

文章编号: 1001-6112(2009)04-0338-05

川西新场气田沙溪庙组 致密碎屑岩储层单井产能评价与预测

石磊^{1,2}, 匡建超¹, 曾剑毅¹, 刘鑫¹, 罗鑫¹, 蔡左花¹

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司, 成都 610016)

摘要: 川西新场气田侏罗系沙溪庙组气藏是典型的低渗透致密碎屑岩气藏, 由于地质条件复杂, 非均质性极强, 储层单井产能预测已成为难点之一。通过分析测井信息和储层物性, 提取声波时差、裂缝张开度、裂缝渗透率等 11 个与产能相关的参数, 并运用相关系数法确定裂缝张开度、裂缝渗透率、产能系数、裂缝孔隙度、裂缝发育指数和综合评价指数 6 个指标作为产能控制特征参数; 然后选取 33 个已测试层位作为已知样本, 利用支持向量机构建适合该区的产能预测方程, 预测标准误差为 0.066 1, 平均绝对误差仅为 0.018 2。预测精度较高; 最后, 利用所构建的产能方程对 24 个未测试层位的产能进行预测, 完成沙溪庙组气藏单井产能评价。

关键词: 产能评价与预测; 支持向量机; 致密碎屑岩; 沙溪庙组; 新场气田

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

SINGLE WELL PRODUCTIVITY EVALUATION AND PREDICTION IN TIGHT CLASTIC RESERVOIR ROCK OF SHAXIMIAO FORMATION IN THE XINCHANG GAS FIELD, WEST SICHUAN

Shi Lei^{1,2}, Kuang Jianchao¹, Zeng Jianyi¹, Liu Xin¹, Luo Xin¹, Cai Zuohua¹

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Southwest Branch, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610016, China)

Abstract: The gas reservoirs of Jurassic Shaximiao Formation in the Xinchang Gas Field of West Sichuan are typical low-permeability tight clastic ones. Due to complex geological conditions and strongly heterogeneous characteristics in this area, it is difficult to predict single well productivity. By analyzing logging information and reservoir physical property, we first extract 11 parameters related to productivity, such as interval transit time, fracture aperture, fracture permeability, etc. Second, with correlation coefficient method, 6 productivity controlling characteristic parameters are determined, including fracture aperture, fracture permeability, productivity coefficient, fracture porosity, fracture developing index and composite evaluation index. Third, we select 33 tested wells as known samples, construct productivity forecast equation with the theory of support vector machine, and then get the standard error of 0.066 1 and the mean absolute error of 0.018 2. In the end, with the equation, we predict 24 untested wells to complete single well productivity evaluation of Shaximiao Formation.

Key words: productivity evaluation and prediction; support vectors machine; tight clastic rock; Shaximiao Formation; Xinchang Gas Field

新场气田位于四川盆地西部, 是川西地区主力气田之一。20 世纪 80 年代后期至今, 先后勘探发现了沙溪庙组气藏、千佛崖组气藏、蓬莱镇组上部气藏、蓬莱镇组中部气藏和蓬莱镇组下部气藏。从产

量结构来看, 蓬莱镇组气藏产量最多, 占累计产量的 1/2 以上; 沙溪庙组产量仅占累计产量的 1/5, 而沙溪庙组储层是探明储量最丰富的气层, 其储量与产量明显不配套。为了维持该气田天然气开采的可持

收稿日期: 2008-07-14; 修订日期: 2009-06-20。

作者简介: 石磊 (1958—), 男, 高级工程师, 主要从事石油和天然气勘探工作。E-mail: shil@cdu.edu.cn。

基金项目: 四川省学术和技术带头人培养基金 (川人办发[2008]24 号); 四川省教育厅人文社科重点项目 (2008ZB026); 成都理工大学商学院自立项目 (Sxyzc08-09)。

续发展,关键是解决提高沙溪庙组气藏产能或寻找高产气井的问题。因此,研究沙溪庙组气藏储层单层产能的问题也就非常有必要。针对该区沙溪庙组气藏储层产能进行研究,建立起更符合川西沙溪庙组致密碎屑岩储层产能的评价指标,形成该区沙溪庙组致密碎屑岩储层产能的评价技术,将会更加深入认识该区储层特征,为气田开发规划部署、开发方案设计、开发动态分析、气井配产及开发方案调整提供参考依据^[1]。

1 地质概况

1.1 区域概况

研究区处于川西坳陷中段的一个北东东向隆起带上,该隆起带分割川西坳陷内2个主要负向构造单元——梓潼向斜和彭县大向斜。在这个相对隆起区域内,分布着一系列北东东向背斜构造,西部有鸭子河、隆丰场、绵竹、孝泉等背斜,向东有新盛场、丰谷等背斜。新场气田位于该隆起西段,由孝泉背斜及向东延伸的平缓鼻状背斜组成。轴部宽缓,两翼不对称,北翼倾角 2.5° ,南翼倾角 4° ,东部有一小型逆断层。圈闭面积约 80 km^2 ,闭合高度 25 m ,构造轴线北东东向。

1.2 沙溪庙组储层特征

新场气田所在区域钻遇地层自上而下有:第四系、下白垩统剑门关组、上侏罗统蓬莱镇组、中侏罗统遂宁组、上沙溪庙组、下沙溪庙组、上三叠统须家河组。沙溪庙组作为本次研究的主力气层,埋深 $2\ 100\sim 2\ 500\text{ m}$,厚度约 400 m ,总体为一发育在洪泛平原上的河流沉积。它是在大面积泛滥平原背景下多期发育的由暗紫红色泥岩、粉砂质泥岩和浅灰色长石岩屑细一中砂岩组合的河流相沉积,是沙溪庙组主要的储气砂体组合^[2]。

储层物性主要表现为基质孔隙度较低、基质渗透率低的特征,孔渗相关性不明显,且非均质性较强。孔隙度 $2.57\%\sim 14.70\%$,峰值介于 $5\%\sim 9\%$,平均为 8.43% 。基质渗透率一般小于 $0.2\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,最大值为 $11.96\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,峰值介于 $(0.1\sim 0.2)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均为 $1.4\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。渗透率低,导致储层有效渗滤性差,部分砂体不具备产能条件。这是新场气田沙溪庙组气藏储量大、产能偏低的原因,对该区储层单井产能精确预测的必要性也在于此。

2 单井产能控制特征参数确立

2.1 产能级别划分

根据新场气田沙溪庙组单层自然产能分布情况,

结合现场生产实际,为了研究的方便,把沙溪庙组单层产能级别划分标准定为:高产大于 $2\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,中产 $(1\sim 2)\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,低产小于 $1\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

2.2 反映裂缝特征的测井信息提取

新场气田沙溪庙组属于典型的致密碎屑岩储层,高产气层段一般为裂缝相对发育层段。裂缝作为天然气储集空间和渗流通道,对产能的影响至关重要。裂缝和产能的响应特征是多方面的。但是,在气田开发初期,能够方便地用于建模和预测的控制特征参数主要是测井信息。声波时差(AC)和深浅双侧向电阻率差值(ΔR)就是反映储层裂缝发育程度的主要信息。根据笔者以前的研究^[3],裂缝张开度(ϵ)、裂缝孔隙度(ϕ_f)、裂缝渗透率(k_{f1})、裂缝线密度(d_f)、裂缝发育指数(F_1)和综合评价指数(F_2)等参数都是反映储层裂缝发育程度的信息,对单井产能大小起着控制作用,计算方法见参考文献^[3]。

2.3 产能控制特征参数确立

要利用所提取的特征参数对产能进行准确评价和预测,首先应明确哪些特征参数对产能起着主要控制作用^[4~8]。本次研究采用相关系数法,来分析测井信息对气井产能的影响。

根据33个已测试样本数据,分别求取AC, ϵ , ϕ_f , k_{f1} , $k_{f1}\cdot h$ (裂缝产能系数), d_f , ΔR , ϕ (储层孔隙度), $\phi\cdot h$ (储层储集系数), F_1 和 F_2 这11个自变量(特征参数)与1个因变量(自然产能)的相关系数,分别用 R_1, R_2, \dots, R_{11} 表示: $R_1=0.334\ 5, R_2=0.897\ 5, R_3=0.920\ 6, R_4=0.916\ 6, R_5=0.955\ 8, R_6=0.845\ 0, R_7=0.480\ 6, R_8=0.570\ 3, R_9=0.133\ 2, R_{10}=0.917\ 9, R_{11}=0.854\ 3$ 。对比发现,与自然产能相关程度较高的特征参数有: $\epsilon, k_{f1}, k_{f1}\cdot h, \phi_f, F_1, F_2$,其相关系数均大于0.85,因此选取这6个参数作为控制单井产能的特征参数。裂缝张开度是指单位井段内裂缝的累计宽度。只要裂缝未被堵死,有一定张开度,就是高渗滤通道。研究表明,石油流过储层孔道的直径需 $50\ \mu\text{m}$,而天然气只需 $5\ \mu\text{m}$,因此对于同样张开度的裂缝而言,它对天然气渗流的影响远远大于对石油的影响。裂缝张开度在一定程度上反映裂缝延伸和穿层范围,张开度越大,裂缝延伸和穿层范围就越大,渗透性就越好。储层渗透率由基质渗透率和裂缝渗透率组成,在致密低渗碎屑岩储层中,储层基质渗透率甚小,对储层渗透性的总贡献也甚小,几乎可以忽略不计,因此储层的有效渗透率主要是指裂缝渗透率。而裂缝渗透率与储层厚度 h 的乘积反映了储层的总渗流能力。在致密碎屑岩储层中,裂缝既是

重要的渗流通道,也是不可忽视的储集空间,因此裂缝孔隙度的大小在一定程度上反映了储层储集性的好坏。 F_1 为裂缝发育指数,反映裂缝段的裂缝储渗性。 F_2 为综合评价指数,反映储层总体孔隙发育程度和裂缝储渗性能的高低。

3 单井产能评价与预测

3.1 支持向量机原理

支持向量机是从线性可分情况下的最优分类面发展起来的^[9-12],其基本思路是把在线性可分条件下构建最优超平面的问题转化为求解式(1)所示的二次规划问题。

$$\begin{cases} \min \Phi(w) = \frac{1}{2}(w \cdot w) + C \sum_{i=1}^l \epsilon_i \\ s.t. \quad y_i(w x_i + b) \geq 1 - \epsilon_i, \epsilon_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (1)$$

式中: w 和 b 为广义参数; C 为惩罚因子; ϵ 为松弛

项; (x_i, y_i) 表示第 i 个观察样本; l 为观察样本的个数。式(1)的最优解为下面的 Lagrange 函数的鞍点:

$$L = (w, b, \alpha) = \frac{1}{2}(w \cdot w) + C \sum_{i=1}^l \epsilon_i - \sum_{i=1}^l \alpha_i [y_i(w x_i + b) + \epsilon_i - 1] - \sum_{i=1}^l \beta_i \epsilon_i \quad (2)$$

式中: $\alpha \geq 0$ 为 Lagrange 乘数; β_i 为 ϵ_i 的权值。

为求解方便,可将构建最优超平面的问题转化为求解(1)式的对偶二次规划问题:

$$\begin{cases} \max W(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \\ s.t. \quad \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0, 0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (3)$$

求解该二次规划问题,获得最优解 α^* ,可求取

表 1 川西新场气田沙溪庙组储层已知样本参数输入汇总

Table 1 Input sample parameters of the Shaximiao Formation of Middle Jurassic in the Xinchang Gas Field, West Sichuan

井号	层号	ϵ/mm	$\phi_f, \%$	$k_f/\mu\text{m}^2$	$k_f \cdot h/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{m})$	F_1	F_2	产能/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
CX132	B	0.298	0.038	0.140	4.900	0.186 2	21.0	0.243 1
CX132	C	0.892	0.080	2.648	52.960	4.236 8	532.0	1.564 8
CX133	B	0.408	0.032	0.233	4.194	0.134 2	15.6	0.242 2
CX133	C	0.963	0.067	2.587	33.630	2.253 3	251.0	1.313 4
CX134-2	A	0.597	0.020	0.293	7.032	0.140 6	22.9	0.249 6
CX134-2	B	0.559	0.026	0.335	6.365	0.165 5	22.4	0.306 6
CX134-2	C	0.948	0.169	6.307	126.100	21.318 0	3 499.0	3.084 9
CX136	A	0.186	0.027	0.039	0.702	0.019 0	2.5	0.056 2
CX136	C	0.916	0.079	2.760	44.160	3.488 6	42.6	1.746 2
CX151	C	0.152	0.048	0.046	0.598	0.028 7	0.6	0.221 0
CX153-2	A	0.289	0.032	0.111	2.775	0.088 8	16.0	0.177 9
CX153-2	B	0.282	0.030	0.099	2.574	0.077 2	15.9	0.152 1
CX153-2	C	0.315	0.034	0.138	1.518	0.051 6	9.0	0.182 8
CX154	A	0.346	0.044	0.220	4.180	0.183 9	24.5	0.322 5
CX154	AB	0.350	0.047	0.239	6.214	0.292 1	43.3	0.391 0
CX154	B	0.423	0.040	0.298	5.662	0.226 5	35.4	0.340 5
CX154	C	0.403	0.044	0.297	3.267	0.143 7	18.8	0.360 7
CX158	AB	0.351	0.077	0.395	9.480	0.730 0	116.0	0.712 6
CX158	B	0.237	0.046	0.108	1.620	0.074 5	1.3	0.260 7
CX158	C	0.306	0.043	0.166	2.490	0.107 1	15.8	0.274 8
CX160	A	0.902	0.087	2.944	70.660	6.147 1	1 000.0	1.704 2
X801	B	0.108	0.059	0.029	0.986	0.058 2	7.1	0.304 8
X801	C	0.099	0.053	0.022	0.308	0.016 3	2.2	0.256 2
X802	B	0.335	0.012	0.054	0.918	0.011 0	1.5	0
X802	C	0.988	0.123	4.996	84.930	10.4470	1 541.0	2.400 0
X803	A	0.356	0.096	0.507	8.619	0.827 4	112.0	0.885 1
X803	B	0.283	0.036	0.120	3.360	0.121 0	13.9	0.201 3
X803	C	0.328	0.033	0.148	1.258	0.041 5	3.6	0.180 1
X804	C	1.055	0.127	5.875	99.880	12.684 0	1 996.0	2.580 0
X805	A	0.335	0.044	0.205	4.305	0.189 4	26.3	0.337 4
X805	B	0.123	0.048	0.030	1.110	0.053 3	6.8	0.208 0
X805	C	0.191	0.043	0.065	0.650	0.028 0	3.7	0.193 6
X808	A	0.168	0.022	0.025	0.525	0.011 6	1.6	0

参数 w, b , 进而构建分类函数:

$$f(x) = wx + b \quad (4)$$

3.2 已测试单井产能方程建立与检验

根据已经测试的 16 口井归纳出 33 组数据, 其中高产层 3 个、中产层 4 个、低产层 26 个(表 1), 选定其中 23 组作为训练样本, 后 10 组作为测试样本。

致密碎屑岩储层地质条件复杂, 非均质性极强, 样本数据较少, 因此采用支持向量机这种机器学习方法来构建储层产能预测模型, 在处理小样本问题中具有较高的泛化能力。以 $\epsilon, k_f, k_f \cdot h, \phi_f, F_1$ 和 F_2 这 6 个影响因素作为输入, 以自然产能作为输出, 以 23 个样本作为学习样本进行学习。此时求得:

$$w = (0.5077 \quad 9.6340 \quad 0.0819 \quad 0.0080 \quad 0.0641 \quad -0.0005)^T$$

$$b = -0.3119$$

产能预测方程可表示为:

$$f(x) = wx + b$$

$$= 0.5077\epsilon + 9.634\phi_f + 0.0819k_f + 0.008k_f \cdot h + 0.0641F_1 - 0.0005F_2 - 0.3119$$

根据上面建立的产能预测方程, 用剩余的 10 个样本对模型进行验证, 预测值见表 2。从结果来看, 预测产能与实际产能相差甚小, 预测产能分级和实际产能分级完全符合, 说明所构建的基于支持向量机的产能预测模型与实际生产情况完全符合。从使用样品井的产能来看, 既有高产井, 又有中产井, 还有低产井; 从引入方程的变量来看, 既有孔隙参数, 又有裂缝参数, 还有评价指标; 从样品井的分布来看, 有一定代表性; 从检验样本预测结果来看,

效果比较理想。因此, 该产能方程完全可以用于该工区其他单井储层产能的预测。

为了检验所构建的基于支持向量机单井储层产能预测模型在产能方面精度较高这一显著特点, 研究中还用多元回归和 BP 神经网络处理了相同数据, 采用标准误差和平均绝对误差作为模型评价指标, 结果如表 3 所示。由表 3 误差数据, 可以清楚认识本次研究所建立的预测模型具有良好的预测效果。

3.3 未测试单井产能预测与评价

利用未测试井层的特征参数, 采用已建立的支持向量机产能预测模型, 即可进行储层自然产能预测, 结果见表 4。

对比预测产能结果与该区裂缝发育程度判识结果发现, 裂缝发育者对应高产, 裂缝较发育者对应中产, 裂缝不发育者对应低产。只有 2 个样本除外, CX160 井—B 层和 X802 井—A 层裂缝均较发育, 而自然产能却分别只有 0.5057×10^4 和 0.7667×10^4 m^3/d 。通过试井分析发现, 这 2 口井为不完善井, 表皮污染未解除, 因而误差较大。其余 22 个未测试层位预测结果均与裂缝判识结果一致, 说明两者一致性较强。另外, 影响产能的因素很多, 地层水活

表 3 3 种方法预测误差对比

Table 3 Error contrast of 3 methods in prediction

预测方法	平均绝对误差	标准误差
多元回归	0.0852	0.2452
BP 神经网络	0.0545	0.1596
支持向量机	0.0182	0.0661

注: 平均绝对误差 = $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_i^*|$,

标准误差 = $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2}{n}}$,

其中: n 为检验样本个数; x_i 表示第 i 个样本的产能预测值; x_i^* 表示第 i 个样本的产能实测值。

表 2 川西新场气田沙溪庙组储层检验样本预测结果误差分析
Table 2 Analysis of prediction error of the Shaximiao Formation of Middle Jurassic in the Xinchang Gas Field, West Sichuan

井号	层位	实际产能/ ($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	预测产能/ ($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	绝对 误差	相对 误差	实际产 能级别	预测产 能级别
X802	B	0	-0.0144	0.0064	—	低产	低产
X802	C	2.4000	2.3625	0.0034	0.0156	高产	高产
X803	A	0.8851	0.9013	0.0039	0.0183	低产	低产
X803	B	0.2013	0.2162	0.0133	0.0740	低产	低产
X803	C	0.1801	0.1957	0.0027	0.0866	低产	低产
X804	C	2.5800	2.5426	0.0041	0.0145	高产	高产
X805	A	0.3374	0.3324	0.0042	0.0148	低产	低产
X805	B	0.2080	0.2244	0.0032	0.0788	低产	低产
X805	C	0.1936	0.2099	0.0166	0.0842	低产	低产
X808	A	0	-0.0084	0.0081	—	低产	低产

表 4 川西新场气田沙溪庙组未测试层预测结果

Table 4 Prediction outcomes of untested reservoirs of the Shaximiao Formation of Middle Jurassic in the Xinchang Gas Field, West Sichuan

井号	层位	ϵ/mm	$\phi_f, \%$	$k_f/\mu\text{m}^2$	$k_f \cdot h/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{m})$	F_1	F_2	预测产能 $/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	产能 级别
CX129	A	1.367	0.113	8.767	131.505	14.86	3 621.00	2.548 3	高产
CX129	B	1.189	0.147	8.662	82.289	12.10	3 193.00	2.385 0	高产
CX132	A	1.103	0.070	3.549	67.431	4.72	730.00	1.696 4	中产
CX133	A	0.713	0.074	1.567	47.010	3.48	818.00	1.124 7	中产
CX136	B	0.487	0.025	0.247	2.964	0.07	6.50	0.217 0	低产
CX151	A	0.627	0.072	1.178	20.026	1.44	56.00	1.001 8	中产
CX151	B	0.111	0.036	0.019	0.285	0.01	0.15	0.089 4	低产
CX158	A	0.572	0.087	1.186	29.650	2.58	51.60	1.263 4	中产
CX160	B	0.072	0.081	0.018	0.648	0.05	1.39	0.505 7	低产
CX160	C	0.772	0.107	2.651	23.859	2.55	389.00	1.474 3	中产
X801	A	0.197	0.055	0.088	1.584	0.09	8.90	0.332 4	低产
X802	A	0.259	0.094	0.263	4.734	0.44	83.80	0.766 7	低产
X804	A	0.294	0.051	0.183	2.928	0.15	18.10	0.361 5	低产
X804	B	0.731	0.095	2.113	80.294	7.63	1 075.00	1.779 6	中产
X806	A	0.607	0.079	1.210	27.830	2.20	334.00	1.056 7	中产
X806	B	0.140	0.051	0.041	0.902	0.05	6.10	0.254 5	低产
X806	C	0.177	0.043	0.056	0.840	0.04	5.30	0.197 2	低产
X807	A	0.594	0.088	1.290	29.670	2.61	372.00	1.165 2	中产
X807	AB	0.570	0.085	1.150	31.050	2.64	393.00	1.119 0	中产
X807	B	0.202	0.038	0.065	0.780	0.03	4.00	0.162 4	低产
X807	C	0.170	0.032	0.038	0.532	0.02	2.20	0.084 4	低产
X808	AB	0.124	0.051	0.033	0.627	0.03	4.70	0.243 2	低产
X808	B	0.147	0.049	0.044	0.660	0.03	5.00	0.236 8	低产
X808	C	0.198	0.022	0.035	0.560	0.01	1.40	0.003 1	低产

动、井网部署、井间干扰、工艺技术水平等都会影响实际产能,给产能精确预测带来困难。

4 结论

1)与储层产能相关的因素众多。本次研究运用相关系数法,确定裂缝张开度、裂缝渗透率、产能系数、裂缝孔隙度、裂缝发育指数和综合评价指数等 6 个指标,作为新场气田沙溪庙组储层单井产能控制特征参数。

2)通过对新场气田 18 口气井、33 个已测试层位的分析建模,构建了与该区储层实际地质特征相吻合的产能预测方程,实现了对另外 24 个未测试层位产能的准确预测,效果比较理想。

3)基于测井资料及其他地质参数的支持向量机方法可以较好地预测储层产能,为产能预测及评价提供有效途径。

参考文献:

1 黄天虎,段永刚. 气井产能预测综述[J]. 石油地质与工程, 2007,21(2):43~47

2 朱 彤,叶 军. 川西坳陷致密碎屑岩气藏类型划分及特征[J]. 石油实验地质,2004,26(6):537~541,546

3 匡建超,徐国盛,王允诚等. 致密碎屑岩储层裂缝和产能预测的单井建模[J]. 矿物岩石,2001,21(2):62~67

4 匡建超,王允诚,胡远来等. 致密碎屑岩储层裂缝和产能的横向识别[J]. 矿物岩石,2001,21(4):75~78

5 吕正祥,卿 淳,曾小英. 川西新场气田下沙溪庙组气藏预测评价研究[J]. 石油实验地质,2001,23(4):400~402,407

6 杨长保,聂兰仕,孙鹏远等. 改进的模糊神经网络模型在储层产能预测中的应用研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2003,33(1):48~55

7 刘宗彦,石燕伟. 关于测井储层的产能预测研究[J]. 国外测井技术,2007,22(5):35~36,44

8 王 昀,张津林. 基于地震资料的储层产能预测方法[J]. 石油天然气学报,2007,29(3):87~89

9 杨志明,刘广利. 不确定性支持向量机原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2007

10 Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York:Springer-Verlag,2000. 193~245

11 乐友喜,袁全社. 支持向量机方法在油气储层参数预测中的应用[J]. 天然气工业,2005,25(12):45~47

12 张彦周,刘叶玲,谢宝英. 支持向量机在储层厚度预测中的应用[J]. 勘探地球物理进展,2005,28(6):423~424,431