

利用弹性参数识别致密砂岩储层流体性质

边会媛¹, 王 飞², 岳崇旺², 张永浩³

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
3. 中国石油测井有限公司, 陕西 西安 710077)

摘 要:鄂尔多斯盆地苏里格气田致密砂岩储层的孔隙结构复杂, 储层低孔、低渗、非均质性特征明显, 储层流体识别困难。基于偶极声波测井资料, 以致密砂岩岩石弹性参数为基础, 利用指标法、交会图分析法、支持向量机进行储层流体性质识别的方法研究。结果表明: 纵横波时差比、地层压缩系数与泊松比比值、纵波弹性模量差比可以作为气层识别的指标; 引入流体敏感度评价参数, 优选出能敏感反映储层含气性的弹性参数, 如拉梅系数与密度之积、拉梅系数、体积模量、拉梅系数与剪切模量之比、弹性模量, 结合支持向量机对流体进行识别, 能够提高流体识别精度; 对有试气结论的储层样本进行实际分类处理, 利用支持向量机判别样本的成功率为 92%。通过对苏里格气田的 X350 井进行实际分类处理, 并经过试气结论验证, 证明优选能敏感反映储层含气性的弹性参数, 结合支持向量机对储层流体进行识别的方法是切实可行的。

关键词: 测井学; 流体识别; 弹性参数; 气层指标; 支持向量机; 敏感度; 交会图; 致密砂岩

中图分类号: P631; TE122

文献标志码: A

Fluid Property of Tight Sandstone Reservoir Identified with Elastic Parameters

BIAN Hui-yuan¹, WANG Fei², YUE Chong-wang², ZHANG Yong-hao³

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3. CNPC Logging Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China)

Abstract: Tight sandstone reservoirs in Sulige gasfield of Ordos Basin have the characteristics of complicated pore structure, low porosity, low permeability and strong heterogeneity, and the fluid identification of reservoir is difficult. According to the dipole acoustic logging data, based on rock elastic parameters of tight sandstone, fluid properties of tight sandstone reservoir identified by index method, crossplot method and support vector machine were discussed. The results show that ratio of time differences of longitudinal and shear waves, ratio of compressibility and poisson ratio and ratio of differences of elasticity moduli of longitudinal wave can be used to identify the gas reservoir; the gas-sensitive elastic parameters are selected optimally, which are fluid sensibility evaluation parameters including product of Lamé coefficient and density, Lamé coefficient, bulk modulus, ratio of Lamé coefficient and shear modulus and elasticity modulus, and the accuracy of fluid identified by support vector machine is improved; compared with the gas production test results of reservoir sample, the prediction matching rate reaches 92% by support

收稿日期: 2014-09-11

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05009-001)

作者简介: 边会媛(1986-), 女, 河北唐山人, 工学博士研究生, E-mail: smilebianhuiyuan@126.com。

通讯作者: 王 飞(1983-), 男, 河北保定人, 讲师, 工学博士, E-mail: wangfeijlu-147@163.com。

vector machine. Finally, well X350 in Sulige gasfield was used to verify the gas production test results. It is verified that the gas-sensitive elastic parameters selected optimally are used to identify the reservoir fluid by the means of support vector machine.

Key words: well logging; fluid identity; elastic parameter; gas formation indicator; support vector machine; sensitivity; crossplot; tight sandstone reservoir

0 引言

储层含气时,岩石的力学参数将会发生改变,如纵波时差增大,横波时差基本不变,储层岩石泊松比降低,地层压缩系数升高等^[1]。利用偶极声波测井资料分析得到的纵横波时差,结合常规密度测井资料可以得到储层岩石的弹性模量、体积模量以及泊松比等岩石力学参数,这些弹性参数都能在一定程度上反映储层的含气性^[2-4]。支持向量机结构简单,泛化能力比较强,且能够克服神经网络存在局部极小点的缺点,尤其是在解决小样本、非线性和高维数模式识别方面具有特有的优势,能够用于储层的流体识别^[5-10]。

苏里格气田致密砂岩储层的孔隙结构复杂,储层低孔、低渗、非均质性特征明显,储层流体识别困难^[11-12]。笔者利用偶极声波测井资料,建立纵横波时差比、地层压缩系数与泊松比比值、纵波弹性模量差比 3 个气层识别指标来进行流体识别,并且利用交会图分析法研究岩石各种弹性属性之间的相互关系,确定能够区分储层岩性及含气性的弹性参数。由于苏里格气田地质条件复杂,交会图分析法不能将反映储层流体性质的影响因素综合考虑进来,进而影响流体性质的识别精度,为此引入流体敏感度评价参数,优选出反映储层含气性敏感的弹性参数,结合支持向量机对流体进行识别,提高流体识别精度。

1 单参数流体识别指标法

在含气地层中,地层纵波速度减小明显,而横波速度基本不变,因此,与饱含水地层的纵横波速度比比较,含气地层的纵横波速度比偏小,并且油、气、水的压缩系数是不同的。气的压缩系数最大,水的压缩系数最小(表 1)。根据气、水的这些性质可以识别气层。

1.1 纵横波时差比

当岩石中天然气饱和时,纵波时差会增大,横波时差基本不变,导致纵横波时差比增大,因此,可通过完全饱和水时纵横波时差比与实测纵横波时差比

表 1 典型流体与骨架的物性

Tab. 1 Physical Property of Typical Fluids and Skeletons

介质	密度/(g·cm ⁻³)	波速/(m·s ⁻¹)	压缩系数/GPa ⁻¹
油	0.830 0	1 200.0	0.837
天然气	0.139 8	629.7	18.051
水	1.000 0	1 500.0	0.444
砂岩骨架	2.650 0	3 720.0	0.027
灰岩骨架	2.700 0	6 130.0	0.020
泥岩	1.600 0~2.000 0	1 830.0~2 440.0	0.050

注:数据引自文献[13]。

的差值来指示气层。

利用 Gassman 方程计算储层含气时岩石的纵横波时差比^[14]和纯水层岩石的纵横波时差比

$$D_{TR} = \sqrt{\left[K_d + \frac{4}{3\mu_d} + \frac{(1-\beta)^2}{1-\varphi\beta/K_{ma} + \varphi/K_f} \right] \frac{1}{\mu_d}} \quad (1)$$

$$D_{TRW} = \sqrt{\left[K_d + \frac{4}{3\mu_d} + \frac{(1-\beta)^2}{1-\varphi\beta/K_{ma} + \varphi/K_w} \right] \frac{1}{\mu_d}} \quad (2)$$

式中: D_{TR} 为储层含气时岩石的纵横波时差比; D_{TRW} 为纯水层岩石的纵横波时差比; μ_d 为干岩石剪切模量; K_f 为孔隙流体体积模量; K_w 为地层水体积模量; K_d 为干岩石体积模量; K_{ma} 为岩石基质体积模量; φ 为孔隙度; β 为毕渥(Biot)数。

气层识别指标 ΔR 的计算公式为

$$\Delta R = D_{TRW} - D_{TR} \quad (3)$$

流体识别标准:通过声波全波资料获得储层含气时岩石的纵横波时差比实际值,将其与纯水层岩石的纵横波时差比进行比较,当前者大于后者时,即储层纵横波时差比小于水层背景值,则认为储层是气层。

1.2 地层压缩系数与泊松比比值

当岩石中天然气饱和时,地层压缩系数(C_B)增大,泊松比(σ)减小,从而导致 C_B/σ 值增大。地层压缩系数计算公式为^[15]

$$C_B = 1/K = 1/[\rho(V_p^2 - 4V_s^2/3)] \quad (4)$$

泊松比计算公式为

$$\sigma = \frac{(V_p V_s)^2 - 2}{2[(V_p V_s)^2 - 1]} \quad (5)$$

式中: ρ 为地层体积密度; K 为流体饱和岩石体积模

量; V_p 为地层纵波速度; V_s 为地层横波速度。

流体识别标准:当岩石中天然气饱和时,地层压缩系数会增大,泊松比会减小,地层压缩系数与泊松比呈镜像变化特征。

1.3 纵波弹性模量差比

地层纵波弹性模量(E_c)计算公式为^[16]

$$E_c = 1.0 \times 10^{16} \rho / \Delta t_c^2 \tag{6}$$

式中: Δt_c 为地层纵波时差。

当目的层为水层时,气层识别指标 D_R 的计算公式为

$$D_R = (E_{cw} - E_c) / E_c \tag{7}$$

式中: E_{cw} 为地层弹性模量。

流体识别标准:当储层含气时,纵波在水层传播

的速度大于在含气储层的传播速度,即纯水层储层的纵波时差小于含气储层的纵波时差,地层弹性模量大于地层纵波弹性模量,气层识别指标大于 0。

1.4 小 结

利用纵横波时差比、地层压缩系数与泊松比比值、纵波弹性模量差比 3 个指标对实际资料进行处理(图 1)。由图 1 可见,含气储层的地层压缩系数与泊松比曲线成麻花状。储层含气时岩石的纵横波时差比小于纯水层岩石的纵横波时差比,岩石的气层识别指标大于纯水层气层识别指标;对于水层,储层含气时岩石的纵横波时差比与纯水层岩石的纵横波时差比重合,岩石的气层识别指标小于纯水层气层识别指标,弹性指标能很好地区分气层和水层。

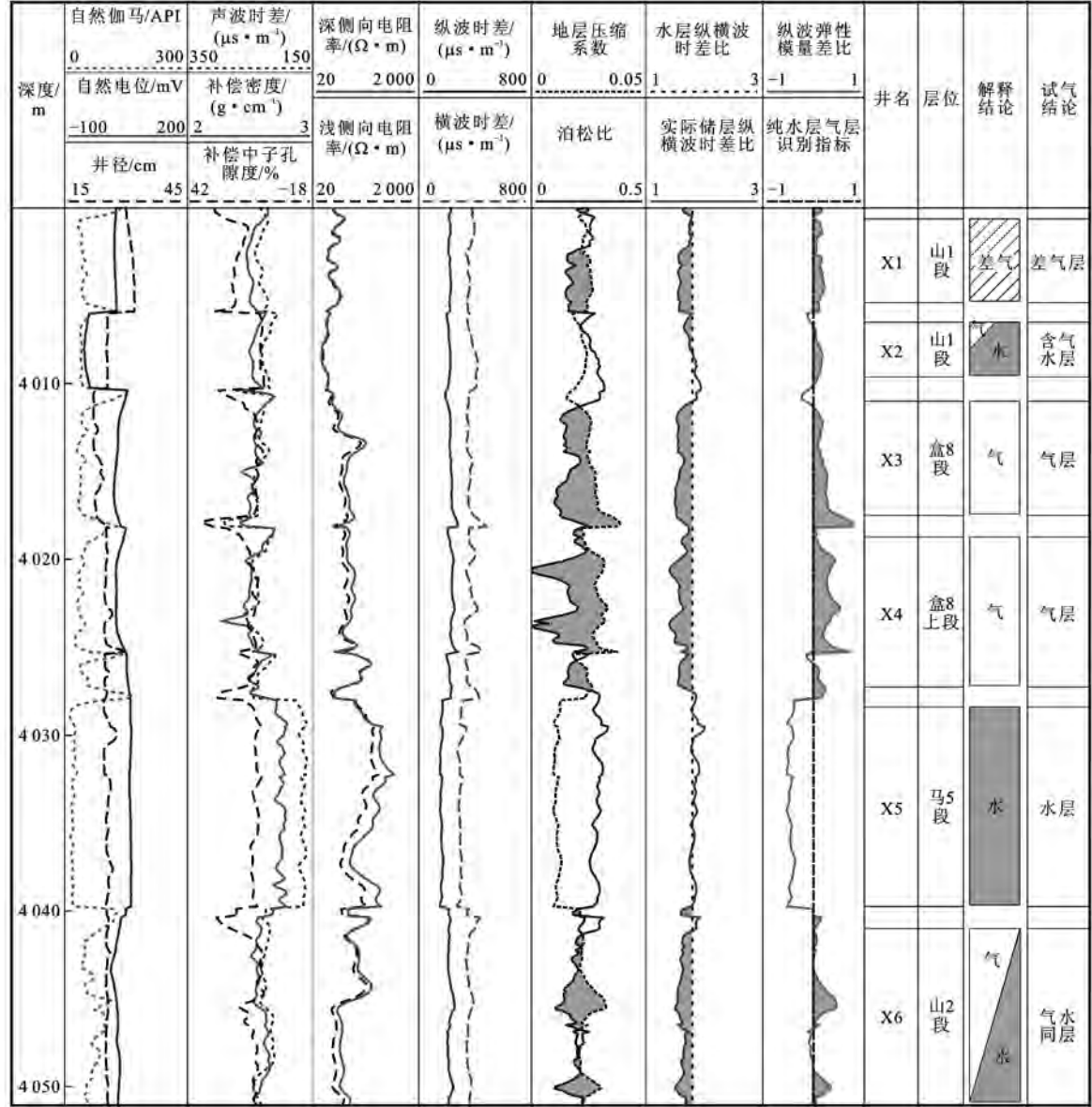


图 1 利用指标法识别气层的效果

Fig. 1 Results of Gas Reservoir Identified by Index Method

2 利用交会图分析法识别流体性质

交会图分析法可以对各种属性之间的关系进行研究,成为储层描述的重要研究方法之一^[17-24]。利用交会图分析法对苏里格气田有试气资料的地层进行研究,分析显示岩石的弹性参数能够很好地区分岩性,并且对气层与非气层也有明显的指示作用。因此,选取苏里格气田盒 8 段储层有试气结论的井段数据做交会图(图 2)。

由图 2(a)、(b)可见,泊松比能够很好地区分砂岩层和泥岩层,并且对砂岩含气性有一定的指示作用。泥岩层的泊松比大于 0.25,砂岩层的泊松比小于 0.25,并且泊松比随含气性的增高有减小的趋势^[14]。由图 2 还可知,纵波阻抗(I_p)、剪切模量

(G)、纵波速度(V_p)、横波速度(V_s)、体积模量(K)、拉梅系数(λ)、弹性模量(E)均对储层的含气性指示明显^[15],且均随着含气性的增加而减小。利用弹性参数的这些属性,建立合理的交会图,可以对流体进行有效识别。

3 利用支持向量机识别流体性质

虽然交会图可以在一定程度上将流体识别出来,但是交会图的确立受人影响比较大,并且苏里格气田地质条件复杂,交会图分析法不能将反映储层流体性质的影响因素综合考虑进来,进而影响流体性质的识别精度。由于不同弹性参数对流体识别敏感度不同,筛选储层含气时灵敏度比较高的参数,引入支持向量机综合识别流体性质^[25-26]。

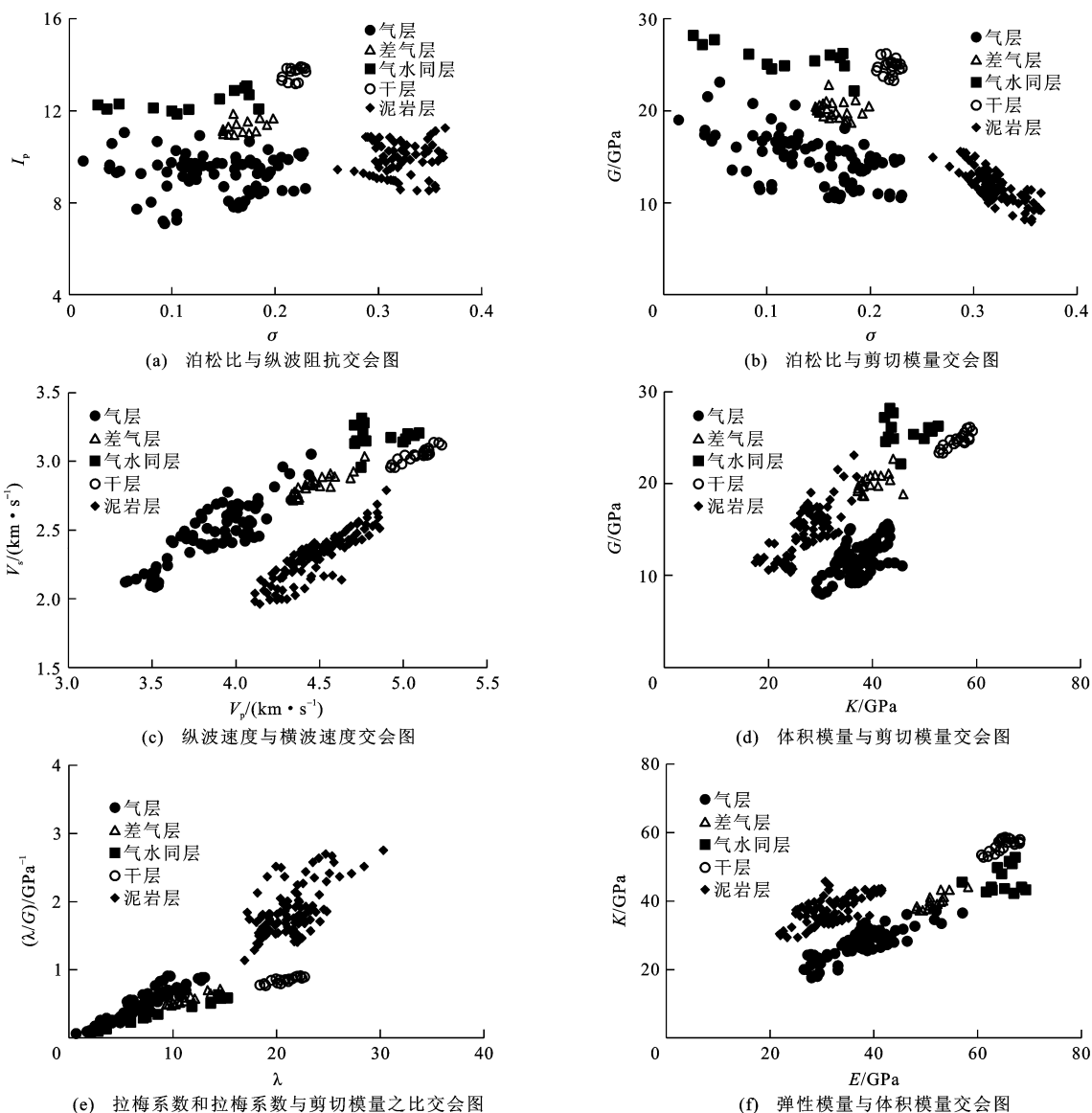


图 2 弹性参数交会图

Fig. 2 Crossplots of Elastic Parameters

3.1 流体参数敏感性分析

为了定量确定各弹性参数对流体识别的灵敏度,定义流体识别敏感度参数(S)的计算公式为

$$S = \frac{2|P - P_g|}{P + P_g} \quad (8)$$

式中: P 、 P_g 分别为干层和气层的流体识别因子。

流体识别敏感度参数越大,说明识别因子对气层的识别效果越好。对不同弹性参数区分气层与干层的灵敏度进行分析(图3),区分气层与干层敏感度较好的参数依次为拉梅系数与密度之积($\lambda\rho$)、拉梅系数(λ)、体积模量(K)、拉梅系数与剪切模量之比(λ/G)、弹性模量(E)、剪切模量(G)、泊松比(σ)、纵波阻抗(I_p)、横波阻抗(I_s)、横波速度(V_p)、纵波速度(V_s)、纵横波速度比(V_p/V_s)。

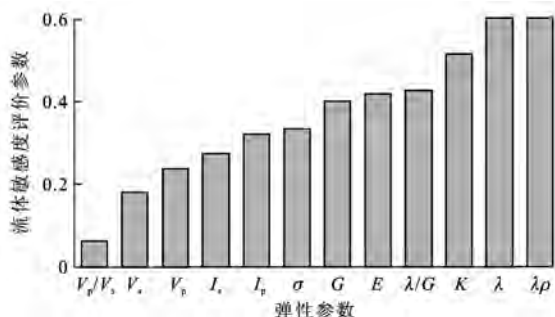
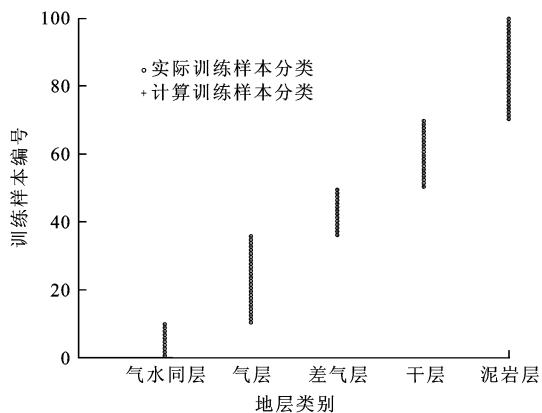


图3 不同弹性参数的流体敏感度分析

Fig. 3 Fluid Sensitivity Analysis of Different Elastic Parameters

3.2 支持向量机的原理

支持向量机是一种机器学习方法。其统计学习理论是采用结构风险最小化准则,在最小化样本点误差的同时,最小化结构风险,提高模型的泛化能力,且没有数据维数的限制。利用支持向量机算法进行流体识别的具体步骤如下^[27-29]。



(a) 支持向量机稳定性测试

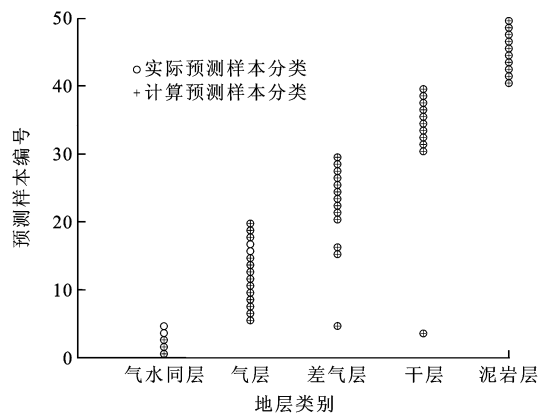
第1步:产生训练样本/预测样本。在苏里格气田选取有试气结论的储层,将不同储层所对应的弹性参数作为训练样本,利用支持向量机对样本进行训练。训练所用的弹性参数选取流体识别灵敏度最高的5个弹性参数,分别为拉梅系数与密度之积、拉梅系数、体积模量、拉梅系数与剪切模量之比、弹性模量。训练选取的样本为100个,其中气水同层样本10个,气层样本25个,差气层样本15个,干层样本20个,泥岩样本30个;另选取有试气结论的50个样本作为预测样本。

第2步:创建/训练支持向量机诊断模型。由于系统中各影响因素量纲不同,在比较分析时会很大程度地影响权重,难以得到正确结论,所以在创建支持向量机诊断模型前需要对弹性参数进行归一化处理;同时,选择合适的核函数类型及参数。笔者选用径向基核函数(RBF),并用粒子群算法寻找最佳参数 c (惩罚因子)和参数 g (RBF核函数中的方差),然后利用最佳参数训练诊断模型。

第3步:预测样本测试。当支持向量机诊断模型训练好后,输入预测样本的类别标签,并利用创建好的诊断模型对预测样本进行预测,可以得到预测的类别标签及正确率。

第4步:性能评价。依据预测样本测试结果,对所建立的模型进行评价。

利用支持向量机对训练样本进行训练,回判的结果与原始样本分类结果见图4(a)。100个样本的回判成功率为100%。利用支持向量机对预测样本进行预测,预测结果见图4(b)。预测成功46个,成功率为92%,说明利用支持向量机进行流体识别的稳定性较好。



(b) 支持向量机对储层的实际预测

图4 支持向量机样本回判与流体识别效果

Fig. 4 Confirming Results of Support Vector Machine Samples and Fluid Identification Results

3.3 支持向量机预测效果分析

以 X350 井的支持向量机识别流体效果为例(图 5),从支持向量机结论中可以看出支持向量机解释 1、2 小层为气层,试气产量为日产气 21 286 m³,日

产水 0 m³,试气结果为气层,解释结论与试气结论相符。支持向量机解释 5、6、7 小层为气水同层。试气产量为日产气 54 411 m³,日产水 7.5 m³,试气结论为气水同层,解释结论与试气结论相符。

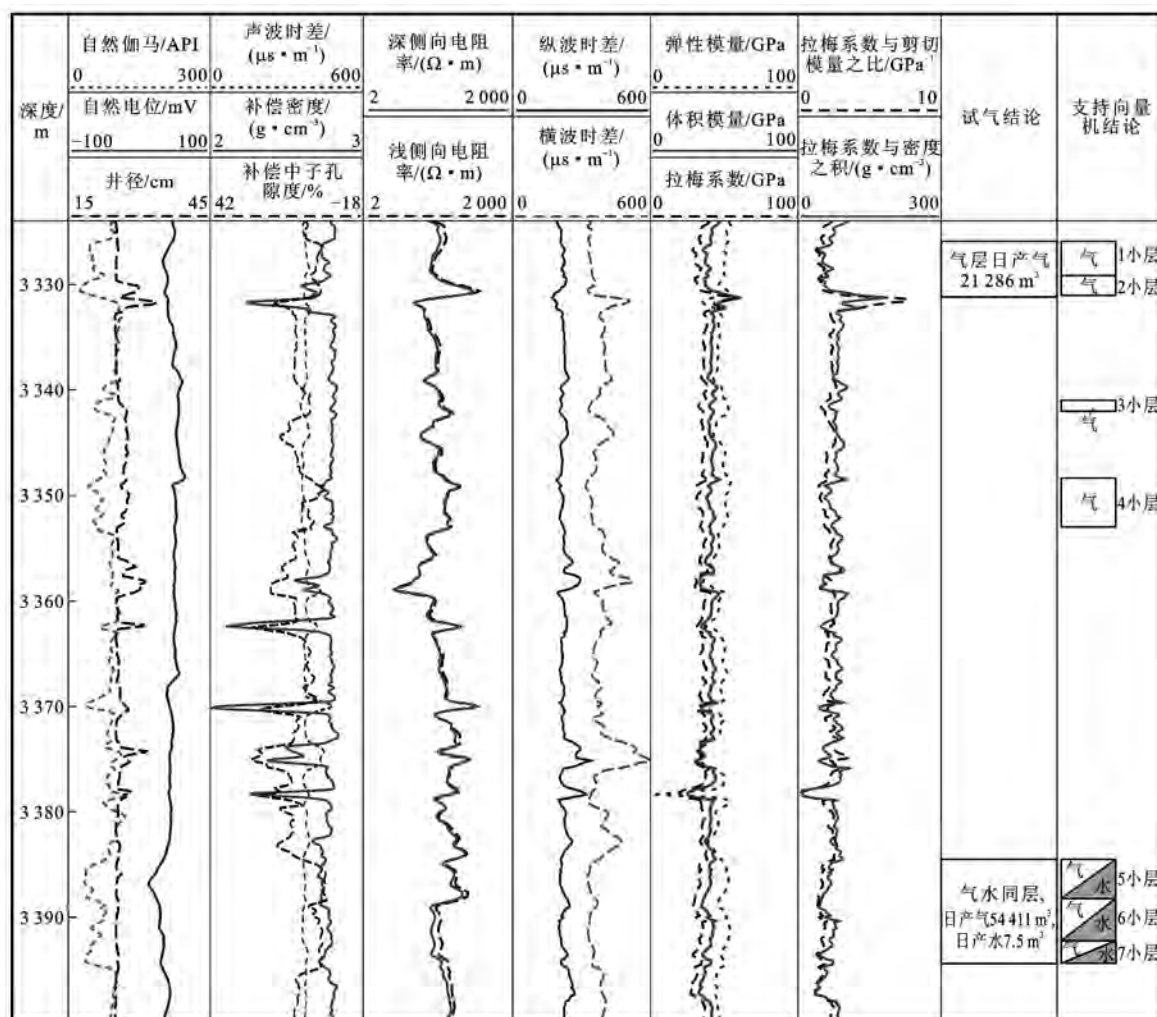


图 5 X350 井支持向量机流体识别效果

Fig. 5 Fluid Identification Results in Well X350 by Support Vector Machine

4 结 语

(1)对于致密砂岩气层,可以利用岩石的声学特性对储层流体进行识别。纵横波时差比、地层压缩系数与泊松比比值、纵波弹性模量差比可以作为气层识别的指标。

(2)不同弹性参数对储层的含气性指示敏感度有差异。利用弹性参数的这些属性,建立合理的交会图,可以对流体进行有效识别。

(3)不同弹性参数对流体识别的敏感度不同。选取对气层识别敏感度较高的弹性参数,引入支持向量机,综合利用这些参数对流体进行识别,可以提高流体的识别精度。

(4)本文是基于纵横波测井数据进行的研究,但是油田大部分井没有阵列声波测井数据,这将使本文的方法应用受到一定限制。

参考文献:

References:

- [1] 李山生,赵 辉,司马立强,等.利用弹性参数识别气、水层[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(3):83-88.
LI Shan-sheng, ZHAO Hui, SIMA Li-qiang, et al. Identification of Water and Gas Reservoirs with Elastic Parameters[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2012, 34(3): 83-88.
- [2] 蔡涵鹏,贺振华,何光明,等.基于岩石物理模型和叠

- 前弹性参数反演的孔隙度计算[J]. 天然气工业, 2013, 33(9): 48-52.
- CAI Han-peng, HE Zhen-hua, HE Guang-ming, et al. Porosity Estimation Based on Petrophysical Model and Prestack Elastic Inversion[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(9): 48-52.
- [3] 杨 宇, 李 瑞, 康 坤, 等. 纵、横波速度和密度重构算法在苏里格地区的应用[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(4): 1-6.
- YANG Bei, LI Rui, KANG Kun, et al. Application of the Reconstruction Algorithms of the Elastic Impedance and Density in Sulige Gasfield[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27(4): 1-6.
- [4] 石玉江, 时 卓, 张海涛, 等. 苏里格气田致密气层测井精细建模方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(5): 71-77.
- SHI Yu-jiang, SHI Zhuo, ZHANG Hai-tao, et al. Fine Logging Interpretation Method of Tight Gas Reservoir in Sulige Gas Field[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2012, 34(5): 71-77.
- [5] 于代国, 孙建孟, 张振城, 等. 支持向量机方法识别储集层流体性质[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(6): 675-677.
- YU Dai-guo, SUN Jian-meng, ZHANG Zhen-cheng, et al. Reservoir Fluid Property Identification with Support Vector Machine Method [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(6): 675-677.
- [6] VAPNIK V N. An Overview of Statistical Learning Theory[J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1999, 10(5): 988-999.
- [7] 张雨晴, 王志章, 张 娜. 苏里格气田苏X井区盒8段砂体识别及含气性预测研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 164-170.
- ZHANG Yu-qing, WANG Zhi-zhang, ZHANG Na. Research on Sand Body Identification and Gas Bearing Area Prediction of He-8 Member in Su X Well Block of Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 164-170.
- [8] 朱怡翔, 石广仁. 火山岩岩性的支持向量机识别[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 312-322.
- ZHU Yi-xiang, SHI Guang-ren. Identification of Lithologic Characteristics of Volcanic Rocks by Support Vector Machine[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 312-322.
- [9] 张长开, 姜秀娣, 朱振宇, 等. 基于支持向量机的属性优选和储层预测[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(2): 282-285.
- ZHANG Chang-kai, JIANG Xiu-di, ZHU Zhen-yu, et al. Attributes Selection and Reservoir Prediction Based on Support Vector Machine[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(2): 282-285.
- [10] 沈加刚, 宋宗平, 关晓巍. 基于地震属性的支持向量机河道砂体厚度预测[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2014, 36(3): 75-81.
- SHEN Jia-gang, SONG Zong-ping, GUAN Xiao-wei. Application of Support Vector Machine to the Prediction of the Thickness of Channel Sand Based on Seismic Attributes[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2014, 36(3): 75-81.
- [11] 李义军, 李进步, 杨仁超, 等. 苏里格气田东二区致密砂岩储层裂缝与含气性的关系[J]. 天然气工业, 2012, 32(6): 28-30.
- LI Yi-jun, LI Jin-bu, YANG Ren-chao, et al. Relationship Between Gas Bearing Capacity and Reservoir Fractures of Tight Sand Reservoirs in the Eastern Block 2 of the Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(6): 28-30.
- [12] 李海燕, 岳大力, 张秀娟. 苏里格气田低渗透储层微孔隙结构特征及其分类评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 133-140.
- LI Hai-yan, YUE Da-li, ZHANG Xiu-juan. Characteristics of Pore Structure and Reservoir Evaluation of Low Permeability Reservoir in Sulige Gas Field[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 133-140.
- [13] 张永军, 顾定娜, 马肃滨, 等. 阵列声波测井资料在吐哈油田致密砂岩气层识别中的应用[J]. 测井技术, 2012, 36(2): 175-178.
- ZHANG Yong-jun, GU Ding-na, MA Su-bin, et al. The Application of Array Acoustic Wave Data to Tight Sandstone Gas Reservoir in Tuha Oilfield[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(2): 175-178.
- [14] 边会媛, 潘保芝, 王 飞. 基于横波测井资料的神经网络火山岩流体性质识别[J]. 测井技术, 2013, 37(3): 264-268.
- BIAN Hui-yuan, PAN Bao-zhi, WANG Fei. Volcanic Reservoirs Fluid Identification by Neural Network Based on Shear Wave Log Data [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(3): 264-268.
- [15] 李景叶, 陈小宏. 基于地震资料的储层流体识别[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 235-238.
- LI Jing-ye, CHEN Xiao-hong. Reservoir Fluid Identification Based on Seismic Data[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 235-238.
- [16] 张 蕾, 成志刚, 冯春珍, 等. 致密砂岩气层识别方法研究及应用效果分析[J]. 测井技术, 2013, 37(6):

- 648-652.
- ZHANG Lei, CHENG Zhi-gang, FENG Chun-zhen, et al. On Identification Methods of Tight Sand Gas Layer and Their Application Effect Analysis[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(6): 648-652.
- [17] 杨丽兵, 李 瑞, 梁 涛. 偶极横波测井在川东北地区气水识别中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32(1): 68-72.
- YANG Li-bing, LI Rui, LIANG Tao. Application of Dipole Shear Wave FMI Log in Discriminating Gas and Water in Northeastern Sichuan[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2009, 32(1): 68-72.
- [18] 李 霞, 石玉江, 王 玲, 等. 致密砂岩气层测井识别与评价技术: 以苏里格气田为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 62-68.
- LI Xia, SHI Yu-jiang, WANG Ling, et al. Logging Identification and Evaluation Technique of Tight Sandstone Gas Reservoirs: Taking Sulige Gas Field as an Example[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 62-68.
- [19] 刘卫华, 高建虎, 陈启艳, 等. 测井资料岩石物理分析在苏西地区储层预测研究中的应用[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 939-945.
- LIU Wei-hua, GAO Jian-hu, CHEN Qi-yan, et al. Application of Rock Physics Parameters Analysis with Logs Data to Reservoir Prediction in the SX Area[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 939-945.
- [20] 江 伟, 李录明, 赵俊省. 多参数交会流体识别方法及应用[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(3): 189-195.
- JIANG Wei, LI Lu-ming, ZHAO Jun-sheng. Application of Fluid Identification with Multi-parameter Cross-plotting[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33(3): 189-195.
- [21] 谢清惠, 邓宏文, 郑文波, 等. 扩展弹性阻抗反演在深海扇含气储层识别中的应用[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 162-168.
- XIE Qing-hui, DENG Hong-wen, ZHENG Wen-bo, et al. Application of EEI Inversion Technique to Submarine Gas Reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 162-168.
- [22] 张树林. 莺琼盆地岩石弹性物性规律之研究[J]. 天然气地球科学, 2000, 11(3): 35-43.
- ZHANG Shu-lin. The Study of the Rock Elastic and Property in Ying-Qiong Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2000, 11(3): 35-43.
- [23] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007.
- YONG Shi-he, ZHANG Chao-mo. Logging Data Processing and Comprehensive Interpretation[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007.
- [24] 肖 昆, 邹长春, 邱礼泉, 等. 漠河冻土区天然气水合物科学钻探 MK-2 孔地层岩性的测井识别[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 46-50.
- XIAO Kun, ZOU Chang-chun, QIU Li-quan, et al. Well-log Lithology Identification in Well MK-2 for Scientific Drilling and Exploration of Gas Hydrate in Mohe Permafrost, China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(5): 46-50.
- [25] PEI F G, ZOU C C, HE T, et al. Fluid Sensitivity Study of Elastic Parameters in Low-medium Porosity and Permeability Reservoir Rocks[J]. Applied Geophysics, 2010, 7(1): 1-9.
- [26] 乔玉雷. 孔隙流体对岩石物理弹性参数的影响及敏感属性参数优选——以济阳坳陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 39-43.
- QIAO Yu-lei. Influence on Petrophysics Elastic Parameter by Pore Fluid and Optimization of Sensitive Attribute Parameter—Case of Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(3): 39-43.
- [27] 魏 聪, 肖玉峰, 董平川. 最小二乘支持向量机在储层流体识别中的应用[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(2): 275-278.
- WEI Cong, XIAO Yu-feng, DONG Ping-chuan. Application of Least-square Support Vector Machine Method in Identifying Reservoir Fluids[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(2): 275-278.
- [28] 张长开, 姜秀娣, 朱振宇, 等. 基于支持向量机的属性优选和储层预测[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(2): 282-285.
- ZHANG Chang-kai, JIANG Xiu-di, ZHU Zhen-yu, et al. Attributes Selection and Reservoir Prediction Based on Support Vector Machine[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(2): 282-285.
- [29] 张尔华, 关晓巍, 张元高. 支持向量机模型在火山岩储层预测中的应用: 以徐家围子断陷徐东斜坡带为例[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 428-432.
- ZHANG Er-hua, GUAN Xiao-wei, ZHANG Yuan-gao. Support Vector Machine in Volcanic Reservoir Forecast: East Slope in Xujiaweizi Depression[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 428-432.