

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2016.30488

李强, 曹扬, 张正, 脱登峰, 卜耀军, 白芸. 电阻抗法在植物根系生物学研究中的应用[J]. 植物科学学报, 2016, 34(3): 488~495

Li Q, Cao Y, Zhang Z, Tuo DF, Bu YJ, Bai Y. Review on the application of bioimpedance methods in plant root biology research[J]. Plant Science Journal, 2016, 34(3): 488~495

电阻抗法在植物根系生物学研究中的应用

李强¹, 曹扬^{2,3**}, 张正², 脱登峰², 卜耀军¹, 白芸¹

(1. 榆林学院, 陕西榆林 719000; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 因受限于检测方法, 对埋藏于土壤中植物根系研究的深入程度远低于其地上部分。传统获取根系的方法不仅费时费力, 而且对根系原位分布和生存微环境具有明显的扰动破坏, 故随着根系研究的不断深入, 迫切需要寻求一种非破坏性的根系检测方法。电阻抗法是在一定频率的外加电源下, 测量电路中的根系电学特征(电容、电阻和电阻抗图谱), 并且电学特征与根系生物量和形态指标之间存在较好的相关性, 然而, 由于对电阻抗法基于电路中电流流向等的关键机理尚不清楚, 有些学者对该方法的大范围应用提出了质疑。本文首先对生物电阻抗法测量根系的原理和模型进行阐述, 然后重点综述根系电阻抗法研究的不同理论方法及存在的问题, 最后提出电阻抗法研究植物根系应该解决的重要科学问题, 并展望电阻抗法更加广泛的研究和应用前景, 以期为获取非破坏性的根系研究技术提供参考。

关键词: 根系; 电极; 电容; 电阻; 电阻抗图谱; 研究进展

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2016)03-0488-08

Review on the Application of Bioimpedance Methods in Plant Root Biology Research

LI Qiang¹, CAO Yang^{2,3**}, ZHANG Zheng², TUO Deng-Feng², BU Yao-Jun¹, BAI Yun¹

(1. Yulin University, Yulin, Shaanxi, 719000, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100, China)

Abstract: Due to the limitation of appropriate methods, the vast majority of research on plant traits has concentrated on above-ground tissues rather than root systems hindered by soil. Conventional root investigation methods such as soil cores, monoliths, and in-growth cores are inherently labour intensive, time-consuming and destructive. There is, therefore, an urgent need for a non-destructive but reliable method for the estimation of the structure and function of root systems *in situ*. Numerous studies have shown good correlations between electrical impedance parameters (capacitance, resistance and electrical impedance spectroscopy) and root weight and morphology with the measurement of roots under an external electric field. Recently, however, other researchers have argued that the understanding of the electrical

收稿日期: 2015-12-08, 退修日期: 2016-02-23。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201088, 41371506); 中央高校基本科研业务费(2014YB056, 2452015484); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放项目(A314021402-1604); 陕西省高校科协青年人才托举计划资助(20150108); 陕西省科技厅农业攻关项目(2014K01-12-03)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (41201088, 41371506), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (2014YB056, 2452015484), Open Fund from the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau (A314021402-1604), Young Talent Fund of University Association for Science and Technology in Shaanxi, China (20150108), and Agricultural Research Project in Shaanxi Province (2014K01-12-03).

作者简介: 李强(1986-), 男, 博士, 讲师, 长期从事根系及其固土抗蚀方面的研究(E-mail: mr.li_qiang@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: yang. cao@nwauf.edu.cn)。

behaviour of roots is still poor. This paper introduces the basic theory and measurement of bioimpedance, reviews the different outcomes of root research using bioimpedance, and suggests several questions in regard to the application of bioimpedance. The current research will provide a reference for studies examining non-destructive root systems *in situ*.

Key words: Root; Electrode; Capacitance; Resistance; Electrical impedance spectroscopy; Research progress

根系在土壤-植物-大气连续体的水分平衡和营养循环过程中具有核心传递作用，并在气候变化响应和适应机制中扮演着重要角色^[1]。然而，对根系研究的深入程度远远低于其地上部分(如枝和叶)，这主要是因为现阶段无法获取一种能准确检测埋藏在土壤中、庞大且复杂的根系的研究方法^[2]。传统的根系研究方法如挖掘法、土钻法、剖面法等，不仅操作步骤繁琐，而且费时费力；同时，在取样过程中对根系原始生存环境存在一定程度的人为干扰和破坏，使得研究结果的准确性受到质疑^[3]。随着科学技术的不断进步，近年来，一些根系研究方法如微根管系统、探地雷达技术、核磁共振成像法、同位素、X-光扫描分析系统和高密度电阻率法等^[4]迅速发展起来。然而，各种方法都存在自身局限性，如：微根管技术虽能连续观察根系生长和周转，但是侵入土壤中的检测根管扰动并改变了其四周的土壤微环境，从而影响对根系观测的结果，且微根管观测范围有很大的局限性^[5]；另外，探地雷达作为一种快速而非破坏性的根系探测技术已被广泛应用，但由于探测深度和分辨率的限制，该方法对细根(直径小于2 mm)的探测存在较大的局限性^[4]。因此，研发适用性强、操作方便、非破坏性的根系检测技术依然是一项迫切的科研任务。

生物电阻抗法作为一种快速和非破坏性的生理测定方法，已经被广泛用于临床医学、食品科学等领域^[6-8]；在植物学方面，也被尝试用于估测植物种子活力、养分状况、果实受害程度、评价植株的抗盐和抗寒性、旱情诊断、机械损伤以及病害检测、植物生长和健康状况等方面的研究^[9-17]。和其他植物器官一样，根系检测研究也尝试使用生物电阻抗法，且随着生物电阻抗法测量根系研究的不断深入，其理论研究方法和测量规程等取得了一些进展。本文系统地综述了根系电阻抗法研究的不同理论方法，以期为获取非破坏性的根系研究技术

提供参考。

1 生物电阻抗法测量根系的原理

1.1 生物电阻抗法测量根系的原理

生物电阻抗(Z ，单位为欧姆)是被测试生物组织在一定频率(f)的外加安全交流电源下电压($V\sin(\omega t)$)与电流($I\sin(\omega t + \theta)$ ，式中角频率 $\omega = 2\pi f$ ， t 为时间， θ 为相位角)的比值，反映了被测试生物组织对电流阻碍能力的总抵抗能力特征。电阻抗用复数矢量形式表示($Z = R + jX$)，由实部电阻器对电流抵抗的电阻部分($R = Z\sin\theta$ ，单位为欧姆)和虚部电容器对电流抵抗的容抗部分($X = Z\sin\theta = 1/(\omega C)$ ，单位为欧姆)组成；阻抗模数表示阻抗的绝对值大小($|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$)。将一系列电流频率下获得的多组阻抗和容抗数值分别绘制在阻抗复合矢量平面的实轴和虚轴而形成阻抗随频率变化的轨迹，被称为电阻抗图谱(Electrical impedance spectroscopy, EIS)^[18,19]。植物细胞由细胞壁和由细胞膜包围的原生质体两部分组成，并且细胞的电学特性源于具有双层结构的细胞膜。细胞膜两侧的电解质溶液形成特定的导电状态，膜内外可模拟为一个电容器，即膜两侧的溶液相当于电容器的两个极板，细胞膜则相当于电容器的中间介质，液泡和细胞质类似于电阻器，而细胞之间的液体可视为电解质。细胞的电阻抗特征随着外加交流电源频率的变化而变化，当施加低频电流时，细胞膜电容有较高的电抗，低频电流基本上不能穿过细胞，而主要流经细胞外液，阻抗以细胞间的电阻为主要表达形式；随电流频率增加，细胞膜的容抗减少，一部分电流可穿过细胞膜进入细胞内液。总阻抗由细胞内外和细胞间的阻抗组成，在足够高的频率下，细胞膜的容抗趋于零值，电流就能通过细胞和周围液体，此时阻抗就是电阻。所以，细胞电阻抗呈现出低频阻抗较大而高频阻抗较小的特征^[20,21]。由电阻公式 $R = \rho L/A$ 可知， R 除了由电

阻器本身性质的电阻率(ρ)决定外, 还取决于电阻器的长度(L)和横截面积(A); 同样, 电容($C = \epsilon S / 4\pi k d$)不仅由电容器本身介电质的电容率性质(ϵ)和静电力常数(k)决定外, 还取决于平板的面积(S)和平行板间隔的距离(d)。因此, 植物根系的电学特征参数与其根系生物量(根系鲜重和干重)及形态学指标(根长、根表面积等)之间存在一定的关系成为可能^[22-24]。

非破坏性根系电阻抗的测量是通过建立一个电极-茎干-根系-土壤或营养液-电极的电路回路来实现的。两个电极作为外加安全交流电源的输入端, 同时也是两点间电压的测量端, 其中一个电极(植物电极)插入测试植株的茎干部, 另一个插入植株生长的土壤中(土壤电极); 再将两个电极连接到选定的阻抗分析仪上。阻抗分析仪可产生单一或多个频率下正弦波激励电信号, 对两个电极间矢量电压、矢量电流进行调理, 然后对采集到的被测信号矢量分解, 从而得到电流和电压在各坐标轴上的投影, 并据此精确估计出两电极间各种电学参数及其频率响应。目前, 根系电阻抗的测量多采用四电极配置, 即一对外电极激励电流导入, 另一对内电极则测定两个外电极之间的电压。与传统的电流电极和电压电极并在一起的双电极配置相比, 采用电流电极和电压电极分离的四电极配置能更好地消除电极极化阻抗对结果的影响, 并使电流电极表面上的电位差不受影响, 电压电极上不携带任何电流, 因此它发生极化阻抗时的电位差为零^[25]。但有些学者^[26-28]发现在1 kHz测试条件下, 双电极和四电极配置检测的根系电容值无显著差别, 且以非极化Ag/AgCl电极为佳。而在实际研究中, 不锈钢材质的针形电极较为常用。根系电阻抗法研究的核心就是探明两电极间不同组成部分对根系电阻抗的影响及其程度, 寻求根系电阻抗参数特征与根系之间的最佳表达关系。随着根系电阻抗研究的不断深入, 电极间各个组成部分的电学特征对根系电阻抗测量的影响逐渐明确, 这为根系电阻抗法更加广泛的应用奠定了基础^[29-31]。

1.2 生物电阻抗法测量根系的模型

目前, 分析和解释生物电阻抗数据使用最多的是等效电路模型方法, 即将复杂的测试生物组织视为由各类电子元件(电阻和电容)通过相互串联或并联组成的简单电路, 且该等效电路对频率的响应

与测试生物组织对频率的响应是一致的。等效电路模型可以分为集总参数和分布参数电路, 并且集总参数等效电路比分布参数等效电路易于计算。等效电路简单、直观, 并能够通过电子元器件参数解释测试生物组织的生理学特征^[32]。Repo^[19]和 Dalton^[23]在根系电阻抗法研究过程中提出不同形式的集总参数等效电路模型, 用于说明测量电路中各个组成部分的电学特征。基于一组电阻抗数据可以建立多个有较好拟合关系的等效电路, 但需要从中选取一个最能表达被测试生物组织电学特征的等效电路。为此, Srinivas等^[33]提出了一些可供选择的判断标准, 如: 电极间的电阻抗易以串联、并联或是其他等形式表达; 检验实验数据与等效电路对频率响应的一致性是否达到统计要求; 检查等效电路中电阻和电容电子元器件的电阻值和电容值是否符合对测试生物组织的一般认知范围。运用电阻抗图谱等效电路参数拟合采用的是非线性最小二乘法拟合原理, 商业软件 Zview 和免费软件 LEVM (<http://www.jrossmacdonald.com/levminfo.html>) 程序可实现对电子元器件参数的求解。

2 根系电阻抗法的研究进展

2.1 单频根系电容法的研究进展

人们虽早就对植物组织因细胞膜而具有电阻和电容等电学特性的理论有一定认识, 但直至1965年 Walker 和 Electrical^[34]才通过水培玉米(*Zea mays L.*)对植物根系的电容理论进行了验证, 并发现当营养液的电导率(300 ~ 15 500 $\mu\text{s}/\text{cm}$)高于蒸馏水的电导率(28 $\mu\text{s}/\text{cm}$)时, 不同电导率溶液的电容测量结果在之间无显著差异; 根系电容值分别与根系在营养液液面处的个数及其倒数有较强的线性关系, 这些研究结果与平行平板电容器和圆柱形导体的特点相符。1972年, Chloupek^[22]研究发现, 玉米、洋葱(*Allium cepa L.*)和向日葵(*Helianthus annuus L.*)等植物根系电容值与根系质量及其形态学指标之间存在较好的线性拟合关系。之后, 植物根系电容值与根系特征参数之间存在的线性关系被广泛证实, 并且在不同植物种甚至不同品系之间存在一定差异^[35,36]。Chloupek等^[37]进一步对影响该线性关系的内外因素进行了分析, 认为常数项受土壤性质和连接线等产生的寄生电容影响, 自变量系数虽取决于植物种类, 但也受外

加电源频率和电压等影响; 移动和调节多个土壤电极与植物之间的距离(5~15 cm), 均不影响植物根系形态学特征与其电容值之间的相关系数; 当摘除植物叶片2、21、44、93 h时, 根系电容值由未摘除叶片时的167 pF, 增加至278、291、245、242 pF, 这是由于蒸腾速率减少, 而根系继续吸收水分, 并使根系体积增大。但 Dalton^[23]研究认为, 根系电容值的这种变化还应该考虑因水分变化而导致根系本身电容特性的变化, 并建议在测量根系电容时不仅要考虑根系的几何形态特征, 还要考虑根系自身的电学属性(表1)。

1995年, Dalton^[23]首次提出通过等效电路图的形式解释根系电容法的理论基础, 并指出两个测量电极之间可以类比为由若干并联在一起的电容器形成的并联电路, 他认为只有活跃的、具有吸收功能的根系才能实现对电流的传导作用。因此, 根系电容特征应是根系几何形态特征和根系生理活性特征的综合表现^[38]。此外, Dalton^[23]还进一步研究了根系电容测量过程中的关键技术问题, 发现含水量对根系与土壤接触面积的大小有很大影响, 建议在土壤水分接近饱和状态下测量根系电容值, 且植物电极在茎干的位置应以接近根基部为佳, 这些重要结论成为后来根系电容法研究和应用中广泛遵循的操作规范^[39,40]。Tsukahara等^[41]却发现根系鲜重与植物电极在根基上方6 cm处测得的根系电容值之间的相关性($R^2 = 0.53$), 优于植物电极在根基部测得的根系电容值之间的相关性($R^2 = 0.41$); Ellis等^[42]通过研究也发现: 在1 kHz测试条件下, 根系电容小于土壤电容; 而在2 kHz测试条件下, 根系与土壤电容才较为一致, 因此对采用电阻抗法测量根系电容通常采用1 kHz的外源交流电源频率指出质疑; Aulen和Shipley^[43]研究表明, 水培试验中容器的大小对根系电容值存在一定影响, 并且盆栽中测量的各玉米根系电容值之和与将所有玉米通过线路连接在一起测定的根系电容值一致。以上这些不同的研究结论对根系电容法和 Dalton 模型在一定程度上提出了质疑。Dietrich等^[24]为了验证 Dalton 模型, 以水培燕麦(*Avena sativa* L.)为材料, 通过向上缓提、剪断营养液内的根系和调整植物电极与营养液液面距离等方法, 研究发现: 虽然根系电容值与根系生物量存在较好的线性关系, 但当向上缓提营养液内的根系时, 根系电容值与留

在营养液内的根系生物量之间不存在线性关系, 而与处于营养液表面的根系横断面积之和存在线性关系; 当切除营养液内的根系时, 根系电容值变化不明显, 该结果与 Dalton 模型截然相反。依据此实验结果, Dietrich 等^[24]认为根系电阻抗法测定的电流是由植物电极流经营养液液面后与土壤电极形成的电路, 因此测量的根系电容实际上是由植物电极与营养液液面之间的组成决定的, 进而他们提出了新的模型, 并指出增加土壤含水量而提高的电容值以增加土壤电容为主, 而非前人认为的是增加了根系与土壤的接触面积使电容值增大^[44]。新模型是由多个若干并联在一起的电容器形成的串联电路, 测定的根系电容与根系生物量之间存在较好的相关性, 但根系电容并不是对根系特征直接测量的结果。

2.2 多频根系电容法的研究进展

随着电化学知识和测量技术的不断完善以及生物电阻抗法的广泛应用, 电阻抗图谱方法也被尝试应用到根系研究领域。Ozier-Lafontaine 等^[45]通过总结前人成果详细阐述了根系研究中, 电极之间的各个主要部分如根、干、根土接触面、土壤、电极与茎干和土壤的电阻抗特征, 并提出了新的等效电路图模型。该模型是由一个电阻器、四个并联的电阻器和一个电容器组成的串联电路, 其中, 一个电阻器代表土壤在电路中的作用, 而四个并联的电阻器和一个电容器组成的串联电路代表根土界面, 根和干的连续体。Ozier-Lafontaine 等^[45]通过盆栽西红柿(*Lycopersicon esculentum* Mill)研究了土壤电极与植物基部间的方位、距离及其在土壤中的深度、植物电极在茎秆的位置对电阻抗图谱的影响, 结果表明: 电阻抗图谱(频率范围为10 Hz~1 MHz)的形状和大小不因土壤电极与植物基部间的方位(四个方位)、距离(5、7、10、12.5 cm)及其在土壤中的深度(0.2、2.5、5 cm)而发生变化, 但因植物电极在茎秆上的不同位置而差异显著; 随着根系不断增大, 电阻抗图谱的基本形状保持不变, 根系电容值却不断增加; 通过对电路中不同电子元器件的参数进行拟合, 在等效电路模型中找到了电学参数与根系参数变化之间存在较好拟合关系的电子元器件。Butler 等^[46]对扦插柳条的根生长动态研究中, 将在40 Hz~340 kHz范围内获得的电阻抗图谱采用一个电阻和三个分布元件串联组成的分

表1 根系电阻抗法研究文献汇总
Table 1 Summarized references using bioimpedance methods for root research

| 方法 Method | 文献 Reference | 植物 Plant | 生长介质 Growth substrate | 频率 (Hz) | R^2 (根鲜重 ¹ /根干重 ² 根长 ³ /表面积 ⁴ /根个数 ⁵) R^2 (Root wet weight/dry weight ² /length ³ /surface area ⁴ /number ⁵) | 数量 No. |
|---|---|---|---|---|--|--|
| 电容法 Capacitance | Walker and Electrical ^[34] Chloupek ^[22] Chloupek ^[39] | 玉米 Maize 玉米 Maize 胡萝卜 Carrot | 水培 Water culture 沙土盆栽 Pot culture 田间 Field | 1 k 800 1 k | 0.70 ⁵ 0.74 ¹ /0.73 ² /0.73 ³ /0.66 ⁴ 0.51 ¹ | 15 24 113 |
| | Kendall <i>et al.</i> ^[26] | 向日葵 Sunflower 向日葵 Sunflower 三叶草 Trefoil | 沙土 Sand 沙土 Sand 水培 Water culture | 1 k 1 k 1 k | 0.55 ¹ (多土壤电极 Multi-soil electrode) 0.52 ¹ /0.54 ¹ /0.57 ¹ (5, 10 and 15 cm from root base) 0.67 ² | 15 15 21 |
| | Dalton ^[23] van Beem <i>et al.</i> ^[27] | 苜蓿 Clover 番茄 Tomato 玉米 Maize 玉米 Maize | 粉砂壤土 Silt sand soil 水培 Water culture 蛭石 Vermiculite 田间 Field | 1 k 1 k 1 k 1 k | 0.29 ² /0.29 ² /0.14 ² /0.08 ² /0.05 ² /0.44 ² (55, 63, 86, 94, 101 and 165 d) 0.77 ² 0.85 ¹ /0.27 ¹ (35, 70 d) 0.41 ¹ /0.53 ¹ (0 and 6 cm from root base) | 20 12 32 36 |
| Ozier-Lafontaine and Bajajet ^[45] | 苋菜 Acalypha | 苋菜 Acalypha | 水培 Water culture | 1 k | 0.94 ¹ | 5 |
| Preston <i>et al.</i> ^[38] Rajkai <i>et al.</i> ^[28] McBride <i>et al.</i> ^[35] Bengough <i>et al.</i> ^[40] Tsukahara <i>et al.</i> ^[41] | 番茄 Tomato 杨树 Populus 向日葵 Sunflower 玉米 Maize 小麦 Wheat | 番茄 Tomato 杨树 Populus 向日葵 Sunflower 玉米 Maize 桃树 Peach | 水培 Water culture 盆栽 Pot culture 盆栽 Pot culture 盆栽 Pot culture 盆栽 Pot culture | 1 k 1 k 1 k 1 k 1 k | 0.99 ² /0.83 ² 0.87 ¹ /0.90 ² 0.83 ¹ (针性电极 Needle electrode), 0.92 ¹ (针电极 Pier electrode) 0.61 ² /0.42 ² /0.68 ² /0.13 ² (不同品种 Different breed line) 0.75 ² | 11, 15 33 12 30, 30 67 |
| Pitre <i>et al.</i> ^[36] Chloupek <i>et al.</i> ^[37] Ellis <i>et al.</i> ^[42] Aulen and Shipley ^[43] Dietrich <i>et al.</i> ^[24] Dietrich <i>et al.</i> ^[44] | 梨树 Pear 柳树 Willow 柳树 Willow 胡萝卜 Carrot 蚕豆 Bean 草坪草 Grasses 大麦 Barley 小麦 Barley | 梨树 Pear 柳树 Willow 柳树 Willow 胡萝卜 Carrot 蚕豆 Bean 草坪草 Grasses 大麦 Barley 小麦 Barley | 盆栽 Pot culture 盆栽和大田 Pot and field 盆栽 Pot culture 大田 Field 盆栽 Pot culture 大田 Field 沙土盆栽 Pot culture 沙土盆栽 Pot culture 水培 Water culture 沙土盆栽 Pot culture | 1 k 1 k 1 k 1 k 1 k 1 k 1 k 1 k 1 k | 0.81 ² 0.81 ² 0.81 ² /0.49 ² 0.53 ¹ 0.31 ² /0.21 ³ /0.24 ⁴ 0.30 ² 0.87 ¹ 0.75 ² | 27 18 16, 8 92 19 150 16 67 |
| 电抗图谱法 Resistance | Walker and Electrical ^[34] Čermák <i>et al.</i> ^[30] Cao <i>et al.</i> ^[31] Urban <i>et al.</i> ^[49] | 玉米 Maize 松树等 Pine tree <i>et al.</i> 柳树 Willow 松树等 Pine tree <i>et al.</i> | 水培 Water culture 林地 Forest 水培 Water culture 林地 Forest | 1 k 128 128 128 | 0.59 ⁵ 直接计算根系吸收面积 Calculation of root absorption area 0.86 ³ /0.83 ⁴ (单根的测量结果 Detection results of single root) 直接计算根系吸收面积 Calculation of root absorption area | 15 16 16 |
| 电抗图谱法 Impedance spectroscopy | Repo <i>et al.</i> ^[48] Ozier-Lafontaine and Bajajet ^[45] Cao <i>et al.</i> ^[49] | 柳树 Willow 西红柿 Tomato 柳树 Willow | 柳树 Willow 盆栽 Pot culture 水培 Water culture | 40 ~ 340 k 10 ~ 1000 k 60 ~ 60 k | 0.77 ¹ /0.86 ² 0.96 ² 0.61 ⁴ | 64 12 15 |

布参数等效电路进行拟合, 从中也找到了能很好地反映出根系生物量动态变化的电学参数。为了更加明确地描述两电极间主要组分的电学特征, Cao等^[47]分别将水培柳条及其萌发的根系浸入营养液中、仅根系浸入营养液、切除根系的柳条浸入营养液中, 并在 60 Hz ~ 60 kHz 范围内获取不同处理的电阻抗图谱, 通过分析得出水培柳条及其萌发根系的电阻抗特征, 并进而提出了新的等效电路模型。该模型以营养液液面为分割点, 在营养液液面以上把植物的茎干类比为一个电容器和电容器并联的电子元件, 并与营养液液面以下的茎干和根系形成串联电路; 而对于淹没在营养液内的茎干和根系, 以并联电路的形式将茎干与根系分开, 并将茎干对电流的影响分为横向和纵向 2 个作用。综上分析发现, 电阻抗图谱方法虽深化了根系电容的测定分析, 但多数研究仍处于营养液水培条件的初级探索阶段, 这就需要在土壤介质中进一步验证该方法, 以进一步完善植物根系的原位检测技术。

3 问题与展望

与其他非破坏性植物根系研究方法一样, 根系电阻抗法(电容、电阻和电阻抗图谱法)在不断的研究和发展过程中形成了较完整的理论体系和实践操作规范, 特别是便携式测量仪器的出现, 使该方法备受关注, 并具有被广泛应用的前景。随着对电极间“黑箱子”的不断探索, 电路中各个组成部分的作用越来越清晰, 这为今后根系电阻抗法更加深入和系统的研究奠定了良好的基础。然而, 目前大量的研究结果均以实验室水培模拟方法为主, 野外实地检测较少且其研究结果的准确性受到了一定质疑, 因此, 为了让这种简便、非破坏性的根系电阻抗法尽快走出实验室, 在野外研究和监测中成为根系检测的重要手段, 需要今后更加广泛地开展野外研究和验证工作, 并建立适合不同野外条件下的测量标准和操作规范^[48-50]。此外, 虽然有研究表明根系的电学特征不仅与根系几何形态特征有关, 还与根系的生理特征存在一定联系, 但现有的文献报道仅涉及电学参数与根系几何形态特征的关系研究, 因此今后可尝试将电阻抗法用来研究或监测根系及其菌根在逆境胁迫(干旱、盐碱、温度、水土流失等)下的生理响应^[51-53]。同时, 根系电阻抗法是针对单株植物根系的研究, 将来可结合其他根系

研究方法如探地雷达技术、高密度电阻率法等, 实现对根系细致而全面的研究。

参考文献:

- [1] 江华波, 王盛锋, 杨锋, 张中华, 邱亨池, 乙引, 汪洪. 不同浓度硝态氮供应下小麦生长、硝态氮积累及根系钙信号特征[J]. 植物科学学报, 2015, 33(3): 362-368.
Jiang HB, Wang SF, Yang F, Zhang ZH, Qiu HC, Yi Y, Wang H. Plant growth, nitrate content and Ca signalling in wheat (*Triticum aestivum* L.) roots under different nitrate supply[J]. *Plant Science Journal*, 2015, 33(3): 362-368.
- [2] Smit AL, Bengough AG, Engels C, Van Noordwijk M, Pellerin S, Van der Gijn SC. *Root Methods: A handbook*[M]. New York: Springer-Verlag, 2000.
- [3] Butnor JR, Doolittle JA, Johnsen KH, Samuelson L, Stokes T, Kress L. Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67(5): 1607-1615.
- [4] Hirano Y, Dannoura M, Aono K, Igashii T, Ishii M, Yamase K, Makita N, Kanazawa Y. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar[J]. *Plant Soil*, 2009, 319(1-2): 15-24.
- [5] Majdi H. Root sampling methods-applications and limitations of the minirhizotron technique[J]. *Plant Soil*, 1996, 185(2): 255-258.
- [6] Altmann M, Pliquet U, Suess R, Von Borell E. Prediction of lamb carcass composition by impedance spectroscopy[J]. *J Anim Sci*, 2004, 82(3): 816-825.
- [7] 董秀珍. 生物电阻抗技术研究进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2005, 21(6): 311-317.
Dong XZ. The development of the bioelectric impedance technologies[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2005, 21(6): 311-317.
- [8] Pliquet U. Bioimpedance: a review for food processing[J]. *Food Eng Rev*, 2010, 2(2): 74-94.
- [9] Zhang M, Stout DG, Willison JHM. Plant tissue impedance and cold acclimation: a re-analysis[J]. *J Exp Bot*, 1992, 43: 263-266.
- [10] Repo T, Zhang M, Ryypöö A, Vapaavuori E, Sutinen S. Effects of freeze-thaw injury on parameters of distributed electrical circuits of stems and needles of Scots pine seedlings at different stages of acclimation[J]. *J Exp Bot*, 1994, 45(6): 823-833.
- [11] Repo T, Pulli S. Application of impedance spectroscopy for selecting frost hardy varieties of English ryegrass[J]. *Ann Bot*, 1996, 78(5): 605-609.
- [12] Repo T, Zhang G, Ryypöö A, Rikala R. The electrical impedance spectroscopy of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)

- shoots in relation to cold acclimation [J]. *J Exp Bot*, 2000, 51(353): 2095–2107.
- [13] Repo T, Oksanen E, Vapaavuori E. Effects of elevated concentrations of ozone and carbon dioxide on the electrical impedance of leaves of silver birch (*Betula pendula*) clones [J]. *Tree Physiol*, 2004, 24(7): 833–843.
- [14] Ryypö A, Repo T, Vapaavuori E. Development of freezing tolerance in roots and shoots of Scots pine seedlings at nonfreezing temperatures [J]. *Cana J Forest Res*, 1998, 28(4): 557–565.
- [15] Tiitta M, Savolainen T, Olkkonen H, Kanko T. Woody moisture gradient analysis by electrical impedance spectroscopy [J]. *Holzforsch*, 1999, 53: 68–76.
- [16] 梁军, 屈智巍, 贾秀贞, 刘惠文, 张星耀. 树体电容的生理学研究 [J]. 林业科学, 2006, 42(1): 90–95.
Liang J, Qu ZW, Jia XZ, Liu HW, Zhang XY. Studies of tree capacitance on the basis of physiology [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(1): 90–95.
- [17] 王爱芳, 张钢, 魏士春, 崔同祥. 不同发育时期樟子松 (*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.) 的电阻抗参数与抗寒性的关系 [J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5741–5749.
Wang AF, Zhang G, Wei SC, Cui TX. Relation between frost hardiness and parameters of electrical impedance spectroscopy in saplings of different development stage of *Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv. [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5741–5749.
- [18] Grimnes S, Martinsen OG. Bioimpedance and Bioelectricity Basics [M]. San Diego: Academic Press, 2008.
- [19] Repo T, Cao Y, Silvennoinen R, Ozier-Lafontaine H. Electrical Impedance Spectroscopy and Roots: Measuring Roots [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012: 25–49.
- [20] 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学报, 2005, 31(1): 19–26.
Zhang G, Xiao JZ, Chen DF. Electrical impedance spectroscopy method for measuring cold hardiness of plants [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005, 31(1): 19–26.
- [21] 游崇娟, 王建美, 田呈明. 植物病害检测领域的电生理学研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2010, 6(1): 118–122.
You CJ, Wang JM, Tian CM. Research progress of electrophysiology in plant disease detection [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 6(1): 118–122.
- [22] Chloupek O. The relationship between electric capacitance and some other parameters of plant roots [J]. *Biologia Plantarum*, 1972, 14(3): 227–230.
- [23] Dalton FN. In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods [J]. *Plant Soil*, 1995, 173(1): 157–165.
- [24] Dietrich RC, Bengough AG, Jones HG, White PJ. A new physical interpretation of plant root capacitance [J]. *J Exp Bot*, 2012, 63(17): 6149–6159.
- [25] Ellis T, Murray W, Paul K, Kavalieris L, Brophy J, Williams C, Maass M. Electrical capacitance as a rapid and non-invasive indicator of root length [J]. *Tree Physiol*, 2013, 33(1): 3–17.
- [26] Kendall WA, Pederson GA, Hill RR. Root size estimates of red clover and alfalfa based on electrical capacitance and root diameter measurements [J]. *Grass Forage Sci*, 1982, 37(3): 253–256.
- [27] Van Beem J, Smith ME, Zobel RW. Estimating root mass in maize using a portable capacitance meter [J]. *Agron J*, 1998, 90(4): 566–570.
- [28] Rajkai K, Vegh KR, Nacsá T. Electrical capacitance of roots in relation to plant electrodes, measuring frequency and root media [J]. *Acta Agron Hungarica*, 2005, 53(2): 197–210.
- [29] Aubrecht L, Staněk Z, Koller J. Electrical measurement of the absorption surfaces of tree roots by the earth impedance method [J]. *Tree Physiol*, 2006, 26(9): 1105–1112.
- [30] Čermák J, Ulrich R, Staněk Z, Koller J, Aubrecht L. Electrical measurement of tree root absorbing surfaces by the earth impedance method [J]. *Tree Physiol*, 2006, 26(9): 1113–1121.
- [31] Cao Y, Repo T, Silvennoinen R, Lehto T, Pelkonen P. Analysis of the willow root system by electrical impedance spectroscopy [J]. *J Exp Bot*, 2011, 62(1): 351–358.
- [32] 张钢, 王爱芳. 针叶树种抗寒性数学模型研究进展 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1610–1616.
Zhang G, Wang AF. Research advances in mathematical model of coniferous trees cold hardiness [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1610–1616.
- [33] Srinivas K, Sarah P, Suryanarayana SV. Impedance spectroscopy study of polycrystalline $\text{Bi}_6\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_{18}$ [J]. *B Mater Sci*, 2003, 26(2): 247–253.
- [34] Walker JM. Electrical AC. Resistance and capacitance of *Zea mays* [J]. *Plant Soil*, 1965, 23(2): 270–274.
- [35] McBride R, Candido M, Ferguson J. Estimating root mass in maize genotypes using the electrical capacitance method [J]. *Arch Agron Soil Sci*, 2008, 54(2): 215–226.
- [36] Pitre FE, Brereton NJB, Audoire S, Richter GM, Shield I, Karp A. Estimating root biomass in *Salix viminalis* \times *Salix schwerinii* cultivar “Olof” using the electrical capacitance method [J]. *Plant Biosyst*, 2010, 144(2): 479–483.
- [37] Chloupek O, Dostál V, Středa T, Psota V, Dvorackova O. Drought tolerance of barley varieties in relation to their root system size [J]. *Plant Br*, 2010, 129(6): 630–636.
- [38] Preston GM, McBride RA, Bryan J, Candido M. Estimating root mass in young hybrid poplar trees using the elec-

- trical capacitance method [J]. *Agro Syst*, 2004, 60(3): 305–309.
- [39] Chloupek O. Evaluation of the size of a plant's root system using its electrical capacitance [J]. *Plant Soil*, 1977, 48(2): 525–532.
- [40] Bengough AG, McKenzie BM, Hallet PD, Dietrich RC, White PJ, Jones HG. Physical Limitations to Root Growth: Screening, Scaling and Reality [M]. Proceedings of 7th ISRR Symposium on Roots: Research and Applications (RootRAP, Austria). 2009: 174.
- [41] Tsukahara K, Yamane K, Yamaki Y, Honjo H. A nondestructive method for estimating the root mass of young peach trees after root pruning using electrical capacitance measurements [J]. *J Agri Met*, 2009, 65: 11–20.
- [42] Ellis T, Murray W, Kavalieris L. Electrical capacitance of bean root systems was related to tissue density—a test for the dalton model [J]. *Plant Soil*, 2013, 366(1–2): 575–584.
- [43] Aulen M, Shipley B. Non-destructive estimation of root mass using electrical capacitance on ten herbaceous species [J]. *Plant Soil*, 2012, 355(1–2): 41–49.
- [44] Dietrich RC, Bengough AG, Jones HG, White PJ. Can root electrical capacitance be used to predict root mass in soil [J]. *Ann Bot*, 112(2): 457–464.
- [45] Ozier-Lafontaine H, Bajazet T. Analysis of root growth by impedance spectroscopy (EIS) [J]. *Plant Soil*, 2005, 277(1–2): 299–313.
- [46] Butler AJ, Barbier N, Čermák J, Koller J, Thornily C, McEvoy C, Nicoll B, Perks MP, Grace J, Meir P. Estimates and relationships between aboveground and belowground resource exchange surface areas in a Sitka spruce managed forest [J]. *Tree Physiol*, 2010, 30(6): 705–714.
- [47] Cao Y, Repo T, Silvennoinen R, Lehto T, Pelkonen P. An appraisal of the electrical resistance method for assessing root surface area [J]. *J Exp Bot*, 2010, 61(9): 2491–2497.
- [48] Repo T, Laukkanen J, Silvennoinen R. Measurement of the tree root growth using electrical impedance spectroscopy [J]. *Silva Fennica*, 2005, 39(2): 159–166.
- [49] Urban J, Bequet R, Mainiero R. Assessing the applicability of the earth impedance method for in situ studies of tree root systems [J]. *J Exp Bot*, 2011, 62(6): 1857–1869.
- [50] 张正, 刘国彬, 李强, 脱登峰. 电容法估测植物根系生物量研究 [J]. 草地学报, 2014, 32(2): 383–386. Zhang Z, Liu GB, Li Q, Tuo DF. Estimating plant root biomass using the electrical capacitance method [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 32(2): 383–386.
- [51] Cseresnyés I, Takács T, Végh KR, Anton A, Rajkai K. Electrical impedance and capacitance method: A new approach for detection of functional aspects of arbuscular mycorrhizal colonization in maize [J]. *Eur J Soil Biol*, 2013, 54: 25–31.
- [52] 张钢. 国外木本植物抗寒性测定方法综述 [J]. 世界林业研究, 2005, 18(5): 14–20. Zhang G. Review on methods for measuring frost hardiness in woody plants abroad [J]. *World Forestry Research*, 2005, 18(5): 14–20.
- [53] 孟昱, 邸葆, 张钢, 封新国, 徐成立, 田军. 潟渍胁迫下白桦根系可溶性糖和淀粉含量与电阻抗的相关性分析 [J]. 生物物理学报, 2013, 29(6): 450–460. Meng Y, Di B, Zhang G, Feng XG, Xu CL, Tian J. The correlation analysis of soluble sugar and starch contents with electrical impedance in *Betula platphylla* Suk. roots under waterlogging and flooding stresses [J]. *Acta Biophysica Sinica*, 2013, 29(6): 450–460.

(责任编辑: 刘艳玲)