

# 基于 Hilbert-Huang 变换的阵列声波测井信号时频分析

王祝文<sup>1</sup>, 刘菁华<sup>1</sup>, 聂春燕<sup>2</sup>

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

2. 长春大学电子信息工程学院, 吉林长春 130022

**摘要:** 针对目前阵列声波测井信号的信息提取主要集中在纵波、横波、斯通利波等组分波的速度、衰减的处理分析上, 对频率特征的分析还缺少足够的重视的不足, 引入了 Hilbert-Huang 变换(HHT) 时频分析方法及瞬时频率的概念, 给出了阵列声波信号的经验模态分解及其时频分布, 并对实际阵列声波的波形信号进行了 HHT 时频处理与剖析. 把这种方法用于区分和识别岩石构造破碎带取得了理想的效果. 从阵列声波测井信号处理和构造异常的地球物理意义两方面表明, IMF 序列能更好反映原始数据固有的物理特性, 所使用的 EMD 分解是有效和易行的, 为 HHT 分析在阵列声波测井信号处理中的应用, 进行了有益的探索.

**关键词:** Hilbert-Huang 变换; 瞬时频率; 声波测井波形; 时频分析.

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2008)03-0387-06

收稿日期: 2007-08-15

## Time-Frequency Analysis of Array Acoustic Logging Waveform Signal Based on Hilbert-Huang Transform

WANG Zhu-wen<sup>1</sup>, LIU Jing-hua<sup>1</sup>, NIE Chun-yan<sup>2</sup>

1. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2. Electronic Information Institute, Changchun University, Changchun 130022, China

**Abstract:** The array acoustic logging information extraction had been focused on processing the velocities and attenuations of the primary wave, shear wave and stoneley wave, and people have not still paid enough attention to the analysis on the frequency characteristics of waveform. In order to make up for this defect, the time-frequency analysis method of Hilbert-Huang transform (HHT) and the conception of transient frequency were introduced, and the empirical mode decomposition (EMD) and its time-frequency distribution about digital array acoustic logging waveform signals were given. This method was provided with the abilities to distinguish and identify the different kinds of structural fracture zones responses. The application of Hilbert-Huang transform on array acoustic logging waveform yields ideal results. Therefore, in terms of signal processing and geophysics theory, the intrinsic mode function (IMF) reflected properly the intrinsic physical properties in waveform and the method of EMD was effective and feasible. All these researches have contributed a lot to confirming the HHT in array acoustic logging waveform processing by providing effective and feasible methods.

**Key words:** Hilbert-Huang transform; transient frequency; acoustic logging waveform; time-frequency analysis.

随着资源的勘探程度不断加深, 勘探的难度也在不断地加大, 对于地下岩石的各种性质的了解要求越来越高. 多极子阵列声波测井提供了大量的地下地层岩石的特性(楚泽涵, 1985; 李长文等, 1997; 张碧星和王克协, 1998; 李维彦等, 1999; 陶果和邹辉, 2000; 陈必孝和张筠, 2002; 王朝辉和王祝文, 2004), 怎样提取这些信息, 对于正确地应用丰富的声波信息了解地下岩石具有重要的现实意义. 阵列

基金项目: “九五”国家重大科学工程“中国大陆科学钻探工程”项目(计高技[1999]1423号).

作者简介: 王祝文(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地球物理测井、核地球物理、大陆科学钻探地球物理测井等方面的解释理论和教学与科研工作. E-mail: wangzhuwen@email.jlu.edu.cn

声波波形是具有时变特性(或称非稳态性质)的典型信号,对于这类信号,不仅需要从总体上了解它的频率成分,而且还需要了解每一时刻信号中所包含的频率成分。

阵列声波测井在井中测得的全波波形中,除了纵波、横波和斯通利波外,还有不同频率成分的伪瑞利波(楚泽涵, 1985)。同时,声波的幅度衰减和频率变化与地下地质条件有密切的关系,速度反映地层的运动学特征,幅度反映地层的动力学特征,而频谱则反映了地层对各种波的吸收滤波特性。目前人们的工作重点仍集中在纵波、横波、斯通利波等组分波的速度、衰减的处理分析上,对频率特征的分析还缺少足够的重视(李长文等, 1997)。通过大量的实际资料,可以发现不同组分波的频率变化以及相对能量的变化都与地层性质密切相关。而对于波列信号的频率和时间的关系,目前研究的很少。

近年发展起来的希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)是一种新的非线性信号处理方法(Huang, 1996; Huang *et al.*, 1998, 1999)。HHT方法将信号作经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD),能有效地将信号的各种频率成分以固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)形式从时间曲线中分离出来。不同的IMF分量是平稳信号或简单的非线性信号,具有简单的非线性特征。其缓变波包特征意味着不同特征尺度波动的波幅随时间变化,因而也具有时间上的局域化特征,而IMF则属于窄带信号,正好满足Hilbert变换的要求。对IMF序列进行Hilbert变换,得到包含时间、频率、振幅的三维离散骨架谱,可提供更加清晰的局部细节时频特征。HHT方法具有较好的客观性、内在性与自适应性,对信号的非线性反映能力较好,适合于对具有非线性和非平稳动态变化的信号的描述与刻划。

本文尝试在阵列声波波形分析与研究中引入HHT时频分析方法。对致密岩石和破碎岩石测量获得的阵列声波波形信号进行多尺度经验模态分解和希尔伯特变换,剖析阵列声波波形在不同IMF尺度上的变化特征,研究阵列声波波形在时频谱上的演化特性。最后讨论HHT方法的适用性及其对非平稳动态变化的阵列声波波形信号的时频刻划能力。

## 1 基于HHT方法的时频分析

HHT方法由Huang变换和Hilbert变换两部分组成(Huang, 1996; Huang *et al.*, 1998, 1999)。

### 1.1 Huang变换

Huang变换,即EMD的本质是通过特征时间尺度获得本征震荡模式,然后由本征震荡模式来分解时间序列资料。根据函数要得到有意义的瞬时频率的约束条件,Huang(1996)、Huang *et al.*(1998, 1999)提出了内蕴模式函数概念和EMD筛选算法。内蕴模式函数必须满足两个条件:其一,信号极值点的数量与过零点的数量必须相等,或最多相差一个;其二,在任一时间点上,信号极大值定义的上包络和极小值定义的下包络的局部均值为零。EMD算法通过不断剔除信号的极大值和极小值连接的上下包络曲线的均值,将原始信号 $X(t)$ 分解成如下形式:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t), \quad (1)$$

式(1)将原始数据分解成 $n$ 个内蕴模式分量函数 $c_j$ 及一个趋势分量 $r_n$ 。从基函数理论的角度来看,EMD对不同信号分解出的基函数 $c_j$ 是不同的,它是依赖于信号本身的,是自适应的。它不同于傅立叶分解的基(一系列恒定幅度与频率的正余弦函数),也不同于小波分解的基函数(是预先给定的)。因此,局域波分解不仅改进了信号分解的效率,而且使这种分解方法可以处理类似阵列声波波形信号时间序列这样的非平稳数据。

### 1.2 Hilbert变换与瞬时频率

对于任意一个时间序列 $X(t)$ ,都能得到它的希尔伯特变换结果 $Y(t)$ ,即:

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t-\tau} d\tau, \quad (2)$$

式(2)中, $P$ 是柯西主分量。通过这个变换, $X(t)$ 和 $Y(t)$ 可以组成一个复数信号 $Z(t)$ ,即:

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = \alpha(t)e^{i\theta(t)}, \quad (3)$$

式(3)中,  $\alpha(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)}$ ,  $\theta(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{Y(t)}{X(t)} \right]$ 。

定义瞬时频率 $\omega(t)$ 为:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}, \quad (4)$$

由(4)式可看出, $\omega(t)$ 是时间 $t$ 的单值函数,即某一时间对应某一频率。为了使瞬时频率具有意义,作

Hilbert 变换的序列必须是单组分的, 即某一时间只有一个频率, 而经验模态分解后的固有模态函数序列恰好满足该要求, 每个 IMF 序列在每一点的频率唯一。

把(2)~(4)式所表示的变换用于每个固有模态函数序列, 可表示为下式:

$$X(t) = \text{real} \sum_{j=1}^n \alpha_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (5)$$

式(5)忽略了式(1)中的残余项  $r_n$ , 因为它不过是单调函数或常数值。由(5)式可看出, 频率  $\omega_j(t)$  和幅值  $\alpha_j(t)$  是时间的变量, 可构成时间、频率、幅值的三维时频谱图  $H(\omega, t)$ 。

## 2 阵列声波测井波形经验模态分解与希尔伯特变换时频分析

### 2.1 实际阵列声波测井波形信号

HHT 法中的 Hilbert 时频谱的时频分辨率与传统的方法有所区别, 其 EMD 方法认为假定信号数据长度为  $T$ , 采样间隔时间为  $\Delta t$ , 那么从数据中获得的最高频率是  $1/(n \times \Delta t)$ , 其中  $n$  是用  $\Delta t$  来精确定义数据最高频率所需的最小数目 ( $n \geq 2$ )。由于 EMD 方法是对信号不断提取高频分量的过程, 每个 IMF 的频率分辨率是不一样的, 频率高的 IMF 频率分辨率低, 频率低的 IMF 的频率分辨率高, 其频率具有多样性, 它是根据信号内在的特性进行自适应调节的。

图 1 最上面的波列是阵列声波测井记录的一个原始波形记录, 该记录的长度为 4.32 ms, 笔者以此为例, 检验 HHT 方法处理波形资料的有效性和刻画动态非线性的能力。

### 2.2 测井波形信号的经验模态分解

图 1 中曲线是信号的经验模态分解图, 按频率由高到低排列, 分别给出了各频段 IMF 序列(IMF1~IMF6)变化曲线。每一个 IMF 分量都有不同的振幅和频率(时间特征尺度), 分解顺序是按频率从高至低进行的。通过 EMD 获得的 IMF 分量大都具有物理意义, IMF1 为信号的高频, IMF2、IMF3 分别为信号的优势频率子频带, IMF4~IMF6 为低频分量, Res 为信号本身微弱的趋势或仪器的漂零。从图 1 中的超低频部分还可以看到线性趋势、非线性趋势变化, 它在一定程度上可替代波形分析中的多种基线校正方法, 如去均值、线性和非线性拟合及滤波

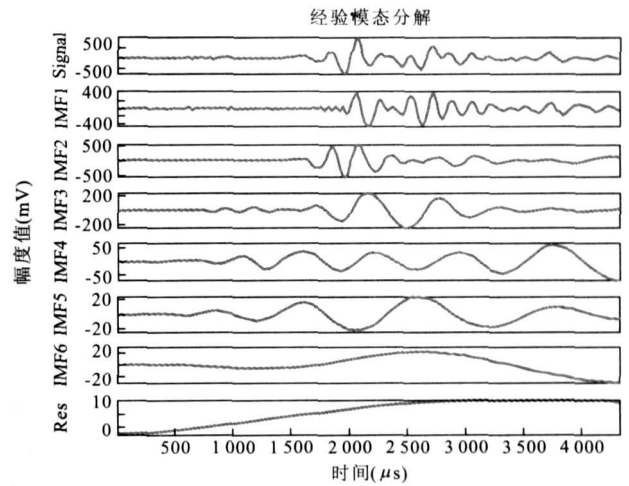


图 1 致密岩阵列声波测井原始波列信号及其经验模态分解  
Fig. 1 Array acoustic logging signal and the EMD of tight rock

等, 具有消除波形背景趋势干扰的能力, 可通过选择一定的 IMF 序列进行 Hilbert 变换, 获得特定的时频谱估计结果。EMD 分解实际上反映了该方法的自适应滤波能力, 获得的 IMF 时序曲线大体上为单一谐波, 是 Hilbert 变换进行时频估计的基础。

### 2.3 波形信号希尔伯特变换—时频分析

图 2 是图 1 中的 IMF1~IMF6 经过 Hilbert 变换得到的时频谱值图。为了能清楚地看到阵列声波随时频演化的过程, 这里采用了二维平面等值线图表示能量变换特征的时频演化过程。

图 2 中横坐标为时间, 纵坐标为频率, 各点表示

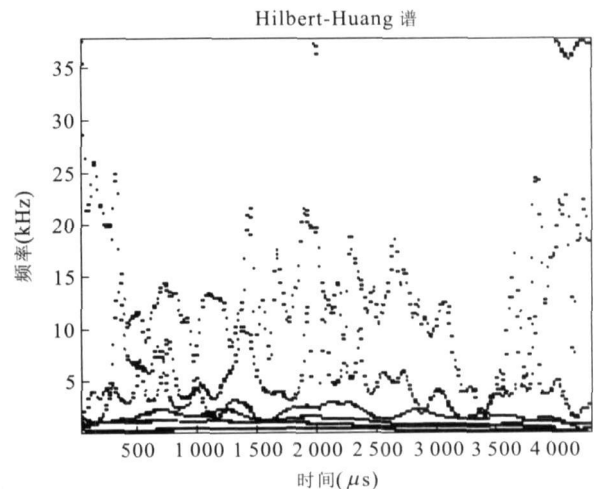


图 2 致密岩阵列声波测井原始波列信号的时间—频率—能量分布

Fig. 2 The time-frequency-energy distribution of the array acoustic logging signal of tight rock

能量.从图 2 中可以看出,EMD 无需选择基函数,可按频率从高至低顺序进行分解,分解所得的每一个 IMF 分量都有不同的振幅和频率(时间特征尺度),并且所获得的 IMF 分量大都具有物理意义. Hilbert 能量谱清晰而详细地显示了能量随时频的具体分布;瞬时能量谱更直观地表明了高频能量主要集中在 100~2 000  $\mu\text{s}$  区间内;在整个采样时间内,声波的能量主要集中在 10 kHz 以内的范围.

以上是致密岩石阵列声波测井原始波列信号的经验模态分解图以及时间—频率—能量分布图.下面来看看破碎岩石阵列声波测井原始波列信号的经验模态分解图以及时间—频率—能量分布图.图 3 为其经验模态分解图,而图 4 则为其时间—频率—能量分布图.

对比图 3 和图 1,可以看出,其高频分量 IMF1 的变化明显与图 1 所示的 IMF1 不同,其频率增加了,幅度也比图 1 所示的 IMF1 增大了,并且出现的时间提前了;这表明,当岩石发生破碎时,能量主要分布在高频段.再结合由图 3 进行 HHT 变换得到的时间—频率—能量分布图(图 4),可以明显地看出,其高频成分主要出现在 1 500  $\mu\text{s}$  以后,并一直延续到记录时间的最后.与图 2 所显示的能量分布相比,可以看出两者的明显差别.

从上述阵列声波测井原始波列的时频谱演化特征可以看出,岩石构造的阵列声波测井波形信号的非线性动态变化特征可被 HHT 方法较好地刻划出来,时间—频率—能量分布图可以揭示出以下信息:

(1) 声波换能器记录的声波传播波动过程是非线性

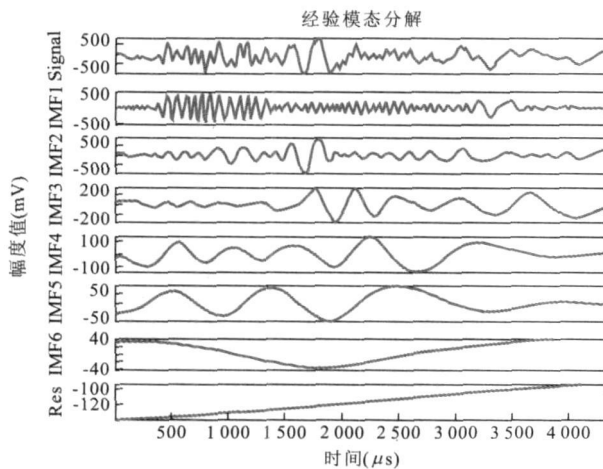


图 3 破碎岩石阵列声波测井原始波列信号及其经验模态分解  
Fig. 3 Array acoustic logging signal and the EMD of fractured rock

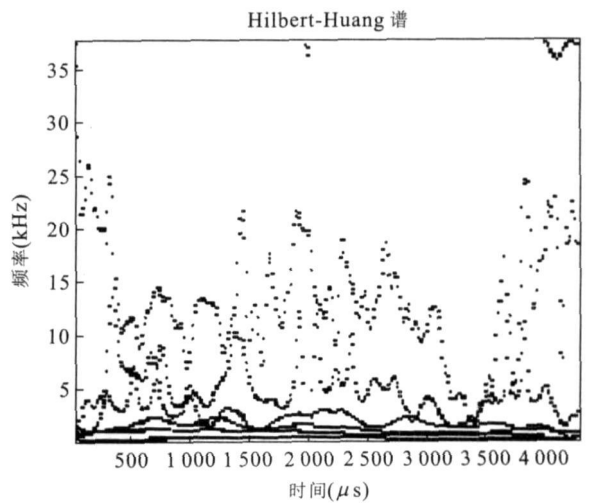


图 4 破碎岩石阵列声波测井原始波列信号的时间—频率—能量分布

Fig. 4 The time-frequency-energy distribution of the array acoustic logging signal of fractured rock

的、动态的;(2) HHT 方法对不同岩石构造的声波波形的动态变化过程刻划得比较清楚,反映了不同岩石结构、构造的不同频率特性、能量差异,其他方法难以揭示出这些细微性变化.这种变换特征为声波测井对储集层介质的研究提供了一种新的思路与方法;(3) 致密岩石的时频能量谱图上的能量主要集中在 100~2 000  $\mu\text{s}$  阶段,而破碎岩石的高频成分主要出现在 1 500  $\mu\text{s}$  以后,并一直延续到记录时间的最后;(4) 对突变点的检测能力较高,验证了 HHT 方法具有完全局部时频特性.上述分析显然是初步的,随着对大量的实际阵列声波测井波形记录利用 HHT 方法进行深入的分析和研究,相信会得到更进一步的认识.

### 3 初步认识及问题讨论

(1) HHT 是一种全新的分析阵列声波测井信号的时频方法.EMD 依据信号本身的固有特性进行分解,保证了阵列声波测井信号分解后的非平稳特性,具有自适应性强和高效的优点; Hilbert 能量谱能清晰地表明阵列声波测井信号能量随时频的具体分布,大部分能量都集中在有限的能量谱线上. HHT 能更好地揭示井中声波的传播规律,有利于储集层结构的响应特征预测,便于更好地研究储集层岩石物理性质.

(2) 经 EMD 分解变换得到的 IMF 序列是直接

从原始时序数据中分离出来的,事先无需确定分解阶次,不受人为因素影响,不存在机械分解.因此 IMF 序列能更好反映原始数据固有的物理特性,其分解是客观的、内在的和自适应的.每阶 IMF 序列都代表了某种特定意义的频带信息,给阵列声波测井的实际应用与解释工作带来了方便,是取得高精度时频估计的前提和基础.

(3)原始信号经过 EMD 分解获得的 IMF 序列具有稳态性,不但可用 Hilbert 变换计算三维时频谱值,而且也可用于多尺度建模、谱分析等工作,这是其他方法所不具备的优势.

(4)实际工作中,可根据需要选择不同阶次的 IMF 序列(不一定相邻)进行 Hilbert 变换时频估计,具有很大的灵活性.

(5)将 HHT 方法用于对非平稳动态变化的阵列声波测井信号的分析,能够敏感捕捉到阵列声波测井波形信号随时间和频率动态变化的不同阶段的主要特征,其图像清晰;能够反应能量突变点信息,其时频局部定位能力较强.HHT 时频谱的大部分能量主要集中在一定的时间和频率范围内,而不是整个时频空间,这可能真实地反映了非线性序列的本质特征.

通过理论分析及阵列声波测井波形信号的 EMD 分解和 Hilbert 变换,可看到 HHT 方法的高精度分解优势与非线性动态数据时频刻划能力.但要真正有效地在阵列声波测井波形处理中用好 HHT 方法,还应该注意以下 4 点(Huang, 1996; Huang *et al.*, 1998, 1999):

(1)HHT 方法算得的结果是离散骨架谱.在 EMD 分解基础上,进行 Hilbert 变换得到的时频能量谱是离散谱,它与其他方法算得的时频谱不一样(Cohn, 1994; 张贤达和保铮, 1998),由此会引起频谱值的解释方式可能有所不同.更好地、合理地解释 HHT 时频谱值,需要进一步深入研究与分析.

(2)波动现象.HHT 方法多次用到三次样条函数,这可能会引起过冲或欠冲现象(Huang, 1996; Huang *et al.*, 1998, 1999).

(3)端点效应.端点效应的解决程度直接影响 HHT 方法的应用效果,解决得好,时频分析效果就好,否则结果可能不理想甚至是完全错误的(Huang, 1996; Huang *et al.*, 1998, 1999).

(4)EMD 是一种自适应强和分解高效的方法, Hilbert 谱具有更好的局部化能力,描述了非平稳信

号的时频分布.HHT 能定量地表明信号的能量分布,且主要集中在有限的时频谱线上.

## 4 结论

HHT 方法克服了其他一些方法的缺陷,完全取消了窗函数的作用,其结果不受核函数影响与时频测不准原理限制,具有完全的局部时频特性,可准确描述阵列声波测井信号的时变特征.HHT 方法可在纵波、横波等速度检测、信号分频、频散计算、多孔介质性质类型识别等方面具有潜在的应用价值.当然,HHT 方法还在不断地发展,本文将 HHT 方法应用到阵列声波测井信号构造信息的提取,也仅仅是一个尝试.阵列声波测井信号中所蕴涵的大量信息远没有被开发,本文的研究仅仅是个开端,随着研究的深入,HHT 方法在研究岩石中波的传播、衰减规律、结构动态响应特征和储集层特征等方面,将有着广阔的应用前景.

## References

- Chen, B. X., Zhang, Y., 2002. Full wave sonic logging data processing technique and its applications. *Well Logging Technology*, 26(5): 369—372 (in Chinese with English abstract).
- Chu, Z. H., 1985. Principle of sonic logging. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Cohn, L., 1994. Time-frequency analysis: Theory and applications. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Huang, N. E., 1996. Computer implicated empirical mode decomposition method, apparatus, and article of manufacture. U. S. Patent Pending.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., 1999. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31: 417—457.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., et al., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. (Ser. A)*, (454): 903—995.
- Li, C. W., Yu, C. H., Wang, W. X., 1997. Full wavetrain processing of array acoustic logging data and its applications. *Well Logging Technology*, 21(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y., Li, Y. S., Wang, Z. H., et al, 1999. Evaluating the reservoir anisotropy by utilizing DSI log data. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 21(4): 36—38 (in

Chinese) .

Tao, G. , Zou, H. , 2000. A study on methods for processing and interpretation of modern array sonic logging data. *Petroleum Exploration and Development*, 27( 2): 76—78 (in Chinese with English abstract).

Wang, Z. H. , Wang, Z. W. , 2004. The development and present situation of acoustic logging. In: Zhang, Z. J. , Liu, Z. K. , Han, L. G. et al. , eds. , The new development of seismological research. Petroleum Industry Press, Beijing, 364—368 (in Chinese).

Zhang, B. X. , Wang, K. X. , 1998. Status quo and development of the acoustic multipole logging in anisotropic formation. *Progress in Geophysics*, 13( 2): 1—14 (in Chinese with English abstract) .

Zhang, X. D. , Bao, Z. , 1998. Analysis and process of non-stationary signal. Defense Industry Press, Beijing (in Chinese) .

附中文参考文献

陈必孝, 张筠, 2002. 声波全波列测井资料分析处理技术及应用. *测井技术*, 26( 5): 369—372.

楚泽涵, 1985. 声波测井原理. 北京: 石油工业出版社.

李长文, 余春昊, 王文先, 1997. 阵列声波测井资料的分波处理及应用. *测井技术*, 21( 1): 1—8.

李维彦, 李永胜, 汪中浩, 等, 1999. 利用偶极横波成像测井资料评价地层的各向异性. *江汉石油学院学报*, 21( 4): 36—38.

陶果, 邹辉, 2000. 现代阵列声波测井数据处理和解释方法研究. *石油勘探与开发*, 27( 2): 76—80.

王朝辉, 王祝文, 2004. 声波测井的发展及现状. 见: 张中杰, 刘振亮, 韩立国, 等主编, 地震学研究新进展. 北京: 石油工业出版社, 364—368.

张碧星, 王克协, 1998. 各向异性介质地层中多极源声波测井的现状与发展. *地球物理学进展*, 13( 2): 1—14.

张贤达, 保铮, 1998. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社.

\*\*\*\*\*

(上接 370 页)

Zhang, C. S. , Liu, Z. B. , Shi, D. , et al. , 2000. Formed proceeding and evolution disciplinarian of fan delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18( 4): 521—526 (in Chinese with English abstract) .

Zhang, C. S. , Liu, Z. B. , Shi, D. , et al, 2003. Experimental study of sandy-fan-delta sedimentary process. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 25( 2): 1—3 (in Chinese with English abstract) .

Zhao, J. Q. , Ji, Y. L. , Xia, B. , et al. , 2004. High-resolution sequence research in fan-delta sedimentary system. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22( 2): 302—309 (in Chinese with English abstract) .

研究. *石油学报*, 21( 6): 107—110.

贾爱林, 穆龙新, 陈亮, 等, 2000b. 扇三角洲储层露头精细研究方法. *石油学报*, 21( 4): 105—108.

刘招君, 2003. 湖泊水下扇沉积特征及影响因素——以伊通盆地莫里青断陷双阳组为例. *沉积学报*, 21( 1): 148—154.

陆永潮, 任建业, 李思田, 等, 1999. 伊通地堑的沉积充填序列及其对转换—伸展过程的响应. *石油实验地质*, 21( 3): 232—236.

孙连浦, 刘招君, 毛天基, 等, 2005. 伊通盆地莫里青断陷双阳组湖泊水下扇沉积特征. *世界地质*, 24( 2): 137—143.

王世虎, 焦养泉, 吴立群, 等, 2007. 鄂尔多斯盆地西北部延长组中下部古物源与沉积体空间配置. *地球科学——中国地质大学学报*, 32( 2): 201—208.

张春生, 刘忠保, 施冬, 等, 2000. 扇三角洲形成过程及演变规律. *沉积学报*, 18( 4): 521—526.

张春生, 刘忠保, 施冬, 等, 2003. 砂质扇三角洲沉积过程实验研究. *江汉石油学院学报*, 25( 2): 1—3.

赵俊青, 纪友亮, 夏斌, 等, 2004. 扇三角洲沉积体系高精度层序地层学研究. *沉积学报*, 22( 2): 302—309.

附中文参考文献

陈程, 孙义梅, 贾爱林, 2006. 扇三角洲前缘地质知识库的建立及应用. *石油学报*, 27( 2): 53—57.

段云卿, 王彦春, 覃天, 等, 2007. 储层地震反演在辽河油田大民屯凹陷的应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 32( 4): 554—558.

贾爱林, 陈亮, 穆龙新, 等, 2000a. 扇三角洲露头区沉积模拟