

引用格式:张莹,曲丽丽,朱露,等. SVM算法在渤海湾盆地南堡凹陷火山岩储层流体预测中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(2): 181-189.

ZHANG Ying, QU Lili, ZHU Lu, et al. Application of SVM algorithm in fluid prediction of volcanic reservoirs in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 181-189.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.006

## SVM算法在渤海湾盆地南堡凹陷火山岩 储层流体预测中的应用

张莹,曲丽丽,朱露,张艳,韩思洋,曾诚  
(中国石油冀东油田公司南堡油田作业区,河北唐山 063200)

**摘要:**火山岩储层受岩相、岩性、储集空间类型等多因素影响,流体识别难度大,是测井解释的难题之一,亟需建立一种方便快捷识别方法。为此,针对渤海湾盆地南堡凹陷火山岩储层特征,采用机器学习的SVM(支持向量机)算法对未知储层进行流体预测。研究表明:①综合应用岩心、测井、录井等资料对流体敏感特征参数寻优,单信息敏感参数为声波时差、补偿密度、深侧向电阻率,多信息融合参数为自然伽马相对值、全烃比值、烃气密度指数、烃气湿度指数,以上7种参数参与模型建立;②使用SVM算法进行火山岩流体预测,将储层流体分为油层、油水同层和水层3类,选取测井、录井敏感参数,训练可靠样本库,预测库正判率达90%。SVM算法预测应用表明,SVM算法计算复杂程度低,泛化推广能力强,可快速识别火山岩流体性质,为油气成藏规律分析和地质储量动用开发提供可靠依据。

**关键词:**SVM算法;储层特征;流体预测;火山岩;南堡凹陷

中图分类号:TE19

文献标识码:A

### Application of SVM algorithm in fluid prediction of volcanic reservoirs in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

ZHANG Ying, QU Lili, ZHU Lu, ZHANG Yan, HAN Siyang, ZENG Cheng

(Nanpu Oilfield Operation Area of PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063200, China)

**Abstract:** Volcanic rock reservoirs are affected by many factors such as lithofacies, lithology, and reservoir space types, and fluid identification is difficult, which is one of the difficulties in well logging interpretation. It is urgent to establish a convenient and quick identification method. For this reason, the SVM (Support Vector Machine) algorithm of machine learning is used to predict the fluids of unknown reservoirs for the volcanic rock reservoirs in the Nanpu Sag of the Bohai Bay Basin. The research shows that: ① Comprehensive application of core, well logging, mud logging and other data to optimize fluid sensitive characteristic parameters, single information sensitive parameters are acoustic time difference, compensation density, resistivity, multi-information fusion parameters are natural gamma relative value, total hydrocarbon Ratio, hydrocarbon gas density index, hydrocarbon gas humidity index, the above seven parameters participate in the model establishment; ② Using the SVM algorithm for volcanic fluid prediction, the reservoir fluid is divided into three types: oil layer, oil-water layer and water layer. Sensitive parameters of well logging and mud logging are selected, and a reliable sample library is trained. The correct judgment rate of the prediction library reaches 90%. The prediction application of SVM algorithm shows that it has low calculation complexity and strong generalization ability, which can quickly identify the fluid properties of volcanic rocks and provide a reliable basis for the analysis of oil and gas accumulation rules and the production and development of geological reserves.

**Keywords:** SVM algorithm; reservoir characteristics; fluid prediction; volcanic rocks; Nanpu Sag

收稿日期:2022-10-28。

第一作者简介:张莹(1984—),女,硕士,工程师,从事油气藏开发工作。地址:河北省唐山市曹妃甸区汇丰路47号南堡作业区,邮政编码:063200。E-mail: 76172156@qq.com

近年来,非常规油气藏关注度越来越高,诸多学者在火山岩储层及流体识别方面有所研究。邹才能等<sup>[1]</sup>采用重磁电剥层处理、沿层延拓信号增强反演方法预测区域火山岩分布;庄圆等<sup>[2]</sup>利用岩性、物性、电性及录井等综合判识春风油田石炭系火山岩油气层;张艺等<sup>[3]</sup>利用测井图版法及归一化气测法,建立测井和地质录井相辅相成的识别方法;吴煜宇等<sup>[4]</sup>综合运用实验数据、常规测井、元素扫描和成像测井识别四川盆地二叠系基性火山岩;李想等<sup>[5]</sup>利用地震波的运动学,根据地层吸收性质与含油气等成分的关系,使用功率谱和衰减谱直接预测了储层的含油性。利用岩心、测井、录井、地震等方法预测火山岩流体性质多使用单信息参数<sup>[6]</sup>,在信息融合方面有所欠缺;机器学习在利用多信息融合参数方面有较大优势,可保证评价结果具有客观性<sup>[7-9]</sup>。洪一鸣等<sup>[10]</sup>利用神经网络识别松辽盆地南部长岭断陷火山岩岩性,预测符合率达89.03%;陈跃等<sup>[11]</sup>利用随机森林算法对低煤阶煤层气开发进行选取预测,模型的成功率曲线值为0.961,结果可靠。

南堡凹陷是位于渤海湾盆地北部的小型富烃凹陷<sup>[12]</sup>,经历了中、新生代断陷和拗陷两个演化阶段<sup>[13]</sup>,南堡1号构造馆陶组底部NgIV小层发育大套火山岩<sup>[14]</sup>,主要岩性为火山熔岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩,是勘探开发重点区域。庄东志等<sup>[15]</sup>利用气测录井资料,补偿密度、声波时差与电阻率交会图版,结合阵列声波测井及补偿中子时间推移测井等方法,对南堡5号构造火山岩储层流体性质预测,南堡火山岩流体性质机器识别领域成果较少,SVM算法作为机器学习方法的一种,适合火山岩流体此类小样本的预测问题,可有效避免过拟合问题,识别精度较高。为此,基于现有资料,对火山岩储层地质特征、测井响应特征等方面进行研究,将测井及录井单参数信息、多参数融合信息与流体进行相关性分析,提取相关系数高的信息作为流体敏感参数,利用SVM算法对流体进行分类,为火山岩储层流体识别提供一定参考依据。

## 1 SVM算法原理

支持向量机(support vector machines,简称SVM)是根据VAPNIK提出的结构风险最小化原则来提高学习机泛化能力的方法。本质是求取凸二次优化问

题的全局最优解,最初是针对线性二分类问题提出的,基本思想是求解两类样本的最优分类面,优势在于不仅能将两类样本正确分开,还能保持分类间隔最大。火山岩储层识别属于非线性多分类问题,需要解决两个问题,一是将非线性转化为线性;二是将多分类转化为二分类。

针对非线性转化为线性问题,需对SVM进行扩展,引入映射函数,把低维空间非线性分类转化为高维空间的线性分类,求取最优分类面(图1)。原理如下:

样本点为 $x_i, y_i, i=1, 2, \dots, n$ ,在高维空间中,设分类面方程为 $\omega\phi(x) + b = 0$ , $\phi(x)$ 为映射函数, $\omega$ 为空间向量, $b$ 为常数项。

选取适当的核函数 $K(x, x_i)$ 和惩罚参数 $C > 0$ ,构造并求解凸二次规划问题,将求解极大转换为求解极小:

$$\begin{cases} \min_{\alpha} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \\ \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为第 $i$ 个特征向量; $y_i$ 为类标记; $\alpha$ 为变量因子; $x_j$ 为第 $j$ 个特征向量; $\alpha_i$ 为拉格朗日乘子,且 $0 \leq \alpha_i \leq C, i=1, 2, \dots, N$ 。

得到决策函数:

$$f(x) = \text{sign} \left[ \sum_{i=1}^N \alpha_i^* y_i K(x, x_i) + b^* \right] \quad (2)$$

式中: $\alpha_i^*$ 为决策函数最优解向量值, $b^*$ 为偏置常数。

核函数是决策函数能否正确分类的关键,不同核函数的SVM分类器性能完全不同<sup>[12]</sup>,研究选定使用RBF核函数,高斯核函数是常用的RBF函数:

$$K(x, x_i) = \exp \left( -\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为速度参数。

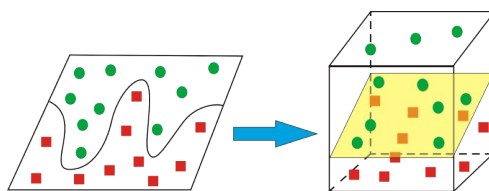


图1 SVM高维映射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SVM high-dimensional mapping

基于高斯径向基函数分类器的分类决策函数表达为:

$$f(x) = \text{sign} \left[ \sum_{i=1}^N \alpha_i^* y_i \exp \left( -\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2} \right) + b^* \right] \quad (4)$$

针对多分类转化为二分类问题,SVM采用一对一组合模式,构造多个二类分类器,按决策规则实现数据分类,通过训练分类器,采取投票机制对样本分类,通过分类函数计算进行计数,最终样本类别归属分类函数值高者。

## 2 火山岩储层地质及测井特征

### 2.1 储层地质特征

火山岩基本类型分为3类:火山熔岩、火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩<sup>[6]</sup>。火山熔岩包含玄武岩、安山岩和流纹岩;火山碎屑岩包含玄武质凝灰岩、流纹质凝灰岩、玄武质角砾岩、流纹质角砾岩;火山碎屑沉积岩包含凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩、凝灰质泥岩<sup>[7]</sup>。南堡1号构造NgIV以火山熔岩的玄武岩为最主要类型,还发育薄层状火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩<sup>[8]</sup>。

玄武岩厚度占火山岩系厚度62%~93%,平均

78%,SiO<sub>2</sub>平均含量为46.77%(表1)。

火山岩储集空间类型分为原生孔隙和次生孔隙两大类。原生孔隙包含气孔及原生粒间孔、晶间孔,研究区以气孔为主,成因推断为气体膨胀逸出<sup>[9]</sup>,岩性为气孔杏仁状玄武岩、角砾岩。次生孔隙包含两小类,第一类为溶蚀孔、溶洞、溶蚀缝,岩性为玄武岩风化或火山碎屑岩;第二类为构造缝,因为构造应力作用,岩性为玄武岩。火山岩内部缝、孔广泛发育,为最主要的储集空间类型,根据火山岩储层物性分类标准,裂缝发育段以高孔、较高渗为特征;气孔多发生溶蚀作用,粒间、粒内溶蚀孔均有发育,以较高孔、中渗为特征;致密段以中孔、特低渗为特征(图2)。

### 2.2 测井响应特征

通过对研究区3口取心井的岩心、薄片和地化数据分析,经岩心刻度测井发现:对火山岩岩性敏感曲线有自然伽马(GR)、声波时差(AC)、补偿密度(DEN)、补偿中子(CNL)以及深侧向电阻率(RLLD)等<sup>[20]</sup>,其中对火山岩岩性敏感度最强的是自然伽马,其次是声波时差和密度。玄武岩测井表征低伽马、低声波、高密度;凝灰岩为高伽马、中声波、低密度;

表1 南堡凹陷南堡1号构造化学成分(质量百分比)统计

Table 1 Statistic of chemical composition(mass percentage) of the 1st structure in Nanpu Sag

层位	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
	47.69	2.26	14.29	7.94	3.95	0.16	8.55	6.27	3.15	1.25	0.34	0.66	3.60
	45.64	2.72	15.91	6.42	4.24	0.19	8.75	7.68	3.15	1.45	0.66	0.66	2.89
馆陶组	46.71	1.92	15.98	4.54	5.87	0.14	4.91	10.21	2.74	0.72	0.35	3.36	2.50
	46.02	2.23	14.86	5.00	7.74	0.09	5.25	8.51	2.30	0.42	0.27	3.60	3.86
	48.67	1.82	14.97	4.01	6.93	0.10	4.71	9.10	2.29	0.51	0.32	3.26	3.12
	45.91	1.85	15.50	2.69	7.28	0.12	4.11	9.05	3.80	0.56	0.35	5.14	3.51

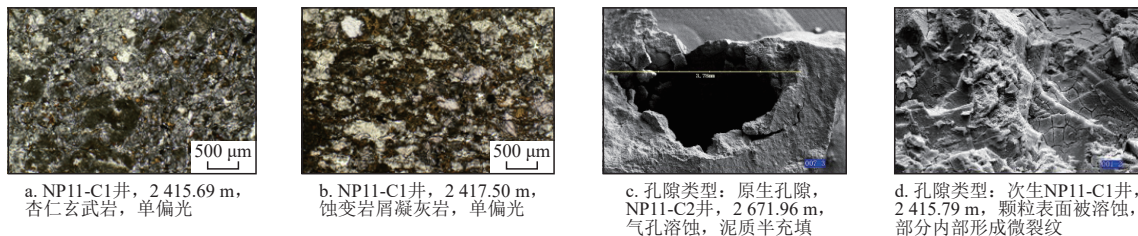


图2 南堡凹陷南堡1号构造馆陶组火山岩岩心及镜下识别图

Fig. 2 Volcanic rock cores of Guantao Formation in the 1st structure of Nanpu Sag and its identification under the microscope

凝灰质砂岩为中伽马、高声波、中密度(表2)。

利用常规测井曲线可定性识别孔隙类型<sup>[21-22]</sup>,使用AC、DEN曲线叠合,定性识别裂缝、气孔发育段,孔隙度值与AC正相关、与DEN负相关;裂缝、溶洞发育段AC增大、DEN减小;致密段AC减小、DEN增大。红色重叠区域电性曲线表现为AC增大、DEN减小,指示储层可能存在裂缝、裂纹,成像测井<sup>[23]</sup>显示为张开缝<sup>[24]</sup>,密度为每米2.3条,一平方米内,累计发现

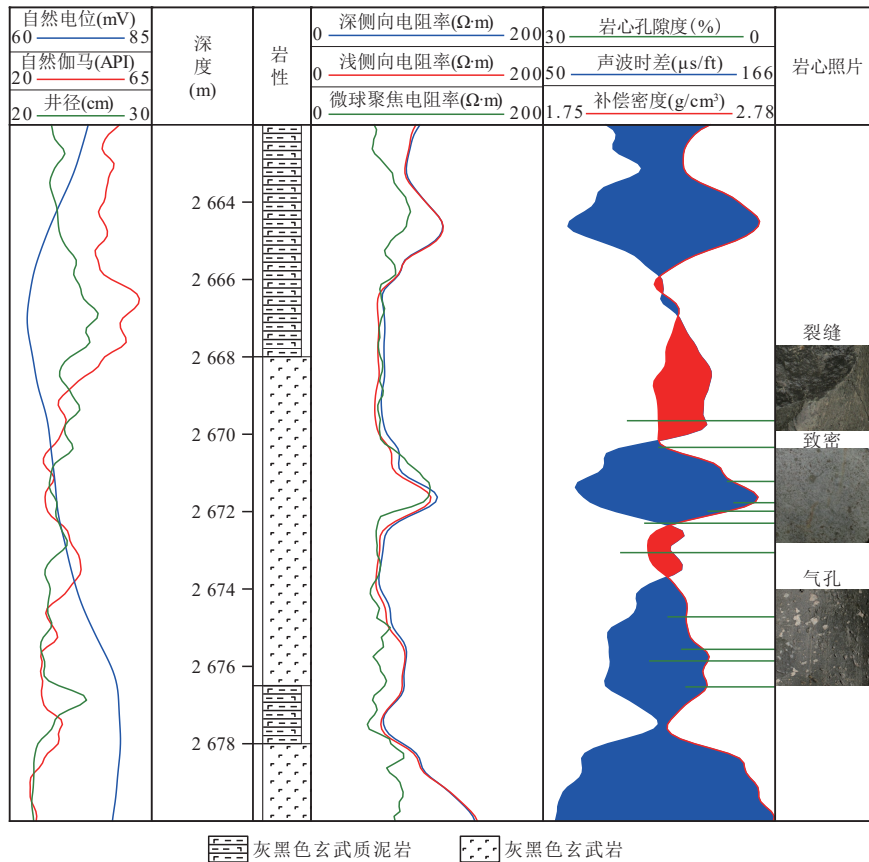
的裂缝长度为3.1 m,开度为0.015 mm;最大主应力方位角为北东向7.5°~22.5°。蓝色重叠区域提示储层存在溶洞及少量裂纹,AC、DEN变化介于裂纹和致密之间,指示储层发育溶洞,随着重叠区域变大,AC减小、DEN增大,逐渐变致密(图3)。

受风化淋滤作用,优势储层主要发育于南堡1号大断层附近,研究区共排査110口井,有气测显示井84口。纵向上表现为分布在火山体溢流相(玄武岩)

表2 南堡凹陷南堡1号馆陶组火山岩测井响应  
Table 2 Logging response of volcanic rocks of Guantao Formation in the 1st structure of Nanpu Sag

岩性分类		电性响应		
		自然伽马(API)	声波时差(μs/ft)	密度(g/cm <sup>3</sup> )
火山熔岩	玄武岩	(30~45)/41	(55~70)/60	(2.3~2.8)/2.55
火山碎屑岩	凝灰岩	(70~90)/82	(68~72)/71	(2.2~2.5)/2.33
火山碎屑沉积岩	凝灰质砂岩	(68~102)/72	(69~96)/79	(2.3~2.6)/2.47

注:1ft=304.8 mm。



注:1ft=304.8 mm。

图3 南堡凹陷南堡1号构造馆陶组物性响应特征

Fig. 3 Physical response characteristics of Guantao Formation in the 1st structure of Nanpu Sag

顶部8~12 m处,该处裂缝发育、物性好,火山体溢流相中下部为致密玄武岩。横向上表现为分布相对集中,呈北东向展布,与最大主应力方向一致,气测显示面积达4.6 km<sup>2</sup>,目前求产见油3口井。

通过分析研究区含油性特征,确定火山岩储层有利分布区域,流体识别需结合测试、气测及测井资料等综合识别<sup>[25]</sup>。气测曲线能够直观识别油气层,但不能完全依赖录井,与电性相结合效果会更好<sup>[26]</sup>,将录井与测井信息紧密结合,运用到火山岩储层流体识别中<sup>[27]</sup>。

气测敏感参数有3个,其中全烃比值为全烃高值TG与全烃基值QT比值,表达为:

$$\text{全烃比值} = \frac{TG}{QT} \quad (5)$$

烃气密度指数表达为:

$$\text{烃气密度指数} = \frac{C_3 + C_4}{C_4} \quad (6)$$

烃气湿度指数表达为:

$$\text{烃气湿度指数} = \frac{C_1 + C_2}{C_3 + C_4} \quad (7)$$

式(5)一式(7)中: $C_1$ 为甲烷; $C_2$ 为乙烷; $C_3$ 为丁烷; $C_4$ 为异丁烷。

测井敏感参数为深侧向电阻率,将储层流体分为油层、油水同层、水层,分别利用全烃比值与深侧向电阻率做交会图,利用烃气湿度指数与烃气密度

指数做交会图(图4)。结果显示随着含油性降低,深侧向电阻率逐渐降低;烃气密度指数随着含油性降低而变大,烃气湿度指数对含油性区分度一般。

常规测井方法可识别一部分表征明显的火山岩储层流体性质,但是对于受多种成因影响的储层,油层和水层会表征相似,识别效果并不好,需使用新方法融合多信息参数来提高解释准确率。

### 3 SVM算法应用

火山岩储层流体性质的识别属于非线性多分类识别问题,SVM应用思路是:敏感参数选取、训练样本、预测目标、输出结果。

#### 3.1 敏感参数选取

充分利用岩心、测井、录井等资料,根据各参数与试油结果进行相关性分析,提取敏感性测井特征参数,作为输入样本的特征参数。优选7个相关系数大于0.35的特征参数,其中单参数有3个:AC、DEN、RLLD,复合参数有4个: $\Delta GR$ 、全烃比值、烃气密度指数、烃气湿度指数(表3)。

其中:

$$\Delta GR = \frac{GR - GR_{\min}}{GR - GR_{\max}} \quad (8)$$

式中: $\Delta GR$ 为自然伽马相对值; $GR$ 为目的层自然伽

表3 火山岩储层流体预测参数  
Table 3 Fluid prediction parameters of volcanic reservoir

特征参数	AC( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )	DEN( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	RLLD( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\Delta GR$	全烃比值	烃气密度指数	烃气湿度指数
相关系数	0.43	0.48	0.36	0.38	0.48	0.55	0.42

注:1ft=304.8 mm。

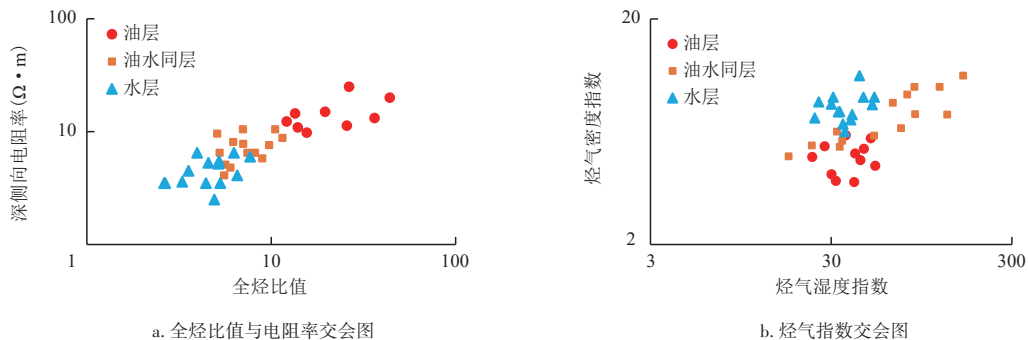


图4 南堡1号构造馆陶组火山岩气测响应特征

Fig. 4 Gas response characteristics of Guantao Formation volcanic rocks in the 1st structure of Sag

马值,  $API; GR_{max}$  为泥岩段自然伽马值,  $API; GR_{min}$  为砂岩段自然伽马值,  $API$ 。

### 3.2 方法应用

根据试油及生产结论,将火山岩储层分为油气层、油水同层、水层3类,为实现多类别油气水层判别问题,建立了3个SVM,首先,SVMA将油气层和其他流体分开,分类函数为 $f_A(x)$ ;其次,SVMB将油水同层和其他流体分开,分类函数为 $f_B(x)$ ;最后,SVMC将水层和其他流体分开,分类函数为 $f_C(x)$ 。选取试油及生产已证实可靠的油气层作为样本库数据,分别训练出3类SVM的最优分类面,将待识别储层输入SVMA、SVMB、SVMC,通过3个分类函数对待识别储层进行判别,归属类别属于值高者。

### 3.3 应用效果

对研究区共提取了具有代表性的40组数据样

本构建样本集,训练数据和预测数据各20组(表4、表5)。预测数据20组中,正确判别18组,错误判别2组,预测正判率为90%。预测结果表明SVM参数及输入特征向量十分可靠,为火山岩储层流体识别提供了一种准确快捷的方法。

根据预测结论,选井进行了试油。NP11-B3井9a层岩性为火山碎屑沉积岩,含凝灰质,有裂纹和溶洞发育,声波时差为273  $\mu\text{s}/\text{m}$ ,密度为2.47  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,深侧向电阻率为10.90  $\Omega \cdot \text{m}$ ,全烃比值为13.92,计算参数自然伽马相对值为0.19,烃气湿度指数为40.70,烃气密度指数为5.06。首先使用测井半定量识别图版识别流体性质,全烃比值与电阻率交会图和烃气指数交会图均处于油水同层区域,使用SVM算法进行预测,该层分类为油层,故进行试油,2019年9月9日射孔后日产油3 t,不含水,油品化验结果显示为50  $^{\circ}\text{C}$ 下黏度为19.8  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ,凝固点为50  $^{\circ}\text{C}$ ,为高凝油,试油结论与预测相符(图5、图6)。

表4 SVM识别火山岩流体性质训练数据库  
Table 4 Training database for SVM to identify fluid properties of volcanic rocks

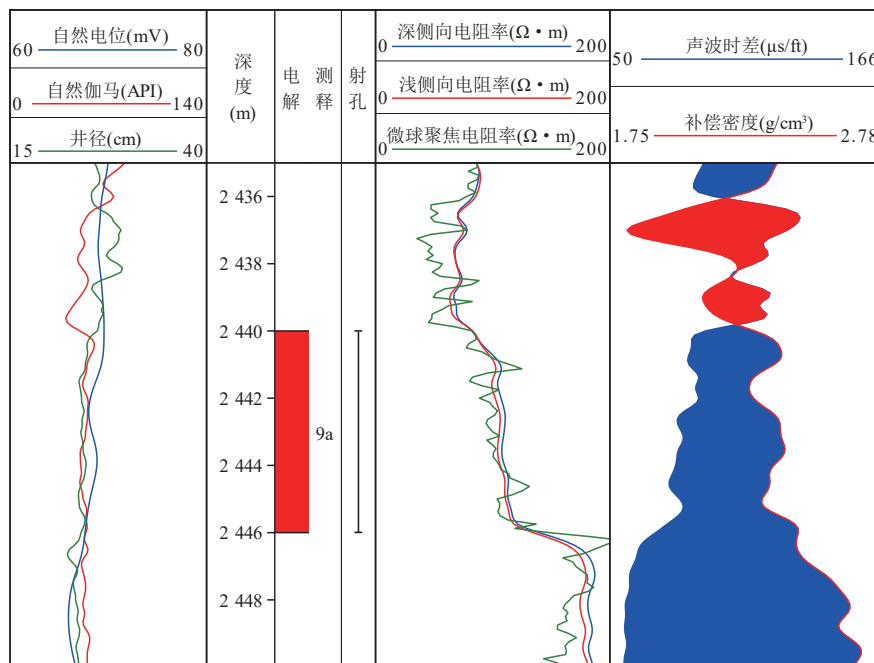
训练数据								
井号	$AC(\mu\text{s}/\text{ft})$	$DEN(\text{g}/\text{cm}^3)$	$RLLD(\Omega \cdot \text{m})$	$\Delta GR$	全烃比值	烃气湿度指数	烃气密度指数	试油结论
NP11-A1	91.72	2.57	12.30	0.18	12.12	36.16	6.11	油层
NP11-A2	88.56	2.41	14.50	0.25	13.47	52.59	4.47	油层
NP11-A3	88.20	2.26	11.30	0.32	25.70	45.51	5.31	油层
NP11-A4	96.00	2.30	25.00	0.31	26.43	43.53	4.74	油层
NP11-A5	82.40	2.40	20.00	0.14	43.94	31.84	3.83	油层
NP11-A6	84.30	2.47	9.80	0.29	110.41	40.22	3.78	油层
NP11-A7	78.70	2.48	4.10	0.22	5.55	51.81	6.08	油水同层
NP11-A8	95.66	2.14	4.80	0.16	6.00	86.65	10.00	油水同层
NP11-A9	73.40	2.64	8.80	0.23	11.50	23.44	5.50	油水同层
NP11-A10	83.33	2.39	7.80	0.30	7.04	34.52	5.77	油水同层
NP11-A11	87.00	2.30	10.50	0.29	10.50	79.08	9.25	油水同层
NP11-A12	88.81	2.54	7.60	0.16	9.73	33.44	5.43	油水同层
NP11-A13	85.23	2.35	6.50	0.31	8.16	87.39	7.57	油水同层
NP11-A14	90.29	2.48	3.50	0.24	4.42	39.20	7.53	水层
NP11-A15	80.05	2.59	3.50	0.18	2.62	45.24	9.00	水层
NP11-A16	71.54	2.70	6.50	0.25	3.96	50.69	8.33	水层
NP11-A17	87.32	2.35	5.20	0.32	5.16	35.72	6.33	水层
NP11-A18	101.59	2.20	2.50	0.31	4.91	32.87	7.74	水层
NP11-A19	95.18	2.20	6.50	0.22	6.28	24.33	7.28	水层
NP11-A20	100.24	2.33	6.00	0.16	7.68	33.41	7.77	水层

注:1ft=304.8 mm。

表5 SVM识别火山岩流体性质预测数据库  
Table 5 SVM identifies volcanic rock fluid properties prediction database

井号	AC( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )	DEN( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	RLLD( $\Omega\cdot\text{m}$ )	$\Delta GR$	预测数据					对比
					全烃比值	烃气湿度指数	烃气密度指数	试油结论	预测结果	
NP11-B1	100.00	2.26	9.80	0.11	15.57	27.61	5.45	油层	油层	正确
NP11-B2	97.00	2.22	15.00	0.26	19.60	49.71	5.92	油层	油层	正确
NP11-B3	83.20	2.47	10.90	0.19	13.92	40.70	5.06	油层	油层	正确
NP11-B4	93.06	2.38	13.20	0.21	36.33	30.13	4.10	油层	油层	正确
NP11-B5	83.12	2.48	21.30	0.28	104.96	23.56	4.89	油层	油层	正确
NP11-B6	74.50	2.42	6.50	0.35	5.25	32.30	6.34	油水同层	油水同层	正确
NP11-B7	80.45	2.42	5.10	0.34	5.64	131.54	7.54	油水同层	油水同层	正确
NP11-B8	85.74	2.50	8.10	0.09	6.22	161.15	11.22	油水同层	油层	错误
NP11-B9	86.73	2.39	10.50	0.24	7.02	73.04	6.56	油水同层	油水同层	正确
NP11-B10	82.12	2.45	6.50	0.17	7.42	65.82	8.50	油水同层	油水同层	正确
NP11-B11	77.37	2.50	5.80	0.23	8.94	17.44	4.92	油水同层	油水同层	正确
NP11-B12	91.64	2.35	9.60	0.30	5.09	119.40	10.00	油水同层	油水同层	正确
NP11-B13	81.58	2.26	3.50	0.37	2.66	38.53	7.14	水层	水层	正确
NP11-B14	91.06	2.59	4.50	0.36	3.56	25.60	8.58	水层	水层	正确
NP11-B15	71.23	2.65	3.60	0.11	3.29	52.00	9.00	水层	水层	正确
NP11-B16	75.23	2.55	5.30	0.26	4.56	34.87	6.84	水层	水层	正确
NP11-B17	98.76	2.39	5.50	0.19	5.21	43.03	11.20	水层	油水同层	错误
NP11-B18	91.53	2.11	3.50	0.25	5.29	30.05	8.38	水层	水层	正确
NP11-B19	101.01	2.44	4.10	0.35	6.54	30.78	9.00	水层	水层	正确
NP11-B20	96.13	2.34	3.66	0.29	4.35	29.50	6.32	水层	水层	正确

注: 1ft=304.8 mm。



注: 1ft=304.8 mm。

图5 NP11-B3井测井曲线  
Fig. 5 Logging curves of Well-NP11-B3



图6 NP11-B3井采出油展示

Fig.6 Oil samples produced from Well-NP11-B3

## 4 结论

1) 火山岩储层流体预测参数寻优过程要充分考虑多因素影响,需对岩心、测井、录井等参数进行融合,敏感参数有7种,单信息参数为声波时差、补偿密度、深侧向电阻率3种,多信息融合参数为自然伽马相对值、全烃比值、烃气密度指数、烃气湿度指数4种,使用以上参数建模,能有效提升预测效果。

2) SVM算法在小样本非线性多分类问题中应用广泛,具有特定优势。它解决了火山岩储层流体预测的两个问题:一是通过高维空间映射将非线性问题转化为线性;二是采用一对一组合模式将多分类问题转化为二分类,简化了预测过程,充分训练样本库,正判率达90%,方法便捷可靠。

3) 南堡凹陷火山岩段主要发育火山熔岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩,气孔和裂缝发育井段含油性较好,是该区火山岩储层勘探开发的重点区域。在分析火山岩储层特征基础上,结合测井响应特征,利用交会图可定性识别储层流体,但准确率有待提高。

### 参考文献

- [1] 邹才能,候连华,王京红,等.火山岩风化壳地层型油气藏评价预测方法研究——以新疆北部石炭系为例[J].地球物理学报,2011,54(2):388-400.  
ZOU Caineng, HOU Lianhua, WANG Jinghong, et al. Evaluation and forecast methods of stratigraphic reservoir of volcanic weathering crust: An example from Carboniferous formation in northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 388-400.
- [2] 庄圆,杨凤丽.春风油田石炭系火山岩油气层综合判识研究[J].新疆地质,2019,37(2):231-236.

ZHUANG Yuan, YANG Fengli. Study on hydrocarbon reservoir synthesize distinguish of carboniferous volcanic rock from Chunfeng Oil Field[J]. Xinjiang Geology, 2019, 37(2): 231-236.

- [3] 张艺,李道清,仇鹏,等.基于岩性分类的火山岩储层流体识别方法——以克拉美丽气田石炭系火山岩为例[J].西安石油大学学报(自然科学版),2020,35(6):22-28.  
ZHANG Yi, LI Daoqing, QIU Peng, et al. Study on fluid identification method of volcanic reservoir based on lithology classification: A case study of carboniferous volcanic rocks in Kelamei Gasfield[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2020, 35(6): 22-28.
- [4] 吴煜宇,谢冰,伍丽红,等.四川盆地二叠系基性火山岩测井评价技术——以永探1井区火山岩为例[J].天然气工业,2019,39(2):37-45.  
WU Yuyu, XIE Bing, WU Lihong, et al. Logging based lithology identification of Permian mafic volcanic rocks in the Sichuan Basin: A case study from the well Yongtan 1[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(2): 37-45.
- [5] 李想,金萍,石艳.火山岩储层含油性预测方法——以克拉玛依油田九区石炭系油藏为例[J].石油天然气学报,2014,36(6):59-62.  
LI Xiang, JIN Ping, SHI Yan. Oiliness prediction method for volcanic rock reservoirs: Taking Carboniferous reservoirs in block 9 of Karamay Oilfield as an example[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(6): 59-62.
- [6] 张丽华,张国斌,齐艳萍,等.准噶尔盆地西泉地区石炭系火山岩岩性测井识别[J].新疆石油地质,2017,38(4):427-431.  
ZHANG Lihua, ZHANG Guobin, QI Yanping, et al. Lithology identification of Carboniferous volcanic rocks in Xiquan area, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(4): 427-431.
- [7] SHI F, WANG X L, LIU C, et al. An XFEM-based method with reduction technique for modeling hydraulic fracture propagation in formations containing frictional natural fractures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 173: 64-90.
- [8] NGUYEN T T, YVONNET J, ZHU Q Z, et al. A phase-field method for computational modeling of interfacial damage interacting with crack propagation in realistic microstructures obtained by microtomography[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2016, 312(6): 567-595.
- [9] LIANG X, YVONNET J, GHABEZLOO S. Phase field modeling of hydraulic fracturing with interfacial damage in highly heterogeneous fluid-saturated porous media[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 186(6): 158-180.
- [10] 洪一鸣,王璞珺,李瑞磊,等.基于常规测井数据的火山岩岩性神经网络识别:以松辽盆地南部长岭断陷为例[J].世界地质,2021,40(2):409-417.  
HONG Yiming, WANG Pujun, LI Ruilei, et al. Neural network recognition of volcanic rock lithology based on conventional logging data: A case study of Changling fault depression, southern Songliao Basin[J]. Global Geology, 2021, 40(2): 409-417.

- [11] 陈跃,王丽雅,李国富,等.基于随机森林算法的低煤阶煤层气开发选区预测[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):596-603.  
CHEN Yue, WANG Liya, LI Guofu, et al. Prediction of favorable areas for low-rank coalbed methane based on random forest algorithm[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 596-603.
- [12] 董月霞,周海民,夏文臣.南堡凹陷火山活动与裂陷旋回[J].石油与天然气地质,2000,21(4):304-307.  
DONG Yuexia, ZHOU Haimin, XIA Wenchen. Volcanic activity and rift-subsidence cycles in Nanpu Sag[J]. Oil and Gas Geology, 2000, 21(4): 304-307.
- [13] 林伟强,曲丽丽,朱璐,等.井震结合判定井间砂体连通性研究及应用——以南堡油田M区中深层为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):373-381.  
LIN Weiqiang, QU Lili, ZHU Lu, et al. Evaluation of inter-well sand body connectivity by combination of well, seismic, and reservoir and its application: Taking the middle and deep layers of M area of Nanpu Oilfield as an example[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 373-381.
- [14] 董月霞,夏文臣,周海民.南堡凹陷第三系火山岩演化序列研究[J].石油勘探与开发,2003,30(2):24-26.  
DONG Yuexia, XIA Wenchen, ZHOU Haimin. Evolution sequence of tertiary volcanic rocks in the Nanpu sag, Eastern China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 24-26
- [15] 庄东志,谢伟彪.南堡凹陷5号构造东部深层火山岩储层流体性质识别方法[J].石油天然气学报,2014,36(5):73-76.  
ZHUANG Dongzhi, XIE Weibiao. A method for identifying fluid properties of deep volcanic reservoirs in the east of No. 5 structure in Nanpu Sag[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(5): 73-76.
- [16] 李昌年.火成岩微量元素岩石学[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.  
LI Changnian. Trace element petrology of igneous rocks[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992.
- [17] 梁新平,金之钧,刘全有,等.火山灰对富有机质页岩形成的影响——以西西伯利亚盆地中生界巴热诺夫组为例[J].石油与天然气地质,2021,42(1):201-211.  
LIANG Xinping, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Impact of volcanic ash on the formation of organic-rich shale: A case study on the Mesozoic Bazhenov Formation, West Siberian Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 201-211.
- [18] 程希,任战利.利用地球化学元素与矿物关系识别GS油田下干柴沟组地层岩性[J].地球物理学进展,2008,23(6):1903-1908.  
CHENG Xi, REN Zhanli. Identification of Ganchaigou group rock lithology in the GS Oilfield by relationship between elements and minerals using geochemical logging technology[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(6): 1903-1908.
- [19] 张明学,吴杰,胡玉双.松辽盆地丰乐地区营城组火山岩储层预测[J].地球物理学进展,2009,24(6):2145-2150.  
ZHANG Mingxue, WU Jie, HU Yushuang. Prediction of reservoirs in volcanic rocks of the Yingcheng formation in the Fengle area north of the Songliao basin[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(6): 2145-2150.
- [20] 支东明,贾春明,姚卫江,等.准噶尔盆地车排子地区火山岩油气成藏主控因素[J].石油天然气学报,2010,(2):166-169.  
ZHI Dongming, JIA Chunming, YAO Weijiang, et al. The major control factors of volcanic reservoir forming law in Chepaizi area of Junggar Basin[J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2010, (2): 166-169.
- [21] 刘双莲.常规测井技术识别火山岩裂缝方法研究——以松南火山岩为例[J].非常规油气,2022,9(4):16-22.  
LIU Shuanglian. Study on method of identifying volcanic rock fractures by conventional logging technology: A case study on Songnan volcanic rock[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(4): 16-22.
- [22] 刘双莲.页岩气“双甜点”参数测井评价方法[J].石油与天然气地质,2022,43(4):1005-1012.  
Liu Shuanglian. Logging evaluation of “double sweet spot” in shale gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2022,43(4): 1005-1012.
- [23] 张建民,李超炜,张继业,等.长深1井区火成岩岩性识别方法及应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(S1):106-109.  
ZHANG Jianmin, LI Chaowei, ZHANG Jiye, et al. A lithologic identification method of igneous rocks and its application in changling area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(S1): 106-109.
- [24] 张莹,潘保芝,印长海,等.成像测井图像在火山岩岩性识别中的应用[J].石油物探,2007;46(3):288-293.  
ZHANG Ying, PAN Baozhi, YIN Changhai, et al. Application of imaging logging maps in lithologic identification of volcanics[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(3): 288-293.
- [25] 王满,薛林福,潘保芝.FMI图像纹理统计方法识别火成岩岩性[J].测井技术,2009,33(2):110-114.  
WANG Man, XUE Linfu, PAN Baozhi. Lithology identification of igneous rock using FMI texture analysis[J]. Well Logging Technology, 2009, 33(2): 110-114.
- [26] 赵建,高福红.测井资料交会图法在火山岩岩性识别中的应用[J].世界地质,2003,22(2):136-140.  
ZHAO Jian, GAO Fuhong. Application of crossplots based on well log data in identifying volcanic lithology[J]. Global Geology, 2003, 22(2): 136-140.
- [27] 张丽华,潘保芝,单刚义,等.长岭地区火山岩储层流体性质测井预测[J].地球物理学进展,2009,24(6):2151-2155.  
ZHANG Lihua, PAN Baozhi, SHAN Gangyi, et al. Fluid property logging prediction of volcanic reservoirs in the Changling area[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(6): 2151-2155.

(编辑 徐佩)