

测井曲线元数学特性及沉积微相定量识别

刘红歧¹ 彭仕宓¹ 夏宏泉² 唐 洪²

(1. 石油大学(北京); 2. 西南石油学院)

摘 要 随着油田开发的不断深入,测井资料在沉积微相研究中起到了更为重要的作用。研究了各种沉积微相在测井曲线上的表现特征,在此基础上引入了测井曲线元的概念;从沉积微相的角度,详细分析了描述测井曲线元形态特征的基本要素,并对其数学特性进行了刻画;建立了箱形、钟形等几种典型曲线形态定量化解释的数学模型,并开发了相应的软件系统。上述研究成果为沉积微相定量化研究提供了一种可借鉴的方法。

关键词 沉积微相 曲线形态 测井曲线元 数学模型

沉积相和沉积微相研究是油田地质研究中最基础的工作,也是油藏描述中最关键的环节。露头 and 岩心资料是确定沉积相和沉积微相最直接的资料,但随着油田开发的不断深入,沉积微相研究越来越依赖于测井资料。实际上,早在1979年,O Serra就提出了电相(electroface)的概念^[1],从而在测井和地质这2个学科间架起了一座相互沟通的桥梁,使得利用测井资料研究沉积相和沉积微相成为可能。随着计算机技术的迅速发展,沉积微相的研究逐渐定量化。利用测井资料划分沉积微相属于人工智能的范畴^[2],从大的分类来看,可以分为2种:一种是无监督信号的模式识别方法,如马世忠等人^[3]提出的定量自动识别测井微相的数学方法;另一种是有监督信号的模式识别方法,如冉启全等人^[4]提出的利用神经网络模式识别测井微相的方法。大量的油田资料表明,最能反映沉积微相特征的常规测井资料是自然电位(SP)、自然伽马(GR)和微电阻率曲线。本文重点研究自然伽马曲线的各种形态,对其变化特征进行了数学描述,并研究了几种常见测井曲线元形态的数学特征。

1 测井曲线元的概念

地层沉积具有一定的旋回性,反映到测井曲线上则表现为曲线具有一定的周期性。因此,纵向上

测井曲线可以划分为很多段,段内测井曲线变化相对较小,而段间则存在明显差异。在沉积相研究中,通常把在相同沉积环境背景下的物理、生物作用所形成的同时沉积称为一个沉积时间单元。在同一沉积时间单元内部,其岩性和物性相对稳定,电性也必然不会有太大的变化,与之相对应的测井曲线比较光滑;而在不同沉积时间单元之间,其电性却有着显著差异,相应的测井曲线形态也存在较大差异。为了描述这一现象,笔者引入了测井曲线元的概念。

在测井曲线上,如果某一段曲线的形态特征与其上、下邻近段的曲线形态特征明显不同,则把这样的一段曲线称为测井曲线元,简称曲线元(C),记为

$$C: \{X | x_0, x_1, \dots, x_n\}$$

$$x_i \in (a, b) \quad i = 0, 1, \dots, n$$

简记为 $C, C \in [a, b]$ 。式中, a, b 分别为测井曲线的左、右刻度; x_i 表示第 i 个采样点的测井数据; n 为采样点数。

2 描述测井曲线元的数学要素

常见的测井曲线形态包括钟形、漏斗形、箱形、对称齿形、反向齿形、正向齿形、指形以及上述这些曲线形态的复合形。测井曲线形态反映了粒度和分选性在垂向上的变化,也反映了地层沉积过程中水动力条件和物源供应的变化情况。例如,箱形曲线是物源供

第一作者简介:刘红歧,男,1994年毕业于西南石油学院测井专业,1997年获硕士学位,现在石油大学(北京)攻读博士学位,一直从事测井数据资料处理科研和教学工作。地址:北京市昌平石油大学博士2001级(邮编:102249)。电话:0312-3825917或010-89733790。E-mail: lhqjpl@sina.com。

给和水动力条件相对稳定的反映,为心滩的典型特征。笔者结合沉积微相和测井相的划分与识别过程,提出了如下描述曲线元数学特征的数学要素。

2.1 比幅度(\tilde{A})

曲线幅度是指曲线偏离其泥岩基线的大小。这里所说的泥岩基线不单指 GR 或 SP 形成的泥岩基线,也可以是其他测井曲线(如微电阻率曲线)形成的泥岩基线。在相对稳定的泥岩层段都可以形成明显而光滑的泥岩基线,这是每条曲线确定其变化幅度的参照值。显然,曲线幅度主要反映岩性的变化,但其大小要受到岩层厚度、流体性质、孔渗特性等方面的影响。

曲线幅度可以通过曲线元的极值来表现,很多情况下还要考虑厚度这一因素。为此,引入曲线元的比幅度 \tilde{A} ,即

$$\tilde{A} = \frac{\Delta A}{\Delta d}$$

式中, ΔA 表示曲线元最大值(或最小值)与泥岩基线值的差,即幅度差; Δd 表示曲线元的厚度。

对砂泥岩剖面而言,之所以引入 \tilde{A} ,是因为当 \tilde{A} 一定时, Δd 越大,说明沉积物源越丰富,且物性变化不大时曲线元表现为箱形;相反, Δd 越小,说明地层只是一个薄夹层,沉积时间短暂,曲线元表现为指形;因此, \tilde{A} 反映了岩性变化的速度。

2.2 幅方差(D_A)

幅方差是指给定曲线元数据集的均方差,它反映了曲线元主幅度的集中程度,其计算方法如下:

$$D_A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中, n 表示曲线元的点数; x_i 表示第 i 个测井值, $x_i \in C$; \bar{x} 表示 n 个数据点的均值。

实际上, D_A 反映了粒度的分选性。如果粒度分选好,物性变化不大,测井曲线则近似为直线,曲线元主要为箱形,其测井数据均值主要集中在曲线

元的中部,只有顶、底部测井数据与均值偏差较大,因此 D_A 较小;如果粒度分选差,物性变化较大,测井曲线就有一定的起伏,曲线元可能为漏斗形、钟形或者指形,其测井数据相对分散,有相当一部分数据点远离均值,因而 D_A 较大。

2.3 形态(m)

曲线元的形态可以通过计算曲线元上、下斜率角的大小以及上、下趋势角的变化来描述。

2.3.1 上、下斜率角(k_1, k_2)

上斜率角是指曲线元第一个点与曲线元内第一个拐点之间线段的斜率角,简称为上斜角,记为 k_1 ;下斜率角则是指曲线元内最后一个拐点与曲线元最后一个点之间线段的斜率角,简称为下斜角,记为 k_2 。如图 1 所示。

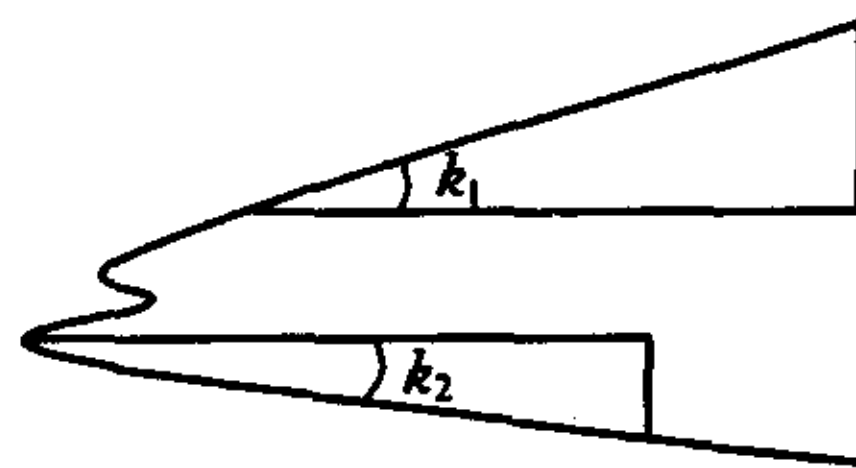


图 1 曲线元的上、下斜率角示意图

上、下斜角反映了沉积过程中物性的变化速度。以 GR 曲线为例,当曲线刻度向右增大时(向左增大时情况相反)有以下 2 种情况:

(1) $k_1 \in (0, 90^\circ)$, 为正韵律沉积,可能反映了水进层序。 k_1 越大,说明物性变化速度缓慢,粒度分选性较好,沉积环境和水动力条件稳定;相反, k_1 越小,则说明水动力较强,物性变化速度较快。

(2) $k_1 \in (90^\circ, 180^\circ)$, 为反韵律沉积,表明可能是水退层序。 k_1 越小,曲线起伏变化平缓,说明物性变化速度较小,粒度较均匀,沉积环境和水动力条件稳定。

下斜率角 k_2 也具有与上述上斜率角 k_1 同样的性质。表 1 描述了几种常见形态曲线元的斜率角特征。

表 1 几种常见形态曲线元的斜率角特征描述

	钟形	漏斗形	箱形	指形
曲线形态				
曲线斜率及斜率角特征	上斜率 > 0 , 下斜率 < 0 $k_1 \in (0, 90^\circ)$, 较大 $k_2 \in (0, 180^\circ)$ $k_1 > 180^\circ - k_2$	上斜率 > 0 , 下斜率 < 0 $k_1 \in (0, 90^\circ)$, 较小 $k_2 \in (0, 180^\circ)$ $k_1 < 180^\circ - k_2$	上斜率 > 0 , 下斜率 < 0 $k_1 \in (0, 90^\circ)$, 较小 $k_2 \in (0, 180^\circ)$ $k_1 \approx 180^\circ - k_2$	上斜率 > 0 , 下斜率 < 0 $k_1 \in (0, 90^\circ)$ $k_2 \in (0, 180^\circ)$ $k_1 \approx 180^\circ - k_2$

2.3.2 上、下趋势角(\tilde{k}_1, \tilde{k}_2)

在很多情况下,一个沉积时间单元内会出现多次水进或水退的沉积过程,而且在刚开始的几次变化中,总有一次沉积过程的物性相对于其他沉积过程变化更大。据此定义上趋势角为:在曲线元内,如果开始曲线是升高(下降)的,曲线下降(上升)最大的一段曲线的斜率角为上趋势角,简称为上趋角,记为 \tilde{k}_1 ;下趋势角是为了反映在某一沉积时间单元内最后一次较大的物性变化情况而引入的参数,其定义为:在曲线元内,如果开始曲线是下降(上升)的,曲线上升(下降)最大的一段线段的斜率角为下趋势角,简称为下趋角,记为 \tilde{k}_2 。

如图2所示,取 a_3 与 a_4 之间曲线段的斜率角为上趋势角,取 a_8 与 a_9 之间曲线段的斜率角为下趋势角。

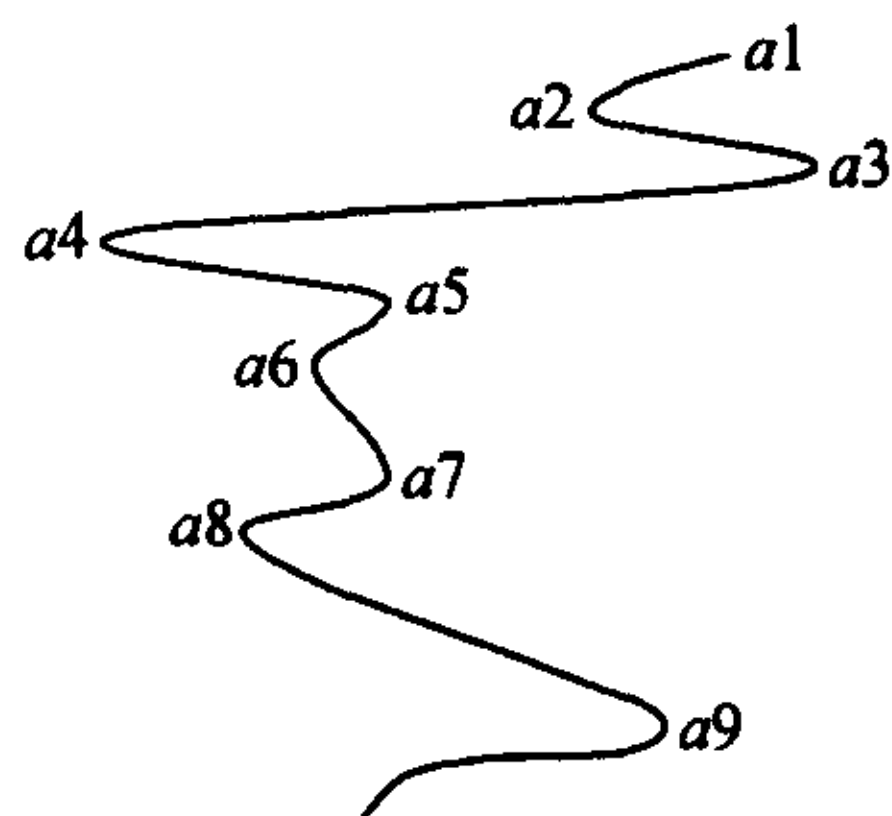


图2 具有多个旋回的曲线元

2.4 齿化程度

曲线元齿化程度一般分为光滑、微齿和齿化3级。齿化现象反映了沉积过程中的水动力条件及物源丰富与否等。曲线元的齿化程度可以通过曲线元的齿化频率和曲线元网格交点函数定量刻画。

2.4.1 齿化频率(f)

在实际计算曲线的齿化程度时,必须先给定一个门限值(θ),只有当相邻3点之间的差不小于门限值时才认为是齿化。曲线元齿化频率定义为单位厚度齿形的个数,简称为曲线元齿频,其定义式如下:

$$f = \frac{1}{\Delta d} \sum_{i=1}^n \delta(x_i)$$

$$\delta(x_i) = \begin{cases} 1 & |x_i - x_{i-1}| \geq \theta \text{ 或 } |x_{i+1} - x_i| \geq \theta \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

式中, $\delta(x_i)$ 为狄拉克函数。

2.4.2 盒维数(D_f)

测井曲线的分形特征已有很多文献论及^[5,6]。

按照分形理论及盒维数的概念,采用一定边长的网格覆盖测井曲线,计算测井曲线与网格的交点,可以得到曲线元的盒维数。根据文献[6]可知,曲线元盒维数反映了地层的非均质性。声波时差(AC)测井曲线的盒维数可按下式计算,其它曲线可据此类推。

$$D(AC) = \frac{\ln \sum_{i=1}^n \left(\frac{|AC_{i-1} - AC_i|}{r} \right)}{\ln(1/r)}$$

式中, AC_{i-1}, AC_i 表示2个相邻点的读值; r 为网格横向边长(即观测尺度),其量纲与AC相同。

2.5 顶底接触关系(R)

曲线元与上、下相邻曲线之间有时是平缓过渡的,有时是突变的,曲线元之间的这种变化反映了砂体沉积初期及末期的水动力能量与物源供应的变化速度。曲线元的顶底接触关系可以由相邻曲线元斜率角的差值来计算。当前曲线元与其上部相邻曲线元的下斜率角的差值定义为曲线元上接触角,简称为上触角,记为 R_u ;同理,当前曲线元与其下部相邻曲线元的上斜率角的差值定义为曲线元的下接触角,简称为下触角,记为 R_d 。曲线元上触角及下触角的计算方法如下:

$$R_u = \arctan(|k_1^{(i)} - k_2^{(i-1)}|)$$

$$R_d = \arctan(|k_1^{(i+1)} - k_2^{(i)}|)$$

式中, $k_1^{(i)}$ 为当前曲线元的上斜率角; $k_2^{(i-1)}$ 为上部相邻曲线元的下斜率角; $k_1^{(i+1)}$ 为下部相邻曲线元的上斜率角; $k_2^{(i)}$ 为当前曲线元的下斜率角。




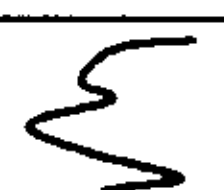

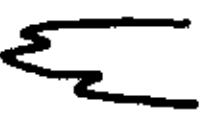
当 $R_u \in (0, 90^\circ)$ 时, R_u 越小,说明相邻曲线元形态变化不大,反映了沉积过程的平稳过渡,地层物性的差异不大; R_u 越大,说明相邻曲线元之间有明显的拐点,形态变化大,地层物性剧烈变化。当 $R_u \in (90^\circ, 180^\circ)$ 时,可以参照上斜率角的情况。下触角 R_d 与上触角 R_u 具有相似的地质意义。

3 几种典型测井曲线元的数学特征

表2给出了几种典型曲线元的数学特征,其描述如下:

(1) 箱形: \tilde{A} 较大(厚度也比较大), D_A 最小, D_f 最小(这说明,箱形曲线元形状比较单一,曲线元内变化不大,反映了稳定的沉积环境); \tilde{k}_1 和 k_1 都很小,接近于0,且 $\tilde{k}_1 \approx k_1$;而 \tilde{k}_2 与 k_2 均很大,接近于 180° ,且 $\tilde{k}_2 \approx k_2$ 。当箱形存在齿化现象时,上述参数值多有所增加。

表 2 几种典型曲线元的数学特征

曲线形态	数 学 要 素									
	f	\tilde{A}	D_A	D_f	\tilde{k}_1	\tilde{k}_2	k_1	k_2	R_u	R_d
 箱形	0.254	1.005	8.136	1.067	3.453	175.005	1.035	178.085	1.538	3.960
 齿化箱形	0.719	0.840	195.022	1.098	3.518	175.917	2.119	179.276	2.794	1.964
 钟形	0.276	0.764	1 101.682	1.073	7.085	179.052	3.681	176.695	11.390	3.829
 复合钟形	0.522	0.849	855.029	1.111	10.181	178.244	2.989	179.162	1.019	4.745
 指形	0.000	0.929	326.601	1.088	21.451	148.887	21.451	148.887	6.819	177.437
 齿化指形	0.222	0.932	946.244	1.091	8.010	150.188	7.231	150.188	174.138	178.043

(2) 钟形： \tilde{A} 较小(厚度也比较小)， D_A 很大， D_f 较大(这说明，钟形曲线元形状数据较箱形分散，曲线元内变化较大，反映其物性变化较大)； \tilde{k}_1 和 k_1 比较大，且 $\tilde{k}_1 > k_1$ ；而 \tilde{k}_2 与 k_2 则很大，接近于 180° ，并且 $\tilde{k}_2 \approx k_2$ (这正是单一钟形曲线元底部光滑的特征，与箱形曲线明显不同)。同样，当钟形存在齿化现象时，上述参数值大都有所增加(但 k_1 、 k_2 并不一定增加)，尤其是 f 和 D_f 增加明显。




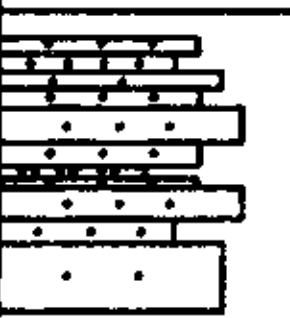

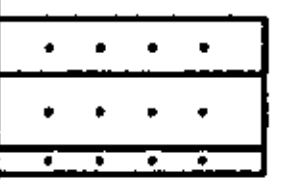

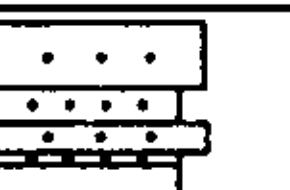


(3) 指形： \tilde{A} 较大(厚度也很小)， D_A 很大， D_f 较大。这些特征与钟形近似；但是 \tilde{k}_1 和 k_1 比钟形曲线元的角度要大，而 \tilde{k}_2 与 k_2 比钟形和箱形的角度要小很多，且 $\tilde{k}_1 \approx k_1$ ， $\tilde{k}_2 \approx k_2$ ， $k_1 = 180^\circ - k_2$ ，这是对称指形的重要特征。当指形存在齿化时，表 2 中的前 4 项参数均有比较明显的增大。

R_u 和 R_d 的变化还与上、下相邻曲线元有关，读者可以自行分析。

4 应用实例

苏里格庙地区上古生界二叠系山西组和石盒子组为一套陆相沉积，岩石主要类型为陆源碎屑岩。本区山西组主要发育曲流河和三角洲沉积，石盒子组主要发育辫状河和辫状河三角洲沉积。根据露头、岩心、录井资料和岩性照片及沉积构造建立的岩性剖面对该地区的沉积微相类型进行了划分，并在此基础上，采用上述定量识别方法对该地区沉积微相的测井曲线形态和数学特征进行了刻画。表 3 为该区某井下石盒子组盒八段几种典型微相的测井曲线形态和数学特征的分析结果。

表 3 某井下石盒子组盒八段几种典型沉积微相的测井曲线形态和数学特征

曲线形态	岩性剖面	数 学 要 素										微 相 类 型
		f	\tilde{A}	D_A	D_f	\tilde{k}_1	\tilde{k}_2	k_1	k_2	R_u	R_d	
		0.097	0.897	95.323	1.088	26.535	171.123	1.320	174.667	145.133	172.803	水下分流河道
		0.689	0.840	255.465	1.105	3.518	175.917	2.889	179.547	176.029	175.029	水下分流河道
		0.278	0.877	495.242	1.040	110.214	175.399	121.241	175.399	0.896	4.158	河口坝
		0.492	0.877	1 532.921	1.076	22.347	176.699	12.099	178.339	175.992	174.601	河口坝
		0.000	0.529	1 864.102	1.066	179.244	3.111	179.244	3.111	176.133	176.133	水下分流河道间

5 结束语

对应沉积时间单元的概念,提出了测井曲线元的概念。研究沉积微相测井曲线元的数学特征,可以为定量研究沉积微相提供一种可借鉴的方法。需要说明的是,本文描述沉积微相的数学特征只是划分沉积微相的必要条件,而非充要条件。也就是说,各种沉积微相所对应的测井曲线具有上述数学特征,但并不是具有这些特征的测井曲线一定对应某一种沉积微相。在相分析的过程中,如果再结合沉积构造、粒度概率曲线等资料,那么沉积相和沉积微相划分的准确性就能够大大提高。

参 考 文 献

- 1 Serra O. Fundamental of well-log interpretation. Elsevier Science Publishers B. V., 1986. 180~185
- 2 李庆谋. 模式识别自动相分析探讨与系统实现. 石油物探, 1996, 36(1): 85~92
- 3 马世忠, 黄孝特, 张太斌. 定量自动识别测井微相的数学方法. 石油地球物理勘探, 2000, 35(5): 590~592
- 4 冉启全, 李仕伦, 李元元. 用神经网络模式识别沉积微相. 石油勘探与开发, 1995, 22(2): 59~63
- 5 潘保芝, 薛林福. 盒维数及其在测井地质解释中的应用. 见: 测井在油藏描述中的应用. 北京: 石油工业出版社, 1992. 213~219
- 6 刘红歧, 夏宏泉, 靳松等. 地层胶结指数 m 的分形特征研究. 测井技术, 2001, 25(1): 24~27

收稿日期: 2004-03-03 改回日期: 2004-07-05

(编辑: 周雯雯)

(上接第 372 页)

参 考 文 献

- 1 乐友喜, 忘永刚. 非参数回归法在孔隙度参数预测中的应用. 地质科学, 2002, 37(1): 118~126
- 2 Doye P M, 周培军. 根据地震信息求取孔隙度的地质统计法. 四川石油普查, 1989, 2: 81~93
- 3 王永红等. 利用地震和测井资料估算孔隙度. 石油地球物理勘探, 1990, 25(5): 572~577
- 4 孙家振, 李兰斌等. 多信息储层预测和油气判别. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997
- 5 吕晓光, 杜庆龙, 曹维福. 应用人工神经网络模型进行油层孔隙度、渗透率预测. 大庆石油地质与开发, 1996, 15(6): 27~32
- 6 吕晓光, 王德发, 姜洪福. 储层地质模型及随机建模技术. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(1): 10~13

收稿日期: 2004-08-09 改回日期: 2004-10-27

(编辑: 崔护社)

Lateral prediction of reservoir porosity in DF gasfield

Zhou Jiaxiong^{1,2} Wang Lifeng²

Mathematic characteristics of Well Logging Curve Unit and quantitative identification of sedimentary microfacies

Liu Hongqi¹ Peng Shimi¹

Xia Hongquan² Tang Hong²

(1. University of Petroleum, Beijing, 102249;

2. Southwest Petroleum Institute, Chengdu, 637001)

Abstract: With the progress of oilfield development, well logging data is becoming more and more important in studying sedimentary microfacies. The characteristics of various microfacies are identified on well log curves, and then a concept of Well Logging Curve Unit (WLCU) is introduced. In term of microfacies, the elements to illustrate shapes of WLCU are carefully analyzed, and their mathematic characteristics are described. In order to quantitatively interpret WLCU shapes, several typical mathematic models have been established, such as box-like and bell-like models, and their software systems are developed. These results may provide an available approach to the quantitative study of sedimentary microfacies.

Key words: sedimentary microfacies; shape of curve; Well Logging Curve Unit; mathematic model

Ma Guangke² Sui Bo²

(1. China Geoscience University, Wuhan, 430074;

2. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Guangdong, 524057)

Abstract: Based on analyzing the relationship between reservoir porosity and seismic attributes in DF gasfield and comparing the available methods to predict porosity by seismic data, an integrated method has been selected to predict lateral reservoir porosity in the field, which has combined the multidimensional linear regression of multiple seismic attributes and well data with the stochastic geological statistics. The spot checks indicated that the predicted porosity was quite in accord with the borehole porosity in DF gasfield.

Key words: DF gasfield; porosity; lateral prediction; multidimensional linear regression; geological statistics