

# 四端子电极提高根系生物量电容法估测的有效性

张正<sup>1</sup>, 刘国彬<sup>1,2\*</sup>, 李强<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;  
3. 榆林学院生命科学学院, 榆林 719000)

**摘要:** 二端子结构在测定根系电容时伴生的电极接触效应会影响根系电容的有效测量。分别采用二端子和四端子 2 种结构在土壤相对含水率为 25%~30%、55%~60% 和 85%~90% 下测定玉米根系电容, 研究土壤含水率对电极接触效应的影响, 并建立不同土壤水分条件和结构下根系电容与根系生物量的关系, 探讨四端子结构在电容法估测根系生物量中的有效性。结果表明, 二端子结构测定的根系电容较四端子结构小, 随着土壤含水率减小, 电极接触效应增大, 在土壤相对含水率为 25%~30% 下最为明显。在土壤相对含水率为 85%~90% 时, 2 种结构下玉米根系电容表征根系生物量的有效性相近 (二端子结构:  $R^2=0.63$ ,  $P<0.05$ ; 四端子结构:  $R^2=0.66$ ,  $P<0.05$ ), 但随土壤含水率减小, 与四端子结构相比, 二端子结构下玉米根系电容表征根系生物量的有效性急剧下降, 在土壤相对含水率为 25%~30% 时最为明显, 二端子结构  $R^2=0.37$  ( $P<0.05$ ) 而四端子结构  $R^2=0.59$  ( $P<0.05$ )。研究认为, 土壤含水率越低, 与二端子结构相比, 四端子结构下根系电容表征根系生物量的有效性越好。

**关键词:** 土壤含水率; 生物量; 根系; 电容; 二端子结构; 四端子结构; 电极接触效应

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.027

中图分类号: TM938.84

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-05-0185-05

张正, 刘国彬, 李强. 四端子电极提高根系生物量电容法估测的有效性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 185-189.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.027 <http://www.tcsae.org>

Zhang Zheng, Liu Guobin, Li Qiang. Four-terminal configuration enhancing estimation efficiency of root biomass by electrical capacitance method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(5): 185-189. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.027 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

由于土壤不透明属性的限制, 埋藏于地下的植物根系难以直接观察与测量, 土钻法、挖掘法和网袋法等<sup>[1-4]</sup>传统的根系研究方法大多需要离土取样, 不仅耗时费力, 而且容易出现移位、断根和水分逸失等问题<sup>[5]</sup>。电容法作为一种更加便捷、无损的根系原位观测方法, 对满足不断增长的根系研究需要具有重要意义<sup>[6-8]</sup>。Kendal 等<sup>[9]</sup>较早地采用电容仪和 2 个电导电极, 以红三叶草 (*Trifolium Pratense* L) 和紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L) 为材料, 将阳极电极插入土壤中, 阴极电极插入茎底部靠近地表方向, 在 1 kHz 测试信号频率下估测了根系的质量, 并指出根系表层与土壤间的湿度会对试验结果带来影响。这种由 2 个电导电极 (阳极电极和阴极电极) 分别将土壤和根系连接起来构成“阳极电极-土壤-根系-阴极电极”的测量回路称为二端子结构<sup>[10-11]</sup>。Dalton<sup>[12]</sup>在根系电容的

建模研究中指出采用二端子结构测定根系电容时, 电极接触效应的存在会影响根系电容的有效测量, 进而影响根系电容表征根系生物量的有效性。为了消除电极接触效应, Tim 等<sup>[13]</sup>在二端子结构中的测量回路外围引入 2 个电导电极形成 1 条激励回路从而构成四端子结构, 在土壤饱和和含水率条件下测定了沙土栽培的蚕豆 (*Vicia faba* L) 根系电容, 但结果表明采用四端子和二端子 2 种结构测定的根系电容呈极显著的相关关系 ( $R^2=0.99$ ,  $P<0.01$ )。这说明土壤饱和和含水率条件下电极接触效应可忽略不计, 四端子结构并不能提高根系电容测量的有效性。然而电极接触效应主要是由于引线间 (阳极电极和土壤) 的“接触”并不完全而引起的<sup>[14]</sup>, 引线间 (阳极电极和土壤) 的接触状况决定了电极接触效应的大小。Dalton<sup>[12]</sup>在对根系电容的建模研究中指出引线间 (阳极电极和土壤) 的接触状况与土壤水分密切相关。

笔者在总结已有相关文献的基础上, 发现采用四端子结构测定植物根系电容的相关研究多是在土壤水分为田间持水量下进行的<sup>[15]</sup>, 而有关不同土壤含水率下应用四端子结构测定根系电容的研究较少。因此, 本文采用四端子结合二端子结构的方法, 研究电极接触效应对根系电容测量的影响及土壤含水率对电极接触效应的影响, 并建立不同土壤水分条件和测量结构下根系电容与根系生物量的关系, 探讨四端子结构在电容法原位估测根系生物量中的有效性, 以期为进一步完善植物根系快速无损检测技术提供参考。

收稿日期: 2016-06-10 修订日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41661101); 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); 黄土高原水土流失综合治理技术及示范 (2016YFC0501700)

作者简介: 张正, 男, 陕西榆林人, 博士生, 主要从事植被地下生态研究。杨陵 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

Email: zhangzheng@nwsuaf.edu.cn

※通信作者: 刘国彬, 男, 陕西榆林人, 研究员, 主要从事流域生态系统管理研究。杨陵 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

Email: gbliu@ms.iswc.ac.cn

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料和装置

本研究采用盆栽控制试验,以典型须根系形态的陕单609春玉米(*Zea mays*)为试验材料,盆栽土壤为陕北安塞县的壤土(弃耕地耕层土壤),土壤基本理化性质包含容重 $1.2\text{ g/cm}^3$ ,水稳性团聚体 $133.9\text{ g/kg}$ ,有机质质量分数 $3.73\text{ g/kg}$ ,全氮质量分数 $0.24\text{ g/kg}$ ,速效磷质量分数 $3.99\text{ mg/kg}$ ,田间持水量质量分数 $22.00\%$ 。

土壤填装采用常规化方法,按照设计容重( $1.2\text{ g/cm}^3$ )分层(每层 $5\text{ cm}$ )装入塑料桶(上径 $\times$ 下径 $\times$ 高为 $28\text{ cm}\times 22\text{ cm}\times 34\text{ cm}$ ),填装结束后,用量筒取 $1.5\text{ L}$ 的水从插入土壤底部的聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)管中加入,于室温下养护 $5\text{ d}$ 后播种。采用穴播法播种,每盆固定3穴,每穴1粒,为了保证盆栽植物的成活率,苗期管理期间及时补苗和间苗,待出苗整齐后,每盆固定1株。

根系电容的测定采用手持式MT4080A型数字电容桥(深圳市恩慈电子有限公司,精度为 $\pm 0.3\%$ )<sup>[15]</sup>,该电容桥带有智能微处理器,通过操作【参数】键可选择并联或串联模式来测量电容、阻抗、电感等多项电参数,测试频率通过电桥面板上【频率】键切换,可选择 $0.1$ 、 $1$ 、 $10$ 和 $100\text{ kHz}$ 共4种频率。该试验中由于电容桥所配套的夹具加持面为锯齿形且夹力较小,不能满足试验要求,故采用自制不锈钢低阻电导电极(长 $5\text{ cm}$ ,直径 $2\text{ mm}$ )连接根系和土壤。

盆栽土壤含水率采用TDR-300水分测量仪(西化仪(北京)科技有限公司)结合称质量法进行测定与控制。本文通过自制5个土壤含水率水平( $3.39\%$ 、 $4.97\%$ 、 $9.80\%$ 、 $14.83\%$ 和 $19.68\%$ ),对时域反射仪(time domain reflectometry, TDR)测量结果进行校正,采用如下公式:

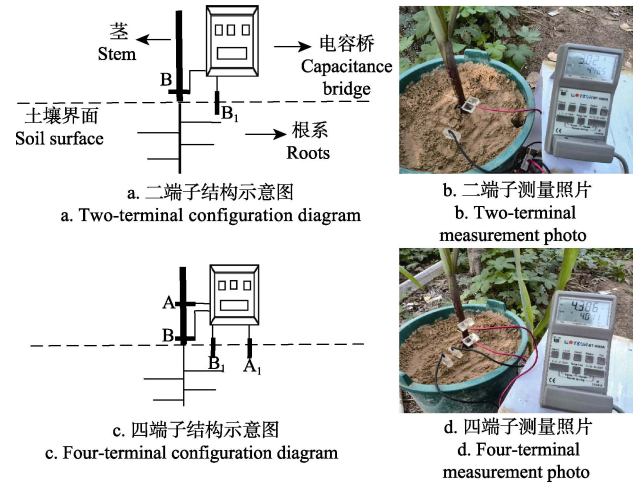
$$X=0.7622x+0.0086 \quad (1)$$

式中 $X$ 为土壤含水率,%; $x$ 为TDR测量值,%。

### 1.2 试验设计和过程

该研究选择在玉米拔节,抽雄和成熟3个生育期分别进行根系电容测定,样本量均为5株,每株玉米分别在二端子和四端子2种结构下进行测定,其中,每种结构分别选定3个土壤相对含水率梯度(相对含水率为土壤含水率与田间水量的比值),即 $25\%\sim 30\%$ 、 $55\%\sim 60\%$ 和 $85\%\sim 90\%$ 。首先用量筒取适量的水从插入土壤底部的PVC管中缓缓加入,补充待测植株土壤相对含水率至 $85\%\sim 90\%$ ,以玉米茎部为原点,在各方向等间距各选择1个点,每间隔 $10\text{ min}$ 用TDR-300水分测量仪测定各点土壤含水率,待各点土壤含水率相近,即土壤水分分布均匀后<sup>[16-18]</sup>,采用二端子结构进行根系电容测定(图1a),测试信号频率为 $1\text{ kHz}$ <sup>[19-22]</sup>。具体测量方法如图1a所示,阴极电极B插入植物茎底部距地表 $1\text{ cm}$ 处,阳极电极 $B_1$ 插入距茎部 $5\text{ cm}$ 处的土壤中,电路连接好后,打开电容桥电源开关,待读数稳定后( $5\text{ s}$ ),读取根系电容值;二端子结构下根系电容值记录完毕后,随即关闭电容桥电源,然后将测量结构切换至四端子(图1c),即保持阴极电极B和阳极电极 $B_1$ 的接触位置不变,于阴极电极B上方 $3\text{ cm}$ 处插入激励电极A,阳极电极 $B_1$ 外侧 $3\text{ cm}$ 处插入激励电极 $A_1$ ,电路连接好后,打开电容桥电源开关,

待读数稳定后( $5\text{ s}$ ),读取根系电容值。相对含水率 $85\%\sim 90\%$ 条件下根系电容测定完毕后,将待测植株转移至炎热干燥环境中自然干旱并每间隔 $1\text{ h}$ 测定土壤含水率,待土壤含水率稳定在下一水分梯度时(相对含水率 $55\%\sim 60\%$ 和 $25\%\sim 30\%$ )分别采用二端子和四端子结构进行根系电容测定,测量方法同上。



注: B 是阴极电极;  $B_1$  是阳极电极; A 和  $A_1$  是激励电极; 下同。  
Note: B is cathode electrode;  $B_1$  is anode electrode; A and  $A_1$  are exciting electrode; Same as below.

图1 二端子和四端子结构示意图及测量根系电容现场照片  
Fig.1 Schematic and photo of root electrical capacitance measurement under two and four-terminal configurations

2种结构3个水分梯度下根系电容测定完毕后,将玉米地上部分沿阴极电极B插入点剪去<sup>[23-25]</sup>,然后分离根系和土壤。分离出的根系置于 $0.05\text{ mm}$ 的网筛内进行冲洗;冲洗结束后,置于装有蒸馏水的器皿中,用镊子将所有杂质从根系中分离出来,再用滤纸轻轻地擦拭根系表面,尽量将根系表面的水分拭去;最后,将根系样品对应编号后放入密封袋内,在 $80^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干至恒质量,并称其干质量。

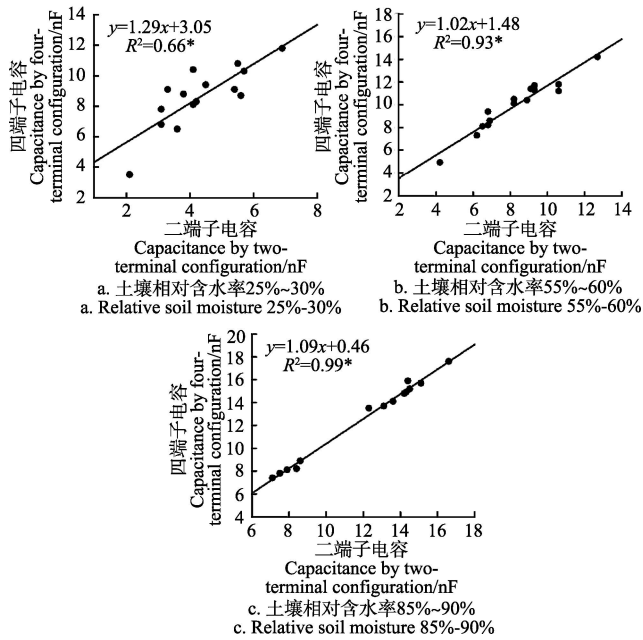
### 1.3 数据处理

采用Excel 2013进行数据整理;采用SPSS13进行试验数据统计分析;采用SigmaPlot 12.5作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 电极接触效应与土壤含水率的关系

图2为3个土壤相对含水率梯度下( $25\%\sim 30\%$ 、 $55\%\sim 60\%$ 和 $85\%\sim 90\%$ ),二端子和四端子2种结构测定的玉米根系电容间关系。由图2可知,当四端子结构消除了二端子结构中的电极接触效应后,玉米根系电容观测值普遍增大,土壤相对含水率为 $25\%\sim 30\%$ 下玉米根系电容观测值比二端子结构测定电容平均增大 $1.04$ 倍,2种结构下根系电容间拟合度 $R^2$ 为 $0.66$ ,土壤相对含水率为 $55\%\sim 60\%$ 和 $85\%\sim 90\%$ 下根系电容比二端子分别平均增大 $0.21$ 和 $0.04$ 倍,根系电容间拟合度 $R^2$ 分别为 $0.93$ 和 $0.99$ ,这说明二端子结构中的电极接触效应对根系电容测量影响的宏观表现是根系电容观测值较四端子结构小,且电极接触效应的宏观表现水平随土壤含水率减小而增大,土壤相对含水率为 $25\%\sim 30\%$ 下增大明显。



注：\*， $P < 0.05$  下同。  
Note: \*,  $P < 0.05$ , Same as below.

图 2 不同土壤相对含水率下二端子和四端子结构测定的玉米根系电容间关系

Fig.2 Relationship between maize root capacitance measured by two-terminal and four-terminal configurations under different relative soil moisture

二端子结构由于只有“阳极电极-土壤-根系-阴极电极”这 1 条电流通路，而引线间（阳极电极和土壤）的“接触面”实际是有限个接触点、线或面组成的集合，因此当电流从原来截面较大的导体（阳极电极）突然转入截面较小的接触点、线或面时会发生剧烈收缩<sup>[14]</sup>，从而在接触点、线或面形成压降，进而产生额外电容现象，即所谓的电极接触效应<sup>[13]</sup>。四端子结构是在二端子结构中的测量回路外围引入 2 个电导电极形成 1 条激励回路，并将测量回路连接到交流电容桥上 1 个有着极高输入电阻的装置上，通过改变电路路径消除电极接触效应<sup>[26-27]</sup>。Tim 等<sup>[13]</sup>指出通过研究某一土壤含水率水平下二端子和四端子 2 种结构测定的根系电容间关系可定性反映该土壤含水率水平下电极接触效应对根系电容测量影响宏观表现，其以沙土栽培的蚕豆为试验材料，在土壤饱和和含水率条件下对二端子和四端子 2 种结构测定的根系电容进行了回归分析，结果显示二者呈显著线性相关且决定系数  $R^2$  为 0.99，并表明土壤饱和和含水率条件下二端子结构中的电极接触效应对根系电容测量的影响可忽略不计。然而电极接触效应主要是由于引线间（阳极电极和土壤）的“接触”并不完全而引起的<sup>[14]</sup>，引线间（阳极电极和土壤）的接触状况决定了电极接触效应的大小。土壤作为二端子结构下“阳极电极-土壤-根系-阴极电极”测量回路中的重要引线，其水分状况不仅决定“根-土”接触的有效性而且影响电极接触效应发生界面的大小（“阳极电极-土壤”）<sup>[28]</sup>。土壤含水率减小减少了“阳极电极-土壤”接触面上可溶性盐的溶解和降低了离子的交换能力，当电流经阳极电极转入土壤时发生剧烈收缩的

程度增大，从而增强电极接触效应，导致对根系电容测量的影响增大<sup>[29]</sup>。

综上，四端子结构由于消除电极接触效应而增大了根系电容测量的有效性，且土壤含水率减小使这种影响更加明显

## 2.2 四端子结构估测玉米根系生物量的有效性

图 3 为 3 个土壤相对含水率梯度下(25%~30%，55%~60%和 85%~90%)，二端子和四端子 2 种结构测定的玉米根系电容与根系生物量的关系。

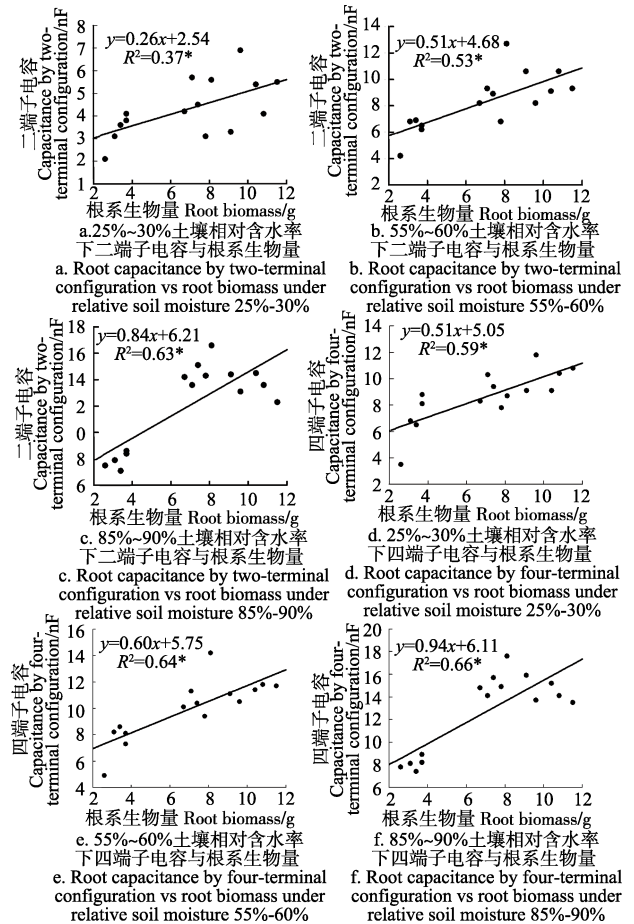


图 3 不同土壤相对含水率下 2 种电极结构测定的玉米根系电容与根系生物量的关系

Fig.3 Relationships between maize root capacitance measured by two terminal configurations and root biomass under different relative soil moisture

由图 3 可知，土壤相对含水率为 85%~90%时，2 种结构下玉米根系电容表征根系生物量的有效性相近（二端子结构： $R^2=0.63$ ， $P < 0.05$ ；四端子结构  $R^2=0.66$ ， $P < 0.05$ ）；随着土壤相对含水率减小至 55%~60%和 25%~30%，2 种结构下根系电容表征根系生物量的有效性均降低。与四端子结构相比，二端子结构下玉米根系电容表征根系生物量的有效性急剧下降，在土壤相对含水率为 25%~30%时表现最为明显（ $R^2=0.37$ ， $P < 0.05$ ）。这是由于土壤含水率较低时，二端子结构中电极接触效应较高，即减小根系电容测量的有效性更加显著，从而使测定的根系电容表征根系生物量的有效性较低。消除了电极接触效应的四端子结构，其根系电容表征根系生物量

的有效性随土壤含水率降低呈现轻微减小,这可能与“根-土”的有效接触面减小有关<sup>[30-32]</sup>。Dalton<sup>[12]</sup>提出的根系概念模型中,假设根系的任一级侧根均可看作为一个轴向的、对称的、均匀的圆柱形电容器,其中,根系木质部视为内电极,皮层组织视为介电质,与根表皮相接触的土壤溶液视为外电极,当外电场和介电质一定时,根系电容取决于内外两柱形电极的正对面积<sup>[33]</sup>,即根系表层与土壤溶液的接触面积,这一方面取决于土壤水分状况,另一方面取决于根系自身性状特征,如根生物量、根长和根表面积等。当根系性状特征一定时,土壤含水率减小导致内外两柱形电极的正对面积减小,因此储存在根系表层的电荷不能有效地反映根系性状特征。

### 3 结 论

1) 二端子结构下根系电容观测值较四端子结构小,在土壤相对含水率为25%~30%时,2种结构下根系电容间拟合度 $R^2$ 为0.66;在土壤相对含水率为55%~60%和85%~90%下,2种结构下根系电容间拟合度 $R^2$ 为0.93和0.99。总体而言,随着土壤含水率减小,二端子结构中电极接触效应增大,在土壤相对含水率为25%~30%下最为明显。

2) 土壤相对含水率为85%~90%时,2种结构下玉米根系电容表征根系生物量的有效性相近(二端子结构: $R^2=0.63$ , $P<0.05$ ;四端子结构: $R^2=0.66$ , $P<0.05$ ),但随着土壤含水率减小,与四端子结构相比,二端子结构下玉米根系电容表征根系生物量的有效性急剧下降,在土壤相对含水率为25%~30%时最为明显( $R^2$ 从0.59降低到0.37, $P<0.05$ )。研究认为,土壤含水率越低,与二端子结构相比,四端子结构下根系电容表征根系生物量的有效性越好。

该试验在一定程度上揭示了土壤含水率较低时,与二端子结构相比,四端子结构测定的根系电容表征根系生物量的有效性较高,但该试验材料单一,样本容量较少,因此关于四端子结构在不同试验材料如草本、灌木和乔木中的应用有效性研究将有利于进一步补充和完善电容法快速无损检测植物根系技术。

#### [参 考 文 献]

- [1] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J].农业工程学报,2013,29(10): 153-159.  
Li Qiang, Liu Guobin, Xu Mingxiang, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(10): 153-159. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关理化性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(17): 105-112.  
Li Qiang, Liu Guobin, Xu Mingxiang, et al. Effect of seasonal freeze-thaw on soil anti-scourability and its related physical property in hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 105-112. (in Chinese with English abstract)

- [3] 王巧利,贾燕锋,王宁,等.黄土丘陵沟壑区自然恢复坡面植物根系的分布特征[J].水土保持研究,2012,19(5): 16-22.  
Wang Qiaoli, Jia Yanfeng, Wang Ning, et al. Distribution of root on vegetation recovery slope in the hilly and gully Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 16-22. (in Chinese with English abstract)
- [4] 燕辉,刘广全,李洪生.青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度变化[J].应用生态学报,2010,21(11): 2763-2768.  
Yan Hui, Liu Guangquan, Li Hongsheng. Changes of root biomass, root surface area, and root length density in a *Populus cathayana* plantation[J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2763-2768. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李克新,宋文龙,朱良宽.作物根系原位观测识别新方法综述[J].浙江农业学报,2011,23(4): 851-856.  
Li Kexin, Song Wenlong, Zhu Liangkuan. Review on new methods of observation and recognition in situ for crop roots[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(4): 851-856. (in Chinese with English abstract)
- [6] Dietrich R C, Bengough A G, Jones H G, et al. Can root electrical capacitance be used to predict root mass in soil?[J]. Ann Bot, 2013, 112(2): 207-222.
- [7] Aulen M, Shipley B. Non-destructive estimation of root mass using electrical capacitance on ten herbaceous species[J]. Plant Soil, 2012, 355(1): 41-49.
- [8] 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 Biosyst, 2010, 144(2): 479-483.
- [9] Kendal W A, Pederson G A, Hill R R. 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.
- [10] Tim E, Wayne M, Keryn P, et al. Electrical capacitance as a rapid and non-invasive indicator of root length[J]. Tree Physiol, 2013, 33(1): 3-17.
- [11] Amato M, Basso B, Celano G, et al. In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging[J]. Tree Physiol, 2008, 28(10): 1441-1448.
- [12] Dalton F N. In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods[J]. Plant and Soil, 1995, 173(1): 157-165.
- [13] Tim E, Wayne M, Laimonis K. Electrical capacitance of bean (*Vicia faba*) root systems was related to density-A test for the Dalton Model[J]. Plant Soil, 2012, 366(1): 575-584.
- [14] Dvorák M, Cernohorská J, Janáček K. Characteristics of current passage through plant tissue[J]. Biol Plant, 1981, 23(4): 306-310.
- [15] 张正,刘国彬,李强,等.电容法估测植物根系生物量研究[J].草地学报,2015,23(2): 383-386.  
Zhang Zheng, Liu Guobin, Li Qiang, et al. Estimating plant root biomass using electrical capacitance method[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(2): 383-386. (in Chinese with English abstract)
- [16] Preston G M, McBride R A, Bryan J, et al. Estimating root mass in young hybrid poplar trees using the electrical capacitance method[J]. Agroforest Syst, 2004, 60(3): 305-309.
- [17] Walker J M, Electrical A C. Resistance and capacitance of *Zea mays*[J]. Plant Soil, 1965, 23(2): 270-274.
- [18] Aubrecht L, Stanek, Z, Koller J. Electrical measurement of the absorption surfaces of tree roots by the earth impedance method: 2. Verification based on allometric relationships and root severing experiments[J]. Tree Physiol, 2006, 26(9): 1105-1112.

- [19] Van B J, Smith M E, Zobel R W. Estimating root mass in maize using a portable capacitance meter[J]. *Agron J*, 1998, 90(4): 566–570.
- [20] Dietrich R, Bengough A G, Jones H G, et al. A new physical interpretation of plant root capacitance[J]. *J Exp Bot*, 2012, 63(17): 6149–6159.
- [21] Tsukahara K, Yamane K, Yamaki Y, et al. A non-destructive method for estimating the root mass of young peach trees after root pruning using electrical capacitance measurements[J]. *J Agric Meteorol*, 2009, 65(2): 209–213.
- [22] Tim E, Wayne M, Keryn P, et al. Electrical capacitance as a rapid and non-invasive indicator of root length[J]. *Tree Physiol*, 2013, 33(1): 3–17.
- [23] 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.
- [24] Cao Y, Repo T, Silvennoinen R, et al. Analysis of the willow root system by electrical impedance[J]. *J Exp Bot*, 2011, 62(1): 351–358.
- [25] Cao Y, Repo T, Silvennoinen R, et al. An appraisal of the electrical resistance method for assessing root surface area[J]. *J Exp Bot*, 2010, 61(9): 2491–2497.
- [26] 李强, 曹杨, 张正, 等. 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 Qiang, Cao Yang, Zhang Zheng, et al. Review on the application of bioimpedance methods in plant root biology research[J]. *Plant Science J*, 2016, 34(3): 488–495. (in Chinese with English abstract)
- [27] Amato M, Bitella G, Rossi R, et al. Multi-electrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone[J]. *Eur J Agron*, 2009, 31(4): 213–222.
- [28] Rajkai K, Vegh K R, Nacsá T. Electrical capacitance as the indicator of root size and activity[J]. *Agrokémia és Talajtan*, 2002, 51(1): 89–98.
- [29] Wu Shiyang, Zhou Qiyong, Wang Gang, et al. The relationship between electrical capacitance-based dielectric constant and soil water content[J]. *Enviro Earth Sci*, 2011, 62(5): 999–1011.
- [30] Repo T, Laukkanen J, Silvennoinen R. Measurement of the tree root growth using electrical impedance spectroscopy[J]. *Silva Fennica*, 2005, 39(2): 159–166.
- [31] Aubrecht L, Stanek Z, Koller J. Electrical measurement of the absorption surfaces of tree roots by the earth impedance method: 2. Verification based on allometric relationships and root severing experiments[J]. *Tree Physiol*, 2006, 26(9): 1105–1112.
- [32] Cermák J, Ulrich R, Stanek Z, et al. Electrical measurement of tree root absorbing surfaces by the earth impedance method[J]. *Tree Physiol*, 2006, 26(9): 1113–1121.
- [33] Daian G, Taube A, Birnboim A, et al. Modeling the dielectric properties of wood[J]. *Wood Sci Technol*, 2006, 40(3): 237–246.

## Four-terminal configuration enhancing estimation efficiency of root biomass by electrical capacitance method

Zhang Zheng<sup>1</sup>, Liu Guobin<sup>1,2\*</sup>, Li Qiang<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China)

**Abstract:** Validity measurement of electrical capacitance across a root system is the precondition for using electrical capacitance method to estimate root biomass. When using two-terminal configuration to measure root electrical capacitance, the parasitic electrode contact effect would affect validity measurement of electrical capacitance. The primary goal of this study was to evaluate the validity of root electrical capacitance by four-terminal configuration compared with two-terminal configuration to measure root biomass. Maize (*Zea mays*) were grown in pots containing a loessial soil. Each pot contained one individual and its root system was measured under electrode configuration of two-terminal and four-terminal. The measurements were conducted at stage of jointing, tasseling and maturity of maize, respectively. A total of 5 plants were measured for each stage. Electrical capacitance of the root system was determined using a portable alternating current (AC) digital capacitance bridge (MT-4080A) with a pure sine wave excitation at a frequency of 1 kHz. Home-made stainless, low resistance electrode (5 cm in length and 2 cm in diameter), which was sharpened at one end and pushed into the soil vertically, was used to connect root system and capacitance bridge. Before each measurement, the relative soil moisture of pots was controlled to 25%–30%, 55%–60% and 85%–90%, respectively. Soil water content of pots was measured and controlled by TDR-300 combined with the weighing method. In measurements under two-terminal configuration, one electrode was inserted through the center of the stem about 1 cm from crown, and the other one was inserted into the soil about 5 cm from the base. Compared with the two-terminal configuration, the four-terminal configuration used a further 2 electrodes which were placed above the stem electrode and further from the base. After measurement of each pot, the roots were harvested and the biomass was determined. The results showed that soil water content had an evident effect on electrode contact effect. The electrode contact effect was presented and root electrical capacitance of maize measured by the two-terminal configuration was smaller than the four-terminal configuration. The electrode contact effect increased with the decrease in soil water content and it was the most obvious at the relative soil moisture of 25%–30%. In detail, compared with the two-terminal configuration, the root electrical capacitance determined by the four-terminal configuration increased by 1.04, 0.21 and 0.04 times at relative soil moisture of 25%–30%, 55%–60% and 85%–90%, respectively. Additionally, the validity of root electrical capacitance characterizing root biomass was similar under two configurations at the relative soil moisture of 85%–90% (two-terminal configuration:  $R^2=0.63$ ,  $P<0.05$ ; four-terminal configuration:  $R^2=0.66$ ,  $P<0.05$ ). However, compared with the four-terminal configuration, the validity of root electrical capacitance characterizing root biomass under the two-terminal configuration declined sharply when soil water decreased, and it was most pronounced at the relative soil moisture of 25%–30% ( $R^2$  decreased from 0.59 to 0.37,  $P<0.05$ ). In conclusion, compared with the two-terminal configuration, the validity of root electrical capacitance characterizing root biomass under the four-terminal configuration was better when soil water content was lower.

**Keywords:** soil moisture; biomass; roots; electrical capacitance; two-terminal configuration; four-terminal configuration; electrode contact effect