

基于阻抗和电容的番茄叶片含水率实时监测

李晋阳 毛罕平

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为降低基于叶片电特性的番茄营养状况实时监测系统中叶片含水率对营养监测准确性的影响,提高营养水平监测模型的精度,提出一种基于叶片阻抗和电容的含水率实时测量方法,利用自制的针状电极设计了一种基于叶片阻抗和电容的4电极含水率监测系统。以不同含水率的番茄叶片为对象,在 $1 \times 10^{-6} \sim 1$ MHz的频率范围内研究了番茄叶片含水率对阻抗的影响规律,提取了叶片含水率的敏感频段,并建立了基于阻抗和电容的各生育期的叶片含水率预测模型,各模型的相关系数均大于0.973,均方根误差均小于5.06%。结果表明:番茄叶片含水率为50.5%~94.4%时,利用频率为3.98 kHz时叶片阻抗和电容的对数函数可对番茄叶片含水率进行监测。

关键词: 番茄; 叶片; 含水率; 阻抗; 监测

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0295-05

Monitoring of Tomato Leaf Moisture Content Based on Electrical Impedance and Capacitance

Li Jinyang Mao Hanping

(Key Laboratory of Modern Agriculture Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to decrease the effect of moisture content on the accuracy of tomato nutrition level in the on-time monitoring system and improve the accuracy of nutrition level prediction model, an on-time measurement method for moisture content based on impedance and capacitance of leaf was proposed. A monitoring system of moisture content with four electrodes was designed. The relationship between electric properties and moisture content of tomato leaves was investigated within a frequency range from 1×10^{-6} MHz to 1 MHz. The sensitive frequency of 3.98 kHz was obtained. Therefore, an equation was developed that simultaneously satisfies both impedance and capacitance. The new method increased the accuracy of moisture measurement as compared to that obtained by using a single parameter. It is suspected that the variation of tissue structure during the growth process of tomato had the effect on electric properties. Therefore, the experimental samples were divided into four classes depending on four growth stages such as strong seedling stage, flowering stage, fruiting stage and picking stage, the samples were reanalyzed. The linear regression equations with the correlation coefficient of 0.973 at least and root mean square error (RMSE) of 5.06% at most for four growth periods respectively were acquired by the least square method. Results showed that the accuracy of model for four growth stages was further enhanced. When the moisture content of leaves was between 50.5% and 94.4%, the logarithmic functions of impedance and capacitance can be used to estimate the moisture content at 3.98 kHz.

Key words: tomato; leaf; moisture content; impedance; monitoring

收稿日期: 2015-11-13 修回日期: 2015-12-24

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B03)、江苏大学高级人才基金项目(13JDG077)、江苏省博士后基金项目(1402076B)和江苏高校优势学科建设工程项目(苏政办发[2014]37号)

作者简介: 李晋阳(1974—),男,副研究员,主要从事智能化检测技术与装备研究,E-mail: by0817136@163.com

通信作者: 毛罕平(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备和设施农业环境控制研究,E-mail: maohp@ujs.edu.cn

引言

在作物生长过程中对养分进行精确监测和诊断,对于实现养分的精确管理具有重要意义。目前植物营养的检测方法主要包括图像和光谱分析法,由于图像和光谱对光照等环境因素的敏感性,限制了其在生产实践中的推广应用^[1]。而电阻抗谱(EIS)测量方法具有对环境不敏感、检测快速和准确的特点,近年来已在作物营养胁迫监测^[1-3]、果蔬质量评价^[4]及损伤^[5-8]、逆境胁迫^[9]等领域得到了应用,为进行基于电阻抗谱的作物营养信息监测提供了理论依据。

然而现有研究中均未考虑叶片含水率对阻抗测量的影响。事实上,由于植物中富含大量的水分和金属离子,水分的变化会引起电导率和阻抗的变化^[10-11]。笔者在基于叶片电阻抗谱的番茄磷钾营养状况在线监测研究中发现,叶片含水率对磷钾模型的预测精度具有决定性的影响^[12]。可见,含水率是影响阻抗变化的主要因素,如能在进行基于电阻抗谱的作物营养状况诊断时,探明含水率对阻抗的影响规律并将这种影响考虑在内,不仅能在一次测量中同时实现作物营养监测和含水率检测,而且可提高营养诊断准确性。为此,有必要对基于电阻抗技术的作物含水率检测进行研究。目前,国内外学者对基于植物电特性的含水率检测进行了大量研究^[13-18]。这些研究为利用电特性对植物含水率监测提供了理论依据。然而,上述对含水率监测的研究中,由于所采用的电极系统、测量方法、所选择的电参数等各不相同,相应的监测系统和方法难于与叶片电阻抗谱的番茄磷钾营养状况在线监测系统集成。另外,尚未见有利用叶片电特性对番茄含水率监测的报道。为此,本文以无土栽培番茄为研究对象,以电阻抗谱分析为研究手段,通过试验研究番茄叶片含水率对阻抗的影响规律,确定叶片含水率的敏感频段和特征参数,构建基于叶片阻抗参数的作物含水率监测模型,旨在寻求一种简便、快速、准确的含水率监测方法,实现利用阻抗进行含水率的监测,为基于电阻抗谱分析的集营养状况监测和含水率检测为一体的测试仪器的开发提供理论依据。

1 材料与方法

试验于2015年2—6月在江苏大学 Venlo 型温室进行。

1.1 试验材料

试验材料为合作908番茄叶片。样品选自于江

苏大学 Venlo 型温室土槽的生长期为1~4个月间不同植株的番茄。

1.2 试验方法

试验前对番茄浇灌不同量的水,使植株处于不同含水率。在植物蒸腾作用下,植株的含水率逐渐降低,从而得到含水率不同的番茄叶片。试验开始后每天08:30—09:30对不同植株中部叶片进行活体在线阻抗测量,待阻抗测量完毕后,将被测试叶片采摘后放入预先贴好标签的密封保鲜袋,迅速带回实验室,用干燥法测量叶片含水率。

1.2.1 阻抗测量

采用 Solarton 1260A 型阻抗分析仪和 1294 生物阻抗接口 (Solarton Analytical, 英国) 进行阻抗测量。阻抗分析仪采用数字相关技术,测量准确性高,幅值和相位的测量精度分别为 0.1% 和 0.1°。1260A 型阻抗分析仪和 1294 生物阻抗接口具有精度高、重复性好、实用方便的特点,已广泛用于生物体活体测量、电极分析系统、生物技术和食品新鲜度等研究中^[19-21]。本文测试系统结构框图和试验装置分别如图 1、2 所示。

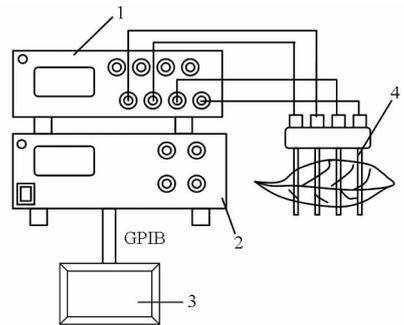


图1 番茄叶片阻抗测量结构框图

Fig. 1 Schematic illustration for measurement system of tomato leaves by four electrodes

1. 1294 生物阻抗接口 2. 1260A 型阻抗分析仪 3. 计算机
4. 电极



图2 试验装置

Fig. 2 Experimental device

阻抗测量采用 100 mV 激励信号,频率为 $1 \times 10^{-6} \sim 1$ MHz 内的 91 个点(对数频率间隔),采取扫频方式。为降低电极极化的影响,使用了 4 端测量方式。电极采用直径 1.0 mm、长度 12 mm、间隔

10 mm 的 4 个不锈钢针状电极,采取刺入方式。电极通过同轴电缆连接到阻抗分析仪的 4 端结构。交流信号通过 1294 生物阻抗接口的 2 个电流激励端 (GenHi、GenLo) 输入到测试样本,从另一对端子 (VHi、VLo) 获取测量电压信号。测试样本分为 2 组,一组为标定样本,另一组为校验样本。

进行阻抗测试时,用水冲掉测试部位的尘土并用面巾纸将测试部位表面的水吸干。每个叶片选取 3 个部位进行测量并将平均值作为测量结果。待阻抗测试完成后,采摘不同处理下的叶片并迅速放入预先贴好标签的塑料袋进行密封,随后立即带入实验室存储,以测量含水率。

测量数据自动通过 GPIB 接口传输到计算机,以便存储和进一步分析。阻抗幅值 $|Z|$ 、电容和相角 θ 可从记录数据中直接获取。电阻 R 和电抗 X 计算式分别为

$$R = |Z| \cos\theta \quad (1)$$

$$X = |Z| \sin\theta \quad (2)$$

测试在室内进行,测试期间的环境温度为 21 ~ 25℃,相对湿度为 45% ~ 55%。由于频率较低时,电极极化影响比较严重,为降低电极极化的影响,选择频率为 $1 \times 10^{-6} \sim 1$ MHz。

1.2.2 叶片含水率测定

用 JY502 型电子天平(上海浦春计量仪器有限公司,精度 0.01 g)测量干燥前番茄叶片质量,然后将叶片置于 105℃ 的电子恒温箱 30 min 后,再于 70℃ 下,干燥至恒定质量,然后对干燥后的叶片进行称量,根据干燥前、后质量计算叶片的湿基含水率 M 。

2 测试结果与分析

2.1 叶片含水率对电特性的影响

不同含水率下叶片样本总阻抗随频率的变化关系如图 3 所示。由图 3 可知,阻抗随频率的增加显著降低。构成生物组织的细胞由细胞内液、细胞外液以及细胞膜组成,其中细胞内、外液被细胞膜分隔开,且胞外液体电阻高于胞内液体^[22-23]。低频区域,由于细胞膜的电容特性,电流仅流穿细胞外液,故阻抗较高;随着频率的增加,细胞膜对电流的阻碍作用减弱,电流穿过胞内液体,由于胞内液体电阻较低,故阻抗降低^[22]。另外,从图 3 可知,相同频率下,不同含水率叶片的阻抗存在明显差异,且总阻抗随含水率的降低而降低。这是由于阻抗不仅与溶液中离子浓度有关,还与离子的移动能力有关^[11]。含水率较高时,由于离子浓度较低,细胞液的导电能力较弱,故阻抗较高;随着含水率减小,离子浓度提高,

导致阻抗降低。综上所述,在所测试频率范围内,阻抗对含水率差异有不同程度的响应。

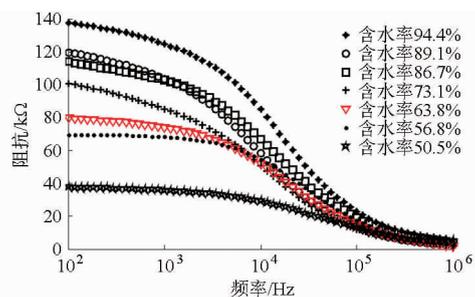


图 3 不同含水率番茄叶片阻抗随频率的变化曲线

Fig. 3 Changes in impedance spectra of tomato leaf at different moisture contents plotted with respect to frequency

植物中富含大量的水分和金属离子,是电的良好导体。利用干燥法测得本研究用番茄叶片的含水率为 50.5% ~ 94.4%。根据含水率的分布情况,从中均匀的筛选出 155 个不同含水率下的数据进行分析。不同含水率叶片样本 Cole - Cole 图如图 4 所示。由图 4 可知,各含水率下的 Cole - Cole 图为半椭圆,水分的变化引起电导率和电阻抗的变化,且随着含水率的降低,半椭圆变小。由此可见,通过半椭圆面积大小对叶片含水率进行定性判别是可行的。

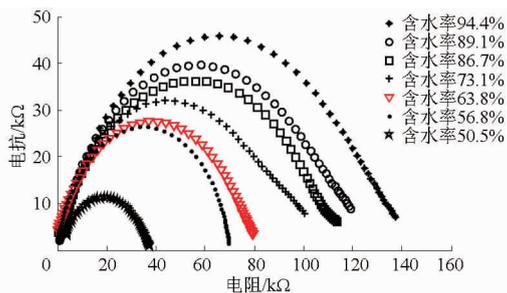


图 4 不同处理番茄叶片的 Cole - Cole 图

Fig. 4 Cole - Cole plot of samples with different moisture contents

2.2 水分敏感频段的获取

为了提取水分的敏感频段,在 $1 \times 10^{-4} \sim 1$ MHz 频率范围内,利用最小二乘法分别对利用同一频率下的阻抗、电阻、电抗、电容、相位角与叶片含水率间的相关性进行了分析。结果表明,在所研究频率范围内,电阻和含水率以及电抗和含水率间的相关性较差,对应的均方根误差分别高于 10.67% 和 14.38%。而含水率与电容和阻抗的对数函数相关性较强,且含水率可表示为^[10]

$$M = A \ln(Z/C) + B \quad (3)$$

式中 M ——叶片含水率,%

Z ——阻抗测量值, Ω

C ——叶片电容,F A 、 B ——系数

利用最小二乘法对 $1 \times 10^{-4} \sim 1$ MHz 频率范围内各频率下的阻抗和电容与含水率按照关系式(3)

进行拟合,获得相应的拟合模型,并将模型预测值与采用干燥法测得的含水率实测值进行比较,相应的相关系数频率响应特性如图5所示。由图5可知,频率3.98 kHz处的阻抗和电容对含水率影响显著,相关系数最高(0.986),因此,可将该频率作为含水率的敏感频率。

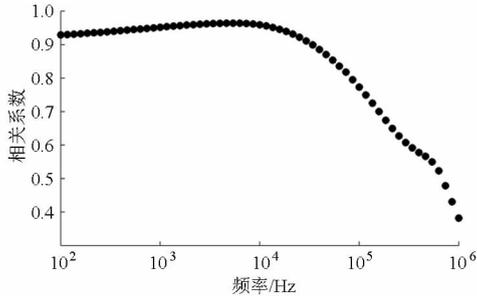


图5 含水率实测值与模型预测值间相关系数的频率响应特性曲线

Fig. 5 Frequency-dependent characteristic of correlation coefficient between measured and estimated values of moisture content

2.3 含水率预测模型的建立

利用获取的敏感频率3.98 kHz下的阻抗和电容测试数据与利用干燥法获得的含水率进行最小二乘回归,获得的回归模型为

$$M = 20.15 \ln(Z/C) - 581.45 \quad (n = 155) \quad (4)$$

为了验证该模型的可靠性,将通过该模型获得的预测值与利用干燥法获得的含水率进行比较,结果如图6所示。相应的相关系数和标准误差分别为0.933和8.92%,这表明所建模型的预测精度不够理想,尚有待于提高。

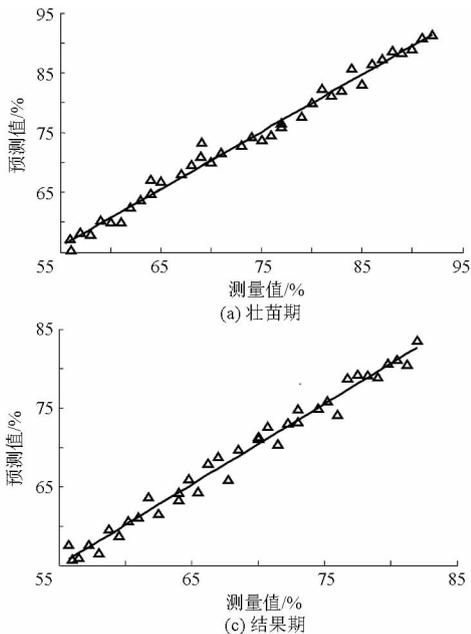


图7 不同生长期叶片含水率测量值与预测值的比较

Fig. 7 Comparison of measured and estimated values of moisture content

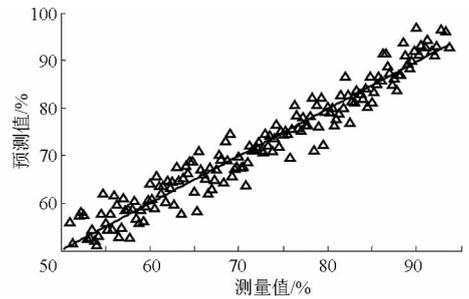


图6 含水率干燥法测量值与模型预测值的比较

Fig. 6 Calibration curve of standard oven drying method vs estimated value of moisture content

2.4 含水率预测模型的改进

为了提高含水率预测模型的精度,将155个不同含水率的叶片样本按照番茄的4个生长期进行分类,壮苗期、开花期、结果期和采收期的样本数分别为38、41、37、39,然后对各生育期进行建模,具体模型如表1所示,并将模型预测值与利用干燥法测得的含水率进行比较,结果如图7所示。壮苗期、开花期、结果期和采收期的叶片含水率模型预测值与实测值相关系数分别为0.988、0.983、0.987、0.973,相应的标准误差分别为3.69%、4.83%、4.23%、5.06%

表1 不同生育期叶片含水率预测模型

Tab. 1 Prediction model of moisture content at different stages

生育期	样本数	模型	R	RMSE/%
全生育期	155	$M = 20.15 \ln(Z/C) - 581.45$	0.933	8.92
壮苗期	38	$M = 19.94 \ln(Z/C) - 587.57$	0.988	3.69
开花期	41	$M = 21.12 \ln(Z/C) - 588.53$	0.983	4.83
结果期	37	$M = 21.04 \ln(Z/C) - 592.01$	0.987	4.23
采收期	39	$M = 18.89 \ln(Z/C) - 569.66$	0.973	5.06

5.06%。这表明将样本按照生育期进行分类后,所建模型的预测精度得到显著提高。其中的原因可能为:从壮苗期到采收期的生长过程中,随着植株的生长,细胞结构发生明显变化,从而导致细胞膜电容发生变化;另外,壮苗期植株组织幼嫩,组织中大多是水分,纤维组织较少,而随着植株生长的逐渐进行,植株中的水分逐渐减少,而纤维组织增多,从而使得各生育期的阻抗特性发生明显变化。

3 结论

(1)利用叶片阻抗和电容可对番茄叶片的含水率进行快速、准确、在线测量,为番茄叶片含水率的实时监测提供了新的途径,电阻抗测量技术是作物

含水率监测的重要手段。

(2)获得了叶片含水率监测的敏感频段,针对番茄整个生育期的全体数据样本以及壮苗期、开花期、结果期和采收期的数据样本,分别建立了基于叶片阻抗和电容的叶片含水率预测模型,通过验证得知,模型具有较高精度,且将样本按照生育期的4个阶段进行分类后,所建模型精度显著提高。含水率敏感频段的获取和含水率预测模型的建立,为今后开发基于阻抗和电容的含水率监测仪器提供了理论基础。

(3)随着含水率的降低,叶片的 Cole - Cole 图面积逐渐变小,这为利用 Cole - Cole 形状特征对水分胁迫进行定性诊断提供了简便、快速的途径。

参 考 文 献

- 1 RAFAEL F Muñoz-Huerta, ANTONIO de J Ortiz-Melendez, RAMON G Guevara-Gonzalez, et al. An analysis of electrical impedance measurements applied for plant N status estimation in lettuce (*Lactuca sativa*) [J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 11492 - 11503.
- 2 刘洋,王涛,吴海云,等.基于叶片组织汁液阻抗的玉米钾营养状况监测[J].*农业机械学报*,2013,44(1):185 - 189.
LIU Yang, WANG Tao, WU Haiyun, et al. Diagnosis on potassium nutrition of maize using impedance parameter of tomato leaf [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1):185 - 189. (in Chinese)
- 3 TOMKIEWICZ D, PISKIER T. A plant based sensing method for nutrition stress monitoring[J]. *Precision Agriculture*, 2012, 13(3): 370 - 383.
- 4 LIU Xing. Electrical impedance spectroscopy applied in plant physiology studies [D]. Melbourne: RMIT University, 2006.
- 5 COX M A, ZHANG Min, WILLISON J H M. Apple bruise assessment through electrical impedance measurements [J]. *Journal of Horticultural Science*, 1993, 68(3):393 - 398.
- 6 VARLAN A R, SANSEN W. Nondestructive electrical impedance analysis in fruit: normal ripening and injuries characterization [J]. *Electromagnetic Biology & Medicine*, 2009, 15(3):213 - 227.
- 7 VOZARY E, LASZLO P, ZSIVANOVITS G. Impedance parameter characterizing apple bruise [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1999, 873:421 - 429.
- 8 JACKSON P J, HARKER F R. Apple bruise detection by electrical impedance measurement [J]. *Hort Science*, 2000,35(1): 104 - 107.
- 9 刘晓红,黄廷林,王国栋,等.盐胁迫下小麦叶片电阻抗与生理特性的关系[J].*浙江大学学报:农业与生命科学版*,2010, 36(1): 90 - 95.
LIU Xiaohong, HUANG Tinglin, WANG Guodong, et al. Relationship between electrical impedance and physiological characteristics of wheat leaves in salt stress[J]. *Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci.*, 2010, 36(1):90 - 95. (in Chinese)
- 10 MIZUKAMI Y, SAWAI Y, YAMAGUCHI Y. Moisture content measurement of tea leaves by electrical impedance and capacitance [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(3): 293 - 299.
- 11 RAFAEL M, MIGUEL A, ANA F, et al. Design of a low-cost non-destructive system for punctual measurements of salt levels in food products using impedance spectroscopy [J]. *Sensors and Actuators A*, 2010, 158(2): 217 - 223.
- 12 LI Meiqing, LI Jinyang, MAO Hanping, et al. Diagnosis and detection of phosphorus nutrition level for *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance spectroscopy[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 143(1): 108 - 118.
- 13 ZHENG Lihua, WANG Zhuo, SUN Hong, et al. Real-time evaluation of corn leaf water content based on the electrical property of leaf[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 112(Supp.1):102 - 109.
- 14 魏永胜,李得孝,牟长灵,等.小麦叶片电特性与外加电压和频率的关系研究[J].*农业工程学报*,2008,24(5):166 - 169.
WEI Yongsheng, LI Dexiao, MOU Changling, et al. Relationship between the wheat seedling leaf electric property and test frequency and voltage[J]. *Transactions of the CSAE*,2008,24(5):166 - 169. (in Chinese)
- 15 KSENZHEK O, PETROVA S, KOLOGYAZHNY M. Electrical properties of plant tissues, resistance of a maize leaf [J]. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*,2004,30(3 - 4):61 - 67.
- 16 金树德,张世芳,郑荣良.从玉米生理电特性诊断旱情[J].*农业工程学报*,1999,15(3):91 - 95.
JIN Shude, ZHANG Shifang, ZHENG Rongliang. Diagnosis of drought from maize physiological electrical characteristics [J]. *Transactions of the CSAE*, 1999,15(3):91 - 95. (in Chinese)

- 10 陈汇龙, 赵春英. 感应荷电喷雾静电场与荷电特性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(10):2519-2524.
CHEN Huilong, ZHAO Chunying. Electrostatic induction field and charging property of droplet in electrostatic spraying process [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10):2519-2524. (in Chinese)
- 11 DENG W W, KLEMIC J F, LI X H, et al. Liquid fuel microcombustor using microfabricated multiplexed electro spray sources [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2239-2246.
- 12 YULIATI L, SEO T, MIKAMI M. Liquid-fuel combustion in a narrow tube using an electro spray technique [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(1):462-464.
- 13 甘云华, 佟洋, 罗智斌. 乙醇在微尺度单电极燃烧器内雾化与燃烧实验研究[J]. 化工学报, 2015, 66(11): 4597-4602.
GAN Yunhua, TONG Yang, LUO Zhibin. Electro-spraying and combustion of alcohol in micro-combustor with single electrode [J]. CIESC Journal, 2015, 66(11): 4597-4602. (in Chinese)
- 14 GAN Y H, WANG M, LUO Y L, et al. Effects of direct-current electric fields on flame shape and combustion characteristics of ethanol in small-scale [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(1):1-14.
- 15 MIKAMI M, MAEDA Y, MATSUI K, et al. Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2):3387-3394.
- 16 GAN Y H, LUO Z B, CHENG Y P, et al. The electro-spraying characteristics of ethanol for application in a small-scale combustor under combined electric field [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87: 595-604.
- 17 GAN Y H, LUO Y L, WANG M, et al. Effect of alternating electric fields on the behavior of small-scale laminar diffusion flames [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89:306-315.
- 18 史艳玲, 罗智斌, 甘云华, 等. 小尺度荷电锥射流场强分布特性分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):15-20.
SHI Yanling, LUO Zhibin, GAN Yunhua, et al. Analysis on the distribution of electric field strength of a small-scale cone-jet electro-spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):15-20. (in Chinese)
- 19 周海英, 陈浩. 均匀带电细圆环的电场的一般分布[J]. 大学物理, 2004, 23(9): 32-34.
ZHOU Haiying, CHEN Hao. Space distribution of electrical field generated by a uniformly charged ring [J]. College Physics, 2004, 23(9): 32-34. (in Chinese)
- 20 茹煜, 郑加强, 周宏平, 等. 感应充电喷头环状电极诱导电场的分布研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 119-122.
RU Yu, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Electric field distribution produced by circular electrode of induce charging nozzle [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 119-122. (in Chinese)
- 21 程昌林, 李业凤, 王慧. 有限长均匀带电薄圆柱面的电场[J]. 大学物理, 2004, 23(2):34-35.
CHENG Changlin, LI Yefeng, WANG Hui. The electric field of finite length uniformly charged thin cylindrical surface [J]. College Physics, 2004, 23(2):34-35. (in Chinese)

(上接第 299 页)

- 17 鲍一丹, 沈杰辉. 基于叶片电特性和叶水势的植物缺水度研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2005, 31(3):341-345.
BAO Yidan, SHEN Jiehui. Study of plant water lack message based on electric property and water potential of leaf [J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2005, 31(3): 341-345. (in Chinese)
- 18 郭文川, 刘东雪, 周超超, 等. 基于电容特性的植物叶片含水率无损检测仪[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 288-293.
GUO Wenchuan, LIU Dongxue, ZHOU Chaochao, et al. Non-destructive moisture detector for plant leaves based on capacitance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):288-293. (in Chinese)
- 19 BAO J Z, DAVIS C C, SCHMUKLER R E. Frequency domain impedance measurements of erythrocytes [J]. Biophys. J., 1992, 61(5): 1427-1434.
- 20 HINTON A J, SAYERS B. Advanced instrumentation for bioimpedance measurements [EB/OL]. [2015-11-13]. [http://www.solartronanalytical.com/download/Advanced instrumentation for bioimpedance measurements. pdf](http://www.solartronanalytical.com/download/Advanced%20instrumentation%20for%20bioimpedance%20measurements.pdf).
- 21 JORCIN J B, ORAZEM M E, PEBERE N, et al. CPE analysis by local electrochemical impedance spectroscopy [J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(8-9): 1473-1479.
- 22 YASUMASA A, KOICHI M, NAOTO W. Electrical impedance analysis of potato tissues during drying [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121: 24-31.
- 23 ANA F, JOSÉ L, MARÍA B, et al. Application of nondestructive impedance spectroscopy to determination of the effect of temperature on potato microstructure and texture [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 133:16-22.