

文章编号: 1006-4710(2011)02-0209-05

三种植物叶片电信号的特征分析

孟晓丽¹, 习岗¹, 张晓辉², 刘锴¹

(1. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 采集玉米(*Zea mays* L)、芦荟(*Aloe vera* L)和吊兰(*Chlorophytum comosum*)三种植物叶片的表面电信号,通过小波变换对采集到的电信号进行降噪和重构,对降噪后的电信号进行功率谱分析。结果表明,玉米、芦荟和吊兰三种植物叶片电信号是幅值为 μV 级、频率分布在 2 Hz 以下的低频电信号。玉米叶片电信号的频率分布主要集中在 0~0.4 Hz,芦荟叶片电信号频率分布主要集中在 0~0.6 Hz,吊兰叶片电信号的频率分布主要集中在 0~0.8 Hz。

关键词: 植物;电信号;小波;功率谱

中图分类号: Q64 **文献标志码:** A

Analysis of Characteristics of Electrical Signals in the Leaves of Three Species of Plants

MENG Xiaoli¹, XI Gang¹, ZHANG Xiaohui², LIU Kai¹

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

(2. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The electrical signals in the leaves of three species of plants including maize (*Zea mays* L), aloe (*Aloe vera* L) and broadleaf bracket-plant (*Chlorophytum comosum*) are collected, de-noised and reconstructed by wavelet transform in this paper. The power spectrum of these de-noised electrical signals was analyzed and the statistic parameters for these signals are obtained. The results show that the electrical signals in the leaves of three species of plants are the low-frequency signals whose amplitude is the μV level and distribution of frequency is in 0~2 Hz range. The frequency of signals in maize mainly concentrate in 0~0.4 Hz, aloe mainly in 0~0.6 Hz, and broadleaf bracket-plant in 0~0.8 Hz.

Key words: plant; electrical signals; wavelet; power spectrum

长期以来植物电场生物学效应的研究经常得出矛盾的结果^[1-4],或者该方面的实验没有统计意义^[5]。其原因一方面在于目前尚缺乏对植物电磁性质的了解以至于所施加的电场具有盲目性,另一方面,0~100 Hz 极低频电磁场易与生物体内的电磁场耦合共振,产生显著的非热生物学效应^[6],如在动物上所做的大量实验已经证明了极低频电磁场的生物学效应具有“频率窗”效应^[7]。由于植物通过自身电信号的变化引发生长代谢、呼吸运动、水分吸收和物质运输等生理变化^[8-10],并且植物电信号还可能参与了植物细胞之间的信息传导^[11-13]。因此,如果能够针对植物电信号的特点有目的的施加

电场,就有可能获得显著的生物学效应,从而使电场植物生物学效应的研究取得突破。然而,植物电信号是一种十分微弱并且复杂的随机信号,国内外学者的相关研究尚不深入,其基本特征和频谱分布尚不明晰。近年来,小波软阈值消噪已被广泛应用于脑电、心电、肌电等微弱电信号的研究^[14-15],但是应用在植物电信号降噪方面的研究尚少。为此,本研究以玉米、芦荟和吊兰三种植物为材料,采用小波分析和功率谱分析的方法研究三种植物叶片电信号的基本特征,为电场生物学效应的深入研究奠定基础。

收稿日期: 2010-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977079);陕西省教育厅专项科研计划基金资助项目(09JK667)。

作者简介: 孟晓丽(1987-),女,山西永济人,硕士生。研究方向为生物物理学。E-mail: mengxiaoli870721@163.com。

习岗(1957-),男,陕西西安人,教授,研究方向为生物物理学和生物光子学。E-mail: xigangchao@xaut.edu.cn。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

陕农226玉米(*Zea mays* L)种子由西北农林科技大学农学院提供。试验时将玉米种子放在湿润的滤纸上萌发,待种子发芽后移到盆里生长,给予充足光照(大田栽培,20℃,60 μmol·m⁻²·s⁻¹光强),待玉米长到三叶期时测量玉米叶片表面电信号。芦荟(*Aloe vera* L)和吊兰(*Chlorophytum comosum*)由花卉市场购买,芦荟株高45 cm,8片叶子,吊兰株高20 cm。

1.2 试验装置

采用成都泰盟科技有限公司生产的BL-420S型生物机能实验系统采集植物电信号,该系统具有高输入阻抗(>10¹⁰ Ω)、高共模抑制比(>120 dB)和低噪声(<1 μV)、低漂移等特点。

引导电极采用银/氯化银的贴片电极,直径为3.4 cm,由基衬材料、导电膏、电极扣等组成,用薄型无纺布或透气纸加涂医用压敏胶形成。由于该电极采用液态导电胶,灵敏度高,噪声小,表面不需要预处理,测量时将正负电极分别贴到植物叶子的两端。该法的优点是不需要适应时间,贴上电极即可开始测量,同时可避免对植物造成损害,并获得准确稳定的电信号。

1.3 测量方法

试验装置连接如图1所示。将待测植物及生物试验机系统置于自制的法拉第笼(60 cm×60 cm×60 cm)内,测试仪器均接地,以有效减少外界干扰。测量时(温度为25℃,湿度为45%~50%,光强为60 μmol·m⁻²·s⁻¹),选取长势好的叶片,将正负电极分别贴于同一叶片的两端,两电极间距为15 cm,参考电极接地,各个电极通过引导电极接入生物机能试验系统,1、2通道作为植物信号输入

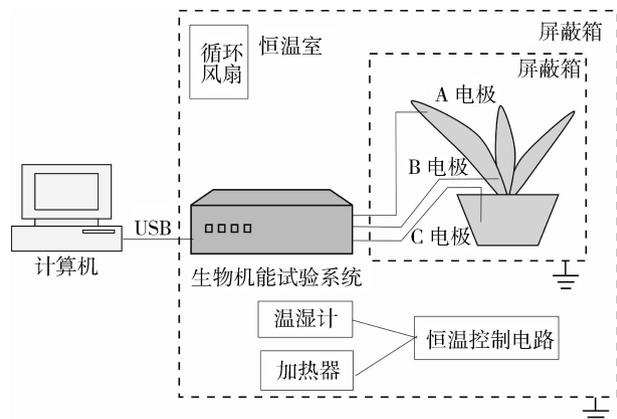


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment device

通道。采样频率为5 kHz(即0.2 ms),低通滤波频率为500 Hz,高通为0.053 Hz。

1.4 分析方法

1.4.1 小波降噪分析

尽管在试验过程中采用了接地、屏蔽等抗干扰措施尽量降低外界干扰。但是由于植物电信号十分微弱,采集到的电信号仍含有较强的噪声。因此,本文采用小波分析的方法对采集到的电信号进行降噪处理^[16]。

小波变换(WT)的定义为:

$$WT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

其中, ψ 为一个基小波, $f(t)$ 为采集的包含噪声的信号, a 为伸缩因子, b 为平移因子,且 $a,b \in R, a \neq 0$ 。小波变换将信号分解为近似系数与细节系数两部分,降噪就是根据需要对各个分解尺度下的细节系数选择一个阈值进行阈值量化处理,然后对信号进行重构。

在小波变换域中对小波系数进行软阈值处理。在选取阈值时用估计法来确定原始信号的噪声标准方差 σ ,即:

$$\sigma = \frac{\text{median}(|h_i(k)|)}{0.6745} \quad (k = 0, 1, \dots, 2^i - 1) \quad (2)$$

其中, i 是小波分解尺度,median是MATLAB中求中值的运算命令,利用Donoho^[17]统一阈值估计公式为:

$$\text{thr} = \sigma \sqrt{2 \lg n} \quad (3)$$

计算各个尺度下的阈值,再利用软阈值方法对小波细节系数进行量化。在式(3)中 n 为信号长度。

利用小波消噪的软阈值规则对小波系数进行判定。当小波系数的绝对值小于给定的阈值时令其为0。大于阈值时令其减去阈值,即:

$$h_{i,\text{thr}} = \begin{cases} 0, & |h_i| < \text{thr} \\ \text{sgn}(h_i) (|h_i| - \text{thr}), & |h_i| \geq \text{thr} \end{cases} \quad (4)$$

$h_{i,\text{thr}}$ 是施加阈值后的小波系数的大小。

将软阈值处理后的小波系数进行重构,即逆小波变换为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [(W_\psi f(a,b))] \psi_{a,b}(x) \frac{da db}{a^2} \quad (5)$$

其中, $C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty$, $\hat{\psi}(\omega)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。此时的 $f(t)$ 即为经小波逆变换重构后的信号。

1.4.2 功率谱分析

通常有用信号与噪声的频谱特性不同,因此,功

率谱估计法成为一种在噪声背景下提取有用信号的有效方法。本文采用周期图法对植物叶片电信号的功率谱进行分析^[18]。

平稳随机过程的功率谱可用周期图来估计,即:

$$S_p(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (6)$$

若先对数据加个矩形窗 (Rectangular Window) 函数 $w(n)$, 则其时域形式可以表示为:

$$w(n) = R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

加窗之后所得频谱为:

$$S_M(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) w(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (8)$$

2 结果与讨论

2.1 三种植物叶片电信号的时域关系

图 2(a)、2(b)、2(c) 为试验采集到的玉米、芦荟和吊兰三种植物叶片电信号的时域波形。由图 2 可见, 三种植物叶片的电信号在测量 100 s 内出现显著波动, 是一种幅值不断变化的随机信号, 其中包含有动作电位 (Action potential) 和变异电位 (Variation Potential), 动作电位对应图 2 中尖峰突起、升降迅速状的电位, 其他起伏缓慢状的电位为变异电位。

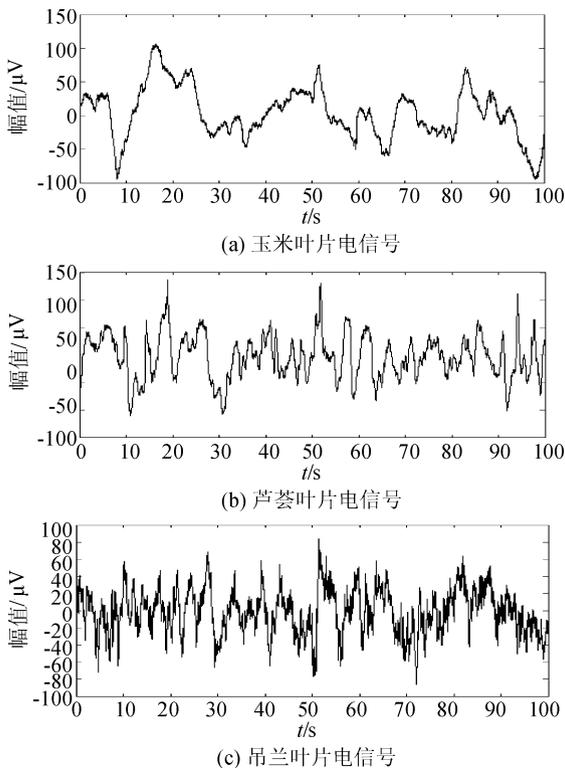


图 2 三种植物叶片电信号

Fig. 2 Electrical signals in the leaves of three plants

2.2 植物叶片电信号的小波降噪

尽管在试验过程中采用屏蔽的方法减小干扰, 但所采集到的电信号中仍含有噪声。为了更准确的分析植物电信号的自身特征, 本研究利用 db7 小波对采集到的三种植物叶片电信号进行 7 尺度分解, 计算出各尺度的小波系数, 图 3 为分解示意图。从图中可以看出高频尺度 (细节系数) 各高频细节成分被分解突现出来, 反映了测得的玉米叶片电信号噪声成分。在高频 1, 2, 3 尺度上 (横坐标 600, 1 000, 1 400 处) 还反映了玉米叶片电信号的突变点对应于动作电位的出现位置。然后, 用小波软阈值方法对小波细节系数进行量化处理, 再进行重构, 得到去噪后的玉米、芦荟、吊兰叶片表面电信号, 结果如图 4(a)、4(b)、4(c) 所示。由图 4 可看出经过小波软阈值降噪后的三种植物叶片电信号保留了原始电信号的特征, 较原始信号有更好的光滑性。这个结果说明, 利用小波降噪的方法可以获得较为理想的植物叶片电信号。

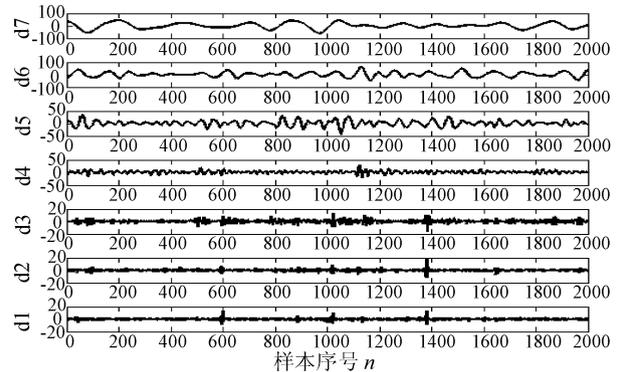


图 3 三种植物叶片电信号的 7 尺度分解示意图
Fig. 3 The diagram of 7 scale decomposition on the electric signals in the leaves of three plants

2.3 三种植物叶片电信号的统计参数

由图 4 得到的玉米、芦荟和吊兰叶片电信号的统计参数见表 1。从表 1 可以看出, 三种植物叶片电信号都属于幅值为 μV 级的微弱信号。但是, 每种植物叶片电信号的统计参数有所不同。其中, 芦荟叶片电信号的幅值变化最大, 吊兰最小。植物电信号是由细胞的静息电位发生较大的波动, 并传向周围的细胞而引起细胞膜电位的变化的结果。这种膜电位的改变随着每种植物的细胞的不同, 有的快速而短暂, 有的缓慢而持续, 这说明每种植物细胞电活动的幅度不尽相同。

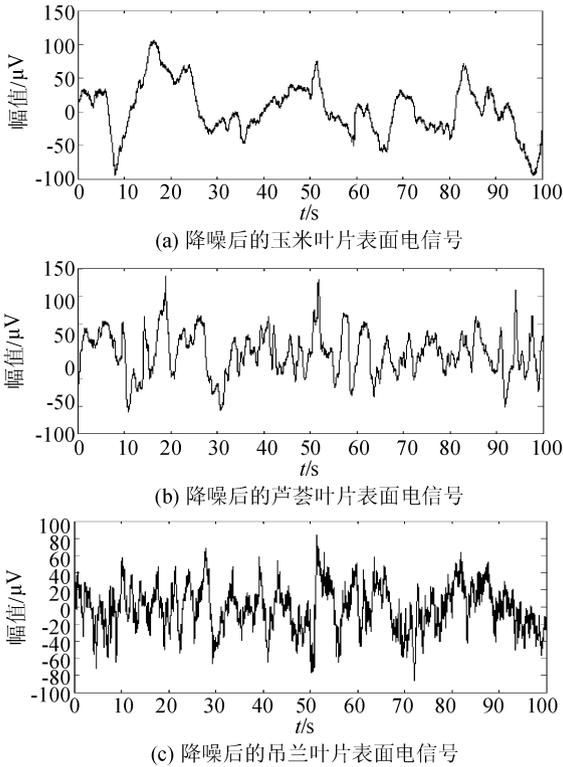


图4 降噪后的三种植物叶片电信号
Fig.4 The de-noised electrical signals in the leaves of three plants

表1 玉米、芦荟、吊兰叶片电信号的统计参数

Tab.1 The statistical parameters of electrical signals in the leaves of maize, aloe and broadleaf bracket-plant

试验植物	幅值/ μV			
	第1组最大值	第2组最大值	第3组最大值	均值
玉米	152.7	-124.1	276.8	0.399 9
芦荟	551	-445.7	996.7	-8.97
吊兰	82.1	-86.45	170.26	-1.485

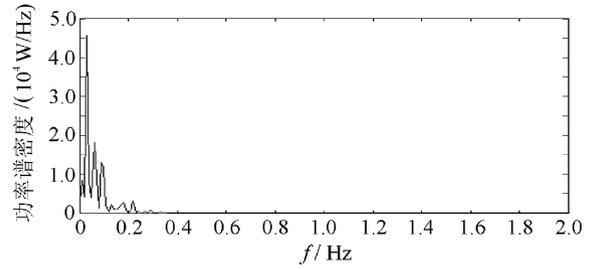
2.4 三种植物的功率谱分析

以 Matlab R2008 软件为平台,应用周期图法对降噪后的电信号进行功率谱分析,得到玉米、芦荟和吊兰三种植物叶片电信号的功率谱(见图5)。

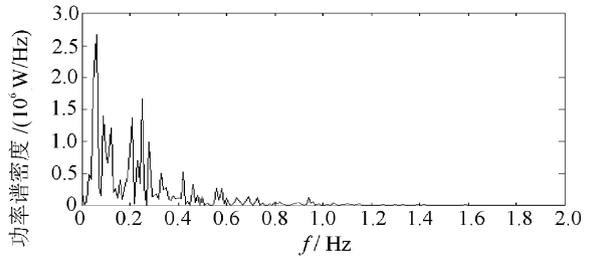
从图5中的功率谱图可以看出,玉米、芦荟和吊兰叶片电信号的频率集中分布在2 Hz以下,其中1 Hz以下的低频信号占绝大部分,1 Hz以上的信号所占比例很少,由此可见植物电信号是一种低频信号。为了更好地分析叶片电信号的频谱特征,以每0.1 Hz作为一个频率区间,计算每个频率区间内的能量占信号总能量的百分比,结果如图6所示。

从图6可见,玉米、芦荟、吊兰叶片电信号总能量的90%分别分布在0~0.4 Hz频段、0~0.6 Hz频段和0~0.8 Hz频段。因此,这三种植物叶片电信号分别分布在0.4 Hz以下、0.6 Hz以下和0.8 Hz

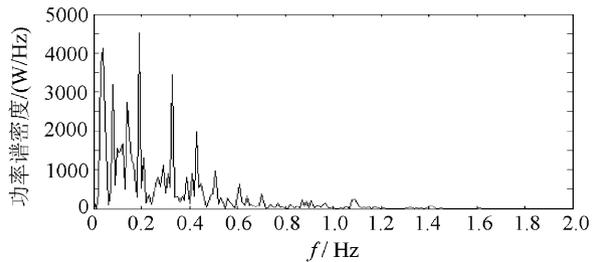
以下。看来不同植物的频谱分布可能在1 Hz以内,但是不同植物的频谱规律有所不同。



(a) 玉米叶片电信号功率谱



(b) 芦荟叶片电信号功率谱



(c) 吊兰叶片电信号功率谱

图5 三种植物叶片电信号的功率谱图

Fig.5 The power spectrum of electrical signals in the leaves of three plants

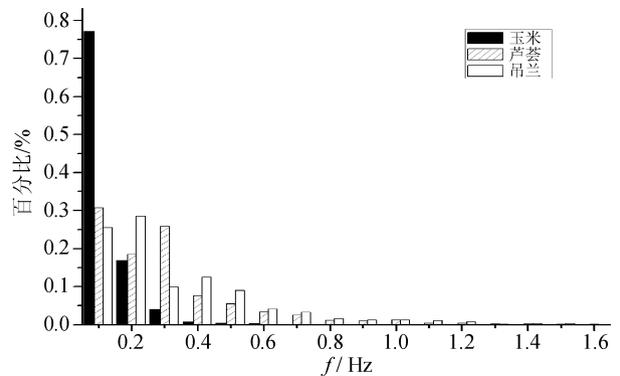


图6 三种植物叶片电信号能量分布图

Fig.6 The energy distribution of electrical signals in the leaves of three plants

3 结论

小波软阈消噪法可以有效减少植物叶片电信号的噪声,保留原始电信号的特性。玉米、芦荟和吊兰

三种植物叶片电信号都属于幅值为 μV 级的微弱信号。其中, 芦荟叶片电信号的幅值变化最大、玉米居中、吊兰最小。功率谱分析发现三种植物叶片电信号的频率分布在 $0 \sim 1 \text{ Hz}$ 内, 其中玉米、芦荟、吊兰叶片电信号频率分布分别集中在 0.4 Hz 以下、 0.6 Hz 以下和 0.8 Hz 以下。

参考文献:

- [1] Isobe S, Ishida N, Koizumi M, et al. Effect of electric field on physical states of cell-associated water in germinating morning glory seeds observed by 1H-NMR [J]. *Biochim Biophys Acta*, 1999, 1426(1):17-31.
- [2] Nechitailo G, Gordeev A. Effect of artificial electric fields on plants grown under microgravity condition [J]. *Advance in Space Research*, 2001, 28(4): 629-631.
- [3] Cogalniceanu G, Carasan M, Radu M, et al. The influence of external electric field on the in vitro postcotyledonary development of *nicotiana tabacum L. cv. xanthi* seedlings [J]. *Roma Biotechnology Letter*, 2001, 6(1): 45-54.
- [4] Cramariuc R, Donescu V, Popa M, et al. The biological effect of the electrical field treatment on the potato seed: agronomic evaluation [J]. *Journal of Electrostatics*, 2005, 63(6):837-846.
- [5] Costanzo E. The influence of an electric field on the growth of soy seedlings [J]. *Journal of Electrostatics*, 2008, 66(7): 417-420.
- [6] 习岗, 宋清, 杨初平. 异常环境电磁场对生物影响的研究进展 [J]. *应用与环境生物学学报*, 2003, 9(2): 203-206.
Xi Gang, Song Qing, Yang Chuping. Research progress about effect of abnormal electromagnetic field on biological system [J]. *China Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(2):203-206.
- [7] 张萍萍, 尹若春, 吴丽芳, 等. 静态和极低频电磁场非热生物效应的研究动态 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2007, 24(6):1411-1415.
Zhang Pingpin, Yin Ruochun, Wu lifang, et al. Non-thermal bioeffects of static and extremely low frequency electromagnetic fields [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2007, 24(6):1411-1415.
- [8] Trebacz K, Dziubinska H, Krol E. *Electrical Signals in Long-Distance Communication in Plants: Communication in Plants Neuronal Aspects of Plant Life* [C]. Berlin, 2006: 277-290.
- [9] Fromm J, Lautner S. Electrical signals and their physiological significance in plants [J]. *Plant Cell Environment*, 2007, 30(3):249-257.
- [10] Christiane K, Grams T E E, Schreiber U, et al. Transient knockout of photosynthesis mediated by electrical signals [J]. *New Phytologist*, 2003, 161(3):715-722.
- [11] Brenner E D, Stahlberg R, Mancuso S, et al. Plant neurobiology: an integrated view of plant signaling [J]. *Trends in Plant Science*, 2006, 11(8):413-415.
- [12] Peter W B. Reflections on 'plant neurobiology' [J]. *Bio-systems*, 2008, 92(2):132-147.
- [13] Yan Xiaofei, Wang Zhongyi, Huang Lan, et al. Research progress on electrical signals in higher plants [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(5):531-541.
- [14] Luo Zhizeng, Li Yafei, Meng ming. EMG denoising based on the lifting wavelet transform [J]. *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 2009, 10: 256-259.
- [15] 游荣义, 徐慎初, 陈忠. 多通道脑电信号的盲分离 [J]. *生物物理学报*, 2004, 20(1):77-82.
You Rongyi, Xu Shenchu, Chen Zhong. Blind signal separation of multi-channel EEG [J]. *Acta Biophysica Sinica*, 2004, 20(1):77-82.
- [16] 齐涛, 倪原, 徐宁. 基于小波变换的微弱生命信号去噪问题研究 [J]. *生命科学仪器*, 2009, 7:20-24.
Qi Tao, Ni Yuan, Xu Ning. Based on wavelet transform denoising problem weak signals of life research [J]. *Life Science Instruments*, 2009, 7:20-24.
- [17] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Trans Inform Theory*, 1995, 41(3):613-627.
- [18] 魏鑫, 张平. 周期图法功率谱估计中的窗函数分析 [J]. *现代电子技术*, 2005, 28(3):14-15.
Wei Xin, Zhang Ping. The window function analysis of amended periodic table in power spectrum estimation [J]. *Modern Electronics Technique*, 2005, 28(3):14-15.

(责任编辑 李虹燕)