

瞬时谱数据的谱加权自适应带通滤波融合

陈学华*^{①②} 钟文丽^③ 贺振华^① 杨威^②

(^①成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都 610059; ^②成都理工大学地球物理学院,四川成都 610059; ^③成都理工大学地球科学学院,四川成都 610059)

陈学华,钟文丽,贺振华,杨威. 瞬时谱数据的谱加权自适应带通滤波融合. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 452~456

摘要 为了快速提取地震谱分解数据中的储层特征信息,本文提出一种将瞬时峰值振幅和峰值频率属性数据进行融合的方法,它采用随频率自适应调节滤波带宽的高斯基函数,可反映时频域地震信号在低频端具有很高的频率分辨率,高频端具有较低的频率分辨率的特征;并以峰值振幅属性作为权重,将两种谱分解属性数据映射为颜色融合数据。实际资料的应用表明,该法可反映瞬时谱主振幅随频率的变化,刻画储层的空间展布、几何形态、相对厚度和含流体情况等,快速提取谱分解数据中的有效地质信息,提高解释的效率。

关键词 谱分解 峰值振幅 峰值频率 自适应带通滤波 数据融合 储层描述

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 引言

谱分解是提取储层地震响应的振幅、相位等参数随频率的变化特征,利用地震信号不同频率成分的信息进行储层描述与流体识别的重要工具^[1~7]。应用谱分解技术常常会生成数十个以上的瞬时谱属性数据体,虽然有助于充分利用地震资料多个频率分量的信息反映储层结构特征,但存在解释工作量大,存储资源消耗高的问题^[3, 6, 8~15]。为了解决这一问题,Stark^[8]将不同频率的谱分解数据体简单地分为低、中、高三个频段后取平均,并分别映射为RGB(红、绿、蓝)三原色分量后融合成单个的真彩色数据体,但易丢失和破坏瞬时谱的主要特征信息^[9],且易受人为主观因素的影响^[10, 11]。此法的优点在于可利用主成分分析方法(PCA)将高维谱分解数据变换为3个主成分后分别映射为RGB三原色分量,再进行融合显示^[10~12],利用数学变换方法较好地挖掘了地震资料中不同频率的振幅属性信息,减少了主观因素的影响。然而,在谱分解数据中,不

同频谱振幅(或能量)随频率的变化与储层的厚度和流体等性质有关^[1~7, 13, 16],但PCA未考虑这种频率变化特征,使融合的数据难以充分反映储层的上述特征信息。

Marfurt等^[3]在基于短时傅里叶变换的谱分解中发现,峰值谱振幅及其对应的峰值频率是概括全频带瞬时谱主要信息的良好属性,由于峰值频率会随储层厚度降低而增大,故可反映储层相对厚度的变化。Liu等^[9]用基于升余弦窗的基函数,开发了一种将峰值谱振幅和峰值频率组合起来显示的方法^[9, 13]。由于地震信号本身存在时变频率分布特征:即在低频端应具有很高的频率分辨率,而在高频端的频率分辨率可以较低^[17~19]。本文基于地震信号时变谱的这种多分辨率特性,提出了一种依赖峰值频率的自适应可变高斯窗为基函数的数据融合方法,实现峰值谱振幅和峰值频率属性的信息融合。

2 方法的基本原理

Liu等^[9]利用自变量为频率的升余弦窗作为基

* 四川省成都市成都理工大学地球物理学院,610059。Email:chen_xuehua@163.com

本文于2011年7月18日收到,最终修改稿于同年10月4日收到。

基金项目:国家自然科学基金(41004054)资助项目;高等学校博士学科点专项科研基金(20105122120002)资助项目;四川省教育厅自然科学基金重点项目(092A011)资助。

函数,对谱分解的峰值振幅和峰值频率数据映射为不同亮度和颜色的色标后进行融合显示^[9, 13],由于升余弦窗为固定窗,对于储层展布特征的刻画与流体信息的提取,基于可变窗函数的时频分解具有更高的分析能力^[4, 5, 19, 20],对于基于此类时频分解生成的谱分解数据,存在低频分量的频率分辨率高(即时频域的频带窄),高频分量的频率分辨率低(即时频域的频带宽)的固有特征,即在时频域,信号分量的频率延续度是随频率增加而增加的。因此,在地震的有效频带内,谱分解的峰值振幅与峰值频率信息若以可变窗函数实现不同亮度和颜色的色标的映射,则更能有效刻画地震谱分解数据的上述固有特征。

首先,利用高斯类函数,定义与谱分解的峰值频率相关的 RGB 三原色自适应带宽的频率域带通滤波基函数

$$MB_{C_i}(f_p) = \exp\left[-\frac{(f_p - f_{C_i})^2}{2(\delta f_{C_i})^2}\right] \quad (1)$$

$C_i \in \{\text{Red, Green, Blue}\}$

式中: $MB_{C_i}(\cdot)$ 为某一原色的滤波基函数; f_p 为谱分解后的峰值频率属性信息,单位为 Hz; f_{C_i} 为某一原色(分别为红绿蓝三种原色)对应的中心频率,单位为 Hz。式(1)的分母包含原色的中心频率,故 f_{C_i} 决定基函数的频带宽度,确定某一原色基函数覆盖的频带范围。 f_{C_i} 越高,该频率范围内的瞬时谱数据的频率分辨率相对越低,正好用较宽的基函数进行映射;反之, f_{C_i} 越低,该频率范围内的瞬时谱数据的频率分辨率较高,从而用较窄的基函数进行映射。因此基函数的频带宽度是随中心频率 f_{C_i} 的增加而增加的。式(1)中的 δ 用于调节这种变化的速度, δ 越小,基函数越窄,相近颜色映射的频带范围越小;反之, δ 越大,基函数越宽,相近颜色映射的频带范围越大。

令中心频率 f_{C_i} 分别为 $f_{\text{red}} = 10\text{Hz}$ 、 $f_{\text{green}} = 40\text{Hz}$ 和 $f_{\text{blue}} = 60\text{Hz}$, $\delta = 0.45$,按照式(1)计算的红、绿、蓝三原色基函数分别为 $MB_{\text{red}}(f)$ 、 $MB_{\text{green}}(f)$ 和 $MB_{\text{blue}}(f)$ (图 1)。图 1a 是利用式(1)计算的基函数映射的 RGB 三原色分量,从图中可见,基函数的频带宽度随中心频率 f_{C_i} 的增加而增加,通过这种映射,可使每一个峰值频率均对应一组不同的 RGB 三原色组合,从而可对每一个峰值频率数据映射一种颜色(真彩色)表示。图 1b 是权值为 255 时

基函数对峰值频率映射的各颜色分量的色标及其组合成的真彩色色标。

通过上述映射实现谱分解的峰值频率数据与 RGB 三原色的映射后,令其亮度级数为 C_s ,则可形成一维色标构成的具有不同亮度级的二维色标 $CM(C_s, f_p)$,亮度相当于基函数的权重,由数字图像原理可知,权值为 255 时色标的亮度最大,权值为 0 时亮度最暗。权重通过谱分解的峰值振幅数据计算,即

$$AW(f_p) = \frac{255\{A(f_p) - \min[A(f_p)]\}}{\{\max[A(f_p)] - \min[A(f_p)]\}} \quad (2)$$

式中: $AW(\cdot)$ 为颜色的权重; $A(f_p)$ 为谱分解的峰值振幅属性数据,也可利用峰值振幅与平均振幅的差计算。上式的值域为 $[0, 255]$ 。

谱振幅加权的 RGB 三原色带通滤波映射的处理步骤为:

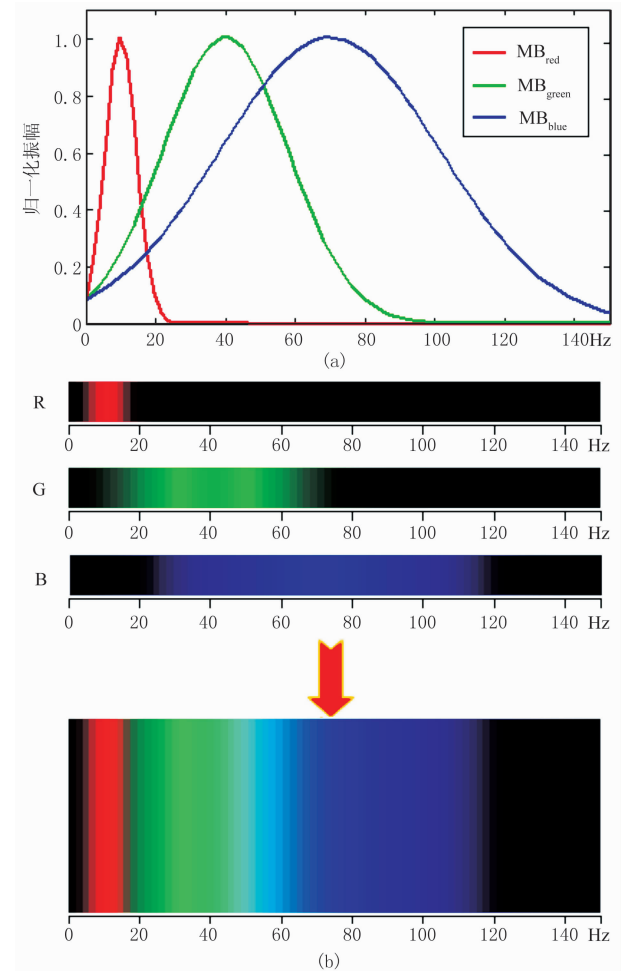


图 1 自适应带宽的 RGB 映射

(a) 自适应带宽的 RGB 基函数; (b) 映射的各颜色分量及其组合色标

(1)利用时频谱分解对地震数据体谱分解后,提取并生成峰值频率及其对应的峰值振幅(或峰值振幅与平均谱振幅的差)属性数据体;

(2)在有效频带范围内,选取 RGB 分量的中心频率 f_{Ci} 及亮度级数(可根据需要分为 16、32、64、128 或 256 级颜色亮度),并利用式(1)的基函数构建二维色标(或颜色平面) $CM(C_s, f_p)$, 二维色标中的每一种颜色是由峰值频率和峰值振幅两个属性同时确定的,具有唯一的映射关系(图 2)。

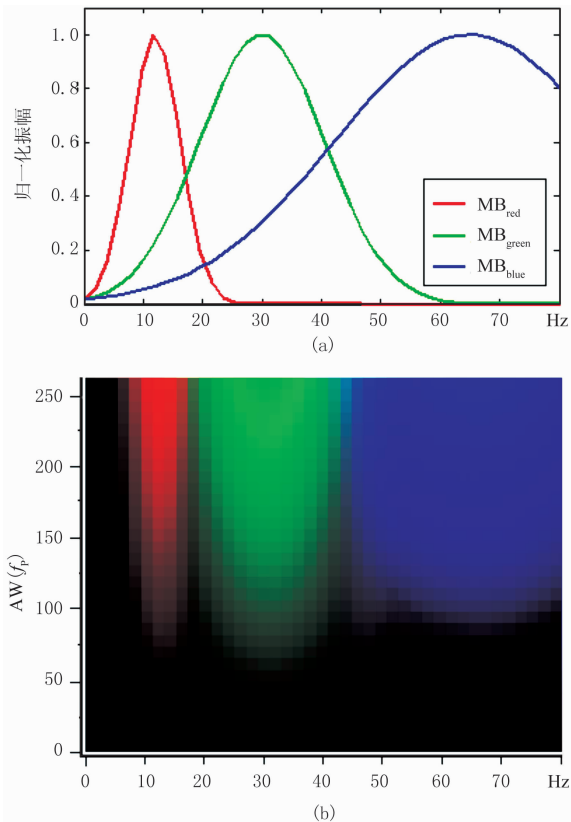


图 2 NH 地区数据融合色标

(a) 自适应 RGB 基函数; (b) 二维色标

(3)利用式(2)计算峰值振幅属性的权重,获得亮度级,结合峰值频率属性,即可在二维色标中映射相应的融合颜色,最后生成新的用色标表示的融合数据体。

3 应用实例

本文对 NH 地区的三维地震数据体进行了处理,首先生成瞬时峰值振幅数据体及对应的瞬时峰值频率数据体,令中心频率 f_{Ci} 分别为 $f_{red} = 12\text{Hz}$ 、 $f_{green} = 30\text{Hz}$ 和 $f_{blue} = 65\text{Hz}$, $\delta = 0.35$,按照式(1)计

算的红、绿、蓝三原色基函数分别为 $MB_{red}(f)$ 、 $MB_{green}(f)$ 和 $MB_{blue}(f)$ (图 2a),颜色亮度分为 32 级,构建了二维色标映射表(图 2b),其峰值频率频带区间位于 $0 \sim 80\text{Hz}$ 。

该区为三叠系的辫状河沉积,主力储层以河道沉积砂体为主。图 3 为 NH 地区瞬时谱峰值振幅与峰值频率数据融合结果。图 3a 是过 NH1 井的纵向剖面,井轨迹处标注了气层顶底(绿箭头所指),为凝析气藏,储层厚度为 10m,平均孔隙度为 23.9%。图 3b 为自适应数据融合剖面,其上部为偏绿至偏蓝的颜色,指示中高频分量(图 2b),而在剖面下部则主要为偏红至偏绿的颜色,指示中低频分量(图 2b),直观地反映了地震信号的频率随着传播深度的增加而降低的趋势。

尤其重要的是:油气储层本身(图 3b 中绿箭头标注)明显表现为高亮度的绿色,从图 2b 中可知绿色处于中频段,而在显示绿色的油气储层下部出现了明显的红色区域(图 3b 中椭圆),由图 2b 可知红色处于低频段,油气储层上、下部表现为从中频到低频的变化,出现了频率衰减,这一低频异常即为与油气储层有关的“低频阴影”。

图 3c 为目的层原始数据的地震振幅切片,图 3d 是从基于上述方法的融合数据体中抽取的穿过目的层段的切片。图 3d 清晰地刻画了三叠系辫状河三角洲砂岩油气储层的平面展布及其几何形态(红箭头标注),且储层内部显示了不同的颜色,这与储层相对厚度存在一定的对应关系:低频(红色)对应相对较厚的储层;而高频(偏绿色、偏蓝色)对应相对较薄的储层。不同的颜色反映了该砂岩储层沉积特征的横向变化,而这些信息在原始地震振幅切片(图 3c)中是难以辨识的。图 3e 为基于固定升余弦窗的数据融合切片,图中显示的砂岩油气储层不如图 3d 清晰突出,其展布特征和边界(红箭头)不易识别。

图 4 为本征结构相干(C3)的信息与图 3d 的自适应融合数据再融合结果,其中按照高相干值(指示横向连续性好)设置相对高的透明度,低相干值(指示横向不连续性)设置相对低的透明度。由图 4b 可见,切片中既清楚地显示了砂岩储层的几何形态和边界(红箭头与点黄线),而且刻画的断层信息比相干切片更清晰突出(黄箭头),并保留和突出了自适应融合数据和相干数据两者的有效地质信息。

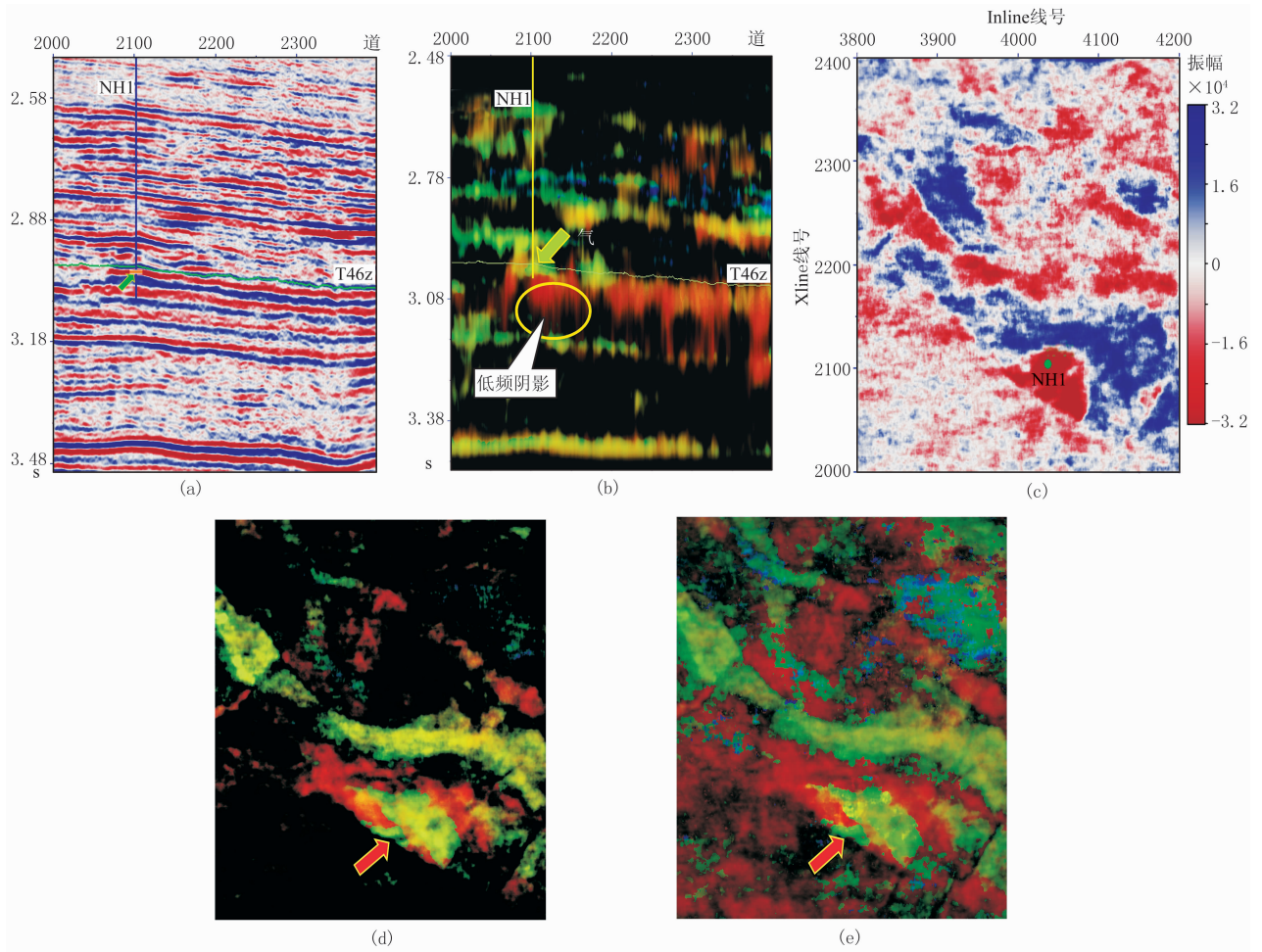


图 3 NH 地区瞬时谱分解数据融合

(a)原始地震振幅剖面;(b)自适应数据融合剖面;(c)过目的层原始地震振幅切片;(d)自适应数据融合切片;(e)固定的升余弦窗数据融合切片;图 3b、图 3d、图 3e 色标与图 2 同

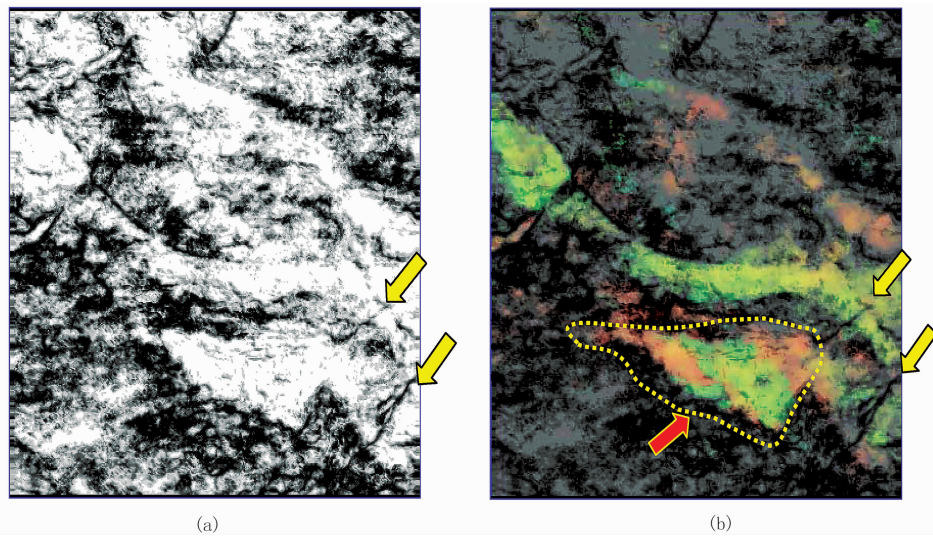


图 4 相干与自适应融合数据的再融合

(a)C3 相干切片;(b)相干与自适应融合数据再融合切片

4 结束语

本文的数据融合反映了地震信号的本质特征,即在时频域,地震信号的低频分量频带窄,高频分量的频带宽。利用随频率自适应变化的高斯基函数,将基于可变窗函数的地震资料瞬时谱分解生成的瞬时峰值振幅和峰值频率属性数据降维和融合,可反映瞬时谱主振幅随频率的变化,刻画储层的空间展布、几何形态、相对厚度和含流体情况等。与地震资料谱分解及其他属性组合应用,可快速提取谱分解数据中的有效地质信息,提高成果数据解释的效率和可靠性。

感谢成都理工大学“中青年科研骨干教师培养计划”对本文研究工作的支持,感谢博士生高刚在本文部分图件制作过程中提供的帮助。

参考文献

- [1] Peyton L, Bottjer R, Partyka G. Interpretation of incised valleys using new 3-D seismic techniques; a case history using spectral decomposition and coherency. *The Leading Edge*, 1998, 17(9): 1294~1298
- [2] Partyka G, Gridley J, Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*, 1999, 18(3): 353~360
- [3] Marfurt K J, Kirlin R L. Narrow-band spectral analysis and thin-bed tuning. *Geophysics*, 2001, 60(4): 1274~1283
- [4] Sinha S, Routh P S, Anno P D, Castagna J P. Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. *Geophysics*, 2005, 70(6): P19~P25
- [5] Castagna J P, Sun S, Siegfried R W. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, 2003, 22(2): 120~127
- [6] 陈学华,贺振华,黄德济. 基于广义 S 变换的地震资料高效时频谱分解. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(5): 530~534
Chen Xuehua, He Zhenhua, Huang Deji. High-efficient time-frequency spectrum decomposition of seismic data based on generalized S transform. *OGP*, 2008, 43(5): 530~534
- [7] 陈学华,贺振华,黄德济等. 时频域油气储层低频阴影检测. *地球物理学报*, 2009, 52(1): 215~221
Chen Xuehua, He Zhenhua, Huang Deji et al. Low frequency shadow detection of gas reservoirs in time-frequency domain. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(1): 215~221
- [8] Stark T J. Visualization techniques for enhancing stratigraphic inferences from 3D seismic data volumes. *First Break*, 2006, 24(4): 75~85
- [9] Liu J, Marfurt K J. Multicolor display of spectral attributes. *The Leading Edge*, 2007, 26(3): 268~271
- [10] Guo H, Marfurt K J. Principal components analysis of spectral components. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2006, 25: 988~992
- [11] Guo H, Lewis S, Marfurt K J. Mapping multiple attributes to three-and four-component color models: a tutorial. *Geophysics*, 2008, 73(3): W7~W19
- [12] Guo H, Marfurt K J, Liu J. Principal component spectral analysis. *Geophysics*, 2009, 74(4): 35~43
- [13] Liu J, Marfurt K J. Instantaneous spectral attributes to detect channel. *Geophysics*, 2007, 72(2): P23~P31
- [14] Blumentritt C H, Marfurt K J. Highlight volumes: Condensing spectral decomposition to two volumes. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2007, 26: 861~864
- [15] Blumentritt C H. Highlight volumes: reducing the burden in interpreting spectral decomposition data. *The Leading Edge*, 2008, 27(3): 330~333
- [16] Chen G, Matteucci G, Fahmy B et al. Spectral-decomposition response to reservoir fluids from a deep-water West Africa reservoir. *Geophysics*, 2008, 73(6): C23~C30
- [17] Chakraborty A, Okaya D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods. *Geophysics*, 1995, 60(6): 1906~1916
- [18] 张贤达. 现代信号处理. 北京:清华大学出版社, 2002, 378~379
- [19] Reine C, Baan M, Clark R. The robustness of seismic attenuation measurements using fixed- and variable-window time-frequency transforms. *Geophysics*, 2008, 73(6): C23~C30
- [20] Castagna J P, Sun S. Comparison of spectral decomposition methods. *First Break*, 2006, 24(3): 75~79

(本文编辑:金文昱)