

文章编号: 0253-2697(2011)05-0815-05

一种改进的全变分地震图像去噪技术

屈勇¹ 曹俊兴^{1,2} 朱海东¹ 任聪³

(1. 成都理工大学地球物理学院 四川成都 610059; 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. 中国石油东方地球物理勘探有限公司研究院库尔勒分院 新疆库尔勒 841000)

摘要:消除地震记录中的噪声是地震资料处理的重要环节,它对地震资料的后续处理和解释都有重要意义。在对传统全变分图像去噪模型原理分析的基础上,提出了一种加入扩散张量的改进全变分图像去噪方法。这种方法能够加强全变分模型中扩散项沿地层纹理方向的滤波作用,使得地层沿层理方向的连续性得到一致性增强;同时控制垂直于地层层理方向上的扩散以保护边缘信息。对川西某实际地震资料的处理结果表明,该方法能够有效地消除地震图像中的噪声,增强同相轴的连续性,提高地震资料的信噪比。

关键词:地震图像;全变分模型;扩散张量;平滑滤波;信噪比

中图分类号: P631.443

文献标识码: A

An improved total variation technique for seismic image denoising

QU Yong¹ CAO Junxing^{1,2} ZHU Haidong¹ REN Cong³

(1. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Korla Branch of Bureau of Geophysical Prospecting Co., Ltd, CNPC, Korla 841000, China)

Abstract: Noise muffling of seismic records is a significant step in seismic data processing and it is of great importance in processing and interpreting seismic data subsequently. Based on the analysis of principles of a traditional total variation image denoising model, an improved total variation approach to image denoising with diffusion tensor appended was proposed. Through enhancing the anisotropic filtering of diffusion terms along the orientation of stratigraphic textures in the total variation model, this approach could consistently strengthen the formation continuity along the orientation and control the diffusion state perpendicular to stratigraphic bedding so as to preserve the edge structure information. The actual result of this approach in application to some seismic data from western Sichuan showed that it could effectively remove the noise in seismic images, enhance the continuity of seismic events and increase the signal to noise ratio of seismic data.

Key words: seismic image; total variation model; diffusion tensor; smooth filtering; signal to noise ratio

消除地震记录中的噪声且同时保持地震图像中的构造边缘信息,是地震资料处理的一个重点,目前已有的许多方法虽可在一定程度上去除地震资料中的噪声,如带通滤波^[1]、分形理论^[2]等,但是这些处理都会在一定程度上模糊地震图像并使地震图像上一些地质体边缘特征被抹去。因此,如何在去除地震图像噪声的同时保持地震图像上的边缘结构特征,是地震资料处理的一个难题。近年来基于全变分图像去噪方法逐渐成为图像研究的热点方法,并在图像处理领域得到大量应用。其思想是将图像去噪问题转换成一个图像模型的能量泛函最小化问题^[3],其实质就是各向异性扩散。但是这种模型有时也会将噪声当作图像边缘,从而使恢复的图像出现假的边缘,尤其是地震图像又具有成层纹理性和地质体边缘结构细微性,因此这些

全变分图像去噪模型在地震成像上并不能取得好的效果。笔者在仔细研究全变分图像去噪原理的基础上,提出了一种加入扩散张量的改进全变分图像去噪方法,该方法通过加强全变分方程中扩散项的各向异性扩散滤波作用,来达到噪声衰减和结构特征增强的目的。

1 全变分模型图像去噪原理

假设 ϕ 为清晰的地震信号, n 为采集过程中混入的随机噪声,则得到的观测记录为

$$\phi_0(x, y) = \phi(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

式中: ϕ_0 为初始的地震图像; (x, y) 为地震图像中某一点的坐标。

根据Chambolle^[4]的定义,可以将原始地震图像数据 ϕ 的全变分定义为

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国石油化工股份有限公司联合基金项目(No. 40739907)资助。

第一作者及通讯作者:屈勇,男,1987年10月生,2009年毕业于成都理工大学勘查技术与工程专业,现为成都理工大学地球探测与信息技术专业在读硕士研究生,研究方向为油气地球物理勘探与储层信息提取。E-mail:quyong654321@gmail.com

$$TV(\phi) = \iint_{\Omega} |\nabla \phi| dx dy \quad (2)$$

式中: $TV(\phi)$ 为全变分原始地震图像; $|\nabla \phi|$ 为地震图像梯度 $\nabla \phi$ 的模; Ω 为地震图像区域。

由于噪声图像的全变分明显要比无噪声图像的全变分大^[5], 因此全变分的图像降噪可以归结为最小化全变分泛函问题:

$$\min TV(\phi) = \min \iint_{\Omega} |\nabla \phi| dx dy = \min \iint_{\Omega} \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} dx dy \quad (3)$$

式中: ϕ_x 和 ϕ_y 分别是地震图像在纵横两个方向上的方向导数。

利用 Lagrange 乘子法定义一个新的能量泛函^[6], 使得最小化的式(2)等价于最小化的式(4):

$$\min TV(\phi) = \iint_{\Omega} |\nabla \phi| dx dy + \frac{\lambda}{2} \iint_{\Omega} (\phi - \phi_0)^2 dx dy \quad (4)$$

式(4)的第一项为光滑项, 其目的是平滑图像; 第二项是逼近项, 其目的是使恢复后的图像与恢复前的图像的改变不会太大; λ 为规整参数, 它是一个正的实数, 其目的是在图像的去噪与平滑中起到平衡作用^[7]。

这样式(4)就是一个全变分图像模型, 基于它可以导出其 Euler-Lagrange 方程:

$$J[\phi(x, y)] = \iint_{\Omega} \Psi(x, y, \phi, \phi_x, \phi_y) dx dy \quad (5)$$

式中: $J(\phi)$ 为原始地震图像的能量泛函; Ψ 为地震图像的复原模型。

要实现地震图像的去噪就是要在复原模型 Ψ 中寻找函数 $\phi(x, y)$, 并使 $J[\phi(x, y)]$ 在定义域 Ω 中达到极值。而让 $J[\phi(x, y)]$ 达到极值的条件是它的一阶导数为零, 这样可导出式(6)

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \phi_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \phi_y} \right) = 0 \quad (6)$$

由图像的复原模型

$$\Psi(x, y) = \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} + \frac{\lambda}{2} (\phi - \phi_0) \quad (7)$$

找出其对应的 Euler-Lagrange 方程

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) + \lambda (\phi - \phi_0) = 0 \quad (8)$$

将式(8)做梯度下降的处理, 得到式(9)偏微分方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) - \lambda (\phi - \phi_0) \quad (9)$$

式中: t 为时间尺度因子。

从式(9)可以看出, 全变分图像去噪的主体部分是

各向异性扩散, 只是在后面加入了一个规整项, 其目的是使图像平滑和规整之间达到一种平衡的态势。在式(9)的扩散项中, 扩散系数 $\frac{1}{|\nabla \phi|}$ 为梯度模的倒数。图像

在边缘处 $|\nabla \phi|$ 较大, 则扩散系数较小, 扩散较弱; 在平滑区域 $|\nabla \phi|$ 较小, 则扩散系数较大, 扩散能力较强。但这种模型中的各向异性扩散有可能将噪声当成边缘, 使其在平滑区产生阶梯效应^[8]。针对这种情况, 笔者提出了一种加入扩散张量的改进全变分模型。

2 改进全变分图像去噪分析

改进后的算法相对于式(9)算法的最大区别是利用扩散张量代替了原先的扩散系数。扩散张量是在 Perona^[9] 和 Weickert^[10] 等人提出的非线性扩散方程的基础上, 通过引入反映图像纹理的结构张量来构建的。

扩散张量的求取: 首先需要利用图像梯度形成张量积 S_0 , 然后再利用一个高斯核函数与其进行褶积后得到结构张量 S_ρ

$$S_\rho(\nabla \phi) = G_\rho \times S_0(\nabla \phi) = G_\rho \times (\nabla \phi \otimes \nabla \phi^T) = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{12} & s_{22} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中: G_ρ 为尺度为 ρ 的高斯函数。

由于式(10)构造的结构张量 S_ρ 是一个半正定的矩阵, 因此具有正交的特征向量 ω_1 、 ω_2 和对应的特征值 λ_1 、 λ_2 , 且满足 $\omega_1 // \nabla \phi$, $\omega_2 \perp \nabla \phi$ 。特征值 λ_1 和 λ_2 之间的差值为 α , 并满足

$$\alpha = \sqrt{(s_{11} - s_{22})^2 + 4s_{12}^2} \quad (11)$$

结构张量 S_ρ 的特征值 λ_1 和 λ_2 反映了特征方向上的平均对比度, 即在特征方向上数据的波动情况, 并总有 $\lambda_1 > \lambda_2$ 。所以 λ_1 指向波动最大的方向, 即图像的梯度方向; λ_2 指向与梯度垂直的法线方向^[11]。将 ω_1 和 ω_2 作为特征向量, 令其特征值为 μ_1 和 μ_2 , 构造扩散张量为^[12]

$$D = (\omega_1 \ \omega_2) \begin{pmatrix} \mu_1 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1^T \\ \omega_2^T \end{pmatrix} \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} \mu_1 = c \\ \mu_2 = \begin{cases} c & \text{当 } \lambda_1 = \lambda_2 \text{ 时} \\ c + (1-c) \cdot \exp(-\alpha^{-2}) & \text{当 } \lambda_1 \neq \lambda_2 \text{ 时} \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中: D 为由地震图像所构建的扩散张量; c 为 $0 \sim 1$ 之间的正的常数; μ_1 为扩散张量的特征值, μ_1 所对应的值与梯度 $\nabla \phi$ 方向平行; μ_2 也为扩散张量的特征值, 且是一个与 α 有关的增函数, 其对应的值与梯度 $\nabla \phi$ 方

向垂直。

由扩散张量的形式可知,特征值 μ_1 和 μ_2 控制着两个方向上的扩散程度,特征向量 ω_1 和 ω_2 控制扩散的方向。由于 μ_1 是一个较小的正数,因此在与边缘垂直的方向(即垂直于地层纹理方向)上扩散很小,这样可以减小地震图像的阶梯效应,防止“伪层”的产生;而在沿梯度垂直的方向(即地层纹理方向)上,随着 α 的增大, μ_2 也增大,沿着地层纹理的方向上的噪声会下降,地层的纹线也得到一致性增强^[13]。将扩散张量 D 代替扩散系数 $\frac{1}{|\nabla \phi|}$,就得到改进后的全变分去噪模型,利用梯度下降法,得到该模型的偏微分方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla \phi) - \lambda(\phi - \phi_0) \\ \phi|_{t=0} = \phi_0 \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)左边的微分用差分代替,就可以得到如下的迭代公式

$$\phi^{k+1} = \phi^k + [\nabla \cdot (D \cdot \nabla \phi^k) - \lambda(\phi^k - \phi_0)] \cdot \Delta t \quad (15)$$

式中: k 为迭代次数; Δt 为迭代步长; ϕ^k 为 k 次迭代后的地震图像; $\nabla \phi^k$ 为 ϕ^k 的梯度。

根据以上的数学表达式,我们可以设计如下相应的算法。其步骤如下:①设置迭代次数 k ,并求地震图像的方向导数,利用式(10)计算地震图像的结构张量;②对结构张量 S_ρ 做矩阵分解,得到特征向量 ω_1 、 ω_2 及其特征值 λ_1 、 λ_2 ,将该特征向量作为扩散张量的特征向量,利用式(11)和式(13)求得扩散张量的特征值;③利用式(12)计算扩散张量 D ;④计算 $\nabla \cdot (D \cdot \nabla \phi^k)$ 和 $\lambda(\phi^k - \phi_0)$ 的值;⑤利用迭代公式(15)进行 k 次迭代计算,得到最终的迭代结果,进行数据输出。

3 实际应用

利用传统全变分图像去噪方法及其改进后的方法对川西龙门山区域地震资料进行了处理。图 1(a)为该区某一地震测线的含有噪声的原始地震记录,该测线横向上共 160 道,道间距 25 m,纵向上为 600 ms。图 1(b)和图 1(c)分别是利用传统全变分图像去噪方法和改进后的方法对原始含噪声地震剖面的处理结果。为了进行对比验证,两种处理方式的迭代次数均为 10 次,迭代步长均为 0.2。从这 3 幅地震剖面可以看出,改进后的方法相对于传统全变分图像去噪方法,处理后地震剖面的同相轴连续性更好,层间结构也更清晰。

同时,采用传统全变分图像去噪方法及其改进后的方法对川西龙门山区域地震振幅切片图像进行了处

理。图 2(a)是原始含噪声的沿层振幅切片,在图片的下方,有一条自西向东的构造高部位线;图 2(b)和图 2(c)分别是采用传统全变分图像去噪方法及其改进后的方法对其进行处理后的图像。

从处理结果的对比来看,经过传统全变分去噪处理后的振幅切片,构造高部位特征有所增强[图 2(b)],但是其去噪和结构增强的效果不是很明显;而图 2(c)中,其构造高部位特征线条清晰度更高,在一些小的结构的显示上更加明显,同时也去除了原始振幅切片上的噪声,使得整体显示更加清晰。为评价传统全变分图像去噪及改进后处理方法的效果,笔者利用峰值信噪比^[14] (P_{SNR})和边缘保持度^[15] (I_{EP})两个参数对其进行评价:

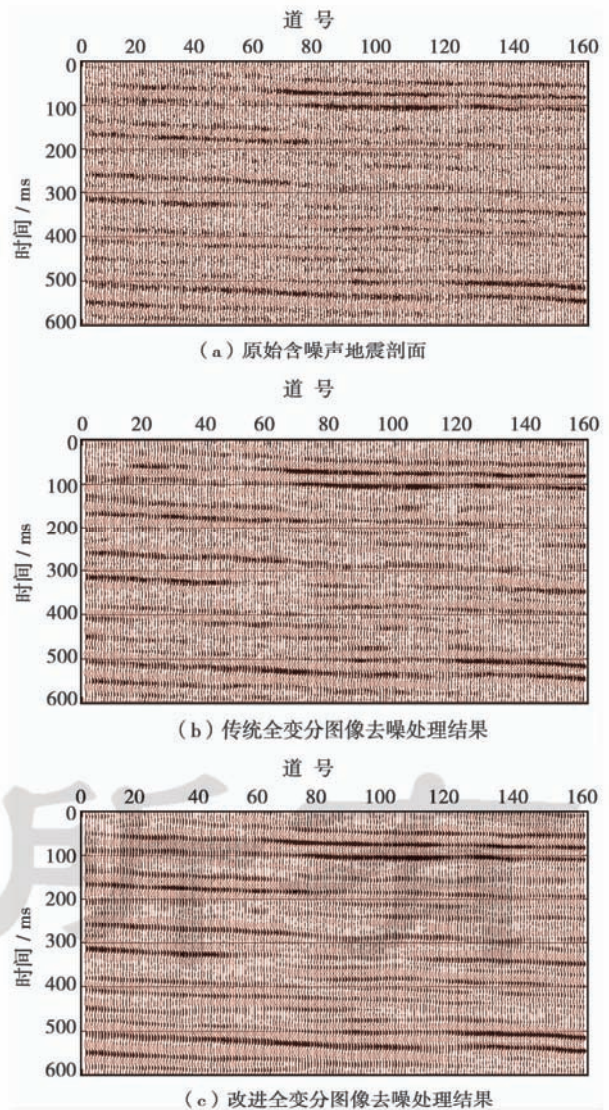


图1 原始地震剖面及其处理后的结果

Fig.1 Original and the processed seismic profiles

$$P_{\text{SNR}} = 10 \times \lg \frac{255^2 mn}{\sum [\hat{\phi}(i, j) - \hat{\phi}(i, j)]^2} \quad (16)$$

$$I_{EP} = \frac{\sum |\hat{\phi}_s(i, j) - \hat{\phi}_s(i+1, j)| + |\hat{\phi}_s(i, j) - \hat{\phi}_s(i, j+1)|}{\sum |\hat{\phi}(i, j) - \hat{\phi}(i+1, j)| + |\hat{\phi}(i, j) - \hat{\phi}(i, j+1)|} \quad (17)$$

式中: $\hat{\phi}$ 为归一化后的原始地震数据; $\hat{\phi}_s$ 为经过处理的数据; (i, j) 为地震图像中的某一个点; m, n 代表地震图像中点的集合。

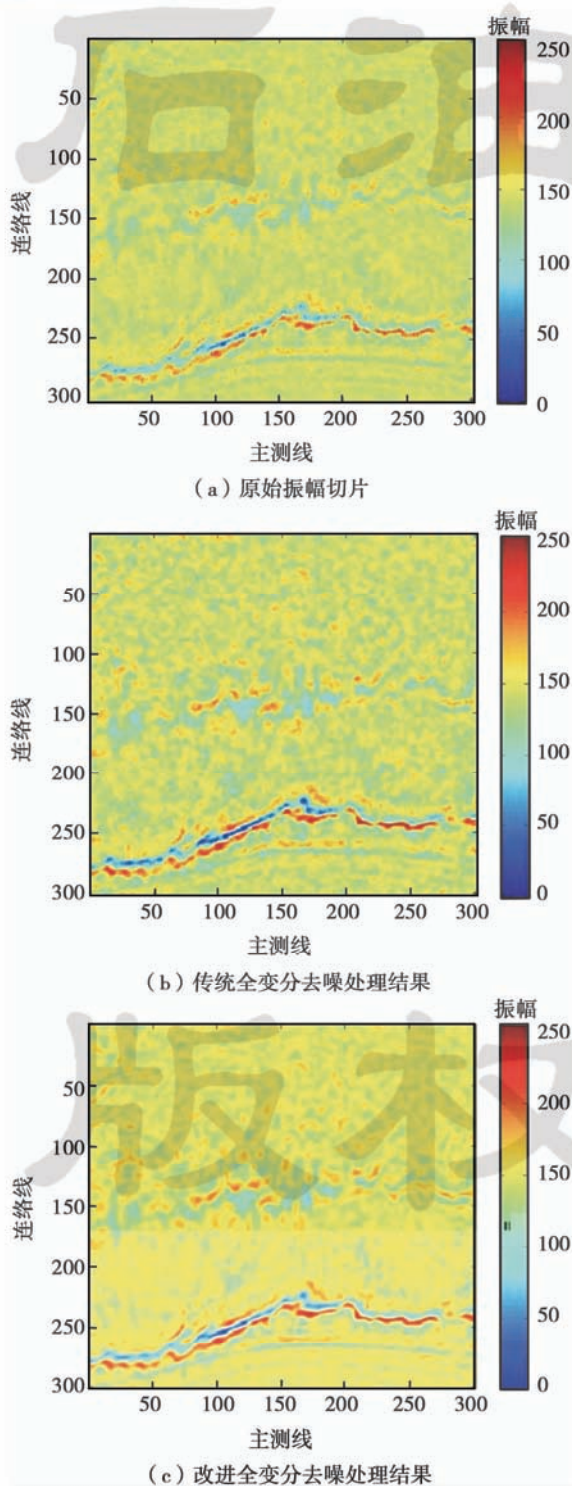


图 2 原始振幅切片及其处理后的结果

Fig. 2 Original and the processed seismic amplitude slices

从表 1 可以看出,改进后的处理方法相对于传统的全变分方法,无论是在峰值信噪比或是边缘保持度上,都有明显的提高。

表 1 两种方法处理结果及其对比

Table 1 Comparison of processing results by two kinds of methods

采用方法	峰值信噪比		边缘保持度	
	地震剖面	振幅切片	地震剖面	振幅切片
传统全变分去噪方法	19.52	22.47	0.672	0.697
本文改进后方法	23.46	26.13	0.736	0.729

4 结 论

(1) 传统全变分图像去噪方法能够在一定程度上去除地震图像中的噪声,加强地震图像中细微地质体的边缘结构,但是传统全变分图像去噪模型扩散项中的扩散系数对于地震图像中的边缘结构变化不敏感,因此扩散去噪效果不明显。

(2) 相对于传统的全变分图像去噪方法,改进后方法的最大特点是利用扩散张量替代原先的扩散系数。这一改进增强了扩散项在地震图像中沿纹理方向扩散的控制作用,因此,保证了在地震图像中垂直于同相轴的部分扩散弱,使地层层理不被模糊,同时在同相轴上一致性的扩散增强,以保持其连续性。

(3) 实际资料的处理分析显示,改进后的方法相对于传统方法,在地震剖面中去除噪声的同时显著增强了同相轴的连续性,在振幅切片中也使得一些细微的结构特征得到加强。因此,改进后的全变分图像去噪方法可以提高地震资料的信噪比,帮助解释人员提高地震资料解释的准确性,并有助于实现计算机自动层位追踪。

参 考 文 献

- [1] 刘振武,撒利明,张昕,等. 中国石油开发地震技术应用现状和未来发展建议[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 711-717.
Liu Zhenwu, Sa Liming, Zhang Xin, et al. Current application and future development of production seismology in PetroChina[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 711-717.
- [2] 孟庆武,李成斌,李强,等. 分形理论在高分辨处理中的应用[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 31-35.
Meng Qingwu, Li Chengbin, Li Qiang, et al. Application of fractal theory in high resolution processing of seismic data[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(2): 31-35.
- [3] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1/2/3/4): 259-268.
- [4] Chambolle A, Lions P L. Image recovery via total variation minimization and related problems[J]. Numerische Mathematik, 1997,

- 76(2):167-188.
- [5] Chen Q, Montesinos P, Sun Q S, et al. Adaptive total variation denoising based on difference curvature[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(3):298-306.
- [6] Chan T, Marquina A, Mulet P. High-order total variation-based image restoration[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2000, 22(2):503-516.
- [7] 李敏, 冯象初. 基于全变差和小波方法的图像去噪模型[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2006, 33(6):980-984.
Li Min, Feng Xiangchu. A denoising model using the total variation and wavelet method[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(6):980-984.
- [8] 余丽红, 冯衍秋, 陈武凡. 基于自适应正则化的全变分去噪算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(10):1950-1954.
Yu Lihong, Feng Yanqiu, Chen Wufan. Adaptive regularization method based total variational de-noising algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(10):1950-1954.
- [9] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7):629-639.
- [10] Weickert J. Coherence-enhancing, diffusion filtering[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 31(2/3):111-127.
- [11] 陈凤, 李金宗, 李冬冬, 等. 提高地震图像信噪比的非线性各向异性扩散算法模型[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2):77-80.
Chen Feng, Li Jinzong, Li Dongdong, et al. A model of nonlinear anisotropic diffusion for increasing signal to noise ratio of seismic image[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2):77-80.
- [12] 孙夕平, 杜世通, 汤磊. 相干增强各向异性扩散滤波技术[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(6):651-655.
Sun Xiping, Du Shitong, Tang Lei. Coherent-enhancing anisotropic diffusion filtering technique[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(6):651-655.
- [13] 项明, 吴小培, 汤婷, 等. 小波域中的 PDE 指纹图像增强[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(27):188-190.
Xiang Ming, Wu Xiaopei, Tang Ting, et al. Fingerprint image enhancement by directional diffusion PDE in wavelet domain[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(27):188-190.
- [14] 钟勇, 孙东, 陈磊. 图像增强技术在地震资料处理中的应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(3):392-395.
Zhong Yong, Sun Dong, Chen Lei. The application of the image enhancement technology to seismic data processing[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(3):392-395.
- [15] 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[J]. 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[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2):452-457.

(收稿日期 2010-10-28 改回日期 2011-02-09 责任编辑 王 秀)

《石油学报》2011 年第 6 期部分文章预告 (I)

渤海湾盆地牛东 1 高温潜山油气藏的发现及其意义	赵贤正等
冀中坳陷新近系油气成藏机理与成藏模式	刘 华等
塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理	赵宗举等
塔北哈拉哈塘地区奥陶系一间房组碳酸盐岩岩心裂缝类型及期次	高计县等
塔中地区志留系柯坪塔格组砂岩输导层量化表征及有效性评价	赵 健等
四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件	聂海宽等
松辽盆地北部深层火山岩气藏的充注: 来自流体包裹体的证据	肖 骏等
准噶尔盆地西北缘走滑构造与油气勘探	邵 雨等
复杂构造建模的理论与技术架构	管树巍等
鄂尔多斯盆地石盒子组致密砂岩的弹性特征	马中高等