

基于优选地震参数的缝洞型油藏单井产能预测模型

解慧^{1,2}, 赵进^{1,2}, 郭臣^{1,2}, 陈勇^{1,2}

(1.中国石化西北油田分公司勘探开发研究院,新疆乌鲁木齐830011;

2.中国石化碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室,新疆乌鲁木齐830011)

摘要:缝洞型碳酸盐岩油藏的储层非均质性强、流体分布复杂,产能预测相关参数往往难以获取,为单井产能准确预测带来较大困难。通过对常见的地震参数进行优选,提出了一种单井产能预测新方法。基于建立基质-裂缝-溶洞三重介质模型,利用 Spearman 和 Pearson 相关系数法优选出影响单井产能的地震参数,进而建立优选地震参数与窜流系数和弹性储容比的关系式,将其引入三重介质产能方程中,从而对不同地质背景下的缝洞型碳酸盐岩油藏单井产能进行预测。以新疆某缝洞型碳酸盐岩油藏实际生产数据及前期测试资料为基础,利用新方法对断裂区、暗河区、明河区及复合岩溶区4个区域134口油井进行产能预测和误差分析,结果表明:该方法对暗河区油井产能预测精度最高,可达87%;对明河区和复合岩溶区预测精度较低,为80%;同时,该方法的平均预测精度为83%,高于多元线性回归、BP神经网络、支持向量机等方法的预测结果。新方法充分利用已有地震资料,进一步提高了产能预测精度,为复杂缝洞型碳酸盐岩油藏产能预测提供了新思路。

关键词:缝洞型碳酸盐岩油藏;单井产能预测;三重介质模型;三维地震参数;岩溶区

中图分类号:TE344

文献标识码:A

Well productivity prediction model for fracture-cavity reservoirs based on optimized seismic parameters

XIE Hui^{1,2}, ZHAO Jin^{1,2}, GUO Chen^{1,2}, CHEN Yong^{1,2}

(1. Research Institute of Exploration and Development, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi,

Xinjiang, 830011, China; 2. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery of Fracture-cavity

Carbonate Reservoir, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: Fracture-cavity carbonate reservoirs have strong heterogeneity and complex fluid distribution. It is often difficult to obtain parameters related to productivity prediction by conventional methods, which brings a great challenge for accurately predicting the single well productivity. This paper proposes a new method for predicting the single well productivity by selecting optimized common seismic parameters. After establishing a matrix-fracture-cave triple medium model, this paper optimizes seismic parameters affecting the single well productivity by Spearman and Pearson method, establishes the relationships between the optimized seismic parameters and the interporosity flow coefficient and storativity ratio, and introduces it into the triple medium productivity equation to predict the single well productivity of the reservoirs with different geological conditions. Based on the actual production data and preliminary test data of a fracture-cavity carbonate reservoir in Xinjiang, this paper uses the new method to predict the productivity of 134 oil wells in four areas (fault areas, underground river areas, aground river areas, and composite karst areas) and analyze errors. The results show that this method has the highest accuracy in predicting the productivity of oil wells in underground river areas, up to 87%, and for oil wells in aground river areas and composite karst areas, the prediction accuracy is low and is about 80%. The average prediction accuracy of this method is 83%, which is higher than those of multiple linear regression, BP neural network, and support vector machine. The new method makes full use of the existing seismic data, further improves the productivity prediction accuracy, and provides a new idea for predicting the productivity of complex fracture-cavity carbonate reservoirs.

Key words: fracture-cavity carbonate reservoir; single well productivity prediction; triple medium model; three-dimensional seismic parameter; karst area

碳酸盐岩油气藏储量占世界油气总储量的50%以上,产量占世界油气总产量的60%以上,是全球重要的油气勘探开发领域之一^[1-2]。碳酸盐岩油气藏储集体可分为孔隙型、裂缝-孔隙型及缝洞型3种类型,储集空间具有尺度差异大、结构复杂、非均质性强等特征^[3-6],常规产能预测方法所需参数难以获取,导致传统的油气藏产能预测方法已不再适用,如何准确预测缝洞型碳酸盐岩油藏单井产能是亟需解决的重要课题之一。

目前,用于缝洞型碳酸盐岩油藏的单井产能预测方法主要有以下3类:第一类是机器学习方法,主要包括支持向量机方法和神经网络方法等,该方法通过学习已知样本点的单井产能与影响因素之间的潜在规律,对未知样本点做出预测和判断^[7-10];第二类是离散介质数值模拟方法,离散介质模型能够精确描述孔隙、裂缝和溶洞的连通性以及流体在各种流动通道中的流动规律^[11-15],但这类方法对计算机硬件和数值模拟技术的要求比较苛刻,目前尚未在油田进行大规模应用;第三类是等效连续介质数值模拟方法,该方法在连续介质理论的基础上将储层裂缝和溶洞等效为具有对称渗透率张量的各向异性连续介质^[16-19],通过等效处理大大简化了数值计算,但是该方法并不适用于复杂地质特征的缝洞型碳酸盐岩油藏,并且等效连续介质模型无法准确描述裂缝和溶洞的局部渗流特征,不能准确反映储层油水驱替的真实状态^[20]。以上几种方法都是基于储层渗流相关参数(如渗透率、孔隙度、毛管压力和相对渗透率曲线)来进行产能预测。通常情况下,这些参数通过单井测井解释、岩心分析和室内实验手段来获取。然而,由于缝洞型碳酸盐岩储层的复杂性,准确获取其相关参数的难度较大,尤其是对井间参数的推断更是存在极大的不确定性,从而影响预测结果的准确性。为解决缝洞型碳酸盐岩油藏单井产能预测方法的局限,基于新疆塔河油田现场生产及测试资料,以三重介质模型为基础,利用 Spearman 和 Pearson 相关系数法优选地震参数,提出了一种基于地震参数的单井产能预测新方法。

1 高精度三维地震反射特征

塔河油田位于新疆维吾尔自治区库车县和轮

台县境内,主力勘探开发层系为奥陶系^[21-22],是典型的缝洞型碳酸盐岩油气藏。塔河油田典型储层岩心表现出多重介质属性,包括基质型、裂缝型及溶蚀孔洞型等(图1)。

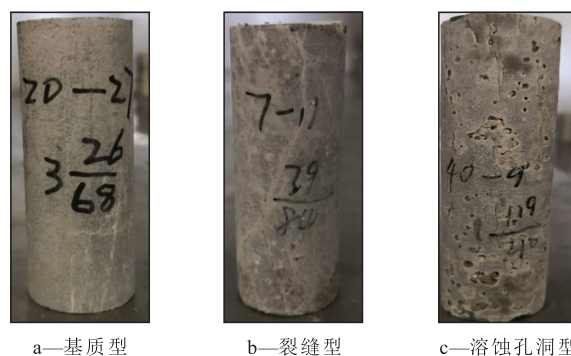


图1 塔河油田典型储层岩心

Fig.1 Typical reservoir cores of Tahe Oilfield

高精度三维地震是大范围探测碳酸盐岩储层特征的关键技术,其地震反射可以分为“串珠状”反射、杂乱强反射、片状反射和弱反射等^[23],通过地震资料可以方便地获得空间距离、串珠面积、频率衰减百分比、振幅变化率等地震参数。其中,“串珠状”反射的反射能量和振幅最强,具有横向延伸范围小、纵向分布差异大的特点,当储层内部的岩石性质(含有大量油气、较大的岩溶洞穴和孔隙度)与周围岩石性质差距较大时,就会形成“串珠状”反射,在地震剖面上变密度显示为红黑相间的珠状或者颗粒状^[24]。采用高精度三维地震技术进行塔河油田缝洞型碳酸盐岩油气藏勘探,发现存在大量的“串珠状”地震反射(图2)。

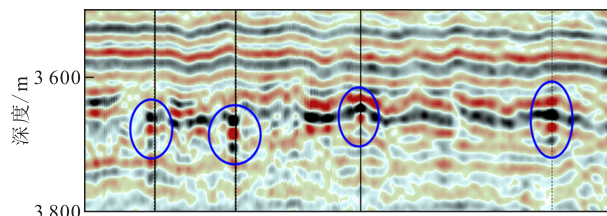


图2 塔河油田“串珠状”反射地震解释结果

Fig.2 Diagram of beadlike seismic reflection waves in Tahe Oilfield

实践发现,塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏中高产井的位置很好地对应了“串珠状”反射^[25],因此“串珠状”反射是缝洞型碳酸盐岩油藏部署井位的重要参考^[26]。高精度三维地震资料虽然可以辅助确定井位,但是无法直接预测单井产能,若能将地震参数信息与单井产能之间直接建立联系,那么不

仅能够为描述碳酸盐岩储层复杂渗流条件提供途径,而且将绕过常规单井产能预测方法中参数难以获取的桎梏,为缝洞型碳酸盐岩油藏单井产能预测带来便捷。

2 考虑地震参数的产能预测模型

根据缝洞型碳酸盐岩储层特点,将该类储层的储渗空间简化为三重介质模型,包括基质、溶洞和裂缝,基本假设条件如下:①储层均质无限大且渗透率各向同性。②油井为定压生产。③储层流体为单相流体。④渗流规律满足达西定律,压缩系数为常数。

以吴玉树等提出的基质-溶洞-裂缝型油藏模型^[27]为基础,建立三重介质数学模型,基质、溶洞、裂缝这3种渗流介质的控制方程分别为:

$$\phi_1 C_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} = \frac{\alpha_1 K_1}{\mu} (p_3 - p_1) \quad (1)$$

$$\phi_2 C_2 \frac{\partial p_2}{\partial t} = \frac{\alpha_2 K_2}{\mu} (p_3 - p_2) \quad (2)$$

$$\phi_3 C_3 \frac{\partial p_3}{\partial t} = \frac{K_3}{\mu} \nabla^2 p_3 - \frac{\alpha_1 K_1}{\mu} (p_3 - p_1) - \frac{\alpha_2 K_2}{\mu} (p_3 - p_2) \quad (3)$$

定义无因次变量为:

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (4)$$

$$t_D = -\frac{K_3 t}{\mu r_w^2 (\phi_3 C_3 + \phi_1 C_1 + \phi_2 C_2)} \quad (5)$$

$$p_{Dj}(r_D, t_D) = \frac{2\pi K_3 h}{\mu} [p_i - p_j(r, t)] \quad j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

对 t_D 做 Laplace 变换并化简得:

$$\left[\frac{\partial^2 \tilde{p}_{D3}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \tilde{p}_{D3}}{\partial r_D} - \left(\frac{\omega_1 s \lambda_1}{\omega_1 s + \lambda_1} + \frac{\omega_2 s \lambda_2}{\omega_2 s + \lambda_2} + (1 - \omega_1 - \omega_2) s \right) \right] \tilde{p}_{D3} = 0 \quad (7)$$

ω_j 和 λ_j 定义如下:

$$\omega_j = \frac{\phi_j C_j}{\phi_1 C_1 + \phi_2 C_2 + \phi_3 C_3} \quad (8)$$

$$\lambda_j = \frac{\alpha_j K_j r_w^2}{K_3} \quad j = 1, 2 \quad (9)$$

对于无限大储层, Laplace 空间内的井底定产压力解为:

$$\tilde{p}_{wD3} = \frac{K_0(\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)} K_1(\sqrt{sf(s)})} \quad (10)$$

其中:

$$f(s) = \frac{a(s + \xi_1)(s + \xi_2)}{(s + \delta_1)(s + \delta_2)} \quad (11)$$

$$\xi_j = \frac{1}{2a} [b + (-1)^j \sqrt{b^2 - 4ac}] \quad (12)$$

$$\delta_j = \frac{\lambda_j}{\omega_j} \quad (13)$$

$$\begin{cases} a = 1 - \omega_1 - \omega_2 \\ b = \frac{\lambda_2}{\omega_2} (1 - \omega_1) + \frac{\lambda_1}{\omega_1} (1 - \omega_2) \\ c = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\omega_1 \omega_2} \end{cases} \quad (14)$$

当 s 很小时,可以得到长时近似解:

$$\tilde{p}_{wD3} = -\frac{1}{s} [\ln(\sqrt{sf(s)}) + 0.5772 - \ln 2] \quad (15)$$

根据杜哈美原理,油井定压产量解 \tilde{q}_D 与定产井底压力解 \tilde{p}_{wD} 的关系式为:

$$\tilde{q}_D = \frac{1}{s^2} \frac{1}{\tilde{p}_{wD3}} \quad (16)$$

将(15)式代入(16)式可得缝洞型碳酸盐岩油藏单井产能预测方程为:

$$\tilde{q}_D = -\frac{1}{s [\ln(\sqrt{sf(s)}) + 0.5772 - \ln 2]} \quad (17)$$

弹性储容比和窜流系数是(17)式中非常重要的2个变量,但这2个变量的准确数值通常难以获取。试图通过建立地震参数与弹性储容比、窜流系数之间的函数关系,将地震参数引入缝洞型碳酸盐岩油藏单井的产能方程中。

假设弹性储容比、窜流系数与地震参数存在多元线性关系:

$$\omega_1 = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad (18)$$

$$\omega_2 = b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (19)$$

$$\lambda_1 = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n \quad (20)$$

$$\lambda_2 = d_1 X_1 + d_2 X_2 + \dots + d_n X_n \quad (21)$$

于是,缝洞型碳酸盐岩油藏单井产能评价方程可写为:

$$q = f(X_1, X_2, \dots, X_n, a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n, c_1, c_2, \dots, c_n, d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (22)$$

3 优选地震参数产能预测方法

新疆塔河油田根据不同的储层地质背景划分

为4个区域,分别是断裂区、明河区、暗河区和复合岩溶区。由于不同地质背景下单井产能主控因素不同,所以在对不同区域进行预测时,选用的地震参数也应不同。为了优选适合每个区域的地震参数,采取统计学中的相关系数法(Correlation coefficient)进行变量的相关性分析,最常用的有 Pearson 和 Spearman 相关系数法。

Pearson 相关系数法(Pearson product-moment correlation coefficient)即应用 Pearson 相关系数度量 2 个变量之间的线性关系^[28]。设有 n 个数据对 $(a_i, b_i)(i = 1, 2, \dots, n)$, 则 Pearson 相关系数计算公式为:

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}} \quad (23)$$

其中:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (24)$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i \quad (25)$$

Pearson 相关系数的取值范围为: $|r_p| \leq 1$, r_p 为正值说明两变量正相关, 否则为负相关, $|r_p|$ 越大两者相关性越强。

Spearman 相关系数法即应用 Spearman 等级相关系数(rank correlation)的单调方程评价 2 个统计变量的相关性^[29], 其中 Spearman 等级相关系数是衡量 2 个变量依赖性的非参数指标。设 n 对变量值的 X 值和 Y 值分别从小到大排序, 把 n 对变量值转换成

n 对秩次, 各对秩次之差记为 $D_i(i = 1, 2, \dots, n)$, Spearman 相关系数计算公式为:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (26)$$

Spearman 相关系数的取值范围为: $|r_s| \leq 1$, r_s 为正值说明两变量正相关, 否则为负相关, $|r_s|$ 越大两者相关性越强。

Pearson 和 Spearman 相关系数法从不同的空间维度衡量 2 个变量之间的关系紧密性。在本次研究中影响单井产能这一目标因素的主要地震参数包括: 距主断裂距离/距明河距离/距暗河距离(X_1)、均方根振幅(Root Mean Square Amplitude, RMS)(X_2)、频率衰减百分比(X_3)、“串珠”面积(X_4)、振幅变化率(X_5)、“甜点”最小值(X_6)和“甜点”最大值(X_7)。采用 Spearman 和 Pearson 相关系数法, 分析地震参数对油井产能的影响程度。首先统计研究区 134 口油井产量数据, 并提取单井的主要地震参数值; 然后将地震参数与生产井产能进行相关性分析, 分别优选出断裂区、明河区、暗河区和复合岩溶区相关性最强的 3 个地震参数; 最后建立基于地震参数的产能预测方程, 进行产能预测。

利用 Pearson 和 Spearman 相关系数法对塔河油田 4 个区域的现场资料和地震参数进行单井初期产能相关性分析。相关系数绝对值越接近于 1, 表示两者相关性越强。由结果(表 1)可知, 断裂区单井产能与“串珠”面积、振幅变化率、距主断裂距离具有较好相关性; 暗河区单井产能与“串珠”面积、振幅变化率、“甜点”最小值具有较好相关性; 明河区

表 1 地震参数与单井初期产能相关性分析
Table 1 Correlation analysis of seismic parameters and initial productivity data

地质分区	相关性分析方法	不同地震参数的相关系数						
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
断裂区	Pearson	-0.401	-0.095	-0.064	0.718	0.692	0.294	-0.222
	Spearman	-0.473	-0.132	0.037	0.676	0.475	0.434	-0.278
暗河区	Pearson	-0.11	0.116	-0.247	0.875	0.853	0.815	0.012
	Spearman	-0.113	0.139	-0.167	0.725	0.743	0.745	0.001
明河区	Pearson	-0.237	0.125	-0.269	0.830	0.816	0.786	0.015
	Spearman	-0.242	0.163	-0.211	0.707	0.718	0.793	0.001
复合岩溶区	Pearson		-0.380	0.805	0.750	0.829	0.527	-0.354
	Spearman		-0.411	0.791	0.612	0.737	0.237	-0.335

单井产能与“串珠”面积、振幅变化率、“甜点”最小值具有较好相关性;复合岩溶区单井产能与振幅变化率、“串珠”面积、频率衰减百分比具有较好相关性。

通过各区域优选地震参数的差异不难发现,“串珠”面积在各地质分区内均与产量有较强的相关性,这是由于“串珠状”反射是地下介质性质发生变化的反映,一般代表该位置含有油气^[30],因此“串珠”面积与产量的相关性符合开发的基本认识。其次,断裂区生产井产量与主断裂表现出较强的相关性,这是由于裂缝是碳酸盐岩主要的渗流介质,是高产的必要条件,主断裂附近产生的次级裂缝和微裂缝能够为生产井提供更加丰富的渗流通道;明河区和暗河区与河道的相关性总体较弱,或与河道沉积填充物存在较多泥质含量有关^[31],对生产的促进作用有限,但两相比较而言,明河区河道对生产井产量影响稍大。此外,振幅变化率是表征地震波动力学特征的重要参数,地震波振幅异常能反映储层波阻抗、地层厚度、孔隙度及流体的异常变化,是判定有利储集区的重要地震参数之一,而频率衰减百分比可以预测岩性和砂泥比,通过检测高频成分吸收衰减的异常响应,可有效预测缝洞型碳酸盐岩储层沉积条件^[32],振幅变化率与频率衰减百分比通常指示较为优质的储集和渗流条件,是单井高产的重要影响因素。综上分析,Pearson和Spearman相关系数法计算结果符合现场经验和缝洞型碳酸盐岩储层渗流规律的认识,具有合理性。

根据前期目标区内典型井试井解释结果,统计4个区域溶洞弹性储容比和窜流系数计算数学平均值(表2)。

为充分利用已有产能计算理论,将各区优选地震参数数据与表2结果代入(18)~(21)式进行拟合,建立油田断裂区、暗河区、明河区、复合岩溶区弹性储容比、窜流系数与优选地震参数之间的关系方程,各拟合回归系数见表3。

将通过地震参数计算得到的弹性储容比和窜

表2 塔河油田4个区域典型井试井解释数据统计
Table2 Well-testing interpretation data of typical well in four areas of Tahe Oilfield

地质分区	溶洞弹性储容比	溶洞-裂缝窜流系数	裂缝弹性储容比	裂缝-基质窜流系数
断裂区	0.250	1.5×10^{-6}	0.121	1.2×10^{-7}
暗河区	0.187	6.1×10^{-7}	0.053	1.53×10^{-8}
明河区	0.159	3.68×10^{-7}	0.065	2.5×10^{-8}
复合岩溶区	0.224	4.25×10^{-6}	0.098	2.24×10^{-7}

流系数分别代入(10)~(14)式和(17)式,将单井产能预测新方法得出的结果与实际生产数据进行对比(图3)。

样本数据预测精度的计算式为:

$$P = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|q_{i\text{实际}} - q_{i\text{预测}}|}{q_{i\text{实际}}} \quad (27)$$

按照(27)式计算各区预测精度,计算得到断裂区33口“串珠状”反射井样本数据的预测精确度达85%;暗河区48口“串珠状”反射井样本数据预测精确度达87%;明河区23口“串珠状”反射井样本数据预测精确度达80%;复合岩溶区30口“串珠状”反射井样本数据预测精确度达80%。据统计,由产量预测误差范围频率分布直方图(图4)可见,误差满足正态分布,标准差为0.18。

4 产能预测结果及对比

为进一步分析新方法的有效性,在众多单井产能预测方法中,选取3种最为常用的方法进行对比:一是多元线性回归方法,即多个影响因素作为自变量对于因变量进行线性表示的方法^[33-34];二是BP神经网络方法,即包括输入层、隐含层和输出层,属于非线性回归的一种方法^[35-36];三是支持向量机方法^[37],即建立在统计学习理论的基础上,根据有限的样本信息在模型的复杂性和学习能力之间寻求最佳折中,以求获得最好推广能力的方法^[38-39]。根据新疆塔河油田实际数据,分别运用以上3种主流

表3 地震参数回归系数拟合结果
Table3 Fitting results of regression coefficients of seismic parameters

地质分区	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3
断裂区	-2.500 15	-13.206 50	20.334 26	0.047 81	0.060 15	0.008 44	1.090 78	-1.928 96	-85.755 10	-0.005 72	-0.007 17	-0.000 86
明河区	3.293 85	-0.055 09	-3.805 72	3.732 02	1.359 64	-2.707 59	59.766 28	3.131 36	5.747 533	-0.752 74	-0.195 53	0.557 42
暗河区	-2.500 15	-13.206 50	20.334 26	0.047 81	0.060 15	0.008 44	1.090 78	-1.928 96	-85.755 11	-0.005 72	-0.007 18	-0.000 86
复合岩溶区	3.293 85	-0.055 09	-3.805 72	3.732 02	1.359 64	-2.707 59	59.766 28	3.131 36	5.747 53	-0.752 74	-0.195 53	0.557 42

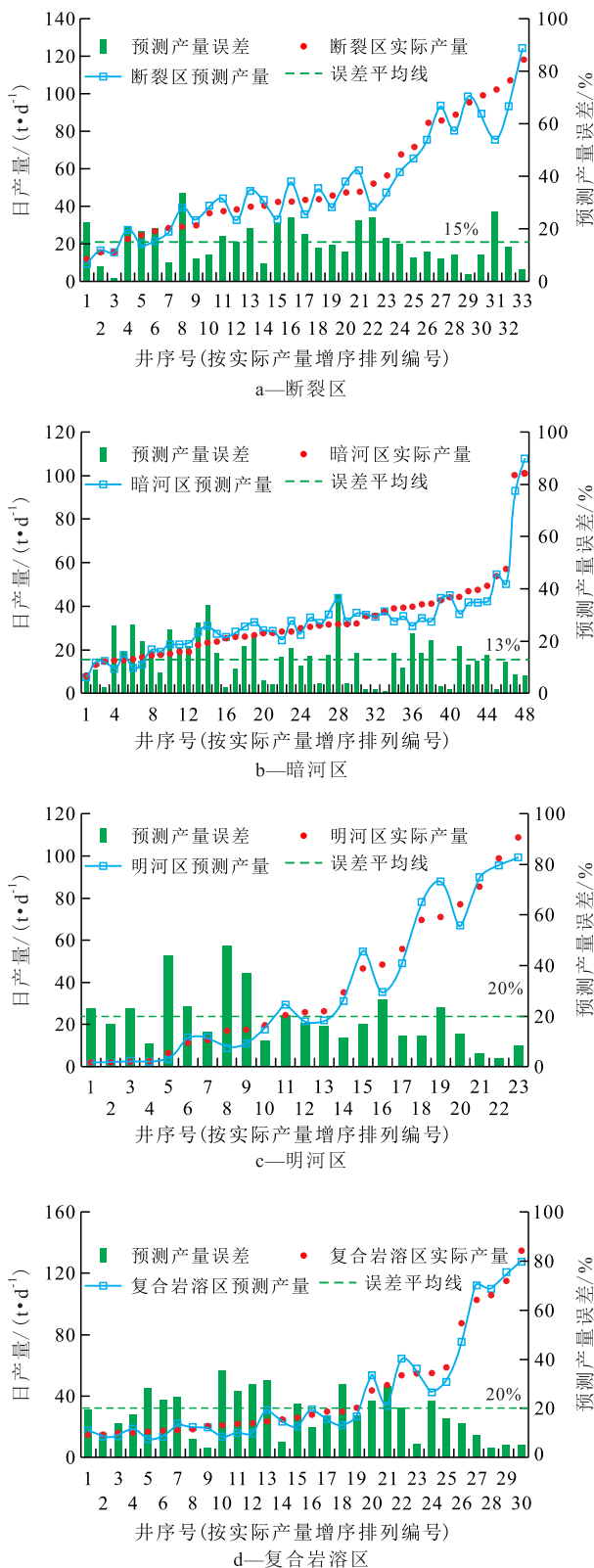


图3 各区生产井初期产能预测情况对比分析

Fig.3 Comparative analysis of initial productivity prediction of oil wells in four areas

方法预测单井产能,得到的结果与单井产能预测新方法结果进行对比,通过表4可以看出在油田4个区域中本文所建立的单井产能预测新方法精度最高,适用范围最广。

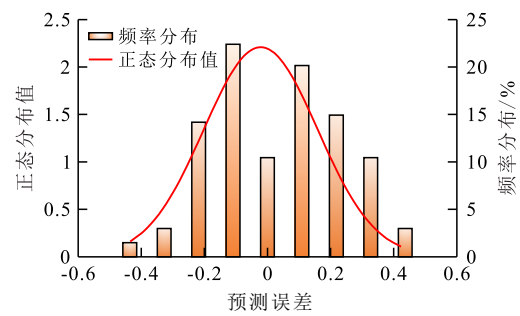


图4 生产井预测产量误差分布直方图

Fig.4 Histogram of error distribution in production prediction of oil wells

表4 多种方法产能预测精度对比

Table4 Comparison of productivity prediction accuracy by various methods

预测方法	精度				平均值
	断裂区	暗河区	明河区	复合岩溶区	
多元线性回归	78	69.17	75.57	73.78	74.14
BP神经网络	62	70.95	75.57	71.08	69.90
支持向量机	72.25	82.46	72	77.50	76.05
基于优选地震参数的缝洞型油藏单井产能预测方法	85	87	80	80	83

5 结论

基于三重介质模型,利用Laplace变换和杜哈美原理,得到缝洞型碳酸盐岩油藏单井初期产能预测方程,并结合地震参数建立了单井产能预测新方法。

针对新疆塔河油田的地质构造特征,将储层划分为4个区域:断裂区、明河区、暗河区和复合岩溶区。通过Spearman和Pearson相关系数法,分别优选出与4个储层区域相关性最强的3个地震参数。其中,断裂区地震参数为:“串珠”面积、振幅变化率、距主断裂距离;暗河区地震参数为:“串珠”面积、振幅变化率、“甜点”最小值;明河区地震参数为:“串珠”面积、振幅变化率、“甜点”最小值;复合岩溶区地震参数为:振幅变化率、“串珠”面积、频率衰减百分比。

对研究区134口油井进行产能预测,结果表明新方法对断裂区预测精度为85%;暗河区预测精度为87%;明河区预测精度为80%;复合岩溶区拟合精度为80%。将单井产能预测新方法计算结果与多元线性回归、BP神经网络、支持向量机等同类方法计算结果进行比较,结果表明针对研究区域本文所

建立的产能预测方法预测精度高于其他方法。

符号解释

a, b, c ——换元变量,即在计算过程中,为了简便,令其等于某个式子;

$a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n, c_1, c_2, \dots, c_n, d_1, d_2, \dots, d_n$ ——方程中的待定系数;

\bar{a}, \bar{b} —— a, b 的样本均值;

C_j ——介质压缩系数, 10 MPa^{-1} ;

D ——秩次之差;

D_i ——各对秩次之差;

h ——油层厚度, cm;

j ——介质, 包括 1, 2, 3, 其中 1 表示基质, 2 表示溶洞, 3 表示裂缝;

K_j ——介质渗透率, μm^2 ;

$K_0(x)$ ——零阶第二类虚宗量 Bessel 函数;

$K_1(x)$ ——一阶第二类虚宗量 Bessel 函数;

n ——井数;

p_{Dj} ——无因次压力;

p_i ——原始地层压力, 10^{-1} MPa ;

$p_j(r, t)$ ——瞬时地层压力, 10^{-1} MPa ;

p_{wD} ——无因次定产井底压力;

p_{wD3} ——裂缝介质无因次井底压力;

p_1, p_2, p_3 ——基质、溶洞和裂缝的压力, MPa;

P ——样本数据预测精度, %;

q ——单井产能, t/d;

$q_{t\text{实际}}$ ——单井实际产量, t/d;

$q_{t\text{预测}}$ ——单井预测产量, t/d;

q_{D} ——无因次油井定压产量;

r ——距生产井距离, cm;

r_D ——无因次半径;

r_P ——Pearson 相关系数;

r_S ——Spearman 相关系数;

r_w ——井筒半径, cm;

s ——Laplace 变量;

t ——生产时间, h;

t_D ——无因次时间;

$X(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ——优选的地震参数;

α_j ——窜流系数, cm^{-2} ;

α_1 ——基质-裂缝窜流系数, cm^{-2} ;

α_2 ——溶洞-裂缝窜流系数, cm^{-2} ;

λ_j ——Laplace 空间窜流系数;

λ_1 ——Laplace 空间溶洞-裂缝窜流系数;

λ_2 ——Laplace 空间裂缝-基质窜流系数;

μ ——流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

ξ, δ_j ——换元变量, 等同于欧式空间中的 a , 在计算过程中, 为了简便, 令其等于某个式子;

ϕ_j ——介质孔隙度, 小数;

ω_j ——弹性储容比;

ω_1 ——溶洞弹性储容比;

ω_2 ——裂缝弹性储容比。

参考文献:

- [1] 沈安江, 张友, 冯子辉, 等. 塔东古城地区碳酸盐岩储层地质认识与勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 96-106.
SHEN Anjiang, ZHANG You, FENG Zihui, et al. Geological understandings and exploration prospects of carbonate reservoirs in the Gucheng area, Tadong, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 96-106.
- [2] 张烈辉, 李成勇, 赵玉龙, 等. 裂缝性碳酸盐岩油气藏渗流机理研究进展[J]. 地球科学, 2017, 42(8): 1 273-1 286.
ZHANG Liehui, LI Chengyong, ZHAO Yulong, et al. Review on the seepage mechanisms of oil and gas flow in fractured carbonate reservoirs[J]. Earth Science, 2017, 42(8): 1 273-1 286.
- [3] 常媛, 贾鹏飞. 塔里木盆地塔中地区连续型碳酸盐岩油气藏地质特征及形成原因[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(2): 11-15.
CHANG Yuan, JIA Pengfei. Geological characteristics and forming cause of the continuous carbonate reservoirs in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(2): 11-15.
- [4] 焦方正, 杨坚. 塔河碳酸盐岩油藏开发与认识[C]//焦方正. 塔河油气田开发研究文集. 北京: 石油工业出版社, 2006: 1-7.
JIAO Fangzheng, YANG Jian. Development and realization of Tahe carbonate reservoir [C]//JIAO Fangzheng. Tahe Oilfield Development Research Collection. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 1-7.
- [5] 尚墨翰, 赵向原, 曾大乾, 等. 深层海相碳酸盐岩储层非均质性研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 32-49.
SHANG Mohan, ZHAO Xiangyuan, ZENG Daqian, et al. Research progress on heterogeneity of deep marine carbonate reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 32-49.
- [6] 杨德彬, 杨敏, 李新华, 等. 塔河油田碳酸盐岩小缝洞型储层特征及成因演化[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 41-46.
YANG Debin, YANG Min, LI Xinhua, et al. Characteristics and genetic evolution of small-scale fracture-cavity carbonate reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1): 41-46.
- [7] 赵艳艳, 袁向春, 康志江. 缝洞型碳酸盐岩油藏油井产量及压力变化模型[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 54-56, 62.
ZHAO Yanyan, YUAN Xiangchun, KANG Zhijiang. Flow rate and pressure variation modeling for production wells in fractured-vuggy carbonates reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 54-56, 62.
- [8] 王禹川, 王怒涛, 袁晓满, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏产能评价方法探讨[J]. 断块油气田, 2011, 18(5): 637-640.
WANG Yuchuan, WANG Nutao, YUAN Xiaoman, et al. Discussion on deliverability evaluation method of fractured-vuggy car-

- bonate reservoir[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2011,18(5):637-640.
- [9] 李鹏,康志宏,龙旭,等.新疆塔河油田缝洞型油藏单井生产规律[J].大庆石油地质与开发,2013,32(1):91-96.
LI Peng,KANG Zhihong, LONG Xu, et al.Production laws of the individual well of fractured-vuggy oil reservoirs in Tahe oilfield [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2013,32(1):91-96.
- [10] 宛利红,刘波涛,王新海,等.致密油藏多元回归产能预测方法研究与应用[J].油气井测试,2015,24(1):17-19,26.
WAN Lihong, LIU Botao, WANG Xinhai, et al.Study on multiple regression analysis in prediction of tight oil reservoir and its application[J].Well Testing,2015,24(1):17-19,26.
- [11] 杨瑀,何志雄,陈旭,等.缝洞型油藏油井产能分析[J].断块油气田,2014,21(6):746-749.
YANG Yu, HE Zhixiong, CHEN Xu, et al.Productivity analysis of single well in fractured-vuggy reservoir [J].Fault-Block Oil and Gas Field,2014,21(6):746-749.
- [12] GILMAN J R, KAZEMI H.Improvements in the simulation of naturally fractured reservoirs [J].Society of Petroleum Engineers Journal,1983,23(4):695-707.
- [13] KASAP E, LAKE L W.Calculating the effective permeability tensor of a gridblock [J].SPE Formation Evaluation,1990,5(2):192-200.
- [14] LEE S H, DURLOFSKY L J, LOUGH M F, et al.Finite difference simulation of geologically complex reservoirs with Tensor permeabilities [J].SPE Reservoir Evaluation & Engineering,1998,1(6):567-574.
- [15] ABDASSAH D, ERSHAGHI I.Triple-porosity systems for representing naturally fractured reservoirs [J].SPE Formation Evaluation,1986,1(2):113-127.
- [16] 张世明,严侠,孙红霞,等.基于离散裂缝模型的裂缝性介质等效渗透率求解新方法[J].科学技术与工程,2014,14(16):36-40,54.
ZHANG Shiming, YAN Xia, SUN Hongxia, et al.An efficient calculation of equivalent permeability of fractured porous media based on discrete fracture model [J].Science Technology and Engineering,2014,14(16):36-40,54.
- [17] 刘建军,刘先贵,胡雅弼,等.裂缝性砂岩油藏渗流的等效连续介质模型[J].重庆大学学报:自然科学版,2000,23(S1):158-161,180.
LIU Jianjun, LIU Xiangui, HU Yareng, et al.The equivalent continuum media model of fracture sand stone reservoir [J].Journal of Chongqing University: Natural Science Edition,2000,23(S1):158-161,180.
- [18] 冯金德,程林松,李春兰.裂缝性低渗透油藏稳态渗流理论模型[J].新疆石油地质,2006,27(3):316-318.
FENG Jinde, CHENG Linsong, LI Chunlan.A theoretical model of steady-state flow for naturally fractured low-permeability reservoir [J].Xinjiang Petroleum Geology,2006,27(3):316-318.
- [19] 汪春浦,叶海峰,肖高棉.多尺度缝洞型碳酸盐岩气藏试井分析[J].油气井测试,2021,30(6):1-9.
WANG Chunpu, YE Haifeng, XIAO Gaomian.Well test analysis of multi-scale fracture-vuggy carbonate gas reservoir [J].Well Testing,2021,30(6):1-9.
- [20] 高鹭陵,王珊林.等效连续介质模型有效性判定方法研究[J].吉林水利,2000,(8):14-15.
GAO Luling, WANG Shanlin. Study on validity determination method of equivalent continuum model [J].Jilin Water Resources,2000,(8):14-15.
- [21] 范嘉松.世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素[J].地学前缘,2005,12(3):23-30.
FAN Jiasong.Characteristics of carbonate reservoirs for oil and gas fields in the world and essential controlling factors for their formation [J].Earth Science Frontiers,2005,12(3):23-30.
- [22] 张抗.塔河油田的发现及其地质意义[J].石油与天然气地质,1999,20(2):120-124,132.
ZHANG Kang.The discovery of Tahe oilfield and its geologic implication [J].Oil & Gas Geology,1999,20(2):120-124,132.
- [23] 郭军参,王振宇,屈海洲,等.塔中岩溶储层地震反射地质特征及其成因机理[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2012,14(2):24-27.
GUO Juncan, WANG Zhenyu, QU Haizhou, et al.Geological characteristics and formation mechanism of karst reservoir seismic reflection in Tazhong area [J].Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition,2012,14(2):24-27.
- [24] 刘鑫,敬兵,孙东,等.塔中西部碳酸盐岩高效井地震波反射特征[J].新疆石油地质,2011,32(3):301-304.
LIU Xin, JING Bing, SUN Dong, et al.Seismic reflection characteristics of high efficient wells in carbonate reservoirs in western Tazhong area, Tarim Basin [J].Xinjiang Petroleum Geology,2011,32(3):301-304.
- [25] 杨平.哈6三维区碳酸盐岩储层“串珠状反射”研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2010.
YANG Ping.Study on beadlike reflections of carbonate reservoir in Ha6 3D area [D].Qingdao: China University of Petroleum (East China),2010.
- [26] 胥洪俊,孙贺东,张万能,等.“串珠”状地震反射与试井分析“串珠”模型关系探讨[J].油气井测试,2015,24(5):6-9.
XU Hongjun, SUN Hedong, ZHANG Wanneng, et al.Discuss on relationship between “beaded” seismic reflection and “beaded” model at well test analysis [J].Well Testing,2015,24(5):6-9.
- [27] 吴玉树,葛家理.三重介质裂-隙油藏中的渗流问题[J].力学学报,1983,19(1):81-85.
WU Yushu, GE Jiali.The transient flow in naturally fractured reservoirs with three-porosity systems [J].Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,1983,19(1):81-85.
- [28] 姜丰.Pearson相关系数评价混合工质与纳米流体换热特性的应用研究[D].天津:天津大学,2017:12-13.
JIANG Feng.Applied research to assess heat transfer performances of zeotropic mixture and nanorefrigerant by pearson correlation coefficient [D].Tianjin: Tianjin University,2017:12-13.
- [29] 吕建伟.我国汽车行业企业电子商务应用的关键影响因素研究[D].长春:吉林大学,2005:45-48.
LÜ Jianwei.Critical factors research on E-commerce application

- of Chinese automobile enterprise [D]. Changchun: Jilin University, 2005: 45-48.
- [30] 王平, 胡太平, 谢恩, 等. 碳酸盐岩串珠状地震相储层自身要素研究及高效井轨迹优化——以塔里木盆地塔中西部奥陶系为例[J]. 海相油气地质, 2016, 21(3): 72-78.
- WANG Ping, HU Taiping, XIE En, et al. Characteristics study of moniform seismic facies and optimization for efficient well trajectory in carbonate reservoirs: A case of Ordovician reservoirs in the west of Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2016, 21(3): 72-78.
- [31] 鲜强, 马培领, 吕东, 等. 河道发现对塔中地区碳酸盐岩勘探的启示[J]. 沉积学报, 2018, 36(6): 1 233-1 242.
- XIAN Qiang, MA Peiling, LÜ Dong, et al. A revelation about carbonate exploration from the discovery of channels in Tazhong area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(6): 1 233-1 242.
- [32] 韩长城, 林承焰, 马存飞. 地震多属性优选技术在碳酸盐岩缝洞型储层预测中的应用[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(6): 67-70, 78.
- HAN Changcheng, LIN Chengyan, MA Cunfei. Application of seismic multi-attribute optimization technology to the prediction of carbonate fractured-vuggy reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(6): 67-70, 78.
- [33] 孙致学, 姜宝胜, 肖康, 等. 基于新型集成学习算法的基岩潜山油藏储层裂缝开度预测算法[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(3): 32-38.
- SUN Zhixue, JIANG Baosheng, XIAO Kang, et al. Prediction of fracture aperture in bedrock buried hill oil reservoir based on novel ensemble learning algorithm [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 32-38.
- [34] 马群, 王胜军, 蒋国军, 等. 库车前陆盆地“三超”气井产能预测方法对比[J]. 天然气技术与经济, 2018, 12(2): 31-34, 82.
- MA Qun, WANG Shengjun, JIANG Guojun, et al. Comparison of productivity prediction methods for 3-ultra gas wells, Kuche foreland basin [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2018, 12(2): 31-34, 82.
- [35] 李伟, 唐放, 侯博恒, 等. 基于神经网络的南海东部砂岩油藏采收率预测方法[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(5): 730-735, 743.
- LI Wei, TANG Fang, HOU Boheng, et al. A method for oil recovery prediction of sandstone reservoirs in the eastern South China Sea based on neural network [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5): 730-735, 743.
- [36] 吴君达, 李治平, 孙妍, 等. 基于神经网络的剩余油分布预测及注采参数优化[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(4): 85-93.
- WU Junda, LI Zhiping, SUN Yan, et al. Neural network-based prediction of remaining oil distribution and optimization of injection-production parameters [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(4): 85-93.
- [37] 陈浩, 张超, 徐程浩, 等. 基于支持向量机的致密油藏水平井体积压裂初期产能预测[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 102-109.
- CHEN Hao, ZHANG Chao, XU Chenghao, et al. Support vector machine-based initial productivity prediction for SRV of horizontal wells in tight oil reservoirs [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 102-109.
- [38] 刘科, 张璇, 贾纯柯, 等. 最小二乘支持向量机在水平井产能预测中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(14): 115-117.
- LIU Ke, ZHANG Hu, JIA Chunke, et al. Least squares support vector machine in the horizontal well productivity prediction [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(14): 115-117.
- [39] 谢玮, 刘斌, 钱艳菱, 等. 基于粒子群优化最小二乘支持向量机的裂缝及缝洞充填物识别[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(2): 135-142.
- XIE Wei, LIU Bin, QIAN Yanling, et al. PSO-LSSVM-based identifying method for the fracture-vug fillings [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(2): 135-142.

编辑 刘北羿