植物学通报 *Chinese Bulletin of Botany* 2007, **24** (6): 695–702, www.chinbullbotany.com

·综述·

植物根构型的定量分析

梁泉, 廖红, 严小龙*

华南农业大学根系生物学研究中心, 广州 510642

摘要 植物根系具有锚定植株、吸收和运输土壤中的水分及养分、合成和贮藏营养物质等重要功能。根构型是根系在土壤中的空间造型和分布。对植物根构型进行定量分析, 有助于人们了解根系结构和根系功能在生态系统中的重要作用。本文对植物根构型的概念及其定量分析研究进展进行了概述, 并介绍了植物根构型的主要研究方法和定量分析技术。

关键词 定量分析, 植物根构型

梁泉, 廖红, 严小龙 (2007). 植物根构型的定量分析. 植物学通报 **24**, 695–702.

根系是土壤和植物的动态界面。植物依靠根系来固定和支撑植物体, 依赖根系吸收土壤中的矿质营养和水分, 并输送到地上部分供其利用。早在18世纪初, 德国的海尔斯(Halls)就开始了对植物根系的研究(程建峰等, 1999)。但由于根系生长环境的复杂性及根系研究方法和定量分析手段的局限性, 使根系的研究相对滞后。此外, 长期以来, 研究者对根系的兴趣和重视程度不够, 也影响了其深入研究。随着人们对根系作用认识的提高和技术手段的进步, 植物根系的研究日益受到重视, 发展了一系列的根系研究方法和定量分析技术, 为研究植物的根构型提供了很大的便利。

1 植物根构型的基本概念

植物根系分为直根系(tap root system)和须根系(fibrous root system)两大类(高信曾, 1982)。近年来, 关于植物根构型(root architecture)的研究不断增加。Lynch (1995)将根构型定义为同一根系中不同类型的根(直根系)或不定根(须根系)在生长介质中的空间造型和分布。根构型是在高级形态学层面上描述作物根系三维立体几何构型的一个综合概念, 包括立体几何构型和平面几何构型(严小龙等, 2000)。立体几何构型是指不同类型的根(直根系)或不定根(须根系)在介质中的三维分布。平面几何构型则是指同一根系的各种根沿根轴二维平面上的分布, 一般用根的数量、长度、表面积以及根毛的数量和长度等参数来描述。目前, 尚无用于定量描述植物根系三维立体几何构型的综合指标, 通常用根分枝状况、侧根分布及根系向地性等参数来间接描述作物的根构型特征。

2 植物根构型定量分析的研究进展

一直以来, 人们试图通过直接或间接的方法定量描述植物根构型, 但是进展缓慢。究其原因, 有以下几点: (1)缺乏较好的研究方式和测定技术。对植物地上部分可以相当精确地观测, 但对于地下根系的测定无论在技术上还是在操作上都十分困难。由于植物根系形态构型十分复杂, 且埋藏在不透明介质中, 难以进行实时定位观察和测定, 因而根形态构型的定量研究一直是世界上根系生物学研究的难点之一。(2)缺乏适宜的综合指标。过去对根系的研究多停留在二维平面的描述上。由于植物根系形态的易变性和空间造型的复杂性, 难以确立一个能客观、全面且准确地描述植物根系三维立体几何构型的综合指标。(3)缺乏便捷的根系处理方法。根

收稿日期: 2007-05-11; **接受日期**: 2007-07-04

基金项目: 国家重大基础研究发展规划项目(No.G2005CB120902)、国家自然科学基金重点项目(No.30230220)和美国 McKnight 基金会国际作物合作研究基金(No.05-780)

* 通讯作者。E-mail: xlyan@scau.edu.cn

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t27-191

系研究通常分成取样和测量两步进行。根的取样和清洗耗时费力, 由于操作不当等原因容易造成损伤, 很难保证根系的完整性; 其次, 根系形态和结构各异, 分枝繁多, 相互遮挡且交叉, 柔软易动, 对根系进行原位测定的难度较大, 很难保证实验结论的可靠性。(4)缺乏地上 - 地下的系统性研究。植物 - 土壤生态系统本身十分复杂, 这种复杂性使得清楚地描述地上部分都难以企及, 更谈不上地下部分了。(5)缺乏认知上的秉承性。长期以来人们通常假定根系对生态系统的贡献要小于地上部分, 因此, 往往忽略根的作用, 由此获得的根系信息相对匮乏。

大约在10多年前, 国外日趋重视对植物根系的专门研究, 从而兴起了一门新的前沿学科——根系生物学(Flores et al., 1998)。随着现代测量和计算机技术的发展及研究方法的突破, 根形态构型的定量研究已成为可能。从根系形态构型的原位观察测定和定量分析,到根构型形成的发育生物学和分子生物学基础, 均开展了系统深入的研究, 并已取得了一定的突破(严小龙等, 2007)。

3 植物根构型的研究方法

3.1 大田土壤种植

3.1.1 自然种植

在大田自然土壤下最能反映作物根系构型的真实性, 早期的根系研究多数是在田间条件下进行的。挖掘法是根系研究的经典方法, 它能提供植物在自然状态下整个根系的清晰情报, 可用于研究根系的根长、大小、色泽和分布等各种特征, 既适用于研究草本和一年生作物(Zhao et al., 2004), 也适于研究乔木和灌木(Vercambre et al., 2003)。但由于操作繁琐, 工作量大, 难以获得完整的根系样品, 对根系大量的、连续的调查与测定也难以完成。

3.1.2 根袋法

在试验地随机设置多个样点, 在样点挖出直径符合要求的孔洞, 然后将套有尼龙袋的铁筒插入孔洞, 将铁筒填满泥土, 然后小心将筒取出。这样在每个样点上就安置了一个尼龙袋。每个袋里按实验要求播种或移栽。取样时, 将尼龙袋连同植株取出, 洗净泥土, 获取完整的根系(蔡昆争等, 2005)。

3.1.3 框栽法

具体做法是在未植稻前预先在田间挖一方形栽培框(如宽50 cm/深150 cm), 然后将多层铁丝网框架埋设在根系可能伸展到的土体内, 之后按原状回填土壤或填入所需实验用土壤和生产介质, 让根系在框架内生长, 待测定时再逐次剔除土壤, 而预先埋设的铁丝网框架则起固定支撑根系的作用, 以此获得田间根系实体的分布状况(郎漫等, 2006)。

3.2 水体漂浮种植

我国著名的遗传育种学家徐冠仁先生曾提出水上种稻的设想, 中国水稻研究所宋祥甫等(1991)在20世纪80年代开展专项研究并获得成功。吴伟明等(2000)利用自然水体研究水稻的根系性状, 采用规格为150 cm×100 cm×5 cm的聚苯乙烯发泡板作种植浮床, 以海绵为固定基质, 行株距20 cm×15 cm、种植孔径4.5 cm, 采用含N、P、K及微量元素, 能缓慢释放的固体混合肥为水上水稻肥料。实验结果表明, 水稻的根系数量、分枝特性和根粗等形态指标以及根系活跃吸收面积百分比等生理指标与水田水稻根系表现出较好的一致性, 而且在整个生育期内的动态变化也表现出较一致的趋势。实验证明利用水上种植方法有望成为今后水稻根系研究的一条简便且有效的新途径。

3.3 温室种植

由于作物田间种植方式耗费人工较多, 操作上也十分繁琐, 所以人们在温室里创造出了许多人工模拟田间条件的种植方式。主要栽培方法有以下几种。

3.3.1 盆栽法

用容器盛土栽培作物以代替田间观测, 即让根系在比田间小得多的容器内生长。采用此法的优点是盆钵易于挪移, 适于同时采用多种基质和设置不同处理, 在互不

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t27-191

干扰的条件下对根系生长进行研究, 而最大的缺点是根系生长易受容器的限制。

3.3.1.1 不分隔式

根据实验目的的不同, 基质可分为土壤、砂(或砾)培和水培3种形式。当使用土壤盆栽方法时, 由于容器内根的走向主要与水分的移动方向保持一致, 因而在带孔的盆钵中, 根会被浓缩在盆钵边缘和底孔土体处, 而在无孔密实的盆钵中, 根主要浓缩在盆钵边缘的土体中。因此, 使用该方法不仅根量多, 且难于进行土、根分离。

3.3.1.2 分室隔网式

分室隔网式实际上就是在盆栽基础上朝水平根面设计实验, 探求不同土壤或养分条件对根系生长的影响, 可分隔为2室或多室。依实验目的的要求, 可以使用土壤、砂或砾3种不同的基质。苏友波等(2003)在研究AM菌根菌侵染三叶草对土壤有机磷的影响时, 实验用盆采用有机玻璃制成的3室盆栽装置, 包括1个中室和2个边室, 中室和边室之间用孔径30 μm的尼龙网隔开, 以将根系生长限制在中室, 而菌根菌可以穿过尼龙网到边室土壤中吸收养分, 达到将根系吸收区与菌根吸收区相区分的目的。

3.3.1.3 分层隔网式

分层隔网式实际上就是在盆栽基础上朝垂直根面设计实验, 探求不同层次土壤的根系分布或分层营养元素对根系生长的影响。依实验目的和要求, 可以使用土壤、砂或砾3种不同的基质。廖红和严小龙(2000)与廖红等(2001)曾采用分层式磷控释砂培系统研究菜豆根构型对低磷胁迫的适应性变化。具体方法是, 将钒土(Al_2O_3, 过28-48目)以1.5%的比例与石英砂混匀后放入25 L的塑料盆中, 从钒土与石英砂的混合物表面开始, 每隔5 cm放入一层孔径为2 mm的玻璃纤维筛网(主根和基根均能顺利穿透), 共分4层, 最后一层为15 cm。利用钒土能有效吸附磷并能缓慢和均匀释放有效磷的特性, 控制介质对有效磷的供应。根系收获时可以分层计算。

3.3.2 土柱法

将工程塑料硬管立于深土坑或地下室中, 管口与地面齐平, 内装按实验需要所配制的配合土壤(由蛭石、细沙和细土组成)。此法实际是揉合了容器法优点的挖掘法, 在作物根系研究上应用较多。

3.3.3 根室法

根室(rhizotron)为研究植物根系提供了便捷的设施条件。华南农业大学根系生物学中心自行设计建造的根室-温室复合体是国内外首创的根系原位观测和定量分析系统。该系统主要由作物地上生长部分、作物根系生长部分和研究、观察等部分组成, 并设置了两类种植槽: 矩形种植槽和圆形透明种植柱。矩形种植槽深为2.3 m, 土壤部分深为1.6 m, 种植槽宽为1.5 m, 长为9 m, 采用钢筋混凝土结构, 在矩形种植槽长向的两个竖直面上设置6组孔以安装玻璃观测管, 每组孔由排列于不同高度而且呈一定倾斜角度的3个孔组成, 使用透明观察管、摄像机和高清晰数字图像等组成的微根管技术设备, 可以借助这些孔道对植物根系生长进行全程观测。圆形透明种植柱外围材料采用有机玻璃制造, 在地下室顶板上设置圆形孔洞, 种植槽穿过地下室顶板固定在地面上, 种植槽的直径为40 cm, 高150 cm, 下部为圆锥形, 在圆锥的端部设置开关, 控制种植槽中水的含量, 透明管种植柱的主要作用是可以在作物生长过程中对根的生长情况进行全方位观察和记录(闫健和谢小妍, 2006)。

3.3.4 雾培法

雾培法(aeroponic technique)最早由Cater(1942)提出, 20世纪80年代经国际水稻所发展而成(白书农和肖翎华, 1986)。这个培养系统由1个直径约90 cm的桶和一套自控的输液与喷雾系统组成。桶顶盖有夹板, 植株用苯乙烯泡沫块固定, 生长在夹板的孔中。孔径5 cm, 孔距7 cm, 以免板下悬长在桶中的根缠在一起。每个泡沫块直径5 cm, 有1个2.1 cm的中心孔, 底部包一块塑料布。稻根悬在桶顶, 容器中的营养液经装在桶底的喷嘴形成雾状不断被喷到稻根上。多余的营养液又

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t27-191

滴回到桶底容器中而得到回收。此法与水培法的不同之处是氧气供应充足, 根部能滋生大量的根毛, 而水培法因容器中氧的供应受限, 根部通常不着生根毛。

3.3.5 营养液纸袋培养

营养袋纸培系统由华南农业大学根系生物学中心首创(廖红和严小龙, 2000)。该系统由 24 cm×30 cm 蓝色无磷吸水纸(美国 Anchor Paper 公司)、具有 0.5 mm 孔径均匀小孔的聚乙烯塑料袋、支撑架、营养液以及室内控温、控光系统组成。催芽后的种子先放入竖立的发芽纸筒上培养 2-3 天, 然后转移到营养袋纸培系统。该系统能使根系正常生长, 同时将根构型原位固定在二维平面上, 对根系生长和二维构型的观测十分方便和直观。

4 植物根构型的定量分析技术

早期人们对根系的研究主要是通过直接或间接的测量方法获得根形态的二维平面参数。20 世纪 90 年代以后, 人们试图应用拓扑学理论将三维根构型分解成二维根构型, 进而通过测定有关的拓扑学参数对根构型给予定量描述(Fitter and Strickland, 1991; 严小龙等, 2000), 或者通过分形几何(fractal geometry)方法估计植物根系的三维立体构型(Nielsen et al., 1997)。廖红和严小龙(2000)在研究菜豆根系形态构型与磷效率的关系时, 发现根系的二维平面几何构型特性在一定程度上能够反映根系的三维立体几何构型, 经分解后的形态参数可以进行直接测定, 这就为根系构型的定量化提供了方便。随着科学技术的不断发展和日益进步, 在植物根系构型的定量分析方面也发展了许多新颖的测量技术, 观测手段也更加可靠。对根系形态构型参数的测定方法可以归纳为人工直接测量法、物理化学间接法、计算机扫描和图像分析法、根系原位观测法和计算机数学模型模拟法 5 个类别。

4.1 二维根构型参数测量方法

4.1.1 直接测量

这是最早用于根系研究的定量分析方法。当根的形状规则且数量较少时, 直接测量法比较有效。而当根较细、形状不规则且数量很大时则效率较低, 人为误差大。

4.1.2 网格法

这是早期用于测量各级分枝根的总长度的方法。将待测根放置于透明托盘上, 装浅水均匀扩展各级分枝根, 盘底贴有相应大小方格的纸, 在放大镜下计数根系与方格纵线及横线的交叉点数(记为*N*),乘上不同大小方格的系数K, 即得根系总长(*R*): $R=N\times K$。网格法只能用于测定根长, 在具有直接测量法不足的同时, 其测量精度还受到网格中单位选择的限制。

4.1.3 物理、化学或物理化学计量法

利用便携式电容仪或根长测定仪进行测量, 虽然测量的速度较快, 但其测量结果具有较大的波动性。采用黏性硝酸钙吸附法测定根表面积相对值和用排水法测定根体积, 都具有效率低、误差大和测定指标单一的缺陷。

4.1.4 同位素示踪法

同位素示踪法又称核素示踪法, 简称示踪法, 是指用同位素示踪剂研究被追踪物质的运动和转化规律的方法。该技术具有灵敏度高、样品制备简单、测定方便、可靠易行和费用低等优点。通常用于根系研究的示踪法有 4 种: 根部标记法、植株地上部标记法、放射自显影法和中子照相法。

4.1.5 计算机扫描及图像分析

在根系采样并清洗干净后, 将根放置于透明有机玻璃平盘中, 用扫描仪对载有待测根的玻璃平盘进行扫描, 图像和数据存储在关系数据库中, 然后, 应用相关的图像分析软件如DT-SCAN(澳大利亚ICT公司)、CI-400/600(美国CID公司)和WinRHIZO(加拿大, Regent Instruments 公司)对扫描图像进行分析, 获取相应的根系形态参数值。如用 WinRHIZO 图像分析软件, 可以得到根总长、根总体积、根总表面积、根平均直径及各级根系(0.00 mm ＜根直径 =0.50 mm、0.50 mm ＜根直径 =1.00

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t27-191

mm、1.00 mm ＜根直径 =1.50 mm、1.50 mm ＜根直径 =2.00 mm、根直径＞ 2.00 mm)的根总长、根总体积和根总表面积等一些二维根形态参数(Zhao et al., 2004)。

虽然根系取样工作费时费力, 但该方法与其它技术方法相比, 具备以下几个优点: (1)可以对多种作物根系进行测量, 不受根形状等因素的限制; (2)全过程均为计算机自动处理, 人为因素干扰少, 精度高; (3)测量速度快, 特别适用于大量根的批量处理。因此, 在田间条件下, 根系图像分析系统仍然不失为植物根系构型定量研究的有力工具。

4.1.6 微根管技术

Bohm(1974)是第一位用微根管(minirhizotron)这个名词描述根系观测方法的科学家, 也是第一个将微根管技术和在田间使用的其它观测技术进行比较的科学家。微根管技术主要由透明观察管、观测设备和记录设备组成, 观测设备曾先后使用了普通镜子、观察镜和照相机(或摄像机), 记录设备也相应地经历了手工绘制、传统黑白、彩色相片(或录像带)以及高清晰数字图像, 还开发了多种图像自动分析系统, 使该项技术日臻完善(周本智等, 2007)。微根管技术可以非破坏方式, 定期对同一根系的出现、生长、衰老、死亡和消失进行连续观察, 对根系伸长、根系密度、扎根深度、侧根伸展、分枝特性、菌根特性以及细根动态、根系生命周期和分解等进行观测研究, 还可获得诸如根系颜色、细根衰亡、分解、寄生和共生微生物等定性信息(Majdi, 1996; Johnson et al., 2001)。此外, 还可以开展根系对不同处理响应的研究。但微根管技术的作业地点固定, 仅适合单个根系的定点观测。

4.2 三维根构型参数测量方法

4.2.1 三维坐标容器法

该方法是利用特殊的三维坐标容器装置和计算机图像处理技术, 对根系的不同垂直分布层进行定位和分析, 利用计算机AutoCAD绘制完整的三维根系图, 根据三维根系图可以求得根长、根重和根密度等根系参数(程建峰等, 1999)。这种方法与大田根系研究相一致, 具有能完整保持根系自然状态的特点。

4.2.2 地下雷达监测系统

地下雷达(underground radar, UGR)利用高频电磁波在介电特性不均匀的介质中产生反射, 获得剖面图像, 通过解译可确定地下物体的性质和结构。该系统可在不破坏土体和根细胞结构条件下对植物根系整个生长期进行观测(Hruska et al., 1999)。近年来应用地下雷达系统对树木根系分布进行观测较为常见(Cermak et al., 2000), 但该方法在农作物上的应用并不多。

4.2.3 射线断层扫描

射线计算机体层成像(X-ray computed tomography, XCT)是以射线为信息载体, X射线穿过物体后, 不同的衰减系数反映了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一种现代医学成像技术。射线断层扫描技术应用于农作物和树木根系的研究已早有报道(Heeraman et al., 1997; Pierret et al., 1999)。罗锡文等(2004)选用德国西门子(Sensation 4)多层面螺旋CT作为大豆、番茄和榕树苗根系样品的扫描设备, 采集到分辨率为512×512的根系断层图像, 利用西门子医用影像处理系统(syngo 2002A_R1.0)进行图像处理, 可明确地分辨出主根在介质中的位置与形态, 能够清晰地观测到直径为 1 mm左右的微细根系, 可观测的最小根系为0.4-0.6 mm。结果表明, XCT技术能够准确、快速且无损伤地实现植物根系原位形态的定性观察和定量测量。

4.2.4 核磁共振系统

核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)是以射频电磁波为信息载体, 通过检测磁场中物体不同位置核磁共振信号的不同, 反映物体组成成分和生化性质的差异, 进而利用计算机重建物体内部影像的一种现代医学成像技术。在植物研究中, 核磁共振仪的应用十分广泛, 包括环境胁迫影响、生长发育、碳代谢、细胞形态和结构以及根系发育和分布等方面的观测(Lauterbur,

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t27-191

1973; Ishida et al., 2000)。利用核磁共振仪对植物根系进行原位观测, 可直接观测到植物根系的整体结构、生长状况和各个部分的生理功能, 也可用于观测根系对水分和养分的吸收、运输以及研究根部周围的微域环境。

4.2.5 图像重建系统

朱同林等(2006)利用一套自行设计的根系栽培系统和旋转数码摄像平台, 通过数码摄像机旋转拍摄大豆根系实体, 获得多视角二维图像, 然后根据大豆根系的基本结构特征, 创建了适合根系等线状物体三维图像的快速重建算法, 从而有效地实现了大豆根系图像的重建。该系统由 2 台同步 CCD 数码摄像机(VCC-5972P, SANYO)、1 台配有两块图像采集卡的 PC 机、1 个白色背景板和 1 个用于定标的棋盘组成。获得根系三维构型的数字化模型和骨架后, 通过进一步分析得到直径大于 0.3 mm 的大豆根系的主根长、根总长、平均基根角度、根宽 / 根深比及不同层次根长分布率以及根系在生长介质中不同三维区域的分布率等三维根构型参数。此系统已成功地应用到大豆根构型与磷吸收效率的研究中, 为深入研究植物根系生长及其营养功能提供了一种新的手段。

4.3 三维构型计算机数学模型模拟方法

早在 20 世纪 70 年代, 人们就开发了模拟单条根二维生长的计算机模型 (Lungley, 1973)。20 世纪 80 年代后期, Diggle(1988)建立了第一个模拟根系结构的三维模型 RootMap, 该模型可模拟根系的年龄、位置和根段取向。Fitter 和 Strickland(1991)在综合考虑根的拓扑结构、根节长度、半径和分枝角度等的基础上, 在三维空间建立了根系构型的模型。Lynch 等(1997)开发的 SimRoot 模型可以确定一定生长时间内的根系基本几何参数(如根长、根体积和根表面积等)以及一些生理参数(如单位根系碳耗、比根长等), 因而 SimRoot 模型在根系数据构建、构型参数生长计算以及三维图形显示方面具有独特的优势。通过改进和扩展 SimRoot 模型的运算功能, 可以模拟不同土壤养分状态和不同植物密度等条件下的根构型及其与养分吸收效率的关系(Ge et al., 2000; 廖红等, 2001)。在此基础上, 钟南等(2005)应用 L 系统建立了根构型定量分析计算机模型 L_Root, 可对植物根系三维生长进行可视化模拟。上述研究实现了根构型性状的定量描述, 为阐明植物根构型与养分吸收(特别是磷吸收)的关系提供了先进的研究手段, 同时为在实验室里进行大批品种的根系性状快速筛选提供了技术基础。

致谢 感谢华南农业大学根系生物学研究中心全体老师和研究生对本研究的支持。

参考文献

白书农, 肖翎华 (1986). 近年来水稻根系生理研究的几个特点. 植物生理学通讯 **4**, 18-22.

蔡昆争, 骆世明, 段舜山 (2005). 水稻群体根系特征与地上总生长发育与产量的关系. 华南农业大学学报 **26**(2), 1-4.

程建峰, 潘晓云, 刘宜柏 (1999). 作物根系研究法最新进展. 江西农业学报 **11**(4), 55-59.

高信曾 (1982). 植物学. 北京: 人民教育出版社. pp. 49-50.

郎漫, 刘元英, 彭显龙, 张文钊 (2006). 不同氮肥用量下镁对大豆碳氮代谢的影响. 大豆科学 **25**, 48-52.

廖红, 严小龙 (2000). 菜豆根构型对低磷胁迫的适应性变化及基因型差异. 植物学报 **42**, 158-163.

廖红, 戈振扬, 严小龙 (2001). 水磷耦合胁迫下植物磷吸收的理想根构型: 模拟与应用. 科学通报 **46**, 641-646.

罗锡文, 周学成, 严小龙, 罗良平, 向子云 (2004). 基于 XCT 技术的植物根系原位形态可视化研究. 农业机械学报 **35**, 104-106.

宋祥甫, 应火冬, 朱敏, 吴伟明 (1991). 自然水域无土栽培水稻的研究. 中国农业科学 **24**(4), 8-13.

苏友波, 林春, 张福锁, 李晓林 (2003). 不同 AM 菌根菌分泌的磷酸酶对根际土壤有机磷的影响. 土壤 **35**, 334-338.

吴伟明, 宋祥甫, 邹国燕 (2000). 利用水上栽培方法研究水稻根系. 中国水稻科学 **14**, 189-192.

严小龙, 廖红, 戈振扬, 罗锡文 (2000). 植物根构型特性与磷吸收效率. 植物学通报 **17**, 511-519.

严小龙, 廖红, 年海 (2007). 根系生物学: 原理和应用. 北京: 科学出版社. pp. 73-115.

闫健, 谢小妍 (2006). 作物根系研究室的设计. 农机化研究 **1**, 152-

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t27-191

155.

钟南, 罗锡文, 严小龙, 廖红 (2005). **植物根系生长的三维可视化模拟**. **华中农业大学学报 24**, 516-518.

周本智, 张守攻, 傅懋毅 (2007). **植物根系研究新技术** Minirhizotron **的起源、发展和应用**. **生态学杂志 26**, 253-260.

朱同林, 方素琴, 李志垣, 刘玉涛, 廖红, 严小龙 (2006). **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**. **科学通报 51**, 1885-1893.

Bohm W (1974). Mini-rhizotrons for root observations under field conditions. *Z Acker- und Pflanzenbau* **140**, 282-287.

Cater WA (1942). A method of growing plants in water vapor to facilitate examination of roots. *Phytopathology* **32**, 623-625.

Cermak J, Hruska J, Martinkova M, Prax A (2000). Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. *Plant Soil* **219**, 103-116.

Diggle AJ (1988). RootMap—a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root system. *Plant Soil* **105**, 169-178.

Flores HE, Brigham LA, Vivanco JM (1998). The future of radical biology? Connecting roots, people and scientists. In: Flores HE, Lynch JP, Eissenstat D, eds. Radical Biology: Advances and Perspectives on the Function of Plant Roots. Marland, USA: American Society of Plant Physiologists. pp. 320-329.

Fitter AH, Strickland TR (1991). Architectural analysis of plant root systems. 2. Influence of nutrient supply on architecture in contrasting plant species. *New Phytol* **118**, 383-389.

Ge ZY, Rubio G, Lynch JP (2000). The importance of root gravitropism for inter-root competition and phosphorus acquisition efficiency: results from a geometric simulation model. *Plant Soil* **218**, 159-171.

Heeraman DA, Hopmans JW, Clausnitzer V (1997). Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-ray computed tomography. *Plant Soil* **189**, 167-179.

Hruska J, Cermák J, Sustek S (1999). Mapping of tree root systems by means of the ground penetrating radar. *Tree Physiol* **19**, 125-130.

Ishida N, Koizumi M, Kano H (2000). The NMR microscope: a unique and promising tool for plant science. *Ann Bot* **86**, 259-279.

Johnson MG, Tingey DT, Phillips DD, Storm MJ (2001). Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environ Exp Bot* **45**, 263-289.

Lauterbur PC (1973). Image formation by induced local interactions: examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature* **242**, 190-191.

Lungley DR (1973). The growth of root system: a numerical computer simulation model. *Plant Soil* **38**, 145-159.

Lynch JP (1995). Root architecture and plant productivity. *Plant Physiol* **109**, 7-13.

Lynch JP, Nielsen KL, Davis RD, Jablokow AG (1997). Simroot: modeling and visualization of botanical root systems. *Plant Soil* **180**, 139-151.

Majdi H (1996). Roots sampling methods-applications and limitations of minirhizotion technique. *Plant Soil* **185**, 255-258.

Nielsen KL, Lynch LP, Weiss H (1997). Fractal geometry of bean root systems: correlation between spatial and fractal dimension. *Am J Bot* **84**, 26-33.

Pierret A, Capowie Y, Moran CJ, Kretzschmar A (1999). X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions. *Geoderma* **90**, 307-326.

Vercambre G, Pages L, Doussan C, Habib R (2003). Architectural analysis and synthesis of the plum tree root system in an orchard using a quantitative modelling approach. *Plant Soil* **251**, 1-11.

Zhao J, Fu JB, Liao H, He Y, Nian H, Hu YM, Qiu LJ, Dong YS, Yan XL (2004). Characterization of root architecture in an applied core collection for phosphorus efficiency of soybean germplasm. *Chin Sci Bull* **49**, 1611-1620.

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t27-191

Quantitative Analysis of Plant Root Architecture

Quan Liang, Hong Liao, Xiaolong Yan *

Root Biology Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract The root system plays a very important role in plant anchorage, water and nutrient uptake, as well as synthesis and storage of metabolites. Quantitative analysis of root architecture, or the spatial configuration and distribution of the root system in the soil, will facilitate our understanding of root structure, function and their interactions in the ecosystem. Here, we introduce the concepts of root architecture and summarize recent progress in quantitative analysis of root architecture, with some examples of major research methods and techniques currently being used in this area.

Key words quantitative analysis, root architecture

Liang Q, Liao H, Yan XL (2007). Quantitative analysis of plant root architecture. *Chin Bull Bot* **24**, 695–702.

* Author for correspondence. E-mail: xlyan@scau.edu.cn

(责任编辑: 孙冬花)

科学出版社新书推介 I

《生命科学新视野》(1 - 9 册)

本系列丛书精选 Elsevier 出版集团出版的 Trends、Current Opinion 和 Drug Discovery Today 等系列中近两年的部分综述文章(2005 - 2006 年), 由国内专家(杜冠华、高福、李葆明、林志彬、刘斌、刘春明、瞿礼嘉、王克夷和席真等)、Elsevier 资深编辑及科学出版社科爱传播中心编辑合力筛选, 以原文稍加中文注解的形式, 按专题编辑成册。版式新颖, 借鉴期刊风格, 每册书含部分彩印。本系列丛书将主要面向大学高年级学生、教师、研究生以及科研工作者, 供其参考和收藏。

本系列丛书现已出版 9 册, 每册汇集 20 多篇综述文章。《生命科学新视野. 1. 基因组学, 转录组学与代谢组学》主要涉及基因组学、转录组学、微阵列以及代谢组学等内容。《生命科学新视野. 2. 蛋白质与蛋白质组学》主要涉及蛋白质与蛋白质组学的相关技术, 比如质谱分析、分馏法和纳米结晶学等内容, 另外还介绍了蛋白质组学在生物医药领域的应用前景。《生命科学新视野. 3. 细胞信号》主要涉及信号转导、信号通路和信号转导网络等内容。《生命科学新视野. 4. 植物生物技术》涉及植物基因工程、农作物改良、海洋植物和药物植物等内容。《生命科学新视野. 5. 微生物学》涉及系统生物学、微生物与人类疾病、噬菌体多样性、基因转移与进化、生物修复与生物强化、III 型分泌系统等内容。《生命科学新视野. 6. 学习与记忆》涉及婴幼儿认知发育、语言学习、正常与异常的记忆系统、学习与记忆过程中的信号转导等内容。《生命科学新视野. 7. 化学生物学》主要涉及生物催化和生物转化等内容。《生命科学新视野. 8. 药物发现》主要涉及疾病机理、疾病模型、治疗技术及治疗策略等内容。《生命科学新视野. 9. 药理学》涉及药理研究各方面的最新进展。

咨询及购书联系方式如下：

地址：北京东黄城根北街 16 号(邮编 100717) 科学出版社 科爱传播中心 杨琴(收)

电话：010-64006871；传真：010-64034056

E-mail: yangq@kbooks.cn；http://www.kbooks.cn

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t27-191