

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.033

# 基质根区阻抗谱测量中补偿和耦合方法研究

王永千<sup>1,2</sup> 赵鹏飞<sup>1,3</sup> 范利锋<sup>1,2</sup> 王子洋<sup>1,3</sup> 黄 岚<sup>1,3</sup> 王忠义<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 根区阻抗谱技术可以很好地展现根区水分、生物量等动态变化。针对相邻激励策略下的基质根区 100 Hz ~ 2 MHz 范围内阻抗谱测量中出现的问题, 进行总结、分析, 并提出了解决方法。进行了延长通道对测量的影响实验, 分析对比了单端口网络和双端口网络补偿策略, 实验结果表明, 纯基质的测量, 单端口网络补偿方法是最佳选择, 其步骤简洁且补偿效果显著。通过延长电极长度, 使自然条件下阻抗谱可被准确测量的含水率变化范围增大, 电极由 3 mm 增长至 8 mm 时, 适用的含水率范围从 8.35% 增大至 11.27%, 是原有含水率范围的 1.35 倍, 有效地减弱了含水率下降时对电极与基质耦合的影响。分析了不同电极长度下的数据差异以及电极几何参数的影响, 结果表明, 电极长度变化并未对数据的整体趋势变化造成显著影响。同时, 对测量中高频时出现负电阻数据的原因进行了分析探讨。

**关键词:** 阻抗谱; 基质; 通道补偿; 电极耦合; 负电阻

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)06-0288-11

## Compensation and Coupling Methods in Impedance Spectroscopy Measurement for Substrate Root Zone

WANG Yongqian<sup>1,2</sup> ZHAO Pengfei<sup>1,3</sup> FAN Lifeng<sup>1,2</sup> WANG Ziyang<sup>1,3</sup> HUANG Lan<sup>1,3</sup> WANG Zhongyi<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The root zone of plant provides a base for use of nutrients and water resources and supports the plant, in which the interaction between root and medium affects the uptake of water and nutrients. The technology of impedance spectroscopy can well reflect the dynamic change of water content and root biomass in the root zone. However, there are many factors that limit the application scenarios which can be measured. The research was focused on the problems encountered in the impedance spectroscopy measurement for the substrate root zone under the adjacent excitation strategy within the range of 100 Hz ~ 2 MHz. The solutions were provided and compared. For the effect of the extended fixtures, compensation methods of single-port network and dual-port network were calculated and analyzed. The experimental results supported that the selection of single-port network compensation method was a better strategy for pure substrate impedance measurement, whose process was simple and the compensation result was remarkable. Through lengthening the electrodes, the range of water content in substrate root zone, that ensure the impedance spectroscopy can be accurately measured under natural dry condition, was increased to 11.27% at 8 mm condition from 8.35% at 3 mm, which was 1.35 times of the original range and effectively attenuated the effect of the root zone water content decrease on electrode coupling. And the data differences under different electrode lengths and effect of variations in electrode geometry were analyzed. The results showed that the change in electrode length had no significant impact on the overall trend of the impedance spectroscopy data. Furthermore, the reasons why the negative resistance data appeared in the high frequency range were presented and analyzed. These analysis and resolutions of

收稿日期: 2018-12-19 修回日期: 2019-01-15

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6192016)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300606)

作者简介: 王永千(1989—),男,博士生,主要从事电阻抗成像系统研究, E-mail: cieewyq@cau.edu.cn

通信作者: 王忠义(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事生物系统感测与智能装备研究, E-mail: wzyhl@cau.edu.cn

measurement compensation and coupling problems would provide references for scientific researchers in the impedance study for the root zone.

**Key words:** impedance spectroscopy; substrate; channel compensation; electrode coupling; negative resistance

## 0 引言

无土栽培作为一种新型作物栽培技术,脱离了土壤的限制,极大地扩展了农业生产方式。无土栽培大致分为溶液栽培和基质栽培:溶液栽培中根系不固定,直接与营养液接触;基质栽培使用有机或无机的基质固定根系,如草炭土、蛭石、珍珠岩等,基质栽培是无土栽培的主要形式<sup>[1]</sup>。溶液栽培的介质特性与土壤差异较大,实验室中采用基质栽培更有利于检测技术向田间应用的转化,且具有清洁、无菌、节水等优势。但基质的不透明性,使得无法对根系形态和生物量进行直接观测。电阻抗谱法不仅可以表征基质的含水率,同时还能估测根区的生物量和位置<sup>[2]</sup>,然而基质的使用也给根区电阻抗测量增加了难度。

作为一种无损检测技术,电阻抗谱法<sup>[3]</sup>在农业领域已有较多应用。可以用来检测水果成熟度<sup>[4-5]</sup>、糖度<sup>[6]</sup>和酸度<sup>[7]</sup>等生理参数,可用于协助机械手臂的自动化采摘,还可以用来检测病原体以及农药残留<sup>[8]</sup>。此外,在植物的耐寒性<sup>[9-10]</sup>以及长势<sup>[11]</sup>检测中也有应用。农作物的含水率直接影响其品质和存储时间,在玉米果穗不脱粒情况下,电阻抗谱法可以准确地检测玉米果穗的含水率,其决定系数 $R^2$ 高达0.9599<sup>[12-13]</sup>。阻抗谱法在根系的检测中也有较多应用<sup>[14-15]</sup>。基质栽培中,根系与基质直接接触,相互影响。以往的根系检测中,为获得完整的根系阻抗信息,测量电极一端需要插入培养介质中,另一端与植物体相连<sup>[15-16]</sup>,但在此电极配置下仅可获得根系生物量和表面积等对应的阻抗信息,无法获得介质的阻抗信息,且由于土壤等固体介质透光性问题,导致无法直接观测根系形态信息。而基质根区的阻抗谱不仅可以反映根系生物量信息,同时可以反映根区根系形态、水分和养分分布等信息<sup>[2]</sup>。根区是一个复杂的系统,土壤影响根系生长形态,同时不同分布下根系的水分吸收会导致根区空间水分差异分布,因此需要采用更能体现根区整体变化的表面电极测量方法。采用循环激励和测量模型,不仅可以克服传统四电极法和两电极法测量中不能同时包含根系和背景介质阻抗特性的弊端,同时均匀的四周电极分布将更全面地反映根区阻抗特性的动态变化。文献<sup>[17]</sup>表明,土壤电阻率

可以用来预测土壤水分特性。OZCEP等<sup>[18]</sup>的实验结果表明,水分与电阻率存在确定性指数型关系。同时利用电阻率成像技术对含水率的研究表明<sup>[19]</sup>,根区电阻率可以反映根区空间含水率分布。根系的电容是估测根系生物量的良好参数,在玉米根系<sup>[20]</sup>和杨柳树根系<sup>[21]</sup>生物量的测量中得到了验证。可见外周电极的循环测量阻抗法可以用来测量根区水分动态变化和根系生物量,继而可获知根系的位置分布。此外,不同频率的电流流经多孔隙固体介质和植物组织时的路径不同<sup>[22]</sup>,较单一频率的阻抗,电阻抗谱更有优势。

根区介质的不同,将对测量结果产生不同的影响。对于液态介质,由于电极与液态介质的耦合性天然良好,使得测量稳定且结果准确。而对于多孔隙结构固体介质,如基质,电极耦合差导致测量不稳定的问题一直存在。含水率变化会影响基质的收缩程度,对于表面接触或插入基质内部的电极,基质的收缩会导致电极与根区介质之间出现间隙,增大接触阻抗,会使适宜进行阻抗谱测量的含水率范围局限在较小范围。同时,阻抗测量中,需要不同长度的测量夹具,而不同特性阻抗的连接导线会对测量结果产生影响。虽然阻抗谱法在植物根区中具有很好的应用前景,但是诸多因素的影响增加了阻抗谱测量的难度,无法获得准确的根区阻抗谱信息。

本文针对基质栽培的植物根区阻抗谱测量中的通道补偿和耦合问题提出解决方法,通过分析不同含水率下的电极耦合情况,研究不同通道阻抗参数补偿方法的适用性,分析测量中出现异常数据的原因,为多孔隙固体介质的根区阻抗谱测量提供参考。

## 1 阻抗谱测量

阻抗谱技术被用来研究有机或无机材料的结构特性,其采用宽频带连续频率的电流或电压信号进行激励,然后测量电压或电流。一般情况下,阻抗由矢量电压和矢量电流相比求得,阻抗是个复数量,其笛卡尔表示形式为

$$Z = R + jX \quad (1)$$

式中  $Z$ ——阻抗  $R$ ——电阻  
 $X$ ——电抗

同时也可以表示为极坐标形式

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

其中  $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$   $\theta = \arctan(X/R)$

式中  $|Z|$ ——阻抗幅值  $\theta$ ——相角

由于电极-待测物界面接触阻抗和电极极化的影响,实际中基质等介质的电阻抗谱测量颇为复杂。阻抗测量通常采用两种电极配置:两端法和四端法。两端法是最简单的电阻抗测量配置,但却存在很多误差因素,导线的电感、电阻以及杂散电容会叠加到测量结果中,此外电极和待测物间的接触阻抗也会被叠加到测量结果中,由此导致两端法配置的电阻抗测量范围一般限制在  $0.1 \sim 10 \text{ k}\Omega$ <sup>[23]</sup>。在四端法配置中,两端作为激励电极,另外两端作为采集电极。由于电流和电压电极是分离的,使得该配置下接触电阻的影响较两端法较小。理想情况下,电压测量电极的接触阻抗不会影响测量结果,因为信号电流几乎不流过电压采集电极。所以该配置下的电阻抗测量范围最小可以达到  $10 \text{ m}\Omega$ ,而对于高阻抗的测量精度并未提升,因为电极间的杂散电容依旧存在。所以无论是两端法还是四端法,必须屏蔽测量导线,而且需要将增加的各测量通道(同轴线缆)的外层屏蔽相连并与设备接地点连接<sup>[23]</sup>,以屏蔽电磁干扰。

针对土壤介质的阻抗数据测量一般采用特定测量夹具<sup>[22,24]</sup>,大都采用长方体盒子,如图1所示的四端法测量。CROSS<sup>[24]</sup>采用如图1所示的测量盒子测量土壤电特性,相对于两端法测量,该测量盒子的主要优点是内部电位电极的存在,将两侧电极的极化影响降到最低。图1所示的方法是对土壤或其他固体介质阻抗的定量测量,但在此种测量条件下测量频率有限<sup>[24]</sup>,此外该方法对土壤阻抗的确定与测量盒外形尺寸和土壤容重都有直接关系。实际对根区的测量中,若采用传统的两电极和四电极法,则检测区域在电极的中间,无法适用于立体的根区空间结构,为了获得更为全面的基质根区的电阻抗特性数据,需要选择更为全面的测量策略。

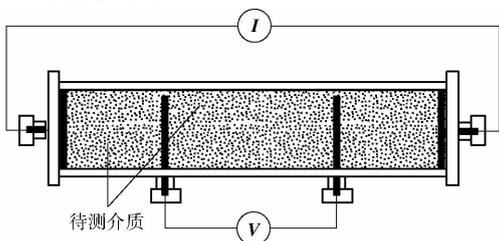


图1 土壤盒子四端法测量电极示意图

Fig. 1 Electrode schematic in soil-box under four-terminal configuration

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

为了更好地满足作物生长的理化需求,实验测量中采用混合固体基质<sup>[25]</sup>。基质由草炭土、蛭石和珍珠岩组成,按体积比  $3:1:1$  进行混合。基质和土壤均为固体颗粒混合物,理化特性相似,针对土壤阻抗谱的研究结果可以为基质的电阻抗谱测量提供一些参考。土壤和基质均为多孔介质,湿润时两种介质是固体粒子、空气和水溶液的混合物。湿土壤的阻抗等效电路模型可以使用电容电阻的组合表示<sup>[22]</sup>,因为基质和土壤的理化性质相近,同样地基质的阻抗等效电路模型也可以使用电容电阻的组合来表示。图2为其中两种较为简单的等效模型电路,通常情况下,类似的多孔介质的阻抗等效模型均由基本的电容电阻并联基本单元(图2a)为基础组成,比如2个或3个并联基本单元串联组成的等效模型电路,或者在电容电阻并联单元中间串联电阻(图2b),或是多种基本单元混合串联和并联排列,大多数固体材料的阻抗等效模型均符合此规律<sup>[26-27]</sup>。理想情况下,连续阻抗谱数据的Nyquist半圆的圆心位于阻抗实部轴上,而实际测量中,由于测量界面和极化等因素的影响,实际测量数据的Nyquist半圆的圆心大都位于实部轴下方,这使得等效电路模型的拟合结果较差。此时通常引入恒相位元件(Constant phase elements, CPE)来辅助拟合。

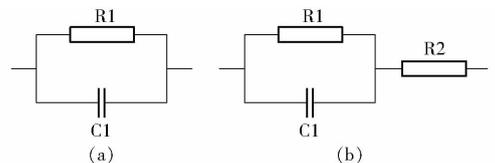


图2 两种表征土壤或基质阻抗的等效电路

Fig. 2 Two equivalent circuits for characterizing impedance of porous solid media

### 2.2 测量方法

采用四端法在相邻激励模型下对模拟的基质根区进行阻抗谱测量,观察根区在不同含水率及不同生物量下的动态阻抗变化。相邻激励模型是阻抗成像中普遍采用的电极激励模型<sup>[28]</sup>。实验中,取相邻两电极作为驱动电极,施加激励电流,依次按顺序测量其他相邻电极的差分矢量电压,继而计算得到阻抗值。LCR表有4个测量端,分别是Hc、Lc、Hp和Lp。图3为相邻激励策略下第1个激励位置下的阻抗测量示意图,电极1(Lc)和电极2(Hc)作为电流驱动电极,依次测量相邻的电极3(Hp)与电极4(Lp)、电极4(Hp)与电极5(Lp)、...、电极15(Hp)与电极16(Lp)的差分矢量电压。然后逆时针依次

按顺序变换相邻电极作为驱动电极。实验中采用了16个测量电极,一共16个激励位置,每个激励位置测量13组阻抗谱数据,共208组阻抗谱测量数据。

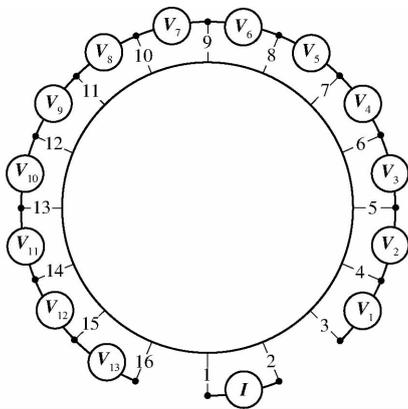


图3 相邻激励策略下测量示意图

Fig. 3 Measurement diagram of adjacent excitation strategy

采用 E4980A 型精密 LCR 表 (Keysight Technologies (China) Co. Ltd.) 测量阻抗谱,使用官方配件 16048A 对测量平面进行延伸以适应三维待测域。激励电流为 1 mA,阻抗谱频率范围为 100 Hz ~ 2 MHz,对数均分为 201 个频率点进行测量。所有结果均按照是德科技手册说明对官方配件 16048A 进行开路 and 短路校正后测量所得。为了实现不同电极间的快速切换和自动测量,制作了多通道选择电路,实现 4 个测量端的 1 转 16 路切换。选择模拟开关芯片 (MAX306 型) 完成多通路选择,磁簧继电器 (EDR1D1A0500Z 型,苏州普雷尔电子科技有限公司) 作为通断开关。测量中,是德科技的 16048A 配件连接 LCR 表和通道选择电路。通道选择电路一端采用卡扣配合型连接器 (Bayonet nut connector, BNC) 接口,与 16048A 配件连接,另一端使用超小 A 型 (Subminiature version A, SMA) 接口,与电极导线相连。电极导线采用 RG-316 射频线,其末端连接鳄鱼夹,方便与电极连接。为保证良好屏蔽效果,通道选择电路的屏蔽层分别与射频线缆的屏蔽层和 16048A 配件的屏蔽层连接并接地。实验容器为有机玻璃圆筒,电极采用不锈钢螺栓,16 个电极处于同一水平面,均匀分布在容器外侧,电极贯穿容器壁,内接基质,外接同轴线缆。图 4 为实验测量系统。

基质的含水率采用标准称量法进行测量,分别计算质量含水率和体积含水率。所有称量采用精度为 1 g 的电子秤进行。实验前,首先对已经过筛的基质采用标准干燥法,在 105℃ 恒温箱中干燥 48 h 至恒定质量;然后对有机玻璃容器和实验用螺栓电极进行清洗,风干,避免其他粘连杂质影响实验;最后对电极和有机玻璃容器进行称量并记录。实验



图4 基质根区阻抗谱测量实验系统

Fig. 4 Experiment system diagram for electrical impedance spectroscopy measurement of substrate root zone

1. 数据处理软件 2. 基质模拟根区 3. 通道选择电路 4. LCR 表

中,首先选取预定量的基质放置于有机玻璃容器中,对模拟根区(容器、基质和电极)整体进行称量并记录,计算基质的质量;然后将一定质量的纯净水倒入基质中,并充分搅拌,根据各物质质量数据可计算得质量含水率;最后对基质的厚度进行测量(3次测量取平均值),加之容器的直径数据,可以得到湿基质的体积参数。由于实验用水为纯净水,可根据质量得出体积参数,继而得到体积含水率。为了防止测量时水分蒸发,采用有机玻璃盖对基质进行密封。实验结果和讨论中,采用了体积含水率作为参数。

### 3 结果与分析

图 5(图中 M1 ~ M13 表示相对于激励位置的测量位置)为实验中第 1 激励位置下的 13 个不同测量位置阻抗谱<sup>[2]</sup>。可以看出实部在较宽频率范围内幅值仅有略微下降,然后迅速下降,且各测量位置的数据下降频率点相近。虚部呈容性,电抗随着频率的增大先减小后增大,存在极值,同一激励下虚部的特征频率接近,图 5b 中的 13 组测量数据的极值频率点依次为 176.72、185.69、205.02、195.11、195.11、195.11、185.69、185.69、185.69、168.18、185.69、176.72、168.18 kHz,图 5b 中各特征频率对数的变异系数 (Coefficient of variation, CV) 仅为 0.4849%。

由于是环形循环激励和采集,基质的阻抗谱数据表现出明显的对称性,其对称性表现在同一激励位置下对称测量位置采集的数据相似性很高。如第 1 测量位置和第 13 测量位置的数据幅度相近,变化规律相同。但由于基质搅拌不绝对均匀,阻抗数据虽然表现出明显的对称性,但也出现略微偏差。此外,不同激励位置下相同相对测量位置的数据相似性很高,实验结果以及相应的分析讨论参见文献[2]。

#### 3.1 通道影响及补偿方法对比

由于待测区域体积的限制,使用 16048A 配件

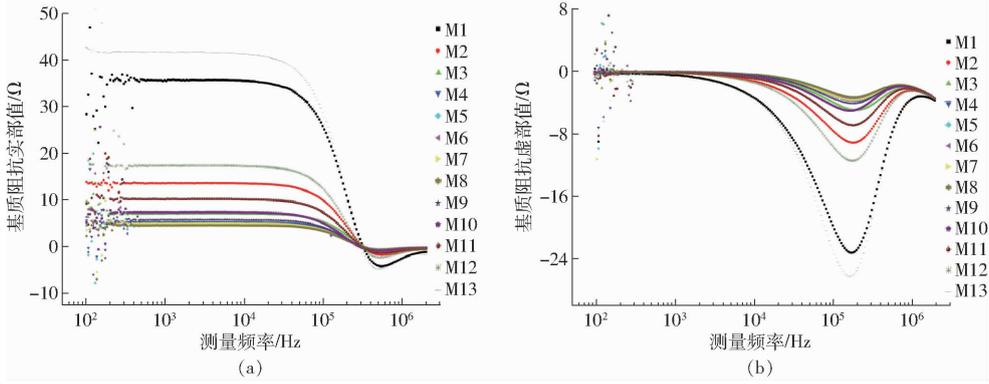


图5 第1激励位置下测量的阻抗谱

Fig. 5 Electrical impedance spectroscopy data for substrate at different measurement positions under the first excitation

无法完成测量,需对测量通道进行延长。为了实现自动连续测量,设计了多通道切换电路。测量通道中包含印刷电路微带线、继电器导线路和射频线,会对测量结果产生一定的影响。首先测量通道的阻抗谱(100 Hz ~ 2 MHz),结果如图6所示,通道阻抗的实部电阻和虚部电抗均随着频率的增大而增大。理想的传输线电阻应该为零,实际传输线总是有一些小的串联电阻。通道的串联阻抗把衰减(损耗)和畸变加入了理想传输线模型。信号衰减意味着当信号沿着通道前进时会越来越小,信号畸变意味着不同频率的信号传播时,其衰减(和相移)的程度不同。由于测量信号最高频率为2 MHz,经过计算其引起的延时可以忽略<sup>[29]</sup>。

在低频时,导体内部的电流分布密度均匀,即导体截面各区域电流流量相同。在高频时,导线表面的电流密度变大,而中心区域几乎没有电流流过,电流几乎只从导线表面流过,产生趋肤效应。在趋肤效应作用下,导体内部电流密度按指数规律下降,平均电流深度(趋肤深度)是频率、磁介系数和电阻率的函数<sup>[30]</sup>

$$d = \left( \frac{2\rho}{\omega\mu} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中  $d$ ——趋肤深度

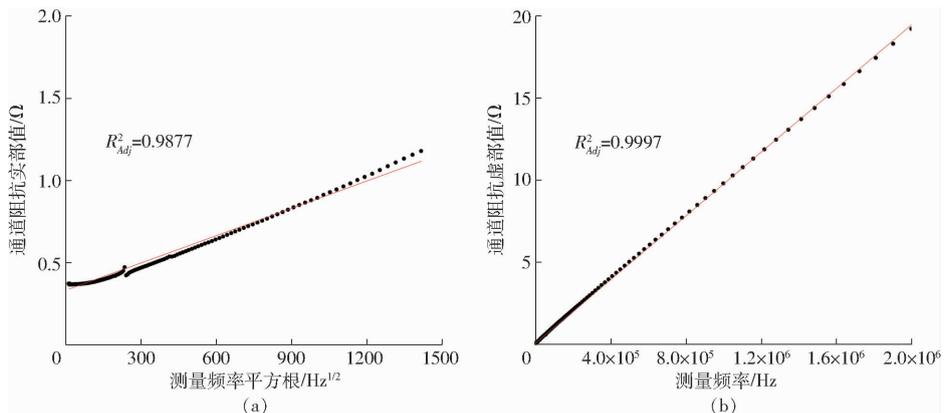


图7 通道阻抗与频率相关性

Fig. 7 Correlation between measured channel impedance and frequency

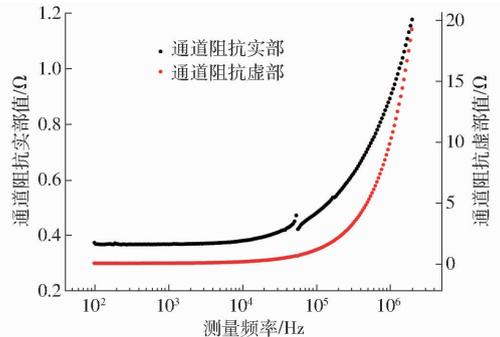


图6 通道阻抗特性数据

Fig. 6 Impedance of measurement channel

- $\omega$ ——电流角频率
- $\mu$ ——导体的磁介系数
- $\rho$ ——电阻率

由于大多数电流在导体表面流动,导体的视在电阻会增大。导体的视在电阻与电流流经的深度呈反比。由此,趋肤深度与频率的平方根呈反比。综合可知,通道的交流电阻与频率的平方根呈正比。将图6中的电阻数据与频率的平方根做线性拟合,结果如图7a所示。可见通道电阻趋肤效应明显。

通道整体是连通的,所以必然会呈现出电阻特性。由图6可知,随着频率的增加,通道的电抗为正值且越来越大,表明通道整体呈感性。因为电感L

阻抗理论计算结果为  $Z_{(L)} = j\omega L = j2\pi fL$ , 电容 C 阻抗理论计算结果为  $Z_{(C)} = 1/(j\omega C) = -j/(2\pi fC)$ , 其中  $f$  为电流频率。通过电容和电感阻抗计算公式可知, 介质呈感性电抗时, 阻抗虚部为正值, 介质呈容性电抗时, 阻抗虚部为负值。真实物理世界中不存在纯电阻、纯电容和纯电感元件, 必然会有寄生阻抗<sup>[23]</sup>。因为通道整体是阻性介质, 这其中会有以串联形式存在的寄生电感  $L_s$  和以并联形式存在的寄生电抗  $C_p$ , 如图 8a 所示。实验中测量了通道的串联电感和并联电容, 测量得到的电感为  $1 \sim 2 \mu\text{H}$ , 而电容则为负值, 可见通道感抗性强于容抗性, 测量结果展现的是寄生阻抗共同作用的结果, 使其整体呈感性。通过计算, 通道阻抗的虚部值与频率呈极强线性相关性, 如图 7b 所示。经过计算和分析, 认为在交流信号驱动情况下, 可以将通道的阻抗模型简化为电阻和电感串联的形式, 如图 8b 所示。

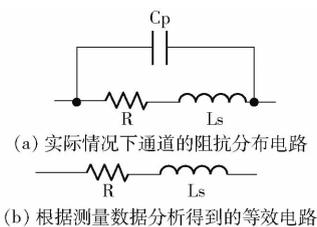


图 8 通道阻抗等效电路

Fig. 8 Impedance equivalent circuits of measurement channel

由于通道延长部分的特性阻抗与仪器配件存在差异, 使得在使用通道 (含 16048A 配件、多通道切换电路和同轴电缆) 和未使用通道 (仅使用 16048A 配件) 下测量的阻抗数据存在差异。图 9 为相同条件下, 两种测量通道的结果对比。从图中可以看出, 使用通道的测量结果中, 虚部数据特征频率 (极值点对应频率) 变小且极值幅度稍有变大, 实部数据的变化节点出现了明显的变化, 数据曲线下降频率点提前且变化幅度范围变大。通道延长线的使用给数据带来了较为明显的影响, 有必要对使用通道测量的结果进行补偿。

在简单的双线连接中, 即两端法测量中, 由无源元件例如测量夹具的残留阻抗、杂散阻抗或导纳以及连接导线寄生阻抗导致的误差可以通过两次参考测量进行补偿, 通常是开路校正和短路校正<sup>[23]</sup>。

图 10 为无源四端口网络测量示意图, 测量仪器和待测物之间存在一个无源四端口网络, 其输入输出关系可以表示为<sup>[23, 31]</sup>

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ F & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $V_1$ ——仪器端电压

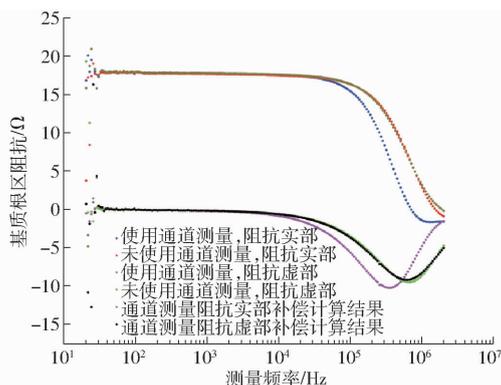


图 9 补偿计算结果与实际测量结果对比

Fig. 9 Contrast of actual measurement results and compensation calculation results

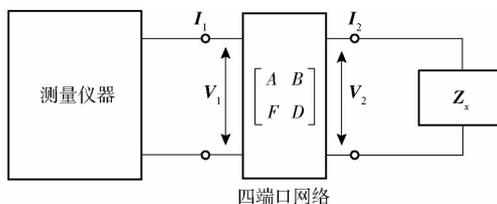


图 10 无源四端口网络测量示意图

Fig. 10 Measurement diagram of passive single-port network

$V_2$ ——待测端电压

$I_1$ ——仪器端电流

$I_2$ ——待测端电流

$A、B、F、D$ ——四端口网络的传递矩阵参数

根据式 (4) 可计算得到测量阻抗结果与待测物实际阻抗的关系为

$$\begin{cases} Z_x = \frac{V_2}{I_2} \\ Z_{xm} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{AV_2 + BI_2}{FV_2 + DI_2} = \frac{AZ_x + B}{FZ_x + D} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $Z_{xm}$ ——测量阻抗

$Z_x$ ——待测物实际阻抗

由式 (5) 可知,  $Z_x$  可通过  $Z_{xm}$  计算得到, 前提是可以独立测量来确定传递矩阵的参数  $A、B、F、D$ 。由式 (5) 可知, 开路测量 ( $I_2 = 0$ ) 可得  $Z_{om} = V_1/I_1 = A/F$ , 短路测量 ( $V_2 = 0$ ) 可得  $Z_{sm} = V_1/I_1 = B/D$ 。假设测量网络是对称的, 即  $A = D$ , 可以得到实际的阻抗  $Z_x$  为

$$Z_x = \frac{V_2}{I_2} = \frac{B - DZ_{sm}}{FZ_{xm} - A} = (Z_{xm} - Z_{sm}) \frac{Z_{om}}{Z_{om} - Z_{xm}} \quad (6)$$

式中  $Z_{sm}$ ——短路测量阻抗

$Z_{om}$ ——开路测量阻抗

实际中即使采用相同的材料也很难保证通道的完全对称性, 不同频率下即使很小的差异也能造成较大的测量误差。所以要确定参数  $A、D$ , 必须对一个参考负载进行测量。经过计算可得实际阻抗  $Z_x$

的表达式

$$Z_x = \frac{V_2}{I_2} = \frac{(Z_{xm} - Z_{sm})(Z_{om} - Z_{rm})}{(Z_{om} - Z_{xm})(Z_{rm} - Z_{sm})} Z_{ref} \quad (7)$$

式中  $Z_{rm}$ ——参考负载的测量阻抗  
 $Z_{ref}$ ——参考负载的实际阻抗

使用式(7)对通道测量的基质根区的阻抗数据进行补偿。参考负载同样使用基质根区的阻抗数据。因为参考负载的选择需要参考待测物阻抗,需要尽量保证阻抗值和测量端口一致<sup>[23]</sup>,所以采用相同测量位置的数据进行补偿,其中相同测量位置指的是相对于激励位置的相对测量位置。式(7)中  $Z_{rm}$  和  $Z_{ref}$  分别是使用通道测量和未使用通道测量(即仅使用校正后的官方配件)的基质根区阻抗。图9所示为通过补偿计算得到的结果与实际测量的两种结果的对比,图中数据为基质条件下的测量结果。

实际基质根区阻抗谱的测量中,使用的是四端法电极配置,虽然单端口网络的补偿方法可以达到很好的效果,有必要对四端法配置下的双端口网络进行计算分析以及对比。无论是哪种补偿方法,参考负载的选择必须与实际待测物相近,要求必须提前对待测物的阻抗有一个较为接近的估计。由图5可知,相同激励下,不同测量位置的数据差异较大,这给自动测量中通道补偿校正带来了很大的不便。而且根区阻抗的不均匀性,使得即使是相同相对测量位置的阻抗数据也不一定可以作参考负载。而此问题在四端法的双端口网络补偿方法中依旧存在,图11中考虑了电压采集电极端电流的存在。

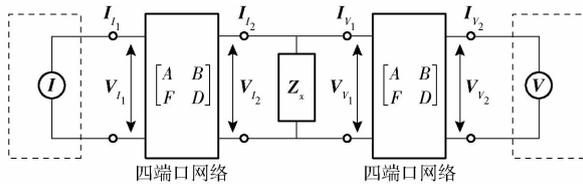


图 11 双端口网络示意图

Fig. 11 Measurement diagram of passive dual-port networks

假设实验中采用的通道性能一致,两个传递矩阵的参数可以认为相等,可得

$$\begin{cases} Z_x = \frac{V_{V_1}}{I_{I_2} - I_{V_1}} \\ Z_{xm} = \frac{V_{V_2}}{I_{I_1}} = \frac{1}{AF + FD + \frac{AD}{Z_x} + \left( BF + D^2 + \frac{BD}{Z_x} \right) \frac{I_{V_2}}{V_{V_2}}} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $I$ ——各测量点电流  
 $V$ ——各测量点电压

由式(8)可知,  $Z_{xm}$  和  $Z_x$  的等式中,存在5个未知数,传递矩阵参数  $A$ 、 $B$ 、 $F$ 、 $D$  和测量端导纳  $I_{V_2}/$

$V_{V_2}$ 。5个未知数,需要5个独立测量来确定。除开路 and 短路校正以外,还需要3个独立测量,而且必须保证其中至少一个参考负载与实际测量待测物阻抗接近,这使得无法进行连续监测。而且这是在假设两个端口网络的参数相同下的求解情况。基质相对于电容电阻等无源元件更为复杂,参考负载在不可重复使用的情况下,使得此种补偿方法实施难度大。相比较,在对基质根区背景(纯基质)阻抗测量时,由于根区阻抗分布均匀,采用式(7)的补偿策略更为实际和有效,是最为合理的方案。而对于含有植物体的根区电阻抗谱测量,并未发现合适的补偿策略。由于使用通道测量并未对数据规律产生影响,仅对数据产生了相移以及不同程度的增益,在分析根区阻抗动态变化规律时,可直接使用通道测量的数据,这在实验中已经得到验证<sup>[2]</sup>。

无论待测物特性如何,都需要保证测量通道特性的稳定。所以,通道阻抗的影响,应该从通道设计初考虑阻抗匹配以及屏蔽问题。电路板的接地点需要和所有的同轴电缆的外层屏蔽短接。不同特性阻抗的传输线上会引起信号的反射,所以微带线的特性阻抗需要特别计算和设计,此外需保证每个通道的长度相等。

### 3.2 水分变化对电极与基质耦合的影响

一般来说,四端法配置已经极大地减小了接触阻抗的影响<sup>[32]</sup>,实际测量中仍有诸多因素影响接触阻抗,即电极的耦合情况。本文影响电极耦合最为突出的因素是基质的含水率和电极长度。图12为基质根区自然风干实验中的两个含水率下的数据,可以看出电极耦合良好和耦合差的测量数据差异明显。为保证数据的准确性,减少测量通道对结果的影响,验证电极耦合的实验数据测量仅使用16048A配件。

常规的电阻抗谱测量中需要使用优质的连接器,以降低接触阻抗,而且通常需要采用不锈钢金属材料。固体介质的电阻抗谱测量中,表面贴的电极会

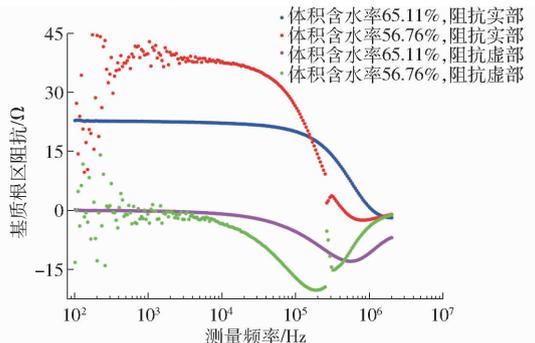


图 12 不同电极耦合情况下的电极阻抗数据对比  
 Fig. 12 Data comparison under different electrode coupling conditions

受到较大的影响。使用电极测量固体材料时,一般采用类似图1的封闭测量,这样可以保证两侧平面电极的良好接触,而且待测物的紧实度等参数也便于控制。而针对根区的测量,需要保证植物的正常生命活动且要连续监测,属于半开放空间,这使得根区侧面的电极需要采用如图1中所示的电压采集电极,将电极伸入基质内部。由于基质随含水率的变化而收缩或膨胀,所以电极的长度一定程度上决定了哪一段的范围可以保证阻抗谱的准确测量。进行了3、8 mm两种电极长度(深入基质的长度)的实验,相同条件下测量阻抗谱数据。为保证测量基质的均一性,同一测量容器内改变电极长度,而后搅拌均匀进行测量。以往实验结果表明,不同激励下的均匀搅拌基质的阻抗谱数据相似性很高<sup>[2]</sup>,在改变电极长度后,对基质内部理化特性的影响很小。如图13所示,电极长度8 mm的虚部数据特征频率点大于电极3 mm的数据。而实部数据中,电极3 mm的数据下降频率点小于电极8 mm。整体而言,电极变长使得数据变化频率点变大,延缓了数据的变化。先前的研究表明,电极长度相同的情况下,通道的使用使得实部数据下降频率点减小,同时虚部的特征频率点减小<sup>[2]</sup>,这与电极变长有相反的影响,但同样地都未对数据整体变化趋势有较大影响。

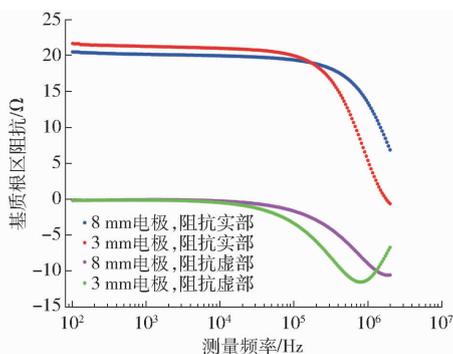


图13 两种电极长度的电极阻抗数据对比

Fig. 13 Impedance measurement comparison under 3 mm and 8 mm electrodes

此外,含水率是影响电极耦合最关键的因素。随着含水率的下降,基质开始收缩,含水率下降最为明显的是表层以及四周容器壁部分。基质的收缩,导致基质与电极的脱离,无法进行实验,为此进行了自然风干实验。实验中采用3 mm电极,初始体积含水率为65.11%,该含水率下基质已接近水分饱和状态,每隔1 d测量1次,第3次测量时的体积含水率为56.76%,出现大量溢出数据,实验无法继续进行。将电极增长至8 mm,使得其更深入基质内部,再次进行自然风干实验,初始体积含水率为65.11%,每隔1 d测量1次,第7次测量时体积含水率为53.84%,同样出现大量溢出数据。这说明由

于含水率的影响,本文中的阻抗谱测量方法仅能在某些含水率范围内才能完成阻抗谱的测量,使用3 mm电极时,仅有8.35%含水率范围可以进行阻抗谱测量,而当电极增长至8 mm,适用范围增大至11.27%。电极长度的变化虽然改善了可测量阻抗谱的含水率范围,使允许测量阻抗谱的含水率范围条件从3 mm电极时的8.35%增大至其1.35倍的水平,但依旧并未涵盖植物生长所需的含水率范围。但是并不能一味地改变电极长度来改善电极与基质的耦合,因为电极变长会使待测空间的范围变小,影响实验条件以及植物的生长,而且由于水分蒸发多来自于基质四周,使得电极长度增大的比例不及其带来的测量范围的增大比例。

在医学领域中,生物电的测量经常采用导电膏或凝胶来使得金属电极耦合更好<sup>[33]</sup>,多孔固体阻抗测量中,由于待测物的理化特性限制,加之长时间连续监测使得该方法并不适用。有效接触面积是接触阻抗中的关键因素,诸多因素影响有效接触面积,例如基质中的空隙。电极增长使得电极与基质的接触面积增大,继而使得接触阻抗减小<sup>[33]</sup>。在人体的实验中,就电极穿透深度而言,电极越深入,接触阻抗越小,同时由于是立体电极,使得电极相对于平面电极更稳定,也会使得接触阻抗更小<sup>[33]</sup>。电极表面粗糙度对接触阻抗也有影响,同样条件下,粗糙界面接触阻抗比光滑界面接触阻抗小<sup>[34]</sup>,实验中采用不锈钢电极,表面光滑,而基质是固体,这使得电极-基质接触面等同于粗糙界面。接触阻抗并非所有情况下均需要进行处理,只有在接触阻抗与待测物阻抗的比例达到一定程度,才会对测量结果产生较大影响<sup>[35]</sup>,而这与测量频率相关<sup>[36-37]</sup>。

针对基质收缩导致的电极耦合问题,实验结果表明电极长度的改变可以一定程度上缓解耦合问题。由图13可知,电极长度的改变并未对数据变化规律造成影响,只是改变了数据变化的频率点。除改变电极长度外,不同的基质混合比例会导致收缩程度不同,配合电极参数的改变,寻找最合适的基质比例也是最佳的解决方法之一,此外测量阻抗谱的同时对接触阻抗进行估测已经在相关阻抗研究中有描述,给阻抗谱的测量提供了参考。

### 3.3 通道和待测物对负电阻数据的影响

如图9所示,在测量频率范围内出现了负电阻数据。相同地,VEAL等<sup>[32]</sup>在测量氧化物晶体的阻抗时,同样出现了负电阻数据,而负电阻经常出现在三端法或四端法配置下的高频范围内<sup>[32]</sup>。电阻抗测量中,接触阻抗<sup>[32]</sup>、通道特性<sup>[23]</sup>以及待测物的固有特性<sup>[38-39]</sup>都可能导致出现负电阻数据。测量通

道导线上由于存在接触阻抗和分布电容,而最终测得的数据为待测物实际阻抗和误差的叠加,会使得测量数据相位和幅度变化。实际测量中,结果受到接触阻抗、通道阻抗特性以及待测物特性的共同影响。这就需要选择合适的电极配置方法,以及对测量通道做好屏蔽、校正和补偿工作。

如图14(Hc、Hp、Lc、Lp为阻抗仪的4个测量端)所示<sup>[23]</sup>,测量端Hp的接触阻抗包含了 $C_{hp}$ 和 $R_{hp}$ ,构成了一个RC低通滤波器,这会使得Hp端的输入信号幅度衰减同时产生相移,进而产生了测量误差。实验测量数据表明,基质呈容性,这与同样是固体颗粒的土壤等效模型相似<sup>[40]</sup>。所以测量得到的阻抗数据中,相角为负值,而RC电路对相位有延迟作用,使得相角变得更小。这可能导致真实相角接近 $-90^\circ$ 时,由于接触阻抗的影响,测量信号相对于初始激励信号的相移大于 $90^\circ$ ,使得计算结果出现负电阻数据。由于测量通道可等效为电阻和电感的串联电路,呈感性,同时由于电路板微带线的分布电容,测量的电压信号进一步产生相移。针对此问题,可以通过对接触阻抗以及通道分布电容的精确测定,使用容性补偿方法。

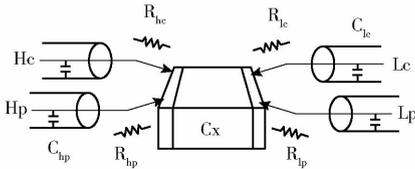


图14 四端法配置中的接触阻抗

Fig. 14 Contact impedance in four-terminal configuration

此外,待测物的电特性影响测量数据。常规基质阻抗测量中,阻抗应如图15中 $Z_1$ 所示,实部为正值,虚部为负值,可求解出负相角。使用高频率测量高品质因数(例如电容)的待测物时,会出现负电阻的情况<sup>[38]</sup>。这是因为阻抗是复数,而实验中所使用的LCR表中阻抗数据是通过数学计算得到,即矢量电压和矢量电流比例,而对于实际的待测物,如电容器,并非理想器件,会有串联电阻,由于电抗与电阻的比例非常高,导致阻抗的不确定度折算到电阻上,可能会算出负的电阻。由图9可知,基质阻抗测

量中,基质呈容性,相角为负值,随着频率的增加,实部电阻骤减,而虚部电抗绝对值先变大后变小,计算得相角幅度随频率增大逐渐变大,如图15中 $Z_2$ 所示,虚部和实部的比值越来越大,测量值很小的不确定度折算到实部值可能会使得实部值计算结果为负值,可能导致 $Z_2$ 的计算结果为负电阻。由于待测物固有特性造成的负电阻,只能通过使用更为精密的仪器解决。

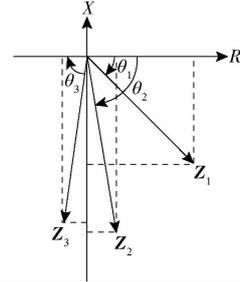


图15 复阻抗平面示意图

Fig. 15 Diagram of different impedances in complex plane

## 4 结束语

为探究基质根区水分和生物量对根区阻抗谱的影响规律,采用相邻激励的策略进行了100 Hz ~ 2 MHz范围内的电阻抗谱测量。分析和计算表明,纯基质的阻抗谱测量采取单端口网络补偿方法相比于四端法下的双端口网络的补偿方法,虽然有局限性,但可以达到很好的效果,为实验的最佳选择。分析了随含水率下降测量失败的原因,实验验证了电极变长对电极耦合的积极效果,分析和讨论了不同电极几何参数对测量的影响,结果表明,长电极可以在一定程度上降低因基质水分蒸发、基质体积收缩造成的电极与基质耦合变差的影响,采用8 mm电极时,阻抗谱可被准确测量的含水率范围是3 mm电极时阻抗谱可被准确测量的含水率范围的1.35倍,测量适用的体积含水率从3 mm时的8.35%扩大至8 mm时的11.27%。仍需探究合适的电极方案,使适宜测量的含水率范围涵盖植物适宜生长的水分范围。通道阻抗特性、接触阻抗以及基质在高频下的阻抗特性使得实验中出现负电阻数据。

## 参 考 文 献

- [1] 刘伟,余宏军,蒋卫杰. 我国蔬菜无土栽培基质研究与应用进展[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 4-7.  
LIU Wei, YU Hongjun, JIANG Weijie. Review on research progress and application of growing media for vegetable production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(3): 4-7. (in Chinese)
- [2] WANG Y Q, ZHAO P F, FAN L F, et al. Determination of water content and characteristic analysis in substrate root zone by electrical impedance spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 243-253.
- [3] BARSOUKOV E, MACDONALD J R. Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications[M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2005.
- [4] LIU X. Electrical impedance spectroscopy applied in plant physiology studies[D]. Melbourne: RMIT University, 2006.
- [5] REHMAN M, IZNEID A, BASEM A, et al. Assessment of quality of fruits using impedance spectroscopy[J]. International

- Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(6): 1303 – 1309.
- [6] 李海峰,张燕,贺晓光,等. 苹果(黄元帅)贮藏过程中品质变化与介电特性及力学特性的相关性[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(4): 910 – 914.  
LI Haifeng, ZHANG Yan, HE Xiaoguang, et al. Relationship between apple quality and dielectric property and mechanical property during storage[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2015, 31(4): 910 – 914. (in Chinese)
- [7] JUANSAH J, BUDIASTRA I W, DAHLAN K, et al. The prospect of electrical impedance spectroscopy as non-destructive evaluation of citrus fruits acidity[J]. Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng., 2012, 2(11): 58 – 64.
- [8] GONZALEZ-CORTES A. Agricultural and food electroanalysis: electrochemical impedance spectroscopy[M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [9] 张钢,肖建忠,陈段芬. 测定植物抗寒性的电阻抗图谱法[J]. 植物生理与分子生物学, 2005, 31(1): 19 – 26.  
ZHANG Gang, XIAO Jianzhong, CHEN Duanfen. Electrical impedance spectroscopy method for measuring cold hardness of plants[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2005, 31(1): 19 – 26. (in Chinese)
- [10] 钱稷,周娟,邸葆,等. 阻抗谱和电导法测定的桃树抗寒性与生理指标通径分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 210 – 216.  
QIAN Ji, ZHOU Juan, DI Bao, et al. Path analysis of cold resistance measured by EIS and EL methods with physiological indicators of peach trees[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 210 – 216. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170627&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170627&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.027. (in Chinese)
- [11] MIZUKAMI Y, YAMADA K, SAWAI Y, et al. Measurement of fresh tea leaf growth using electrical impedance spectroscopy[J]. Agricultural Journal, 2007, 2(1): 134 – 139.
- [12] ZHANG H L, MA Q, FAN L F, et al. Nondestructive in situ measurement method for kernel moisture content in corn ear[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2196.
- [13] ZHAO P, ZHANG H, ZHAO D, et al. Rapid on-line non-destructive detection of the moisture content of corn ear by bioelectrical impedance spectroscopy[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(6): 37 – 45.
- [14] OZIER-LAFONTAINE H, BAJAZET T. Analysis of root growth by impedance spectroscopy (EIS)[J]. Plant and Soil, 2005, 277(1 – 2): 299 – 313.
- [15] CAO Y, REPO T, SILVENNOINEN R, et al. Analysis of the willow root system by electrical impedance spectroscopy[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1): 351 – 358.
- [16] CSERESNYES I, RAJKAI K, VOZARY E. Role of phase angle measurement in electrical impedance spectroscopy[J]. International Agrophysics, 2013, 27(4): 377 – 383.
- [17] KALINSKI R J, KELLY W E. Estimating water content of soils from electrical resistivity[J]. Geotechnical Testing Journal, 1993, 16(3): 323 – 329.
- [18] OZCEP F, YILDIRIM E, TEZEL O, et al. Correlation between electrical resistivity and soil-water content based artificial intelligent techniques[J]. International Journal of Physical Sciences, 2010, 5(1): 47 – 56.
- [19] BRUNET P, CLEMENT R, BOUVIER C. Monitoring soil water content and deficit using electrical resistivity tomography (ERT)—a case study in the Cevennes area, France[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(1): 146 – 153.
- [20] MCBRIDE R, CANDIDO M, FERGUSON J. Estimating root mass in maize genotypes using the electrical capacitance method[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2008, 54(2): 215 – 226.
- [21] PITRE F E, BRERETON N J B, AUDOIRE S, et al. Estimating root biomass in *Salix viminalis* × *Salix schwerinii* cultivar “Olof” using the electrical capacitance method[J]. Plant Biosystems, 2010, 144(2): 479 – 483.
- [22] RAO B H, BHAT A M, SINGH D N. Application of impedance spectroscopy for modeling flow of AC in soils[J]. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 2007, 2(3): 197 – 206.
- [23] KEYSIGHT Technologies. Impedance measurement handbook, a guide to measurement technology and techniques[Z]. 2017.
- [24] CROSS G. Soil electromagnetic properties and metal detector performance: theory and measurement[R]. Defence Research and Development Canada, 2008.
- [25] 王宇欣,孙倩倩,王平智,等. 玉米秸秆复配基质对黄瓜幼苗生长发育的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 286 – 295.  
WANG Yuxin, SUN Qianqian, WANG Pingzhi, et al. Effect of corn stalk compound substrate on cucumber seedling growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 286 – 295. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180734&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180734&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.034. (in Chinese)
- [26] VIPULANANDAN C, PRASHANTH P. Impedance spectroscopy characterization of a piezoresistive structural polymer composite bulk sensor[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2013, 41(6): 898 – 904.
- [27] RAHEEM A M, VIPULANANDAN C, JOSHAGHANI M S. Non-destructive experimental testing and modeling of electrical impedance behavior of untreated and treated ultra-soft clayey soils[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(3): 543 – 550.
- [28] 王智杰. 基于 EIT 的植物根区检测方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.  
WANG Zhijie. The research on the methods of monitoring the root zone based on EIT[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

- [29] 于争. 信号完整性揭秘[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [30] JOHNSON H, GRAHAM M. High-speed digital design: a handbook of black magic[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993.
- [31] TORRENTS J M, PALLAS-ARENY R. Compensation of impedance meters, when using an external front-end amplifier[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 310 – 313.
- [32] VEAL B W, BALDO P M, PAULIKAS A P, et al. Understanding artifacts in impedance spectroscopy[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(1): 47 – 57.
- [33] CARDU R, LEONG P H, JIN C T, et al. Electrode contact impedance sensitivity to variations in geometry[J]. Physiological Measurement, 2012, 33(3): 817 – 830.
- [34] MCADAMS E T, JOSSINET J, LACKERMEIER A, et al. Factors affecting electrode-gel-skin interface impedance in electrical impedance tomography[J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 1996, 34(6): 397 – 408.
- [35] YANG L, DAI M, XU C, et al. The frequency spectral properties of electrode-skin contact impedance on human head and its frequency-dependent effects on frequency-difference EIT in stroke detection from 10 Hz to 1 MHz[J]. PloS One, 2017, 12(1): e170563.
- [36] NGUYEN D T, KOSOBRODOV R, BARRY M A, et al. Electrode-skin contact impedance: in vivo measurements on an ovine model[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 434:012023.
- [37] LIU X, YAO J, ZHAO T, et al. Image reconstruction under contact impedance effect in micro electrical impedance tomography sensors[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2018, 12(3): 623 – 631.
- [38] PRABHAKARAN S, SULLIVAN C R. Impedance-analyzer measurements of high-frequency power passives: techniques for high power and low impedance[C]//Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting, 2002.
- [39] HALTER R J, HARTOV A, PAULSEN K D. A broadband high-frequency electrical impedance tomography system for breast imaging[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2008, 55(2): 650 – 659.
- [40] HILHORST M A. Dielectric characterisation of soil[M]. Wageningen, Netherlands: DLO Institute of Agricultural and Environmental Engineering, 1998.

(上接第 271 页)

- [9] WU Z, LI C, NG K Y, et al. Location estimation via support vector regression[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(3):311 – 321.
- [10] 王俊, 刘刚. 基于遗传 BP 算法的温室无线传感器网络定位方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21):156 – 163.  
WANG Jun, LIU Gang. Localization method of wireless sensor network for greenhouse based on genetic BP algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21):156 – 163. (in Chinese)
- [11] 李华亮, 钱志鸿, 田洪亮. 基于核函数特征提取的室内定位算法研究[J]. 通信学报, 2017, 38(1):158 – 167.  
LI Hualiang, QIAN Zhihong, TIAN Hongliang. Research on indoor localization algorithm based on kernel principal component analysis[J]. Journal on Communications, 2017, 38(1):158 – 167. (in Chinese)
- [12] WOLD S, SJOSTROM M, ERIKSSON L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58(2):109 – 130.
- [13] TRYGG J, WOLD S. Orthogonal projections to latent structures (O – PLS)[J]. Journal of Chemometrics, 2002, 16(3): 119 – 128.
- [14] RANTALAINEN M, BYLESJO M, CLOAREC O, et al. Kernel-based orthogonal projections to latent structures (K – OPLS)[J]. Journal of Chemometrics, 2007, 21(7 – 9):376 – 385.
- [15] HUANG G B. An insight into extreme learning machines: random neurons, random features and kernels[J]. Cognitive Computation, 2014, 6(3): 376 – 390.
- [16] GOMEZ-CHOVA L, CAMPS-VALLS G. Learning with the kernel signal to noise ratio[C]//IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP). IEEE, 2012:1 – 6.
- [17] 李军, 赵畅. 基于核自适应滤波的无线传感网络定位算法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4):241 – 248.  
LI Jun, ZHAO Chang. Wireless sensor network location algorithms based on kernel adaptive filtering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):241 – 248. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180427&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180427&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.027. (in Chinese)
- [18] MEDEISIS A, KAJACKAS A. On the use of the universal Okumura-Hata propagation prediction model in rural areas[C]//VTC2000-Spring. IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000:1815 – 1818.
- [19] ZANCA G, ZORZI F, ZANELLA A, et al. Experimental comparison of RSSI-based localization algorithms for indoor wireless sensor networks[C]//Proceedings of the Workshop on Real-world Wireless Sensor Networks. ACM, 2008:1 – 5.
- [20] TRYGG J, WOLD S. O2 – PLS, a two-block (X – Y) latent variable regression (LVR) method with an integral OSC filter[J]. Journal of Chemometrics, 2003, 17(1): 53 – 64.