

# 基于核磁共振成像技术的作物根系无损检测

张建锋<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1,2</sup>, 龚向阳<sup>3</sup>, 何勇<sup>1\*</sup>, 刘飞<sup>1</sup>

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 爱尔兰国立都柏林大学生物系统工程系, 都柏林 Dublin 4; 3. 浙江大学医学院附属邵逸夫医院放射科, 杭州 310016)

**摘要:** 作物根系三维构型对于作物养分吸收具有十分重要的作用。该研究选用玉米、大豆和茄子 3 种常见作物根系作为研究对象, 利用核磁共振成像 (MRI) 技术对其根系三维构型进行原位无损检测。试验研究和分析了生长介质、作物根系类型以及三维重建方法对作物根系成像的影响, 并探讨了应用 MRI 技术快速无损进行作物根系研究的优势和不足。研究表明, 应用 MRI 技术进行作物根系三维构型的研究是可行的。该研究为作物根系三维构型的定量描述和分析提供了一种新的途径。

**关键词:** 核磁共振, 无损检测, 三维构型, 根系

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.08.028

中图分类号: S124<sup>+</sup>.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-08-0181-05

张建锋, 吴迪, 龚向阳, 等. 基于核磁共振成像技术的作物根系无损检测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 181-185. Zhang Jangfeng, Wu Di, Gong Xiangyang, et al. Non-destructive detection of plant roots based on magnetic resonance imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 181-185. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

根系是作物从生长介质中获取各种养分和水分的重要器官。由于作物生长介质中各种养分和水分的分布通常是非均匀的, 作物对各种养分和水分的利用取决于根系的分布状况——根系三维构型。已有研究表明, 根系三维构型对于一些扩散性差的养分如磷、氮等的吸收具有重要的影响<sup>[1-3]</sup>。因此, 对作物根系的三维构型进行定量测定和分析是研究作物根系生长和养分吸收利用的重要手段之一<sup>[4-5]</sup>。由于作物根系大都生长在土壤中, 而土壤又是非透明介质, 造成对作物根系的研究十分困难。传统的根系研究方法包括挖掘法、土钻法、根室法、微根管法和同位素法等<sup>[6]</sup>, 大都具有破坏性, 对作物的生长发育有一定的影响, 且在实施测量过程中易于产生误差。近年来, 许多学者利用计算机图形学技术, 构建作物根系的三维显示模型, 实现了作物根系的三维构型可视化<sup>[7-9]</sup>。但是, 已有研究多基于作物根系的形态特征及适宜生长状况, 并未考虑实际生长环境对作物根系三维构型的影响。X 射线计算机层析成像 (X-ray computed tomography, X-CT) 和核磁共振成像 (magnetic resonance

imaging, MRI) 等先进技术的发展, 为实现作物根系的全面无损检测提供了有效的手段和方法。国际上 Heeraman 等利用 X-CT 技术对生长在 PVC 容器中 14 d 大小的豆科作物实现了根系的原位定量研究, 并将测量结果与实测结果进行了比较<sup>[10]</sup>。Anders Kaestner 等利用 4 个月大生长在天然冰碛土的桤木根 X-CT 数据对根系网络进行了重建, 并与真实根系的测量数据进行了比较<sup>[11]</sup>。MacFall 等利用 MRI 对生长 8 d 的大豆根系进行研究, 获得了较为清晰的三维图像<sup>[12]</sup>。国内罗锡文等利用多层面螺旋 X-CT 设备对植物根系进行了原位可视化的开创性研究<sup>[13-15]</sup>, 但是获取的 X-CT 断层序列图像中非根物质所形成的噪声比较多, 根系本身的灰度分布与其周围介质的灰度分布之间并没有明显的分界线, 而是相互交叉、相互重叠<sup>[16]</sup>, 造成后期处理困难。核磁共振作为一种更先进的成像技术, 在成像速度、二维图像最小分辨率和层面厚度选择等方面与 X-CT 相比均有较大的优势。X-CT 是单参数成像, 而 MRI 则是多参数成像, 可提供多种对比度图像。另外, MRI 成像与被测物质的水分含量有关, 可以从根本上克服 X-CT 研究根系成像时物质密度相接近图像难以区分的缺点。但是, 目前利用 MRI 对作物根系进行原位无损检测的研究还较少。本文利用 MRI 对作物根系进行原位无损检测研究, 系统分析影响作物根系成像的各种因素, 从而为进一步深入开展作物根系三维构型的定量描述和分析打下基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

选用 3 种具有代表性的作物 (玉米、大豆和茄子) 作为研究对象, 其中玉米属于禾本科植物, 根系为典型

收稿日期: 2011-09-20 修订日期: 2012-02-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2011AA100705, 2012AA101903); 国家自然科学基金项目 (31071332); 浙江省自然科学基金重点项目 (Z3090295); 浙江省科学技术创新团队项目 (2009R50001)。

作者简介: 张建锋 (1982-), 男, 河南漯河人, 博士, 研究方向为机器视觉和光谱成像技术。杭州 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 310058。Email: zhang-jfeng@163.com

\*通信作者: 何勇 (1963-), 男, 教授、博士生导师, 主要从事数字农业与 3S 技术方面的研究。杭州 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 310058。Email: yhe@zju.edu.cn

须根系；大豆和茄子属于双子叶植物，根系为典型直根系。所有根系样本均取自浙江大学农场实验田，生长介质为普通壤土，采用一般的田间管理方法。其中大豆品种为浙农 8 号，生长期为 30 d；玉米品种为浙大糯玉 2 号，生长期为 17 d；茄子品种为紫秋，生长期为 17 d。实验中采用普通壤土、南方典型红壤土和自制砂土 3 种土壤作为作物的生长介质。所有作物均在采挖后，立即进行根系冲洗、人工测量和拍照，后移植到盛有生长介质的塑料花盆中，3 种作物和生长介质交叉组合一共制成实验用样 9 个（另外，用普通壤土制成湿壤和干壤样本各 3 个）。所有样本放置 3d，待植物在生长介质中成活后进行实验。实验前，为利用头线圈进行根系核磁共振成像，将所有作物的茎部以上剪除，只保留土壤以下的根系。此外，为了增强图像的对比度，获得较好的根系图像，对生长介质水分做适当的控制，整个实验过程中：除湿壤样本（体积含水率为 40%）和干壤样本（体积含水率为 5%）之外，剩余所有样本的生长介质体积含水率均控制在 $(25\pm 2)\%$ 。由于生长介质中所含的水分相对较少，实验过程中塑料花盆均用自制的水袋环绕，以增强核磁共振的信号强度。

## 1.2 试验仪器和软件

试验采用 0.35TMRI 永磁型核磁共振成像仪（西门子集团，德国）和 1.5TMRI 超导型核磁共振成像仪（通用集团，美国）对根系样本进行扫描。图像分析采用 Osiris 医学图像处理软件（日内瓦大学，瑞士）以及核磁共振仪配套的图像处理工作站。

## 1.3 试验方法

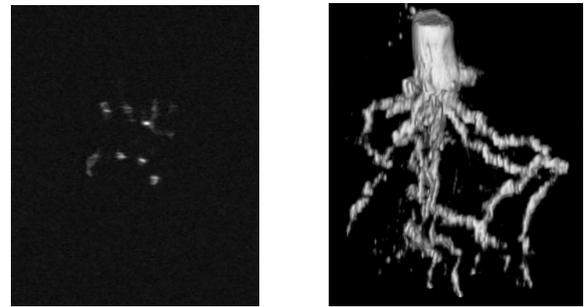
以头线圈作为测试线圈，采用头部扫描模式对根系样本进行 MRI 扫描。通过调节核磁共振参数，获取清晰的根系样本断层序列图像。将获得的断层序列图像数据以 DICOM 格式保存，具体的分析过程为：1) 利用 Osiris 软件和 MRI 配套的图像处理工作站对其进行分析，研究生长介质、介质体积含水分率、作物根系类型对作物根系成像的影响（各影响因素分析中均采用同一种图像重建方法）；2) 利用图像处理工作站中的三维重建方法，对样本根系进行三维重建；3) 根系三维成像结果与实际测量获取的根系数据相比较，并评价三维重建的效果。

## 2 结果与分析

### 2.1 成像参数与图像获取

MRI 可调整的参数很多，对各种参数进行不同的调整可以得到不同的成像效果。通过合理选择脉冲序列，以及正确调整成像参数，可以获得信噪比较好的图像。在试验中，经过多次调整，T2 加权成像被认为是最优成像方法。所有的根系样本均采用该方法进行扫描，测试参数设置为：重复时间（TR）4 400 ms，回波时间（TE）28 ms；层厚/层距（Thk/sp）2 mm/1.5 mm；视野（FOV）20 cm×20 cm；采集次数（NAQ）2 次。图 1 为所获得的玉米根系断层序列图像和三维重建图像：图 1a 为玉米根系断层图像（第 8 层），图 1b 为三维算法 Volume Rendering（VR）重建的玉米根系图像。其中，图 1a 中突出的白色

亮点区域为玉米根系 MRI 成像，由于根系的直径不同，所形成亮点的亮度不同。另外，在玉米根系的三维图像中，如图 1b 所示，直径较细小的根系没有形成完整的根系图像，而是形成一些不连续的断点或小的亮点。



a. 玉米根系断层图像（第 8 层）  
b. 玉米根系三维重建图像

图 1 玉米根系图像  
Fig.1 Corn root images

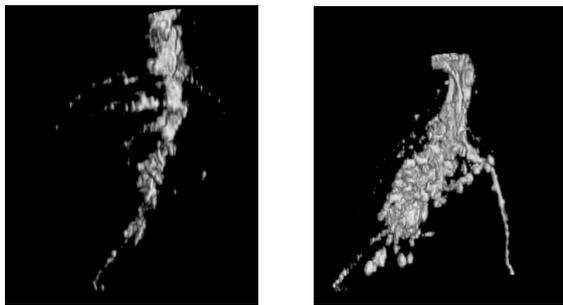
## 2.2 影响作物根系成像因素的分析

### 2.2.1 生长介质

为了分析生长介质对作物根系成像的影响，对体积含水率为 $(25\pm 2)\%$ 的 3 种土壤作为生长介质的同种作物根系样本进行 MRI 成像研究。成像结果表明：在 MRI 成像中，普通壤土、南方典型红壤土和砂土 3 种生长介质所形成的噪声均较小。图 1b 所示为普通壤土作为生长介质的玉米根系图像，可以看出作物根系灰度值与生长介质灰度值之间差异明显，2 者之间不存在严重的重叠和交叉现象，因而土壤与根系之间能很好地区分。另外，3 种生长介质的灰度值比较接近，说明生长介质对作物根系的 MRI 成像没有明显影响，研究作物根系无损检测时，MRI 技术比 X-CT 技术更具有优势。这是由 2 种技术不同的成像原理造成的：X-CT 是以 X 射线为信息载体，通过检测穿过物体的 X 射线衰减系数的程度差异来反映物体内部不同位置组成成分和密度的差异，进而利用计算机重建物体内部影像的三维数字化成像技术。如果被测根系密度与土壤密度相接近，X-CT 成像将会出现较多的噪声，造成后期处理时根系分离的困难。据罗锡文等人报道，大豆根系与细砂介质间的密度非常接近，造成成像质量很差，使得图像难以有效分割<sup>[13]</sup>。而 MRI 是利用水分子中的氢核（即质子）磁共振信号进行成像的，试验时生长介质的体积含水率为 $(25\pm 2)\%$ ，而作物根系的体积含水率远大于此，因而避免了上述情况的发生。

另外，为了分析生长介质中不同体积含水率对作物根系成像的影响。比较了以普通壤土作为生长介质的的大豆根系湿壤（即土壤体积含水率 40%）和干壤（即土壤体积含水率 5%）2 种样本的 MRI 成像，成像结果表明，土壤的体积含水率对根系成像有明显的影。2 种样本的三维重建结果如图 2 所示，可以看出 2 者的差异比较明显。体积含水率较多的湿壤样本中，大豆根系的主要侧根能形成完整连续的根系图像，如图 2b。而对于体积含水率较少的干壤样本，大豆根系的主要侧根不能形成完整的根系图像，而是一系列不连续的断点，如图 2a。但

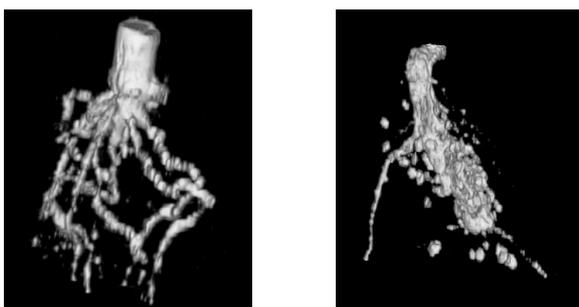
是，实际测量的结果表明 2 个根系样本的主要侧根直径十分接近，说明根系生长介质中的体积含水率低时不利于根系核磁共振成像。



a. 干壤 (体积含水率 5%)      b. 湿壤 (体积含水率 40%)  
图 2 不同体积含水率的生长介质中大豆根系重建图像  
Fig.2 Reconstructed images of soybean root in media with different moisture content

### 2.2.2 作物根系类型

为了分析作物根系类型对成像的影响，在体积含水率同为 $(25 \pm 2)\%$ 的条件下，研究了以普通壤土作为生长介质的玉米、大豆、茄子 3 种根系样本的 MRI 成像。成像结果表明：玉米根系的成像效果较好，茄子的次之，大豆的成像效果欠佳。玉米和大豆的三维重建图像如图 3 所示，可以看出 2 者之间有明显的差异。图 3a 所示的玉米根系图像可以得到清晰的显示，而大豆则较差一些。而实际测量结果表明，大豆和玉米的主要根系直径相接近，造成三维重建图像差异的原因是：大豆根系含有较多的根瘤，许多根瘤颗粒形成较为明显的伪影附着在大豆根系上，给后期的三维重建处理造成困难，导致图像重建时根系信息丢失较多。在重建后的图像中，根瘤形成块状物附着在大豆根系上，造成根系图像难以辨认，如图 3b 所示。



a. 玉米根系重建图像      b. 大豆根系重建图像  
图 3 不同作物根系三维图像

Fig.3 Three-dimensional images of plant roots

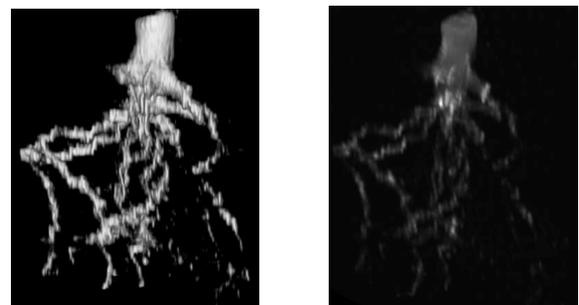
另外，玉米属于禾本科作物，而大豆属于双子叶作物，成像差异是否与 2 种作物根系组织结构差异有关需待进一步验证。

对于成像效果较好的玉米根系，从所获得的三维图像中可以清晰分辨出 2 mm 及其以上的细根系。尽管与已有利用 X-CT 研究根系无损检测的报道相比，我们的三维重建结果最小分辨率显得有些低，但是实验中利用 MRI 所获取的断层序列图像中根系最小分辨率可以达到零点

几个毫米。这说明三维成像中根系分辨率小是由于医学图像处理工作站中的图像处理算法不太适用于作物根系重建造成的。另外，根据我们的实验，1.5TMRI 仪的成像结果好于 0.35TMRI 仪的成像结果，所以高场强 MRI 仪可以增强图像的信噪比，能否采用更高场强的核磁共振仪研究作物根系有待于进一步探索。

### 2.2.3 三维重建方法

为了分析不同的三维图像重建方法对作物根系图像重建的影响，以体积含水率 $(25 \pm 2)\%$ 的普通壤土作为生长介质的玉米根系样本为研究对象，对所获得的 MRI 断层序列图像，采用图像处理工作站中常用的三维成像方法进行三维重建。所采用的三维重建方法包括：最大密度投影 (maximum intensity projection, MIP)、容积再现技术 (volume rendering, VR) 和多平面重构 (multi-planar reconstruction, MPR) 3 种。通过分析比较三维重建的结果可以看到，3 种方法中以 VR 重建方法获取的图像相对比较好，MIP 次之，MPR 最差。VR 和 MIP 的图像重建结果如图 4 所示



a. VR 算法重建图像      b. MIP 算法重建图像  
图 4 不同图像重建方法所得到的玉米根系三维图像

Fig.4 Three-dimensional images of corn roots by different reconstructed methods

比较 2 幅图像，可以发现 VR 重建图像 (图 4a) 可以获得更为清晰和完整的玉米根系，重建后的三维图像更接近于根系的实际生长情况，由此可以获得更多的根系生长信息；另外，一些直径较细小的玉米根系所形成的细小线段和断点可以在 VR 重建图像中得到显示，而在 MIP 重建图像 (图 4b) 中却无法得到显示。

与已有报道<sup>[13]</sup>的利用 X-CT 数据重建植物根系结果相比较，可以看出同样的重建算法，利用核磁共振获取的根系数据的重建效果要优于 X-CT 数据的重建效果。获取的三维重建成像中，非根系物质没有形成接近作物根系的伪影，图像中作物根系能清晰地表达。这与核磁共振的断层序列图像中生长介质引起的噪声较少、作物根系和生长介质灰度值差别较大有关。

但是，对比玉米根系的三维重建图像和实际根系图像，可以发现三维重建丢失许多较细小的根系，如图 5 所示。

重建图像只能显示主要的侧根，其他相对较细小的根系不能得到显示。另外，通过测量对比发现：直径在 2 mm 以下，但比较接近 2 mm 的根系显示为断点组成的

虚线,远小于 2 mm 的则没有任何显示。缺乏有效的针对作物根系重建的分割提取算法是其重要原因。因此,开发专门针对作物根系生长系统的图像处理算法和三维重建算法,是利用 MRI 设备进行作物根系原位无损检测的关键。



a. 三维重建图像  
b. 根系真实图像  
图 5 玉米根系的三维重建图像与根系真实图像

Fig.5 Three-dimensional reconstructed and real image of corn root

### 3 结 论

利用 MRI 对作物根系进行研究,分析生长介质、作物根系类型以及三维重建方法对作物根系成像的影响。为进一步利用 MRI 技术进行作物根系三维构型的定量描述和分析研究打下基础。

1) 生长介质对作物根系的 MRI 成像没有明显影响。根系周围生长介质中产生的噪声很少,生长介质的灰度值与作物根系灰度值之间差异明显,2 者之间不存在严重的重叠和交叉现象。另外,生长介质的体积含水率对根系成像有明显的影响。

2) 作物根系类型对 MRI 成像有一定的影响。实验中玉米、茄子和大豆 3 种作物根系的 MRI 成像中,玉米比较好,大豆根系成像效果欠佳。

3) 3 种常用的医学成像方法中,容积再现技术(VR)的成像效果较好,最大密度投影(MIP)次之。但是重建过程中根系信息丢失较多,且重建后根系的最小分辨率不理想。因此,需要开发专门的与作物根系生长系统相适应的图像处理和三维重建算法。

#### [参 考 文 献]

[1] 刘灵,廖红,王秀荣,等.不同根构型大豆对低磷的适应性变化及其与磷效率的关系[J].中国农业科学,2008,41(4):1089-1099.  
Liu Ling, Liao Hong, Wang Xiurong, et al. Adaptive changes of soybean genotypes with different root architectures to low phosphorus availability as related to phosphorus efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(4): 1089-1099. (in Chinese with English abstract)

[2] Lynch J P, Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiol, 1995, 109: 7-13.

[3] 彭云峰,张吴平,李春俭.不同氮吸收效率玉米品种的根系构型差异比较:模拟与应用[J].中国农业科学,2009,42(3):843-853.

Peng Yunfeng, Zhang Wuping, Li Chunjian. Relationship between nitrogen efficiency and root architecture of maize plants: simulation and application[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3): 843-853. (in Chinese with English abstract)

[4] Craine J M, Wedin D A, Chapin F S, et al. Relationship between the structure of root systems and resource use for 11 North American grassland plants[J]. Plant Ecology, 2002, 165: 85-100.

[5] 朱同林,方素琴,李志垣,等.基于图像重建的根系三维构型定量分析及其在大豆磷吸收研究中的应用[J].科学通报,2006,51(16):1885-1893.  
Zhu Fanglin, Fang Suqin, Li Zhitan, et al. Quantitative analysis of root architecture based on three-dimensional image reconstruction and application of study phosphorus uptake in soybean[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 1885-1893. (in Chinese with English abstract)

[6] W.伯姆.根系研究法[M].北京:科学出版社,1985:3-7.

[7] 徐其军,汤亮,顾东祥,等.基于形态参数的水稻根系三维建模及可视化[J].农业工程学报,2010,26(10):188-194.  
Xu Qijun, Tang Liang, Gu Dongxiang, et al. Architectural parameter-based three dimensional modeling and visualization of rice roots[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 188-194. (in Chinese with English abstract)

[8] 钟南,罗锡文,秦琴.基于生长函数的大豆根系生长的三维可视化模拟[J].农业工程学报,2008,24(7):151-154.  
Zhong Nan, Luo Xiwen, Qin Qin. Modeling and visualization of three-dimensional soybean root system growth based on growth functions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(7): 151-154. (in Chinese with English abstract)

[9] 赵春江,王功明,郭新宇,等.基于交互式骨架模型的玉米根系三维可视化研究[J].农业工程学报,2007,23(9):1-6.  
Zhao Chunjiang, Wang Gongming, Guo Xinyu, et al. 3D visualization of corn root system based on interactive framework model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(9): 1-6. (in Chinese with English abstract)

[10] Heeraman D A, Hopmans J W, Clausnitzer V. Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-ray Computed Tomography[J]. Plant and Soil, 1997, 189(2): 167-179.

[11] Kaestner A, Schneebeli M, Graf F. Visualizing three-dimensional root networks using computed tomography[J]. Geoderma, 2006, 136(1/2): 459-469.

[12] Mac Fall J S. Visualization of root growth and development through magnetic resonance imaging[A]. Current Topics in Plant Physiology: An American Society of Plant Physiologists Series, 1998, 18: 67-77.

[13] 罗锡文,周学成,严小龙,等.基于 X-CT 技术的植物根系原位形态的可视化研究[J].农业机械学报,2004,35(2):104-106,133.  
Luo Xiwen, Zhou Xuecheng, Yan Xiaolong, et al. Visualization of plant root morphology in situ based on x-ray

- ct imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 104—106, 133. (in Chinese with English abstract)
- [14] 周学成, 罗锡文. 采用区域生长算法分割植物根系原位 CT 图像的改进算法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12): 122—125. Zhou Xuecheng, Luo Xiwen. An improved region growing algorithm for the ct images segmentation of plant root[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 122—125. (in Chinese with English abstract)
- [15] 周学成, 罗锡文, 严小龙, 等. 基于遗传算法的原位根系 CT 图像的模糊阈值分割[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 681—687. Zhou Xuecheng, Luo Xiwen, Yan Xiaolong, et al. A fuzzy thresholding segmentation for plant root ct images based on genetic algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 681—687. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhou Xuecheng, Luo Xiwen, Yan Xiaolong. Research on segmenting algorithm for MSCT images of plant root system based on its morphological feature[C]// 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting, Ottawa, Canada, 2004: 4141—4148.

## Non-destructive detection of plant roots based on magnetic resonance imaging technology

Zhang Jianfeng<sup>1</sup>, Wu Di<sup>1,2</sup>, Gong Xiangyang<sup>3</sup>, He Yong<sup>1\*</sup>, Liu Fei<sup>1</sup>

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Biosystems Engineering, University College Dublin-National University of Ireland, Belfield, Dublin 4, Ireland; 3. Department of Radiology, Sir Run Run Shaw Hospital, School of Medicine, Zhejiang University, Hangzhou 310016, China)

**Abstract:** Three-dimensional (3-D) root architecture plays an important role in the nutrition absorption for crops. Taking the roots of corn, soybean, and eggplant as study objects, magnetic resonance imaging technology (MRI) technique was used to acquire 3-D architectures of these roots in situ. Various factors affecting the process of MRI were discussed, such as growth medium, root type, and three-dimensional reconstruction methods. Advantages and disadvantages of MRI as a rapid and non-invasive technique for the root architecture research were also discussed. The results show the feasibility of applying MRI technique for the acquisition of 3-D root architectures of crops. This study will be helpful for the further quantitative description and analysis of 3-D root architecture of crops using MRI technique.

**Key words:** magnetic resonance imaging, nondestructive examination, three dimensional computer graphic, plant root