

文章编号: 0253-9985(2009)02-0245-05

川西坳陷须家河组小波域层间吸收属性应用研究

徐天吉^{1,2}, 程冰洁³, 唐建明¹, 李显贵¹

(1. 中国石油化工股份有限公司 西南分公司 勘探开发研究院 德阳分院, 四川 德阳 618000)

(2. 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)

(3. 中国石油化工股份有限公司 西南分公司 博士后科研工作站, 四川 成都 610081)

摘要: 基于小波理论, 对地震资料进行小波域分频成像处理, 具有突出地质体的局部化地质特征、储层的微观结构、反映薄互层反射的重要信息等优点。将小波域二维分频地震剖面进行重构, 可以形成地震波的振幅与时间、频率直接相关的三维地震数据体。再沿目标层段或井位置点分析地震波的层间吸收属性、高频衰减特征, 能够获取圈定储层与预测油气的重要参考信息。将该方法运用到川西坳陷深层须家河组气藏的储层预测与含气性检测中, 获得了与测井记录吻合良好的预测效果。

关键词: 小波域; 分频成像; 地震资料; 层间吸收; 应用研究; 须家河组; 川西坳陷

中图分类号: TE13.1 **文献标识码:** A

A study on application of interbed absorption attribute in wavelet domain to the Xujiahe Formation in western Sichuan Depression

Xu Tianji^{1,2}, Cheng Bingjie³, Tang Jianming¹, Li Xiangui¹

(1. Deyang Branch of Exploration & Production Research Institute, SINOPEC Southwest Company,

Deyang Sichuan 618000 China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and

Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059 China;

3. Post-doctoral Research Center, SINOPEC Southwest Company, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract Wavelet theory-based frequency-division processing of seismic data has the advantages of highlighting the local geological characteristics of geologic bodies and microstructure of reservoirs and revealing the important information contained in thin interbed reflection. Reconstruction of two-dimension frequency-division seismic profile in wavelet domain can generate a 3D seismic data cube, of which the wave amplitude is directly related to the time and frequency. Then, important information for locating and predicting oil and gas reservoirs may be obtained through analysis of the interbed absorption attribute and high-frequency attenuation along the target layers or at the well points. Application of the technology to reservoir prediction and gas detection of the deep Xujiahe Formation in western Sichuan Depression gave out satisfactory results in accordance with log data.

Key words Wavelet domain; frequency-division imaging; seismic data; interbed absorption; applied research; Xujiahe Formation; Western Sichuan Depression

地质体的吸收属性不仅与岩石类型、流体性质有关, 还与压力、温度、饱和度和频率等因素有

关。双相介质理论也证实, 油气储层由固体骨架和孔隙流体组成, 疏松骨架和孔隙流体的黏滞性

收稿日期: 2008-05-09

第一作者简介: 徐天吉 (1975—), 男, 博士, 石油物探。

基金项目: 中石化科研项目 (P05003)。

将引起地震波的衰减。Biot和Wyllie研究了地震波衰减的特性,骨架的衰减一方面由固体摩擦引起,另一方面与频率有关;而孔隙流体的衰减完全是由频率引起的^[1]。由此可见,对地震资料进行分频处理意义重大,可以充分利用孔隙流体的频率响应特征,获得地震波的局部高频衰减异常,探寻油气藏的有利位置。

在地震勘探中,固体骨架和孔隙流体的衰减特征由地震波的吸收属性描述,使用的参数主要有吸收系数、衰减因子、对数衰减率和品质因子等。这些参数均与频率有关,对它们的研究由来已久。获取这些参数的方法较多,M. P. Mathery(1995)采用 Fourier 变换求取高低频振幅谱沿层计算高频衰减率,即拟吸收数。但是,王西文^[2]认为,基于小时窗的 Fourier 变换计算高频衰减存在:时窗宽度不易把握、局部化特征很差、难以用于微观分析等问题。因此,他提出在小波域分频计算瞬时振幅,然后,利用高低频来计算高频衰减。其方法利用小波分析局部化优异的特点,同时,计算出瞬时拟吸收系数,不存在平均效应,能准确地刻画出每一砂层高频衰减特征。本文作者基于小波分频成像方法,采用沿层提取分频振幅的方法计算地震波的对数衰减率,研究油气的地震波频率响应特征,并运用到川西坳陷深层须家河组储层预测与含气性检测。

1 方法原理

1.1 基于小波变换的分频成像理论

小波变换具有良好的局部化性质和时间定位准确的优点,利用小波变换可以避免常规 Fourier 分析时带来的时窗问题,小波变换在地震资料处理中已经得到广泛应用^[3~5]。近几年迅速发展起来的基于小波变换的频谱分解方法,是一种利用频率对储层进行预测解释的新技术。该技术将地震信号视为一种非平稳信号(时变信号),采用尺度(伸缩)产生一系列基函数对地震信号进行重构,并将整体频率局部化、把信号的能量采用时间和频率来描述,利用频率域刻画时间域难以显现的现象与规律^[6]。

如果地震信号用 $s(t)$ 表示^[4],则其正、反小波变换对为:

$$\begin{cases} S(b, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} (t) g \left| \frac{t-b}{a} \right| dt \\ S(b) = \frac{1}{C_g} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (t) g^R \left| \frac{t-b}{a} \right| dt da \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S(b, a)$ 为小波变换系数; t 为时间, s, a 为尺度因子; b 为时移因子; $g(t)$ 为小波函数; $-$ 表示共轭; R 表示取实部; C_g 为调制常数。将地震信号 $s(t)$ 的小波反变换公式进行离散,得:

$$S(b) = \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^N \int_{a_{i-1}}^a \int_{-\infty}^{+\infty} (t) g^R \left| \frac{t-b}{a} \right| dt da \quad (2)$$

不同尺度的积分区间 (a_{i-1}, a_i) , $(i=1, 2, \dots, N)$ 的地震信号分频处理表示为:

$$S_i(b) = \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^N \int_{a_{i-1}}^a \int_{-\infty}^{+\infty} (t) g^R \left| \frac{t-b}{a} \right| dt da \quad (3)$$

重构是用时变的线性组合表示:

$$\begin{aligned} S_i(b)^+ &= \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^N C_i(b) \int_{a_{i-1}}^a \int_{-\infty}^{+\infty} (t) g^R \left| \frac{t-b}{a} \right| dt da \\ &= \sum_{i=1}^N C_i(b) S_i(b) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $C_i(b)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 为随时间变化的系数,称重构系数; $S(b)^+$ 为地震重构信号^[2,7]。这样就实现了地震信号的非平稳表示,重构的地震信号是时间和频率的函数。

1.2 对数衰减率

对数衰减率反应地震波的吸收性质,根据地震波的吸收特性与岩相、孔隙度、含油气之间的紧密关系就可以圈定有利储层、实现油气藏的预测。通常,利用地震反射资料,采用谱比法就能够获得地震波的对数衰减率。即:

$$\delta = \ln \frac{A_0(f)}{A(f)} \quad (5)$$

式中: δ 是地震波的对数衰减率; f 是地震波的频率; A 和 A_0 分别是地震波经过目标层顶、底界面后的振幅值。

1.3 方法的实现

图 1 所示为基于小波分频成像方法提取层间对数衰减率实现储层预测的技术路线示意图。地

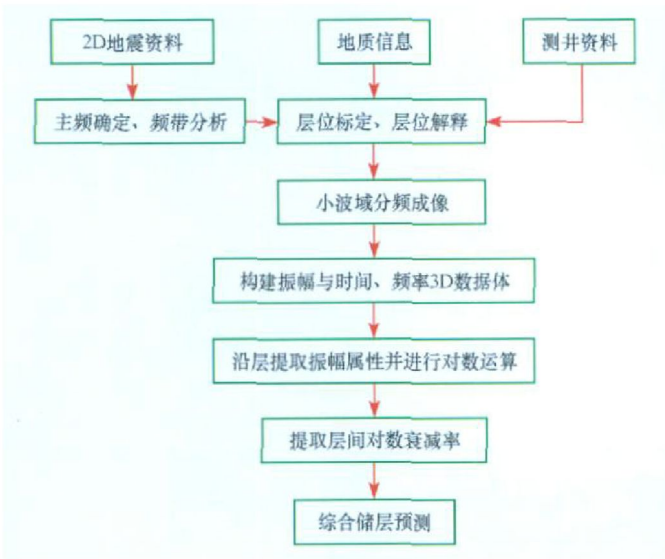


图 1 基于小波分频的层间吸收属性提取流程
Fig. 1 Process of extracting interbed absorption attributes based on frequency-division in wavelet domain

震资料要求去噪、频带较宽、目标层已经校正拉平及品质良好的保幅叠加地震剖面。利用地质资料、测井资料进行层位标定、层位解释后, 就可以采用小波分频成像技术对地震剖面进行分频处理了。低频地震数据反应大套储层与地质体的轮廓, 中频反应较薄、较小套地质体, 高频则能反应薄互层目标、实现对地层层序的精细勾画。对小波域分频地震剖面按频率增长方向进行 3D 地震数据体构建之后, 就可提取目标层的振幅、进行振幅的对数运算。目标层的底层与顶层对数振幅之差就是目标层的对数衰减率, 它反应频率不同时地震波穿过目标层后的衰减情况。如果目标层充

填油气, 对数衰减率在高频端将出现较强的衰减。

2 应用实例

川西坳陷深层须家河组致密碎屑岩含气储量丰富, 燕山期后的致密化过程将油气封闭在超致密储层中, 喜马拉雅期构造运动使裂缝系统疏导活化, 形成了具有相当规模的天然气藏。然而, 由于该区构造复杂、地震资料主频较低、频带狭窄、分辨率有限, 加之埋藏较深 (5 000 m 左右) 等众多因素增加了储层预测、裂缝描述及含气性检测的难度^[8~11]。30 多年的勘探开发, 虽然在浅中层取得了较好成果, 但在深层却至今尚未获得突破^[12~13]。通过对该区地震资料的小波域分频处理, 低频资料反应大套沉积相、高频反应薄互层反射信息。对比目标层顶底的分频振幅值, 可以分析目标层的衰减特征、圈定储层空间分布。

图 2 是川西坳陷深层须家河组工区的过井地震剖面, 图中所示 X856 井、X851 井和 X853 井是产气量较高的工业气井, L150 井产气量不高, 而 CX565 是无工业采气的水井; X2 井、X3 井是尚未开钻的建议井。图 3 是图 2 所示过井地震剖面在 25 Hz 时的小波域分频成像处理结果, 红色表示振幅强、蓝色表示振幅弱。

图 4 所示是沿目标层提取反射顶、底界面的归一化振幅值之差, 深蓝色区域展示了地震反射波经过储层后高频能量发生了较强衰减, 是发现油气藏储存的有利位置。

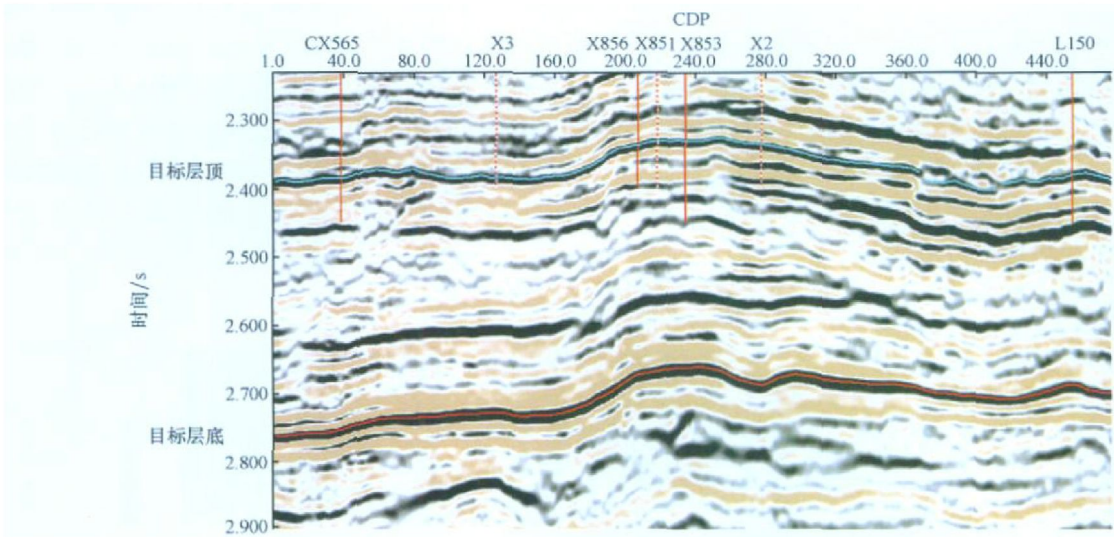


图 2 用于小波域分频处理的过井叠加地震剖面
Fig. 2 Well-tied stacking section for frequency-division processing in wavelet domain

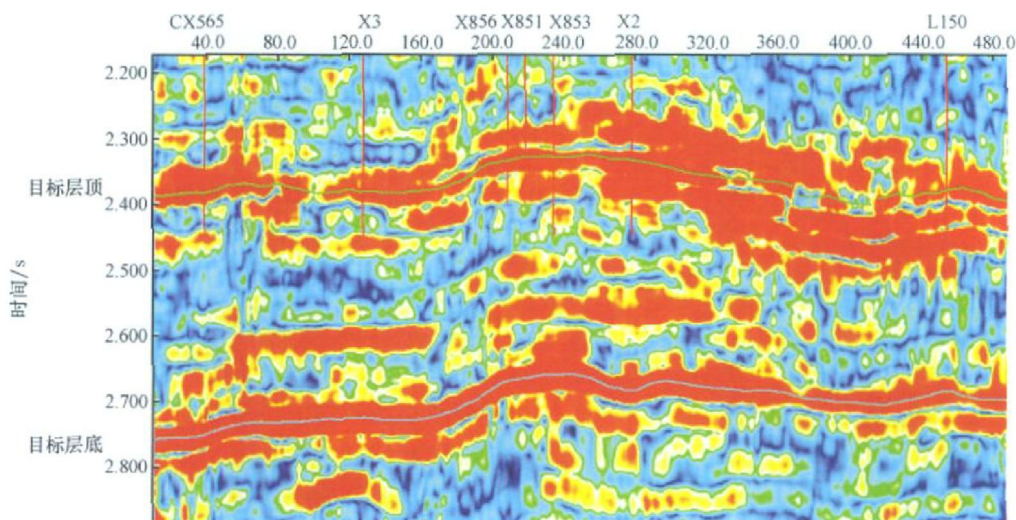


图 3 25 Hz 小波域分频剖面

Fig. 3 Frequency-division section in 25 Hz wavelet domain

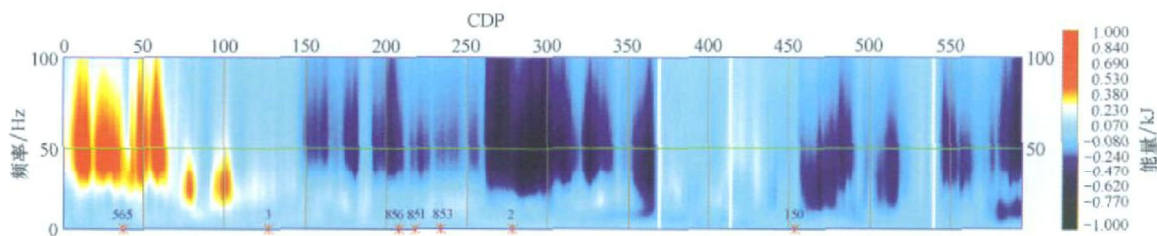


图 4 反射波经过目标层后顶、底界面归一化分频振幅变化情况

Fig. 4 Variation of frequency-division amplitude during the normalization of the top and bottom boundary after the reflected waves passing through the target layers

图 5 所示是反射波经过目标层后的对数衰减率随频率的变化情况。深蓝色区域说明地震波经过反射界面后其振幅发生较强衰减,特别是高频部位的剧烈衰减显示出了目标层可能含油气的明显信号。

图 6 所示为反射波经过目标层后对数衰减率随频率的变化情况。图中显示 X851 井、X853 井、X856 井和 X2 井的对数衰减率从 25 Hz 开始出现明显递减,而这些井中除 X2 井是尚未开钻的建议井外,其余井均为高产井。CX565 井无气藏发现是水井, L150 井目前产气量较低。X3 井和 X2 井

一样,是尚未开钻的建议井,图中对数衰减率曲线预测其含气情况不如 X851 等井。

图 7 所示为地震波在过井位置反射经过目标层的顶、底界面归一化振幅随频率的对数变化情况。对频率求取自然对数是为了使低频情况下地震波的振幅将变得平缓,突出在高频情况下地震波的振幅变化。图中显示,在 45 Hz 左右, X851 井、X853 井、X856 井和 X2 井的衰减特征十分突出, L150 井次之, X3 井与 CX565 井在低频端有所衰减而在高频端衰减特征与其余各井明显不同。

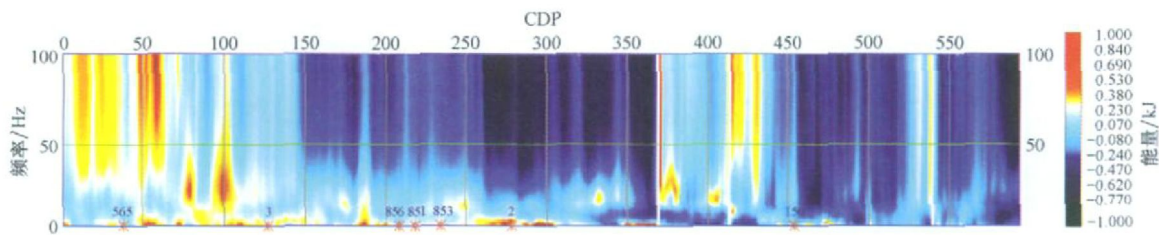


图 5 反射波经过目标层后对数衰减率随频率的变化情况

Fig. 5 Variation of logarithmic attenuation rate with frequency after reflected waves passing through target layers

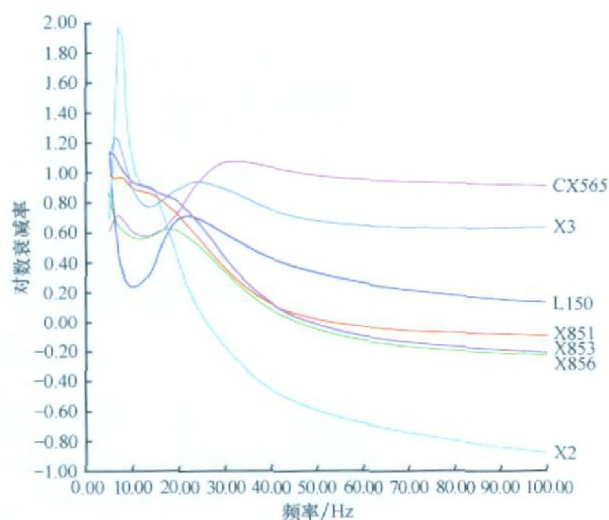


图 6 反射波过井目标层后对数衰减率随频率的变化情况

Fig. 6 Variation of logarithmic attenuation rate with frequency after reflected waves passing through target layers in wells

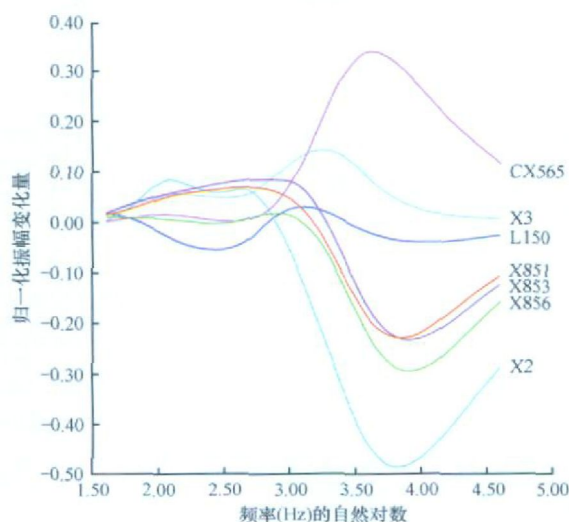


图 7 反射波过井目标层后归一化振幅变化随对数频率的变化情况

Fig. 7 Variation of normalized amplitude with logarithmic frequency after the reflected waves passing through target layers

对比图 6 与图 7, 两幅图所展示的地震波在各井位置的吸收属性基本一致。产气量较高的各井之对数衰减率曲线和归一化振幅变化曲线特征类似, 而新布置的建议井 X2 井与 X3 井有明显不同的衰减特征, 此两井的产气情况在不久将会检验笔者的预测。

3 结束语

地震资料的小波域分频成像能够突出地质体的局部化地质特征、储层的微观结构, 是反应薄互层反射信息的有效工具。对小波域的分频地震剖面进行三维重构, 能够同时观察到地震波的振幅在时间域、频率域的变化情况。基于重构的三维地震数据体, 不仅可以沿目标层位分析地震波的层间吸收属性, 还能够提取地震波的局部 (如井位置点或空间段) 层间吸收属性、分析高频衰减特征, 为储层的圈定与油气预测提供参考信息。

参 考 文 献

- 1 Wyllie M R, J Gardner G H F, Gregory A R. Studies of elastic wave attenuation in porous media 31st annual SEG meeting [J]. Denver Colorado 1961
- 2 王西文. 地震资料处理和解释中的小波分析方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004
- 3 李宏兵, 赵文智, 曹宏, 等. 小波尺度域含气储层地震波衰减特征 [J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 892~898
- 4 Mallat S A. Wavelet tour of signal processing [M]. San Diego Academic Press 1999
- 5 Chakraborty A, Okaya D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods [J]. Geophysics 1995, 60(6): 1906~1916
- 6 印兴耀, 韩文功, 李振春, 等. 地震技术新进展 [M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2006
- 7 王西文, 刘全新, 高静怀, 等. 地震资料在小波域的分频处理与重构 [J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(1): 78~85
- 8 杨克明, 叶军, 吕正祥. 川西坳陷上三叠统须家河组天然气分布及成藏特征 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(5): 501~505
- 9 杨克明, 叶军, 吕正祥. 川西坳陷上三叠统成藏年代学特征 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 208~213
- 10 曹烈, 安凤山, 王信. 川西坳陷须家河组气藏与古构造关系 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 224~229
- 11 杨克明. 川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 786~793
- 12 Xu Tianji Gan Qiang Li Xiangui Research and application of absorptive attenuation filtering technology based on Prony transformation [M]. Science Press USA Inc Geophysical Solutions for Environment and Engineering 2006 204~210
- 13 李显贵, 徐天吉, 甘其刚. 新场气田须家河气藏含气性地震检测研究 [J]. 石油物探, 2006, 45(2): 186~191

(编辑 高 岩)