

# 基于复数域非线性各向异性 扩散滤波的裂缝检测方法

石战战\*<sup>①②</sup> 贺振华<sup>①②</sup> 文晓涛<sup>①②</sup> 唐湘蓉<sup>①②</sup>

(<sup>①</sup>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;

<sup>②</sup>成都理工大学地球物理学院,四川成都 610059)

石战战,贺振华,文晓涛,唐湘蓉. 基于复数域非线性各向异性扩散滤波的裂缝检测方法. 石油地球物理勘探, 2012, 47(2): 286~290

**摘要** 针对P-M模型易产生集块效应,边缘保持效果不理想,无法滤除边缘噪声,且P-M方程是病态的等缺点,本文提出了基于复数域非线性各向异性扩散滤波的储层裂缝检测方法。该方法通过将传统各向异性扩散方程拓展到复数域,将复数域扩散项加入Shock滤波器,克服了扩散滤波边缘保持能力差和Shock滤波器对噪声敏感的缺点,在压制噪声的同时保持了地震资料同相轴的边缘信息,从而增强了地震同相轴的横向连续性,使断点更加清晰。理论和实际资料试算结果表明,本文提出的基于复数域非线性各向异性扩散滤波方法具有较强的噪声压制能力,能够精确检测储层裂缝发育带分布特征。

**关键词** 非线性 复数域 扩散滤波 Shock滤波器 裂缝检测

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A

## 1 引言

裂缝储层预测对油气勘探与开发具有重要意义<sup>[1,2]</sup>。目前基于地震资料不连续性的裂缝储层预测方法主要有相干技术、广义希尔伯特变换边缘检测、曲率分析、小波多尺度奇异值检测等,这些方法虽然可以有效地检测裂缝发育带,但受噪声影响大。常规的线性滤波方法如中值滤波、维纳滤波均是压制和滤除信号的中高频成分,而中高频信息对于裂缝的识别具有重要意义。为此,人们提出许多改进方法,如小波阈值、基于秩阶的滤波方法、基于马尔可夫场的模型、基于偏微分方程和LP的正则方法等,这些方法的目的是对信号进行非线性滤波,能够同时达到滤除噪声和保持断裂信息的目的。各向异性扩散滤波方法自20世纪90年代以来广泛应用于图像降噪和增强等领域。Perona等<sup>[3]</sup>最先提出各向异性扩散方程(即P-M模型),但P-M模型易产生集块效应,边缘保持效果不理想,无法滤除边缘

噪声,且P-M方程是病态的。后来出现了许多改进模型,如Cottet模型<sup>[4]</sup>、Weickert模型<sup>[5]</sup>等。Osher等<sup>[6]</sup>提出Shock滤波器,Gilboa等<sup>[7]</sup>将实数域各向异性扩散方程推广到复数域。孙夕平等<sup>[8]</sup>、王绪松等<sup>[9]</sup>将各向异性扩散方法引入地震剖面保边滤波。

基于前人研究,本文提出了将复数域各向异性扩散滤波方法用于地震属性沿层切片计算,可有效压制地震噪声,且具有很高的边缘检测精度,从而可以有效地检测与识别储层裂缝发育带。

## 2 方法原理

### 2.1 复数域线性各向异性扩散方程

受量子力学启发,Gilboa等<sup>[7]</sup>将传统的实数域扩散方程拓展到复数域,得到以下复数域线性各向异性扩散方程

$$\begin{cases} I_t = cI_{xx} & t > 0, x \in \mathbf{R} \\ I(x;0) = I_0 \in \mathbf{R} & c, I \in \mathbf{C} \end{cases} \quad (1)$$

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

本文于2011年5月9日收到,最终修改稿于2012年2月6日收到。

本研究由国家自然科学基金青年基金(40904034)和国家自然科学基金“石油化工联合基金”重点项目(40839905)联合资助。

其中:  $I_0$  为初始含噪声图像;  $I_t$  为对  $t$  的一阶偏导数( $t$  为时间尺度坐标);  $I_{xx}$  为对  $x$  的二阶偏导数( $x$  为空间坐标);  $c = re^{i\theta}$  为扩散系数,  $r$  为  $c$  的模,  $\theta$  为相位角。

当  $\theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$  时, 式(1) 存在稳定的正向扩散, 其基本解为

$$I(x; t) = I_0 * h(x; t) \quad (2)$$

其中:  $I(x; t)$  为经过时间尺度  $t$  扩散后图像;  $h(x; t) = Ag_\sigma(x; t)e^{i\alpha(x; t)}$  为核函数;  $*$  为褶积算子。式中

$$A = \frac{1}{\sqrt{\cos\theta}}$$

$$g_\sigma(x; t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(t)} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2(t)}\right]$$

$$\alpha(x; t) = \frac{x^2 \sin\theta}{4tr} - \frac{\theta}{2}$$

其中  $\sigma(t) = \sqrt{\frac{2tr}{\cos\theta}}$ 。正向扩散过程要求  $t \geq 0$ , 当  $\theta \rightarrow$

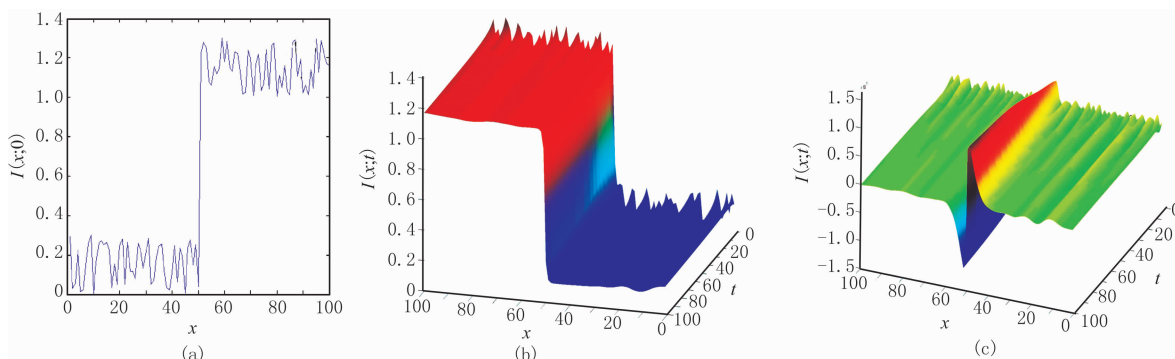


图 1 原始加噪信号(a)及其复数域线性各向异性扩散滤波获得的不同尺度的实部(b)、虚部(c)

器, 也称冲击滤波器) 作为一种稳定锐化的处理过程, 类似于反褶积。其基本思想为: 在图像极大值附近使用膨胀算子, 而在极小值附近使用腐蚀算子以达到冲击效果<sup>[10]</sup>, 通过拉普拉斯算子判断像素点是在极大值或者极小值附近。Shock 滤波方程为

$$I_t = -|I_x| F(I_{xx}) \quad (4)$$

其中  $F$  必须满足  $F(0) = 0$  和  $F(s)\text{sign}(s) \geq 0$  ( $\text{sign}(s)$  为符号函数,  $s = I_{xx}$ )。

与平滑去噪相反, Shock 滤波器能起到锐化边缘的作用, 主要在图像的灰度拐点两侧增大灰度差异, 但滤波过程对噪声非常敏感。针对这一缺陷, 后人提出了许多方法, 尝试加入一些新的元素来控制 Shock 滤波器对噪声的敏感性, 改善其边缘增强效果, 其中最典型的有 Shock 滤波器与偏微分方程结

合的方法<sup>[11]</sup>。Shock 滤波器中滤波算子  $F(s)$  的选择对于滤波过程有重要影响, 为了使边缘处相对平滑区域锐化强烈, 取

$$\begin{cases} \lim_{\theta \rightarrow 0} \text{Re}(I) = g_\sigma * I_0 \\ \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\text{Im}(I)}{\theta} = tr \Delta g_\sigma * I_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\text{Re}(\cdot)$  为实部,  $\text{Im}(\cdot)$  为虚部;  $\Delta$  为拉普拉斯算子。由式(3)可见: 当  $\theta \rightarrow 0$  时, 式(1) 解的实部近似为图像的高斯褶积; 虚部可以近似为图像的高斯褶积的拉普拉斯变换, 该算子是随时间做尺度变化的平滑二阶导数, 因此可以用作边缘检测。

仿真信号的复数域各向异性扩散实例(图 1) 说明: 当  $\theta \rightarrow 0$  时复数域线性各向异性扩散方程(式(1)) 的近似解由式(3) 所表达; 复数域线性各向异性扩散具有较强的噪声压制能力, 但随迭代次数增加边缘部分扩散较强, 边缘保持效果不理想; 虚部反映信号边缘信息。

## 2.2 复数域非线性扩散方程

文献[6] 利用一种双曲线方程(即 Shock 滤波

器) 作为一种稳定锐化的处理过程, 类似于反褶积。其基本思想为: 在图像极大值附近使用膨胀算子, 而在极小值附近使用腐蚀算子以达到冲击效果<sup>[10]</sup>, 通过拉普拉斯算子判断像素点是在极大值或者极小值附近。Shock 滤波方程为

$$F(s) = \frac{2}{\pi} \arctan(as)$$

从而将式(4) 改写为

$$I_t = -\frac{2}{\pi} \arctan(aI_{xx}) |I_x| + \lambda I_{xx} \quad (5)$$

式中:  $a$  作为锐化系数, 控制梯度过零点附近锐化强度;  $\lambda > 0$  为常数。

由式(3) 和式(5) 可以推导出  $\theta \rightarrow 0$  时复数域非线性各向异性扩散滤波方程

$$I_t = -\frac{2}{\pi} \arctan\left[a \text{Im}\left(\frac{I}{\theta}\right)\right] |I_x| + \lambda I_{xx} \quad (6)$$

式中  $\lambda = re^{i\theta}$  为复数。将式(6) 推广到二维空间, 即

$$I_t = -\frac{2}{\pi} \arctan \left[ a \operatorname{Im} \left( \frac{I}{\theta} \right) \right] |\nabla I| + \lambda I_{\eta} + \tilde{\lambda} I_{\zeta} \quad (7)$$

其中:  $\nabla$  为梯度算子;  $\lambda$  和  $\tilde{\lambda}$  为复常数;  $I_{\eta}$  为梯度方向二阶偏导数 ( $\eta$  为梯度方向);  $I_{\zeta}$  为垂直梯度方向二阶偏导数 ( $\zeta$  为垂直梯度方向)。

通过复数域非线性各向异性扩散滤波可以有效降低模糊度, 扩散过程遵守最小-最大原理<sup>[11]</sup> (即没有新的局部极值产生, 在任何时间全局的最大

和最小值受初始条件限制), 在边缘处与平滑区域具有不同的权值, 在接近边缘区域具有较大的数量级, 相对于平滑区域具有更强烈的锐化程度, 并且避免了每次迭代过程中需要将图像与高斯信号褶积, 仍然可以获得光滑的结果。由不同方法对图 1a 的滤波结果(图 2)表明: P-M 扩散滤波对噪声压制能力较弱(图 2a), 扩散滤波后信号有较大畸变; 复数域各向异性扩散滤波具有良好的压制噪声和边缘增强能力(图 2b、图 2c)。

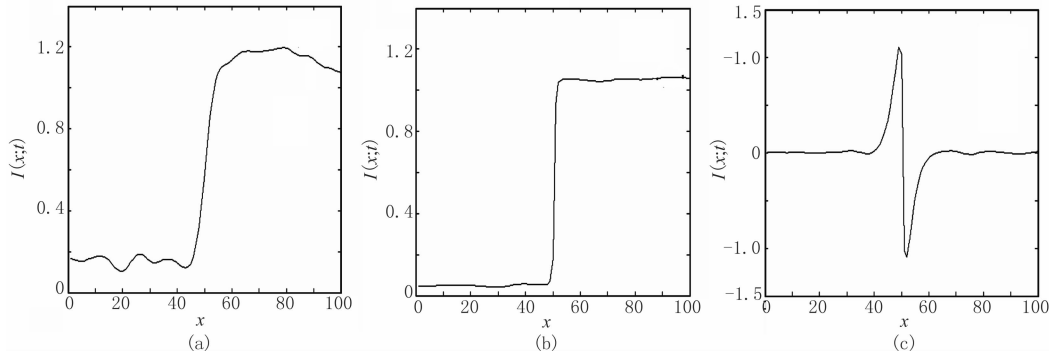


图 2 不同方法对图 1a 的滤波结果( $t=0.25$ )

(a) P-M 扩散滤波; (b) 复数域非线性扩散滤波的实部; (c) 复数域非线性扩散滤波的虚部

### 2.3 储层裂缝发育带

所谓裂缝发育带是指相对围岩而言, 其裂缝密度明显增大, 并有一定延伸范围的地质体。自然界中岩层或岩石中普遍存在孔隙、裂缝和溶蚀孔洞, 其形态各异, 尺度大小相差悬殊<sup>[1,2,12]</sup>。受地震勘探分辨率限制, 地震资料中难以识别小于第一菲涅尔带宽度的地质体<sup>[13]</sup>, 即使采用最高分辨率的地震资料也难于识别单个的中、小尺度裂缝。然而单个的、孤立的中小裂缝对油气赋存意义不大, 只有具有一定规模的裂缝发育带才具有勘探、开发价值。

## 3 应用实例

本文以中国西部 M 地区二叠系储层裂缝发育带的检测结果评价文中方法的效果。该地区位于逆冲断裂带, 地表条件复杂, 二叠系云质岩分布广泛, 储层较为致密, 储集性能主要受裂缝控制, 多期构造应力作用为裂缝带的发育提供了地质条件。该区地震资料采集、处理难度大, 所得的处理剖面信噪比低, 噪声干扰严重。

图 3 为该区低信噪比原始地震剖面 A 及复数

域非线性各向异性扩散滤波剖面, 由图中可见: 原始地震剖面同相轴不连续(图 3a), 描述构造精细特征有困难(椭圆位置); 采用复数域非线性各向异性扩散滤波能较好地压制噪声, 增强剖面同相轴连续性, 同时增强边缘信息, 提高了资料信噪比(椭圆位置), 有利于构造精细解释(图 3b)。

图 4 为实际资料的滤波沿层切片, 由图中可见: 由第三代相干(图 4a)及本文提出的结合复数域非线性各向异性扩散滤波与相干的方法(图 4b、图 4c)得到的裂缝发育带的宏观发育趋势基本一致, 虽然前者可以获得该区断裂信息, 但由于受噪声干扰, 相干法对于这些信息的描述不清晰, 容易造成假象; 后者对噪声压制能力更强, 对裂缝发育带刻画更加细致, 使断裂信息更加清晰, 能够准确反映裂缝发育区域。

图 5 为图 4 数据的局部放大, 由图中可见: 在原始资料第三代相干切片上(图 5a), 4 口井(井 1~井 4)均落在裂缝发育带上; 由相干与复数域非线性扩散滤波实部(图 5b)、虚部切片(图 5c)可以看出, 井 1、井 2 及其附近裂缝较发育, 有利于油气运移和聚集成藏, 井 3、井 4 及其附近裂缝不发育。测井解释及钻井资料证实: 井 1、井 2 二叠系储层岩性为白



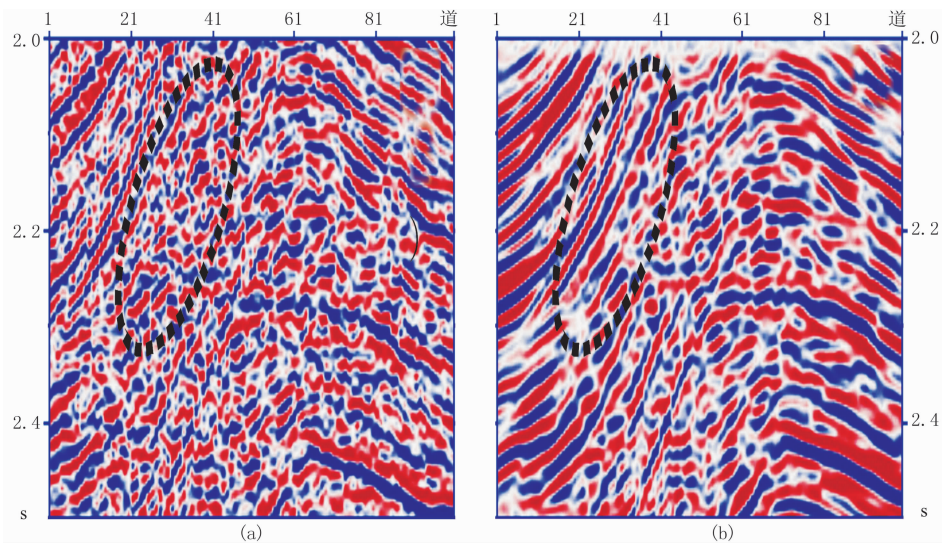


图 3 低信噪比原始地震剖面 A(a)及复数域非线性各向异性扩散滤波剖面(b)

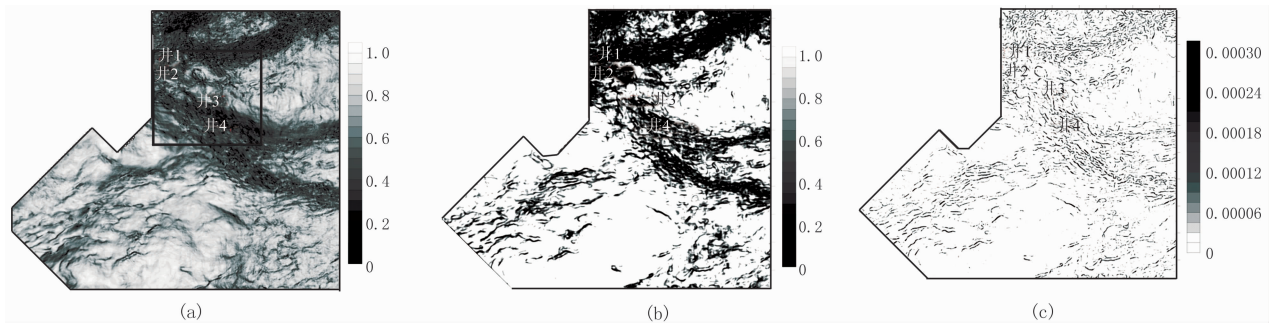


图 4 实际资料的滤波沿层切片

(a)原始资料第三代相干切片;(b)相干与复数域非线性扩散滤波实部切片;(c)相干与复数域非线性扩散滤波虚部切片(边缘检测算子)

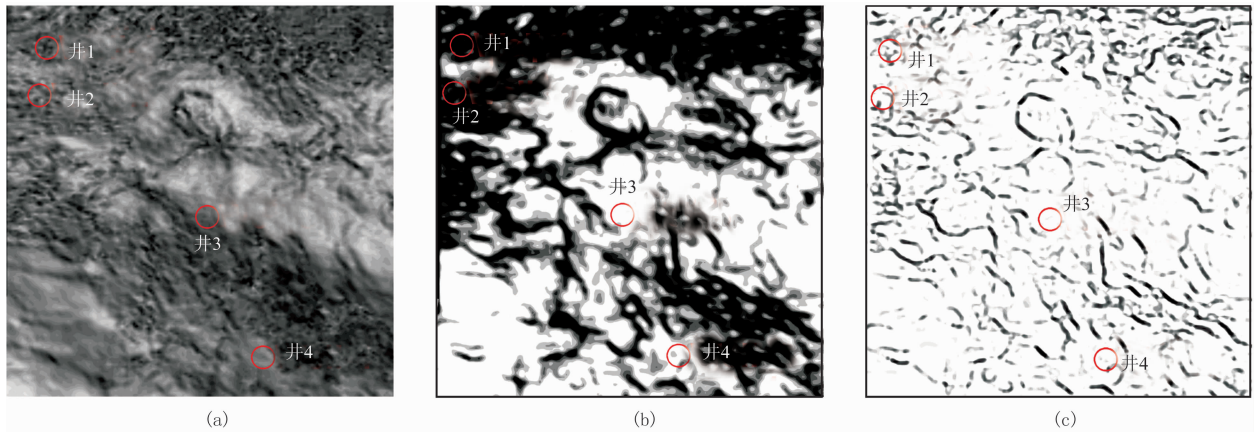


图 5 图 4 数据的局部放大

(a)原始资料第三代相干切片;(b)相干与复数域非线性扩散滤波实部切片;(c)相干与复数域非线性扩散滤波虚部切片(边缘检测算子)

云质粉砂岩,储层具有裂缝—孔隙双重介质特征,裂缝发育,获得高产工业油流;井 3、井 4 岩性致密,裂缝不发育,解释为干层。因此图 5 的裂缝检测结果与钻、测井资料验证结果相吻合。

### 4 结束语

实际资料计算结果表明:本文提出的基于复数

域非线性各向异性扩散滤波的储层裂缝检测方法是有效的,该法克服了 P-M 模型易产生集块效应,边缘保持效果不理想,无法滤除边缘噪声,且 P-M 方程是病态的缺点;通过复数域非线性各向异性扩散可以有效地降低模糊度和 Shock 滤波器对噪声敏感的缺点。因此本文方法具有较强的噪声压制能力,同时能够有效地突出储层裂缝边缘细节,具有较高的裂缝检测精度,检测结果与钻、测井资料验证结果相吻合。因此基于复数域非线性各向异性扩散滤波裂缝检测方法可以提高地震资料解释准确性,具有重要的实际应用价值。

#### 参 考 文 献

- [1] 贺振华,黄德济,文晓涛. 裂缝油气藏地球物理预测. 四川成都:四川科学技术出版社,2007:1~5
- [2] 熊晓军,贺振华,赵明金等. 一种基于 GHT 的裂缝检测新方法. 石油地球物理勘探,2009,44(4):442~444  
Xiong Xiaojun, He Zhenhua, Zhao Mingjin et al. A new GHT based fractural detection method. *OGP*, 2009,44(4):442~444
- [3] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7):629~638
- [4] Cottet G H, Germ L. Image processing through reaction combined nonlinear diffusion. *Mathematic of Computation*, 1993, 11(61):659~673
- [5] Weickert J. Coherence-enhancing diffusion filtering. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 31(2):111~127
- [6] Osher S J, Rudin L I. Feature-oriented image enhancement using shock filter. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1990, 27(4):919~940
- [7] Gilboa Guy, Nir A Sochen et al. Regularized shock filters and complex diffusion. *Lecture Notes in Computer Science*, 2002, 2350:399~413
- [8] 孙夕平,杜世通,汤磊. 相干增强各向异性扩散滤波技术. 石油地球物理勘探, 2004, 39(6):651~655, 665  
Sun Xiping, Du Shitong and Tang Lei. Coherent-enhancing anisotropic diffusion filtering technique. *OGP*, 2004, 39(6):651~655, 665
- [9] 王绪松,杨长春. 对地震图像进行保边滤波的非线性各向异性扩散算法. 地球物理学进展, 2006, 21(2):452~457  
Wang Xusong, Yang Changchun. An edge-preserving smoothing algorithm of seismic image using nonlinear anisotropic diffusion equation. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(2):452~457
- [10] 唐磊,赵春霞,王鸿男等. 路面图像增强的多偏微分方程融合法. 中国图像图形学报, 2008, 13(9):1661~1666  
Tang Lei, Zhao Chunxia, Wang Hongnan et al. Fusion of multiple basic PDE models for enhancing road surface images. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(9):1661~1666
- [11] 尹奎英,胡利平,刘宏伟等. 一种复合的 SAR 图像去噪算法. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2010, 37(2):224~230  
Yin Kuiying, Hu Liping, Liu Hongwei et al. Composite enhancing and denoising algorithm for SAR images based on scale space correlation. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(2):224~230
- [12] 蔡涵鹏,贺振华,唐湘蓉等. 岩性体边界与断裂异常信息识别研究及应用. 断块油气田, 2010, 17(3):285~288  
Cai Hanpeng, He Zhenhua, Tang Xiangrong et al. Study and application of identification of abnormal information between lithologic body boundaries and fractures. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2010, 17(3):285~288
- [13] 王绪松,钱雪峰,李波涛. 第一菲涅尔带半径与地震资料的横向分辨率. 勘探地球物理进展, 2006, 29(4):244~248  
Wang Xusong, Qian Xuefeng and Li Botao. The first Fresnel zone radius and lateral resolving power of seismic data. *Progress in Exploration Geophysics*, 2006, 29(4):244~248

(本文编辑:刘勇)