

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.03.008

干旱胁迫状态下植物电信号特征分析与研究

周敏姑¹, 剧飞儿², 孙振豪³, 许景辉³

(1. 西北农林科技大学 旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100)

摘要: 植物电信号反映植物本身的生长情况和环境变化,了解植物电信号有助于了解植物的各项生理活动。由于植物电信号随机性强且受噪声影响比较大,在植物进行自身调节时会表现出复杂的时变特性,所以对信号的采集、降噪和分析处理存在一定的难度。本文从生物电技术角度出发,分析植物在不同水胁迫下的电位特征,通过先进的信号处理和分析方法,综合分析植物电信号在时域、频域和时频域的特征,解译植物电信号特点,实现植物电信号的特征分析和信号解译。

关键词: 植物电信号;去噪分析;机器学习;系统开发

中图分类号: S24

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)03-0320-07

Characteristic analysis of and research on plant electrical signal under plant drought stress

ZHOU Mingu¹, JU Feier², SUN Zhenhao³, XU Jinghui³

(1. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Area of China (IWSA), Northwest A&F University,

Yangling 712100, China; 2. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Plant electrical signals reflect plant growth and environmental changes, and understanding the electrical signals of plants helps to understand the physiological activities of plants. Because plant electrical signals are highly random and subject to noise, it will exhibit complex time-varying characteristics when the plant performs its own adjustment. Therefore, there are certain difficulties in signal acquisition, noise reduction and analysis processing. This article, from the perspective of bioelectric technology, analyzes the potential characteristics of plants under different water stresses. Based on the theoretical study on machine learning, through advanced signal processing and by analysis methods, a comprehensive analysis of the characteristics of plant electrical signals in the time domain, the frequency domain and time-frequency domain can interpret the characteristics of plant electrical signals.

Key words: plant electrical signal; denoising analysis; machine learning; system development

植物电信号是植物生长变化过程中的主要生理信号^[1]。它不但反映植物自身的生长状况,还反映植物生长的环境状况,因此,研究植物电信号能从植物与环境的耦合关系上揭示植物生境信息,为农业生态和植物生理研究服务。随着信号采集和处理技术的发展,很多学者对植物的电信号进行了研究。Volkov等^[2]研究通过PCP、FCCP等多种刺激对植物电信号的影响,表明植物电信号是植物组织和器官中远距离信息传递的最快途径。李峻等^[3]通过三

种菊科(Asteraceae)植物电信号的分析,利用短时Fourier变换,认为其电信号均为微伏级低频信号。张晓辉等^[4]利用小波去噪和STFT算法,分析芦荟电信号是一种毫伏级,频率分布在5 Hz左右的低频信号。这些研究揭示了植物电信号的一般规律,但对植物电信号变化与环境因素之间的相关性研究甚少。

本文在分析植物电信号特征的基础上,研究植物电信号所具有的特性及其与环境水因子间的相关关系,利用机器学习的方法建立植物电信号特征和

收稿日期: 2019-01-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0403203)

作者简介: 周敏姑,女,硕士,讲师,研究方向为农业智能检测。E-mail: zmingu@163.com

通讯作者: 许景辉,男,博士,副教授,研究方向为农业智能检测与控制。E-mail: x36936@163.com

环境水胁迫的分析模型,通过吊兰(*Chlorophytum Comosum*)、红景天(*Sedum Rosea*)等观赏植物的电信号变化,进行水胁迫程度的检测,研究环境因素对植物电信号影响的一般规律。

1 试验方法与材料

1.1 信号采集系统

本研究选用成都泰盟科技有限公司设计生产的

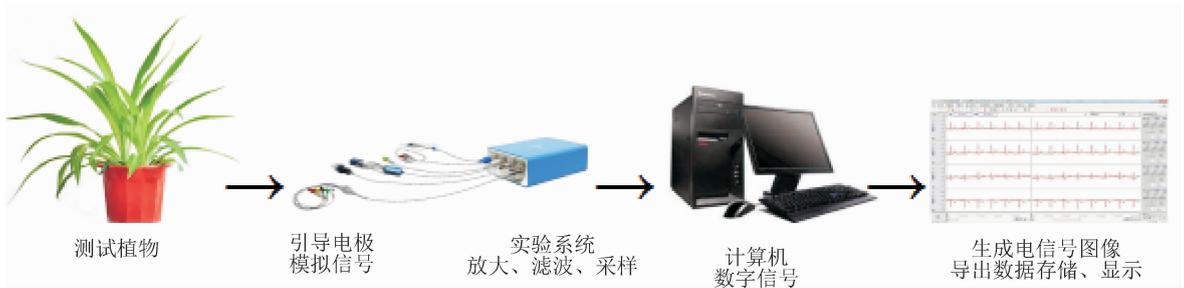


图1 生物机能实验系统工作流程图

Fig.1 Work flow chart of bio-functional experiment system

由于植物电信号微弱、低频的特点^[5],空间中电磁场、电磁辐射以及周围设备电磁噪声均会对信号的采集造成极大干扰,有可能湮没植物电信号^[6-8]。因此将待测植物放入 130 cm×120 cm×120 cm 屏蔽箱中,测量过程中屏蔽网接地,以消除外界影响^[9]。

1.2 试验对象及方法

试验分别采集吊兰和红景天两种观赏性植物在缺水时(水胁迫)以及水分充分时的电信号,通过滤波算法,建立植物电信号采集系统,完成信号数据的处理和存储工作。采集的植物电信号用 MATLAB 软件进行降噪处理,通过人工神经网络,针对不同含水量下的吊兰和红景天的电信号进行学习和训练,实现两种植物水胁迫程度的识别和判断。从而实现基于植物电信号特征的植物生长实时监测^[10-12]。

将待测植物体以及生物实验机能系统放于屏蔽箱内,测量过程中屏蔽箱可靠接地,以消除外界对植物电信号的影响^[13]。实验外部环境温度 25 ℃,空气湿度是 45%~50%,光照强度 5 000 lx。选择生长良好的叶片,将植物电信号采集传感器的金属铂丝插于同一叶片上,保证铂丝完全没入且未穿透叶片。为了消除电极极化现象,电极插入 30 min 后,再对植物电信号进行测量,以保证信号的稳定性。试验系统采样频率设置为 100 Hz(0.01 s),高通滤波频率设置成 0.053 Hz,低通滤波频率设置成 500 Hz。利用 BL-420F 型生物机能实验系统采集土壤含水量为 12.5% 时的吊兰叶片电信号,信号取样 7 681 个数据点。为了提高电信号的准确性,试验运用小

BL-420F 生物机能实验系统来采集植物电信号。由计算机、BL-420F 系统硬件、TM-WAVE 生物信号软件三部分组成。采用 METER 公司生产的 ECH2O 土壤含水量监测系统,由 Em50 系列数据采集器和 5TE 土壤水分传感器组成。BL-420F 型生物机能实验系统工作原理图见图 1。

波去噪和滤波器滤波去噪两种方式,对采集的原始信号进行了处理^[14]。

1) 小波去噪。分别选择 bior2.4、coif3、db4、haar、sym2 五个小波函数对上述采集的信号进行 3 尺度小波分解,采用软阈值去噪。见图 2。

2) 滤波器滤波去噪。分别采用均值、中值滤波、无限冲激响应(IIR)滤波器、有限脉冲响应(FIR)滤波器对吊兰电信号进行去噪。去噪后的信号见图 3。

从图 3 看出,滤波器滤波去噪后,造成植物电信号的信号失真,信号幅值范围由原来的 2.3 μV 左右压缩到 1 μV 左右范围,且信号包络线趋于平整,而植物电信号是有突变并且是无规则的^[15]。对比图 2 和图 3 可知,小波去噪除了平滑原有电信号外,保留了信号的许多细节信息。因此本试验选用小波去噪进行电信号处理。通过不同小波基去噪处理还发现,使用 db4、haar 等小波基分解奇异信号,去噪效果较好,如果用 sym8、coif3 等小波基来分析,则会使信号的奇异点部分变得平滑,使降噪后的信号畸变较大,出现一定程度的失真,去噪效果不佳^[16]。

信噪比(SNR)是反应去噪效果的重要参数^[17],SNR 的表达式^[18]为:

$$SNR = 10 \log_{10} \left| \frac{\sum_N \tilde{x}(n)^2}{\sum_N [x(n) - \tilde{x}(n)]^2} \right| \quad (1)$$

式中: $x(n)$ 为原始信号, $\tilde{x}(n)$ 为去噪后的信号。db4 和 haar 小波消噪后的信噪比 SNR 见表 1。

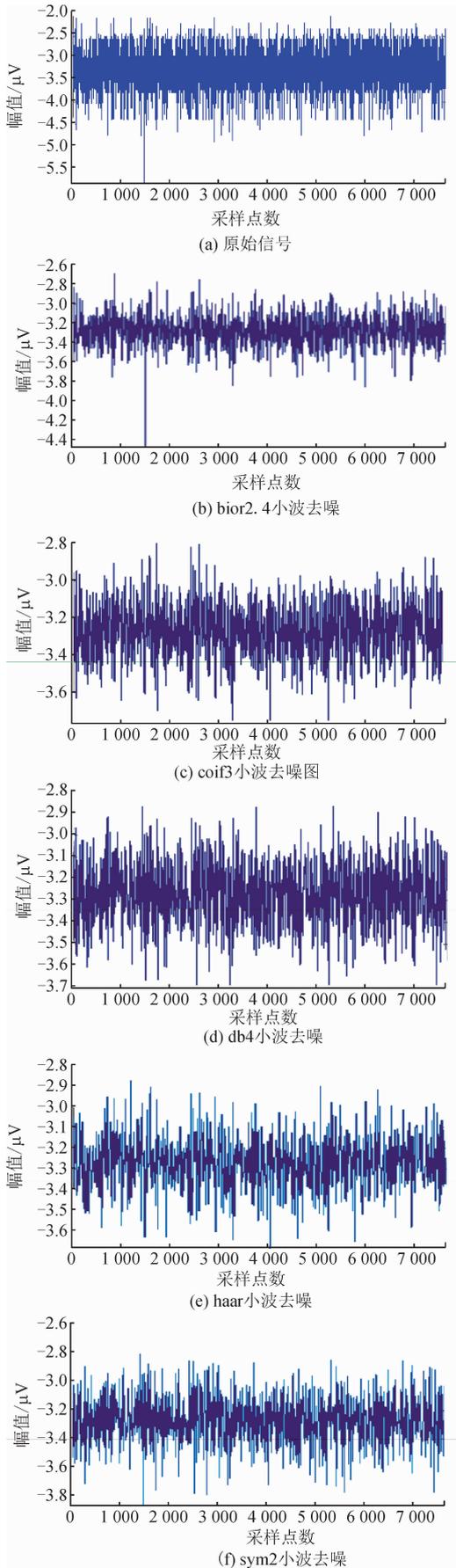


图 2 小波去噪结果图
Fig. 2 Wavelet denoising

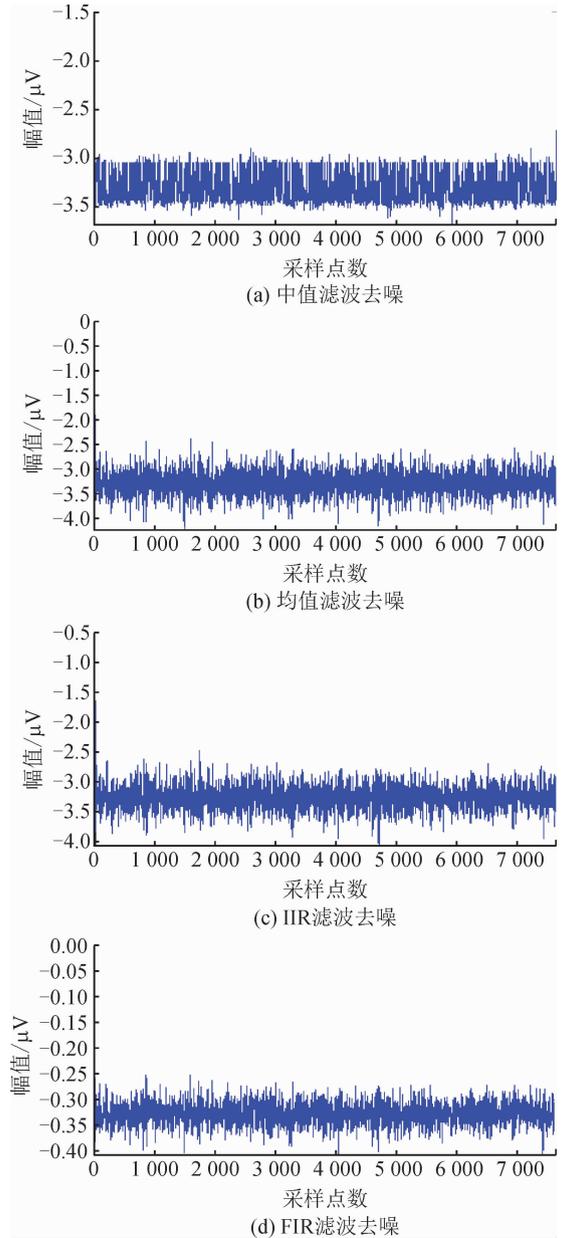


图 3 滤波去噪
Fig. 3 Filter denoising

表 1 db4 和 haar 小波信噪比

Tab. 1 Db4 and Haar wavelet signal to noise ratio

小波	db4	haar
SNR/dB	89.826 3	89.614 2

从表 1 看出,两种小波信噪比差距不大,db4 去噪略高,其余性质来看,对称性相似,滤波长度 db4 更长,因此实验选择 db4 小波去噪。从降噪结果看,小波去噪更适用于植物电信号的降噪处理,而选择 db4 小波作为基函数,对采集的信号进行 3 尺度分解,为本实验的最优去噪方法。

2 植物电信号特征分析

在测量环境温度 25℃,空气相对湿度 50%,光照强度 5 000 lx 时,对吊兰在干旱(土壤含水量 5.15%)、适宜(土壤含水量 12.5%)和潮湿(土壤含水量 23.6%)三种状况下的植物电信号进行测量和分析,寻找环境水胁迫程度与电信号特征值之间的相关关系。

分别对吊兰电信号进行小波去噪处理,时域波形见图 4。

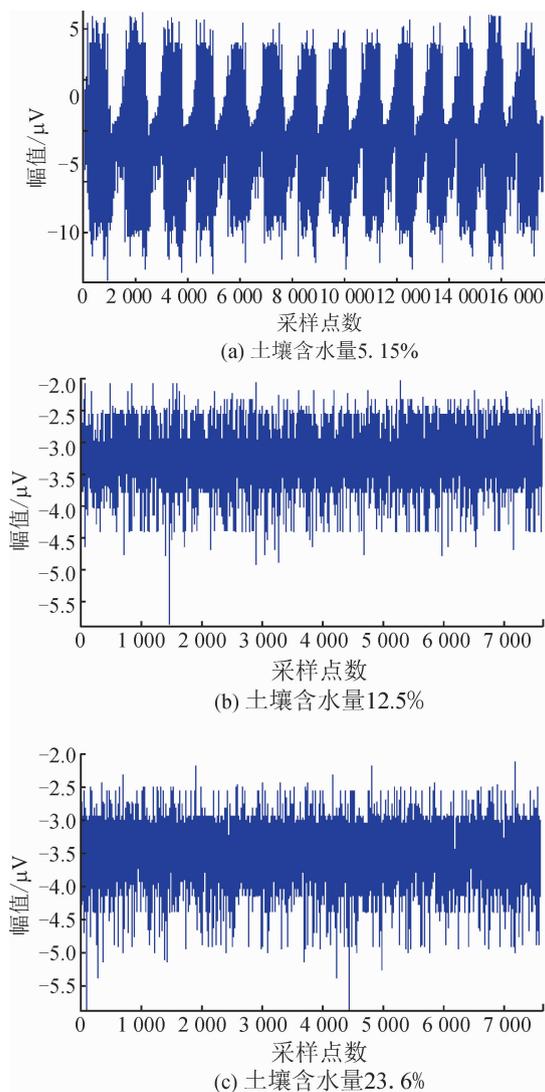


图 4 三种状态下的原始信号

Fig. 4 Original signal in three states

基于 db4 的小波去噪处理后,信号图形见图 5。

从三种水胁迫状态下的时域波形可以看出,随着含水量变化,三种状态下的植物电信号变化具有一定随机性,其幅值变化也有一定不稳定性。因此对三种状态共计 23 043 个信号采用统计分析方法。三种状态下吊兰电信号的统计数据见表 2。

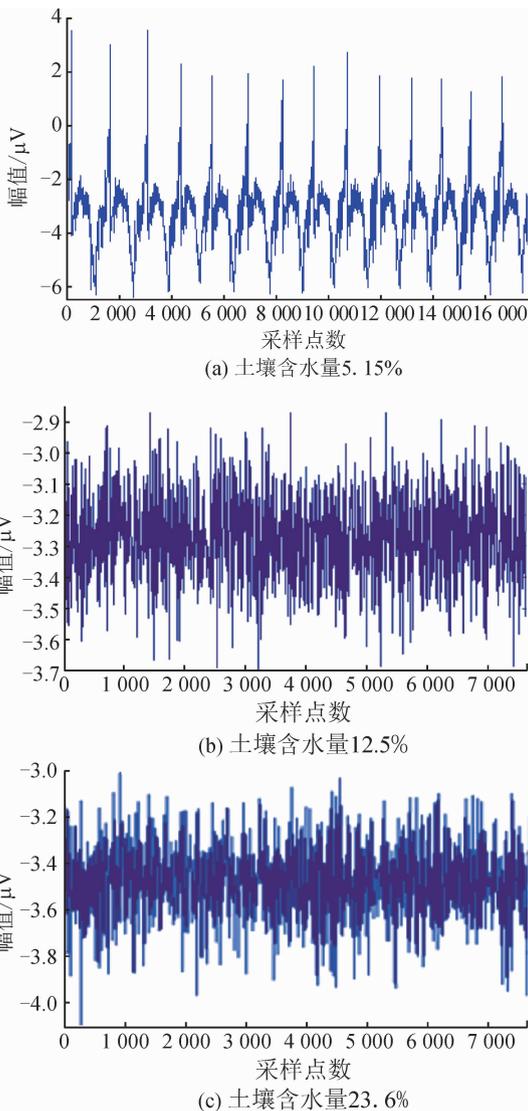


图 5 三种状态下的 db4 小波去噪

Fig. 5 DB4 wavelet denoising in three states

表 2 三种水胁迫状态下,吊兰电信号的统计参数

Tab. 2 Three water stress statistical parameters for spider plant electrical signals

环境水胁迫程度	最大值/ μV	最小值/ μV	平均值/ μV	方差/ μV^2	标准差/ μV
干旱	6.35	-13.69	-3.23	18.65	4.32
适宜	-2.01	-5.87	-3.27	0.14	0.37
潮湿	-2.08	-5.87	-3.51	0.16	0.39

表 2 表明,吊兰电信号最大在几微伏,属于微伏级。表中信号的方差都小于 $20 \mu\text{V}^2$,说明正常情况下植物电信号的功率很低,证明植物电信号本身是一种微弱信号^[19]。

对于吊兰类喜水植物,环境水胁迫程度的变化对其植物电信号时域波形影响较大^[20],主要表现在:随土壤含水量变大,电信号均值在逐步下降;适

宜土壤含水量下,电信号幅值在 $-2.0\ \mu\text{V}$ 左右,干旱在 $6\ \mu\text{V}$ 左右,潮湿在 $-2.1\ \mu\text{V}$ 左右,可观察到土壤含水量偏离正常值都会使电信号幅值发生化,干旱时会有明显增大,潮湿时和适宜时变化不大。

对相关信号进行 Fourier 变换,其频域波形见图 6。

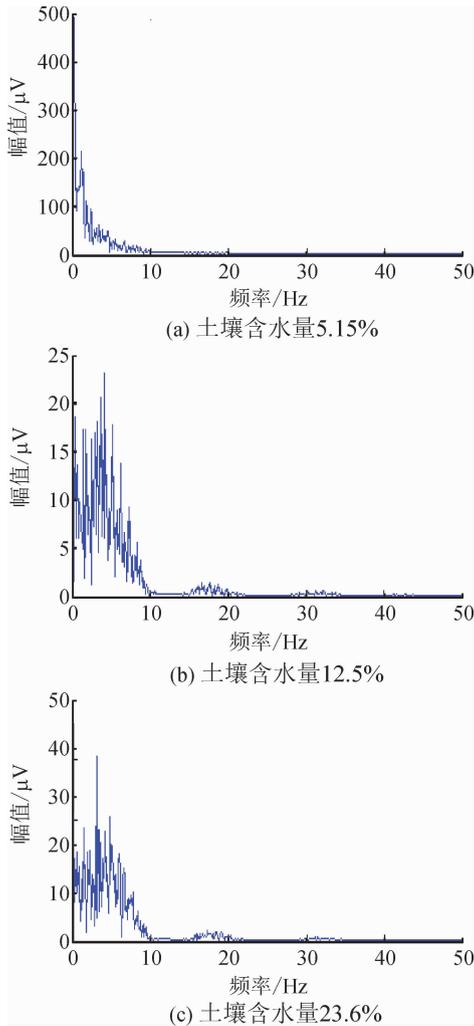


图 6 三种状态下的频域波形

Fig. 6 Waveform of frequency domain in three states

图 6 表明,对于吊兰类喜水植物,土壤含水量的变化对其植物电信号频域波形影响较大,主要表现在:当其含水量较为充足时(适宜或者潮湿),其频率集中在 $0\sim 10\ \text{Hz}$ 之间,以 $5\ \text{Hz}$ 最为突出;含水量不充足(干旱)时,其频率范围大大缩短,主要分布在 $0\ \text{Hz}$ 左右。

对 7 681 个采样点计算功率谱,其功率谱波形见图 7。从图 7 看出,植物电信号的功率谱大部分集中在 $15\ \text{Hz}$ 以下, $15\ \text{Hz}$ 附近的谱峰值已经非常低,基本在 $-50\ \text{dB}$ 。信号的绝大部分功率谱集中在大概 $2\sim 5\ \text{Hz}$ 频率附近,处于 $-30\ \text{dB}$ 级别,这说明植物电信号不仅低频而且信号能量极弱,是一种典

型的生物电信号。在干旱状态下,同频率下,谱峰值会略高于正常状态下的峰值。

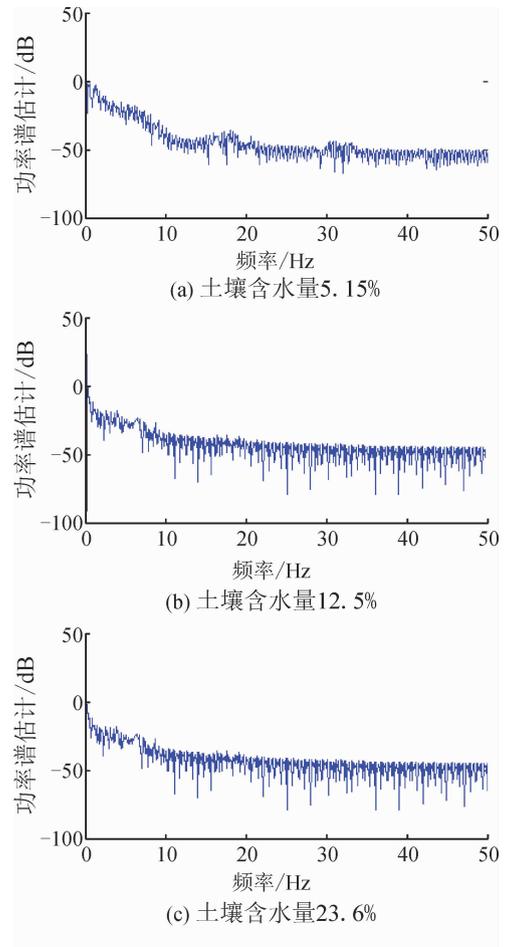


图 7 三种状态下的功率谱波形

Fig. 7 Waveform of power spectrum in three states

采用短时 Fourier 变换(STFT)对其植物电信号进行了相应的频谱分析,其中短时 Fourier 变换中窗函数采用 Kaiser 窗函数,时域宽度为 360 数据点,其结果见图 8。

图 8 橙黄色表示能量较高的部分,蓝色表示能量低。由图 8 分析可得,吊兰电信号的短时 Fourier 变换频谱明显在 $15\ \text{Hz}$ 以下,大多不超过 $10\ \text{Hz}$,频谱能量大多集中于 $2\sim 5\ \text{Hz}$ 以及以下。另外随着环境水胁迫程度的增高,频谱能量集中的频率会呈现向高频方向的发展趋势,即干旱程度越高,频谱能量集中区域的频率越高。

3 基于神经网络的植物电信号识别模型建立

使用 MATLAB 的神经网络工具箱,以 BP 神经网络进行信号的训练和识别^[22]。BP 神经网络隐含层节点为 50 个。以小波去燥后抽样的 4 000 个点,选择 70%的数据作为训练集(Training),15%的

数据作为测试集(Testing)和 15%的数据作为验证集(Validation),其中训练集和验证集主要用于 BP 算法的最优化选择模型的建立,而测试集用来给出最终模型的性能指标。训练结束后,生成训练模型的 MSE 和 R 曲线,见图 9。

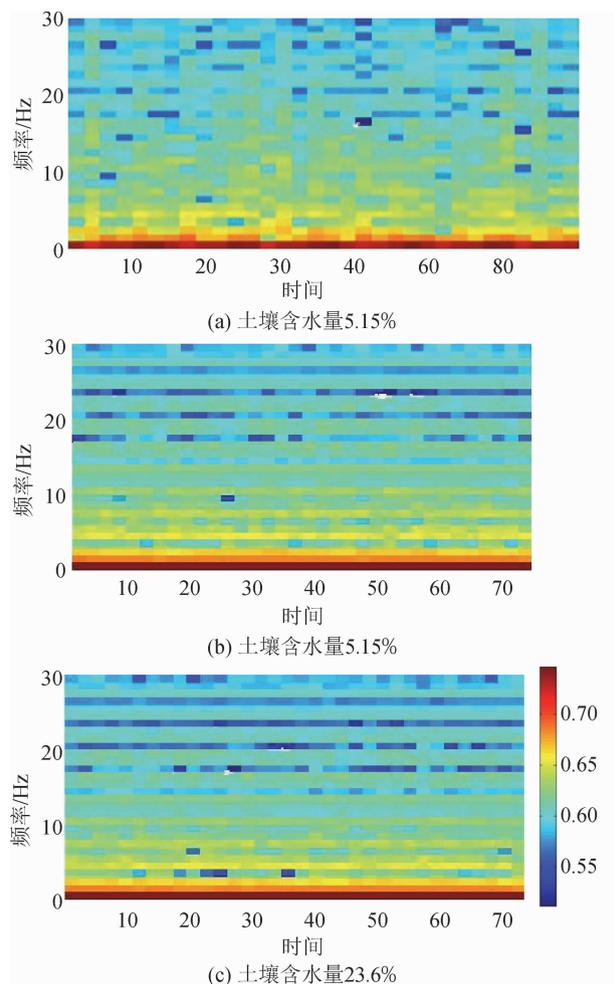
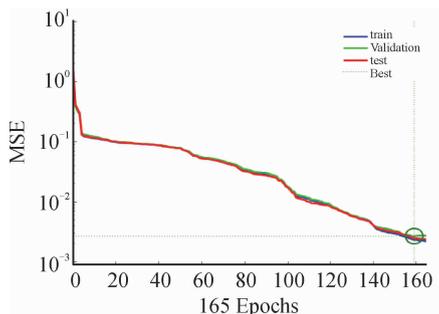


图 8 STFT 变换频谱图

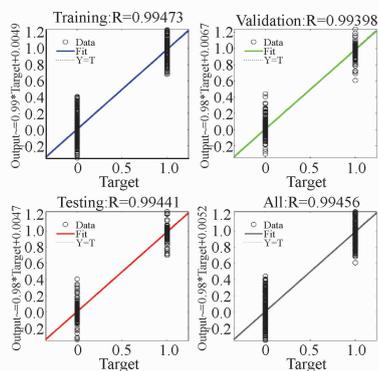
Fig. 8 STFT transform Spectrum map

从图 9(a)中可以看到,三条 MSE 曲线几乎完全重合,而且呈现下降趋势,说明随着训练的进行,输出的预测值与实际值误差越来越小,并且训练形成的算法在训练集、验证集和测试集的表现趋同,识别系统非常稳定。

从图 9(b)中来看,R 值曲线在三个数据集中的正确率均超过 99%,并且三个数据集的正确率差异不大,可以作为吊兰这种植物的电信号对于环境水胁迫程度的识别和预测模型,可以应用于实际农业种植中植物的检测工作。因此,以 BP 神经网络为基础的监督式机器学习在植物电信号的识别和预测模型建立方面,有一定的应用价值。



(a) MSE 曲线图



(b) R 值曲线图

图 9 MSE 和 R 值曲线图

Fig. 9 MSE and R value graph

4 结论

1) 在采集植物电信号的基础上,对于不同降噪作了明确的分析和对比,选取了最适合植物电信号的“db4”3 层小波去噪,同时对去噪后的信号进行了时域、频域和时频域的相关分析,验证了植物电信号微弱、低频、非线性和随机性,探寻了特征值与土壤含水量的相关关系。

2) 探索了 BP 神经网络在植物电信号与土壤含水量直接相关关系的最优算法,建立了植物电信号与土壤含水量的识别和预测模型,实现对植物环境水胁迫程度的预测和识别。

3) 植物电信号是一种复杂的信号,探寻信号的特征参数与外界环境变化的相关关系将在智能农业领域起到重要作用。

参考文献:

- [1] 高翔, 习岗, 刘锴, 等. 基于小波的植物电信号降噪方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(1): 92-97.
GANG Xiang, XI Gang, LIU Kai, et al. The study of de-noising method about plant electrical signal based on wavelet[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(1): 92-97.
- [2] VOLKOV A G. Green plants: electrochemical interfaces[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2000,

- 483(1): 150-156.
- [3] 李娇, 王兰州, 李东升, 等. 三种菊科植物电信号的分析[J]. 中国计量学院学报, 2006, 17(4): 333-336.
LI Qiao, WANG Lanzhou, LI Dongsheng, et al. Analysis of electrical signal of three species in compositae[J]. Journal of China Jiliang University, 2006, 17(4): 333-336.
- [4] 张晓辉, 李艳贞, 马红标, 等. 植物微弱电信号在线采集系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(11): 3728-3731.
ZHANG Xiaohui, LI Yangzhen, MA Hongbiao, et al. Design of online measuring system of plant electrical signal[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(11): 3728-3731.
- [5] 高翔. 基于小波的植物电信号降噪及其应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2013.
GAO Xiang. Wavelet-based plant electrical signal denoising and its application [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
- [6] 陆静霞, 丁为民, 李林, 等. 植物电信号分析技术研究现状[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(30): 14583-14584.
LU Jingxia, DING Weiming, LI Lin, et al. Current status of techniques about electrical signal in plants[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(30): 14583-14584.
- [7] 胡俊海, 齐迹, 王英男, 等. MATLAB 在植物电信号降噪处理中的应用[J]. 农业工程, 2017, (4), 41-44.
HU Junhai, QI Ji, WANG Yingnan, et al. Application of Matlab in de-noising of plant electrical signal[J]. Agricultural Engineering, 2017, (4), 41-44.
- [8] 陆静霞. 植物电信号特性分析及其与环境因子关系研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
LU Jingxia. Analysis of plant electrical signal characteristics and its relationship with environmental factors [D]. NanJing: Nanjing Agricultural College, 2012.
- [9] 王玲玲, 翁绍捷, 陈薇. 基于虚拟仪器的植物电位信号测量系统的设计[J]. 机电工程技术, 2009, 38(1): 95-97.
WANG Lingling, WENG Shaojie, CHEN Wei. Design of measurement system for electrical signal in plant based on virtual instrument[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2009, 38(1): 95-97.
- [10] 丁红星, 李敏通, 郭交, 等. 君子兰电信号与含水率的关系[J]. 西部林业科学, 2016, 45(3): 75-80.
DING Hongxing, LI Mintong, GUO Jiao, et al. The relationship between electrical signal and moisture content of clivia miniata[J]. Journal of West China Forestry Science, 2016, 45(3): 75-80.
- [11] 王兰州, 李东升, 李娇. 植物电信号测试研究进展[J]. 中国计量学院学报, 2008, 19(1): 10-19.
WANG Lanzhou, LI Dongsheng, LI Qiao. Advance on the testing research of weak electrical signals in plants[J]. Journal of China Jiliang University, 2008, 19(1): 10-19.
- [12] 王兰州, 胡安雨. 微弱电信号测试计量的植物生长信息传递研究展望[J]. 中国计量学院学报, 2010, 21(3): 192-200.
WANG Lanzhou, HU Anyu. A vista on growth information transmissions of weak electrical signals in plants[J]. Journal of China Jiliang University, 2010, 21(3): 192-200.
- [13] 孟晓丽. 环境胁迫下植物电信号变化规律的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
MEN Xiaoli. Study on the change law of plant electrical signal under environmental stress[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.
- [14] 付会凯. 基于多种小波熵和信号熵的植物电信号特征提取[J]. 农机化研究, 2013, 35(9): 38-40.
FU Huikai. Feature extraction of plant electrical signals based on multi-wavelet entropy and signal entropy [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(9): 38-40.
- [15] HUANG Lan, WANG Zhongyi. Computing methods in analyzing plant electrical signal[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2002, 18(5): 39-42.
- [16] 周先飞, 马书香, 钱峰. 基于虚拟仪器的信号分析系统实验设计[J]. 洛阳工业高等专科学校学报, 2015, 25(1): 66-69.
ZHOU Xianfei, MA Shuxiang, QIAN Feng. Experimental design of signal analysis system based on virtual instrument[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology, 2015, 25(1): 66-69.
- [17] 舒彬. 基于多小波熵和信号熵的植物电信号特征提取[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(7): 178-180.
SHU Bin. Feature extraction of plant electrical signals based on multi-wavelet entropy and signal entropy [J]. Computer Knowledge and Technology, 2016, 12(7): 178-180.
- [18] 武海, 田立国, 汪建国, 等. 基于 NI-DAQmx 的植物电信号检测系统[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(12): 326-328.
WU Hai, TIAN Ligu, WANG Jianguo, et al. Study on plant electrical signal detection system based on NI-DAQmx[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(12): 326-328.

- ponents based on strengthening effects of low-amplitude loads below fatigue limit[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2012, 35(3): 269-277.
- [10] 高刚刚. 新型双风轮合成增速箱的设计与仿真分析及优化[D]. 兰州:兰州理工大学, 2017.
GAO Ganggang. Design, simulation analyses and optimization of a new speed-increasing gearbox for wind turbine with double rotors[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [11] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.
- [12] 赵礼辉, 郑松林, 冯金芝. 基于低载强化特性的疲劳寿命估计方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(8): 115-122.
ZHAO Lihui, ZHENG Songlin, FENG Jinzhi. Fatigue life prediction based on simplified low-amplitude-load strengthening model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(8):115-122.
- [13] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计[M]. 第 8 版. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [14] 胥良. 基于载荷谱的兆瓦级风电齿轮箱动态特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
XU Liang. Dynamic characteristics research based on load spectrum of megawatt level wind turbine gearbox [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [15] 郑松林, 鞠方超, 冯金芝. 一种新的谱载荷寿命评估模型[J]. *机械强度*, 2014, 36(2):261-266.
ZHENG Songlin, JU Fangchao, FENG Jinzhi. A new fatigue life prediction model by random load spectrum [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2014, 36(2): 261-266.
- [16] 郑松林. 低幅载荷对汽车前轴疲劳寿命影响的试验研究[J]. *机械强度*, 2002, 24(4):547-549.
ZHENG Songlin. Studying the effect of low amplitude loading on fatigue life of truck front axle[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2002, 24(4):547-549.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 326 页)

- [19] 张晓辉, 余宁梅, 习岗, 等. 基于小波消噪的植物电信号频谱特征分析[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(4): 411-416.
ZHANG Xiaohui, YU Ningmei, XI Gang, et al. The analysis on spectrum characteristic of plant electrical signal based on wavelet de-noising[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(4): 411-416.
- [20] 李国臣, 于海业, 李强征, 等. 植物电位信号采集与处理方法的研究[J]. *农机化研究*, 2006, 6: 145-148.
LI Guochen, YU Haiye, LI Qiangzheng, et al. Discussion on method of measuring and proceeding plant physiological signals[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, 6: 145-148.
- [21] 段晓杰, 王宝珠, 潘洪刚. 基于 LabVIEW 技术的虚拟小波消噪仪设计[J]. *国外电子测量技术*, 2005, 24(8): 18-21.
DUAN Xiaojie, WANG Baozhu, PAN Honggang. Design of virtual wavelet noise eliminator based on LabVIEW[J]. *Technology Electronic Measurement Technology*, 2005, 24(8):18-21.
- [22] 陈薇, 翁绍捷, 王玲玲, 等. 基于虚拟仪器和小波降噪的植物电信号测量系统的设计[J]. *中国农机化*, 2010, 231(5): 94-97.
CHEN Wei, WENG Shaojie, WANG Lingling, et al. Design of the measurement system for week electrical signal based of virtual instrument and wavelet de-noising[J]. *Chinese Agriculture Mechanization*, 2010, 231(5): 94-97.

(责任编辑 王绪迪)