究区 S 油层孔隙度与渗透率相关图, 见图 1. 由图可知, 渗透率与孔隙度之间存在正相关关系, 这是因为

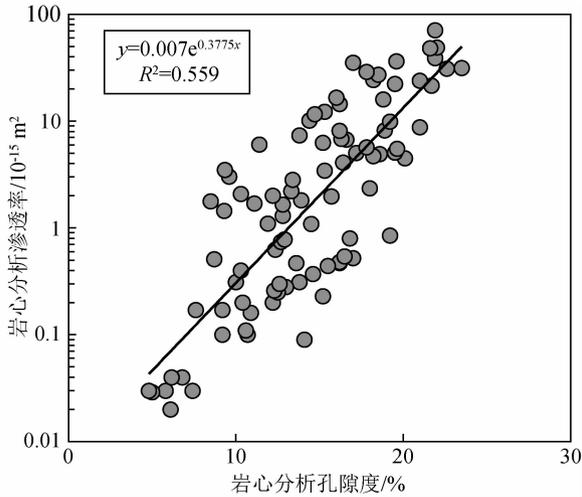


图1 B区块S油层孔隙度与渗透率交会图
Fig. 1 Plot of porosity and permeability in S reservoir in block B

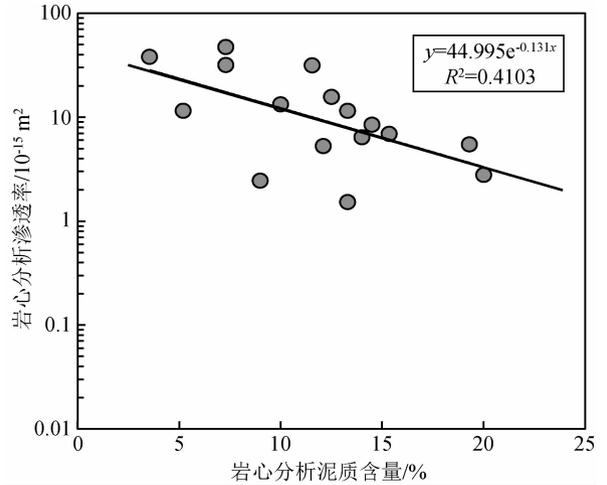


图3 B区块S油层泥质含量与渗透率交会图
Fig. 3 Plot of shale content and permeability in S reservoir in block B

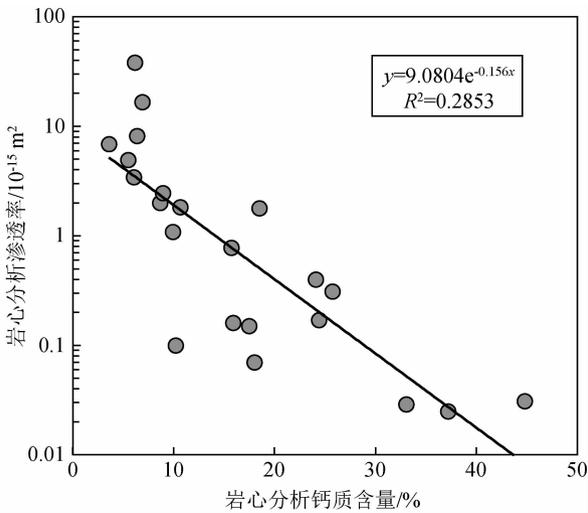


图2 B区块S油层钙质含量与渗透率交会图
Fig. 2 Plot of calcium content and permeability in S reservoir in block B

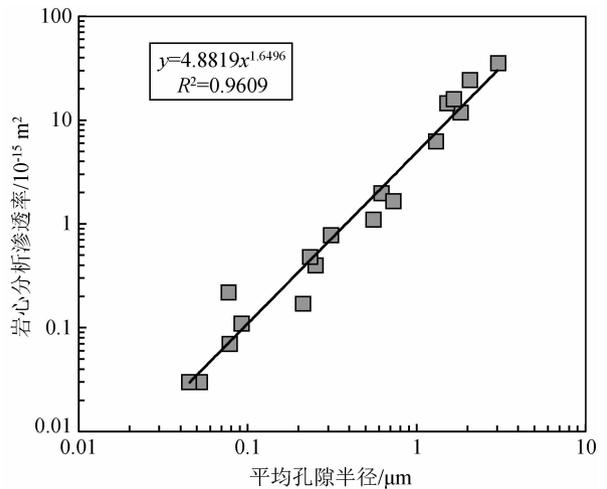


图4 B区块S油层平均孔隙半径与渗透率交会图
Fig. 4 Plot of average pore radius and permeability in S reservoir in block B

岩石孔隙度增大,孔隙增多,故岩石渗流能力增大,渗透率高。虽然岩心分析渗透率与孔隙度相关性较好,相关系数为0.75,但是同一数值的孔隙度对应的渗透率可相差一到两个数量级,因此,孔隙度是研究区S油层储层渗透率的主要影响因素之一。

利用研究区S油层22块岩心分析钙质含量数据(钙质含量大于2%)以及16块岩心分析泥质含量数据,绘制钙质含量、泥质含量与渗透率的相关图,见图2和图3。由图可知,渗透率与泥质含量和钙质

含量之间存在负相关关系,因为随着泥质含量或钙质含量的增加,分散在孔隙中的泥质颗粒或钙质颗粒增多,使得孔隙度降低,孔隙结构变得更加复杂,故岩石渗透率降低。岩心分析渗透率与钙质含量相关系数为0.53,相关性一般。岩心分析渗透率与泥质含量相关系数为0.64,相关性较好。因此,钙质含量和泥质含量是研究区S油层储层渗透率的主要影响因素之一。

1.2 孔隙结构影响

利用研究区S油层18块岩心压汞数据,绘制平

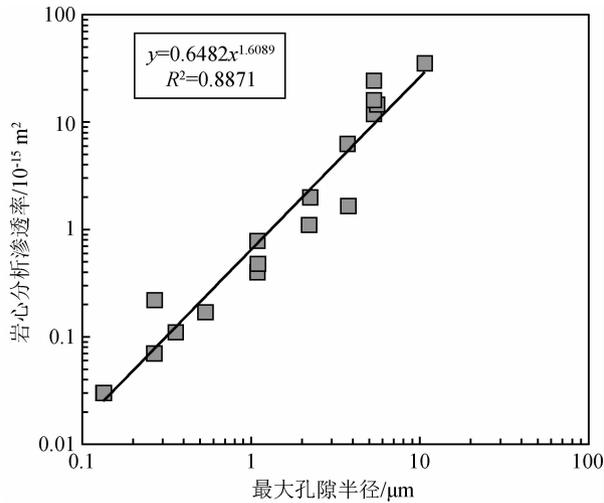


图5 B区块S油层最大孔隙半径与渗透率交会图
Fig. 5 Plot of maximum pore radius and permeability in S reservoir in block B

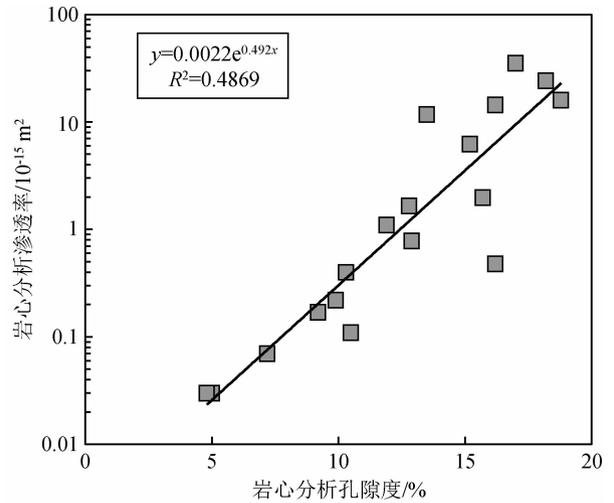


图7 B区块S油层孔隙度与渗透率交会图(压汞实验)
Fig. 7 Plot of porosity and permeability in S reservoir in block B (mercury injection experiment)

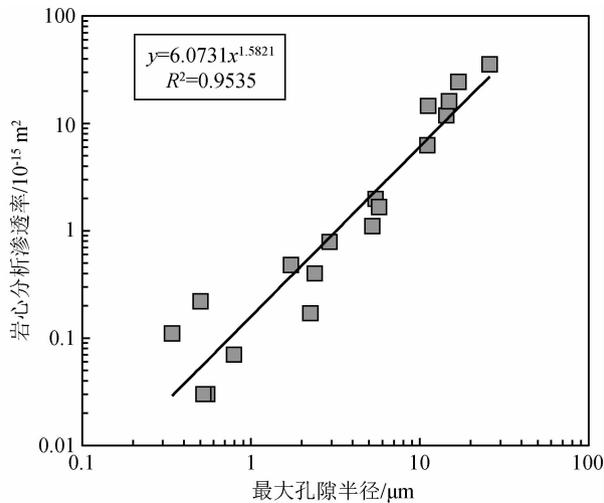


图6 B区块S油层半径均值与渗透率交会图
Fig. 6 Plot of mean radius and permeability in S reservoir in block B

均孔隙半径、半径均值、最大孔隙半径与渗透率的相关图,见图4~图6。由图可知,渗透率与平均孔隙半径、半径均值、最大孔隙半径之间存在正相关关系,这是因为岩石平均孔隙半径、半径均值、最大孔隙半径增大,孔隙结构变好,故岩石渗流能力增大,渗透率高。岩心分析渗透率与平均孔隙半径、半径均值、最大孔隙半径之间相关性均很好,相关系数在0.9以上。此外,图7给出了18块岩心的孔隙度与渗透率的相关图,由图可知,渗透率与孔隙度之间存在正

相关关系,但相关性较好,相关系数为0.69。因此,孔隙结构是研究区S油层渗透率的主要影响因素之一。

综上所述,孔隙度、泥质含量、钙质含量、孔隙结构是影响B区块S油层特低渗储层渗透率的主要因素,其中,孔隙结构是影响B区块S油层特低渗储层渗透率的关键因素。因此,采用基于孔隙结构的储层分类方法确定B区块S油层特低渗储层渗透率可以提高渗透率计算精度。

2 中低孔特低渗储层类型划分

压汞实验能很好地反映岩石的孔隙结构变化,可获得大量用于衡量孔隙结构好坏的参数,故可更好地划分储层类型。为了建立基于孔隙结构的储层分类标准,利用研究区S油层18块岩心压汞实验数据,绘制毛管压力曲线及孔喉半径分布频率图,见图8。根据毛管压力曲线以及孔喉半径分布形态特征,将B区块S油层储层分为三类。

1类储层:排驱压力较低,在0.1~0.3 MPa之间;毛管压力曲线呈“下凹型”,中值压力较低,在0.3~0.8 MPa之间;孔喉半径主峰向大孔径方向偏移,主要分布在1~7 μm之间,见图8a。

2类储层:排驱压力中等,在0.2~0.7 MPa之间;毛管压力曲线呈“直线型”或“下凹型”,中值压力中等,在0.3~1.5 MPa之间;孔喉半径主峰向中等孔径方向偏移,在0.3~1.5 μm之间,见图8b。

3类储层:排驱压力较高,在0.8~2 MPa之间;

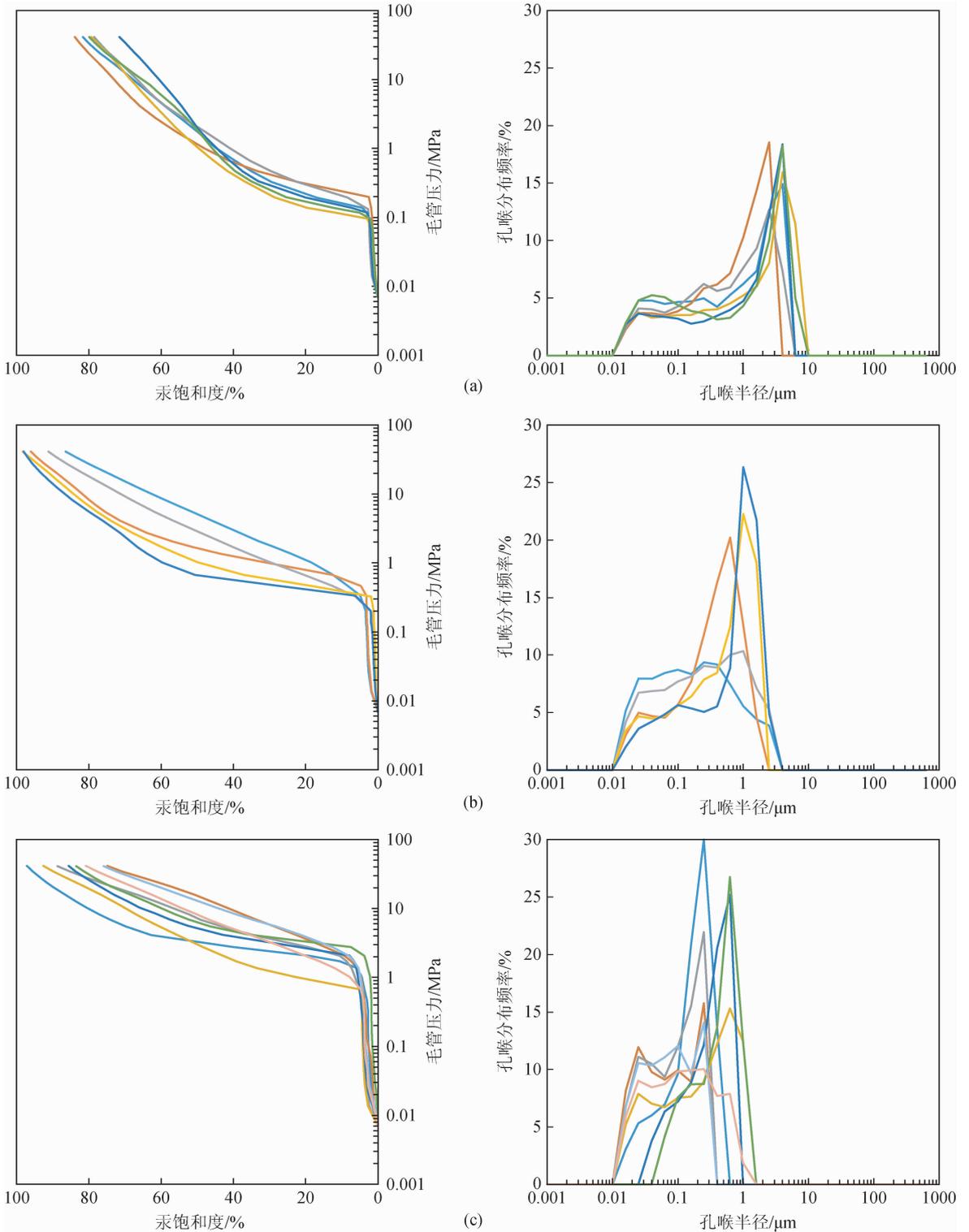


图8 B区块S油层毛管压力曲线及孔喉半径分布图

(a) 1类储层; (b) 2类储层; (c) 3类储层.

Fig. 8 Capillary pressure curves and pore throat radius distributions in S reservoir in block B

(a) Class 1 reservoir; (b) Class 2 reservoir; (c) Class 3 reservoir.

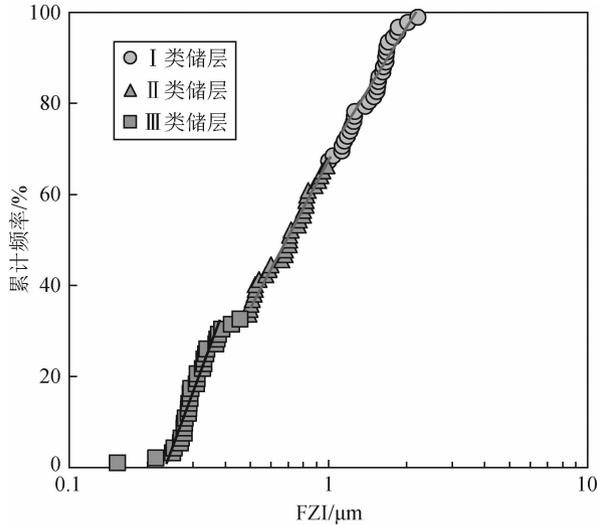


图9 流动单元指数累积频率图

Fig.9 Cumulative frequency diagram of FZI

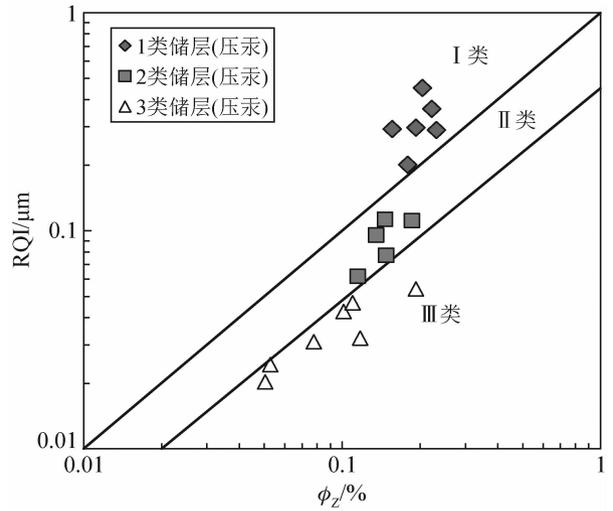


图11 压汞法储层类型划分结果与流动单元指数法储层类型划分结果对比

Fig.11 Comparison of the result of reservoir type classification on mercury injection experiment with that on flow unit index method

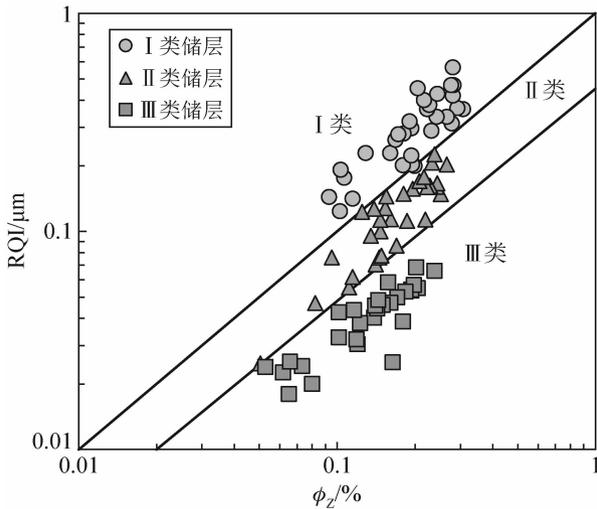


图10 孔隙体积和颗粒体积比(φ_z)与储层品质因子(RQI)交会图

Fig.10 Plot of RQI and φ_z

毛管压力曲线呈“直线型”，中值压力较大，在1~5 MPa之间；孔喉半径主峰向小孔径方向偏移，在0.05~0.7 μm之间，见图8c。

毛管压力曲线及孔喉分布形态特征等参数给出的储层类型划分界限是定性的，不同储层类型间存在交叠，且参数很难由常规测井资料获取。基于流动单元指数能够描述岩石孔隙结构特征，易于由常规测井资料获取，可以给出储层类型的定量划分标准，因此，引入流动单元指数概念，建立储层分类标准。流动单元指数 $FZI = 1 / (\sqrt{F_{ps}} \tau S_{vgr})$ ，其中， S_{vgr} 表示

单位颗粒体积岩石的孔隙空间内总表面积， τ 表示岩石孔隙曲折度， F_{ps} 表示岩石孔隙形状因子，这三个参数均反映了岩石孔隙结构变化。随单位颗粒体积岩石的孔隙空间内总表面积 S_{vgr} 增大，岩石孔隙曲折度 τ 增大，岩石孔隙形状因子 F_{ps} 增大，岩石孔隙结构变复杂，FZI 减小，故 FZI 可用于描述岩石孔隙结构变化，即相同 FZI 值，具有相似的孔隙结构。

根据 Kozeny 和 Carman 给出的渗透率与孔隙度的关系式：

$$K = \frac{1}{F_{ps} \tau^2 S_{vgr}^2} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}, \quad (1)$$

式中， K 为渗透率，单位为 μm^2 ； ϕ 为有效孔隙度，单位为 %。

定义储层品质指数 $RQI = 0.0314 \sqrt{K/\phi}$ ，其中渗透率单位为 $10^{-3} \times \mu\text{m}^2$ ，随着岩石渗透率与孔隙度比值降低，即储层品质指数 RQI 降低，岩石孔隙结构变得越复杂。令孔隙体积与颗粒体积比值为 $\phi_z = \phi / (1 - \phi)$ ，随着岩石孔隙度降低，即 ϕ_z 降低，岩石孔隙结构变得越复杂。将 FZI、RQI、 ϕ_z 代入式(1)，得出 $RQI = FZI \times \phi_z$ 。对该式两边取对数，则有：

$$\lg(RQI) = \lg(FZI) + \lg(\phi_z). \quad (2)$$

式(2)表明，在双对数坐标下， ϕ_z 与 RQI 的关系是斜率为 1 的直线，同一流动单元的特征点位于同一条斜率为 1 的直线周围，而不同流动单元的特

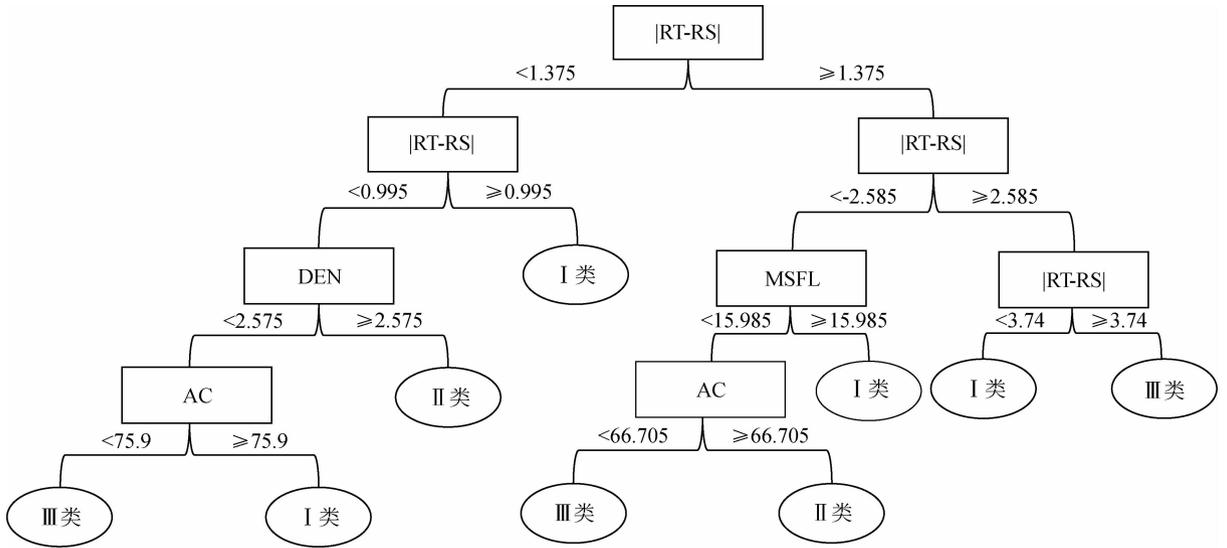


图 12 储层类型识别决策树模型

Fig. 12 Decision tree model of reservoir type classification

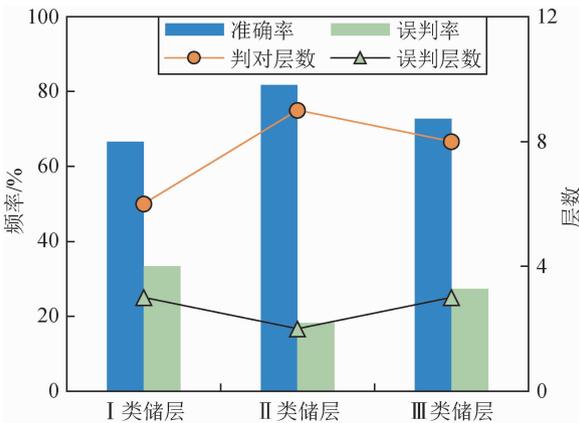


图 13 储层类型判别结果(决策树法)

Fig. 13 Result of reservoir type discrimination (decision tree method)

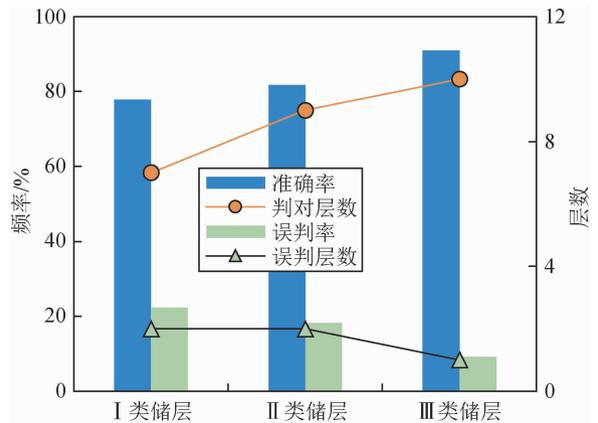


图 15 储层类型判别结果(BP神经网络法)

Fig. 15 Result of reservoir type discrimination (BP neural network method)

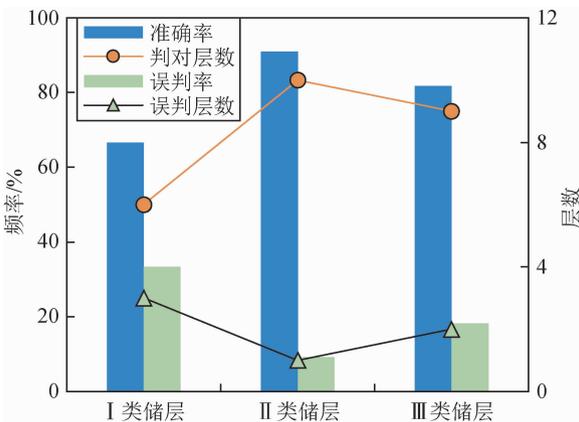


图 14 储层类型判别结果(最邻近结点法)

Fig. 14 Result of reservoir type discrimination(KNN method)

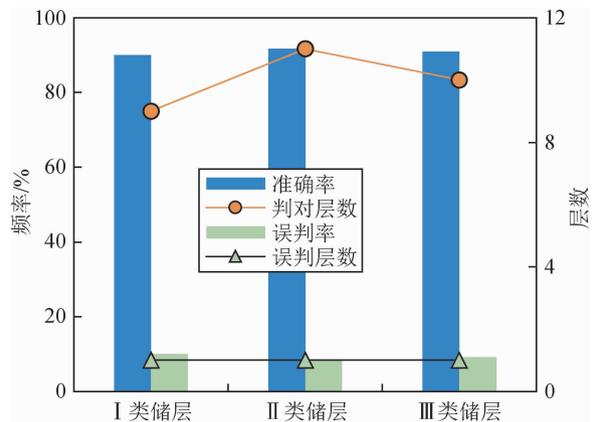


图 16 储层类型判别结果(支持向量机法)

Fig. 16 Result of reservoir type discrimination(SVM method)

征点位于多条斜率为 1 的直线周围,形成多个条带状分布形式;在流动单元指数的累计频率图中同一流动单元的样品点表现为相同的斜率,而不同流动单元的样品点表现为不同的斜率.据此可以进行流动单元的划分和识别.图 9 和图 10 分别给出了 B 区块 S 油层 92 块样品的流动单元指数累计频率图及 RQI 和 ϕ_z 交会图,从图中可知,将 B 区块 S 油层的砂岩储层划分为三类,即 3 种流动单元类型. I 类储层的流动单元指数大于 $1 \mu\text{m}$, II 类储层的流动单元指数在 $0.49 \sim 1 \mu\text{m}$ 之间, III 类储层的流动单元指

数小于 $0.49 \mu\text{m}$.为了验证基于流动单元指数的储层分类结果的合理性,利用压汞法划分的 3 类储层 18 块岩心数据,计算了 3 类储层 RQI 和 ϕ_z ,并绘制了 ϕ_z 与 RQI 交会图,见图 11.从图中可知,压汞法划分的 I 类、II 类和 III 类储层点分别落在流动单元指数划分的 I 类、II 类和 III 类储层区域内,由此说明,基于流动单元指数划分的储层类型标准是正确的,且其结果与基于压汞法划分的储层类型结果是一致的.因此, B 区块 S 油层储层类型划分标准见表 1.

表 1 B 区块 S 油层储层类型划分标准

Table 1 Classification standard of reservoir type in S reservoir in block B

储层类型	FZI/ μm	RQI/ μm	孔隙度/%		渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$		排驱压力	孔喉半径	压汞曲线形态
			范围	均值	范围	均值			
I	> 1	0.124 ~ 0.452	8.5 ~ 23.5	16.7	1.45 ~ 71.1	20.1	较低	较大	“下凹形”
II	0.49 ~ 1	0.047 ~ 0.199	4.8 ~ 21.2	14.5	0.03 ~ 9.88	3.01	中等	中等	“直线型”或“下凹形”
III	< 0.49	0.020 ~ 0.069	5.0 ~ 19.2	11.9	0.02 ~ 0.85	0.26	较高	较小	“直线型”

3 中低孔特低渗储层类型判别

在确定储层类型划分标准后,选用何种方法提高储层类型判别准确率就显得尤为重要.根据 B 区块 S 油层的 92 块岩心分析物性值,结合对应的测井曲线特征,将其细分为 77 小层.利用计算的 77 层的流动单元指数值,根据储层类型划分标准(表 1),确定 I 类储层 22 层, II 类储层 29 层, III 类储层 26 层.抽取其中 46 层作为训练集,其中 I 类储层 13 层, II 类储层 18 层, III 类储层 15 层;剩余 31 层作为验证集,其中 I 类储层 9 层, II 类储层 11 层, III 类储层 11 层.将 46 个样本训练集的 3 种储层类型作为期望输出值,将优选的判别储层类型的敏感测井响应或参数作为输入值,采用机器学习方法,建立储层类型判别模型,并利用 31 个样本的验证集,验证模型精度.

3.1 储层类型敏感测井响应分析

选取合适的测井响应作为判别储层类型方法的输入项,可以提高储层类型判别准确率.然而,能反映储层类型的测井响应,均受渗透率主控因素的影响, B 区块 S 油层特低渗储层渗透率的主要影响因素分析表明泥质含量、钙质含量、孔隙度是影响储层渗透率的因素,而孔隙结构是影响储层渗透率的主要因素.研究区储层密度测井、声波测井、中子测井

等三种孔隙度测井响应是储层泥质含量、钙质含量、孔隙度、流体性质和饱和度的函数,对于油水层,流体性质和饱和度对储层三种孔隙度测井响应影响很小,而泥质含量、钙质含量、孔隙度对储层三种孔隙度测井响应影响较大,故选取三孔隙度测井反应储层泥质含量、钙质含量、孔隙度变化.对于渗透性较好的油层,呈现低侵特征,浅侧向电阻率测井值小于深侧向电阻率测井值;对于渗透性较好的淡水泥浆水层,呈现高侵特征,浅侧向电阻率测井值大于深侧向电阻率测井值,而对于渗透性差的油层或水层,侵入特征不明显,深侧向电阻率测井值近似等于浅侧向电阻率测井值,故选取深浅侧向电阻率测井差值的绝对值反应研究区储层渗透性变化,即孔隙结构变化.微球形聚焦测井响应主要受研究区储层钙质含量、泥质含量、孔隙度等参数影响,故选取微球形聚焦测井反应储层钙质含量、泥质含量、孔隙度变化.由于研究区 S 油层存在含介形虫储层,其自然伽马测井响应显示为高值,因此,自然伽马测井不能用于求取含介形虫储层的泥质含量,故不选取自然伽马做为储层类型判别的敏感测井响应.

综上所述,选取密度测井、声波测井、中子测井、微球形聚焦测井、深浅侧向电阻率测井差值的绝对值等 5 个参数做为储层类型判别的敏感测井响应或参数.

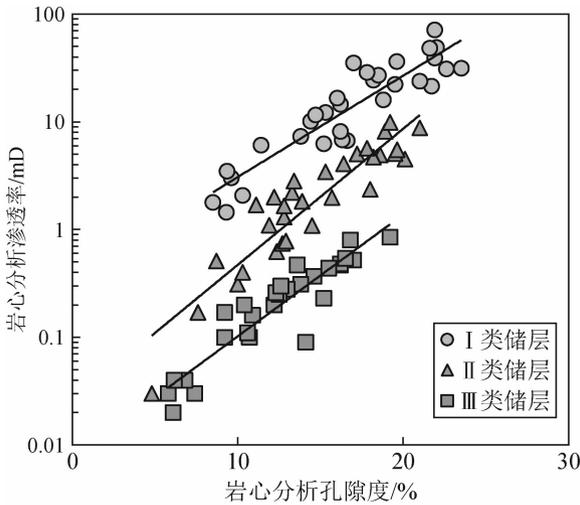


图 17 基于储层分类的孔隙度与渗透率关系图

Fig. 17 Plot of porosity and permeability on reservoir classification

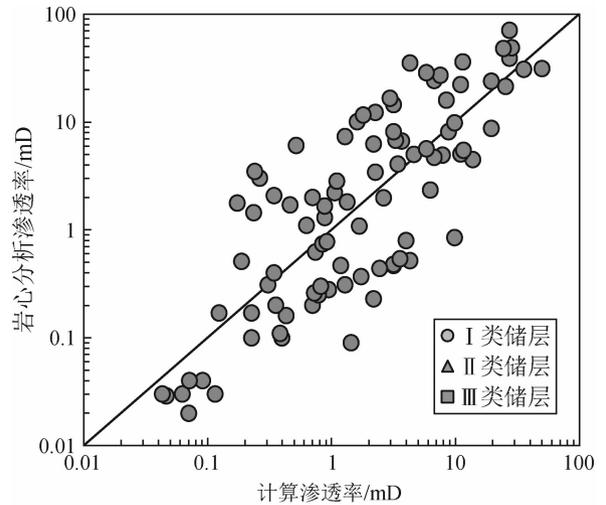


图 19 储层分类前计算渗透率与岩心分析渗透率交会图

Fig. 19 Plot of permeability calculated on unclassified reservoir and measured permeability

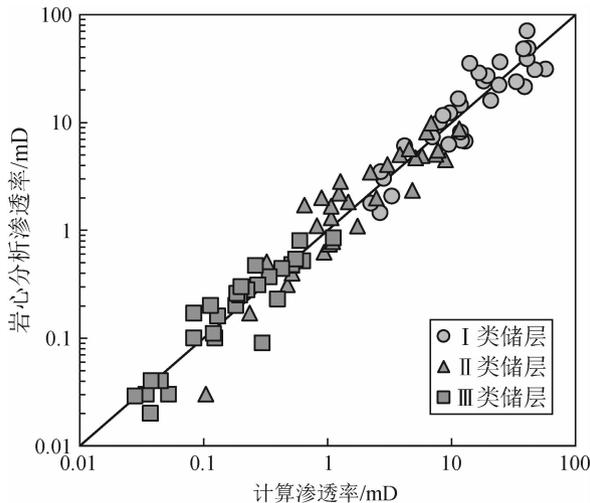


图 18 基于储层分类的计算渗透率与岩心分析渗透率交会图

Fig. 18 Plot of permeability calculated on reservoir classification and measured permeability

3.2 基于机器学习分类算法的储层类型判别

通过 77 个样本的敏感测井响应或参数与流动单元指数的相关性分析,发现 5 个参数与流动单元指数之间的相关性均很差,故采用计算流动单元指数进而判别储层类型的方法不适用研究区储层类型判别.为此,引入决策树、BP 神经网络等 4 种机器学习算法建立储层类型判别模型.

3.2.1 决策树判别储层类型

决策树(DT)是一个有监督学习的预测模型,输

入确定类型的样本,按照节点分裂准则(信息增益、信息增益比、基尼指数),从根节点开始,到每一个内部节点,确定最优的划分属性,最后,到叶节点(分类结果)为止,进而得到一种树形结构的分类模型.决策树生成算法有 ID3、C4.5、CART,其中, ID3 算法是根据最大信息增益的原则选取划分属性,这种算法更倾向于选择取值较多的属性,该方法没有考虑连续特征;C4.5 算法采用最大信息增益比的原则选取划分属性,这种算法更倾向于选择取值较少的属性,且能处理连续属性与缺省值;CART 算法采用 GINI 指数选取划分属性,与其他两种算法不同,它给出了二叉树模型.决策树算法的优点是易于理解与实现,并能给出明确的分类模型.

将 3 种储层类型作为期望输出值,将 5 个敏感测井响应或参数作为输入值,使用 46 个样本,建立决策树判别模型.本文采用贝叶斯优化方法对模型的超参数进行优选,在迭代次数设置为 30 条件下,得出当最大分裂数为 29,以基尼指数为分裂准则时,模型训练准确率最高,为 80.4%.决策树判别模型见图 12.其中, I 类储层判对 12 层, II 类储层判对 14 层, III 类储层判对 11 层,共判对 37 层.利用 31 个测试样本对决策树分类模型精度进行验证,其中 I 类储层判对 6 层, II 类储层判对 9 层, III 类储层判对 8 层,预测准确率为 74.2%,判别效果见图 13.由图可知,决策树储层类型判别方法对于 II 类储层判别效果好,对于 III 类储层判别效果较好,对于 I 类储层判别效果一般.

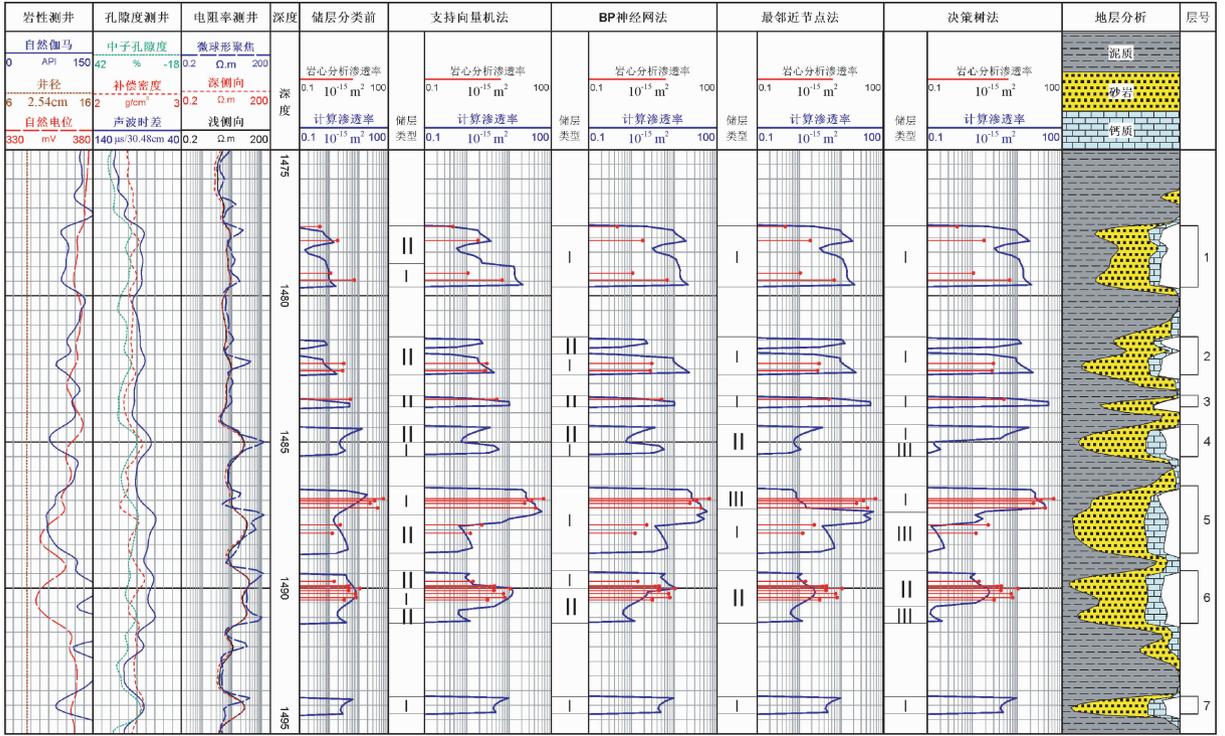


图 20 XX1 井 S 油层渗透率解释成果图

Fig. 20 The calculation results of permeability for well XX1

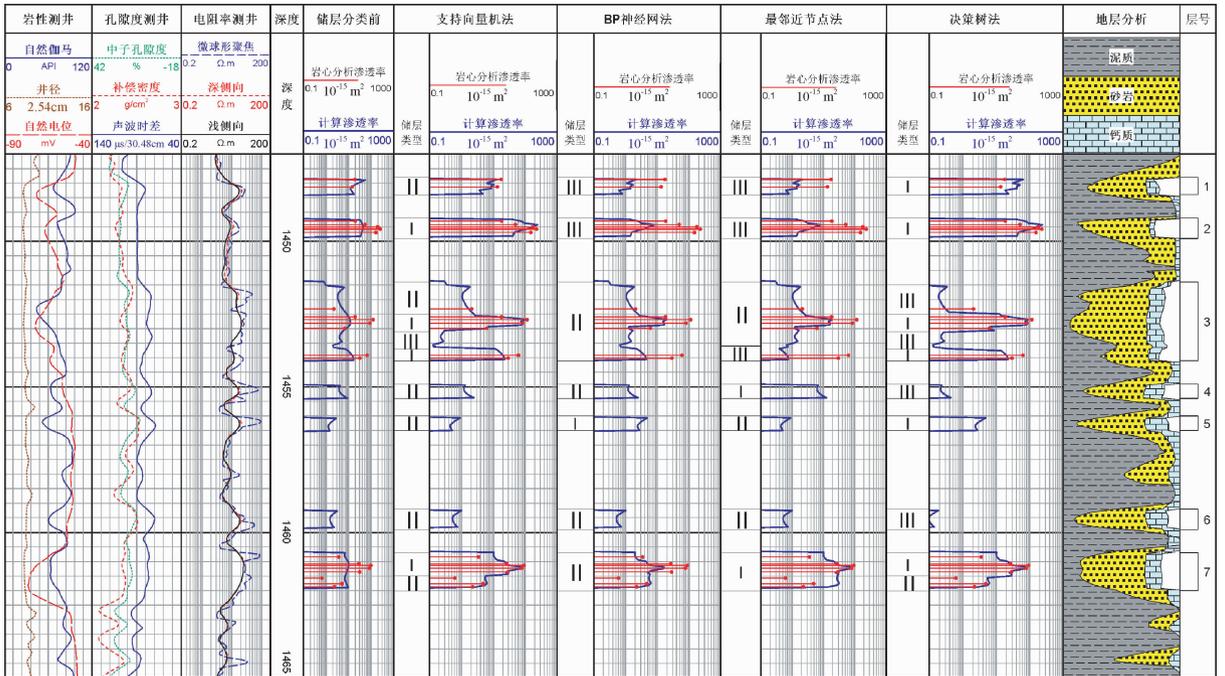


图 21 XX2 井 S 油层渗透率解释成果图

Fig. 21 The calculation results of permeability for well XX2

3.2.2 最邻近结点法判别储层类型

最邻近结点法(KNN)是在训练集中数据和标签已知的情况下,输入测试数据,计算测试数据与各个训练数据之间的距离,按照距离的递增关系进行排序,选取距离最小的 K 个点,确定前 K 个点所在类别的出现频率,将前 K 个点中出现频率最高的类别作为测试数据的预测分类.该方法的优点是简单、易实现,精度高、对异常值不敏感(Shokrziade *et al.*, 2021).但对于样本容量大的数据集计算量比较大.本文仅有46个训练样本以及3种训练类型,因此,KNN算法较为适用.将3种储层类型作为期望输出值,将5个敏感测井响应或参数作为输入值,使用46个样本,建立了基于最邻近结点法的分类模型.本文采用贝叶斯优化方法对模型的超参数进行优选,在迭代次数设置为30条件下,得出当 K 值为10,采用Minkowski度量方法计算两点之间的距离,距离加权函数为距离平方倒数时,模型训练准确率最高,为84.7%,其中I类储层判对11层,II类储层判对15层,III类储层判对13层,共判对39层.利用31个测试样本对最邻近结点法分类模型精度进行验证,其中I类储层判对6层;II类储层判对10层;III类储层判对9层,预测准确率为80.6%,判别效果见图14.由图可知,基于最邻近结点法的储层类型判别方法对II类储层判别效果很好,对III类储层判别效果好,对I类储层判别效果一般.

3.2.3 BP神经网络法判别储层类型

人工神经网络(ANN)判别储层类型,就是通过已知样本的学习获得识别模式,从而对未知层段进行预测.本文采用人工神经网络中的BP神经网络模型(Jolliffe, 1986; Ouadfeul and Aliouane, 2015).网络分为3层即输入层、隐藏层与输出层.网络的学习过程就是不断调整神经元之间的连接权,直到输出值与期望输出值间的误差达到足够小,从而确定输入层到输出层之间的运算网络.将待预测的样本数据输入建立的运算网络,可得到预测的输出值.该方法的优点是可以模拟几乎全部的连续函数,适用于复杂的分类问题.将3种储层类型作为期望输出值,将5个敏感测井响应或参数作为输入值,使用46个样本作为训练样本.将I类储层设置为 $[0.9, 0.1, 0.1]$,II类储层设置为 $[0.1, 0.9, 0.1]$,III类储层设置为 $[0.1, 0.1, 0.9]$,建立了基于BP神经网络的分类模型.模型预测结果也为一个包含三个数字的数组,当第1个数字最大时,为I类储层;当第2个数字最大时,为II类储层;当第3个数字最大时,为III

类储层.当隐藏层层数从6层逐渐增大到16层,得出当隐藏层为12层时,模型训练准确率最高,为86.9%.其中I类储层判对13层,II类储层判对16层,III类储层判对11层,共判对40层.利用31个测试样本对BP神经网络分类模型精度进行验证,其中I类储层判对7层,II类储层判对9层,III类储层判对10层,预测准确率为83.9%.判别效果见图15.由图可知,BP神经网络储层类型判别方法对III类储层判别效果很好,对于I类、II类储层判别效果好.

3.2.4 支持向量机法判别储层类型

支持向量机(SVM)的主要实现思想是选择一些非线性映射函数(线性核函数、多项式核函数、高斯核函数/径向基核函数、sigmoid核函数等),将输入样本数据从低维线性不可分特征空间映射到高维线性可分特征空间,并在分类误差最小的前提下寻找出分类间隔最大的超平面,通过分离超平面实现对输入的样本数据进行分类.选取合适的核函数可以提高支持向量机模型的预测精度,目前主要有4种类型的核函数,其中高斯核函数最为常用.该类型的核函数的优点是可以映射到无限高的维度,使得决策边界更为准确,缺点是分类界限复杂时,容易过拟合,导致运算时间较长(Nazari *et al.*, 2011; Park and Park, 2021).将3种储层类型作为期望输出值,将5个敏感测井响应或参数作为输入值,使用46个样本,建立了基于支持向量机判别模型.本文采用贝叶斯优化方法对模型的超参数进行优选,在迭代次数设置为30条件下,得出当核函数为高斯核函数,分类方法为一对多,框约束级别为995.2056时,模型训练准确率最高,为93.4%,其中,I类储层判对12层,II类储层判对16层,III类储层判对15层,共判对43层.利用31个测试样本对支持向量机分类模型精度进行验证,其中I类储层判对8层,II类储层判对10层,III类储层判对10层,预测准确率为90.3%,判别效果见图16.由图可知,基于支持向量机的储层类型判别方法对三类储层判别效果均很好,且判别准确率明显高于其他3种方法.

4 中低孔特低渗储层渗透率确定方法

利用划分的3类储层的岩心分析孔渗数据,分类建立了储层孔隙度与渗透率关系式,见图17.从图中可以看出孔隙度与渗透率关系明显变好.基于储层分类的渗透率计算公式为:

$$K = \begin{cases} 0.2752e^{0.2358 \times \phi} & \text{I 类} \\ 0.0267e^{0.2855 \times \phi} & \text{II 类} \\ 0.0076e^{0.2581 \times \phi} & \text{III 类} \end{cases} \quad (5)$$

利用式(5)计算的储层渗透率与岩心分析渗透率交会图见图 18,可以看出储层分类后计算的储层渗透率平均相对误差为 38.7%,而储层分类前计算的储层渗透率平均相对误差为 153.6%(图 19),故储层分类后计算的储层渗透率精度明显提高,能满足特低渗储层渗透率计算要求。

5 实际应用效果评价

利用研究区 10 口取心井 77 层的岩心分心渗透率对本文给出渗透率计算方法进行验证,储层分类前计算渗透率平均相对误差为 159.7%;基于决策树、最邻近结点、BP 神经网络和支持向量机储层分类的渗透率模型计算的平均相对误差分别为 83.8%、76.4%、54.2%、43.1%,均明显低于储层分类前计算渗透率的平均相对误差,且基于支持向量机储层分类的渗透率模型计算渗透率精度最高。

为进一步检验建立的 4 种基于机器学习储层分类的渗透率模型适用性,选取研究区 XX1 和 XX2 两口取心井,利用建立的 4 种基于机器学习储层分类的渗透率模型计算研究区 S 油层的渗透率,并将计算渗透率与岩心分析渗透率进行对比。

图 20 给出了 XX1 井 1475 ~ 1495 m 井段储层渗透率解释结果。图中第一道至第三道给出 9 条测井曲线,第十道给出了泥质含量、钙质含量、孔隙度,第五道给出储层分类前渗透率计算结果,第六道至第九道给出 4 种基于机器学习储层分类的渗透率模型的储层分类结果以及计算渗透率与岩心分析渗透率对比结果。从图中可以看出,基于支持向量机储层分类的渗透率模型计算渗透率与岩心分析渗透率吻合最好,其平均相对误差最低(59.4%),明显低于储层分类前计算渗透率的平均相对误差(93.4%)。

图 21 给出了 XX2 井 1447.0 ~ 1465 m 井段储层渗透率解释结果。图中第六道至第九道给出 4 种基于机器学习储层分类的渗透率模型的储层分类结果以及计算渗透率与岩心分析渗透率对比结果,第十道给出储层分类前渗透率计算结果。从图中可以看出,基于支持向量机储层分类的渗透率模型计算渗透率与岩心分析渗透率吻合最好,其平均相对误差最低(60.8%),明显低于储层分类前计算渗透率的平均相对误差(148.6%)。

6 结论

(1) B 区块 S 油层特低渗储层渗透率受岩性、物性以及孔隙结构的影响,平均孔隙半径、半径均值、最大孔隙半径与渗透率相关性最好,而孔隙度、泥质含量、钙质含量与渗透率相关性较好,孔隙度、泥质含量、钙质含量、孔隙结构是影响 B 区块 S 油层特低渗储层渗透率的主要因素,其中,孔隙结构是影响 B 区块 S 油层特低渗储层渗透率的关键因素。

(2) 综合压汞曲线和孔喉半径分布特征以及流动单元指数大小将 B 区块 S 油层特低渗储层类型划分成 3 类, I 类储层,压汞曲线为“下凹型”,孔喉半径较大,排驱压力较低, $FZI > 1$; II 类储层,压汞曲线为“下凹型”或“直线型”,孔喉半径中等, $0.49 < FZI \leq 1$,排驱压力中等; III 类储层,压汞曲线为“直线型”,孔喉半径较小,排驱压力较高, $FZI \leq 0.49$ 。

(3) B 区块 S 油层特低渗储层类型判别的敏感测井响应或参数为密度测井、声波测井、中子测井、微球形聚焦测井、深浅侧向电阻率测井差值的绝对值。决策树法、最邻近结点法、BP 神经网络法和支向量机法等 4 种机器学习算法均能较好地区分 B 区块 S 油层特低渗储层的 3 种储层类型,且判别准确率依次增大。其中,基于支持向量机的储层类型判别方法对 3 类储层判别效果均很好,且判别准确率明显高于其他 3 种方法。

(4) 基于储层分类的渗透率模型计算 B 区块 S 油层特低渗储层渗透率精度明显高于储层分类前渗透率计算精度,且基于支持向量机储层分类的渗透率模型计算 B 区块 S 油层特低渗储层渗透率精度最高。

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Cheng M W. 2016. Calculation method of logging permeability based on reservoir classification. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)* (in Chinese), 13(35): 42-46, 52, doi: 10.3969/j.issn.1673-1409(s).2016.35.010.
- Chu Z H, Xie J. 1994. The evaluation of the permeability by well logging information. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 21(1): 46-52.
- Cui G X, Lu F Y, Wang S, et al. 2021. Classification and evaluation of tight sandstone reservoir of He8 member in Longdong area. *Petroleum Geology and Engineering* (in Chinese), 35(3): 44-49.
- Dai L, Zhao C S. 2021. Classification and discrimination method of reservoir flow unit index based on Fisher and probability method.

- Complex Hydrocarbon Reservoirs (in Chinese), 14(2): 73-79, doi: 10.16181/j.cnki.fzyqc.2021.02.014.
- Du C, Chen R, Zhao L S, *et al.* 2013. Calculation of permeability of sandstone. Science & Technology Information (in Chinese), (8): 130, doi: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2013.08.139.
- Gan L, He D B, Guo J L, *et al.* 2019. Application of Machine Learning Method in Reservoir Classification. Mathematics in Practice and Theory (in Chinese), 49(13): 138-144.
- Gao Y, Gao C Q, Zhao B, *et al.* 2019. Permeability calculation based on reservoir classification for low permeability tight reservoirs in East China Sea. Fault-Block Oil and Gas Field (in Chinese), 26(3): 309-313.
- Han B H, Wang F, Liu Q R, *et al.* 2021. Review of research progress on evaluation of logging reservoir classification methods. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(5): 1966-1974, doi: 10.6038/pg2021EE0431.
- He S L, Zhang H R, Ma W H, *et al.* 2017. Pore structure evaluation methods and application of complex reservoir using conventional well logging data in the Yinggehai basin. Progress in Geophysics (in Chinese), 32(6): 2642-2649, doi: 10.6038/pg20170647.
- Jing C, Song Z Q, Pu C S, *et al.* 2013. Refined permeability of tight gas reservoir based on petrophysical facies classification—Taking the study of tight gas reservoir permeability in the eastern of Sulige for an example. Progress in Geophysics (in Chinese), 28(6): 3222-3230, doi: 10.6038/pg20130649.
- Jing W X. 2002. A theoretical method for calculation of sandstone reservoir with conventional logging data. Well Logging Technology (in Chinese), 26(1): 46-48, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2002.01.014.
- Jolliffe I T. 1986. Principal Component Analysis. New York: Springer, 51-52.
- Li Y S, Zhang Z S, Zhang C M, *et al.* 2009. Application of mercury injection data to Chang 6 reservoir classification in Changqing area. Lithologic Reservoirs (in Chinese), 21(2): 91-93, 132.
- Li Z C, Zhong S M, Yang Y J. 2013. Reservoir classification and productivity forecast in Fuyu layer Chaochang district. Progress in Geophysics (in Chinese), 28(5): 2561-2568, doi: 10.6038/pg20130535.
- Lu J K, Hao B, Li C S, *et al.* 2021. Permeability prediction of tight sandstone reservoirs based on flow unit classification. Petroleum Science Bulletin (in Chinese), 6(3): 369-379.
- Nazari S, Kuzma H A, Rector III J W. 2011. Predicting permeability from well log data and core measurements using support vector machines. // Proceedings of SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Society of Exploration Geophysicists, 2004-2008.
- Ouadfeul S A, Aliouane L. 2015. Total organic carbon prediction in shale gas reservoirs from well logs data using the multilayer perceptron neural network with levenberg marquardt training algorithm: application to Barnett shale. Arabian Journal for Science and Engineering, 40(11): 3345-3349.
- Park B, Park C. 2021. Kernel variable selection for multicategory support vector machines. Journal of Multivariate Analysis, 186: 104800, doi: 10.1016/j.jmva.2021.104800.
- Shokrzade A, Ramezani M, Tab F A, *et al.* 2021. A novel extreme learning machine based KNN classification method for dealing with big data. Expert Systems with Applications, 183: 115293, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115293.
- Sima L Q, Xiao H, Yuan L, *et al.* 2012. Research on reservoir flow unit based on bp neural network technology. Well Logging Technology (in Chinese), 36(4): 421-425, 430, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2012.04.014.
- Song N, Liu Z, Zhang J F, *et al.* 2013. Permeability prediction of heterogeneous sand reservoir based on flow units classification. Science & Technology Review (in Chinese), 31(2): 68-71.
- Sun J M, Yan G L. 2012. Review on absolute permeability model. Well Logging Technology (in Chinese), 36(4): 329-335, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2012.04.001.
- Wang J F, Bi Y B, Li J F, *et al.* 2010. A new method to evaluate reservoir with capillary pressure curve by means of instantaneous mercury injection saturation. Journal of Daqing Petroleum Institute (in Chinese), 34(3): 54-59.
- Wang M, Liu Z J, Yang Y Q, *et al.* 2021. Permeability calculation in reservoir flow unit based on regional logging big data and experimental data. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(1): 274-280, doi: 10.6038/pg2021EE0199.
- Wang Q H, Zhu M, Feng J, *et al.* 2021. A method for predicting productivity of sandstone reservoirs based on permeability synthesis technology. Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), 49(6): 105-112.
- Xie W B, Zhou F M, Si Z W, *et al.* 2014. New calculation model of permeability in sandstone formation by the mathematical derivation. Well Logging Technology (in Chinese), 38(5): 553-557.
- Yang L, Cheng D J, Liu B L, *et al.* 2014. Reservoir classification and application based on mercury injection coefficient. Science & Technology Review (in Chinese), 32(24): 46-50.
- Yu H, Linghu S, Wang Q, *et al.* 2020. A new method for calculating permeability of sandstone reservoir. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition) (in Chinese), 42(2): 125-132.
- Zhao J, Zhang T, He S L, *et al.* 2021. Prediction of reservoir permeability by deep belief network based on optimized parameters. Reservoir Evaluation and Development (in Chinese), 11(4): 577-585, doi: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.04.014.

附中文参考文献

- 程梦薇. 2016. 基于储层分类的渗透率测井计算方法. 长江大学学报(自科版), 13(35): 42-46, 52, doi: 10.3969/j.issn.1673-1409(s).2016.35.010.
- 楚泽涵, 谢京. 1994. 用测井方法估算渗透率的评述. 石油勘探与开发, 21(1): 46-52.
- 崔改霞, 卢帆雨, 王松, 等. 2021. 陇东地区盒8段致密砂岩储层分类评价. 石油地质与工程, 35(3): 44-49.
- 代玲, 赵澄圣. 2021. 基于 Fisher 和概率法的储层流动单元指数分类判别方法. 复杂油气藏, 14(2): 73-79, doi: 10.16181/j.cnki.fzyqc.2021.02.014.
- 杜超, 陈嵘, 赵立帅, 等. 2013. 利用泥质含量与孔隙度计算砂岩渗透率. 科技资讯, (8): 130, doi: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2013.08.139.
- 干磊, 何东博, 郭建林, 等. 2019. 机器学习方法在储层分类中的应用. 数学的实践与认识, 49(13): 138-144.
- 高颖, 高楚桥, 赵彬, 等. 2019. 基于储层分类计算东海低渗致密储层渗透率. 断块油气田, 26(3): 309-313.
- 韩博华, 王飞, 刘倩茹, 等. 2021. 测井储层分类评价方法研究进展综述. 地球物理学进展, 36(5): 1966-1974, doi: 10.6038/pg2021EE0431.
- 何胜林, 张海荣, 马文宏, 等. 2017. 常规测井评价复杂砂岩储层孔隙结构的方法与应用——以莺歌海盆地黄流组储层为例. 地球物理学进展, 32(6): 2642-2649, doi: 10.6038/pg20170647.
- 景成, 宋子齐, 蒲纯生, 等. 2013. 基于岩石物理相分类确定致密气储层渗透率——以苏里格东区致密气储层渗透率研究为例. 地球物理学进展, 28(6): 3222-3230, doi: 10.6038/pg20130649.
- 荆万学. 2002. 常规测井资料计算砂岩储层渗透率的理论思考. 测井技术, 26(1): 46-48, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2002.01.014.
- 李彦山, 张占松, 张超谟, 等. 2009. 应用压汞资料对长庆地区长6段储层进行分类研究. 岩性油气藏, 21(2): 91-93, 132.

- 李郑辰, 钟淑敏, 杨永军. 2013. 朝长地区扶余油层储层分类与产能预测. 地球物理学进展, 28(5): 2561-2568, doi: 10.6038/pg20130535.
- 鲁健康, 郝彬, 李程善, 等. 2021. 基于流动单元分类的致密砂岩储层渗透率预测. 石油科学通报, 6(3): 369-379.
- 司马立强, 肖华, 袁龙, 等. 2012. 基于BP神经网络技术的储层流动单元研究. 测井技术, 36(4): 421-425, 430, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2012.04.014.
- 宋宁, 刘振, 张剑风, 等. 2013. 基于流动单元分类的非均质砂岩储集层渗透率预测. 科技导报, 31(2): 68-71.
- 孙建孟, 闫国亮. 2012. 渗透率模型研究进展. 测井技术, 36(4): 329-335, doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2012.04.001.
- 王剑峰, 毕研斌, 李景发, 等. 2010. 基于瞬时进汞饱和度的毛细管压力曲线储层评价方法. 大庆石油学院学报, 34(3): 54-59.
- 王猛, 刘志杰, 杨玉卿, 等. 2021. 基于区域测井大数据和实验资料的储层流动单元渗透率建模方法. 地球物理学进展, 36(1): 274-280, doi: 10.6038/pg2021EE0199.
- 王清辉, 朱明, 冯进, 等. 2021. 基于渗透率合成技术的砂岩油藏产能预测方法. 石油钻探技术, 49(5): 105-112.
- 谢伟彪, 周凤鸣, 司兆伟, 等. 2014. 基于数理推导的砂岩地层渗透率计算新模型. 测井技术, 38(5): 553-557.
- 杨玲, 程道解, 刘保磊, 等. 2014. 基于压汞系数的储层评价分类方法. 科技导报, 32(24): 46-50.
- 于华, 令狐松, 王谦, 等. 2020. 一种砂岩储层渗透率计算新方法. 西南石油大学学报(自然科学版), 42(2): 125-132.
- 赵军, 张涛, 何胜林, 等. 2021. 基于参数优选的储层渗透率深度置信网络模型预测初探. 油气藏评价与开发, 11(4): 577-585, doi: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.04.014.