

文章编号: 1009-3850(2011)04-0058-06

测井信号小波变换在层序地层划分中的应用 ——以南海北部莺歌海盆地 D14 井黄流组为例

王亚辉¹, 赵鹏肖², 左倩媚¹, 钟泽红¹, 李俊良¹

(1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057; 2. 中海油能源发展股份有限公司钻采工程研究院湛江实验中心, 广东 湛江 524057)

摘要: 本文介绍了小波变换的基本原理和步骤, 探讨了测井信号小波变换在层序地层划分中的方法和地质意义。对南海北部莺歌海盆地 D14 井黄流组自然伽马(GR) 测井信号利用 Daubechies 小波系 db5 小波进行了一维连续小波变换和一维离散小波变换。根据其时频色谱图特征和高频离散系数曲线特征, 将黄流组一段划分出 1 个长期旋回、3 个中期旋回和 9 个短期旋回。显示出小波变换在测井层序地层划分中较高的分辨率、在识别地质作用中的隐蔽旋回特征的优势。实践证明, 将一维连续小波变换和一维离散小波变换进行综合分析, 更有利于不同级次的层序旋回识别。

关键词: 小波变换; 层序地层; 测井信号; 莺歌海盆地

中图分类号: TE132.1⁺4

文献标识码: A

近年来, 将测井信号进行小波变换在层序地层划分中得到广泛应用, 使得层序地层学的研究逐渐从定性向定量的转变, 实践证明, 此方法非常有效。一方面测井信号数据具有高分辨率、连续地反应了地层成层性和旋回性的地质信息, 以及沉积盆地的演化条件和影响因素, 如古环境、古气候、海平面变化、沉积物供给以及沉积速率等因素; 不同的测井信号数据反映的地质岩性特征不同, 因此, 根据研究的需要选择不同的测井曲线或者多种测井曲线的综合分析等, 这在无地震资料或地震资料分辨率低和无取心的研究区域, 对测井资料的充分利用尤其重要。另一方面, 小波变换具有时频局部化和多尺度分析的思想, 将测井信号和深度的一维信息转化为测井信号与深度、尺度域的二维信息, 有利于揭示测井信号中包含的多级次周期性旋回特征, 较传统的利用测井曲线形态、深度域和利用平稳信号整体分析的 Fourier 变换等分析方法更为有效。

1 小波变换原理

目前, 将测井资料用于层序地层学的研究, 已有深-频分析法^[1]、活度函数分析法^[2]、最大熵谱分析法^[3]等多种方法, 但这些方法主要是依靠人工对测井曲线形态、形状、幅度等进行研究, 定性划分层序界面及识别层序旋回类型。小波变换将测井信号从不同尺度进行分解, 将测井信号反映的地层旋回性特征由粗到细不同级次地显现出来, 具有多分辨率, 表现出时(深度)域-频(尺度)域二维信息。

小波变换就是将一小波函数 $\Psi(t)$ 进行位移和伸缩处理后, 与待变换的函数 $f(t)$ 内积, 得到具有双参数 a (位移参数)和 b (伸缩参数)的函数 $W_f(a, b)$ ^[4], 即:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi[(t-b)/a]} dt \quad (A > 0)$$

收稿日期: 2011-02-18; 改回日期: 2011-03-23

作者简介: 王亚辉(1980-), 女, 工程师, 从事储层沉积学研究。E-mail: 282001722@qq.com

通常 $\Psi(t)$ 具有有限的支撑集,即在 t 的一个有限集合,例如 $[0, T]$ 之外全部等于 0。此时,上述积分只在包含 b 的视窗 $[b-aT, b]$ 内部不等于 0;而视窗位置随 b 移动,其大小随 a 伸缩。另外,上述积分可以化成褶积,因此小波变换是视视窗中的 $f(t)$ 进行滤波处理,此滤波是一种带通滤波。 a 越大频带越窄,视窗越大越模糊;反之, a 越小频带越宽,视窗越小,分辨率越高。

对测井信号的小波变换一般分为两种,即连续小波变换和离散小波变换。

一维连续小波变换步骤如下:第一步,选择尺度 a 一定的小波,把它与原始测井信号的开始一段进行比较;第二步,计算 $W_f(a, b)$,它表示这段信号与尺度 a 小波的相关程度(小波变换系数)。 $W_f(a, b)$ 越大,二者越相似,这个结构依赖于所选择的小波的形状;第三步,将小波右移,重复第一、第二步。直到覆盖整个原始测井信号曲线。第四步,增大或者缩小小波的尺度因子,重复前面步骤,得到全部 $W_f(a, b)$ [5]。通过对测井信号进行连续小波变换,可以对信号进行时频分析,即观察信号在某一时间上对应某一尺度的成分,得到时频色谱图。

小波变换的意义在于通过对不同尺度(频率)、不同位置(时间)将原始测井信号进行分解,有利于对信号的任一细节加以分析,具有数学显微镜的功能。小波系数的数值大小可以理解为要分析的测井信号与小波的协方差 [6]。

一维离散小波是将小波函数中的尺度和时间限定在一些离散点上取值,进而进行相应的离散小波变换,通过多尺度离散小波变换,可得到高频和低频系数,然后进行小波分解结构的低频或高频重构,得到不同尺度下的近似信号和细节信号 [7]。

常用的小波函数有十几种,如 Harr 小波、Daubechies 小波(dbN)、Symlet 小波(SymN)、dmey 小波以及 Morlet 小波等。

2 层序划分依据

2.1 地质意义

高分辨率层序划分对比的实质就是基准面旋回对比和识别,以 Cross 为代表的学者将基准面定义为一个假想的势能面,而非物理面,受控于海(湖)平面变化、构造沉降、沉积负荷、沉积物供给、地形等要素影响的沉积基准面旋回,作为层序划分的原理;应用地层过程-沉积响应动力学原理,把基准面变化导致的可容纳空间变化与沉积物沉积过

程和沉积学响应特征密切结合起来 [8~9]。在实际操作中,以露头、岩心、测井和地震剖面为基础资料进行层序划分,但对于海相地层来讲,由于钻井较少、岩心资料较贵以及二维地震剖面分辨率不高等特点,充分利用测井资料进行层序划分变得尤为重要。传统的应用测井曲线定性划分层序的方法主要是通过测井曲线表现的形态不同(如钟形、箱形和漏斗形);测井曲线反映不同的退积、加积和进积单元的叠加样式的变换等 [7],反映岩石粒度和岩性组合的变化、相转换面、不整合面、初始海泛面以及最大海泛面等。由于地质历史过程中沉积地层受多种地质作用的影响,很难通过传统的方法来识别出测井曲线所代表的各种隐蔽周期。近年来,为了能准确、快速地识别和划分层序地层单元,采用了一系列数学方法对测井数据进行处理 [1~3],但这些方法难以模拟逐级分层的人工解释效果。小波变换的优点就是能从原始测井信号中提取时频特征,实现信号分析的时频局部化,尤其是它能在多种尺度下以多种分辨率识别测井信号中的周期旋回特征,从而通过小波变换对测井信号中隐含的周期性旋回进行定量化的识别和划分 [10]。其地质意义在于测井数据经过小波变换后所得的小波系数周期性振荡位置代表了各级的突变点和突变区域,是一种界面的响应,可与各级层序界面建立一定对应关系,作为测井层序分析的依据 [11]。

2.2 划分方法

一维连续小波变换后所得的时频色谱图,根据不同尺度下所表现的突变点或突变区域进行划分层序。识别不同尺度层序界面的具体方法是:先参照时频色谱图所反映的概貌信息,即同一尺度上相同的颜色代表同一时期形成的沉积地层;再依据小波变换系数曲线中同一尺度旋回内小波系数振荡趋势相似的原则,从大到小进行划分,先识别出层序界面,再在层序内部划分出次一级层序界面,依次从次一级层序内部识别出更低级别层序界面;最后根据岩心资料对划分出的界面位置加以适当校正,达到准确划分不同级别层序界面的目的 [12]。

3 应用

3.1 研究区地质背景

莺歌海盆地位于南海北部大陆边缘,是一个走滑-伸展型盆地 [13]。黄流组沉积时期,海平面呈现逐步上升趋势,局部有小的海退事件,如晚中新世梅辛期与托尔通期和晚中新世与上新世界面附近,

即相当于地震界面 T30 和 T31 附近,但规模有限。D14 井区周围钻遇的多口井显示,岩性主要为灰色泥岩、粉砂质泥岩夹薄层泥质粉砂岩,在黄流组一段中下部发育一套(或几套)厚层泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩,总厚度可达 100m 左右,是本区良好的储集层。D14 井有孔虫化石定量分析参数($N/50g$)表明,黄流组一段砂岩层上下的泥岩中有孔虫化石丰度高,且浮游有孔虫占优势,认为沉积时期水体较深,属浅海环境;而黄流组一段下部砂岩为快速堆积的重力流沉积。

3.2 研究实例

本次以莺歌海盆地 D14 井黄流组一段 2629 ~ 3006m 地层为研究目标,以 Matlab 软件为平台,通过大量的小波基和测井曲线匹配拟合,对自然伽马曲线选取 Daubechies(N) 二进制小波系进行研究,经反复尝试发现 db5 小波所得的一维连续小波和一维离散小波所反映的沉积旋回和层序界面更适合本地区地质情况,

1. 一维连续小波变换

以 db5 小波对 D14 井自然伽马曲线进行一维连续小波变换,识别沉积旋回时依据时频色谱图 and 同一尺度旋回内小波系数振荡趋势相似的原则,从大到小进行划分。首先划分出大尺度旋回的界面,然后在大尺度旋回内部识别出中小尺度旋回界面,依次从中小尺度界面识别出更小的旋回界面。

图 1a 为原始自然伽马测井曲线,横坐标表示深度,自左至右深度增加,坐标值为采样点序号,采样间隔为 0.125m,可换算成地层深度值;纵坐标为自然伽马(GR)测井值。为了便于进行井间对比,已进行了归一化处理。

图 1b 为经 Daubechies(5) 对自然伽马曲线进行小波变换后得到的一系列小波变换系数而构成的时频色谱图,根据系数大小进行染色,颜色越深,表示系数越大,小波基与测井信号越相似。不同级别层序界面与色谱图不同尺度的亮色对应。

图 1c、d 为一维连续小波变换后不同尺度小波变换系数曲线,可以参照小波变换时频色谱图与小波变换系数曲线的振荡趋势共同确定各个级别的层序界面。从图(1c)代表在尺度 $a=500$ 时小波变换系数曲线,可以看出中部整段系数振荡趋势较一致,顶端明显的两个突变区域分别对应两个(长期)旋回界面,与地震剖面识别出的三级层序界面对应较好。

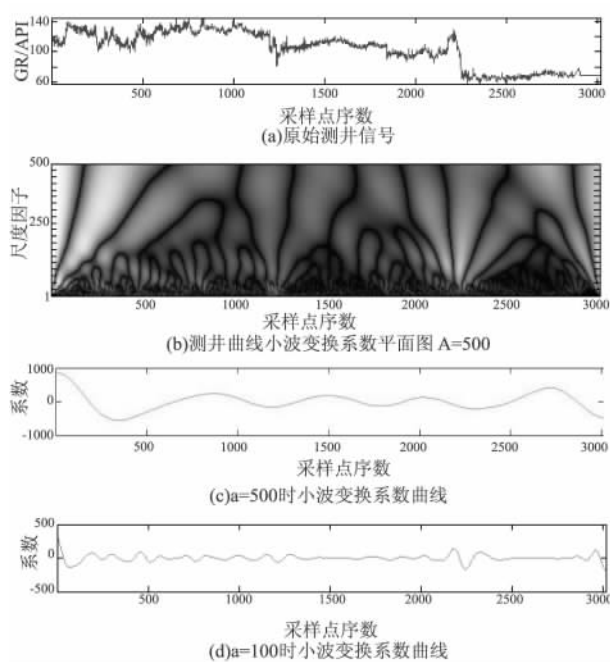


图 1 测井信号连续小波变换图

Fig. 1 Diagrams showing the well logging signal continuous wavelet transformation

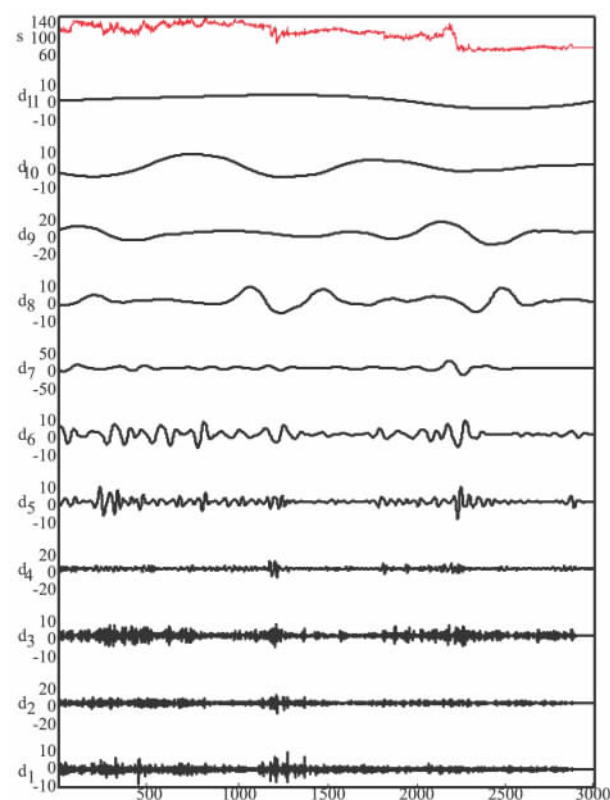


图 2 Daubechies 小波变换结果

Fig. 2 Illustration of Daubechies wavelet transformation

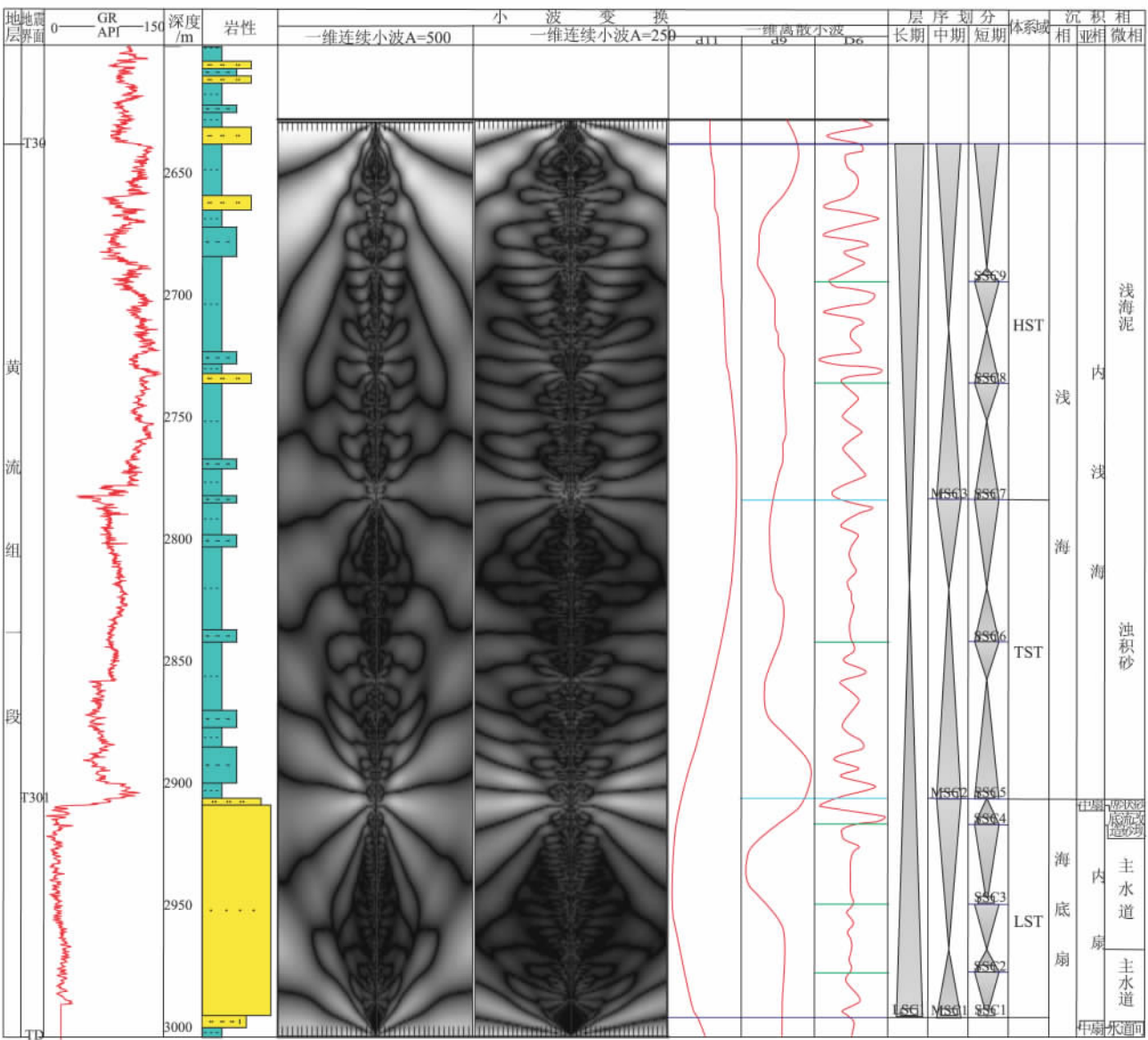


图3 D14 井综合分析柱状图
Fig.3 Generalized column through the D14 well in the Yinggehai Basin

从图 1b 可以看出,在横轴采样点序数为 1000 ~ 1300 内,由深部到浅部能量团从小尺度向大尺度转移,尺度为 $450 \pm$ 时能量明显增强,到尺度为 500 处达到最大,存在一个层序界面;同理,在采样点序数为 2000 ~ 2500 内,同样存在一个层序界面。结合图 1d 中 $a = 100$ 的小波变换系数曲线的振荡特征,在大尺度内部可以识别出两个次一级层序界面,其序数点分别为 $1244 \pm$ 和 $2224 \pm$ 。此尺度为小波变换的中小尺度,所以确定的层序界面划分的层序对应于(中期)旋回界面。

2. 一维离散小波变换

在小波变换对层序地层划分中,多采用一维连续小波变换,此方法能较好地应用于由于地层不整

合或具有断点的地层层序分析中^[7],其在时频色谱图上和小波变换系数曲线振荡趋势上都能非常直观的显示(图 1b)。但相对整合或连续沉积地层的高分辨率层序地层对比划分,尤其是较低级别的层序旋回性划分,如能结合一维离散小波变换成果,则更能保证层序旋回划分的高精度和准确性,此实践经验在前人研究中也有涉及。就测井曲线的特点来讲,测井数据本身就有一定的采样间隔,采用连续小波分解和频谱图不能反映测井的采样间隔特征,因此,采用离散小波变换和连续小波变换相结合,在理论上更合理。

本次仍然采用 db5 小波对自然伽马曲线作一维离散小波变换,采用十一级分解(图 2),并选择其中

的 $d=6$ 、 $d=9$ 、 $d=11$ 这 3 个分辨率效果较好尺度的高频信号来识别层序。

从图 3 中可以看出, $d=11$ 对应一个明显的大旋回, 同时结合地震剖面识别的界面相互对应校正, 确定出一个长期旋回层序(LSC1)。在长期旋回层序内部, 根据 $d=9$ 的离散小波系数曲线振荡趋势特征, 结合一维连续小波变换最大尺度 $A=500$ 谱系图, 可以直观清楚地见到两个亮色的突变区域界面, 将其划分出两个次一级旋回界面, 其序数点分别为 $1244 \pm$ 和 $2224 \pm$, 即 3 个中期旋回(MSC1、MSC2、MSC3)。结合地震相特征, 3 个中期旋回分别对应长期旋回的 3 个体域。在 MSC1 旋回内部, 根据 $d=6$ 的曲线振荡趋势特征, 可以明显看出 4 个不同的振荡特征变化, 结合一维连续小波变换的时频色谱图 $A=250$ 的小尺度小波系数表现的突变区域, 识别出 3 个层序界面, 其序数点分别为 $2793 \pm$ 、 $2572 \pm$ 和 $2310 \pm$, 将 MSC1 划分为 4 个短期旋回(SSC1、SSC2、SSC3、SSC4)。在 MSC2 旋回内部, 从一维连续小波变换的时频色谱图 $A=250$ 中可以看出一个明显的突变区域(即亮色界面), 据此将 MSC2 划分为两个次一级层序, 在 $d=6$ 的曲线振荡特征中也有相应的响应。即将 MSC2 划分为两个短期旋回(SSC5、SSC6), SSC5 层序顶界面序数点 $1710 \pm$ 。在 MSC3 旋回内部, 通过一维连续小波变换中小尺度反映的色谱图和一维离散小波变换 $d=6$ 的曲线特征, 可以识别出两个层序界面, 其序数点分别对应 $863 \pm$ 和 $530 \pm$, 划分出 SSC7、SSC8 和 SSC9 3 个短期旋回层序。

4 结论

通过应用小波函数 Daubechies 二进制小波系的 db5 小波对南海北部莺歌海盆地 D14 井自然伽马曲线进行小波变换, 将一维测井数据拓展为二维深度-尺度域空间, 有效地揭示了测井数据中包含的丰富地质信息, 通过多种尺度的小波变化可以识别出地层较隐蔽的旋回特征。本文通过一维连续小波变

换色谱图和一维离散小波系数曲线地震特征相结合的方法, 对该井不同级别的层序界面进行识别, 并划分出 1 个长期旋回、3 个中期旋回和 9 个短期旋回。这种应用数学方法进行层序地层的研究, 有利于克服手工划分层序的人为因素, 也为地震资料缺乏或分辨率不高、岩心资料较少的井区进行精细层序地层的划分提供了一种新的思路和途径。

参考文献:

- [1] 陈茂山. 测井资料的两种深度域频谱分析方法及在层序地层学研究中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(1): 57-64.
- [2] 朱剑兵, 赵培坤. 利用测井曲线活度划分准层序[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(4): 426-427.
- [3] 王贵文, 邓清平, 唐为清. 测井曲线谱分析方法及在沉积旋回研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 93-95.
- [4] 王家华, 张团峰. 油气储层随机建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [5] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [6] 陈桂明, 张明照, 戚红雨. 应用 Matlab 语言处理数字信号与数字图象[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] 李新虎. 小波分析在测井层序地层划分中的应用[J]. 天然气地球科学, 2008, 6(3): 385-389.
- [8] 邓宏文, 王红亮, 宁宁. 沉积物体积分配原理-高分辨率层序地层学的理论基础[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 305-313.
- [9] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249-254.
- [10] 张莹, 潘保芝, 黄布宙, 等. 测井资料小波变换在高分辨率层序地层划分中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2008, 1(1): 58-62.
- [11] 余继峰, 李增学. 基于测井数据小波变换及其地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 336-339.
- [12] 李霞, 范宜仁, 杨立伟, 等. 测井曲线小波变换特性在层序地层划分中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 8(4): 112-115.
- [13] 孙家振, 李兰斌, 杨士恭, 等. 转换-伸展盆地-莺歌海的演化[J]. 中国地质大学学报, 1995, 20(3): 243-249.

An application of the wavelet transformation to sequence stratigraphy: A case study of the Huangliu Formation in the Yinggehai Basin , northern South China Sea

WANG Ya-hui¹ , ZHAO Peng-xiao² , ZUO Qian-mei¹ , ZHONG Ze-hong¹ , LI Jun-liang¹

(1. Zhanjiang Branch , CNOOC , Zhanjiang 524057 , Guangdong , China; 2. Zhanjiang Laboratory Center , CNOOC , Zhanjiang 524057 , Guangdong , China)

Abstract: The present paper gives an introduction of the terminology , principle , method and significance of the wavelet transformation in sequence stratigraphic division. The gamma-ray logging data for the D14 well in the Yinggehai Basin are explored with the aid of db5 wavelet in one-dimensional continuous wavelet transformation and one-dimensional discrete wavelet transformation , respectively. One long-term cycle , three medium-term cycles and nine short-term cycles are discriminated for the first member of the Huangliu Formation according to the time-frequency chromatogram and high-frequency discrete coefficient curves. The results of the study show that the wavelet transformation may provide a tool for the division of high-resolution logging sequence stratigraphy and recognition of subtle sequence cycles. The integration of one-dimensional continuous wavelet transformation and one-dimensional discrete wavelet transformation will be more favourable for the recognition of sequence cycles of varying orders.

Key words: wavelet transformation; sequence stratigraphy; logging signal; Yinggehai Basin