

文章编号: 1006-4710(2011)04-0411-06

基于小波消噪的植物电信号频谱特征分析

张晓辉¹, 余宁梅¹, 刁岗², 孟晓丽²

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用小波软阈值消噪法和快速傅里叶变换研究不同温度条件下芦荟叶片电信号的基本特征及变化规律。通过植物电信号谱边缘频率(SEF)、谱重心频率(SGF)和功率谱熵(PSE)研究不同温度下芦荟(Aloe vera L.)叶片电信号功率谱的变化。结果表明, 芦荟的电信号是一种强度为 mV 数量级、频率分布在 5 Hz 以下的低频信号; 随着温度的升高, 电信号的 SEF 和 SGF 向高频段移动, 细胞活动受到激发, PSE 急剧增加; 在升温过程中 SEF、SGF 和 PSE 三者的变化趋势趋于一致, PSE 与 SGF 的变化之间有很强的关联性, 因而植物电信号 PSE 或 SGF 的变化可以作为叶片细胞响应外界环境变化的灵敏指标, 而对植物生长发育的生理生化过程实施科学调控。

关键词: 植物电信号; 小波分析; 功率谱; 温度; 芦荟

中图分类号: TN911.72

文献标志码: A

The Analysis on Spectrum Characteristic of Plant Electrical Signal Based on Wavelet De-Noiseing

ZHANG Xiaohui¹, YU Ningmei¹, XI Gang², MENG Xiaoli²

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

2. Faculty of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The paper studies the basic characteristics and the changing laws of aloe electrical signals under different temperatures based on wavelet soft threshold de-noising method and Fast Fourier Transform. The spectral edge frequency (SEF), spectral gravity frequency (SGF) and power spectral entropy (PSE) of plant electrical signals are used to study the changes of power spectrum of aloe electrical signals under different temperatures. The results show that the magnitude of aloe electrical signal is a strength of mV, and the frequency is below 5 Hz. The SEF and SGF in aloe leaves move to the high frequency as the temperature increases, and the PSE of the electrical signal has a dramatic increase. The study reveals that the SEF, SGF and PSE have the consistent trend to change and there is a significant relevance between PSE and SGF during the process of raising temperature. It is considered that the changes of the PSE and SGF in aloe leaves can be used as sensitive index of external environment change in leaf cells, and then implement scientific regulators of physiological and biochemical process of plant growth and development.

Key words: plant electrical signal; wavelet analysis; power spectrum; temperature; Aloe vera L

研究表明植物内部存在着一种涉及电信号及其转换的通讯途径^[1-6]。环境刺激会使植物产生不同的电位波动^[3-4], 推测电位波动的频率、振幅、电信号传递速率及相关的离子流动可以构成植物的通讯

信息, 被接收细胞会以特有的方式进行转换^[6-7], 进而调节植物的生理变化以适应环境的改变。该方面的研究有可能在植物生命科学中催生一门新的领域——植物神经生物学^[8]。但是, 目前只知道植物

收稿日期: 2011-06-03

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: 张晓辉(1981-), 男, 河南郑州人, 博士生, 研究方向为大规模集成电路设计及相关信号处理。E-mail: xiaohui.zh@163.com。余宁梅(1963-), 女, 江苏南京人, 教授, 博导, 研究方向为大规模集成电路设计及相关信号处理。E-mail: yuningmei@xaut.edu.cn。

电信号是一种十分微弱并且复杂的随机信号,对其基本特征及规律的研究还十分薄弱,特别是对环境胁迫下植物电信号变化规律的解读与分析研究很少,其变化规律尚不明晰。

芦荟作为百合科多年生常绿肉质草本植物,在医疗、保健和空气污染治理等方面的应用十分广泛。芦荟具有喜温畏寒的特点,其适宜生长的最低温度为 $10^{\circ}\text{C} \sim 12^{\circ}\text{C}$,低于 10°C 则停止生长。关于芦荟的电信号已有研究^[9-10],但是,关于不同温度下芦荟叶片电信号变化规律的研究目前还鲜见报道。鉴于此,笔者研究了芦荟电信号的基本特征及其在不同温度下的反应,获得温度变化条件下芦荟叶片电信号频谱的变化规律。

1 材料与方 法

1.1 测量材料及处理

花卉市场外购多株芦荟(*Aloe vera* L.),生长状态良好,8片叶子,株高45 cm。进行温度胁迫,在温度分别为 12°C 、 16°C 、 20°C 、 25°C 、 30°C 、 35°C 时测量叶片电信号。将多株芦荟重复测量5次,用单因素方差分析法进行误差分析。

1.2 测量方法与步骤

测试仪器采用成都泰盟科技有限公司生产的BL-420S生物机能试验系统,该系统输入阻抗为 $400\text{ M}\Omega$,每个输入通道采用光电隔离方式以很好的降低外界干扰,仪器的等效输入噪声电压小于 $1\text{ }\mu\text{V}$,测量系统如图1所示。图1中的恒温控制系统、屏蔽箱和测试仪器均良好接地。实验数据的采样率为 2 kHz ,低通滤波频率为 500 Hz ,高通滤波为 0.053 Hz ,电势能单位为 μV ,时间单位为 s 。信号采集时环境温度为 20°C ,相对湿度为 $60\% \sim 70\%$,在实验过程中通过湿度传感器进行空气湿度的实时监测,当湿度值低于预设值时就让加湿器进行工作,高于预设值就让烘干器工作,以保证实验时空气湿度值在限定的范围内,从而确保芦荟进行最适宜的生长,并且保证其电信号恒定。

测试电极采用丹麦 Ambu 医用高灵敏度心电电极,预测试结果表明,温度在 $20^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ 范围内变化时,电极采集到的 $0 \sim 50\text{ Hz}$ 频段内的信号波动幅度小于 0.5% ,电极热稳定性好。按图1所示将A电极贴于芦荟叶片正面尖部(叶片长 35 cm ,宽 4 cm),B电极贴于被测芦荟叶片反面根部,两电极之间距离为 15 cm 。将铜片埋入盆内土壤,用导线将参考电极C与之连接。测量时将测试电极连入生物机能实验系统,使用计算机监测并记录下电信

号。环境温度由恒温控制器调控。

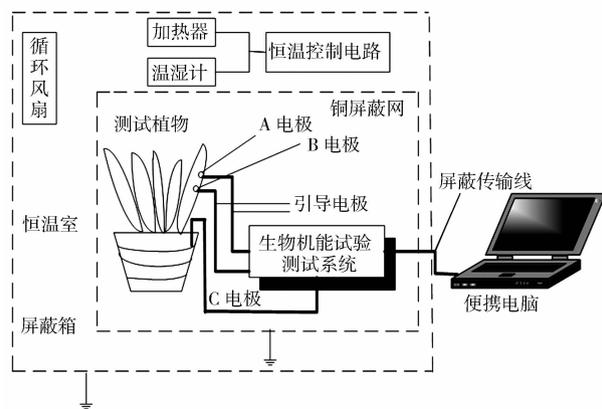


图1 试验装置示意图

Fig.1 The schematic diagram of experiment device

1.3 数据处理

植物电信号是一种具有非平稳性和非线性的随机信号,具有时变特点,本研究以 Matlab R2008 软件为平台,采用小波软阈值消噪的方法和离散快速傅立叶变换对采集的电信号进行分析与处理。

1.3.1 小波理论分析

对于一个叠加了加性噪声的有限长信号 $x(t)$,选定一个适当的小波基函数 ψ 进行小波变换,为:

$$(W_{\psi}x)(a\tau) = \langle x, \psi_{a,\tau} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (1)$$

其中, $a, b \in \mathbf{R}$, a 为伸缩因子,且 $a \neq 0$, τ 为平移因子, ψ^* 表示对 ψ 的共轭运算。由上述小波变换得到小波分解后的各层系数,然后在小波变换域中对小波系数进行软阈值处理。在选取阈值时一般采用估计方法来获得原始信号的噪声标准方差 σ ,运用 Donoho 统一阈值估计公式^[11]求取阈值 thr 。

将各层小波系数利用小波消噪的软阈值规则来进行判定。当小波系数的绝对值小于给定的阈值时,小波系数为0;当小波系数大于阈值时,令小波系数减去阈值;小波系数小于阈值的负数时,令小波系数加上阈值,即:

$$d_{j,thr} = \begin{cases} d_j - thr, & d_j > thr \\ d_j + thr, & d_j < -thr \\ 0, & |d_j| < thr \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中的 $d_{j,thr}$ 是施加阈值作用后小波系数的大小。

由软阈值处理后的小波系数进行逆小波变换,为:

$$x(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} [(W_{\psi}x)(a,\tau)] \psi \left(\frac{t-\tau}{a} \right) da d\tau \quad (3)$$

其中, $C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty$, $\hat{\psi}(\omega)$ 是 $\psi(t)$ 傅里叶变换的结果。此刻的 $x(t)$ 即为经过小波分解消噪和重构后的信号。

1.3.2 信号功率谱分析

对有限长离散时间序列信号 $x(n)$, 频谱特性计算公式为^[12]:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (4)$$

其中, $X(e^{j\omega})$ 为 $x(n)$ 的离散时间傅里叶变换, 通过研究 $X(e^{j\omega})$ 可以得出原始信号 $x(n)$ 的频域特性。

本研究采用的功率谱分析特征参数为:

1) 谱边缘频率(spectral edge frequency, SEF): 分布在 0 Hz 到该频率时的信号功率占信号总功率的 95%, 单位为 Hz, 其给出了信号分布的频率范围。

2) 谱重心频率(spectral gravity frequency, SGF): SGF 给出了信号功率按频率的分布重心, 计算公式为:

$$f_g = \frac{\sum_{f=f_1}^{f_2} [P(f) \times f]}{\sum_{f=f_1}^{f_2} P(f)} \quad (5)$$

其中, f_g 为重心频率, f_1 到 f_2 为频率范围, $P(f)$ 为信号的功率, f 为频率值。

3) 功率谱熵(power spectral entropy, PSE): 功率谱熵反映了信号的复杂程度, 定义为:

$$H_f = - \sum p_f \ln p_f \quad (6)$$

其中, f 表示频率, p_f 为在频率 f 处的功率在整个谱功率中所占的百分比。

2 试验结果

2.1 芦荟叶片电信号的时域特征

在 12℃ ~ 35℃ 范围六个不同的温度条件下, 分别对芦荟叶片进行测试, 采集其电信号, 得到各温度下芦荟电信号的时域关系曲线。在芦荟植物电信号中分别随机抽取不同温度条件下的一段电信号进行分析, 采用 db3 小波对芦荟原始电信号进行 5 层分解, 用软阈值法消噪后再进行信号的重构, 获得到小波消噪后的电信号, 图 2 为环境温度是 12℃ 时采集到的芦荟叶片电信号的时域波形, 图 3 是 12℃ 时芦荟小波消噪重构后的电信号。

由图 3 可见, 经过小波软阈值消噪后, 芦荟植物电信号保留了与原信号很高的相似性, 同时又比原信号有了更好的光滑性, 表明小波分析具有较好的消噪效果。因此, 利用小波软阈值消噪能够获得较

为理想的芦荟电信号。在本研究中利用该法对其他温度条件下采集的电信号进行处理。

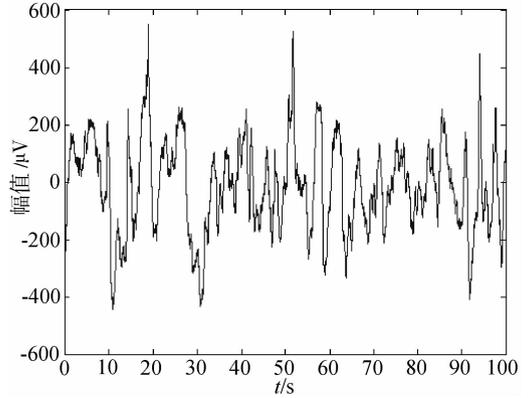


图 2 12℃ 时芦荟原始电信号的时域波形
Fig. 2 Time domain waveform of aloe leaves electrical signals at 12℃

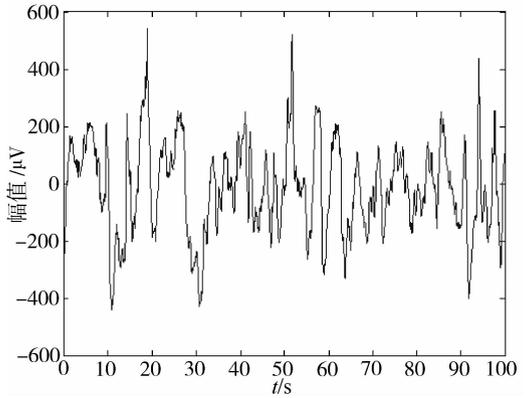


图 3 12℃ 时芦荟小波消噪后电信号
Fig. 3 The de-noised electrical signals of aloe leaves electrical signals at 12℃

2.2 不同温度下芦荟叶片电信号的统计参数

由表 1 可见, 在各种温度下, 芦荟电信号的幅值为 mV 级。在 16℃ 时芦荟电信号的最大值和峰峰值较 12℃ 时升高了, 但是, 随着温度的升高, 其最大值和峰峰值反而减小了。由此看来, 过高的温度会抑制电信号, 从而对芦荟生长造成不利影响。

表 1 不同温度条件下芦荟原始电信号统计参数

Tab. 1 The statistics parameters of aloe leaves electrical signals under different temperature

| 温度/ ℃ | 最大 值/mV | 最小 值/mV | 峰峰 值/mV | 均值/ mV | 中值/ mV | 模值/ mV |
|----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 12 | 0.51 | -0.22 | 0.73 | 0.083 | 0.07 | 0.059 8 |
| 16 | 0.58 | -0.54 | 1.12 | 0.017 | 0.05 | 0.225 3 |
| 20 | 0.27 | -0.35 | 0.62 | -0.026 | -0.01 | -0.029 7 |
| 25 | 0.25 | -0.30 | 0.55 | -0.02 | -0.018 | -0.025 |
| 30 | 0.22 | -0.24 | 0.46 | -0.016 | -0.008 | -0.019 3 |
| 35 | 0.18 | -0.12 | 0.30 | -0.01 | -0.005 | -0.009 6 |

2.3 不同温度下芦荟电信号的功率谱分析

应用快速傅里叶变换对小波消噪后的芦荟电信

号进行频谱分析,得到不同温度下芦荟电信号的频

谱分布,见图4。

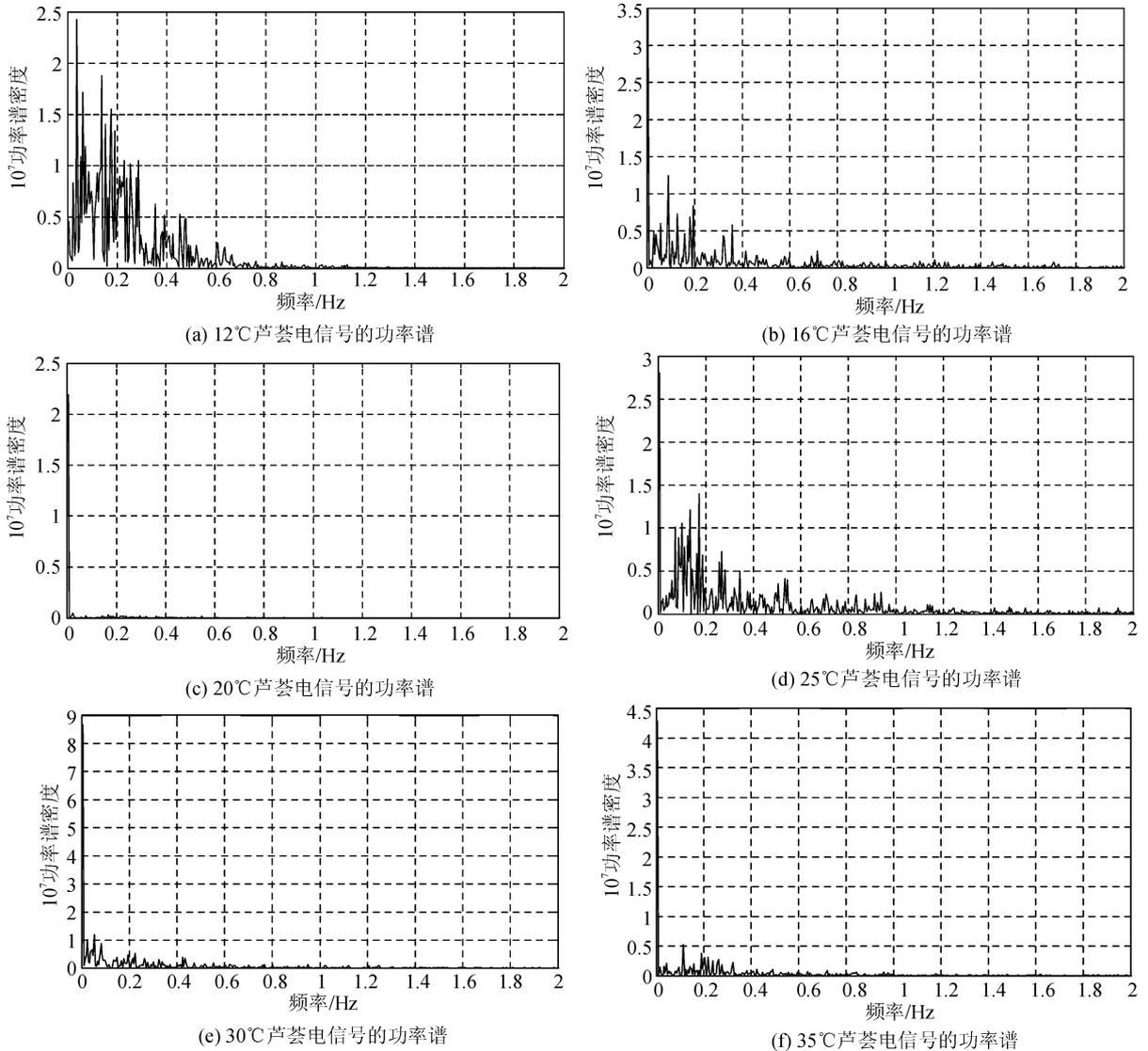


图4 不同温度下芦荟电信号的功率谱

Fig.4 The power spectrum distribution of electrical signals in leaves of aloe under different temperature

为了进一步研究芦荟电信号的频谱分布,对图4得出的频谱分布图进行数学统计,将每0.01 Hz频谱范围内的能量相累加,然后除以总能量,得出各个频段能量的百分比(见表2)。

表2 芦荟电信号不同频段能量的分布

Tab.2 The energy distribution of different frequency band of aloe leaves electrical signals

| 温度/ ℃ | 0~1 Hz/% | 1~2 Hz/% | 2~3 Hz/% | 3~4 Hz/% | 4~5 Hz/% | 5~∞ Hz/% |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 12 | 69.8 | 9.9 | 5.4 | 9.2 | 2.9 | 2.8 |
| 16 | 63.9 | 14.1 | 6.4 | 3.8 | 2.4 | 9.4 |
| 20 | 53.1 | 13.3 | 7.2 | 4.7 | 3.6 | 18.1 |
| 25 | 50.8 | 20.1 | 8.4 | 5.7 | 1.9 | 13.1 |
| 30 | 49.8 | 19.9 | 6.4 | 6.2 | 2.1 | 15.6 |
| 35 | 60.8 | 14.9 | 6.2 | 2.2 | 1.1 | 14.8 |

由表2所示结果知芦荟电信号的能量随着频率的增加呈减少的趋势,超过5 Hz后各频段能量所占总能量的百分比很小。综合上述情况可以得出,随着温度的升高,芦荟电信号的频率分布向高频方向移动。

2.3.1 芦荟叶片电信号功率谱 SEF 和 SGF 的变化

为了进一步定量说明不同温度条件下芦荟电信号功率谱的变化,分别计算了各种温度下芦荟叶片电信号 SEF 和 SGF 的变化(见图5)。在12°C时电信号的 SEF 约为0.4 Hz,随着温度的升高,SEF 迅速上升,表明电信号功率谱分布逐渐向高频段扩展;在25°C时 SEF 达到峰值,此后开始缓慢下降,从30°C开始急剧下降,表明功率谱分布向低频段收缩。图5还显示,在胁迫过程中 SGF 的变化趋势与 SEF

的变化趋势类似,SGF 与 SEF 的同步增长说明电信号功率谱分布的重心变化和频率分布范围的变化基本一致。

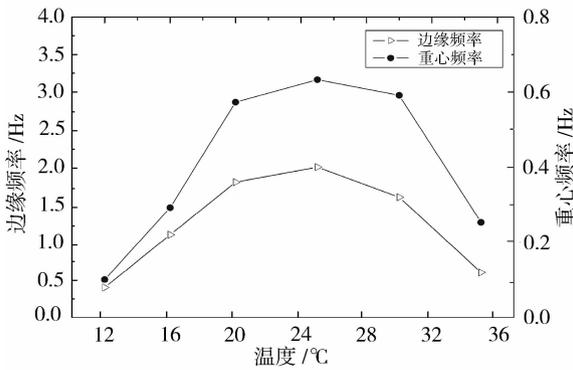


图5 不同温度下芦荟电信号 SEF 和 SGF 的变化
Fig. 5 The changes of SEF and SGF of aloe leaves electrical signals under different temperature

2.3.2 芦荟叶片电信号功率谱 PSE 的变化

芦荟电信号功率谱的复杂程度可由 PSE 表示,渗透胁迫下 PSE 的变化见图 6。随着温度的升高,芦荟电信号的 PSE 有所升高,在 25°C 时 PSE 达到峰值,此后 PSE 缓慢下降,从 30°C 开始急剧下降,其整体变化趋势与 SEF 和 SGF 的变化趋势相似。

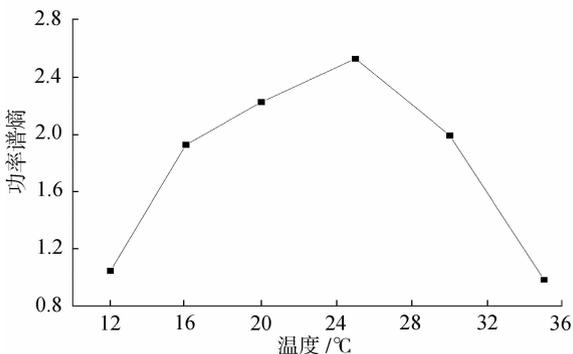


图6 不同温度下芦荟电信号 PSE 的变化
Fig. 6 The changes of PSE of aloe leaves electrical signals under different temperature

3 讨论

在生命活动中,植物电信号在时域特征上呈现出貌似随机的特征,在频域特征上呈现出连续的功率谱分布。由于电信号的功率谱分布与生命体系内各种复杂的离子跨膜运输和膜电位的变化以及细胞之间的电偶联作用有关。因而,功率谱分布的复杂性正是生命过程复杂性的体现。当植物处于特定的生理状态时其电信号的功率谱分布是一定的。当生命活动受到干扰时功率谱将随之发生改变。基于这

种认识对植物电信号功率谱的特征提取和分析可以帮助人们对植物的应激反应及状态做出判断。笔者的研究表明,可以应用植物电信号边缘频率(SEF)和重心频率(SGF)来定量描述植物电信号功率谱特征及变化。SEF 越小则功率谱分布越趋近于低频段,表明细胞活动受抑制越深;反之,则细胞越“兴奋”。而 SGF 不仅可以较好地反映信号功率谱的分布情况,表明频谱中分量较大的信号成分的频率,还可以反映在不同条件下整个功率谱的迁移情况,因此,SEF 和 SGF 均可以作为细胞“兴奋性”的量度。本研究的结果还显示,在缓慢升温的条件下芦荟叶片电信号的 SEF 和 SGF 呈现缓慢升高的趋势,在 25°C 时达到峰值,此后开始下降,25°C 左右是芦荟细胞生长的最适温度,而在 35°C 左右,芦荟叶片细胞活动受到严重抑制,细胞的兴奋性明显降低。这个结果与芦荟最适宜的生长温度为 20°C ~ 30°C 是一致的。10°C 以下植物细胞的气孔开度最小,随着温度的缓慢上升,细胞的气孔开度逐渐增大,因此细胞自身的活动增强,细胞相互之间的信息传导也相应的增多。25°C 时各项值达到最大,说明此时细胞的活动最旺盛。在 35°C 左右各项值降低,说明超过一定的环境温度就会导致植物细胞气孔导度降低,细胞活动减弱,相互之间的信息传递随之减少。不适宜植物的生长发育。

运用植物电信号的功率谱熵(PSE)来定量描述植物电信号功率谱分布的复杂性及变化,将其作为功率谱分布复杂性的量度。PSE 反映了时间序列信号的无序程度、多频率成分信号的混乱程度以及时间序列信号的谱结构情况。信号能量在整个频率成分上分布越均匀,功率谱越平坦,则信号越复杂^[13],PSE 越大。反之,信号功率谱越狭窄,PSE 越小,表示信号中存在明显的振荡节律,复杂度小。图 6 显示,在 20°C ~ 30°C 之间,芦荟电信号的 PSE 变化很小,在 30°C 之后 PSE 急剧下降,表明在正常生长中细胞的兴奋度较高,细胞从外界接受的信息量较大,细胞活动的随机性增强,电信号的复杂度较大。在 30°C 之后,细胞活动受到抑制,细胞从外界接受到的信息量减少,细胞活动的有序性增加,电信号的复杂度变小。

对比 SEF 和 SGF 的变化可见,PSE 和 SEF 与 SGF 的变化是同步的。这种 PSE 与 SEF、SGF 变化的一致性表明 SEF、SGF 和 PSE 的变化都是植物对外部环境变化的适应性反应。由于植物电信号的变化远比各种生理变化和形态变化要早^[5,8,14],因此,根据电信号的变化可以对植物的应激反应做出迅速

而准确的判断^[15],SEF、SGF和PSE从不同方面定量说明植物电信号功率谱的变化,因而可以作为实时评估植物对胁迫反应的早期指标。

4 结 论

本研究利用小波软阈值消噪法对芦荟微弱电信号进行消噪处理,实验结果验证了该方法的可行性。通过对小波消噪后电信号的功率谱参数分析得到结论为:

1) 芦荟的电信号是一种频率分布在5 Hz以下的低频信号。

2) 植物电信号功率谱分布可以通过SEF与SGF定量描述。在正常温度下,芦荟电信号的SEF在0.4~1.8 Hz之间,SGF在0.3~0.6 Hz之间;在30℃以上芦荟电信号的SEF和SGF迅速向低频段移动,表明高频信号减少,低频信号增加,细胞受到抑制。

3) 用PSE可以定量描述植物电信号的复杂程度。在20℃~30℃之间芦荟电信号的PSE基本不变,在30℃以上PSE急剧下降,电信号复杂性减少。

4) 在温度升高过程中PSE和SEF与SGF的变化之间有很强的关联性,利用植物电信号的PSE和SEF与SGF的变化定量评价植物细胞电信号功率谱特征及细胞状态的变化是可行的,其有望成为衡量植物细胞生理状态的定量指标而在植物对环境的应激反应、植物抗逆性评价、生态及环境监测以及信息农业等领域的研究中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] Dziubińska H. Ways of signal transmission and physiological role of electrical potentials in plants [J]. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 2003, 72: 309-318.
- [2] Baluška F, Volkmann D, Hlavacka A, et al. Neurobiological View of Plants and Their Body Plan [C]// *Communication in Plants: Neuronal Aspects of Plant Life*. Springer-Verlag: Berlin, 2006.
- [3] Baluška F, Mancuso S, Volkmann D. *Communication in Plants. Neuronal Aspects of Plant Life* [M]. Springer-Verlag: Berlin, 2006.
- [4] Stahlberg R, Cleland R E, Volkenburgh V E. *Slow Wave Potentials-A Propagating Electrical Signal Unique to Higher Plants* [M]. Springer-Verlag: Berlin, 2006.
- [5] Brenner E D, Stahlberg R, Mancuso S, et al. Plant neurobiology: an integrated view of plant signaling [J]. *Trends Plant Science*. 2006, 11(8): 413-421.
- [6] Fromm J, Lautner S. Electrical signals and their physiological significance in plants [J]. *Plant Cell Environment*, 2007, 30: 249-257.
- [7] Lautner S, Grams T E E, Matyssek R, et al. Characteristics of electrical signals in poplar and responses in photosynthesis [J]. *Plant Physiology*, 2005, 138: 2200-2209.
- [8] Peter W B. Reflections on 'plant neurobiology' [J]. *BioSystems*, 2008, 92: 132-147.
- [9] Alexander G V, Ryan D L, Maia I V. Electrical signaling in Aloe vera induced by localized thermal stress [J]. *Bioelectrochemistry*, 2007, 71: 192-197.
- [10] 王兰州, 李海霞, 林敏, 等. 植物微弱电波信号的时、频域分析 [J]. *中国计量学院学报*, 2005, 16(4): 294-298.
Wang Lanzhou, Li Haixia, Lin Min, et al. Analysis of plant electrical signal in the time domain and frequency domain [J]. *Journal of China Jiliang University*, 2005, 16(4): 294-298.
- [11] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3): 613-627.
- [12] Alan V O, Alan S W S, 著, 刘树棠, 译. 信号与系统 [M]. 西安交通大学出版社: 西安, 2005.
- [13] Fell J, Elfadil H, Klaver P, et al. Covariation of spectral and nonlinear EEG measures with alpha biofeedback [J]. *International Journal of Neuroscience*, 2002, 112(9): 1047-1057.
- [14] 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.
- [15] Oyarce P, Gurovich L. Evidence for the transmission of information through electrical potentials in injured avocado trees [J]. *Plant Physiology*, 2011, 168(2): 103-108.

(责任编辑 李虹燕)