

文章编号:0253-9985(2010)04-0436-06

小波分析划分层序单元的地质学理论 基础、方法与应用

赵伟^{1,2},姜在兴²,邱隆伟³,陈妍⁴

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083; 2. 中国地质大学
能源学院,北京 100083; 3. 中国石油大学 地球资源与信息学院,山东 东营 257061;
4. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 物探研究院,山东 东营 257022)

摘要:从地质学角度对小波分析的理论基础进行了分析,认为测井曲线是地层中某种特征所反映出的不同周期沉积旋回的相互叠加,而小波分析能够将叠加在测井曲线中的不同频率的旋回识别出来。由此可以看出,对测井曲线的小波分析能够识别出其中所包含的不同周期的沉积旋回,据此可以进行层序地层单元的划分。在进行划分的过程中,小波的选取十分关键,不同的小波类型会对划分的结果产生比较明显的影响。通过对渤海湾盆地东营凹陷两口不同类型的井段进行具体的分析可以发现,该方法不仅能够划分常规的砂、泥岩互层的地层层序,同时也能够通过识别出常规方法不易识别出的一些微小特征变化、并结合 Fischer 图解来划分出大段单一岩性地层中的层序单元界面。

关键词:测井曲线旋回;沉积旋回;层序地层;地质学基础;小波分析;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Geological concept, method and application of sequence unit identification through wavelet analysis

Zhao Wei^{1,2}, Jiang Zaixing¹, Qiu Longwei² and Chen Yan³

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 10083, China;
3. College of Earth Resources and Information, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong 257061, China;
4. Institute of Geophysical Exploration, SINOPEC Shengli Oilfield Company Ltd., Dongying, Shandong 257022, China)

Abstract: Wavelet analysis as a mathematic method can be used to solve some problems in sequence stratigraphy research. This paper analyzed the concept of this method from a geological standpoint and come to a conclusion that the logs are reflections of certain characteristics of strata that reveal the superposition of the sedimentary cycles in different periods, while these sedimentary cycles can be identified through wavelet analysis and used for division of sequence stratigraphic units. In practice, we realize that choosing the right wavelets are essential to the division of sequence units. We applied the technique to the analysis of different intervals of two wells in Dongying Sag of Bohai Bay and found out that the method is not only useful in division of conventional interbedded sandstone and shale stratum, but also capable of identifying subtle changes that tend to be ignored with conventional methods. Combined with Fischer Diagram, we can use the techniques to identify the sequence units in a large interval with mono lithology.

Keywords: cycle on logs, sedimentary cycle, sequence stratigraphy, geological principle, wavelet analysis, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期:2009-09-24;修订日期:2010-06-23。

第一作者简介:赵伟(1982—),男,博士研究生,层序地层学和沉积学。

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX05009-002)。

1 问题的提出

层序地层学诞生至今,经过了不断的发展和完善,已经成为一门独立的学科,并在实际的油气勘探中得到了广泛的应用,取得了巨大的成就^[1~4]。但在研究中也存在一些不可避免的问题,影响了层序地层学的进一步发展,并对实际的结果产生不利的影响。

1) 层序单元划分的精度

随着勘探技术水平的提高和人们认识的不断深入,层序地层学的划分精度也不断提高,但随之而来的一些新的问题开始出现。由于高精度条件下缺少类似于地震数据这样的等时约束客观资料,因此划分时的人为因素就往往比较大地影响到了划分的结果。

2) 体系域的划分

体系域概念的提出对于人们理解层序地层学的理论及层序地层学的推广有很大的帮助。目前关于体系域划分也有一分、二分、三分和四分等几种不同的方案^[5],而且体系域的发育往往不完整,在盆地的不同位置也有不同,这就使得体系域的划分很难形成一个客观、统一的标准。

3) 大段单一岩性的层序地层划分

由于传统的划分方法更多地是依赖地震、测井及岩性上的相关标志,而地震、测井资料上的界面标志归根结底又都是与岩性有关,因此对于大段单一岩性的层序地层划分传统的方法会受到很大的限制。

如何解决上述问题已经成为目前该领域研究的一个重要课题,广大研究人员也对此进行了很多有利的尝试,并取得了很多有益的成果^[6~10]。利用小波分析划分层序地层便是其中的一种。目前,该方法在层序地层学的研究中取得了一定的效果^[11~16],但还没有真正从地质学的角度对该方法的理论基础进行分析,不同学者操作的具体方法也不完全相同。本文试图从小波分析划分层序地层的理论基础、划分方法及实际应用等方面探讨该方法的可行性及存在的问题,希望能为该方法的深入研究和广泛应用提供一些帮助。

2 小波分析划分沉积旋回的地质学理论基础

在我们通常研究的沉积岩地层中,沉积物的

特征可以反映沉积时水体的特征。随着沉积水深的变化,沉积物中多种特征都会相应地发生变化,如放射性物质含量、有机质含量或微量元素含量等,这种变化就会在相应的测井曲线上反映出来。而沉积水深变化受到了多种因素的影响,有长期和短期的旋回,是多个不同周期旋回的叠加。因此,测井曲线应该是沉积地层中某种随水深变化的特征的多种频率变化的响应的叠加。也就是说,测井曲线中包含着沉积水深不同周期变化的信息,是多个沉积水深变化周期相互叠加的响应。

小波分析被誉为“数学显微镜”,它的主要功能和特长是:①它具有多分辨分析或多尺度分析功能,可以把信号分解成各种不同频道和频率成分,或者把信号分解成各种不同的尺度成分;②它具有很强的局部分析功能,同时具有时间(或空间)域和频率域的局部分析性质,可以自动地通过伸缩、平移聚焦到信号的任一细节对其加以分析^[17]。也就是说,小波分析能够将信号分解为不同频率、不同周期的旋回。从这里不难看出,小波分析的特长恰好可以和测井曲线的特点相对应。利用小波分析的方法可以比较准确地将测井曲线中相互叠加的反映水深变化的不同周期的信息分别识别出来,识别出的这些信息就可以用来进行沉积旋回的划分。

简单地说,用对测井曲线的小波分析划分沉积旋回的理论基础就是小波分析能够识别出测井曲线中不同频率的曲线旋回。其中,高频的曲线旋回对应高频的即短期的沉积旋回,低频的曲线旋回对应低频的即长期的沉积旋回。因此,可以用不同频率的测井曲线旋回划分不同周期的沉积旋回,对应不同级别的层序单元(图1)。

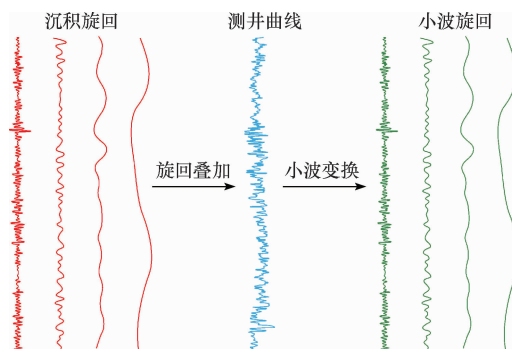


图1 小波分析识别沉积旋回理论示意图

Fig. 1 Sketch map showing the concept of sedimentary cycle identification through wavelet analysis

3 小波的选取及划分方法

3.1 小波的选取

随着小波理论的完善和发展,小波也出现了多种类型以满足不同行业的需要。总体来看,比较著名的小波有 Daubechies 小波、Coiflets 小波、Symlets 小波、Morlet 小波、Mexican Hat 小波、Meyer 小波等^[17]。每一种小波具有不同的函数和形态,所有满足小波条件的函数都可以作为小波函数。

不同的小波可能会得到不同的结果,因此首先应该选择适合层序划分的小波类型。实际选取小波的原则主要有以下3种^[18]:

1) 自相似性原则

对二进小波变换,如果选择的小波对信号有一定相似性,则变换后的能量就比较集中,可以有效减少计算量。

2) 判别函数

针对某类问题,找出一些关键性的技术指标,得到一个判别函数,将各种小波函数代入其中,得到一个最优原则。

3) 支集长度

大部分应用选在支集长度在5~9之间的小波。因为支集太长会产生边界问题,支集太短不利于信号能量的集中。

笔者通过对小波形态与测井曲线形态的对比,以及对不同小波进行变换的结果分析,认为 db5 小波在划分沉积旋回时具有较好的适用性。从形态上看,该小波相对其他几种类型对称性比较差、变化特征明显,这也恰恰符合了测井曲线的特点,因而与测井曲线具有较好的相似性,符合小波函数选取的原则。通过采用 db5 小波对测井曲线进行变换后发现,db5 小波的能量集中较好,边界问题也不明显,划分的结果较为理想。

Daubechies 函数是由世界著名的小波分析学者 Ingrid Daubechies 构造的小波函数。她发明的紧支集正交小波是小波领域的里程碑,使得小波的研究由理论转到可行^[9]。这一系列的小波简写成 db N ,其中 N 表示阶数。除了 db1 (即 haar 小波) 外,其他小波没有明确的表达式,但转换函数 A 的平方模是很明确的。小波函数的有效支撑长度为 $2N-1$,消失矩为 N 。

3.2 小波分析划分沉积旋回的操作方法

MATLAB 软件的小波分析工具箱是一种比较常用的工具。MATLAB 是 Math Works 公司于 1982 年推出的一套高性能的数值计算和可视化软件,其中的小波分析工具箱可以满足对测井曲线进行小波变换的需要,也可以根据其基本原理编制相关的程序来实现。

在对测井曲线进行小波变换时,首先需要对所研究层段的顶、底界面进行准确的标定,然后将需要变换的该深度段的测井曲线数值建立单独的文本文件作为原始文件。将原始文件导入后保存成 .m 格式的信号文件。选择 MATLAB 软件的 wavelet (小波分析) 工具箱进行一维小波变换,小波类型选择 db,阶数为 5,最大级数定为 12。将上述参数选好后进行分析,即可得到一组 12 条不同级次的 db5 小波变换曲线。这些不同级次的小波变换曲线经过与实际地质认识的分析和对比,可以与不同周期的沉积旋回相对应。一般一个完整的曲线旋回对应一个完整的沉积旋回,但在以不整合面为边界的层序界面附近,可能会出现不完整的沉积旋回。

4 应用实例

为了分析实际的应用效果,本文选择了渤海湾盆地东营凹陷沙河街组两口探井代表两种不同类型的地层分别进行了相关研究。

4.1 在砂、泥岩互层为主的地层中的应用

牛 8 井位于牛庄洼陷西部,构造位置相对稳定,岩性以砂、泥岩互层为主。该井沙(河街组)三(段)上(亚段)—沙二段地层,没有明显的沉积间断。通过对不同曲线变换结果的对比可以看出,对 GR 测井曲线进行变换后得到的旋回特征比较明显。通过与相关地质认识的对比,发现经过小波变换以后的 d11、d9 和 d7 曲线分别对应层序、准层序组、准层序级别的层序单元。因此,可以使用这 3 条曲线进行层序单元的划分和对比(图 2)。据此将牛 8 井沙三上一沙二段地层划分为两个层序,自下向上分别为层序 1 和层序 2。其中,层序 1 包含 3 个准层序组、9 个准层序,而层序 2 包含 4 个准层序组、12 个准层序(图 2)。相关界面与岩性、测井上

的响应具有较好的一致性,在平面对比中也可以得到比较好的结果,限于篇幅将在另文中详述。

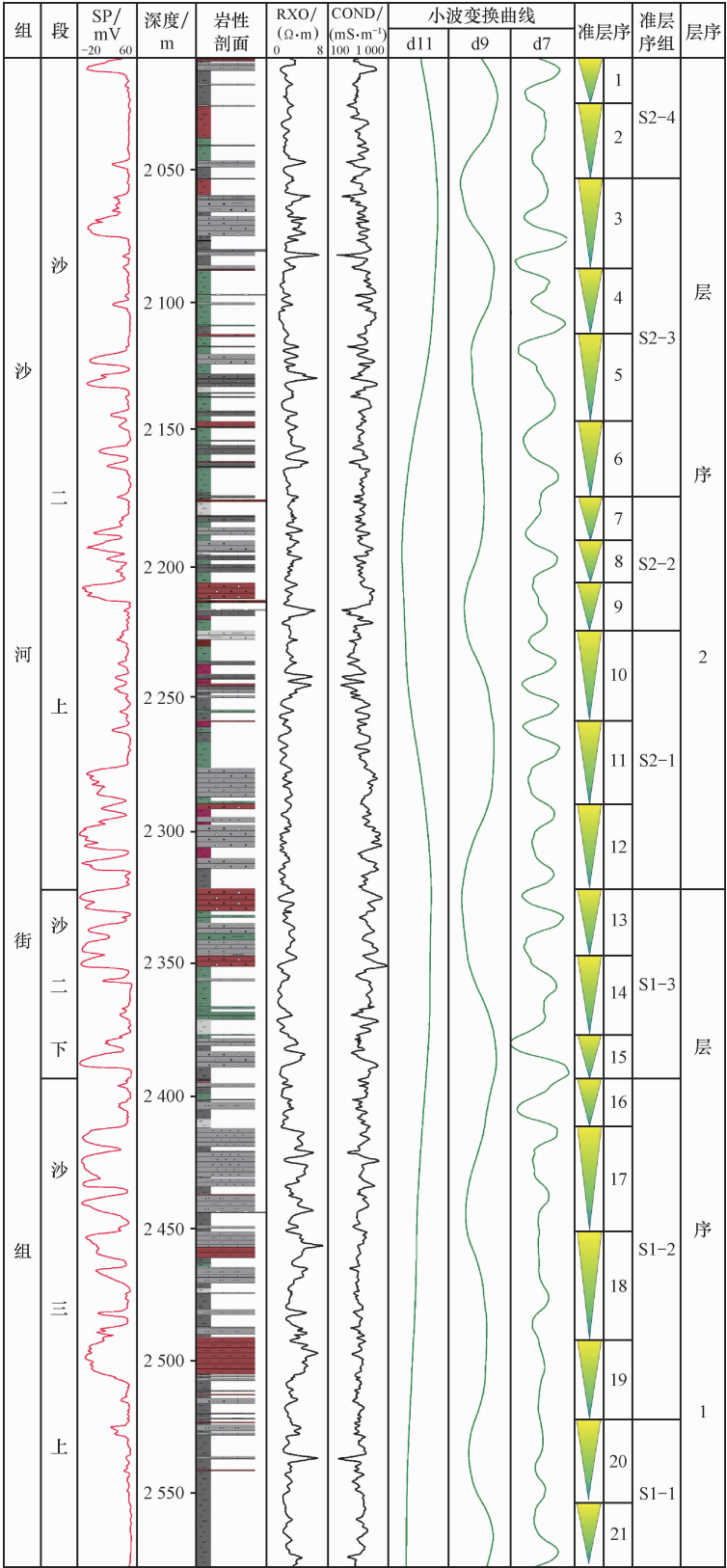


图 2 利用 db5 小波变换结果划分层序单元(牛 8 井)

Fig. 2 Division of sequence units by using the results of db5 wavelet analysis(Well Niu-8)

4.2 在大段单一岩性地层中的应用

丰深3井位于民丰洼陷的中心,沙三下—沙四上亚段属于深湖—半深湖环境,岩性以深灰色—灰黑色泥岩为主,夹有极少量薄层的砂岩。在传

统的层序地层划分方法中,对于类似岩性的地层很难进行层序界面的识别。但笔者通过对其测井曲线进行小波变换及作出 Fischer 图解以后,发现仍然有相应旋回的出现,并可据此进行层序单元的划分,进而识别出其中所包含的体系域(图3)。

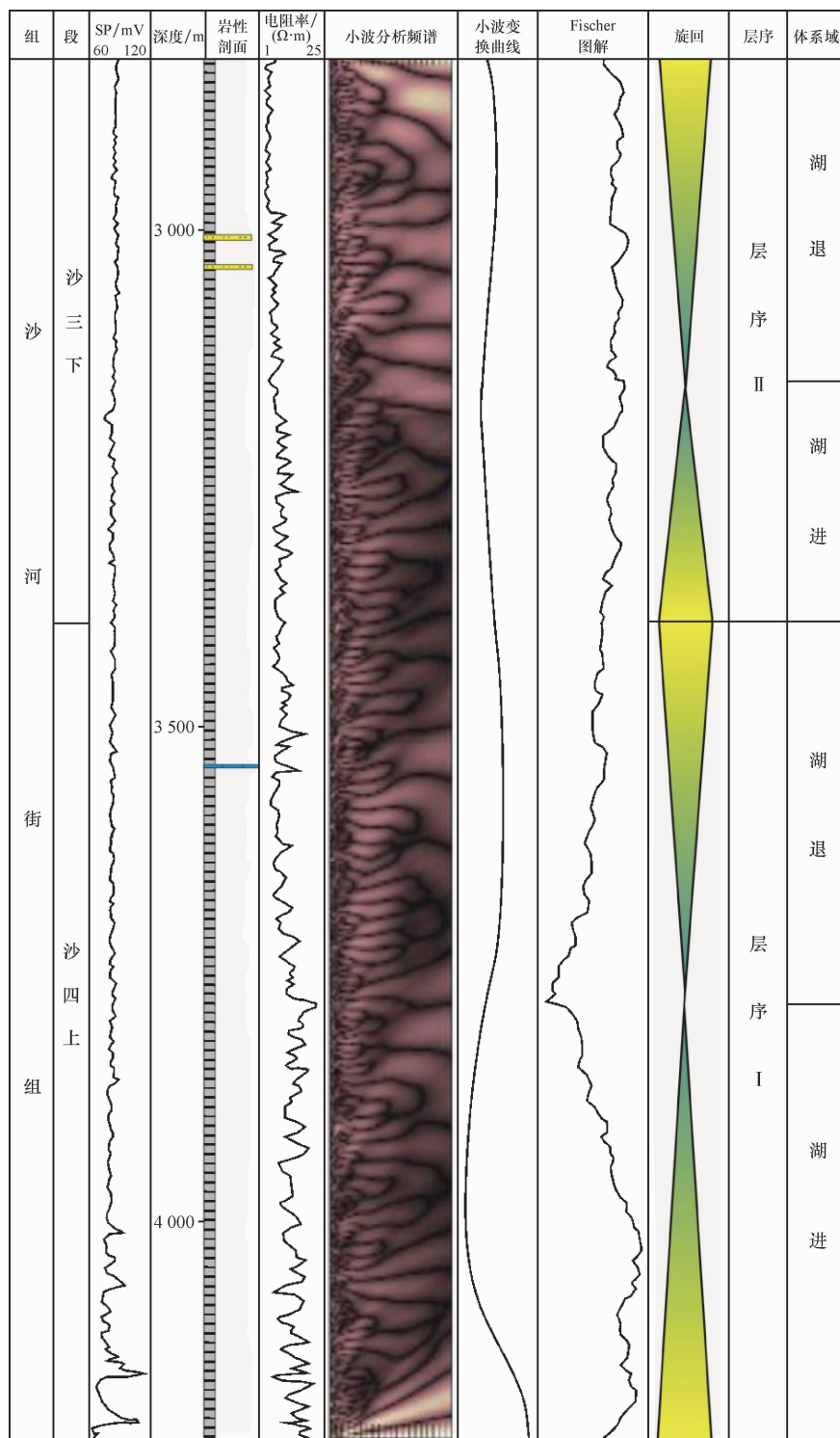


图3 小波分析在单一岩性地层划分中的应用(丰深3井)

Fig. 3 Application of wavelet analysis in the sequence unit division of large intervals with mono lithology (Well Fengshen-3)

Fischer 图解是 Fischer 在研究奥地利三叠纪潮坪相灰岩剖面时为解释该剖面中 Lofer 旋回的厚度变化规律提出的一种研究方法。他将传统的一维岩石柱状图重绘在以时间为横轴的二维图解上,将每个旋回的底部向右移到经过线性沉降校正的起点上,以此来反映可容空间的变化。在用 Fischer 图解进行体系域划分时,要求地层剖面的描述必须以“旋回”为基本单位。对于砂、泥岩互层为主的地层,一般认为一个砂、泥岩性的变化可以作为一个沉积旋回。但对于一套较厚的单一岩性地层,这种方法显然不能使用。因此,借助小波分析划分出与岩性旋回对等的沉积旋回、在此基础上完成 Fischer 图解是一种新的有效的方法。

在沉积过程中深水区同样会有水深的变化,这种变化虽然不足以使得岩性发生明显的变化,但同样会造成沉积物中有机质含量、某些微量元素含量等方面的不同。这种差别是微小的,常规方法不易识别;但是这些变化仍然会被记录在地层中,并在测井曲线上反映出来。因此,通过对测井曲线的小波分析变换,把这些细微的特征进行分频放大,仍然可以得到比较明显的旋回特征,从而进行层序地层单元的有效划分。这就解决了在传统方法研究中所无法解决的一个难题。

5 研究意义及需要注意的问题

利用小波分析进行层序地层学研究是小波分析理论在地质领域应用的一个有益尝试,虽然并不能替代常规的研究方法,但可以作为对层序地层学研究方法的一种有利补充。这种方法有利于减少层序划分过程中由于个人的认识不同造成的划分结果的差异,使得层序地层单元的划分更加客观,还可以用来解决一些传统方法不易解决的问题。

在实际的操作中,首先需要注意的是边界即地层顶底界限的确定。因为小波分析目前只适用于边界确定之后的地层内部沉积旋回的划分,但不能检验边界的正确性;而边界的正确与否反而会影响到内部沉积旋回的正确划分。因此,边界的确定是影响划分结果的非常重要的影响因素,需要在地震、测井、录井及岩心等资料综合分析的基础上选定一个尽量准确的边界。对于无法确定边界的情况下,可以适当扩大研究的目的层段,尽量通过小波分析识别相应级别的边界位置。

其次,在测井曲线的选择上应尽量选择在整个研究层段内曲线变化比较平稳、没有明显高幅或低幅值出现的曲线,且所选择的曲线的测量精度应该相对比较高,这样才能使得划分结果更加准确,减少异常值造成的影响。

参 考 文 献

- 1 姜在兴. 层序地层学原理及应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1996. 1~10
- 2 纪友亮,张世奇. 层序地层学原理及层序成因机制模式[M]. 北京:地质出版社,1998. 1~6
- 3 蔡希源,李思田. 陆相盆地高精度层序地层学——隐蔽油气藏勘探基础、方法与实践[M]. 北京:地质出版社,2003. 3~30
- 4 陈欢庆,朱筱敏,董艳蕾,等. 深水断陷盆地层序地层分析与岩性-地层油气藏预测——以中国南海 C 盆地深水区古近系 T 组为例[J]. 石油与天然气地质,2009,30(5):626~634
- 5 操应长. 断陷湖盆层序地层学[M]. 北京:地质出版社,2005. 48~59
- 6 邓宏文,吴海波,王宁,等. 河流相层序地层划分方法——以松辽盆地下白垩统扶余油层为例[J]. 石油与天然气地质,2007, 28(5):621~627
- 7 王林,姜在兴,冯磊,等. 深水湖盆层序地层单元识别方法——以 Muglad 盆地 Fula 坳陷为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2007,26(6):24~27
- 8 孙钰,钟建华,姜在兴,等. 松辽盆地南部坳陷期层序地层研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(5):1~7
- 9 顾家裕,郭彬程,张兴阳. 中国陆相盆地层序地层格架及模式[J]. 石油勘探与开发,2005,32(5):11~15
- 10 贾承造,赵文智,邹才能,等. 岩性地层油气藏勘探研究的两项核心技术[J]. 石油勘探与开发,2004,31(3):3~9
- 11 史清江,王延江,孙正义,等. 小波变换和沃尔什变换在测井曲线分层中的联合应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006,30(2):138~142
- 12 柳建新,韩世礼,马捷. 小波分析在地震资料去噪中的应用[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):541~545
- 13 朱剑兵,纪友亮,赵培坤,等. 小波变换在层序地层单元自动划分中的应用[J]. 石油勘探与开发,2005,32(1):84~86
- 14 吴小羊,刘天佑,唐建明,等. 改进的 Morlet 小波频谱分析及在川西坳陷中的应用[J]. 石油天然气学报,2008,30(2):242~245
- 15 Chakraborty A, Okaya D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods[J]. Geophysics, 1995,60(6): 1 906~1 916
- 16 王起琮. 旋回层序地层的控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2009,30(5):648~656
- 17 Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. Philadelphia, USA: SIAM, 1992
- 18 董长虹. Matlab 小波分析工具箱与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004. 20

(编辑 李 军)