

文章编号: 1000-0550(2008)06-0947-09

基于方向概率密度和小波描述子的沉积微相识别研究

王任一^{1,2} 梅廉夫¹

(1 中国地质大学 武汉 430074 2 中国海洋石油股份公司湛江分公司勘探开发部 广东湛江 524057)

摘要 首次提出了利用测井曲线不同形态识别沉积微相方法(算法)必须要满足三个前提条件,即平移和尺度缩放的不变性以及旋转可变性的认识,并提出了一种满足这三个前提条件的利用测井曲线形态识别沉积微相的新方法。主要通过求取不同测井曲线形态的边界方向概率密度后,再对其进行小波变换,可用少数几个对其方向概率密度可以近视重构的低频小波描述子进行沉积微相识别,同时建立了不同沉积微相小波描述子识别模式。对反映不同沉积微相的测井曲线形态方向概率密度函数进行小波分析,使沉积微相信息从高维特征空间被映射到由少数几个低频小波描述子组成低维特征向量空间,使不同沉积微相间差异信息得到放大突出。该方法不仅使利用测井曲线形态对沉积微相识别的这一较复杂问题,简化为对少数几个低频小波描述子进行判断的简单问题,而且还可利用这些小波描述子对其进行一定程度上沉积学分析。

关键词 沉积微相 测井曲线形态 方向概率密度 小波描述子 自动识别

第一作者简介 王任一 男 1968 年出生 高级工程师 博士研究生 油田开发 E-mail wry2899@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

沉积微相是油气田勘探开发中最重要的基础研究之一,它控制着储集层及其物性参数的空间分布,影响着流体分布和运动规律。沉积微相的研究一般分为四步。第一步,单井岩心沉积微相的识别。主要根据岩心结构及其构造特征,再结合露头及分析化验等资料划分不同的岩石相类型,不同的岩石相在垂向上的组合即可确定沉积微相;第二步,建立测井相图版库。将所划分的岩心微相与对应的测井曲线对比,将岩心微相转化为测井相;第三步,建立单井沉积微相剖面。利用建立的测井相图版库,对未取心井段进行微相识别;第四步,井间沉积微相预测。以单井沉积微相测井识别成果、小层划分对比结果和地震相等其它资料为约束条件,通过合适的随机算法预测出井间沉积微相分布,得出每个小层微相在整个研究区的展布规律。目前主要由地质家定性识别沉积微相,它不仅费时费力,而且研究结果也因人而异。

近年来,沉积微相自动识别方法研究发展非常快,概括起来主要有三类,测井曲线形态几何学或统计学特征的数学表征法^[1~4]、储层属性参数判别法^[5~9]和将二者相结合的方法^[7,8]。储层属性参数判别法,主要以不同微相储层属性参数(例如,反映平均能量大小粒度中值等),来建立识别样本,用数理

统计(例如 Bayes 判别法等)或神经网络等手段进行微相识别。该方法基于储集层的各种属性参数分布的统计结果,难以全面地反映测井曲线形态的变化规律,经常出现不同微相,具有相似储层参数统计结果,使微相识别难以进行。目前应用最多效果较好的是测井曲线形态特征的数学表征法。它是用数学方法提取反映不同微相曲线形态的几何学或统计学特征量(例如,曲线的比幅度,主要反映测井曲线形态不同的类别;曲线的变差方差根,反映曲线整体波动大小和锯齿的多少及严重程度等),利用这些从不同角度反映其整体或局部不同层次的曲线形态变化特点的特征量,进行微相识别的一种方法。提取适合研究区反映沉积相响应曲线形态的几何学或统计学特征量选择及其特征量的数量,是这一方法的核心。如果提取的曲线形态特征量选择不当,则其可能是对原曲线形态畸变反映,如果提取的曲线形态特征量过少,则其特征量“逼近”原曲线形态特征的能力大大降低,过多则引起特征量间的信息相关冗余,影响识别效果^[9]。笔者应用方向概率密度和小波描述子的方法解决了这一问题。

1 方向概率密度及特性

传统的微相研究是依据岩心、露头和化验分析等资料,将岩心微相转化为测井相,建立不同微相的测

收稿日期: 2007-11-10 收修稿日期: 2008-04-07

井响应模式库。在此研究认识过程中,地质家也在自己大脑中建立了识别微相的知识库。然后以此为依据,定性判断其它未取心井段的沉积微相。要实现沉积微相从定性到定量自动识别的关键是能否找到一种高保真表征反映不同微相测井曲线形态特征的方法,该方法还必须要具有平移和尺度缩放的不变性以及旋转的可变性。这是由于实际的油田测井资料由于种种原因,数据标准化后,并不能完全消除井间和井内测井数据的系统误差问题,所以利用测井曲线形态识别沉积微相的方法(算法),必须满足测井曲线的平移对识别结果的不变性;同时还必须具有不同比例尺度(缩放)的同一测井曲线形态,对识别结果的不变性,例如同属河道微相沉积的砂体在不同的地理位置,其沉积厚度和分选性等方面存在着一定的差别,反映在测井曲线形态(例如自然电位 SP)上,表现为曲线长度和幅度的差异性,但它们曲线形态仍属同一类;在满足了平移和尺度缩放的不变性这两个特性之后,还必须满足第三个条件,即旋转可变性,因为同一测井曲线形态,如果具有不同的方位(向),则有不同的沉积学含义,代表着不同微相(例如河道和河口坝砂体在自然电位曲线(SP)上表现的曲线形态特征,整体上是相似的,其差别仅仅是方向(位)相差 180°)。传统形状识别方法,要求具有平移、尺度缩放和旋转不变性^[10],这一特殊差异性也成为致使其它现有成熟的形状识别手段^[11-13],无法应用于这一基于测井曲线形态的沉积微相识别方法的一个难题。通过对多种方法反复试验,求取测井曲线形态边界方向的概率密度函数,可解决这一问题。

概率密度函数是描述随机信号统计特征,不同类型信号的概率密度函数存在着很大差别^[14]。概率密度函数是变量 X 的函数,它表示随机信号 X(t) 的幅值落在 [X, (X+ΔX)] 范围内的频率,可以用 T_x/T 来表示, T 是观察时间, T_x 是在 T 时间内 X(t) 值落在 [X, (X+ΔX)] 的总时间,其数学定义为:

$$P(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta X} \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T} \right) \quad (1)$$

假定反映不同沉积微相的测井曲线段 N 个等间距的离散点的序列为, {x(l), y(l); l=1, 2, ..., N}, x 轴的逆时针方向为正角度,顺时针方向为负角度,则可计算得到对应边界方向离散点的序列为:

$$\alpha(l) = \operatorname{atan2} \left[\frac{(y(l) - y(l-1))}{(x(l) - x(l-1))} \right] \quad (2)$$

l = 2, 3, ..., N

其中 $\operatorname{atan2}$ 为四象限反正切函数; $\alpha(l) \in (-\pi, \pi)$, 但实际的测井曲线形态边界方向一般在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 间。

按照概率密度函数的定义可表示为:

$$P(l) = \frac{n_k}{N-1} \quad (3)$$

N 为曲线边界采样点的总数, n_k 表示第 l_k 个方向区间的频数, P(l) 表示方向概率密度函数。它具有尺度缩放的不变性^[15]。P(l) 表示反映不同微相的测井曲线(例如自然电位 SP)形态方向概率密度函数,不同的微相具有不同曲线形态特征,而不同形态特征的曲线具有不同的方向概率密度函数,从后面论述中可看到,同时它代表着不同地质含义。

曲线方向概率密度函数,很显然是不受位置平移变化的影响,要受到形状旋转的影响,具有旋转的可变性^[16]。因此,通过将反映不同微相的测井曲线形态转换为它的边界方向概率密度函数后,不仅具有了平移和尺度缩放的不变性以及旋转的可变性,而且使反映不同微相的在厚度、幅度和形态上千差万别测井曲线段,具有了一个幅度为 0~1 间,长度为 -90°~90° 间大小一致规范化的一维数据,满足了利用测井曲线形态进行沉积微相识别的要求。

2 小波描述子计算

不同微相曲线形态特征映射到其方向概率密度函数特征域,具有了平移和尺度缩放的不变性以及旋转的可变性,并且转化成规范化的大小一致的一维数据,但不宜直接利用变化相对很大的方向概率密度函数对沉积微相进行识别。可通过对不同微相的测井曲线形态方向概率密度函数进行小波变换,可利用它具有的多分辨率时频两域局部化能力,不仅可以提取其更有利于微相识别的特征,还可以进行一定的沉积学分析。

二进制小波函数族可如下定义:

$$\psi_{jk}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in Z \quad (4)$$

对给定信号 f(t) 的正交二进制小波变换和逆变换的定义为^[17, 18]:

$$W_{jk} = \langle f(t), \psi_{jk} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{jk}(t) dt \quad (5)$$

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \langle f(t), \psi_{jk} \rangle \psi_{jk}(t) + \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \langle f(t), \psi_{jk} \rangle \psi_{jk}(t) \quad (6)$$

其中, j 与截断系数时所需精度有关。如果设尺度函数 $\varphi_{jk} = 2^{-j} \varphi(2^{-j}t - k)$, 并将 (6) 式右边第一项用 $\varphi_{jk}(t)$ 的线性组合代替, 则可将 (6) 式变为:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle f(t), \varphi_{j,k} \rangle \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle f(t), \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(t) \quad (7)$$

上式右边第一项可以看作是 $f(t)$ 在 2^{-j} 尺度下的低通逼近分量, 为曲线轮廓的概貌, 第二项为曲线轮廓的局部细节分量; 式中 $\langle f(t), \varphi_{j,k} \rangle$ 为尺度系数, $\langle f(t), \psi_{j,k} \rangle$ 为小波系数, 也称为小波描述子。由 (7) 式可知, 如果用所有的小波系数可无任何信息损失地完全重构曲线轮廓。小波分解系数主要能量集中在低频部分, 高频部分较小。在满足需要解决问题精度前提下, 选择合适的分解层数 j (对于该研究工区, 反复试验 $j=3$ 效果最好), 利用能量集中的少数低频系数, 可近视重构信号^[19]。考虑到该区沉积作用的强非均质性, 选择具有紧支集的 Daubechies 小波, 可有利于突出细节变化。

这样, 利用测井曲线形态对沉积微相识别的复杂问题, 通过对其它轮廓边界方向概率密度函数的小波分解后, 就简化为通过对少数几个低频小波描述子进行判断识别的简单问题, 并且无特征冗余性问题^[20], 具有较高的鲁棒性。

3 沉积特征

研究工区为西部 SS 油田 S3 断块。在岩心描述和岩石相划分的基础上, 根据不同的岩石相组合研究, 该区为一套扇三角洲前缘沉积体, 主要发育水下分流河道、河口坝、席状砂、水下分流河道间、滨浅湖泥 5 种微相类型。

(1) 水下分流河道

水下分流河道由于规模大小的差异, 其沉积特征也有较大的不同。一些主河道的岩石相沉积组合以砾岩、砾状砂岩、砂砾岩、砂岩和粉砂泥岩为主, 沉积厚度平均 12 m 显示正韵律岩性组合特征。沉积构造以洪积层理、槽状交错层理、块状层理为主, 具间歇性, 常由若干正韵律迭加而成, 反映出河道内部洪水较强的期次性。底部常见冲刷面, 内部也可见冲刷特征。对于次一级分流河道, 岩性较主河道稍细, 从下到上以含砾砂岩、砂砾岩、砂岩、粉细砂岩和泥岩为主, 河道底部也可见冲刷面, 沉积厚度较小。水下分流河道的测井相特征十分明显, 在自然电位曲线

(SP) 上常呈钟状、箱状和圆头状。该区发育有三种曲线形态类型的河道, 河道 1 为钟型形状, 河道 2 为箱型, 河道 3 为圆头型 (见图 1)。

(2) 河口坝

多位于水下分支河道的河口处, 沉积速率很高。水流和波浪的冲刷和簸选作用使泥质沉积物被带走, 保存下来的沉积物相对来说具有较高的结构和成分成熟度, 发育槽状交错层理。河口坝砂体一般较厚, 岩石相组合依次为泥岩、粉细砂岩、砂岩到砂砾岩相的反韵律, 物性向上逐渐变好。在自然电位曲线上呈中高幅的漏斗状 (见图 1)。

(3) 席状砂

在水流作用较强的河口区, 河口砂坝受波浪和岸流作用的淘洗和改造而发生侧向迁移, 使之成席状或带状广泛分布于三角洲前缘, 形成三角洲前缘席状砂。沉积构造与河口坝相似, 广泛发育交错层理, 缺少生物化石。在横向上砂体向岸方向变厚。岩性组合为粉细砂岩、砂岩到含砾砂岩的反韵律。该区共发育 2 种类型, 在测井曲线上, 呈中低幅漏斗状 (席状砂 1) 和低幅齿状 (席状砂 2) (见图 1)。

(4) 水下分流河道间

位于水下分流河道之间, 当扇三角洲向前推进时, 在分支河道之间形成一系列尖端指向陆地的楔形泥质沉积体, 岩性以泥岩、粉砂质泥岩为主, 在洪水季节河床漫溢也会有砂质沉积。发育水平和波状层理。自然电位、电阻率曲线呈平直或近乎平直变化, 间或出现由薄层粉细砂引起的齿峰 (见图 1)。

(5) 滨浅湖泥

以泥岩及粉砂质泥岩为主, 发育虫孔及生物扰动构造。滨浅湖泥由于常处于氧化环境, 泥岩颜色为杂色或棕褐色。测井曲线形状呈平直型。

4 方向概率密度小波描述子的沉积学含义

由于该区资料比较齐全的自然电位曲线 (SP) 可以很好地反映微相特征, 此次研究采用自然电位曲线建立微相识别模型。由于该油田勘探开发历史的原因, 测井数据类型比较多, 消除不同时期不同测井系列等方面的影响, 保持数据一致性是沉积微相正确识别的基础。测井数据标准化原理主要依据是利用同一地区、同一层位具有相似或相同的岩石物理特征这一规律, 将测井数据标准化为测井数据的相对值。该区地层对比成果表明, 目的层之上发育一套 45 ~

60 m 的比较稳定湖相泥岩, 全区分布, 具有稳定的地质测井响应特征, 它可作为标准化数据校正的标准层, 以各井的该标准层段的自然电位曲线平均值作为读数的基线值。标准化自然电位计算公式如下:

$$V_{SP} = k \frac{(V_{SP标准层} + V_{SP}) - (V_{SP标准层} + V_{SP})_{min}}{(V_{SP标准层} + V_{SP})_{max} - (V_{SP标准层} + V_{SP})_{min}} \quad (8)$$

式中 V_{SP} 为自然电位测井值; $(V_{SP标准层} + V_{SP})_{min}$ 为目的层段纯砂岩段自然电位最小值; $(V_{SP标准层} + V_{SP})_{max}$ 为目的层段纯泥岩段自然电位最大值; $V_{SP标准层}$ 为单井标准层自然电位平均值; V_{SP} 为标准化后的自然电位值, k 为标准化系数, 一般取 10。

在对工区三口取心井段进行精细沉积微相研究基础上, 结合前人对该区小层对比和沉积微相研究成果, 利用资料比较齐全, 并且可很好地反映该区微相特征的自然电位曲线 (SP) 特征, 建立反映该区发育的四类微相七种典型 SP 曲线测井相图版库 (图 1), 作为该区反映不同微相的标准 SP 模版曲线。对这四类七种标准 SP 模版曲线, 采用上述方法, 首先求取其方向概率密度函数, 再对方向概率密度函数进行小波变换, 经过反复试验, 仅提取前 11 个小波描述子, 可以满足沉积微相识别研究的精度要求, 实现测井相图版库向对应的小波描述子图版库的转变。这样就可以利用此新建立的小波描述子图版库, 对未取心井段相应测井曲线求取其方向概率密度函数后, 进行小波变换, 提取前 11 个小波描述子, 进行微相识别。

图 1 为建立的研究区测井相图版库中, 四类微相的七种标准 SP 模版曲线的方向概率密度函数, 以及用前 11 个小波描述子重构的方向概率密度函数。可以看出, 不同微相具有不同的方向概率密度函数, 由前 11 个低频小波描述子就可很好地重构该曲线, 可反映方向概率密度函数轮廓特征。因此, 方向概率密度函数经过小波变换后, 其包含的高维特征信息, 以较小损失信息地映射到由少数几个低频小波描述子组成低维特征向量空间, 使研究问题得到了大大简化。

图 2 为研究区小波描述子图版库中, 四类微相的七种标准 SP 模版曲线的前 11 个小波描述子曲线叠合图。从图中可看出, 不同沉积微相类型间, 小波描述子曲线具有显著的差异。

河道 1 (钟型), 形态呈两个大小不等的“人”字型, 大个“人”字型位左侧 (第 5 小波描述子), 小个“人”字型在右侧 (第 9 小波描述子)。

河道 2 (箱形), 整体形态呈一以中心第 6 小波描述子为最大幅值的近乎对称的“人”字型。

河道 3 (圆头型), 整体上呈一以第 3 到第 8 小波描述子为上底的近视等腰“梯形”分布状, “梯形”高度很小, 其值在 0.05 左右, 中心第 6 小波描述子附近幅值有所下凹。

前缘席状砂两种类型 (前缘席状砂 1 为中低幅漏斗状, 前缘席状砂 2 为低幅齿状) 均呈一大小对称或不对称类似哑铃“人—人”状, 幅值能量其中于两头, 其中心最大幅值点分别为第 3 小波描述子和第 9 小波描述子附近, 中部 4 到 8 小波描述子值接近零或为零, 两类前缘席状砂的区别在于两个“人”字间, 零值距离大小 (零值小波描述子多少), 大者为前缘席状砂 1, 小者为前缘席状砂 2。

河口坝 (漏斗型), 整体上形态与前缘席状砂两种类型很相似, 呈一左小右大不对称的类似哑铃“人—人”状, 大“人”字在右侧 (第 8 小波描述子), 小“人”字在左侧 (第 3 小波描述子), 中部 4 到 7 小波描述子值相对较小, 但不为零。与前缘席状砂的主要区别有二, 一是右侧大“人”字幅度大小要远大于左侧的小“人”字, 二是中间部分有一定的幅值能量, 而前缘席状砂的此部分小波描述子值为零或接近零。

滨浅湖泥自然电位曲线较平直, 中心第 6 小波描述子为一尖脉冲, 幅度能量最大, 其它描述子处幅值接近 0。河道间微相也具有相似的特征, 二者区别主要后者尖脉冲幅值中心有所向高频方向 (大序号小波描述子) 测移。

利用小波变换, 对反映沉积微相的测井曲线 (SP) 方向概率密度函数进行分析, 不仅利用小波描述子可识别沉积微相类型, 还有可能在一定程度上对它们进行沉积学分析。小波分析的多分辨率特性, 使不同小波描述子重构信息代表了不同频率成分^[21], 而不同频率成分或不同频率成分组合 (相对应于不同的小波描述子或不同小波描述子的组合重构信息) 可能反映了控制一个沉积事件的沉积动力学各要素 (沉积能量大小、水动力稳定程度等)^[22]。通过利用此方法对该工区沉积微相识别研究实践表明, 小波描述子中蕴涵丰富的沉积学信息, 与受一定水动力环境控制的砂体形成过程中, 水动力能量的大小以及能量变化稳定程度等方面密切相关。其二者间主要关系有以下几点:

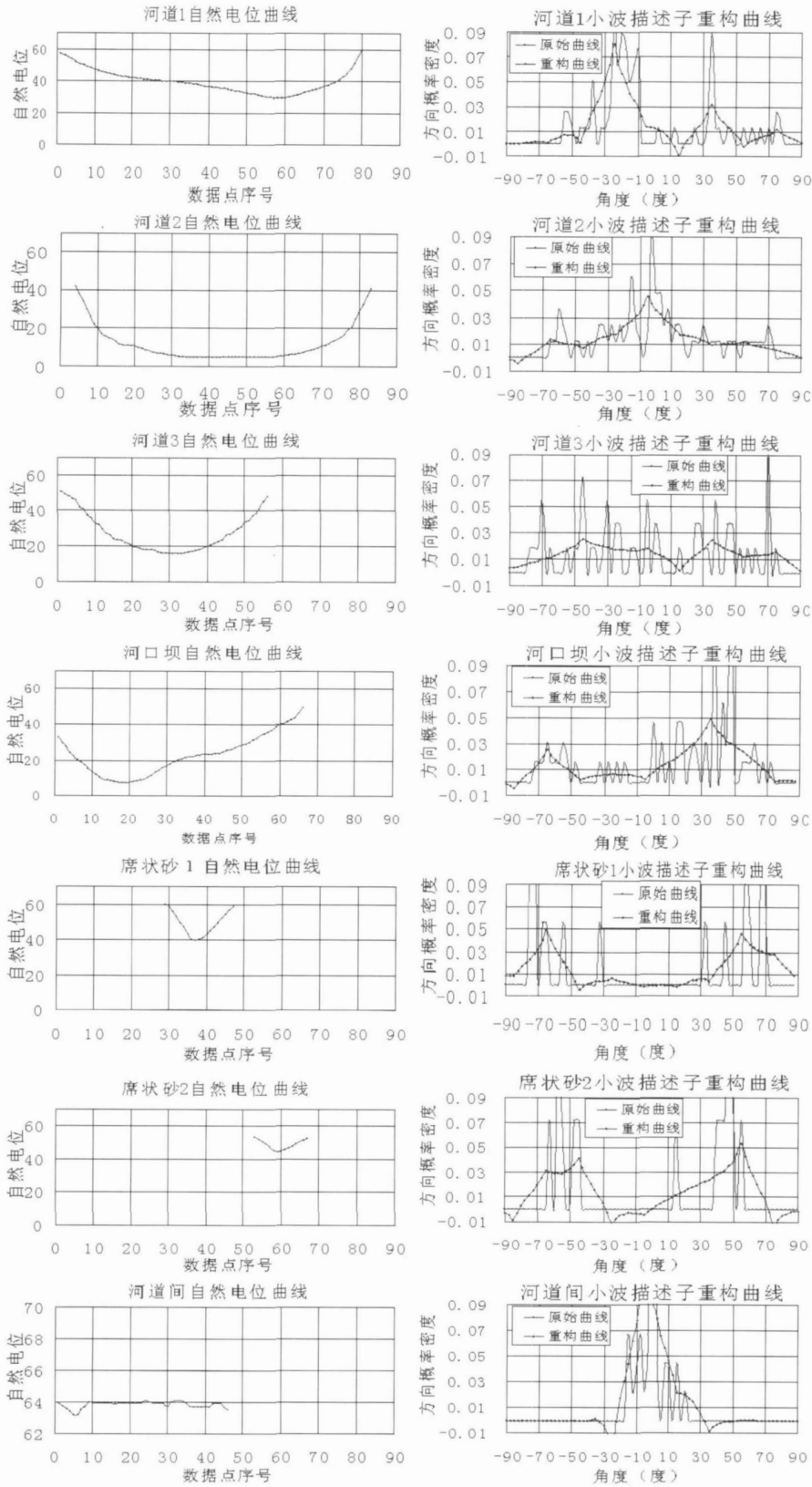


图 1 七种典型微相的 SR 方向概率密度和前 11 个小波描述子重构曲线

Fig 1 SP and the direction probability density curve of seven classic microfacies and the foregoing 11 wavelet descriptor reconstruct curves

(1) 利用前 11 个低频小波描述子, 可以在信息能量有所损失情况下, 对不同微相的测井曲线形态的方向概率密度曲线重构, 可完全满足对微相识别需要的精度要求。前 11 个低频小波描述子反映了不同微相沉积学主要特征, 而之后的小波描述子主要反映高频细节和噪音部分。

(2) 前 11 小波描述子, 反映了一完整砂体沉积过程。11 个小波描述子可分成两段, 1 到 6 小波描述子可看作是相对低频部分, 反映了砂体沉积能量大小, 7 到 11 小波描述子可看作是相对高频部分, 反映了砂体沉积期次性, 水动力环境的周期性强弱。

(3) 中心小波描述子, 即, 第 6 小波描述子频率成分指示的是沉积能量稳定程度信息, 其值越大, 意味着沉积能量越稳定, 变化越小, 反之其值越小, 意味着沉积水动力环境越动荡, 变化越不稳定。依次从中心小波描述子 6 向小波描述子 1 和从中心小波描述子 6 向小波描述子 11 的方向, 反映了沉积能量稳定程度逐渐变差, 变化动荡程度依次加强的趋势。

从图 2 中可看出, 河道 1 (钟型), 其小波描述子曲线整体上, 从低频到高频能量呈逐渐减弱之势, 反映了搬运能力逐渐减小的水流沉积产物特征; 指示沉积能量稳定程度的第 6 小波描述子附近和 8、9 描述子附近也有聚集了一定的能量, 反映了砂体沉积过程中, 水动力能量变化相对较大, 河道内部沉积的期次性比较明显, 非均质性也较强。为一典型的沉积能量不断减弱的正韵律沉积特征。

河道 2 (箱型), 小波描述子曲线以中心第 6 小波描述子为最大幅值中心, 呈“人”字分布状, 除了中心

第 6 小波描述子处能量相对较大外, 能量在其它小波描述子上分布基本均一。说明物源供给持续充足, 沉积能量较大, 沉积过程中水动力能量变化小, 能量稳定。此类砂体往往沉积厚度大, 沉积期次性比较弱, 分选性好, 渗透性高, 多为主河道沉积。此类砂体为该河的一类储集层。

河道 3 (圆头型), 小波描述子曲线整体上呈一以第 3 到第 8 小波描述子为上底的低幅近视等腰“梯形”状, 反映沉积能量稳定程度的第 6 小波描述子附近为低值, 呈下凹状。反映了在沉积过程中, 沉积能量相对较小, 水动力稳定性差, 但变化较均匀, 属于过渡类型。总体上, 分选相对均一, 物性也比较好, 砂体沉积期次性比较弱, 多为次一级分流河道。此类河道砂体在研究工区也占一定的比例。

前缘席状砂两种类型 (前缘席状砂 1 为中低幅漏斗状, 前缘席状砂 2 为低幅齿状) 均呈一大一小对称或不对称类似哑铃“人—人”形状, 反映了沉积水动力稳定程度的第 6 小波描述子附近值很小, 接近零, 能量主要集中于低频的第 3 小波描述子和高频第 9 小波描述子附近, 说明此类砂体, 具有较小的沉积能量, 水动力环境动荡, 稳定性非常差, 沉积期次性比较强。此类砂体厚度小, 岩性细, 非均质性较强, 物性差, 在该区多属表外储层。

河口坝 (漏斗型), 小波描述子曲线整体上, 从低频到高频能量逐渐呈增强之势, 反映了水动力能量逐渐趋强的反韵律沉积物特征; 指示沉积能量稳定程度的第 6 小波描述子附近其值较小, 反映了沉积环境动荡, 沉积能量的稳定性很差; 同时高频部分第 8、9 描

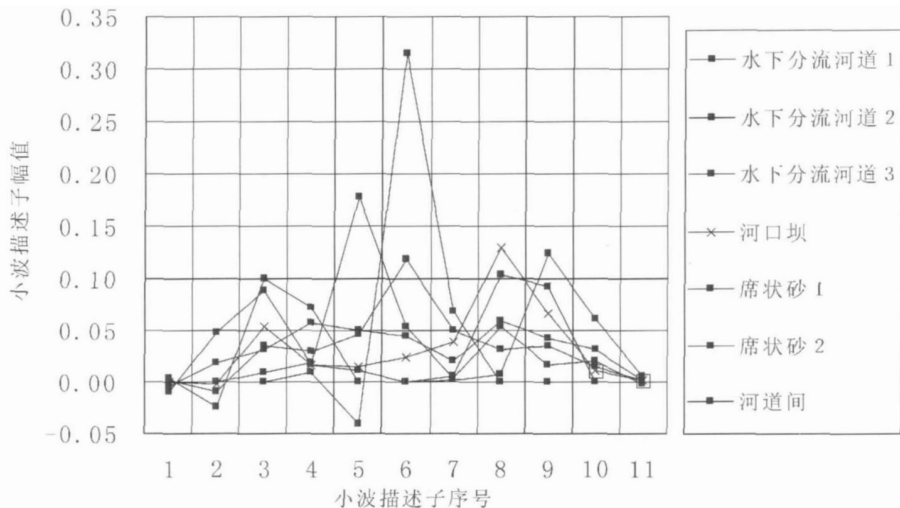


图 2 七种典型微相的前 11 个小波描述子曲线

Fig 2 Foregoing 11 wavelet descriptor curves of seven classic microfacies

述子附近聚集了大部分的能量,反映了沉积过程中,水流、波浪的冲刷和簸选作用很强,有可能使泥质沉积物被带走,保存下来的沉积物相对来说,具有较高的结构和成分成熟度,物性较好,但沉积槽状交错层理发育,沉积的期次性比较明显,非均质性也较强。此类砂体在该区占有较低的比例。

河道间微相和滨浅湖泥自然电位曲线近乎平直状,其小波描述子曲线中心第 6 小波描述子附近均为一尖脉冲,幅度能量最大,其它描述子处幅值为 0 反映了相对能量最稳定的沉积环境。二者的区别在于前者尖脉冲中心,有所向高频方向侧移。

5 识别效果分析

对研究工区中建立的由反映四类微相的七种标准 SP 模版曲线组成的测井相图版库,求取其方向概率密度函数,再进行小波变换,从而将测井相图版库转化为相对应地由前 11 个小波描述子组成的小波描

述子识别模式库。可采用简单的类欧氏距 (或相交距、海明距等)的方法,直接对微相类型未知层进行识别,如果利用神经网络,可以明显地提高微相识别的精度及效率,要比简单的类欧氏距离方法的识别率高出 5.7%。这可能与神经网络的算法具有强大的学习能力和良好的容错性能与泛化能力,以及对识别系统和噪音等不敏感有关。用该区已建立反映不同微相的小波描述子识别模式库,作为多层 BP 神经网络分类器的输入学习样本,建立预测识别模型,把待识别的未知微相类型自然电位 (SP) 曲线,求取其方向概率密度函数后,进行小波变换提取其前 11 个小波描述子作为预测输入样本,进行预测识别。对研究工区 17 口井,共 136 个小层的微相识别结果,与该区原有人工识别的沉积微相成果相比,仅有 13 个为误判 (假定人工识别微相全部为正确),识别正确率达到 90.4%。

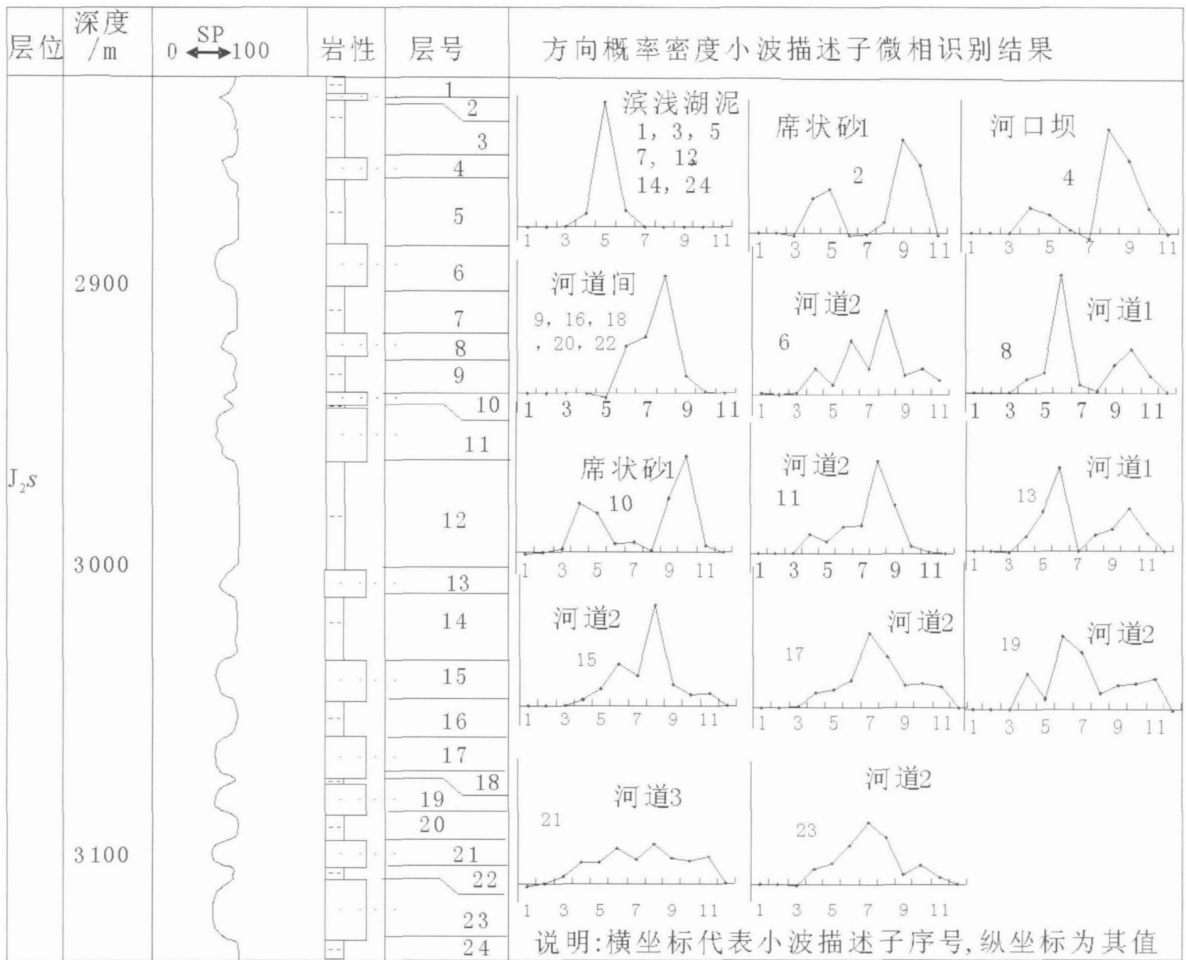


图 3 S3-15 井利用方向概率密度和小波描述子沉积微相识别实例

Fig 3 S3-15 well example for sedimentation microfacies identification based on direction probability density and wavelet descriptors

对 13 个误判小层分析,主要分为二类,一类是河道中出现了一定厚度夹层时(主要是泥质夹层,其厚度较小时,不影响识别结果),尤其是泥质夹层出现在砂层上部或下部后,对曲线的整体形态产生了较大的影响(夹层在中部,则影响很有限),以是不同的形态曲线做出了“误判”,程序设计中没有考虑到,此种情况下,曲线形态变化是由泥质夹层引起。解决办法是,可在程序中做一特殊处理,或将此类顶底部位含泥质夹层小层筛选出来,交由地质专家另行处理;第二类是由于事先没有认识到的新曲线形态类型。例如,对应图 3 中 3 110 75 ~3 120 m 编号为 19 的砂层,人工判别微相结论为河道 1(钟型),而此方法判别为河道 2(箱型)。实际上仔细研究发现,该类型属于河道 1+河道 2 叠合类型,从其小波描述子曲线上可看出(图 3),形态呈一“人入”字型特征,曲线整体形态与河道 2 典型的“人”字型特征的相似度要大于河道 1“人入”字型特征,因此做出“误判”为河道 2 的结论。这可以通过在识别模式库中加入新的河道新类型(河道 1+河道 2)来解决。实际上,把河道类分为三类以上或更细的亚类,这属于对沉积微相识别的更精细研究要求。

6 结论

(1)首次提出了基于测井曲线形态的沉积微相识别方法必须要满足三个条件,即平移和尺度缩放的不变性以及旋转的可变性的认识。不同微相曲线形态特征映射到其方向概率密度函数特征域,不仅满足了基于测井曲线形态的沉积微相识别方法必须要具备的三个条件,而且使不同微相的特征差异得到放大和突出。

(2)通过对不同微相测井曲线形态方向概率密度函数进行小波变换后,可利用少数几个低频小波描述子重构方向概率密度函数轮廓特征,使其高维特征信息,以较小信息损失地映射到由很少几个低频小波描述子组成低维特征向量空间。这样,利用测井曲线形态对沉积微相识别的较复杂问题,就简化为通过对少数几个低频小波描述子进行判断识别的简单问题。

(3)该方法定量化程度高,操作灵活,地质意义比较明确,是一种值得推广和发展的沉积微相识别方法。但需要注意的是不同工区,因反映不同沉积环境的测井曲线形态模式可能会有所差异,同时所选取的小波函数不同其结果会有所变化。应根据具体研究工区实际反映沉积环境差异的测井曲线特征灵活应

用。另外,利用小波描述子进行沉积学分析,具有一定的探索性,须在以后理论研究和生产实践中继续完善和发展。

参考文献 (References)

- 1 马世忠,黄孝特,张太斌.定量自动识别测井微相的数学方法[J].石油地球物理勘探,2000,35(5):582-589 [Ma Shizhong Huang Xiaote Zhang Taibin Mathematic method for quantitative automatic identification of logging microfacies [J]. Oil Geophysical Prospecting 2000 35(5): 582-589]
- 2 刘红歧,陈平,夏宏泉.测井沉积微相自动识别与应用[J].测井技术,2006,30(3):232-236 [Liu Hongqi Chen Ping Xia Hongquan Automatic identification of sedimentary microfacies with log data and its application [J]. Well Logging Technology 2006 30(3): 232-236]
- 3 许少华,刘扬,梁久祝,等.基于遗传-BP算法和图像处理的沉积微相识别[J].石油学报,2002,23(3):48-51 [Xu Shaohua Liu Yang Liang Jiuzhen et al Sedimentary facies identification based on genetic-BP algorithm and image process [J]. Acta Petrolei Sinica 2002 23(3): 48-51]
- 4 靳松,朱筱敏,钟大康.变差函数在沉积微相自动识别中的应用[J].石油学报,2006,27(3):57-60 [Jin Song Zhu Xiaomin Zhong Dakang Application of variogram to automatic identification of sedimentary microfacies [J]. Acta Petrolei Sinica 2006 27(3): 57-60]
- 5 陈焯菲,彭仕宓.沉积微相定量研究方法[J].石油勘探与开发,2003,30(4):51-53 [Chen Yefei Peng Shimi Quantitative study on sedimentary microfacies [J]. Petroleum Exploration and Development 2003 30(4): 51-53]
- 6 张萌,田景春,吴志勇.用 Bayes 判别模型识别未取芯井段沉积微相——以沾化凹陷罗家鼻状构造沙四上段近岸水下扇砂砾岩体为例[J].成都理工学院学报,2001,28(3):273-278 [Zhang Meng Tian Jingchun Wu Zhiyong Application of the bayes discriminant analysis to sedimentary microfacies of the non-cores information's drills taking the nearshore subaqueous fans conglomerate of the fourth member stratum of Shahejie Formation in Luojiase-type st [J]. Journal of Chengdu University of Technology 2001 28(3): 273-278]
- 7 张福明,李洪奇,邵才瑞.应用神经网络模式识别技术进行测井沉积学研究[J].石油勘探与开发,2003,30(3):121-123 [Zhang Fuming Li Hongqi Shao Cairui Application of artificial neural network pattern recognition technology to the study of well logging sedimentology [J]. Petroleum Exploration and Development 2003 30(3): 121-123]
- 8 倪新锋,田景春,陈洪德,等.应用测井资料定量识别沉积微相——以鄂尔多斯盆地姬塬白豹地区三叠系延长组为例[J].成都理工大学学报(自然科学版),2007,34(1):57-61 [Ni Xinfeng Tian Jingchun Chen Hongde et al Quantitative discrimination of sedimentary microfacies by use of log data-Taking the Triassic Yanchang Formation in Jiyuan-Baibao region of Ordos Basin for example [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science of Technology Edition) 2007 34(1): 57-61]
- 9 王志征,余岳峰,姚国平.基于主成分分析法和自适应神经模糊推

- 理系统的电力负荷预测 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9): 39-41 [Wang Zhizheng Yu Yuefeng Yao Guoping Power load forecast based on principal component analysis and adaptive neuro-fuzzy inference system [J]. Electric Power Automation Equipment 2003, 23, 23 (9): 39-41]
- 10 刘宏申, 秦锋. 确定轮廓形状匹配中形状描述函数的方法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2005, 33(4): 13-16 [Liu Hongshen Qin Feng Method of determining the function of description of shape in shapematching [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology 2005, 33(4): 13-16]
- 11 王勇, 杨公训, 路迈西. 图像识别中颗粒形状表征方法的研究 [J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2005, 25(1): 27-29 [Wang Yong Yang Gongxun Lu Maixi The study on the method of signifying the shape coefficient of grain in image recognition [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 25(1): 27-29]
- 12 王波涛, 孙景鳌, 蔡安妮. 相对矩及在几何形状识别中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(3): 296-300 [Wang Botao Sun Jing'ao Cai An'ni Relative moments and their applications to geometric shape recognition [J]. Journal of Image and Graphics 2001, 6(3): 296-300]
- 13 葛元, 郭兴伟, 王林泉. 傅立叶描述子在手势识别中的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(6): 12-13 [Ge Yuan Guo Xingwei Wang Linquan The application of fourier descriptors to the recognition of alphabet gesture [J]. Computer Applications and Software 2005, 22(6): 12-13]
- 14 孔繁森, 陈如恒, 李富海. 三缸泵动力端的振动监测与故障诊断 (二) 倒频谱与幅值概率密度函数的应用 [J]. 石油矿场机械, 1996, 25(3): 40-43 [Kong Fansen Chen Ruheng Li Fuhai Vibration probability and fault diagnosis of the triplex pump's power end (two): the application of cepstrum and amplitude probability density function [J]. Oilfield Equipment 1996, 25(3): 40-43]
- 15 梁艳, 潘保昌, 郑胜林. 区域直方图及在鉴别身份证真伪中的应用 [J]. 计算机工程于应用, 2005, 26(12): 3450-3452 [Liang Yan Pan Baochang Zheng Shenglin Region direction histogram and its application in distinguishing true or false of ID card [J]. Computer Engineering and Design 2005, 26(12): 3450-3452]
- 16 樊亚春, 耿国华, 周明全. 用不变矩和边界方向进行形状检索 [J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(4): 659-662 [Fan Yachun Geng Guohua Zhou Mingquan Shape-based retrieve using invariant moments and edge direction [J]. Micro Systems 2004, 25(4): 659-662]
- 17 曲桂红, 张大力, 阎平凡. 数字空间轮廓的小波描述子 [J]. 电子与信息学报, 2002, 24(6): 794-799 [Qu Guihong Zhang Dalu Yan Fanping Wavelet descriptor of contours in digital space [J]. Journal of Electronics and Information Technology 2002, 24(6): 794-799]
- 18 杨翔英, 章毓晋. 小波轮廓描述符及在图像查询中的应用 [J]. 计算机学报, 1999, 22(7): 752-757 [Yang Xiangying Zhang Yujin Wavelet boundary descriptors and its application in image querying [J]. Chinese Journal of Computers 1999, 22(7): 752-757]
- 19 冯占林, 张学工, 李衍达. 基于小波变换的地震勘探数据压缩的工程分析 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2001, 41(4): 170-173 [Feng Zhanlin Zhang Xuegong Li Yanda Some practical aspects of seismic data compression based on wavelet transform [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(4): 170-173]
- 20 秦萍, 阎兵, 李辉. 小波分析在柴油机滑动主轴接触摩擦故障诊断中的应用 [J]. 内燃机工程, 2003, 24(34): 56-90 [Qin Ping Yan Bing Li Hui The application of wavelet analysis in the fault diagnosis for the plain bearing's contact friction of diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering 2003, 24(34): 56-90]
- 21 吴小培, 冯焕清, 周荷琴, 等. 结合小波变换和独立分量分析的脑电特征提取 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(1): 116-120 [Wu Xiaopei Feng Huanqing Zhou Heqin et al EEG pattern extraction of combining wavelet transform and independent component analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2004, 25(1): 116-120]
- 22 李庆谋, 刘少华. 地球物理测井序列的小波波谱方法 [J]. 地球物理学进展, 2001, 17(1): 1-6 [Li Qingmou Liu Shaohua Wavelet scalogram and application for geophysical well [J]. Progress In Geophysics 2004, 25(1): 116-120]

Sedimentation Microfacies Identification Based on Direction Probability Density and Wavelet Descriptor

WANG Ren-yi^{1,2} MEI Lian-fu¹

(1 China University of Geosciences Wuhan 430074

2 CNOOC Zhanjiang Branch of the Department of exploration and development Guangdong Zhanjiang 524057)

Abstract For the sedimentation microfacies identification based on the well logging curves of different shapes, three conditions including the invariance of translation and dimension scaling and the modifiability of rotation should be satisfied. In this paper, a new method of sedimentation microfacies identification using the shape of well logging curves which can satisfy the three conditions above was set. Through computing the boundary direction probability density of

different shapes of well logging curves, then the wavelet transformation should be made, and few low frequency wavelet descriptors whose direction probability density can be reconstructed can be used as the sedimentation microfacies identification, and the wavelet descriptor identification of different sedimentation microfacies can be set at the same time. The wavelet analyze should be made for the direction probability density function of different well logging curve, so the sedimentation microfacies information should be mapped to a reduced dimensionality characteristic vector space consist of few low frequency wavelet descriptors from the high dimensionality characteristic vector space, therefore the discrepancy information of different sedimentation microfacies can be enlarged. For the complicated problem of sedimentation microfacies identification based on the shapes of well logging curves, this method can degenerate it into a simple problem that judging few low frequency wavelet descriptors and the wavelet descriptors can also be used for the sedimentology analysis.

Key words: sedimentation microfacies, well logging curve shape, direction probability density, wavelet descriptors, automatic identification.

欢迎订阅《沉积学报》

《沉积学报》是中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会、中国地质学会沉积地质专业委员会、中国科学院兰州地质研究所共同主办的综合性学术刊物,是全国自然科学核心期刊。主要刊载沉积学、沉积矿产、地球化学以及相关分支学科、交叉学科的基础和应用基础研究的创新性研究成果和高水平论文,介绍沉积学研究的新技术、新理论及国内外最新沉积学论著,同时也报导有关学术活动、学科研究动态及学术思想的讨论和争鸣。优先发表国家、省、部级重大科技项目及基金资助的在沉积学、地球化学前沿各分支领域以及学科交叉点上有创造性的研究成果。读者对象为大专院校地学专业的师生及科研院所的地学工作者。

2006年起《沉积学报》改为双月刊,16开本,每期144页,逢双月10日出版,定价30元,全年定价180元。国内外公开发行,欢迎广大读者到当地邮局订阅。

国内邮发代号:54-45

国外发行代号:Q832

同时欢迎各位专家学者踊跃投稿。

网址: www.cjxb.ac.cn

地址:兰州市东岗西路382号中国科学院兰州地质研究所《沉积学报》编辑部

邮政编码:730000

联系电话:(0931)4960916 4960917 传真:(0931)8278667

Email: cjxb@ns.lzb.ac.cn