

沉积旋回叠置形式的波形分析及旋回层序划分方法^①

伊海生^{1,2}

(1.油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学) 成都 610059;2.成都理工大学沉积地质研究院 成都 610059)

摘要 在陆源碎屑岩地层的沉积记录中,测井曲线上一个砂泥岩旋回可以采用正弦波进行描述,测井曲线幅度的高低反映旋回粒度大小的变化,旋回波长则是度量旋回厚度的标尺。本研究表明,测井曲线变化幅度与其平均值之差计算的累积残差曲线,是识别沉积体系、判别旋回层序界面的一个有效图解方法。根据数值模拟实验,证实对于任意一个级次的旋回复合波系,累积残差曲线的正半波和负半波曲线分别对应低频旋回的向上变细和向上变粗的沉积序列,正半波和负半波曲线的转换点位置对应旋回层序界面的深度。同时,引进测井曲线的频谱分析和滤波方法,可以划分沉积旋回的级别,进而研究沉积旋回变化形式的驱动机制。文中以柴达木盆地东部地区仙3井为例,根据测井数据计算的累积残差曲线,说明了划分低频和高频旋回层序的方法和流程,讨论了旋回幅度、波长变化与沉积环境和沉积速率的关系。

关键词 沉积旋回 叠置形式 频率 幅度 波形分析 旋回层序

第一作者简介 伊海生 男 1959年出生 博士 教授 沉积地质学 E-mail: yhs@cdu.edu.cn

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

0 引言

在地层记录中,砂岩和泥岩是我们最常见的岩性单元。如果以砂岩粒度作为参照标准,则在地层剖面上可观察到向上变粗或变细沉积序列,而如果以砂岩层厚进行划分,则有向上变薄或变厚的叠置形式,这是在露头 and 单井剖面中判别沉积体系转换和海侵—海退过程的重要标志^[1-2]。在地层剖面上,砂岩粒度与厚度变化可能是同步的,如河流相序一般显示向上变细、变薄的叠置样式,海滩相序具有向上变粗同时变厚的变化趋势;有时也可观察到粒度与厚度变化呈反向变化趋势,而常见的情况是粒度与厚度变化没有明显关联,这是因为控制二者变化的因素有所不同。砂岩粒度的粗细变化一般受水动力强度控制,它与沉积环境有关,如冲积扇环境以砾岩沉积为主,而湖泊环境则常见细粒级泥岩沉积。而砂层厚薄与沉积物供应量大小有关,地形高差及气候干湿变化是控制沉积物供应量的主导因素。

如果将测量的一层砂岩和一层泥岩这二个岩层单元作为一个沉积旋回的最小单元,那么以剖面深度作为横坐标,以每一个旋回对应的粒度或厚度作为纵坐标,则地层序列中沉积旋回的变化可以采用幅度和

频率二个变量进行描述(图1)。根据信号分析理论,幅度和波长是二个描述沉积旋回方向性变化和地层叠加形式的主要参数,在露头剖面上测量的旋回厚度变化反映的是信号波长或频率变化,而一般测井曲线则指示旋回信号的幅度或强度变化^[3-6]。

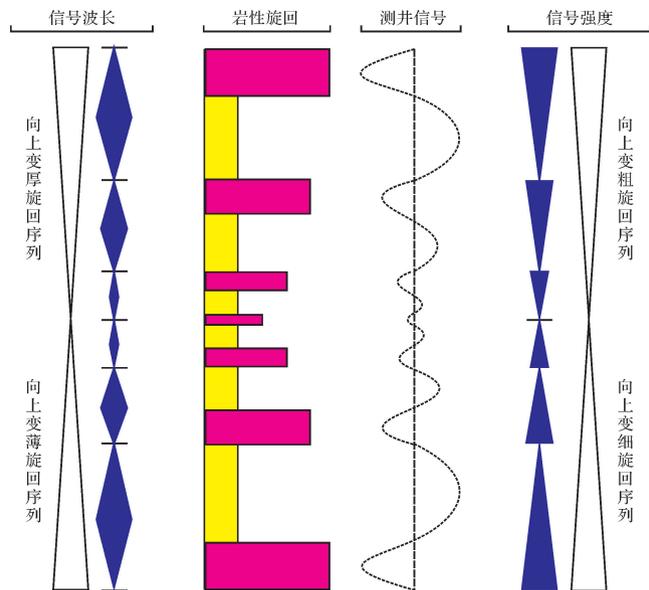


图1 地层记录中沉积旋回信号幅度和波长变化形式示意图
Fig.1 Amplitude and wavelength directional changes of sedimentary cycle signals in stratigraphic records

①国家自然科学基金项目(批准号:40972084)与教育部博士点基金项目(编号:20105122110013)联合资助
收稿日期:2013-06-12;收修改稿日期:2014-12-04

残差分析是旋回地层研究中最简单的方法,它通过计算观察值与平均值之差所提供的信息,分析数据序列的周期性信号。参考费希尔图解的分析方法^[7-9],我们引入一个变量,称为旋回幅度残差(Cycle Amplitude Residuals,简称为CAR),即旋回幅度与其平均值之差,其值可正可负,同时计算累积旋回幅度残差(Cumulative Cycle Amplitude Residuals,简称为CCAR),根据CCAR曲线与原始数据曲线之间的相位偏移关系,可以应用波形图法解析向上变粗和变细的旋回叠置形式,进而划分旋回层序。

1 原理与方法

根据信号分析理论,一个复合波系都可分解为一系列不同频率的正弦波信号,或者说一个复合波系是一系列振幅、频率和相位不同的正弦波信号的叠加组合。因此,可以认为正弦波是一个复合波系的最基本的构成单元^[3]。在测井曲线旋回层序分析过程中,

如果将测井曲线幅度的高低变化作为砂岩粒度或泥质含量的数学指标,则一个砂岩和泥岩旋回的测井曲线对应一个简单的正弦波。为了观察在数学转换过程中测井曲线的波形变化,将采用正弦波形图分析予以说明。

1.1 单旋回累积残差曲线的波形分析

图2中设定测井信号在深度坐标系呈正弦波变化,旋回波长为100m,信号强度变化于0~10,初始相位角为0。这时一个正弦波信号,可以分解为一个上升半周期和一个下降半旋回周期,它的转换点分别对应正弦波的峰值点和谷值点(图2A)。在测井曲线中,以自然伽马GR曲线为例,因为砂岩GR低,而泥岩GR值高,因此正弦波的上升半周期和下降半周期,分别对应一个向上变细和一个向上变粗的沉积序列,一个旋回层序包括一个向上变细的半周期和一个向上变粗的半周期。

图2B是根据原始信号强度与平均值之差计算

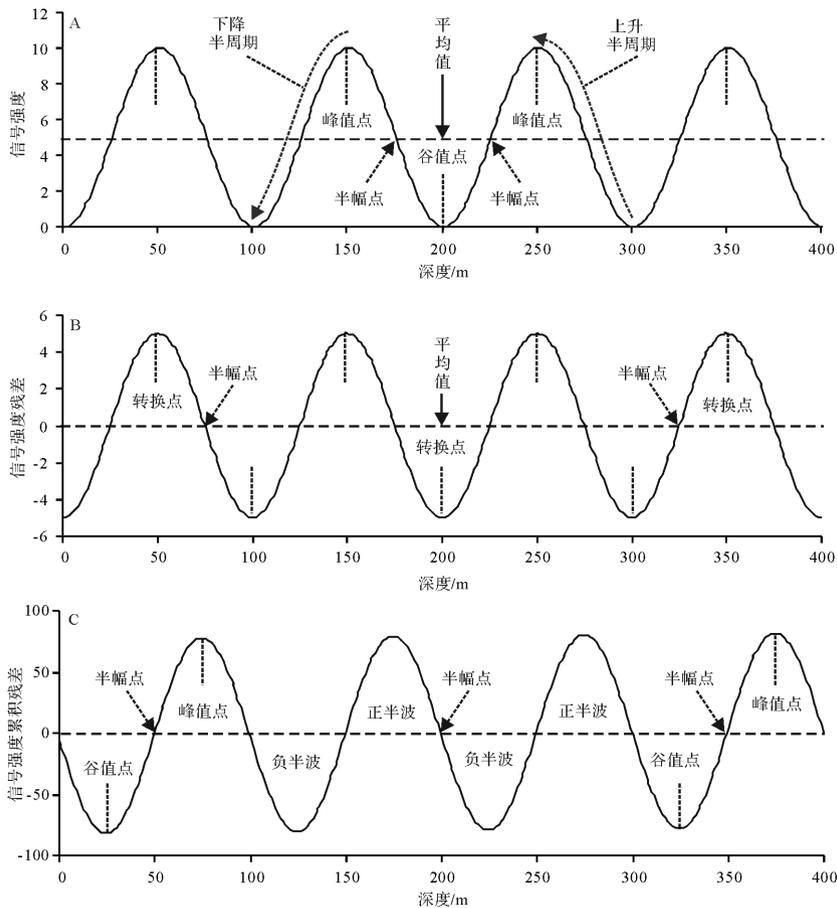


图2 单旋回累积残差曲线图

A.原始信号;B.残差信号;C.累积残差信号

Fig.2 Cumulative residual curve graph of single cycles

A. original signals; B. residual signals; C. cumulative residual signals

的信号强度偏差曲线,它与图 1A 中原始正弦波曲线波形一致,但其平均值通过正弦波曲线半幅点位置。图 2C 是测井信号强度的累积残差曲线,它是将测井信号的强度从上到下顺次累加重构的一条曲线,它与原始正弦曲线存在 180° 的相位差,这时原始正弦波曲线的上升半周期和下降半周期转换为正半波和负半波信号,而正半波与负半波曲线半幅点深度对应图 1A 中原始正弦波曲线峰值点和谷值点的位置。在测井旋回曲线分析时,我们可以利用累积残差曲线这一特性,根据平均值与累积残差曲线交点的深度,标定旋回层序界面的位置。

1.2 多旋回累积残差曲线的波形分析

图 3A 设定低频旋回波长分别为 100 m,信号幅度变化于 0~10,高频正弦波叠加的高频旋回波长为 5 m,幅度变化于 0~2 m。图 3A 中同时标定了低频正弦波峰值和谷值转换点的位置。对比观察可以发现,图 3C 显示的信号强度累积残差曲线与图 3A 原始正弦曲线差异是,它的波形变化仅反映低频波变化

轨迹,而叠加的高频波信号急剧衰减。可以证明,信号强度累积残差曲线,它记录的是一定地层区间内波长最大、频率最小的低频旋回变化的轨迹,这时采用平均值与信号强度累积残差曲线交点标定的则是低频波旋回层序。

1.3 变幅波累积残差曲线的波形分析

图 4A 是一个单旋回正弦波信号,波长 100 m,但旋回幅度在深度域是变化的,设定中间二个正弦波幅度比两侧正弦波的低 1/2。图 4C 是一个复合正弦波信号曲线,低频正弦波波长和幅度变化与图 3A 相同,其上叠加波长为 5 m、幅度变化区间介于 0~2 m 的高频正弦波。对比观察图 4B 和图 4D 信号强度累积残差曲线,可以发现,无论是单个正弦波还是叠加复合正弦波信号将产生一个超低频波,叠加的高频正弦波信号消失,这时信号强度累积残差曲线记录的是超低频波转换点的位置。

1.4 变频波累积残差曲线的波形分析

图 5A 是一个单旋回正弦波信号,设定旋回信号

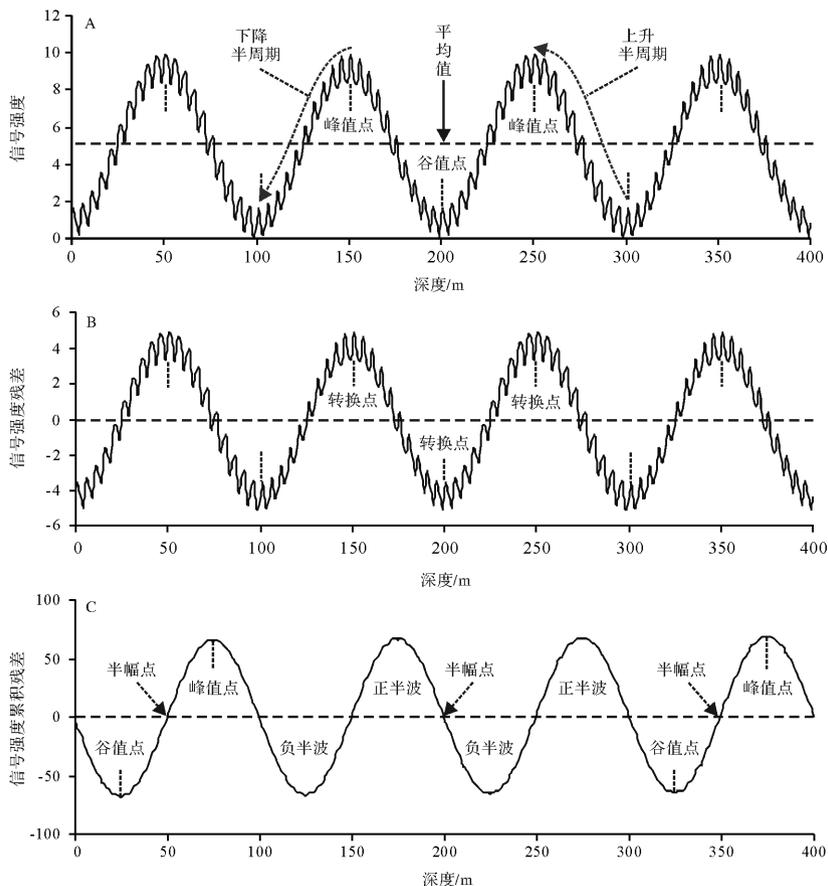


图 3 多旋回累积残差曲线图

A.原始信号;B.残差信号;C.累积残差信号

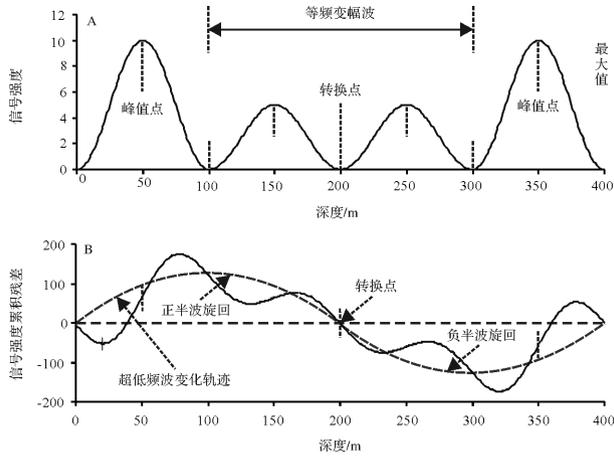
Fig.3 Cumulative residual curve graph of multiple cycles

A. original signals; B. residual signals; C. cumulative residual signals

的变化幅度相等,最大振幅为 10,但波长在深度域变化,中间二个高频正弦波波长为 50 m,两侧低频波波长为 100 m。图 5C 是一个复合正弦波,低频正弦波波长和幅度变化与图 5A 相同,其上叠加波长为 5 m、幅度变化区间介于 0~2 m 的高频正弦波。对比观察图 5B 和图 5D 信号强度累积残差曲线,可以发现它与变幅波相似,也会产生一个超低频波信号,同时深度域短周期正弦波信号振幅明显减小,叠加的高频正弦波信号消失。

根据以上数字模拟实验研究,可以总结如下结论,作为进行旋回层序分析的理论基础:

(1) 深度坐标系的测井信号,如常用的 GR、SP



测井数据,通过信号强度的累积残差曲线,可识别出一系列的正半波和负半波信号,一个旋回层序包括一个正半波和一个负半波信号,它对应一个向上变粗和一个向上变细的沉积旋回系列,信号强度的累积残差曲线与其平均值交点的深度,对应旋回层序界面的位置。

(2) 测井信号强度的累积残差曲线,反映一个测井段区间频率最小、波长最大的旋回层序的变化轨迹,这时深度域或空间域的高频波成分会受到抑制而衰减。因此要检测短周期旋回层序,需要采用低通或高通滤波方法,对旋回层序的等级进行分解,进而探索控制旋回周期变化的控制机制。

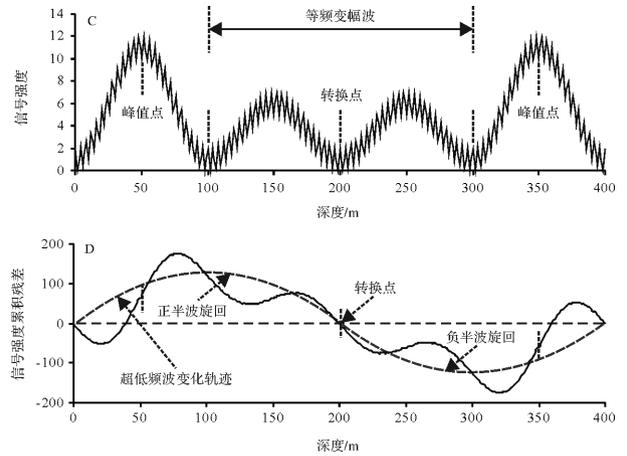


图 4 单旋回和多旋回变幅波信号累积残差曲线对比图

A.单旋回变幅波信号;B.单旋回变幅波累积残差曲线图;C.多旋回变幅波信号;D.多旋回变幅波累积残差曲线图

Fig.4 Comparative diagrams of cumulative residual curves of single cycles and multiple cycles with various amplitudes

A. original signals of single cycles with various amplitudes; B. cumulative residual signals of single cycles with various amplitudes;

C. original signals of multiple cycles with various amplitudes; D. cumulative residual signals of multiple cycles with various amplitudes

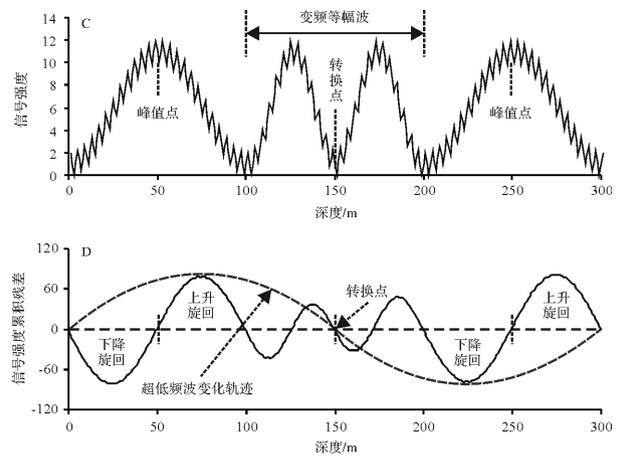
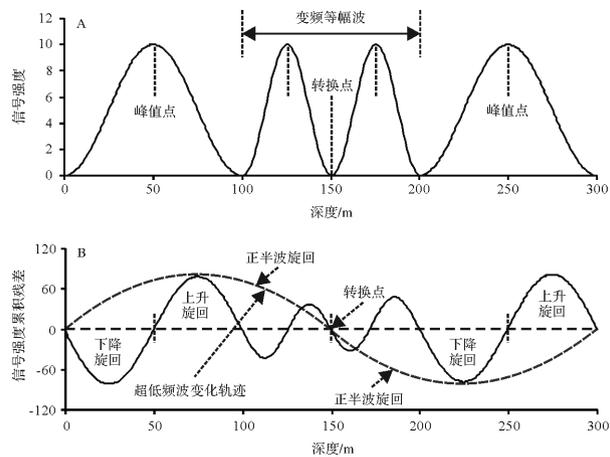


图 5 单旋回和多旋回变频波信号累积残差曲线对比图

A.单旋回变频波信号;B.单旋回变频波累积残差曲线图;C.多旋回变频波信号;D.多旋回变频波累积残差曲线图

Fig.5 Comparative diagrams of cumulative residual curves of single cycles and multiple cycles with various frequencies

A. original signals of single cycles with various frequencies; B. cumulative residual signals of single cycles with various frequencies;

C. original signals of multiple cycles with various frequencies; D. cumulative residual signals of multiple cycles with various frequencies

2 研究实例

仙3井位于柴达木盆地东部南八仙地区,它是这一地区首次发现油气藏的探井,介形虫和轮藻化石丰富,是南八仙油田地层对比基准。仙3井深度3 800 m,其中井段165~2 500 m根据岩性、电性、化石鉴定结果,钻遇地层从上至下包括上油砂山组(井深599 m)、下油砂山组(井深1 591 m)、上干柴沟组(井深2 100 m)下干柴沟组(2 972 m)。根据完井报告记述,仙3井上油砂山组为一套黄绿色、黄褐色泥岩夹灰白色粉砂岩组合,下油砂山组以黄褐色泥岩出现为标志,夹含灰色粉砂岩、细砂岩。上干柴沟组以棕褐色泥岩为主,夹少量灰色粉砂岩。下部以棕褐色泥岩为主,与灰色细砂岩、粉砂岩互层。下干柴沟组上部为一套以灰白色粉砂岩、细砂岩为主,夹棕褐色泥岩;下部则以棕褐色细砂岩和含砾砂岩为主,与棕褐色泥岩互层,底部见有砾岩层。据单井剖面沉积相和区域古地理研究,这一地区上油砂山组和下油砂山组为湖泊相沉积,上干柴沟组和下干柴沟组为三角洲沉积^[10-12]。

选取仙3井165~2 500 m井段的自然伽马(GR)数据进行旋回层序分析,原始测井数据经过校正和拼接处理,测点间距为0.125 m,井段长度2 335 m(图6A)。为了揭示测井信号旋回波长的大小,图6B采

用频谱分析方法进行了旋回谱系的检测^[13-14],结果如图6B所示。从图6B中可见,仙3井沉积旋回波长的最大值为2 335 m,最小值为11.21 m。这些频谱峰反映的地质意义是,它指示在地层序列中存在一系列波长大小不等的沉积旋回,这些旋回的级次计有长周期100 m级的,如图6B中331.25 m频谱峰所示,也有10 m级的短周期旋回,如图6B中观察到的波长分别为99.34 m、27.92 m的沉积旋回。

为了研究一个特定级次沉积旋回的地层叠加形式,首先采用滤波方法,提取一个频谱段的数据序列进行分析。图7A和图7B是分别采用高通滤波提取频率大于0.002 5(波长=400 m)测井曲线编绘的滤波信号和频谱分析结果。图6B与图7B对比可以发现,这时波长大于400 m的低频波消失,滤波曲线频谱分析图中最小的低频波波长为311.25 m,而波长小于400 m的高频旋回频谱信号与原始测井曲线相同。

图8A是采用滤波信号强度计算的仙3井累积残差曲线,根据图形判读和计数,四个组级地层单元共识别21个沉积旋回以及2个半旋回,其中下油砂砂组可划分为3个旋回层序,上干柴沟组可识别出5个旋回层序,且旋回周期或波长差别甚大。图8B是仙3井累积残差曲线的频谱分析结果,它的低频旋回波长为311.25 m和255.84 m,可检测的最小旋回波长为93.38 m,与图7B滤波曲线频谱分析图比较,累

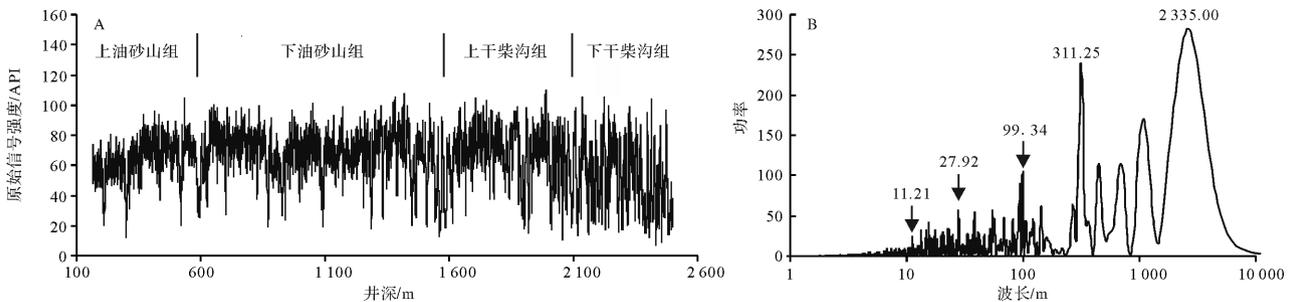


图6 柴达木盆地仙3井GR原始测井曲线(A)及频谱分析图(B)

Fig.6 Spectral analysis diagrams of original GR data from the Well Xian 3 of Qaidam Basin

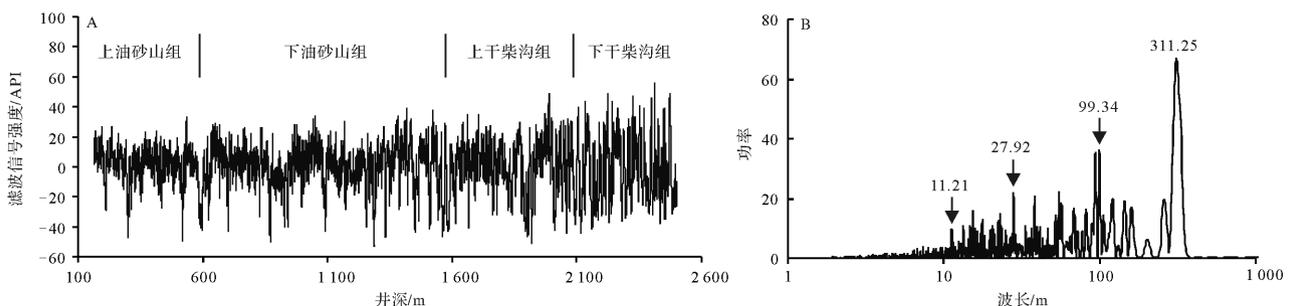


图7 柴达木盆地仙3井GR滤波曲线(A)及频谱分析图(B)

Fig.7 Spectral analysis diagrams of filtering GR data from the Well Xian 3 of Qaidam Basin

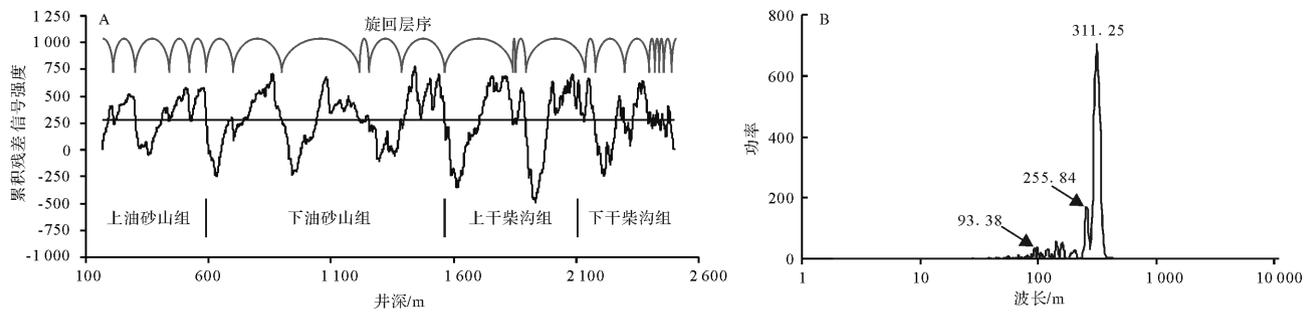


图8 柴达木盆地仙3井GR数据累积残差曲线(A)及频谱分析图(B)

Fig.8 Cumulative residual curves and spectral analysis diagram of GR filtering data from the Well Xian 3 of Qaidam Basin

积残差曲线中高频旋回消失,它仅显示了低频旋回周期,这验证了累积残差曲线记录的是一个测井区间长周期旋回的结论。

进一步观察图8可以发现,上油砂山组与下油砂山组以及下油砂山组与上干柴沟组旋回层序界面与岩石地层界面在同一个深度,井深分别为599 m和1591 m,而上干柴沟组与下干柴沟组则位于一个长周期旋回与短周期旋回界面交界处,如果按旋回层序进行分层,则二者地层深度应从井深2100 m下移至2190 m。同时,仙3井三个地层界面,在累积残差曲线图上位于负半波与正半波曲线转换点的位置,而这个界面深度恰是向上变粗的沉积序列向向上变细的沉积序列过渡的部位,可能反映了湖平面从下降到上升的沉积过程。

3 讨论

3.1 数据处理方法

岩性和岩相韵律互层的沉积序列在深度域的变化是旋回层序分析的主要研究对象,因此它首先要测井曲线能反映岩性旋回的变化^[15-19]。在砂泥岩剖面一般选择自然伽马和自然电位测井分辨砂岩和泥岩旋回,而在碳酸盐岩剖面可采用密度和声波测井判别石灰岩和白云岩。而对于露头剖面,磁化率测量则是一个建立旋回层序数字化曲线的有效方法,这是陆源碎屑地层和碳酸盐岩地层野外研究中最实用的方法^[20-22]。

在剖面旋回层序分析中,第一步是对测井数据进行拼接和校对,其次是采用频谱分析图解判别旋回波长。一般的测井曲线,既有幅度的变化,也有波长的差异,这在频谱分析图中显示一系列波长大小、强度高低的复杂谱系^[23-25]。一般选择那些频谱峰强度高,即岩性旋回明显的主频波进行滤波处理,如在

仙3井中我们可选择波长分别为331.25 m、99.34 m、27.92 m、11.21 m沉积旋回进行滤波处理,研究它们在单井剖面的变化及古环境和古气候意义。

对测井数据进行滤波处理,可以采用两个方法:其一是对原始测井数据进行低通滤波,计算滤波数据与其平均值之差,然后编绘滤波数据的累积强度残差曲线,根据平均值与累积强度残差曲线的交会点的深度划分旋回层序。另外一个快速划分旋回层序的方法,是对原始测井数据计算的累积强度残差数据采用高通滤波,编绘滤波数据的累积强度残差曲线。这两个方法编绘的累积强度残差曲线划分的层序界面完全一致,仅二者平均值线位置发生偏移。

3.2 旋回等级的划分

在陆源碎屑岩地层剖面中,砂岩和泥岩旋回是旋回层序研究的最常见的地层单元,这些旋回的厚度一般为厘米级到米级大小,它们在垂向上表现为向上变粗和向上变细的地层叠置样式,一个旋回层序包括一个向上变粗的沉积序列和一个向上变细的沉积序列。但是,在深度域的旋回层序是一个连续的旋回谱系,在一般采样间隔为0.125 m的测井信号中,旋回波长变化于1~10³ m区间。按旋回波长的变化,可将旋回层序分四个等级,计有1 m、10 m、100 m和1000 m旋回周期。一般而言,波长大于100 m级旋回与幕式构造活动有关,10 m级旋回受海平面变化的控制,波长小于10 m级旋回可能反映受米兰科维奇驱动的气候旋回^[23,26-28]。在这里,可采用滤波方法逐步分解旋回级次。兹以仙3井GR测井曲线的频谱分析予以说明。图9A是仙3井原始测井曲线的频谱分析图,从图中可见GR测井曲线是一个旋回波长连续变化的谱系,可以检测到波长分别为311.25 m、93.38 m、27.92 m、11.21 m等一系列特征峰,它反映测井段中的一些最明显的沉积旋回。低频波旋回波长的大小

与数据长度有关,数据序列长度愈大,旋回波长愈大,最大的旋回波长等于井段长度。而频谱分析图中旋回波长的最小值与采样点间距有关,它是采样点间距的二倍,常规测井的间距0.125 m,则频谱分析图中能分辨的最小旋回波长为0.25 m^[29]。

图9A中仙3井GR测井数据的频谱分析图中解析的低频波的旋回波长为2 335 m,最小的旋回波长为0.25 m,根据旋回波长的大小可分四级。图9B、图9C和图9D分别通过高通滤波分解的100 m、10 m、1 m级的旋回频谱分析图,对比观察特征峰的大小和位置,可以了解不同级次旋回波长的大小变化形式。例如图9B中100 m级旋回的主旋回波长为311.25 m,10 m级旋回的计有波长从93.38 m到11.21 m等多个优势频谱峰,而1 m级旋回则以波长9.56 m特征峰显示最明显。

3.3 旋回结构的解析

在陆源碎屑岩地层剖面中,按砂岩粒度和岩层厚度变化划分,可识别出二类变化趋势,其一是向上变粗或变细的变化形式,其二是向上变厚或变薄的旋回叠置样式。这两类变化形式可以是同步变化的,如河流相一般表现为向上变细、变薄的岩相序列,三角洲相则常呈向上变粗、变厚的沉积序列,但更常见的是二者之间无明显相关变化的情况。通常的解释是,砂岩粒度变化与沉积环境的水动力强度有关,而岩层厚度变化受沉积物供应量大小的控制。同理,在旋回波

形分析过程中,我们不但可以通过测井信号强度的变化划分旋回层序,还可以通过旋回厚度的高低变化分析沉积供应量的变化过程。

图10是仙3井累积残差曲线经过高通滤波后的曲线,滤波波长的上限为100 m,共计检测到60个旋回,同时根据计算求得旋回波长最大值为87.2 m,最小值为2.7m。观察图10中旋回波长随井深变化图,可以发现上、下油砂山组旋回厚度大于上、下干柴沟组旋回厚度,旋回厚度最小值在井深1 600 m处,即下油砂山组与上干柴沟界线处,另外在上油砂山上部和下部也有二个低值区。这些旋回厚度减薄的低值区间反映沉积物供应量低,沉积速率小,是湖泊扩张、滨岸线向陆地后退时凝缩段沉积的标志。

4 结论

(1) 砂岩粒度和厚度在地层序列中的变化趋势是沉积体制转型和旋回层序划分中重要标识。如果我们定义一个旋回层序由一个向上变粗和一个向上变细的沉积序列构成,则根据测井曲线的累积残差曲线正半波和负半波信号转换点的位置,可以标定旋回层序界面。

(2) 测井数据的累积残差曲线反映是一个井段低频长周期旋回的变化轨迹,通过滤波处理,我们可以对旋回级次进行分级,探索1 m级、10 m级乃至100 m级旋回的驱动机制。

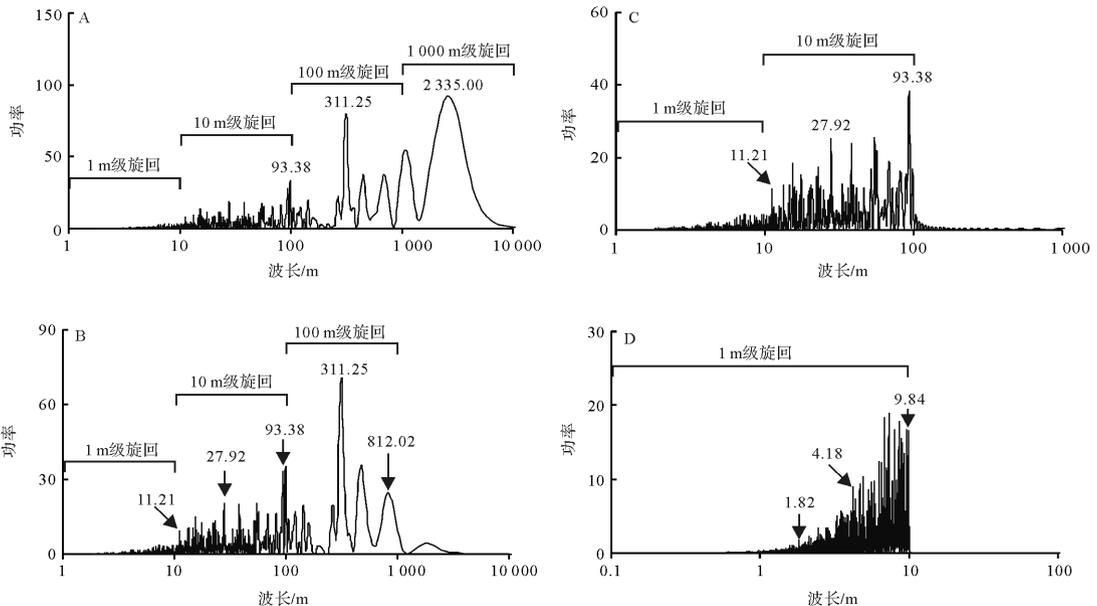


图9 柴达木盆地仙3井GR测井数据分步滤波信号的频谱分析图

A.原始GR测井信号;B.频率<0.001高通滤波信号;C.频率<0.01高通滤波信号;D.频率<0.1高通滤波信号

Fig.9 Spectral analysis diagram of stepwise filtering signals from GR data of the Well Xian 3 in Qaidam Basin

A. original GR signals; B. high pass signals of frequency $\lt; 0.001$; C. high pass signals of frequency $\lt; 0.01$; D. high pass signals of frequency $\lt; 0.1$

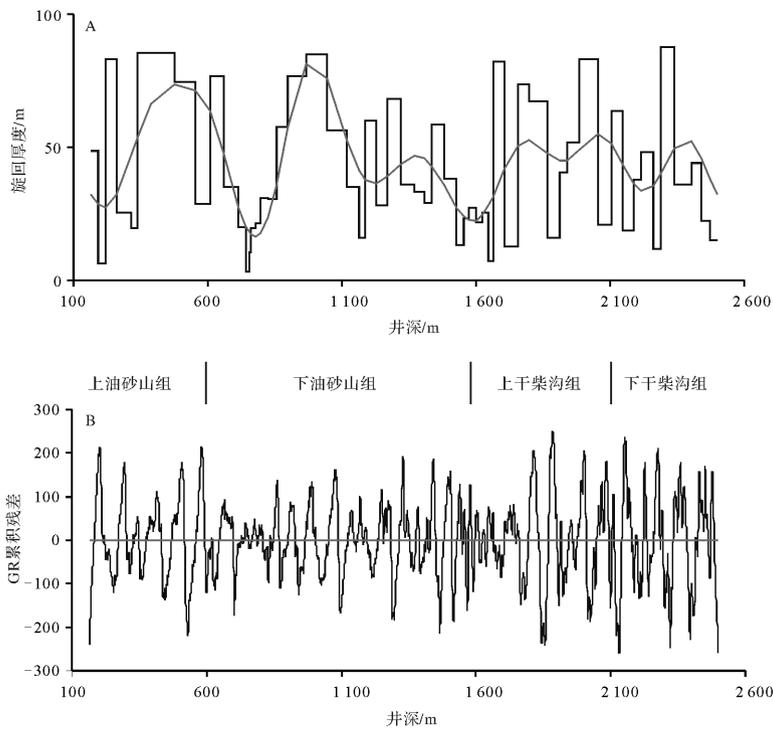


图10 柴达木盆地仙3井GR滤波数据的旋回波长变化图(A)和累积残差曲线图(B)

Fig.10 Cumulative residual curves and cyclic wavelength variation diagram of GR filtering data from the Well Xian 3 of Qaidam Basin

(3) 测井曲线幅度变化的累积残差曲线反映地层序列中向上变粗和向上变细的旋回叠加形式,同时通过这一曲线简单计算求得旋回波长在深度域的变化,解析地层记录中旋回厚度向上变厚和向上变薄变化趋势。

(4) 沉积体系中砂岩粒径的变化受沉积环境水动力变化和湖平面升降周期的控制,而旋回波长大小与受地貌高差和气候变化影响,它与沉积物供应量变化有关。同步分析测井曲线的幅度和波长变化,可以为我们研究沉积旋回空间结构的变化提供变化信息。

参考文献 (References)

- Mitchum Jr R M, van Wagoner J C. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles[J]. *Sedimentary Geology*, 1991, 70(2/3/4): 131-160.
- Catuneanu O. Principles of Sequence Stratigraphy [M]. Elsevier, 2006: 1-386.
- Weedon G P. Time-series Analysis and Cyclostratigraphy: Examining Stratigraphic Records of Environmental Cycles[M]. Cambridge University Press, 2003: 1-276.
- 梅冥相,马永生,周洪瑞,等. 雾迷山旋回层的费希尔图解及其在定义前寒武纪三级海平面变化中的应用[J]. *地球学报*, 2001, 22(5): 429-436. [Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Zhou Hongrui, et al. The Fischer plots of Wumishan cyclothem as records of third-order sea level changes in Precambrian[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2001, 22(5): 429-436.]
- 伊海生. 测井曲线旋回分析在碳酸盐岩层序地层研究中的应用[J]. *古地理学报*, 2011, 13(4): 456-466. [Yi Haisheng. Application of well log cycle analysis in studies of sequence stratigraphy of carbonate rocks[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(4): 456-466.]
- 伊海生. 地层记录中旋回层序界面的识别方法及原理[J]. *沉积学报*, 2012, 30(6): 991-998. [Yi Haisheng. Detection of cyclostratigraphic sequence surfaces in stratigraphic record: its principle and approach[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(6): 991-998.]
- Read J F, Goldhammer R K. Use of Fischer plots to define third-order sea-level curves in Ordovician peritidal cyclic carbonates, Appalachians[J]. *Geology*, 1988, 16(10): 895-899.
- Goldhammer R K, Dunn P A, Hardie L A. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: examples from Alpine Triassic platform carbonates [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1990, 102(5): 535-562.
- Husinec A, Basch D, Rose B, et al. FISCHERPLOTS: An Excel spreadsheet for computing Fischer plots of accommodation change in cyclic carbonate successions in both the time and depth domains [J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 34(3): 269-277.
- 党玉琪,尹成明,赵东升. 柴达木盆地西部地区古近纪与新近纪沉积相[J]. *古地理学报*, 2004, 6(3): 297-306. [Dang Yuqi, Yin Chengming, Zhao Dongsheng. Sedimentary facies of the Paleogene and

- Neogene in western Qaidam Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(3): 297-306.]
- 11 马雪,伊海生,夏国清. 柴达木盆地西部新生代砂岩碎屑组分变化记录的沉积转型事件[J]. *地质通报*, 2010, 29(9): 1294-1303. [Ma Xue, Yi Haisheng, Xia Guoqing. Cenozoic sedimentary transformation event record by detrital components in western Qaidam Basin, Qinghai, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(9): 1294-1303.]
- 12 李凤杰,孟立娜,方朝刚,等. 柴达木盆地北缘古近纪—新近纪古地理演化[J]. *古地理学报*, 2012, 14(5): 596-606. [Li Fengjie, Meng Lina, Fang Chaogang, et al. Palaeogeographic evolution of the Paleogene and Neogene in north margin of Qaidam Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(5): 596-606.]
- 13 Hammer Ø, Harper D A T. *Paleontological Data Analysis*[M]. John Wiley & Sons, 2005: 1-368.
- 14 伊海生. 地层记录中沉积旋回周期检测及沉积速率变化曲线重建[EB/OL]. 北京:中国科技论文在线, 2014 [2014-01-27]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201401-1185>. [Yi Haisheng. Detection of sedimentary cycle periods in stratigraphic record and sedimentation rate reconstruction [EB/OL]. Beijing: Sciencepaper Online, 2014 [2014-01-27]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201401-1185>.]
- 15 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. [Chen Maoshan. Two novel depth-domain frequency spectrum analysis methods for logging data and their application to sequence stratigraphy research[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1999, 34(1): 57-64.]
- 16 邵才瑞,李洪奇,张福明,等. 用测井曲线自动划分层序地层研究[J]. *地层学杂志*, 2004, 28(4): 321-325. [Shao Cairui, Li Hongqi, Zhang Fuming, et al. Research on the division of sequence stratigraphy automatically using well logs[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2004, 28(4): 321-325.]
- 17 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): 233-236. [Liu Hongqi, Chen Ping, Xia Hongquan. Automatic identification of sedimentary microfacies with log data and its application[J]. *Well Logging Technology*, 2006, 30(3): 233-236.]
- 18 李新虎,祁云望. 测井曲线形态的自动识别方法研究[J]. *大庆石油地质与开发*, 2006, 25(5): 116-118. [Li Xinhui, Qi Yunwang. Study on well logging curve shape automatic identification method[J]. *Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing*, 2006, 25(5): 116-118.]
- 19 彭智,樊官民. 测井曲线自动分层解释方法研究[J]. *石油仪器*, 2011, 25(3): 43-44, 48. [Peng Zhi, Fan Guanmin. Study on well logging curve auto-subdivide formation method[J]. *Petroleum Instruments*, 2011, 25(3): 43-44, 48.]
- 20 Ellwood B B, Crick R E, El Hassani A, et al. Magnetosusceptibility event and cyclostratigraphy method applied to marine rocks: detrital input versus carbonate productivity[J]. *Geology*, 2000, 28(12): 1135-1138.
- 21 Ellwood B B, Crick R E, Fernandez J L G -A, et al. Global correlation using magnetic susceptibility data from Lower Devonian rocks[J]. *Geology*, 2001, 29(7): 583-586.
- 22 宋华颖,伊海生,马雪,等. 柴达木盆地西部典型剖面磁化率特征及其意义[J]. *勘探地球物理进展*, 2009, 32(4): 275-279. [Song Huaying, Yi Haisheng, Ma Xue, et al. Characteristics of magnetic susceptibility on typical sections and its significance in western Qaidam Basin[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2009, 32(4): 275-279.]
- 23 Scarparo Cunha A A, Koutsoukos E A M. Orbital cyclicity in a Turonian sequence of the Cotiguiba Formation, Sergipe Basin, NE Brazil[J]. *Cretaceous Research*, 2001, 22(5): 529-548.
- 24 Corgas T J, Wilkens R H. Sedimentation rates off SW Africa since the Late Miocene deciphered from spectral analyses of borehole and GRA bulk density profiles: ODP Sites 1081-1084[J]. *Marine Geology*, 2002, 180(1/2/3/4): 29-47.
- 25 Paulissen W E, Luthi S M. High-frequency cyclicity in a Miocene sequence of the Vienna Basin established from high-resolution logs and robust chronostratigraphic tuning[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 307(1/2/3/4): 313-323.
- 26 Grottsch J. Cycle stacking and long-term sea-level history in the Lower Cretaceous (Gavrovo Platform, NW Greece)[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(4): 723-736.
- 27 Hinnov L A, Park J. Detection of astronomical cycles in the stratigraphic record by frequency modulation (FM) analysis [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1998, 68(4): 524-539.
- 28 Rodríguez-Tovar F J, Pardo-Igúzquiza E. Strong evidence of high-frequency (sub-Milankovitch) orbital forcing by amplitude modulation of Milankovitch signals [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210(1/2): 179-189.
- 29 伊海生. 沉积记录中超级和次级米兰科维奇旋回频带的成因解释[EB/OL]. 北京:中国科技论文在线, 2014 [2014-02-13]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201402-181>. [Yi Haisheng. The genetic interpretation of the super and secondary Milankovitch cycles in sedimentary record[EB/OL]. Beijing: Sciencepaper Online, 2014 [2014-02-13]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201402-181>.]

The Waveform Graphic Analysis of Cyclic Stacking Patterns in Sedimentary Successions and Detection Methods of Cyclostratigraphic Sequences

YI HaiSheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Oil / Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059;

2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract: The rhythmic sandstone and mudstone cycles are common lithologic units in terrigenous stratigraphic system. Wireline log curves of sandstone and mudstone cycles can be described in term of sinusoidal waves in depth domains. Amplitude variations of wellline logs reflect grain sizes in a sedimentary cycle, and wavelength changes are a measure scale to mark cyclic thickness. The cumulative residual curves from average amplitude variations of well logs are introduced and demonstrated as a valid graphical method to define depositional regime transformation and check boundary surfaces of cyclic sequences. The numerical simulation results shows the positive half waves and negative half waves of cumulative residual curves are respectively corresponding to coarsening-upward and fining-upward sedimentary successions in low frequency cyclic sequences in a well interval. Transform points of positive half waves and negative half waves are calibrated to boundary surface depth of cyclic sequences. The spectral analysis and filter methods are adopted to divide cyclic sequence hierarchy and then discuss depositional mechanism. The GR log data from Xian Well 3 of Qaidam Basin as a case, cumulative residual curves are calculated and constructed on well log data. The low and high frequency cyclic sequences are distinguished and its procedure and methods are illustrated in detail. The significance and interpretation of amplitudes and wavelength changes of sedimentary cycles is discussed in this paper.

Key words: sedimentary cycle; stacking pattern; frequency; amplitude; waveform analysis; cyclic sequence