

# 基于 Prony 滤波的地层吸收衰减参数研究

周邵巍, 肖茵, 邵荣峰, 郑杰

(中国石油大学(华东)机电工程学院 山东青岛 266555)

**摘要:** 地震波在地层中传播而引起的吸收衰减也是地震资料的重要属性之一。根据地层吸收性质与岩相、孔隙率、含油气成分等的密切关系,通过地震资料预测储层的岩性及砂泥岩分布,在有利的地质条件下还可以直接预测石油和天然气。因此,研究目的层吸收特性的相对变化,对油藏描述具有重要意义。一般采用常规 Fourier 变换的方法研究储层的吸收性能,但由于 Fourier 变换是将信号分解为简谐波,且以线性方式求取目的层段相对的平均吸收率,从而制约了预测精度并影响到方法的推广应用。为克服 Fourier 变换方法的不足,本文基于 Prony 变换方法,即用阻尼谐波分解信号及非线性方法进行滤波,直接求取目的层吸收系数,再选择关键的参数分量进行重构,以提高储层含气性预测的精度。Prony 滤波方法可以识别出地震能量的异常吸收带和地震波场的高频分量,并且在时间和空间都具有很高的分辨率,从而清晰的刻画含流体岩石、断裂带等,为后续的油藏分布研究做准备。

**关键词:** 地震波, 吸收衰减, 滤波, 油藏

## The Research of Formation Absorption Attenuation Parameters Based on Prony filter

ZHOU Shao Wei, XIAO Yin, SHAO Rong Feng, ZHENG Jie

(College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** The seismic wave attenuation during transmission period is a major property of seismic data. The lithology and sand shale distribution of reservoirs can be predicted by seismic data according to the close relationship among earth's absorption, porosity, oil-gas composition. Furthermore, the oil and natural gas could even be predicted directly if the geological conditions are favorable enough. Consequently, the study of relative change about target stratum's absorption characteristics has significant meaning for reservoir description. Usually, conventional Fourier transform method is utilized to analyze reservoirs' absorption performance. However, Fourier transform is to decompose the signal into simple harmonic wave and to use linear method for gaining target stratum's relative average absorption rate, which undermines prediction accuracy and its popularity. In order to overcome deficiency of Fourier method, the Prony transform was used in this paper. This method decomposes signal into damped harmonica wave and uses non-linear ways for filtering, which enables it to gain the absorption coefficient of target stratum directly and select key parameters for reconstruction. The Prony filtering method could recognize the abnormal absorption and high frequency component of earthquake wave, keeping high resolution both in time and space. As a result, the Prony method could clearly describe fluid rock, fault zone, etc. and pave way for following study of reservoir distribution.

**Key words:** Seismic waves, Absorption Attenuation, Filtering, Reservoirs

## 一、前言

弹性波在地层中传播而引起的吸收衰减也是地震资料的重要属性之一。根据地层吸收性质与岩相、孔隙率、含油气成分等的密切关系,可以通过地震资料预测储层的岩性及砂泥岩分布,在有利的条件下还可以直接预测石油和天然气的存在。因此,在工区范围内研究目的层吸收特性的相对变化,对油藏描述具有重要意义。

长期以来,研究储层的吸收性能一般采用 Fourier 变换<sup>[1-3]</sup>的方法,即首先根据声波测井和井中地震观测资料,研究吸收系数与油藏参数的关系,再结合从地面地震资料获得的吸收参数横向相对变化规律,实现井间插值和外推,进行储层描述和参数预测,可为非背斜油气藏的勘探提供可靠的依据。但由于 Fourier 变换是将信号分解为简谐波,且以线性方式求取目的层段相对的平均吸收率,从而制约了预测精度并影响到方法的推广应用。

为克服 Fourier 变换的不足,我们采用 Prony 变换方法<sup>[4-7]</sup>,即用阻尼谐波分解信号及非线性方法进行滤波,直接求取目的层吸收系数,再选择对研究感兴趣的参数分量进行重构,以提高储层含气性预测的精度。Prony 滤波方法可以识别出地震能量的异常吸收带,并且在时间和空间都具有很高的分辨率,这对研究地震波场的高频分量的特征是非常重要的,因为高频分量可以清楚的反应含流体岩石、断裂带等。

## 二、Prony 滤波基本原理与流程

众所周知, Fourier 分析是正统的谱分析方法。而早在 1795 年, Prony 就提出了使用指数函数的线性组合来描述等间距采样数据的数学模型。Prony 方法采用的数学模型为一组  $p$  个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数,其离散时间的函数形式<sup>[8-9]</sup>为:

$$X(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n, n=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

并使用  $X(n)$  作为  $x(n)$  的近似值,式(1)中,  $b_i, z_i$  假定为复数,即:

$$\begin{cases} b_i = A_i \exp(j\theta_i) \\ z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t] \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $A_i$  为幅值,  $\theta_i$  为相位(单位:弧度),  $\alpha_i$  为衰减因子,  $f_i$  为震荡频率,  $\Delta t$  为采样间隔。

然而, Prony 法一直被人们所遗忘。直到 20 世纪 60 年代, Prony 变换方法才再一次引起一些研究人员的兴趣。一是因为随着功能强大的计算机技术的飞速发展,全新的计算机技术已足以支持这种非线性算法的应用;二是因为在不同的自然科学和工程领域中,都迫切需要一种更好的谐波分辨力的方法。因此,已有一些新的 Prony 的分解方法被提出,其中一些是基于最小平方,并采用非线性最优化和多项式因式分解的算法。这些方法直接与自适应的分析方法(AR models)相联系,并且具有很高的运算速度。Prony 变换之所以可应用在地震资料的处理中,主要由于它在频率及时间域有较高的分辨率,并且可以提供另外秒速地震波衰减的动力学参数。

最完善的 Prony 分析方法是 Marple 在 1987 年提出<sup>[4]</sup>的,它是将一个复数分解成一系列复指数之和,每一个复指数由振幅、频率、衰减系数和相位等 4 个实参数确定。由于观测到的地震信号是一个实数,故使用 Prony 变换可将地震信号分解为带有振幅、衰减、频率和相位等 4 个参数的一系列衰减正弦函数的和,其数学表达式为:

$$X_n = \sum_{k=1}^{P/2} A_k e^{\alpha_k(n-1)t} \cos(2\pi f_k(n-1)t + \theta_k) \quad (3)$$

式中:  $X_n$  为地震信号时间序列;  $A_k, f_k, \theta_k, \alpha_k$  分别为第  $k$  个分量的振幅、频率、相位和衰减系数(吸收系数);  $P/2$  为 Prony 分解的阻尼正弦值的个数;  $n$  为 Prony 变换的地震信号样点数。

Prony 法是在调和函数的基础上提出的一种数学变换,使用指数函数的线性组合来描述等间距采样数据的数学模型。与 Fourier 变换不同的是,Prony 法用阻尼谐波描述所观测到的数据,可以看做是一种广义的 Fourier 分析。从(3)式也可以看出,Prony 变换与 Fourier 变换的形式非常相似,当  $\alpha_k=0$ 、且  $f_k$  为已知的确定基波频率时,Prony 变换即为 Fourier 变换,也就是说 Fourier 变换是 Prony 变换的一个特例。恰恰是衰减系数  $\alpha_k$  和频率  $f_k$  使它区别于 Fourier 变换,成为一种非线性的多维滤波方法。

地震波的衰减因素主要包括:地震波传播过程中的球面扩散效应、地层层状结构引起的地震波的传输效应、岩石骨架的黏弹性性质、岩石的孔隙率、孔隙中的流体成分等。其中前两项衰减与地震波的频率关系不大,其余几项的吸收衰减与频率有密切关系而 Prony 变换能够描述频率和吸收衰减系数间的关系,所以它可作为检测吸收异常带和预测储层岩性变化的手段。Prony 滤波特征是立方体式的,谐波振幅与频率和吸收衰减系数均有关,因此可以从观测波场中的不同频率范围内提取不同的吸收系数信号。通常,我们是根据复赛谱分析方法原理求取地层的平均对数衰减率,即:

$$\delta = \pi / Q \quad (4)$$

$$\alpha = \delta f / V \quad (5)$$

式中:  $\delta$  为地层平均对数衰减率;  $Q$  为介质的品质因子;  $\alpha$  为吸收系数;  $f$  为频率;  $V$  为层速度。与 Fourier 变换相比,Prony 变换具有以下优点:

- (1) 利用阻尼滤波对信号进行分解;
- (2) 对单波有很好的分解能力;
- (3) 直接求取吸收系数;
- (4) 显示结果有振幅谱、能量曲线、滤波剖面等三类;
- (5) 质控手段强。

Prony 分解技术经过几十年的发展,已成为一种有效的地震信号非线性分解技术,目前较常用的方法是采用奇异值分解总体最小二乘法确定阶数的 Prony 算法,利用 Prony 变换包含衰减因子的特点,对地震资料进行吸收滤波处理,将重构后不同频率段的剖面与全频段剖面进行比较来发现吸收异常区域,进行油气检测,其重构剖面中已基本消除散射的影响,提高了检测精度。1998 年, Mitrofanov 等人研制了 Prony 滤波程序,亦称吸收滤波程序。该程序可基于不同的标准来选择参数值,然后对实际记录进行处理。它类似于基于 Fourier 变换的带通滤波,但与之不同的是,Prony 滤波不仅只用频率一个参数,而且也可以用上面提到的其他参数,如用两个参数:频率和衰减。

Prony 滤波处理流程<sup>[8]</sup>主要由以下几部分构成:

- (1) 资料选取。

选用宽频、保幅叠加剖面(或原始道集),并拉平目的层。同时要做到同一区块的资料处理流程、参数尽可能一致,目的层段主频带宽度也要尽可能一致。

- (2) 频谱分析。

在选定的时间段内对目的层段进行频谱分析其目的是确定原始资料的频谱宽度及频率分布,特别是要了解在高频域中缺失频率段的分布规律,并用于指导滤波参数的选取和滤波剖面吸收异常带的分析。

利用 Prony 滤波技术进行储层非均质性和含气性识别,首先选择过已知井的地震测线进行相对振幅保持处理,为保证预测的精度,最好要做保持频率和相位处理;进行标准谱分析,了解地震信号的主频和谱宽。谱宽用于确定高频域中是否存在有用的频率成分,须用比地震目标层反射信号长度宽的时间窗做分析。例如,目标层在某标准层上方约 80 ms,这样,必须对标准层上 60 ms 或 80 ms 的时间间隔作分析。为了避免分析结果的片面性,分析时窗除包含目的层外,还应向上、下各延拓 80 ms,这一时窗将包括所有的地震目标层。用分析的结果可估算 Prony 滤波的总频率

范围和主频。

### （3）参数选择。

通过分析和确定分析时窗长度、分解长度、白噪系数、滤波主频、滤波半频宽和吸收系数宽度范围共六个参数，进行优化 Prony 滤波准备，可达到较好的滤波效果。

对处理后的地震剖面进行细致的层位标定，确认目的层的顶底界面；根据地震资料的频率分析情况和层位解释，确定 Prony 滤波处理参数。影响 Prony 滤波效果的主要参数是分解步长。分解步长大，数据信噪比高，但分辨率下降；分解步长小，数据信噪比降低，分辨率得到提高。因此，必须根据实际资料情况和目的层的厚度综合考虑选择合适分解步长，做到既提高地震资料的分辨率，又有较高的信噪比。

### （4）进行 Prony 滤波。

当最佳参数选择后，用 Prony 滤波程序对资料进行处理。以得到的各频率段剖面去识别与目标层段相关联的异常，形成反射异常带剖面图，最后与已知钻井做对比，形成识别模式，在理论分析指导下，依据过井段的不同频率带的特征与储层非均质性、含气性关系，建立识别模式；最后进行储层非均质性和含气性识别。目的是分离非正常带，以便对这些异常带进行物性、含气性的进一步解释。

Prony 吸收滤波分析的解释方法是对原始输入剖面和高频吸收滤波剖面进行对比解释，并通过高频吸收异常带模式对目标区含油气性进行预测。高频吸收异常带可分为 5 种模式：

I 类异常。全频强振幅带，高频弱振幅带，可能的较好含油气带。

II 类异常。全频弱振幅带，高频弱振幅带，可能的较差含油气带或断裂带。

III 类异常。全频弱振幅带，高频强振幅带，致密岩性带。

IV 类异常。全频强振幅带，高频强振幅带，致密岩性带。

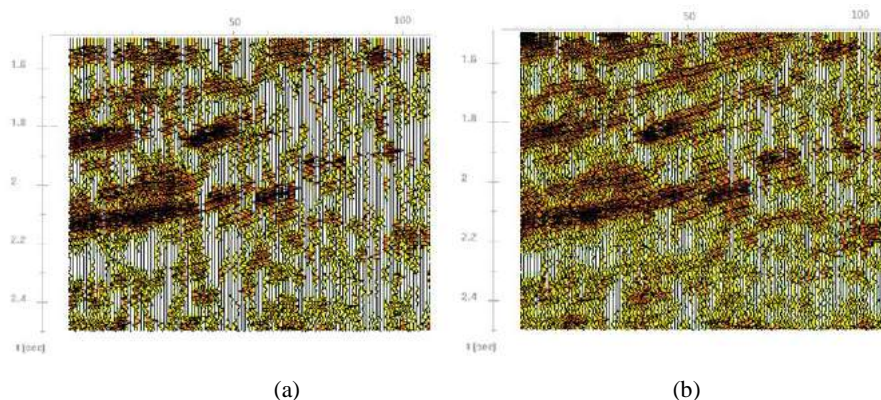
V 类异常。高频振幅突变带，可能为含油气带的指示。

上述解释方法对于常见的碎屑岩和碳酸盐岩储集层都适用，但若构造主要受断层控制时需要借助其他技术方法来进行综合判别，因为断裂带本身对高频也有较强的吸收

经 Prony 滤波以后的叠加剖面比用常规滤波处理的剖面得到了更多的信息。例如用这些叠加剖面对不同的频率采用不同的时间间隔分析可以得到有关气藏结构的附加信息。但是为了保存与储层含气性相关的波场所具有的强衰减和低频响应特征，只从中提取了两种参数——时窗内的衰减能量和波形的一致性进行含气性的表征描述。

## 三、Prony 滤波影响参数分析

通常参数选择以研究人员在视觉上对滤波结果的分析来做判断，确定所得结果的质量标准是基于问题的需要而定的。所以选择最佳参数的标准是相当主观的，取决于研究人员的经验和要解决问题的类型。下面给出在处理中选择 Prony 滤波参数<sup>[10]</sup>的一般系统地逼近的方法。





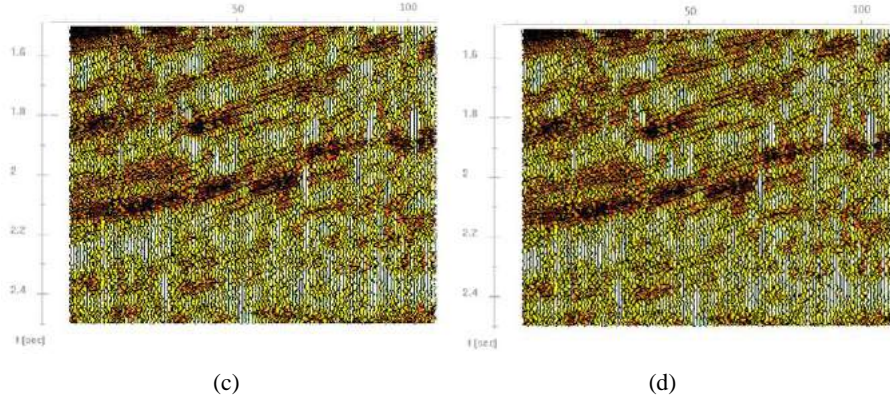


图 1 不同频率间隔时滤波效果对比图

(a): 2Hz; (b): 4Hz; (c): 6Hz; (d): 8Hz

频率间隔  $\Delta f$  的宽度必须保证稳定地恢复给定的信号分量，并且最低限度地覆盖组合波场的其他频率。通常我们取标准谱作为一个先验信息。例如，中间频率为 30Hz，选择不同的频带宽度  $\Delta f$ ，得到的滤波结果如图 1 所示。对比图 1a、图 1b 和图 1c，可以确定频带宽度不能小于 4Hz，过小的频带宽度会造成滤波结果损失信息多。另外  $\Delta f$  不能太大，因为频带太宽会在恢复时过多混入相邻频率的波场成分，造成信号污染、异常带不清晰、图象分辨率变差等结果，对异常带的判断造成影响。

衰减带间隔  $\Delta \alpha$  的宽度必须保证稳定地恢复给定的信号分量，并且最低限度地覆盖衰减量。通常我们取标准谱作为一个先验信息。例如，选取中间频率为 30Hz，频带宽度  $\Delta f$  为 6Hz，使用不同的衰减带宽度  $\Delta \alpha$  得到的滤波结果如图 2 所示。对比图 2a 和图 2b 可以看出，选择过小的衰减带宽度  $\Delta \alpha$ ，会损失部分估算值，降低滤波结果的分辨率。增大  $\Delta \alpha$  虽然可以提高分辨率、更大限度地还原信号，但是过大的  $\Delta \alpha$  会增加不必要的计算量，降低工作效率， $\Delta \alpha$  通常取-100~100。

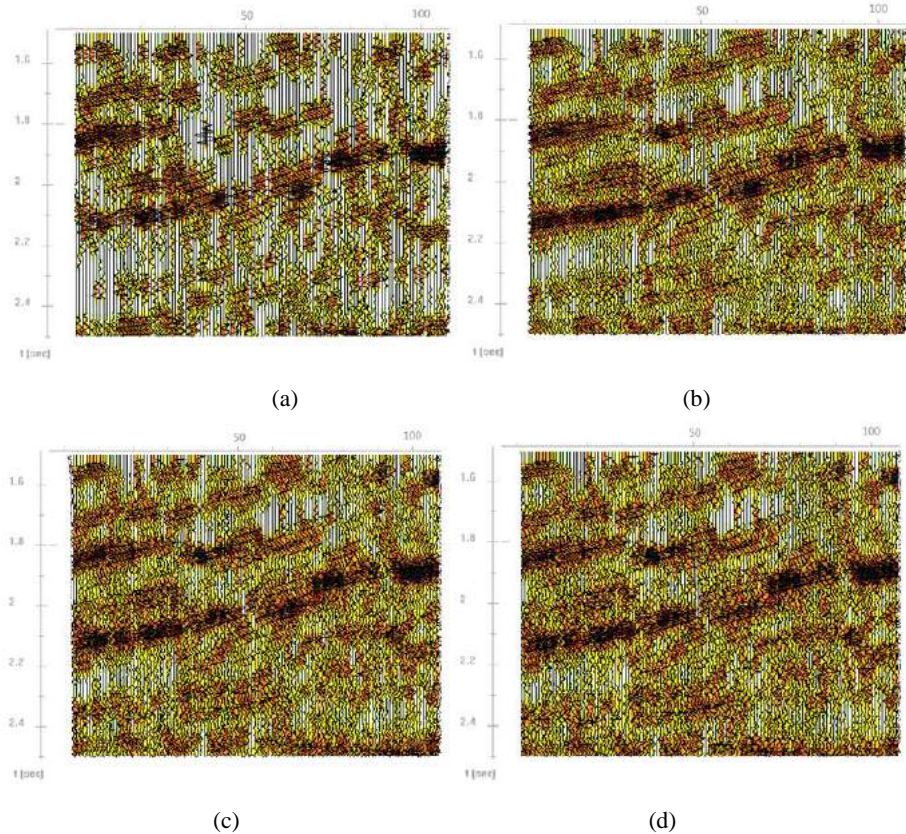


图 2 不同衰减带宽度时滤波效果对比图

(a): -10~10; (b): -30~30; (c): -100~100; (d): -300~300

#### 四、实际资料应用

选取中国某地区某断块砂层数据进行实际资料处理，因资料中给出第 62 道为 A3-1 井旁道，选取第 51-71 道进行处理。

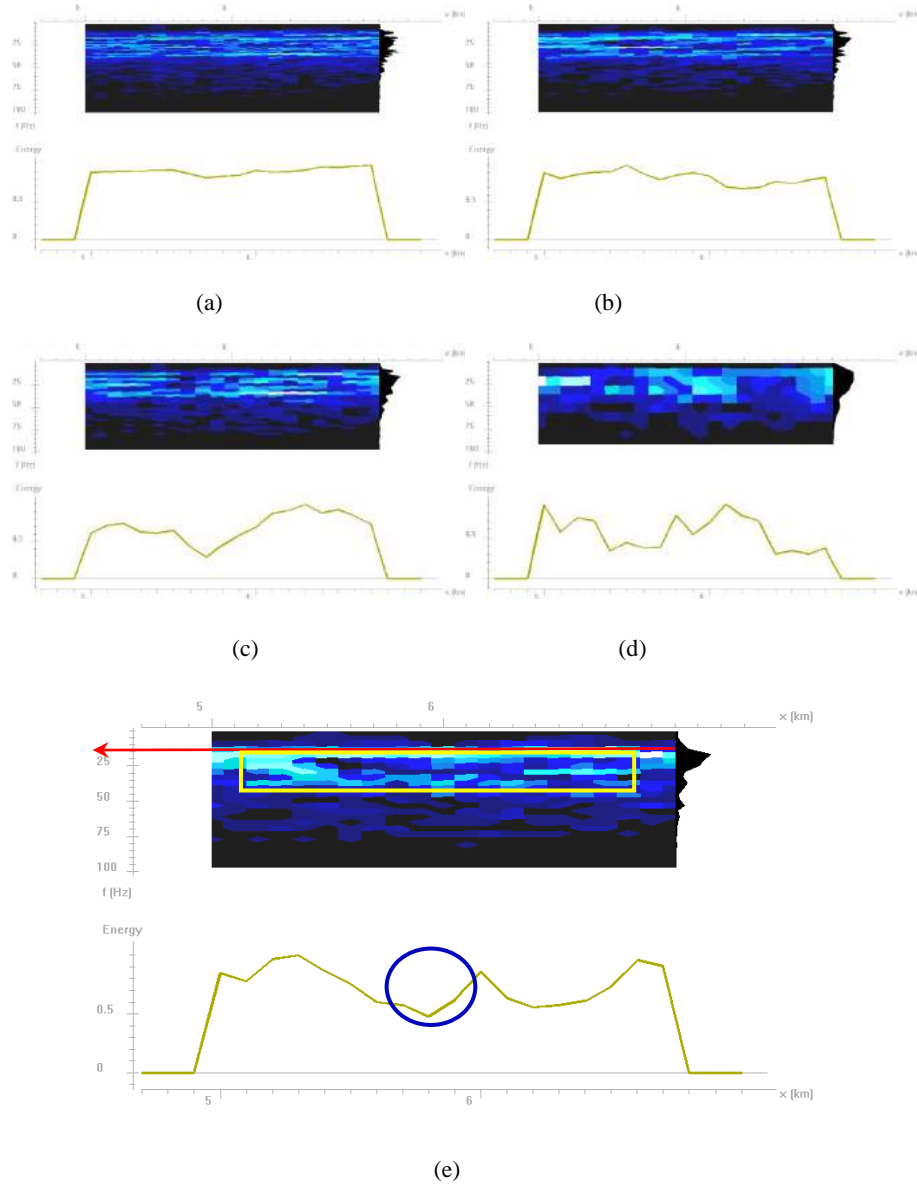


图 3 不同频率时振幅谱与能量谱

图 3a、b、c、d、e 分别为选取频率步长为 1、2、3、10、4Hz 时的振幅谱和能量谱。通过对不同频率间隔的效果进行比对，我们选取频率间隔  $\Delta f$  为 4Hz（图 2-22E 所示）。图 3e 上图振幅谱中，红线附近为主频带，黄框标出变化异常的频率带；图 3e 下图能量谱中蓝圈所示为能量突变区域，大致位于 61-63 道。



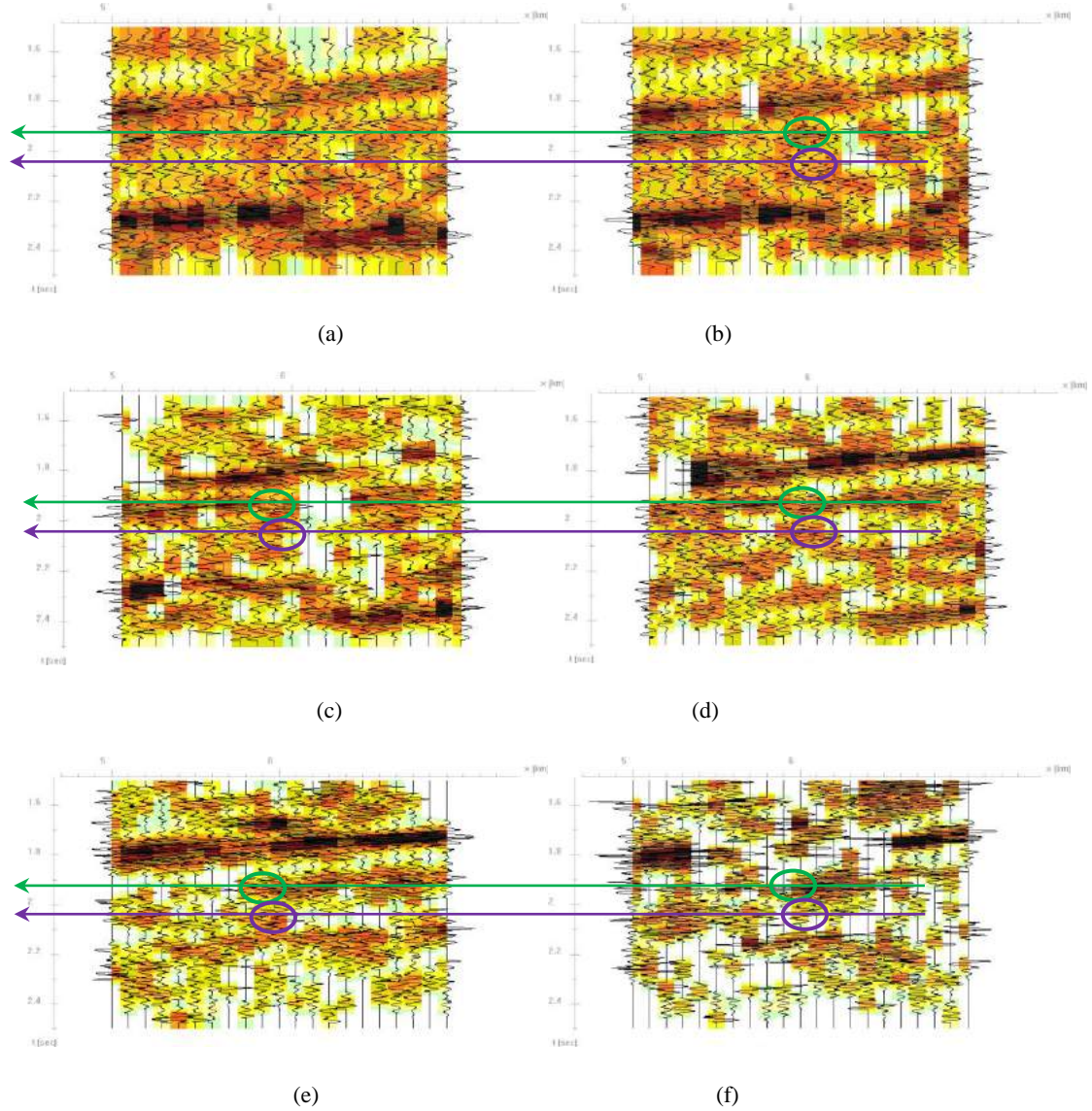


图4 不同频率带的 Prony 滤波结果图

(a): 13~22Hz; (b): 18~26Hz; (c): 23~42Hz; (d): 30~36Hz; (e): 35~41Hz; (f): 40~46Hz

图4a、b、c、d、e、f分别对应着不同的六个频率带的 Prony 滤波结果。对比图3e上的振幅谱可知，13~22Hz（图4a所示）为主频带，各道的信息都可有一定程度的还原重构；40~46Hz（图4f所示）已为能量分布较少的高频突变带，许多区域无法还原；而18~26Hz、23~42Hz、30~36Hz、35~41Hz（图3b、c、d、e所示）几个频带都落在图3e中的黄框内，即能量变化异常区域内。在改变频率参数的过程中，发现几个异常区块：

（1）对比图4a和图3b，频带从13~22Hz升至18~26Hz时，中浅层大部分区域都能得到较好的还原，但在63±道、时深约为1.9~2.2s处，突然出现一个较大的低频异常区块。

（2）继续增加频率，频带从18~26Hz升至23~42Hz，对比图4b和图3c，注意到时深1.9~2.0s处和时深2.0~2.2s处似乎是两个变化规律不同的异常带I和II，在图中分别用绿圈（I）和紫圈（II）标出。随着频率的升高，对比图3c（23~42Hz）、图3d（30~36Hz）和图3e（35~41Hz），可进一步确认I和II为两个不同的异常带。我们在实验中缩小频带增加的步长，发现异常带I在20~30Hz几乎没有能量，30Hz以上能量突然升高，频率高到50Hz以后没有能量；而异常带II在20~30Hz几乎没有能量，30Hz以上能量逐渐升高。

（3）在对异常带II高频规律的研究中又发现，异常带II中2.0~2.1s（i）、2.1~2.15s（ii）、2.15~2.2s（iii）

三个区块的变化规律略有差别。尤其是 2.1~2.15s (ii) 处, 在 20~30Hz 几乎没有能量, 35~45Hz 处能量明显比 i 和 iii 高, 48~52Hz 则几乎没有能量, 但在频率升到 55Hz 以上后能量又突然增加; 而 i 区 (2.0~2.1s) 从 27Hz 时就开始出现能量, 明显早于 I、ii、iii 等区域; iii 区 (2.15-2.2s) 则在频率达到近 40Hz 处才显示能量团, 且一直能量较低。

总的来说, 在 63 道附近、时深 1.9~2.2s 处出现了低频异常吸收区。但是由于地下结构的复杂性、实验过程中的主观推断和野外采集数据的误差等因素, 单凭 Prony 滤波资料, 是不能推断地下真实情况的, 只能推测 63 道附近时深 1.9~2.2s 处存在一块异于周围环境的结构, 尤其是在出现了低频和高频两处反常吸收的时深 2.0~2.05s 处。

## 五、结论

Prony 分解是一种有效的地震信号非线性分解技术, 利用 Prony 变换直接包含衰减因子的特征, 对地震资料进行吸收滤波处理, 将重构后不同频率段的剖面与全频段剖面进行比较来发现吸收异常区域, 进行油气检测, 提高了检测精度。

同时, prony 吸收滤波在多级质控的条件下, 其对含气性的预测精度比 Fourier 变换技术要高。

## 参考文献

- [1] Sneddon I N. Fourier Transforms[J]. Fourier Transforms, 1951, 42(4): 145-151.
- [2] Mitchell O H. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(9): 2141-2150.
- [3] Tomczyk K. Fourier Transform[M]// Signal Transforms in Dynamic Measurements. Springer International Publishing, 2015: 43-79.
- [4] Marple, L. Spectral line analysis by pisarenko and prony methods[J] IEEE. 1979, 4: 159-161.
- [5] Mitrofanov G, Zhan Z, Cai J. Using of the proni transform in processing of Chinese seismic data[J]. Seg Expanded Abstracts, 1998(1): 1157.
- [6] Ramdas Kumaresan, Donald W. Tufts, and Louis L. Scharf. A prony method for noisy data[J] IEEE. 1984, 72(2): 230-233.
- [7] Mitrofanov G, Priimenko V. Prony Filtering of Seismic Data[J]. Acta Geophysica, 2015, 63(3): 652-678.
- [8] 李来运, 蒋加钰, 杨宝泉. PRONY 滤波方法及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(4): 409-414.
- [9] 单慧逸, 李振春, 曹文俊. Prony 滤波方法研究[C]// 中国地球物理 2013——第二十二分会场论文集. 2013.
- [10] 姚海东. Prony 滤波影响因素分析及应用研究[D]. 中国地质大学(武汉), 2009.

## References

- [1] Sneddon I N. Fourier Transforms[J]. Fourier Transforms, 1951, 42(4): 145-151.
- [2] Mitchell O H. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(9): 2141-2150.
- [3] Tomczyk K. Fourier Transform[M]// Signal Transforms in Dynamic Measurements. Springer International Publishing, 2015: 43-79.
- [4] Marple, L. Spectral line analysis by pisarenko and prony methods[J] IEEE. 1979, 4: 159-161.
- [5] Mitrofanov G, Zhan Z, Cai J. Using of the proni transform in processing of Chinese seismic data[J]. Seg Expanded Abstracts, 1998(1): 1157.
- [6] Ramdas Kumaresan, Donald W. Tufts, and Louis L. Scharf. A prony method for noisy data[J] IEEE. 1984, 72(2): 230-233.
- [7] Mitrofanov G, Priimenko V. Prony Filtering of Seismic Data[J]. Acta Geophysica, 2015, 63(3): 652-678.



- 
- [8] Li Yunlai, Jiang Jiayu, Yang Baoquan. PRONY filtering method and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(4):409-414.
- [9] Shan Huiyi, Li Zhenchun, Cao Wenjun, Study of Prony fiitering method[C]. Chinese Geophysical Society- The 22th session proceedings.
- [10] Yao Haidong. Analysis on influential factors of Prony filtering and its application research [D]. China University of Geosciences(WuHan), 2009.