

· 综合研究 ·

# 基于地震道时频分析的地层结构 解析原理和方法

夏竹<sup>\*①②</sup> 刘兰锋<sup>②</sup> 任敦占<sup>③</sup> 魏文博<sup>①</sup> 张振生<sup>②</sup> 宋建国<sup>④</sup>

(①中国地质大学(北京)地球物理及信息技术学院;②东方地球物理公司物探技术研究中心;

③东方地球物理公司石油学会;④中国石油大学(华东)资源与信息学院)

夏竹,刘兰锋,任敦占,魏文博,张振生,宋建国. 基于地震道时频分析的地层结构解析原理和方法. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 57~65, 69

**摘要** 地震时频分析是通过地震信号采用多种数学变换,实现从时频域角度对信号的局部特征进行分解,剖析信号细微特征所对应的地层结构。在应用地震时频分析技术过程中,人们对于这项技术能否真正有效地解决实际地质问题存在许多争论。本文从时频原理综合分析的角度出发,对地震道时频谱中各种频率特性参数和时频旋回直接转化成对地层结构逐级、分步的解析方法进行了较深入的探讨。研究认为时频分析原理不仅是对地震数据进行特殊数学变换,实现对信号的分解,而且充分利用了地层厚度的调谐效应及岩性调谐效应;时频谱与地质结构特征之间良好响应关系为地震地质精细解释提供了直观的依据。

**关键词** 地层调谐效应 傅里叶变换 三角递归滤波 时频谱特征 地层结构解析

## 1 引言

自20世纪60年代以来,国外曾对时频理论进行过许多有益的探索<sup>[1~3]</sup>,尤其是90年代以后,国内外有关时频分析的研究再度兴起,应用范围也越来越广<sup>[4~8]</sup>,近些年已逐渐发展成热点技术。

时频分析就是通过对数字信号采用多种数学变换,如傅里叶、小波、魏格纳-威尔变换等等,实现从时频域角度对信号的局部特征进行分解和描述,以达到对信号细微特征的解剖和更全面地认识。但现今发表的论文和研究成果多侧重于其方法和原理的讨论,而实例偏少,且应用效果至今也难以令人信服。笔者曾就地震资料时频分析的具体应用做过一些时频解释方法方面的初步探讨<sup>[9~11]</sup>,引起了读者诸多共鸣与争论。争论的焦点主要在如下几个方面:对复杂的地震信号仍采用经典傅里叶正反变换法解决局域问题时,本身就存在着理论上的一些局限性,所以时频解释方法和结果有一定的主观性和多解性;运用于时频分析中的零相位双倍频程三角

宽带递归滤波器的设计依据是什么?三角滤波器的工作流程与地层调谐效应及时频谱特征之间的过程响应关系如何?直接利用时频特征对不同尺度地层结构进行精细识别和划分的方法及具体实施步骤等等。本文旨在通过对上述问题进行详细分析和讨论,进一步探讨和完善利用地震道时频谱中各种频率属性特点和时频参数旋回直接转化成陆相砂泥岩薄互层结构的方法。

## 2 地层调谐效应与时频分析中的滤波器设计

### 2.1 地层调谐效应

就地震波对地层的垂向分辨力而言,厚度调谐作用是薄层地震响应的一个重要机理。传统的时间分辨率极限为 $\Delta H = \lambda/4$ ( $\Delta H$ 为岩层调谐厚度, $\lambda$ 为波长)或 $\Delta t = T/2$ ( $\Delta t$ 为时间厚度, $T$ 为视周期)。图1是具有一定波长的地震子波的Widess楔形模型的地震响应解释图版。若按常规信号处理方法和解释技术,当地震资料有效高频成分偏少、频带偏窄

\* 河北省涿州市东方地球物理公司物探技术研究中心, 072751

本文于2006年3月6日收到,修改稿于同年10月20日收到。

时,从地震资料上所能识别出的薄层调谐厚度还远不能达到对实际复杂的地层结构(单一层或砂—泥薄互层组)做更精细描述的要求。因此,一方面,须采取特殊和必要的信号处理手段,以期尽可能地从地震数据中获取更有效、更丰富的频率信息;另一方面,前人有关地层的两种调谐效应分别揭示了岩层中不同物性特征的研究成果,为地层结构解析和薄层分辨提供了新的分析思路。穆申教授<sup>[12]</sup>、Mahradi<sup>[3]</sup>、罗伯卡<sup>[13]</sup>、张玉芬<sup>[14]</sup>、张会星<sup>[15]</sup>等人都曾做过地球物理模型试验和理论计算。除了薄层厚度调谐外,岩石粒度—频率—振幅能量之间同样具有相关性,即存在岩性共振(岩性调谐)(图2),两者的有机结合可使地震信号的潜在分辨率接近 $\lambda/16$ 。从图2中频率—振幅能量分布角度分析,相对粗颗粒成分多集中分布于低、中—低频段(10~35Hz),该频段强振幅能量来自粒级偏粗的厚岩层,即便此间发生“薄层”厚度调谐,对地质上的薄层(数厘米至几厘米厚)分辨已没有任何实际意义,只是为岩性共振贡献了一部分调谐振幅能量而已。而细颗粒成分多发育于中—高、高频段(47~70Hz),其振幅能量强度要明显弱于低、中—低频段(除高频能量本身的自然衰减因素外),但考虑到此频带对应的实际地层厚度相对较薄,故薄层的厚度调谐效应(薄层顶、底干涉)将更为敏感,成为该频段振幅能量的主体。35~47Hz中间频段属两者共同调谐的过渡区。通过以上实验可知,从低频、低—中频成分中得到很厚的调谐岩层其实都是复合粒度分层(由几个或十几个乃至几十个单一岩层组合而成),着重强调对大套岩层的宏观识别;在中—高频及高频段,则偏重于对岩层厚、薄特征的分辨(复合厚度层或单一薄层)。两种调谐作用在整个频带都会发生,并可能出现两种形式的振幅能量叠加效应,因此振幅能量中应同时包含地层厚度和粒度等多重信息,尽管在调谐机理上存在着较明显的主次、强度、频带分布和地层物性响应上的差异。应当指出,上述岩石粒度粗、细和岩层的厚、薄是相对的,陆相地层沉积中岩石粒度粗、细和岩层的厚、薄之间常具有正向关系,即厚、粗对应低频响应,薄、细对应高频响应,有时也会出现相反的情况。了解地层的双重调谐原理有助于对地层特征做出相对更合理、更准确的推断和解释。

## 2.2 时频分析中的滤波器设计

时频分析的基本原理除了对地震数据进行特殊

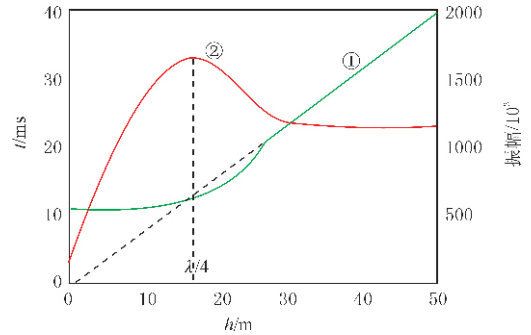


图1 Widess楔形模型的地震响应解释图版

①视时间曲线;②相对振幅曲线

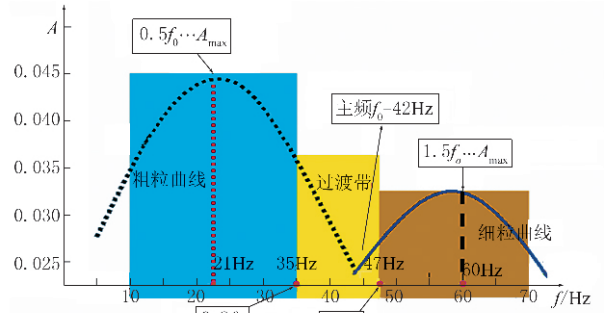


图2 岩石粒度—频率—振幅能量响应关系图

(引自文献[15],本文稍作修编和注解)

的数学变换,以获得对局域信号特征做进一步分解的同时,也充分利用了地层的两种调谐效应,即在有效频带范围试图找到与其相应的岩石(复合)粒度层或复合厚度层(单一层)所对应的最大振幅谱频率位置及所对应的时间点。设测点地震道的记录可用 $f(x, t) = f(x, t - t_0)$ 表达,则地震记录的时间域傅里叶正变换(谱分解)和反变换(谱合成)的积分表达式依次表示为

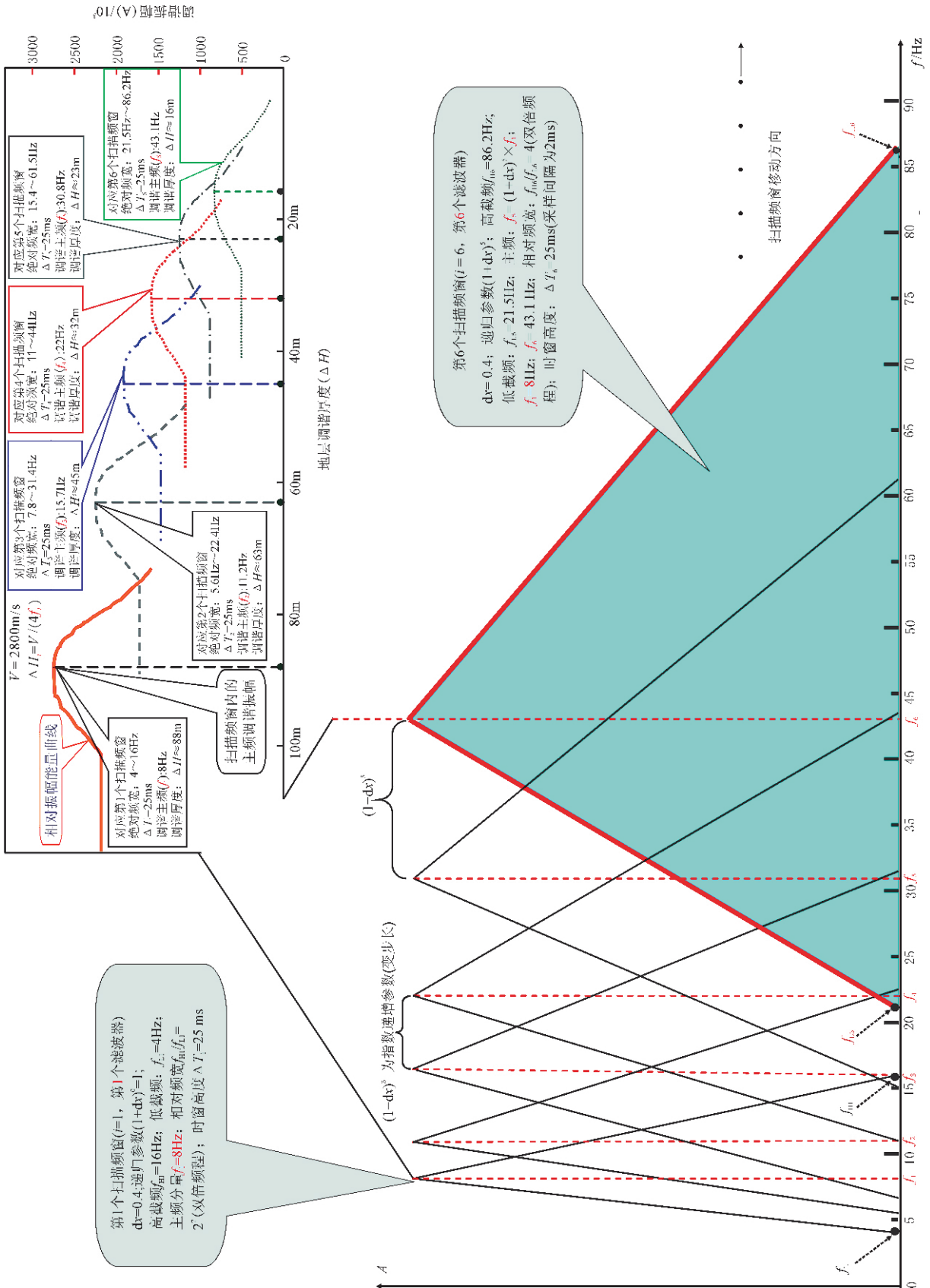
$$F(x, \omega, t_0) = e^{-j\omega t_0} F(x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t - t_0) e^{-j\omega t} dt$$

$$f(x, t - t_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, \omega) e^{j\omega(t-t_0)} d\omega$$

当地震道地震信号通过傅里叶正变换后就得到一系列不同 $f_i$ 分量的谐波群,每个简谐波包括复振幅(其模量是振幅谱,时频分析剖面上的能量曲线与之相应)和相位两部分

$$e^{-j\omega t_0} \frac{1}{2\pi} F(x, \omega) d\omega e^{j\omega t}$$

上述变换通过设计一种双倍频程零相位三角递归宽带滤波器来实现对地震道的频谱分解(图3)。从调谐角度分析,傅里叶正变换中具有不同波长的简谐波都有各自频率值( $f_i$ )所对应的调谐厚度群,



且频率值越高,调谐厚度越薄,故  $\Delta H_i$  似乎是一个动态的调谐厚度( $\Delta H_i = V/(4f_i)$ )。而事实上,利用此调谐厚度推断实际岩层厚度,很多是不存在的,这说明岩层物性在空间上变化非常剧烈。图4是根据一维地质模型进行时频分析的试验结果(傅里叶变换),充分显示在整个频段经常会出现虚假调谐现象(对岩层实施假分层),只有那些粒度或厚度上的岩性自然分层,并在与该岩层、频率值和时间点相对应的位置上发生的调谐作用才是真实、有效的。真、假调谐的区别表现为真调谐能量很强,假调谐频谱常形成多级完全相似对称的镶嵌结构,相邻频段调谐主频的频宽大体相等( $\Delta f \approx 22\text{Hz}$ ),能量相对较弱,且有规律地依次减弱。因此,在频率滤波器设计过程中,通过采用一种特殊的滤波因子进行约束和目标调谐频率加强技术,实现每个扫描频窗的主频和实际调谐作用的有机结合。即当不断移动频窗时,在每个特定宽度的频窗内来搜寻一个与实际地层厚度相适应的、更合理的调谐频率和更强、更集中的调谐振幅能量团(图3上部)。

由图3可以看出,向高频方向移动,时窗高度( $\Delta T_i = 25\text{ms}$ )相对固定,扫描频窗宽度( $\Delta f_i$ )或相邻滤波器主频的确定是以能识别不同厚度的薄层为基本准则。主频间的差值呈指数递增,以适应地震信号在低频段较长时间内频展窄、频率变化慢和在高频段短时间内频展宽、频率变化大的特征,同时兼顾到所响应的薄层厚度呈指数性减小的特点,这正好

满足不同尺度的地层层序体相嵌的原理。扫描频窗( $\Delta f_i$ )个数的确定(等于滤波器个数或被分解的  $N$  个频率分量),是按地震资料的有效频带范围进行计算的,并从低到高依次对应排列,而每个滤波器将分别获得近似来自某一地震道时间域各自所对应的连续滑动时窗中相应扫描频窗内(从低频到高频)的带通滤波记录。经傅里叶反变换后,再把地震道各滤波器的频率记录道排列起来并转换到对应的时间域,得到该道各调谐频率成分( $f$ )和相应的调谐振幅能量( $A$ )随记录时间( $T$ )变化的  $f$ - $A$ - $T$  柱状图,如图5左边所示。它的最基本特征是:不同时段和频段上,只要出现厚度或岩性调谐作用,位于三角形顶点的主频或优势频率就能够较好地突出信号区域性特征,与之对应的实际调谐振幅能量将突显(时频谱图上不同色谱的强振幅能量团);若不发生调谐,振幅能量相对较弱。随着频窗右移,主频值增高,向高频方向虽振幅能量会自然减弱,但只要存在调谐,在相近的频带范围内,物性不同的相邻岩层之间总会表现出振幅能量团相对的强弱变化和调谐频率位置上的差异(指视觉能分辨出的纵向方向性变化),直到被检测的地层厚度逐渐变薄、粒度变细,最终实现对地层结构精细解析的目的。

图3中, $\Delta f_i$  为第  $i$  个扫描频窗的频带宽度(三角形底边); $f_{Hi}$  为第  $i$  个扫描频窗的高截频值; $f_{Li}$  为第  $i$  个扫描频窗的低截频值; $f_i$  为第  $i$  个扫描频窗的主频(优势频率,三角形顶点); $f_H$  为地震资料的

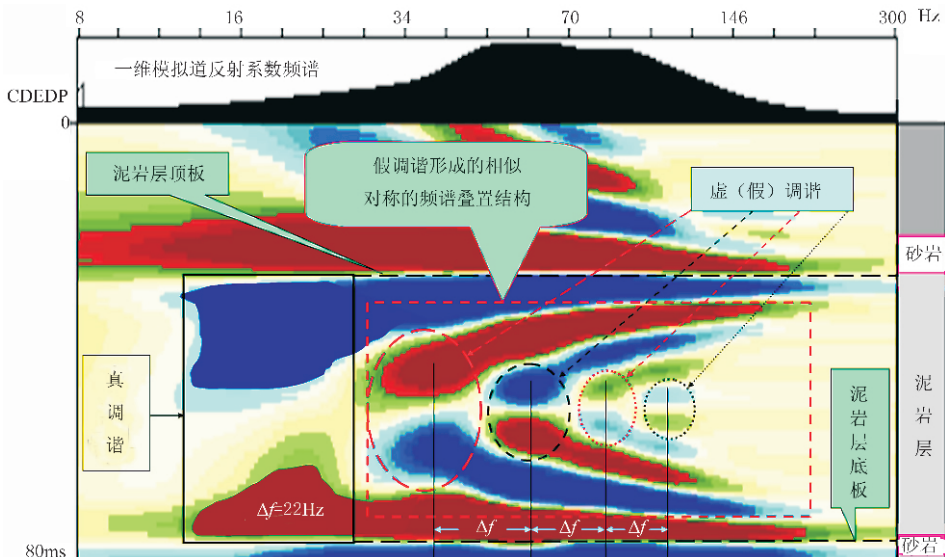


图4 利用一维砂泥互层结构的地质模型制作的反射系数序列时频分析柱  
单层泥岩设计厚度约55m,内部物性均匀、实际不分层,速度为2000m/s



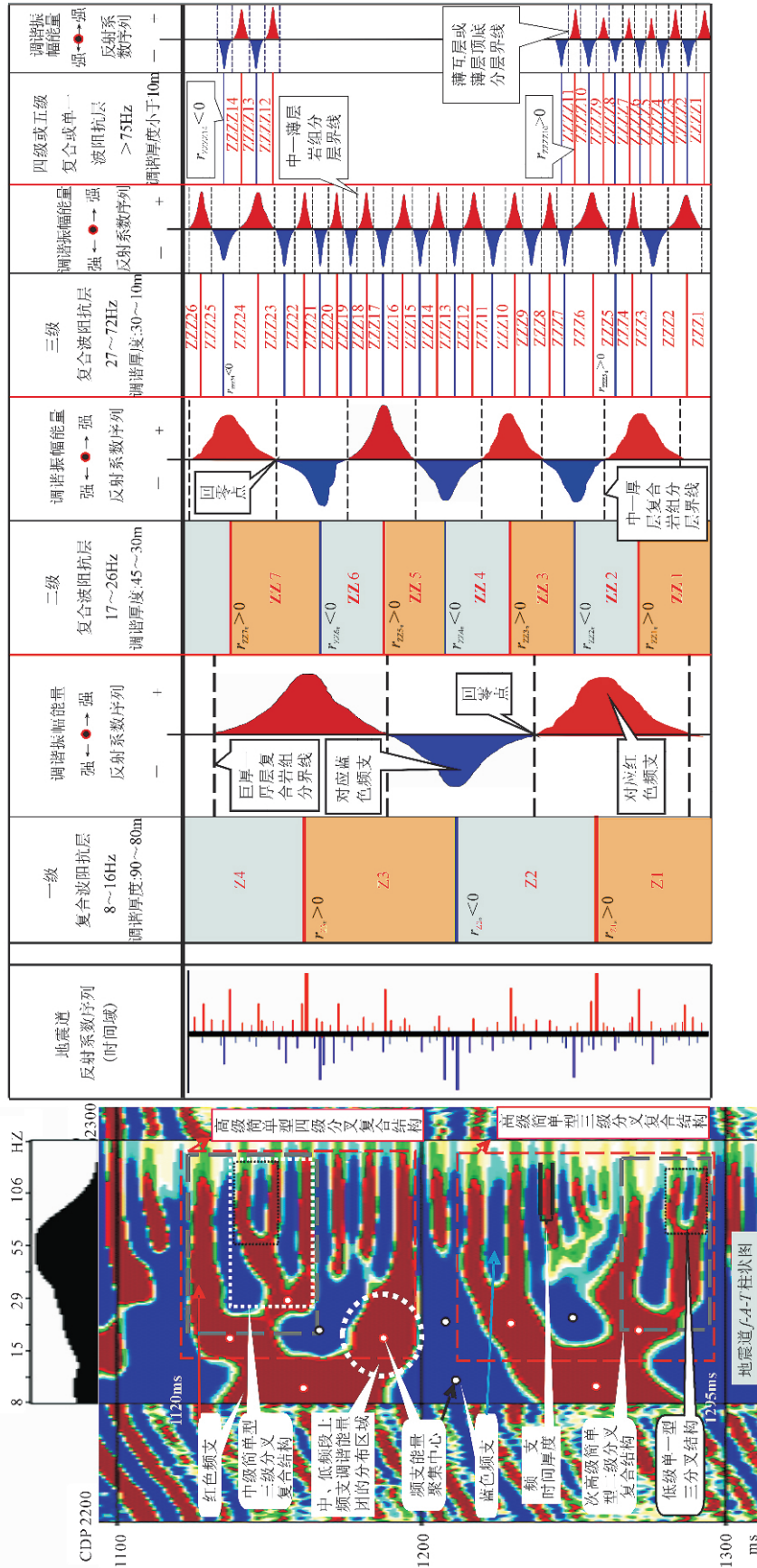


图5 利用地震道时频谱结构和地层调谐效应进行地层物性结构逐级解释的过程示意性图解

有效高截频率,  $f_L$  为地震资料的有效低截频率;  $dx$  为扫描频窗中的固定参数,  $(1+dx)^i$  为主频递归参数(或指数递增参数);  $\Delta T_i$  为与第  $i$  个扫描频窗相对应的扫描时窗高度(ms);  $N$  为滤波器个数(地震道被分解出的  $N$  个频率分量)。  $\Delta f_i = f_{Hi} - f_{Li}$ ,  $f_{Hi}/f_{Li} = 2^2$  (双倍频程),  $f_{Hi} = 2 \times f_i$ ,  $f_{Li} = 0.5 \times f_i$ ,  $f_{i+1} = (1+dx) \times f_i = 1.4 \times f_i$ ;  $f_i = (1+dx)^{i-1} \times f_1$  (递归),  $dx = \exp\{[\lg(F_H) - \lg(F_L)]/N - 1\} - 1.0$ ,  $dx \approx 0.38$  (一般情况下该值变化较稳定);  $i = 1, 2, 3, \dots, n, \dots$ 。滤波器( $N$ )个数越多,  $dx$  就小些(但  $dx < 0.4$ ), 相邻扫描频窗的主频间隔就密, 主频的指数递增速度变慢—— $(1+dx)^{i-1}$ 。但在实际应用时, 该参数的选取主要是依据地震资料的有效频带和被分析地质目标的尺度大小和横向稳定性而定, 一般取  $dx = 0.04 \sim 0.4$  之间的某个值。

另外, 所设计的滤波器须符合以下原则: ①滤波器频率响应极大值突出, 旁瓣低平, 确保滤波器提取的能量尽量反映主频成分的强弱; ②滤波器频率响应有一定的宽度(双倍频程), 使输出信号延续时间较短, 保证一定的分辨率; ③滤波器时间响应的时移为零, 采用零相位滤波器; ④对不同扫描频率, 滤波器的频率响应要相似, 便于对比, 故要求滤波器的低截频陡度和高截频陡度固定。

### 3 基于地震道时频谱的地层结构解析方法

对我国东部某区三维地震数据体中地震道应用上述三角滤波技术, 把地震道沿时间域按频率成分展开后, 结合钻、测井等资料及地层的调谐特征, 通过对地震道时频谱的解剖, 间接地提取并推测地层结构特征, 诸如岩性、岩层厚度、地层界面等有关的各种地质信息(图5、图6)。

该区地震资料主频为 65Hz 左右。依照图2的推算, 地层频率小于 50Hz 和大于 65Hz 分别是岩性共振和薄层厚度调谐的主要发生频段。研究区待分析的地质目标属于中生代早白垩世地层, 具有拗陷型湖盆三角洲环境下的砂泥岩薄互层结构特征。该区邻井地震道上双程旅行时间厚度约 175ms(1120~1295ms), 对应的地层厚度约 245m(岩性序列是根据其毗邻多口井的岩性柱进行横向综合对比推断出来的; 利用速度谱和邻井声波测井资料, 取砂岩和

泥岩的平均层速度为 3300m/s); 单个岩层厚度介于 5~10m 之间。

#### 3.1 分叉节点特征描述与频带划分、地层级序确定

地震道时频谱普遍具有横向多级分叉特征(二到五级)。分叉节点是指位于相对低频的主频支分解出相对高频的多个次级频支时, 主、次频支间形成的交会点。节点可划分为单柄型和双柄型两种(图6)。横向不同级次的节点是随着频率的提升, 频率对地层的分辨能力增强, 相继出现在不同的频率和时间位置上, 它预示该套地层内部因物性差异(岩石粒度、岩层厚度及地层含油气水特征等)将逐步产生分级和分层特征; 而垂向上在相对较短的年代跨度内, 当沉积相变较稳定时, 相同等级的节点频率值一般都变化于特定的频率范围内, 反之亦然。故同级节点的频值摆动幅度实际上反映纵向某一级次地层序列的内部地层厚度或粒级或沉积微相的分异性。先利用相应级次的分叉节点连线旋回直接识别和划分不同频带的边界, 该边界在时空域是一条曲线, 完全符合地层在横向和垂向上多变的沉积发育规律。例如, 通过一、二级节点连线可以划分出低频(8~16Hz)、中—低频(17~26Hz)两个频段, 三、四、五级节点连线可识别出中频(27~42Hz)、中—高频(43~72Hz)和 高频(>75Hz)等三个频段; 再按照以上各频带来确定地层级序的划分(发育规模与等级), 如低频、中—低频、中频、中—高频(图中合并)、高频四个频段分别对应 I 级岩组序列(厚层—粗粒层结构)、II 级岩组序列(中—厚层—粗粒层结构)、III 级岩组序列(中层—中粒层结构)和 IV 级岩组序列(薄互层、单层—细粒层结构); 最后依据节点发育级序和个数进行时频谱结构类型、级序的初步识别和划分。上述基于节点特征的频带划分准则, 为下一步对地震资料进行正确的时窗选择与分频以及地质目标的精细研究提供了合理、科学的约束条件。

#### 3.2 主要频率参数特征、频谱结构划分与地层结构的解析

##### 3.2.1 主要频率参数特征描述及地质意义

(1) 频支为对地震道整个有效频段上数个滤波扫描频率道所对应的调谐振幅能量沿某一时间域连续聚集而形成的一种特殊频谱现象的刻画, 频支长短不一(起始点不同), 多呈条带状、分叉树枝状, 近于平行的展布。

频支形成的地球物理—地质响应受地层调谐作

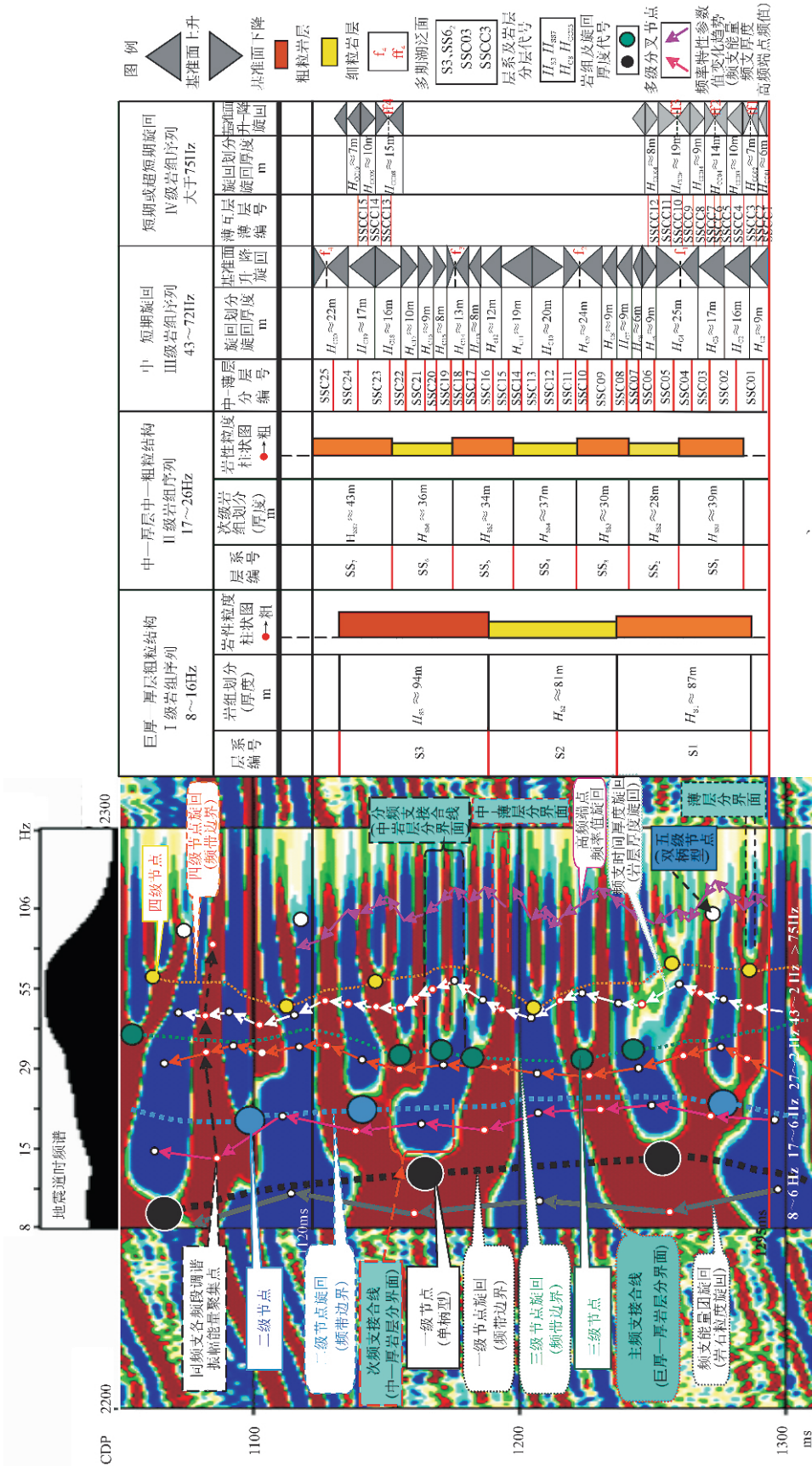


图6 利用地震道时频谱进行地层结构、多级节点和频率特性参数进行地层结构逐步解析的示意图



用的影响可从图5中得到进一步解释。高级复合层通常是由一系列层状、物性相近的粒级层复合而成,它的复合密度( $\rho_c$ )和复合层速度( $V$ )是其所包含的多个次一级复合层或单层的密度( $\rho_i$ )和层速度( $V_i$ )累积统计的平均波阻抗效应,依次类推到单个岩层。所以地层逐级分解特点实际上是波阻抗的分级分层,表现在时频谱上的重要特征就是频谱结构类型的差异、频支延续长短的不同和多级分叉性,频支的延伸方向与地层的层状叠置相一致。时频谱中各频支的强振幅是一个调谐概念,其能量团中心近似地对应某粒度层粒级最集中位置或厚度层的中部,与常规的地震反射界面(强振幅能量或强同相轴对应波阻抗分界面)的含义有差别。若岩层(复合层或波阻抗层)顶面反射系数为正(+),可视为时间域该层的反射波调谐频谱为正振幅能量(右),频支用朱红色色标表示;若层顶面的反射系数为负(-),则反射波调谐频谱为负振幅能量(左),频支振幅能量用深蓝色色标表示;能量强弱横向上用相对幅度大小(长短)来标识(也可从时频柱能量分布曲线上量化显示);频支之间的接合线(能量偏弱区域)大体接近于波阻抗分界面或地层界面。

(2)频支能量团为单一频支中强能量相对聚集的近圆形分布区域。在整个有效频带,同一频支可出现多级次、强弱不等的频支振幅能量团,分别反映了某一时段与地层岩性(优势粒级)或厚度(调谐厚度)相对应的调谐频率和调谐振幅能量相对聚集的特点。该参数主要发育于低、中频段,是岩石粒度分层的标识性振幅属性信息,故更适用于对粒级较粗或厚度较大的地层做解释。在垂向相同的窄频带范围,红色的频支能量团(正极性)比蓝色频支能量团(负极性)所反映的岩层在粒度上要显得粗一些。

(3)频支能量团聚集点指不同频带频支频团中最大能量聚集焦点(高频段不易识别)。它构成了时域相邻频支调谐能量变化的过渡点(强→弱,弱→强)或转换点(弱←强→弱,强←弱→强),也是划分垂向频支能量团旋回的连接点。在特定频带内,该参数所处频率值又对应于某套粒度层内部的最粗或最细粒级密集段的时间分布位置。

(4)频支时间厚度为对时间域单一频支顶、底之间厚度的一种度量。它指示着不同尺度的地层发育厚度,频支顶、底界线(频支接合线为边界)分别与岩层(复合层或单层)的顶、底分界面相呼应。该参数

主要运用于中、高频段的时频解释。

(5)频支接合线指相邻频支间的接合处,时间延续很短,呈近平直状分布。按频率起始点和延伸长度的不同,有规模大小和主次之分,但基本不分叉。它代表着振幅能量弱值分布域(色标为浅黄色或黄绿色),该线大体指示着不同级次的层与层之间的分层界线(分隔面)。

(6)频支高频端点频率值指频支向高频方向延伸至频支能量终止点的有效频率值。频支高频端点频率值所构成的纵向旋回揭示了最低一级(短期或超短期基准面旋回)的地层内部细节,是一种用来甄别薄层(薄砂层)厚度和粒度特征的较有效的方法。

从地层调谐角度来看,当频率小于50Hz时,以岩性调谐为主,响应高级、较高级和中级复合层,复合层厚度较大、岩石粒度相对偏粗,单一频支的时间厚度大、能量较强,且在该频带出现明显的多个频支能量聚集带;当频率大于65Hz时,对应于低级复合层或薄互层组、甚至到单层,层厚度明显变薄、岩石粒度也变细,此时单一频支的时间厚度往高频方向逐渐变薄、能量变弱,尤其是频支能量团单从视觉上已越来越难以分辨了。

总之,上述几个频率特性参数,包括节点、节点旋回和频谱结构类型等,构成了地震道时频谱的总体特征要素,它们与地层特征之间形成的良好响应关系是进行地层学解释的基础和重要依据。

### 3.2.2 频谱结构划分与地层结构的识别

(1)依据地震道时频谱形态表征,可划分出8种单一型频谱基本结构(形态分类):三分—侧三分型、花瓣型、扇—半扇型、二分—侧二分型、弧—半弧型、不分叉型、线型和不规则型,其中前6种最常见<sup>[10,11]</sup>。结合这8种单一基本结构类型和多级分叉特点,可进一步识别出简单型、复杂型两种频谱复合结构(图5)。简单型复分叉复合结构由多个相同的单一结构类型复合而成;复杂型复分叉复合结构指两个以上不同单一结构类型的组合。从外部形态来看,复合结构本身有明显的顶、底边界,非常易于识别,并包含多个分叉节点。从内部结构来看,每个复合结构都由外型镶嵌的、级次逐渐降低的次级复合结构及单一结构所构建,由外向内,对应的地层级序(岩组、层序或旋回)逐渐降低。对地震道时频谱复合结构的识别、分类和分析有助于对多级次层序地层结构特征的精细解剖。



(2)从地震道整个时域有效频带范围看(图 5、图 6),其时频谱上规模最大一级的单个高级复分叉复合结构都代表着相对独立的、彼此有别的 I 级岩层组合体,其上、下(顶、底)边界(主频支接合线)指示着大套层(复合层或层组)与层(复合层或层组)之间的高级分隔面,也可能对应于较大规模、高级别的地层层序分界面(区域性不整合面或岩性突变界面),它们的地震响应类似于水平层状介质的褶积地震模型的响应,表现为反射界面的振幅能量强,频带较宽,波形相对稳定,其地震反射特征基本不随频率值的高低而发生变化,但向高频方向总体振幅能量是逐渐减弱的。镶嵌于高级复分叉复合结构中的次高级复分叉复合结构(频带向高频方向移动)代表着 I 级岩层组合体内部将进一步分化成 II 级岩层组合体,同样其上、下(顶、底)边界(次频支接合线)指示着中套层(中级复合层或单层)与层(中级复合层或单层)之间的次高级分界面,相当于规模相对较小、级别较低的地层分界面(局部不整合面或岩性岩相变化分界面或短时间沉积侵蚀间断面等),依此类推至完成对单一时频谱结构的精细解剖。从时频谱结构上确定了不同尺度地质单元的顶、底分界面后,就可以进行详细的地层划分,然后利用顶、底间时间段或各频段单一频支的时间厚度和层速度,分别计算出每套地层结构、复合层、旋回层或单层的实际地层厚度。

### 3.3 时频旋回类型与地层内部旋回的划分

(1)地震道时频谱中频率特性参数在时间域不同频带上常形成各种类型的纵向时频旋回。如图 6 中的频支能量团强弱变化旋回(频率小于 50Hz 的频带,岩石粒度响应,中、低频段易分辨)、频支时间厚薄变化旋回(频率大于 65Hz 频带,岩层厚薄响应,中、高频段视觉可分辨)、频支高频端点频率值高低变化旋回(频率大于 75Hz 频带)及节点频率值高低变化旋回(频率大于 8Hz 频段)等。时频旋回形成机理是:由于各级次岩层与岩层之间普遍存在着整体上物性不均匀,以及岩层内部局域上的粒度或厚度上的波动,都将引起整个频带上地层调谐类型的差异、频谱特性参数的变化,以及正、负调谐振幅能量在时间位置和调谐频率大小分布上的方向性等,从而形成垂向上各种时频旋回。

(2)利用时频谱图上频支能量团旋回和频支时间厚度旋回能直接解析出多级次岩石复合粒度粗一

细旋回层(复合波阻抗层)和多级次复合厚度或单一岩层厚薄变化旋回层(见图 6);利用频支高频端点频率值旋回识别和划分到相对更薄和更细的薄互层组或单层结构(短期或超短期地层基准面旋回);节点频率值旋回可作为时域各时间段分频分级的依据和其他旋回划分的控制边界。

通过对研究区十口井旁地震道的时频→地层结构(多期地层旋回)的解剖研究,并与实际井岩心柱地层序列、井曲线特征和井高频地层旋回的验证、对比发现,井—震平均符合率达 70% 左右。地震道时频谱中较高频带的时频旋回(频支时间厚度旋回、频支高频端点频率值旋回)与井的中—短期或短期地层旋回具有更好的可比性。

特别值得提出的是,为确保解释方法的有效性,减少模糊性和多解性,在时频解释过程中应严格遵循以下原则:①各等级的时频旋回的识别、划分和对比必须限定在各自对应的频带范围和相应规模的顶、底时间分界面所确定的时频窗内(跨频段解释将人为地导致不同规模的地层、不同期次的旋回交叉混叠,纵、横向地层分析结果的可信度降低),并要根据研究对象和频带的不同,正确、合理地选择相应频带上的频率特征要素;②判断时频道上各频支较高频端点频率值是否有效,关键是看对应该频值的调谐振幅能量团在垂向上能否被分辨并具有旋回性或方向性变化;③若侧重于获得砂—泥岩薄互层结构的厚度参数,建议利用较高频带的时频旋回作解释。

## 4 结论

(1)地层调谐效应有薄层厚度调谐和岩性共振之分,在整个有效频带,两者均起作用,但在不同频段上却明显存在主次之分,薄层厚度调谐侧重于地层厚度检测,而岩性共振可用于岩石粒度的检测。

(2)双倍频程零相位三角递归宽带滤波技术充分体现了把时频局域分析和地层调谐作用紧密联系起来的实用性设计理念,较好地实现了基于地层学意义前提下对地震数据的变换。

(3)地震道时频谱既反映了局域信号特征,又是地层调谐作用的产物;时频谱与地质特征之间形成的良好响应关系为地震地质的精细解释搭建了一座真正的桥梁。

(下转第 69 页)