

S变换在测井曲线识别沉积旋回中的应用

王富美, 余为维*, 李 颜, 杨 清, 吴飞飞, 袁宣果

攀枝花学院土木与建筑工程学院, 四川 攀枝花

收稿日期: 2025年11月21日; 录用日期: 2025年12月16日; 发布日期: 2025年12月29日

摘 要

测井曲线数据在地质研究中存在广泛应用, 其包含有丰富的地质信息, 是研究层序地层中沉积旋回的主要资料。S变换时频分析技术具有独特的优势, 其既吸收了短时傅里叶变换和小波变换的优点, 又避免了二者的不足。本文主要基于测井曲线资料, 采用S变换的时频分析技术来揭示层序的沉积旋回特征, 以便有效地对沉积旋回进行合理划分。根据模型及实际资料的分析表明通过该方法研究沉积旋回是较为有效可行的。

关键词

测井曲线, 沉积旋回, S变换, 时频分析

Application of S-Transform in Identifying Sedimentary Cycles with the Well Log

Fumei Wang, Weiwei Yu*, Yan Li, Qing Yang, Feifei Wu, Xuanguo Yuan

School of Civil and Architectural Engineering, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan

Received: November 21, 2025; accepted: December 16, 2025; published: December 29, 2025

Abstract

Well log is widely used in geological research, containing abundant geological information and serving as the primary material for studying sedimentary cycles in sequence stratigraphy. The S-transform time-frequency analysis technique possesses unique advantages, combining advantages of the Short Time Fourier transform and wavelet transform while avoiding their weaknesses. Based on the well log, this paper uses the S-transform time-frequency analysis technique to reveal the characteristics of sedimentary cycles, facilitating effective and reasonable division of sedimentary cycles. According to the analysis of the models and real data, it is effective and feasible for studying

*通讯作者。

文章引用: 王富美, 余为维, 李颜, 杨清, 吴飞飞, 袁宣果. S变换在测井曲线识别沉积旋回中的应用[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(4): 801-808. DOI: 10.12677/jogt.2025.474089

sedimentary cycles by this method.

Keywords

Well Log, Sedimentary Cycles, S-Transform, Time-Frequency Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

层序地层学是根据露头、钻井、测井和地震资料,结合有关沉积环境和岩性古地理解释,对地层层序格架进行地质综合解释的地层学分支[1]。近年来层序地层学得到了广泛的传播与发展,为地层层序的划分、沉积旋回体的识别提供了可行性较强的方法[2]-[4]。测井资料是地下地质情况的反映,包含了地层岩性、沉积旋回变化等丰富的地质信息[5]。从主要根据井曲线形态及时间域来研究测井信号所反映的岩性及其组合信息,到采用傅里叶变换手段来对测井曲线资料进行地层的旋回研究,均在一定程度上解决或是解释了某些地质问题或地质现象。但傅里叶变换时频分析方法存在固有的局限性,近年来发展起来的小波变换、S变换等在信号时频分析上显现出独特的优势[6][7]。对测井信号采用时频分析技术,其理论依据是沉积岩石体的厚度和沉积岩颗粒的粗细可通过频率域上频率变化的特征来进行判别。该理论依据主要是认为地质体是不同级别的层序体相互结合而成的,不同级别的层序体内部在沉积上具有旋回性,形成沉积旋回体,代表着载体岩性变化的韵律,引入频率参数的意义,则表现为频率有规律的变化[8]。因此,本次研究通过引入S变换时频分析方法对测井资料进行频率域分析,提取地层相应的时频特征,判识各级层序体的旋回性等地质信息,进而推断出其水体变化规律与沉积环境。

2. 关键方法流程及原理

2.1. 测井曲线时深转换

众所周知,测井曲线数据中包含较为丰富的地质信息,能够敏感地反映地层的成层性以及旋回性特征。本次研究思路主要在测井曲线资料的基础上得到相关的地震数据,借此研究沉积旋回特征。此处,测井曲线资料与地震资料的匹配问题是首先要关注的。常规测井曲线是在深度域内按等间隔采样而获得的离散信号,根据信号分析理论可将其视为非平稳深度信号。这种匹配问题即为测井曲线从深度域转换到时间域的重采样问题[9]。对于测井声波时差曲线如何从深度域转换到时间域,此处主要通过以下过程实现的。

假设深度域声波测井曲线采样间隔为 Δh ,根据声波时差序列得到相应的层速度序列为 $V_i(i=1,2,\dots,n)$ 。将厚度 Δh 的地层视为各向同性均匀介质,由于地震剖面可看作是来自垂直方向自激自收的结果,在垂直方向入射情况下,在每一个 Δh 内部传播双程旅行时为:

$$t_i = \frac{2\Delta h}{V_i}, i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

波从第一层传播至第 n 时,传播时间总和即为各个小 Δh 层传播时间的总和,即为:

$$T_{0i} = \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n \frac{2\Delta h}{V_i}, i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

当时间 T_{0i} 岁深度累加达到整数或取整后达到时间域采样间隔的整数倍, 即可建立对应深度值与时间值的关系。

在测井曲线资料时深转换的基础上再根据速度与密度之间的关系式: $\rho = 0.31 \cdot \sqrt[4]{v}$, 得到相应的层密度。最后根据地层反射系数的定义, 在速度及密度基础上实现层反射系数的求解。根据已得到的反射系数数据, 可通过子波数据得到相应的地震数据, 进而通过 S 变换, 分析时频特征对沉积旋回进行分析判别。

2.2. S 变换原理

Stockwell 等地球物理学者在前人基础上提出了 S 变换[10], 其是在以 Morlet 小波为基函数的小波变换的基础上所改进而来的, 较好地综合了短时傅里叶变换和小波变换的优点。对能量有限的信号其 S 变换定义为:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) w^*(t - \tau, f) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

其中 $h(t)$ 为解析信号, $w(t, f)$ 为局部高斯窗, 定义为:

$$w(t - \tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} \quad (4)$$

其中 f 为频率, t 代表高斯窗中心时刻的时间位置, τ 为控制时间轴上高斯窗滑动的时间因子, 近似小波变换中的平移参数。S 变换的窗函数由于引入了频率参数, 在信号分解变换时, 低频处窗函数较宽以获得较高的频率分辨率, 而在高频处窗函数较窄, 从而获得较高的时间分辨率, 其具有多分辨率的特点, 适用于非平稳信号的分解处理。

3. 沉积旋回时频分析

时频特征值变化的方向性取决于地层厚度的变化方向, 而厚度沉积物的颗粒粒度与厚度存在一致性, 细颗粒的沉积物对应薄层结构, 颗粒越粗, 沉积速度越快, 地层越厚, 这为应用时频分析进行沉积旋回、层序划分提供了理论支撑[11]-[13]。沉积旋回的时频分析就是基于地震波频率高低的变化特征可以反映沉积岩石体的厚度和沉积岩颗粒的粗细这一理论基础的。

根据沉积学原理, 单一层系体 - 旋回内, 沉积岩物性(结构和物质)的变化具有方向性和连续性, 各种级次和规模的旋回都具有这种方向性和连续性。以沉积岩物性的变化特点为依据, 可将沉积旋回划分为正旋回、反旋回、正反旋回、反正旋回。下面以具体的旋回模型来分析相应的时频特征, 每个模型由两个沉积周期组成。

3.1. 正旋回模型时频特征

正旋回的形成是沉积物相对供应不足的结果, 它主要是在海平面上升期所形成的, 在该阶段由于水深的增加是沉积物沿岸逐渐退积, 从而使其在纵向的堆积上出现从下往上、由粗变细、由砂岩变为粉砂岩乃至泥岩、层厚也逐渐变薄的变化趋势, 沉积相也发生依次逐渐变化, 水动力条件由强变弱。图 1 所示为正旋回模型及相应时频特征, 图中 a 为模拟反射系数序列, b 为合成记录, c 为 S 变换后时频谱。由图可知正旋回 S 变换后对应的时频特征表现为其频率从左到右由低频到高频变化时, 每个沉积周期内能量团逐渐向右边高频方向移动, 且高频部分对应上部的薄层地区, 低频部分对应下部厚层。

3.2. 反旋回模型时频特征

反旋回是沉积物供应逐渐变得充裕的结果, 并在纵向上沉积物出现由细到粗、由泥岩逐渐变为粉砂

岩乃至砂砾岩、层厚由薄变厚的变化趋势。图 2 所示为反旋回模型及相应时频特征，图中 a 为模拟反射系数序列，b 为合成记录，c 为 S 变换后时频谱。从图上可以看出，反旋回经 S 变换后对应的时频特征表现为其频率从左到右由高频到低频变化，高频部分对应下方的薄层，低频部分对应上方的厚层。

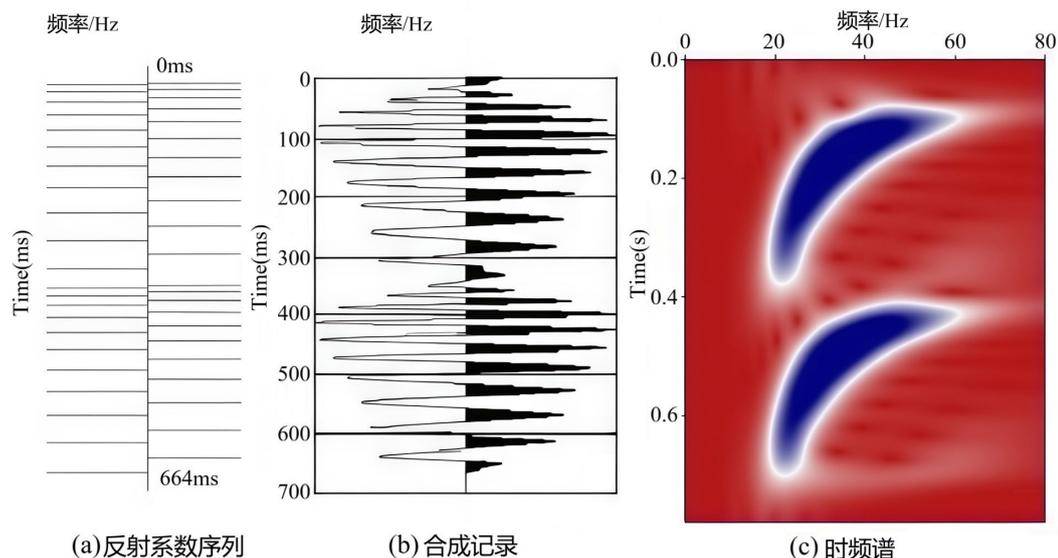


Figure 1. Positive cycle and corresponding characteristics in the time-frequency domain
图 1. 正旋回模型及相应时频特征

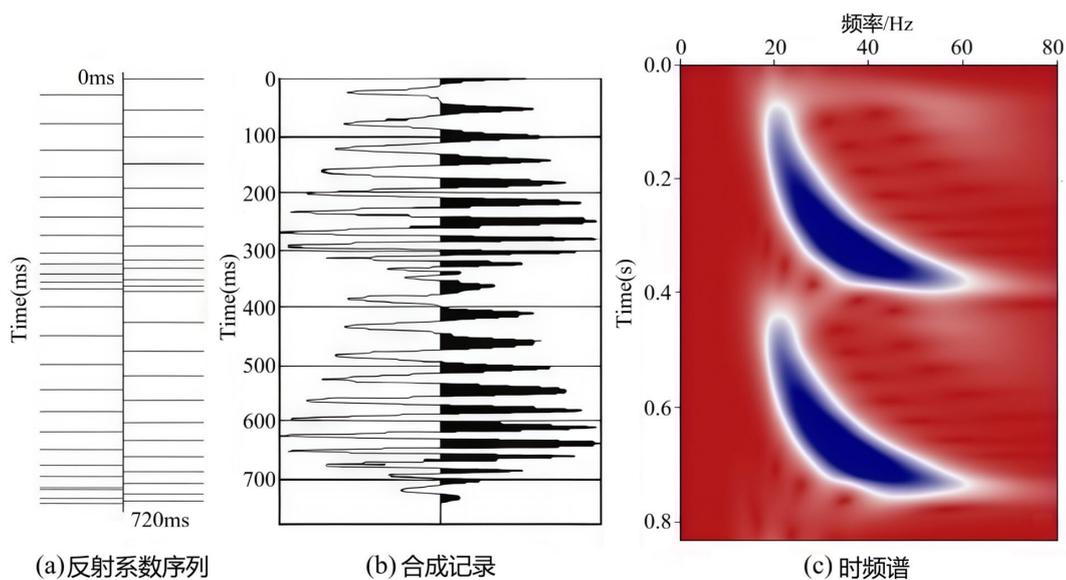


Figure 2. Reverse cycle and corresponding characteristics in the time-frequency domain
图 2. 反旋回模型及相应时频特征

3.3. 正反旋回模型时频特征

正反旋回即水进 - 水退型混合旋回，砂泥岩互层的厚度随深度增加而变化的趋势为薄 - 厚 - 薄，代表了水动力条件由弱到强再到弱、沉积物粒度由细到粗再到细的变化过程，反映了进积 - 进积型的沉积

环境。图 3 所示为正反旋回模型及相应时频特征，其中 a 为模拟反射系数序列，b 为合成记录，c 为 S 变换后时频谱。从图上可以看出，S 变换后的时频特征呈现出一定的规律，类似于曲线“抛物线”特征，其频率高低与地层的薄厚层相对应。

3.4. 正反旋回模型时频特征

正反旋回即为水退 - 水进型混合旋回，砂泥岩互层的厚度随深度增加而变化的趋势为厚 - 薄 - 厚，代表了水动力条件由强到弱再到强、沉积物粒度由粗到细再到粗的变化过程，反映了进积 - 退积型的沉积环境。图 4 所示为正反旋回模型及相应时频特征，其中 a 为模拟反射系数序列，b 为合成记录，c 为 S

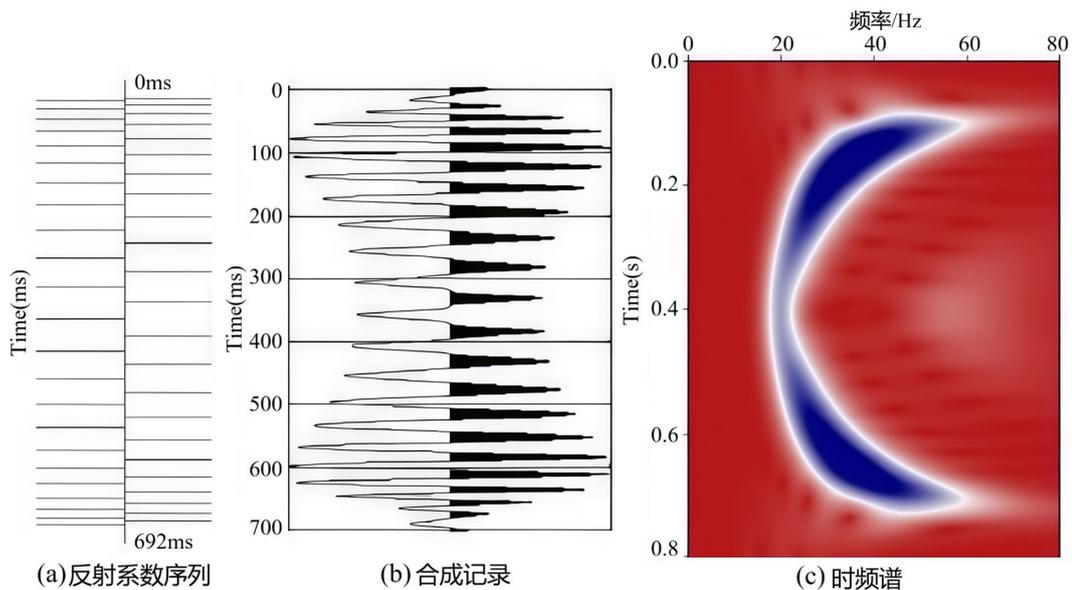


Figure 3. Positive-reverse cycle and corresponding characteristics in the time-frequency domain
图 3. 正反旋回模型及相应时频特征

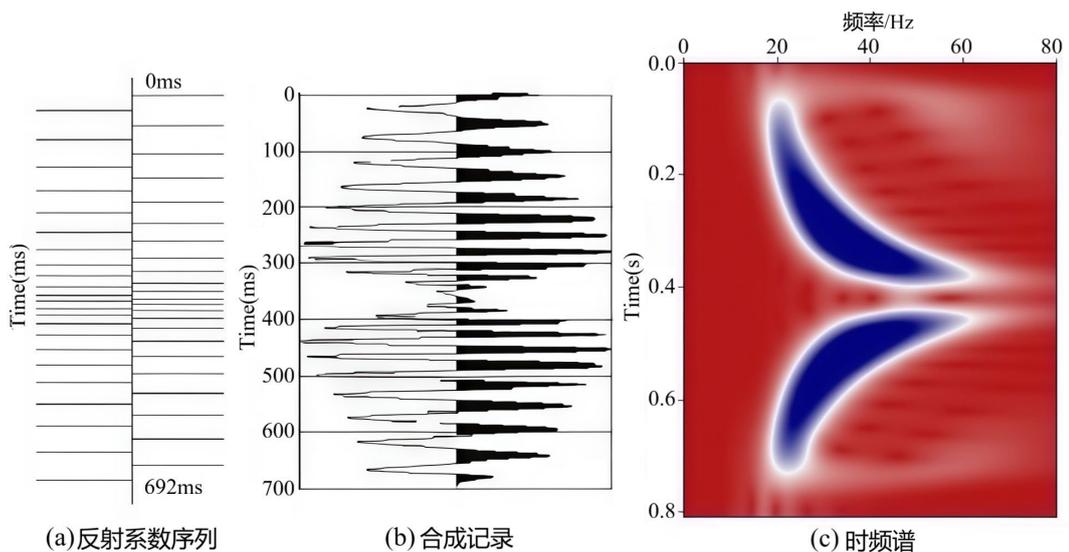


Figure 4. Reverse-positive cycle and corresponding characteristics in the time-frequency domain
图 4. 正反旋回模型及相应时频特征

变换后功率谱, d 为 S 变换后振幅谱。从图上可以看出, 反正旋回经 S 变换后的特征较为容易识别, 其频率高低也与地层的薄厚层相对应。

由这四个模型结构图可以看出, 将合成记录所代表的沉积旋回经 S 变换后, 功率谱图和振幅谱图变化规律明显。其中功率谱图的能量团集中, 且能量团不同的移动方向代表了不同的沉积旋回类型, 和沉积体内部的变化特征一致, 从而表明通过 S 变换划分沉积旋回的方式是较为有效可行的。

4. 应用效果分析

在模型分析基础上将该方法应用于实际资料以验证其效果。图 5 所示为实际测井资料的正旋回时频分析效果, 其中图 5(b) 为准噶尔盆地东北部乌伦古拗陷伦 2 井的测井资料。根据声波测井曲线计算得到反射系数数据(见图 5(a)), 可以看出, 该反射系数表现为两个逐渐增大的阶段, 结合其岩性变化特征, 即为随着砂岩比率的逐渐增大, 反射系数逐渐增大。在第一阶段中, 深度约为 2720 m 处的砂岩厚度小于第二阶段中深度约为 2734 m 处的砂岩厚度, 所以第一阶段的反射系数增加速率大于第二阶段的反射系数增加的速率。根据反射系数得到合成记录(见图 5(c)), 再进行 S 变换, 得到时频变换结果(见图 5(d))。从图上可以看出, 从下到上其能量团逐渐向高频方向移动。

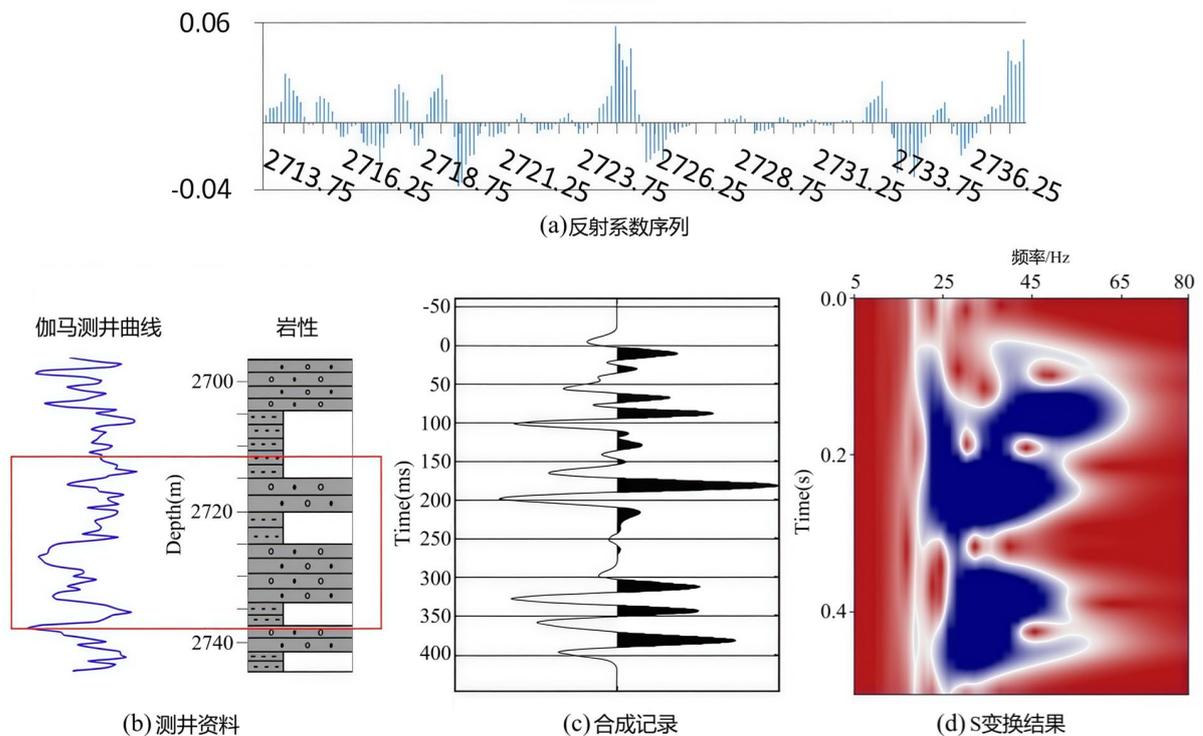


Figure 5. Time-frequency analysis of the positive cycle based on the real well log
图 5. 基于实际测井曲线的正旋回时频分析

图 6 所示为根据伦 2 井资料的反旋回时频分析。从伽马测井曲线和岩性特征(见图 6(b)), 可将该反旋回在 3054 m 左右处分为两个小的反旋回, 所得的反射系数也可分为两个阶段, 可以明显看出每个阶段的反射系数呈逐渐减小的趋势。根据声波测井曲线计算得到反射系数数据(见图 6(a)), 在此基础上得到合成记录(见图 6(c)), 并进行 S 变换获得时频域分布特征(见图 6(d))。从图上可以看出, 从上到下能量团逐渐低频方向移动, 与正旋回呈现出的特征相反。

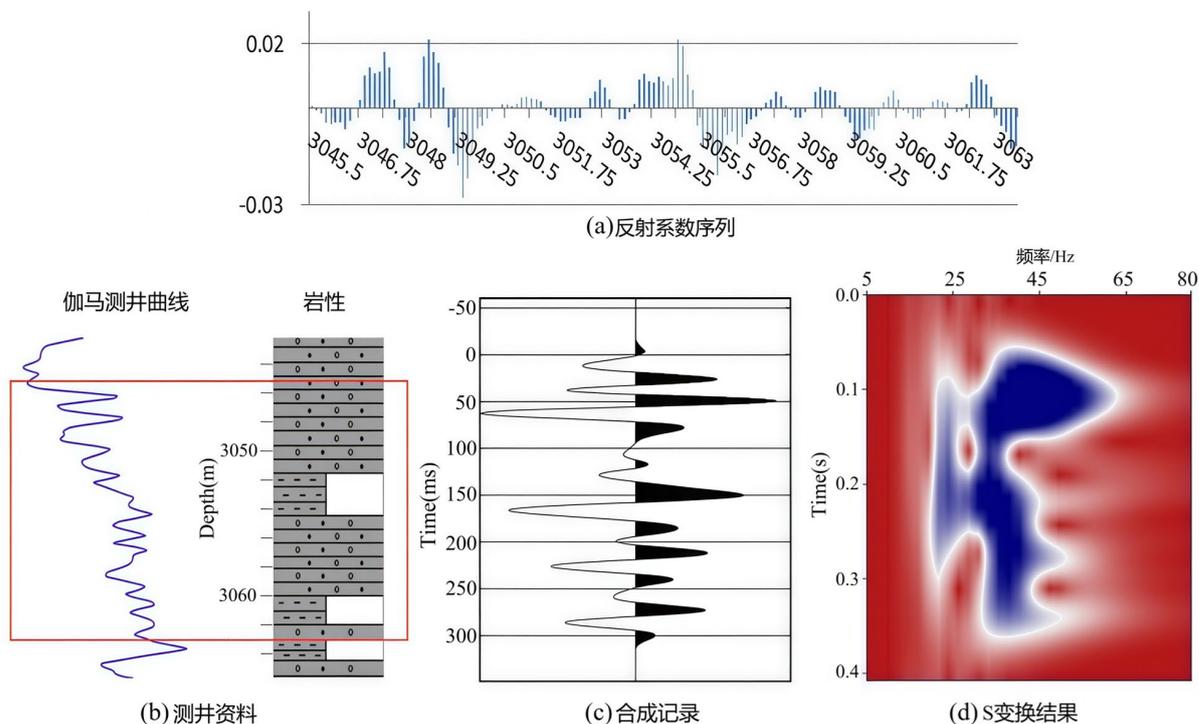


Figure 6. Time-frequency analysis of the reverse cycle based on the real well log
图 6. 基于实际测井资料的反旋回时频分析

5. 结论

(1) 根据旋回模型数据的时频分析, 正旋回沉积物颗粒大小由下往上逐渐变细, 其频率从高降到低, 反旋回地层上厚下薄, 为反粒序, 频率由低逐渐升到高, 正反旋回地层从上到下由薄到厚, 再由厚到薄, 沉积物粒序为正粒序和反粒序, 频率从上到下由高到低再由低到高地变化, 反正旋回地层从上到下依次由厚到薄又由薄到厚, 沉积物粒序为反粒序和正粒序, 频率从上到下由低到高再由高到低的变化。

(2) 测井曲线资料包含丰富的地层旋回信息, 测井曲线上不同幅度和频率特征直接反映了不同层序界面岩性和沉积特征差异。根据声波测井曲线资料, 应用有效的时深转换方法及 S 变换时频分析方法, 可以较为有效地对沉积旋回信息进行判识, 为后续地质研究奠定了基础。

参考文献

- [1] 杜世通. 层序框架下的地震高分辨率资料解释[J]. 油气地球物理, 2004, 2(4): 66-77.
- [2] 崔永谦, 刘延利, 王孟华, 等. 利用地震资料 Hilbert-Huang 变换划分沉积旋回[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(5): 983-981+1001.
- [3] 吴鹏, 樊太亮, 王红亮. 高分辨率层序地层划分在辫状河沉积相中的应用——以北京延庆硅化木国家地质公园剖面为例[J]. 现代地质, 2016, 30(3): 635-642.
- [4] 高达, 林畅松, 胡明毅, 等. 利用自然伽马能谱测井识别碳酸盐岩高频层序——以塔里木盆地塔中地区 T1 井良里塔格组为例[J]. 沉积学报, 2016, 34(4): 707-715.
- [5] 王贵文, 邓清平, 唐为清. 测井曲线谱分析方法及其在沉积旋回研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 93-95.
- [6] 陈雨红, 杨长春, 曹齐放, 等. 几种时频分析方法[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1180-1185.
- [7] 邹文, 陈爱萍, 贺振华, 等. 基于 S 变换的地震相分析技术[J]. 石油物探, 2006, 45(1): 48-51.

- [8] 冯磊. 利用地震资料时频特征分析沉积旋回[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(2): 95-99.
- [9] 马劲风, 赵圣亮, 曲志浩. 声波测井数据的深度域转换到时间域采样方法研究[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(S1): 40-45+55.
- [10] Stockwell, R.G., Mansinha, L. and Lowe, R.P. (1996) Localization of the Complex Spectrum: The S Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **44**, 998-1001. <https://doi.org/10.1109/78.492555>
- [11] 周强, 朱仕军, 文中平, 等. S 变换在高分辨率层序地层学中的应用分析[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(2): 259-262.
- [12] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2000.
- [13] Matos, M.C., Davogusto, O., Zhang, K., *et al.* (2010) Continuous Wavelet Transform Phase Residues Applied to Detect Stratigraphic Discontinuities. *SEG 2010 Annual Meeting*, Denver, 17-22 October 2010, 1494-1499.