

一种遥感影像噪声抑制各向异性扩散算法

段加波, 张海荣, 王 栋

中国矿业大学测绘与空间信息工程研究所; 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏徐州 221008

摘要 噪声抑制是遥感影像处理中一个重要研究课题, 但常用的去噪算法会造成细节损失。为有效抑制噪声, 同时保护边缘, 本研究在 Perona-Malik 扩散模型基础上, 提出了一种新的基于方向信息测度和边缘隶属度的各向异性扩散滤波算法。本算法的核心思想是根据遥感影像在其均匀区域各向同性扩散而在边缘细节区域各向异性扩散的这种局部特征, 将影像分为边缘区和非边缘区两个区域, 对非边缘区采用常规 Perona-Malik 扩散方程完成噪声的滤除, 而对边缘区采用基于方向信息测度的非线性扩散方法进行处理, 在平滑去噪的同时对边缘进行修整, 不仅可以很好保持边缘细节信息, 而且可以对其进行增强。实验结果表明, 该算法的峰值信噪比、均方误差、辐射分辨率等参数均优于常规算法, 提高了遥感影像的等效视数, 有效消除了影像中的相干噪声。算法具有良好的应用前景和实用价值。

关键词 噪声抑制; 各向异性扩散; 方向信息测度; 边缘隶属度; 辐射分辨率

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)01-0069-05

An Anisotropic Diffusion Algorithm for Denoising for Remote Sensing Image

DUAN Jiabo, ZHANG Hairong, WANG Dong

Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environment Information Engineering, Institute of Surveying and Spatial Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu Province, China

Abstract Noise reduction is an important research topic for the remote sensing image processing, and the commonly used noise reduction methods usually cause a loss of the details. In order to effectively reduce the noise and keep the edge information intact at the same time, a new anisotropic diffusion algorithm based on the information measure and the edge membership is proposed. As the local feature of remote sensing image which has anisotropic diffusion in the heterogeneous area and isotropic diffusion in the homogeneous area, the core content of this algorithm is to divide the remote sensing image into two areas, the edge area and the non-edge area. While the conventional Perona-Malik diffusion equation is used into the non-edge area to filter the noise, and the nonlinear diffusion equation based on the information measure is used into the edge area to filter the noise and enhance the edge and details. The final results show that this algorithm's Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), Maximum Absolute Error (MAE) and radiometric resolution are better than the traditional algorithms. Experimental results also prove that the algorithm can greatly enhance the equivalent number of looks of the remote sensing image and effectively inhibit the coherent noise of the remote sensing image. So this algorithm has practicality and potential application value.

Keywords image noise inhibition; anisotropic diffusion; information measure; edge membership; radiometric resolution

0 引言

目前, 数学偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 思想已广泛应用于遥感影像处理中的各个领域, 如影像

去噪、边缘提取和影像重建等。这种思想起源于计算机视觉发展早期。1990 年, Perona 和 Malik 提出了非线性各向异性扩散方程 (P-M 方程)^[1]:

收稿日期: 2009-11-02

基金项目: 江苏省资源环境信息工程重点实验室开放基金项目 (20080105)

作者简介: 段加波, 硕士研究生, 研究方向为地图制图学与地理信息工程, 电子信箱: cumtjiaboduan@gmail.com; 张海荣 (通信作者), 副教授, 研究方向为地理信息系统设计与开发、空间分析方法, 电子信箱: cumt1234@163.com

$$\begin{cases} \partial I(x, y, t) / \partial t = \text{div}[g(|\nabla I|) \cdot \nabla I(x, y, t)] \\ I(x, y, t)|_{t=0} = I_0(x, y, 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, I 为图像强度; ∇ 为梯度算子; div 为散度; $g(\cdot)$ 为扩散系数, 是一个有界非负递减函数, Perona 和 Malik 建议的 $g(\cdot)$ 有两种形式:

$$g(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{k}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$g(x) = \frac{1}{1+(x/k)^2} \quad (3)$$

式中 k 为梯度门限。这样图像经过多次迭代后强的阶跃状边缘被保留下来。在 P-M 方程提出之后, 人们发现它也有许多不足之处, 例如用 P-M 方程进行平滑处理不能保留细节边缘。关于扩散系数的选取没有成熟的理论, 人们根据各自对图像平滑处理的需要, 对原方程提出了各种各样的改进形式。为有效抑制噪声并保护边缘, 本研究在 P-M 扩散模型的基础上, 提出了一种新的基于方向信息测度和边缘隶属度的各向异性扩散滤波算法。

1 基于方向信息测度的非线性扩散方法

根据 Charbonnier 等提出的构造准则^[2], 各向异性扩散方程可改写成如下形式:

$$\partial I / \partial T = g_x I_{xx} + g_y I_{yy} \quad (4)$$

其中, I_{xx} 为图像横向 x 的二阶导数, I_{yy} 为图像纵向 y 的二阶导数:

$$I_{xx} = I(x+1, y) + I(x-1, y) - 2I(x, y) \quad (5)$$

$$I_{yy} = I(x, y+1) + I(x, y-1) - 2I(x, y) \quad (6)$$

$$g_x = g_\eta \cos \theta \quad g_y = g_\eta \sin \theta \quad (7)$$

式中, θ 为梯度方向, 方向 θ 与方向信息测度 $M_{x,y}$ 相关, 方向信息测度定义为设 L_θ 为过中心 (x, y) 、沿 θ 方向的直线, 将 (x, y) 的 $N \times N$ 大小的邻域分成面积相等的两部分 $S_{\theta 1}$ 和 $S_{\theta 2}$, 则方向信息测度 $M_{x,y}$ 为

$$M_{x,y} = d_{\theta \max} - d_{\theta \min} \quad (8)$$

$$d_{\theta \max} = \max(d_\theta) \quad 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad (9)$$

$$d_{\theta \min} = \min(d_\theta) \quad 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad (10)$$

$$d_\theta = \left| \sum_{m,n \in \theta_1} I(m, n) - \sum_{m,n \in \theta_2} I(m, n) \right| \quad m, n = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

方向信息测度能够良好地表征像素点的特征, 具有较高的抗噪性。在实际过程中, 计算时, θ 选取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 4 个方向计算最大的 d_θ , 并将该角度作为 θ 角。

为此, 提出了基于图像方向信息测度的非线性扩散方程:

$$\partial I(x, y) / \partial t = g_\eta I_{xx} \cos \theta + g_\eta I_{yy} \sin \theta \quad (12)$$

$$g_\eta = g(M_{x,y}) = \frac{1}{1 + M_{x,y}^2 / k^2} \quad (13)$$

基于方向信息测度的非线性扩散方法能在抑制噪声的同时起到强化边缘的作用, 但 $M_{x,y}$ 并不能完全表征边缘, 这就

使得在扩散的过程中会出现噪声被当作边缘得到了加强。基于此, 引入了边缘隶属度来对非线性扩散方程进行修正, 以期减小其对噪声的增强。

2 基于隶属度的边缘检测算法

管志强等^[3]提出了基于模糊集的自适应红外图像边缘增强方法, 该方法针对噪声和不同梯度的边缘, 分别建立噪声、弱边缘和强边缘的模糊特征隶属度函数, 并且提取图像信息来自适应调整该隶属度函数。通过隶属度函数将图像映射到模糊特征平面, 最后模糊特征平面控制图像边缘增强系数。该种增强方法可以应用到本研究的边缘检测中, 同时, 为了更好起到抑制噪声的作用, 对该算法进行了改进。

为计算边缘隶属度, 采用 Sobel 算子 T_1 和 T_2 进行边缘检测处理:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

选用 Sobel 算子, 是因为 Sobel 算子具有噪声抑制功能。处理后得图像:

$$L = |T_1 \otimes I| + |T_2 \otimes I| \quad (15)$$

L 的数值范围限定在 $[0, 255]$ 区间, 对大于 255 的像素一律变为 255。将图像 L 按灰度值大小分为两个部分, 采用最大类间方差法选择最佳阈值 d_T , m 定义为图像 L 的最大灰度值, 取阈值为 t , 类 1 (对应灰度值大的类) 像素数占总像素数的比率为 $\omega_1(t)$, 平均灰度值 $E_1(t)$, 类 2 (对应灰度值小的类) 为 $\omega_2(t)$ 和 $E_2(t)$, p_i 为灰度级 i 出现的概率, 则阈值为

$$d_T = \arg\{\max[\omega_1(t)\omega_2(t)(E_1(t)-E_2(t))^2]\} \quad t \in [0, 255] \quad (16)$$

$$\omega_1(t) = \sum_{i=0}^t p_i \quad \omega_2(t) = \sum_{i=0}^m p_i \quad (17)$$

$$E_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^t ip_i}{\omega_1(t)} \quad E_2(t) = \frac{\sum_{i=0}^m ip_i}{\omega_2(t)} \quad (18)$$

得到高灰度值图像

$$L^h(x, y) = \begin{cases} L(x, y) & L(x, y) \geq d_T \\ 0 & L(x, y) < d_T \end{cases} \quad (19)$$

统计 L^h 均值 E^h 和均方差 σ^h :

$$E^h = \frac{\sum_{x,y \in N} L^h(x, y)}{\sum_{x,y \in N} U(L^h(x, y))} \quad (20)$$

$$U = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\sigma^h = \sqrt{\frac{\sum_{x,y \in N} (L^h(x, y) - E^h)^2}{\sum_{x,y \in N} U(L^h(x, y))}} \quad (22)$$

隶属度为

$$\mu^h(x, y) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(L^h(x, y) - E^h)^2}{2(\sigma^h)^2}\right] & L(x, y) < d_T + \sigma^h \\ 1 & L(x, y) > d_T + \sigma^h \end{cases} \quad (23)$$

式中, μ^h 为图像中各像素对边缘的隶属度。图像边缘细节与噪声的主要差异在于边缘的连通性, 表现在边缘不只是孤立的一个点或两个点, 而是彼此直接相互衔接的连通区域。可以这样定义, 在进行边缘分割时, 分割出来的边缘连通域面积越大, 该片区域是边缘的概率就越大。所以可以依据其连通状况重新调整隶属度, 以达到隶属度对噪声的免疫。

选取阈值 p_m , 将 $\mu(x, y) > p_m$ 的像素值设为 1, 将 $\mu(x, y) \leq p_m$ 的像素值设为 0, 得到一幅新的二值化图像 $Class$, 对 $Class$ 中值为 1 的像素进行 8 邻域连通域标号, 得标号图 $Tlabel$, 有

$$Tlabel = BWlabel(Class) \quad (24)$$

根据 $Tlabel$ 得到连通因子:

$$Coe(x, y) = num(x, y) \cdot c_1 \quad (25)$$

其中, $num(x, y)$ 为像素 (x, y) 所在连通域包含像素个数, c_1 为系数。噪声与边缘的最大区别在于噪声的孤立性和边缘的连通性。 $Coe(x, y)$ 的值越大, 代表与像素 (x, y) 连通的像素数越多, 为真实边缘的概率越大。 $Coe(x, y)$ 也可称为连通因子隶属度。一般超过 50 个像素的连通域, 其为噪声的概率近似为 0, 所以 c_1 的取值为 0.02。同时, 为了使得 $Coe(x, y)$ 最大值为 1, 对 $Coe(x, y)$ 进行调整如下:

$$Coe(x, y) = \begin{cases} Coe(x, y) & Coe(x, y) \leq 1 \\ 1 & Coe(x, y) > 1 \end{cases} \quad (26)$$

这样, 最终的隶属度调整为

$$\mu(x, y) = (1 - c_2) \cdot Coe(x, y) + c_2 \cdot \mu(x, y) \quad (27)$$

3 新的非线性扩散方程

新的非线性扩散方程为

$$\frac{\partial I(x, y)}{\partial t} = \left[\frac{\partial I}{\partial t} \right]_1 \cdot \{1 - U[\mu(x, y) - c_3]\} + \left[\frac{\partial I}{\partial t} \right]_2 \cdot \{1 - U[\mu(x, y) - c_3]\} \quad (28)$$

式中, U 同式(21), 且有

$$\left[\frac{\partial I}{\partial t} \right]_1 = g_{\eta 1} I_{xx} + g_{\eta 1} I_{yy} \quad (29)$$

$$\left[\frac{\partial I}{\partial t} \right]_2 = g_{\eta 2} I_{xx} \cos \theta + g_{\eta 2} I_{yy} \sin \theta \quad (30)$$

$$g_{\eta 1} = g(M_{xy}) = \frac{1}{1 + M_{xy}^2 / k_1^2} \quad g_{\eta 2} = g(M_{xy}) = \frac{1}{1 + M_{xy}^2 / k_2^2} \quad (31)$$

新的非线性扩散方程主要由式(29)和式(30)两种扩散方程组成。其中, 式(29)主要起平滑去噪的作用, 式(30)因具有方向信息, 在平滑去噪的同时对边缘也会有一定的修整、增强的作用, 如果用式(30)作用于整幅图像, 会造成一些噪声同时也会被修整成边缘从而影响视觉效果。所以两个扩散方程分区域操作, 式(30)应用于边缘区域, 式(29)应用于非边缘区域。式(28)中的 $U(x)$ 控制区域的划分, $\mu(x, y) > c_3$ 划分为边缘区域, 否则划分为非边缘区域。 c_3 为划分的阈值, 在计算的时候取 0.8, 即隶属度大于 0.8 的就判断为边缘。 k_1, k_2 分别两种扩散函数的梯度门限。

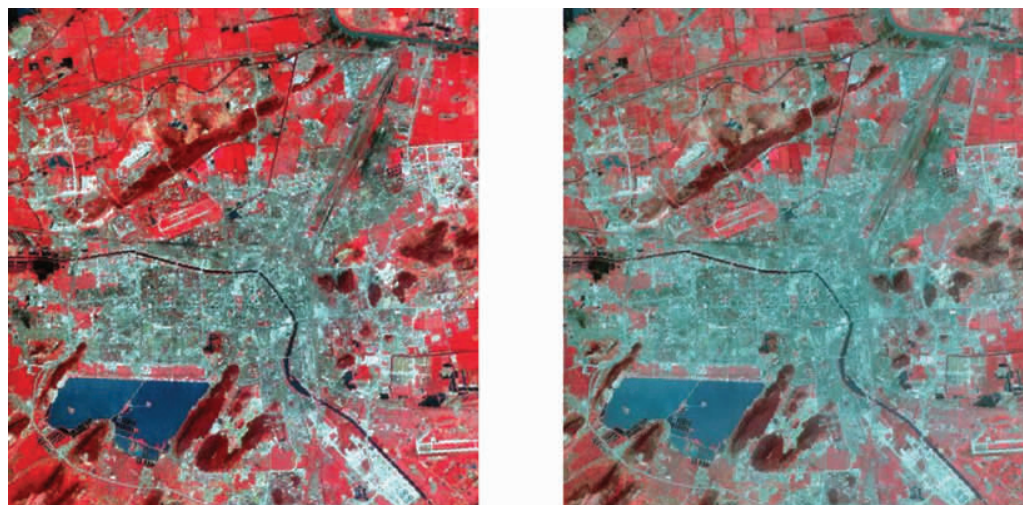
最终迭代式为

$$I^{(n+1)}(x, y) = I^{(n)}(x, y) + k_3 \frac{\partial I(x, y)}{\partial t} \quad (32)$$

式中, k_3 为时间步长参数。迭代次数选 10~20 次为宜。参数 k_1, k_2, k_3 的选择与噪声的强弱相关。

4 实验结果

图 1 给出了原始图像和 3 种算法处理的结果。其中, 图 1(a) 为原始遥感影像, 图 1(b)~(d) 分别为采用 P-M 扩散算法、3×3 均值滤波对加入均值为 0 和本文算法处理的结果。



(a) 原始图像
(a) Original image
(b) P-M 算法
(b) P-M algorithm

图 1 原始图像和 3 种算法的处理结果

Fig. 1 Original image and processed results of three algorithms

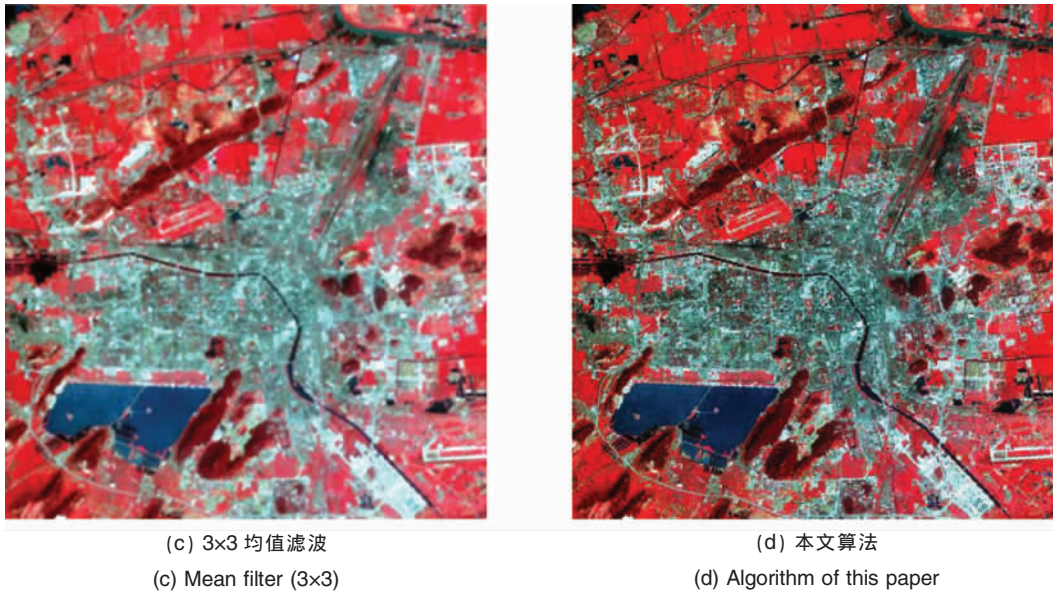


图 1 原始图像和 3 种算法的处理结果 (续)
Fig. 1 Original image and processed results of three algorithms (continued)

P-M 扩散算法采用的是式(1)和式(3), (3)式中 k 的取值与本文算法的 k_2 值相同。本文算法的 k_1, k_2, k_3 取值见表 1。

表 1 不同方差噪声下扩散参数的选择
Table 1 Different coefficients for different noises

参数	$\sigma=2$	$\sigma=4$	$\sigma=8$
k_1	5	30	30
k_2	5	50	100
k_3	0.3	0.5	0.8

为了客观地评价处理后图像的质量, 用峰值信噪比 $PSNR$ 、均方误差 MAE 、辐射分辨率 γ 分别对影像进行评价。 $PSNR$ 和 MAE 反映处理后图像与原图像的差异, γ 反映边缘保持能力。

$$PSNR=10\lg(255^2/MSE) \quad (33)$$

$$MSE=\frac{\sum_{n=1}^{FrameSize} (I_n-p_n)^2}{FrameSize} \quad (34)$$

$$MAE=\frac{\sum_{n=1}^{FrameSize} |I_n-p_n|}{FrameSize} \quad (35)$$

$$\gamma=10\lg\left(1+\frac{\sqrt{\sigma_I}}{E_1}\right) \quad (36)$$

式中, E 为图像的均值, σ_I 为处理后图像的方差, I 为处理后图像, p 为处理前图像。

从表 2 可以看出, 本文算法的 $PSNR$ 、 MAE 值优于 P-M 扩散算法和 3×3 均值滤波, 代表其去噪能力要比这两种算法强; 本文算法的 γ 值也大于 P-M 扩散算法和 3×3 均值滤波, 本文算法较好地保持了图像边缘细节信息。

表 2 各种滤波算法比较
Table 2 Comparison of various filtering algorithms

算法	$PSNR$			MAE			γ		
	$\sigma=2$	$\sigma=4$	$\sigma=8$	$\sigma=2$	$\sigma=4$	$\sigma=8$	$\sigma=2$	$\sigma=4$	$\sigma=8$
均值滤波	31.0841	30.4665	26.743	3.7831	5.4264	8.3986	0.3641	0.3631	0.3643
P-M 算法	38.7564	35.0708	25.693	2.1482	3.8022	9.3561	0.3652	0.3642	0.3639
本文算法	43.1427	35.2182	27.385	1.4732	3.6553	6.8734	0.3658	0.3652	0.3658

5 结论

在 Perona-Malik 扩散模型的基础上, 提出了一种基于方向信息测度和边缘隶属度的各项异性扩散滤波算法。该算法对影像的非边缘区采用常规 Perona-Malik 扩散方程完成噪声的滤除, 对边缘区采用基于方向信息测度的非线性扩散方

法, 在平滑去噪的同时对边缘进行修整、增强。实验结果表明, 该算法大大提高了遥感影像的等效视数, 有效地消除了影像中的相干噪声, 并且很好地保留和增强了影像的目标特性和细节。从目视解译、辐射分辨率等参数看, 本文所提出的算法是一种非常有效的遥感影像噪声抑制方法。

参考文献 (References)

- [1] 李兰兰, 吴乐南. 一种各向异性扩散图像去噪的方法 [J]. 电路与系统学报, 2003, 8 (6):143-145.
Li Lanlan, Wu Lenan. *Journal of Circuits and Systems*, 2003, 8(6): 143-145.
- [2] 李学玲, 齐国清. 基于方向信息测度的非线性扩散图像去噪方法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(3): 400-405.
Li Xueling, Qi Guoqing. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13 (3): 400-405.
- [3] 管志强, 陈钱, 王忠林, 等. 基于模糊集的自适应红外图像边缘增强[J]. 光子学报, 2008, 37(6): 1281-1284.
Guan Zhiqiang, Chen Qian, Wang Zhonglin. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(6): 1281-1284.
- [4] Gadallah F L, Csillag F. Destriping multisensor imagery with moment matching [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21 (12): 2505-2511.
- [5] Michael D F, Mersereau R M. On the impact of PCA dimension reduction for hyperspectral detection of difficult targets [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 192-195.
- [6] Mallat S. A wavelet tour of the signal processing [M]. New York: Academic Press, 1999.
- [7] Bruzzone L, Prieto D F. Automatic analysis of the difference image for

- unsupervised change detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(3): 1171-1182.
- [8] Bazi Y, Bruzzone B, Melgani F. An unsupervised approach based on the generalized gaussian model to automatic change detection in multitemporal SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 874-887.
- [9] 冯益明, 雷相东, 陆元昌. 应用空间统计学理论译遥感影像信息“缺失”区[J]. 遥感学报, 2004, 8(4): 317-321.
Feng Yiming, Lei Xiangdong, Lu Yuanchang. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(4): 317-321.
- [10] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 23-30.
Zhang Renduo. *Theory of spatial variability and application*[M]. Beijing: Science Press, 2005: 23-30.
- [11] 何东健. 数字图像处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 64-74.
He Dongjian. *Digital image processing* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003: 64-74.
- [12] 董长虹. Matlab 图像处理与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 150-155.
Dong Changhong. *Matlab image processing and applications*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 150-155.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·



“钙信号前沿国际研讨会”征文

由中国生物物理学会、北京大学和美国生物物理学会主办的“钙信号前沿国际研讨会”将于 2010 年 10 月 10-13 日在北京举行。现征集相关内容论文:Ca²⁺ and cell migration;TRP and other Ca²⁺-permeable channels;Ca²⁺ signaling and secretion;Ca²⁺ signaling in neurons;Ca²⁺ signaling in cardiaces;Skeletal and smooth muscl. 论文摘要截止日期:2010 年 7 月 15 日。
联系方式:北京朝阳区大屯路 15 号中国生物物理学会(100101),王悦;电话:010-64889894;传真:010-64889892;
电子信箱:wangyue@sun5.ibp.ac.cn。



“第二届中国油气藏开发地质学术研讨会”征文

中国石油学会、中国地质学会、中国石油大学、北京石油学会联合主办的“第二届中国油气藏开发地质学术研讨会”将于 2010 年 9 月 20 日在北京举行。
现征集相关内容论文:碎屑岩储层构型及成岩非均质模式与表征;碳酸盐岩储层分布规律与表征;特殊储层表征;复杂油气层识别与评价;油气藏地质建模方法及软件技术;剩余油形成机制、分布模式及预测;不同类型油气藏开发地质研究新进展。全文截稿日期为 2010 年 4 月 30 日。
联系方式:北京市昌平区中国石油大学(北京)期刊社(102249),徐樟有;电话:010-89731949;
电子信箱:xzy@cup.edu.cn。