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

朱同林[①②*] 方素琴[①*] 李志垣[②] 刘玉涛[①] 廖 红[①] 严小龙[①†]

(华南农业大学①根系生物学研究中心; ②计算机系, 广州 510642. * 同等贡献. † 联系人, E-mail: xlyan@scau.edu.cn)

摘要 植物根系三维构型的定量描述和分析是研究植物根系生长及对养分吸收利用等营养功能的重要手段之一, 但迄今尚无定量测定三维根构型参数的有效方法. 本研究通过数码摄像机旋转拍摄物体获得根系多视角二维图像, 并根据根系基本结构特征, 创建了适合根系等线状物体三维图像的快速重建算法, 重建了植物根系图像, 获得根系三维构型的数字化模型及其骨架. 以此模型和骨架为基础, 获得直径大于 0.3 mm 大豆根系的主根长、总根长、平均基根角度、根宽深比、介质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, 并分析了这些参数与大豆生物量和磷吸收量等生长指标之间的相关关系. 本研究可以为研究植物根系生长及其营养功能提供一种新方法.

关键词 大豆 根系 三维根构型 图像重建 磷效率

根系不仅是植物吸收养分和水分的主要器官, 也起着支撑地上部的重要作用 [1,2]. 植物根构型是指根系在生长介质中的空间分布 [3]. 不同的根构型显著影响养分水分的吸收利用、碳源分配及适应环境胁迫能力等重要生理功能, 甚至影响某些豆科植物根系的抗病虫害能力, 因此近年来根构型研究越来越受人们重视 [4~12]. 但是目前国内外对根构型的定量化研究的报道甚少. 有人通过纸培等特殊栽培系统结合计算机图像分析技术定量研究植物的二维根构型 [13], 但是纸培系统下获取的二维根构型与植物在自然条件下三维根构型之间存在一定的差异, 不能准确代表植物根系在土壤中的实际空间分布, 因此非常有必要对植物的三维根构型进行定量化研究. 三维根构型定量化研究的主要困难是因为根系在土壤等生长介质中的隐蔽性造成了难以观察根构型, 且根系的复杂性和重叠性造成测量精度的限制. 目前获取三维根构型图像的主要方法有核磁共振成像(MRI)、X射线断层扫描技术(CT)和地下雷达监测(GPR)等 [14~18]. Montgomery和Heyenga[19]利用CCD摄像机拍摄一系列由铁丝模拟的根系, 并对其进行三维重建, 证明该方法用于观察植物根系在太空中生长过程的可行性.

本研究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物体获得多视角二维图像, 并根据根系基本结构特征, 创建了适合根系等线状物体三维图像的快速重建算法, 有效地重建了植物根系图像. 在此基础上, 对三维根构型参数进行定量测定和分析, 并初步分析根构型参数与大豆生物量、磷吸收量等植物营养指标之间的相关关系. 本研究的目的是探索一种植物根系三维构型图像重建以及根构型参数定量计算的方法, 实现植物根系三维构型的定量描述和分析, 从而为研究植物根系生长及其营养功能提供新的手段.

1 材料与方法

(ⅰ) 供试植物材料及其生长方法. 本研究主要采用农作物的根系作为实验材料, 但由于篇幅有限, 仅以大豆 (*Glycine max* (L) Merr)为例. 根据以往实验结果, 采用 3 个不同根构型类型的大豆基因型(品种), 即浅根型的巴西 10 号(BX10)、深根型的本地 2 号(BD2)以及中间型的白豆(BAI). 每个基因型设 3 个重复, 共 9 株植物. 利用廖红等人[20]报道的分层式三维栽培系统方法进行种植. 分层式三维栽培系统由一个可对半打开的高 35 cm, 直径 30 cm的圆柱形聚丙烯箱和一个内置分层钢架组成, 从箱子顶部开始每隔 10 cm放入一层孔径为 3 mm的玻璃纤维筛网(主根、基根均能顺利通过), 每盆分 3 层(0~10, 10~20, 20~35 cm)(图 1). 栽培介质为石英砂/低磷红壤(1∶1). 出苗后进行常规水肥管理, 移栽后 70 d后收获. 先收获地上部用于生物量和磷浓度测定, 然后拆开根箱外壳, 用水小心冲洗根系周围的砂土, 露出整个根系, 由于筛网网格的直径比较小, 一般每个网格只有一

条根通过, 所以可以基本保持根系不错位. 对根系进行干燥和定型处理, 使根构型基本保持不变. 控制大于 0.5 mm的主根、基根和侧根不错位, 然后小心去除筛网等支撑物, 将根系固定在旋转式摄像平台中, 供测定三维根构型参数(图 2).

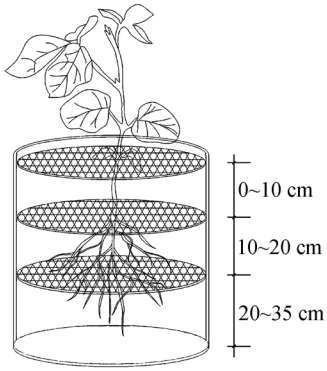


图 1 分层式栽培系统示意图

(ii) 根系三维实物图像重建系统基本配置. 图 2 是我们自行设计的根系三维实物图像重建系统. 如图 2 所示, 本研究用到两台同步 CCD 数码摄像机(VCC-5972P, SANYO, 分辨率 45 万像素)、一个大转台、一个小转台、一台控制转台转动的电机数字控制仪(M2.0, Fangda)、一台配有两块图像采集卡的 PC 机(Dell 服务器, 1.5 G 内存)、一个白色背景板以及一个用于定标的棋盘. 用其中一台摄像机放在小转台上, 将小转台放在大转台上的一端, 并且让物体悬挂在大转台上方静止不动, 让摄像机随大转台绕物体旋转一周, 每隔 5°拍摄一幅根系的二维视频图像, 然后通过调小转台让摄像机倾斜 25°~45°, 再通过大转台使物体旋转 1 周拍摄物体视频图像, 从而获得根系柱状体、向地性、凸状体等表面形态特征信息. 同时为了方便计算, 将另一台摄像机置于电机控制仪前同步记录前一摄像机拍摄照片的角度.

(iii) 根系三维构型实物图像重建步骤. 复杂结构物体的三维重建是计算机视觉中的一个难点问题, 由于根系的多重叠性和根表面颜色的相似性, 传统重建雕塑作品的双目测定对应点算法不适用于根系的重建. 另一方面, 根系细小复杂, 若用目前流行的"切割算法"[21,22], 虽然可克服重叠性, 但计算速度不能满足今后日常实验中大量样品测定的需求. 我们曾做过比较实验. 重建一株 200 mm × 200 mm × 200 mm大小的根系, 拍 36 幅在不同方位的图像, 用我们的重建方法需要 269.39 s, 而"切割"重建方法需要 2731.83 s, "切割"方法花费的时间是我们的方法的 10 倍多. 另一方面, 近几年还流行另一种重建算法, 即基于光栅变形测量深度的算法 [23,24], 这种重建方法比较适用于单连通表面的重建, 对于根系的多连通区域的连接和网格化比较困难. 然而, 作物根系是由一些柱体组成的线状物体(基本属于凸状物体), 加上根构型参数对物体表面细节和颜色的要求不高, 所以根据创建虚拟包的方式 [25], 结合广义Hough变换的投票原理 [26], 利用各方位投影图像的原像来投票塑造其三维图像模型 [27]. 下面是这种重建方法的主要步骤.

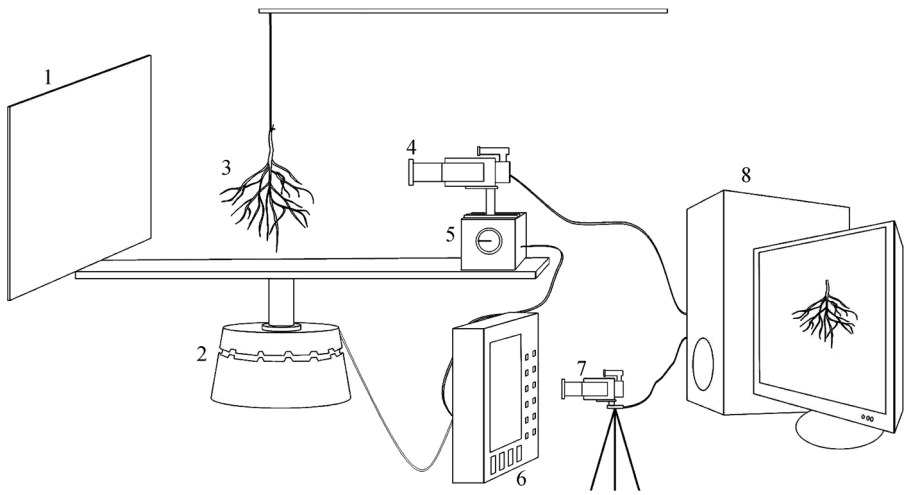


图 2 根系三维构型实物图像重建系统框架

1, 白色背景板; 2, 大转台; 3, 植物根系及其悬挂设备; 4, 同步摄像机 1; 5, 小转台; 6, 电机控制器; 7, 同步摄像机 2; 8, PC 机

(1) 摄像机内外参数设置与转台位置定标. 摄像机定标的目的是确定物体空间的三维坐标与它在各投影图像平面的二维坐标之间的对应关系, 这样就需要知道或测出摄像机的焦距和光心位置等内部参数, 以及摄像机图像平面坐标系与转台坐标系的关系等外部参数 [28]. 本研究参照Zhang[29]提出的基于平面网络的定标方法, 利用一个已知网格点位置的多层次棋盘作为定标对象, 通过精确检测棋盘角点坐标来计算被测空间的各点的位置关系与其图像空间的对应的位置关系, 最终确定出摄像机的内外参数和转台转轴位置. 此外, 通过重新定标和遍历挑选来校订CCD到不同根系观测点空间距离的差异所导致的误差. 一旦摄像机到旋转台轴心位置发生改变或者摄像机的内参数改变, 系统可以进行重新定标, 并计算出这个位置参数的新值. 然后, 在重建算法中用"CCD到不同根系的观测点的空间距离"这个参数作为自由变量, 在这个新值的前后一定范围内进行遍历挑选, 将CCD到不同根系观测点空间距离的差异降到最小的程度, 这样使它对重建结果基本上不造成明显的影响和误差.

(2) 获取图像. 设置好转台的旋转速度和转动度数, 让转台带动摄像机环绕根系转动一周连续采集根系视频图像, 并由另一摄像机同步记录下每张图像的拍摄角度. 然后对这些原始视频图像进行分割, 去除噪声点, 最后变成二值化图像, 使根上的象素点的值为 1(黑点), 背景点的值为 0(白点). 重建算法的关键是对于每一个投影图像中每一个前景点的原像投一票, 然后统计得票数, 得票多(超过预先设定的阈值)的物体空间点就被入选三维前景点 [27]. 这样, 被遮挡了的点也同样得到它该得到的票数, 因而可以避免遮挡和交错造成的误差. 另外, 图像中只有那些随着拍摄角度而改变位置的像素点原像才可能得到较多的票, 故噪声点的得票将很少, 所以噪声问题也很自然地得到了解决.

(3) 图像重建计算及其数字化模型. 本研究图像重建应用广义 Hough 变换原理, 其基本含义是取定一个比例阈值 v%(一般可取 $v = 60$), 先估计一个长方体作为被测物体所在的区域, 区域上的点是前景(物体)点或者背景点的一种. 区域中的点作为物体三维图像景物点的充要条件是: 它在所有观察图像平面的投影像中有 v%以上是"黑点", 也就是说, 物体三维图像的景物点是由各二维图像原像所有具有 v%共同交点的点组成的. 所有这样的景物点放在一起即可构成一个实体图像, 即物体的数字化模型, 必要时还可以根据所有投影图像的颜色来进行纹理映射, 计算物体表面的色彩.

(4) 三维根构型骨架提取. 由于根系的线状特征和天然的连续缓变特征, 根系构型可以由各根的中轴线, 即骨架来刻画. 针对实际获得的三维根系图像存在由噪声引起的沙洞以及根系固有的柱体线状性, 本文研究了多种三维骨架提取算法, 提出了投票骨架算法和最小截面算法, 其中最鲁棒的方法是最小截面算法. 该算法的基本步骤和原理为: 对根系三维图像中各条根上的一些关键或特殊点进行多方向"截割"(一般取 9 或 27 个方向), 对每一点的所有这些截割面中面积最小的中心定为该骨架节点; 用人机交互方法寻找每个主根、分支根的若干个骨架节点; 用这些节点作为型值点, 再用非均匀B样条曲线 [30] 把这些骨架点连接和拟合起来, 最终提取出三维根系骨架.

(ⅳ) 植物根系三维构型参数计算方法. 植物根系三维构型参数主要包括主根长、总根长、基根角度、根宽深比和根长在介质不同层次的分布率以及根系在介质中不同区域的分布率等. 以下简单介绍这几个主要参数的计算方法.

(1) 主根长和总根长. 由于各基根和侧根上骨架点的空间位置距离较小, 我们采用三维空间骨架点间的欧氏距离之和来计算每一条根的长度. 有了上述重建图像及其骨架, 可很方便精确计算出主根长和总根长. 假设某条根 R_k 的骨架的型值点为 V_i (x_i, y_i, z_i), $i = \{1,2,\cdots,n\}$, 则各段根长度为

$$D_i = \sqrt{(x_{i+1}-x_i)^2 + (y_{i+1}-y_i)^2 + (z_{i+1}-z_i)^2}, \quad i = 1,2,\cdots,n-1. \tag{1}$$

所以这条根的长度为

$$L_k = \sum_{i=1}^{n-1} D_i.$$

若一株根系有 m 条根, 则这株根的总根长度为

$$L = \sum_{i=1}^{m} L_i.$$

(2) 平均基根角度. 在此引入空间直线的平均夹角作为基根与水平方向的夹角, 即基根角度. 这个

参数是二维图像所无法进行精确量化的，但现在利用三维骨架即可很方便地计算出来. 设某段基根骨架 V_iV_{i+1} 长度为 D_i，与 YZ 平面交角为 β_i，则

$$\cos\beta_i = |y_{i+1}-y_i|/D_i.$$

从而可得垂直方向的平均夹角为

$$\beta = \left(\sum_{i=1}^{n}\beta_i D_i\right)\Big/\left(\sum_{i=1}^{n} D_i\right).$$

而基根与水平方向平均夹角为 $\alpha = 90°-\beta$，可求得平均基根角度为

$$\alpha = 90^\circ - \left(\sum_{i=1}^{n}\beta_i D_i\right)\Big/\sum_{i=1}^{n} D_i.$$

(3) 根宽深比. 指根宽与主根长的比值，由(1)式可计算出主根长，因为本研究重建得到的根系数据集中在三维空间上呈垂直分布，与大豆根系生长的向地性特性相吻合，所以根宽的计算可采用所有侧根(包括基根)根尖在水平方向上的最大距离值，而根深可采用主根长的值. 取根宽与主根长的比值即可得到根宽深比.

(4) 介质不同层次的根长分布率. 指根长在各指定层次空间的分布比例. 在上述方法我们可以计算出总根长、主根长和基根以及侧根的长度. 可以将三维空间在垂直方向上划分若干个不同深度的区域，这样就可得出根系在介质不同层次里的根长占总根长的分布率.

(5) 不同区域根长分布率. 将根系生长箱分为上、下两层，而将方位划分为东、南、西、北，共得到 8 个区域，上层为Ⅰ~Ⅳ区，下层为Ⅴ~Ⅷ区(图 3). 我们可以分别计算在这些区域里的根长占总根长的比例(区域根长分布率). 由于每个区域具有明确的三维定义，因此这是一个严格意义上的三维参数，而且有一定的实际意义，可反映根系在介质中的不对称分布.

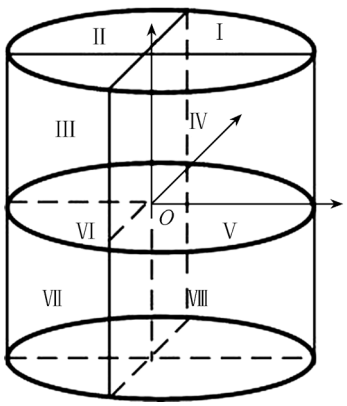


图 3 根系生长介质三维空间划分为 8 个不同方位的区域

(ⅴ) 根构型参数与植物营养参数的相关关系. 将剪下的地上部与扫描完毕后的根部放入烘箱于 105℃下杀青 30 min，然后于 75℃恒温烘干后称取干物重，代表生物量. 植株地上部测定完生物量后，将样品粉碎，用干灰化-钼锑抗比色法测植株磷浓度 [31]. 根据植株生物量和磷浓度的乘积计算出磷吸收量. 同时测定田间实验相同大豆基因型和磷处理的生物量和磷吸收量数据进行比较验证. 利用SAS统计软件(SAS Institute Inc.，美国)对所采用的 3 个不同根构型大豆基因型的根构型参数和植物营养参数进行方差分析Duncan多重比较，并用Microsoft Excel 2003 软件进行根构型参数和植物营养参数的线性相关分析.

2 结果与分析

2.1 根系图像重建结果

本研究表明，我们的重建方法对于重建根等线状物体效果良好，不仅视觉效果非常逼真、有较高的精度、重建速度非常快，而且不需要任何手工修改和编辑，可编程实现全自动化，有利于构建物体的数字化模型. 本次实验利用 36 张不同旋转角所拍摄获得的二维图像重建三维图像(图 4). 由重建结果可以看出这种重建方法克服了根系遮挡和交错问题以及图像的噪声问题，获得的三维图像精度较高，如图 4 中一个单位相当于 35 mm，与实际物体的误差不超过 1 mm. 另外，用这种方法重建图 4 中的 3 株根系分别需要 269.39，276.41 和 264.93 s，而“切割”算法分别需要 2731.83, 2836.06 和 2712.84 s. 本重建方法在普通 PC 机中(Dell 服务器，1.5G 内存)比“切割”方法明显要快 10 倍多，适合于以后的大量实验. 此外，本研究所用设备普通简便，光照条件为普通灯光或自然光，所以这方法既鲁棒又成本低，便于推广应用.

2.2 骨架提取结果

骨架化后结果如图 4 中 4 和 5 所示，所获得的根系骨架与图 4 中 1 的原始图像根构型拓扑结构相吻合. 由实验结果可得，对于复杂的三维根系图像，截面算法提取的骨架可保持与原始图像拓扑结构一致，所以是适合复杂根系图像骨架提取的一种有效方法. 由于重建的根系图像真实可靠，所以用它所创建的根系骨架形象逼真，精度也较高. 例如在距离方面，

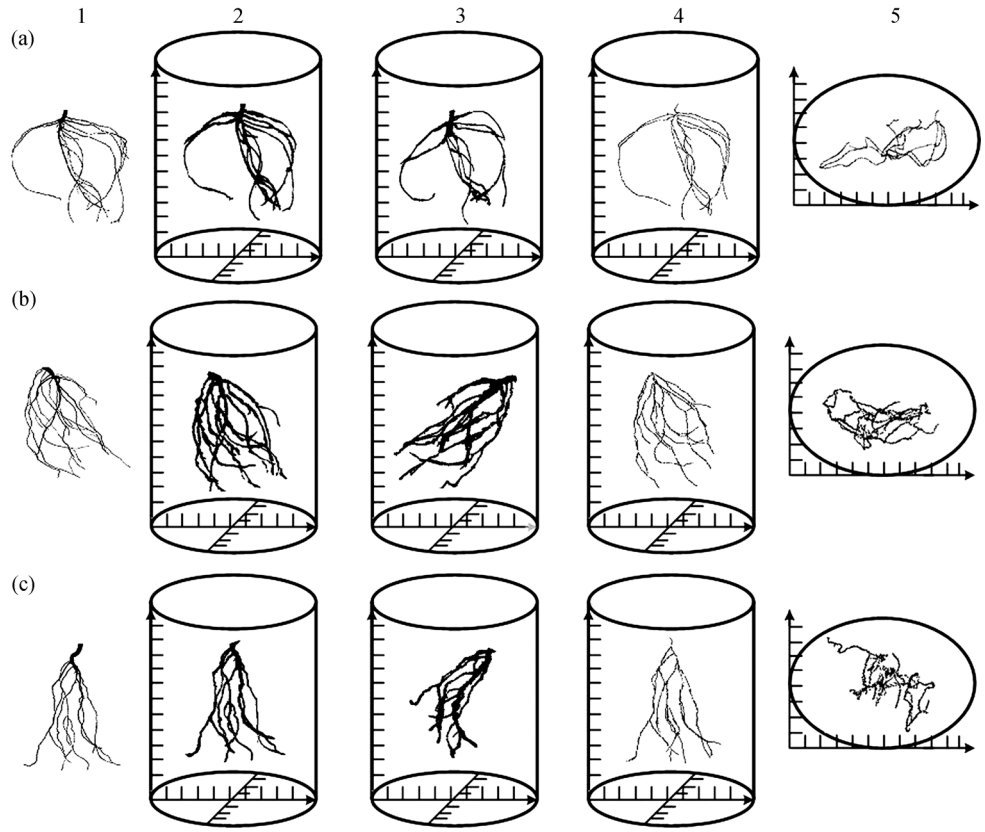


图 4 3 个大豆基因型的根系三维构型图像重建与骨架提取

3 个坐标轴每 1 格相当于 35 mm, 每一行图像为不同根构型的大豆基因型. (a) 浅根型 BX10; (b) 中间型 BAI; (c) 深根型 BD2. 1, 根系原图; 2, 根系重建后在 1 位置的平行投影图像; 3, 根系重建后在另一个不同方向下的平行投影图像; 4, 骨架在与 1 相同位置的图像; 5, 根系骨架的俯视图

用黑白相间的 10 × 10 棋盘(每格宽度 20 mm)进行 10 层次的定标, 利用最小二乘法计算坐标参数, 算得 10 × 10 × 10 = 1000 个点, 最大误差是 1.2 mm, 也就是说, 在一个 200 mm × 200 mm × 200 mm 的正方体中 1000 个均匀分布的点的坐标(距离)的绝对误差为 1.2 mm(这个误差与根的长度无关, 因此无相对误差). 在角度方面, 在实际的实验中, 若根系大小在 200 mm × 200 mm × 200 mm(一般情况下是在这个范围), 则长度误差均在 1.1 mm 左右, 体现在相互间平均夹角角度误差均在 1.0°左右. 上述这些精度用任何手工方法难以达到.

2.3 三维根构型参数的定量计算结果

在数字化模型和根构型骨架化的基础上求出总根长、主根长、平均基根角度、根宽深比和介质不同层次的根长分布率以及不同区域的根长分布率等主要三维根构型参数. 对 3 个大豆基因型的根构型参数进行差异显著性分析(表 1), 发现 3 个大豆基因型间的总根长和主根长这两个参数都没有显著差异. 但是浅根型大豆 BX10 的平均基根角度显著小于深根型大豆 BD2, 而中间型 BAI 的平均基根角度处于 BX10 和 BD2 之间, 但与后者的差异不显著; 3 个基因型的根宽深比也有显著差异, BX10 的根宽深比显著大于 BAI, 而后者又显著大于 BD2. 另外, BX10 在 0~10 cm 层的根长分布率显著大于 BD2, 而 BAI 在 0~10 cm 层的根长分布率处于 BX10 和 BD2 之间, 但与这两个基因型的差异不显著; 3 个基因型在 10~20 cm 层的根长分布率都没有显著差异; BD2 在 20 cm 以下介质层的根长分布率显著大于 BX10 和 BAI, 而 BX10 和 BAI 之间的差异不显著. BX10 在区域 Ⅰ, Ⅱ和Ⅳ的根长分布率都显著大于 BD2, 在区域 Ⅴ, Ⅵ和Ⅷ里则显著小于 BD2, 同时在区域Ⅲ和区域Ⅶ里这两个基因型没有显著差异. 而 BAI 除了在区域Ⅶ里显著大于其他两个基因型, 在其他区域都介于 BX10 和 BD2 之间. 上述结果表明, 不同根构型可以用平均基

根角度、根宽深比和介质不同层次的根长分布率和不同区域根长分布率等三维根构型参数进行定量描述, 而总根长和主根长这两个参数不能反映根系在三维空间上的相对分布. 另外, 对 9 株大豆的各个根构型参数进行相关分析, 发现其中平均基根角度与 0~10 cm 层的根长分布率呈极显著负相关($R^2 = 0.931^{**}$), 与根宽深比呈显著负相关($R^2 = 0.544^{*}$), 根宽深比与 0~10 cm 层的根长分布率呈显著正相关($R^2 = 0.471^{*}$).

2.4 根构型参数与生物量和磷吸收量的关系

为了进一步研究获得的根构型定量参数的实际应用效果, 我们对 3 个大豆基因型的生物量和磷吸收量进行测定和比较. 结果表明, 浅根型 BX10 的生物量和磷吸收量都显著高于深根型 BD2 和中间型 BAI; 而 BD2 和 BAI 间的生物量和磷吸收量没有显著差异(表 1). 对不同基因型间存在显著差异的根构型参数(平均基根角度、根宽深比和 0~10 cm 层的根长分布率)与生物量和磷吸收量分别进行相关分析. 结果显示(图 5), 平均基根角度与生物量和磷吸收量都呈极显著负相关, 即平均基根角度越小(根系越浅), 生物量和磷吸收量越大; 同样, 0~10 cm 层的根长分布率与生物量和磷吸收量达到显著正相关; 根宽深比与生物量和磷吸收量的相关性也达到显著水平. 上述结果说明浅根型大豆具有较高的磷吸收效率, 因而在低磷情况下具有较大的生物量. 不同区域根长分布率差距很大, 因此不同区域根长分布率与生物量和磷吸收量的相关性不同. 有意思的是, 同是在表层, 区域 I 根长分布率与生物量和磷吸收量达到显著正相关; 区域 II 与生物量显著相关但与磷吸收量相关不显著; 而区域III和IV根长分布率与生物量和磷吸收量无显著相关(图 6), 反映了根系在三维介质中的不对称分布以及不同区域根系对养分吸收的贡献不一样.

3 讨论

植物根系三维构型的定量描述和分析是研究植物根系生长及其对养分吸收利用等营养生理功能的重要手段之一, 但迄今尚无文献报道定量测定三维根构型参数的有效方法, 因此难以深入研究植物根系三维特征及其营养功能. 本研究首次提出了一种利用多视角二维图像来重建线状物体三维图像的简便而相对精确的方法. 这种方法对于重建植物根系图像非常有效, 可获得根系三维构型的数字化模型及其三维骨架, 并可准确计算三维根构型的一些重要参数. 本研究首次实现了植物根系三维构型的定量描述和分析, 并成功地应用到植物生长和磷吸收研究中, 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.

表 1 3 个不同根构型大豆基因型的根构型参数和营养参数的比较 a)

根构型或营养参数	不同根构型大豆基因型		
	BX10(浅根型)	BAI(中间型)	BD2(深根型)
总根长/mm	3215.3a	3354.4a	3045.4a
主根长/mm	333.1a	341.6a	321.4a
平均基根角度(°)	22.83 b	43.17ab	64.17 a
根宽深比	0.804a	0.500b	0.297c
介质不同层次根长分布率(%)			
0~10 cm	47.33a	37.57ab	27.90b
10~20 cm	36.77a	43.77a	34.47a
>20 cm	15.90b	18.67b	37.63a
8 个不同区域的根长分布率(%)			
I	20.50a	10.37b	9.00b
II	24.67a	21.11ab	8.58b
III	8.13a	9.52a	7.53a
IV	13.03a	16.09a	0.87b
V	13.53b	6.33b	29.15a
VI	10.57b	15.77ab	29.26a
VII	5.53b	14.42a	6.81b
VIII	4.03b	6.03ab	8.80a
生物量/g·株$^{-1}$	18.56a	10.82b	10.81b
磷吸收量/mg·株$^{-1}$	32.81a	12.18b	12.89b

a) 表中数据为 3 个处理重复的平均值. 同一参数间具有同一字母表示差异不显著(Duncan 多重比较, $P = 0.05$)

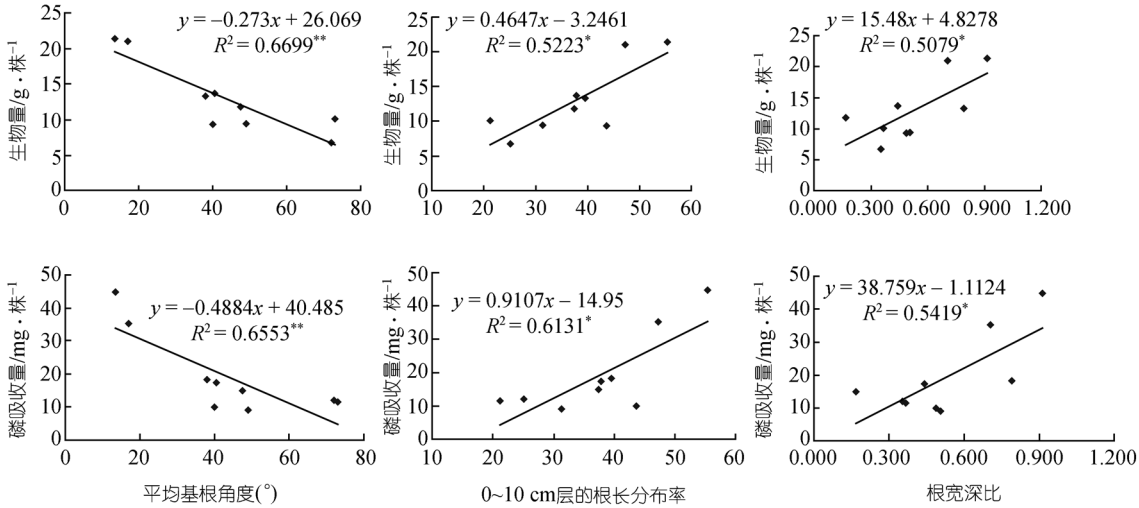


图 5 三维根构型参数与生物量和磷吸收量的相关关系

**, 极显著相关($P < 0.01$); *, 显著相关($P < 0.05$)

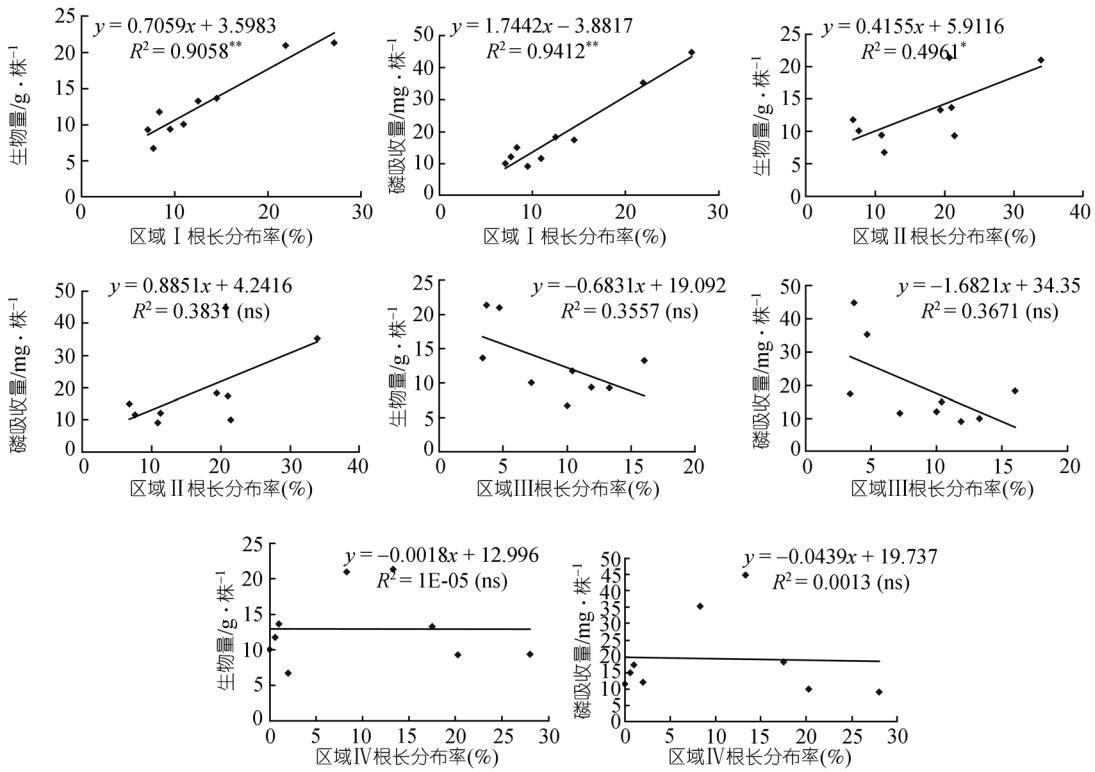


图 6 三维根构型参数(区域Ⅰ~Ⅳ根长分布率)与生物量和磷吸收量的相关关系

**, 极显著相关($P < 0.01$); *, 显著相关($P < 0.05$); ns, 相关不显著

3 个不同根构型(浅根型、中间型、深根型)的大豆基因型进行比较实验表明, 不同根构型可以用平均基根角度、根宽深比、介质不同层次的根长分布率和不同区域根长分布率等三维根构型参数进行较为精确地定量描述. 上述 4 个参数的大小可以相对精确地描述不同根构型的特征, 从而克服了以往研究仅靠目测法对大豆根构型进行简单划分为浅根型、深根型和中间型的困难 [6,13,15,32]. 另一方面, 上述 4 个根

构型参数是独立的变量，具有不同的含义. 例如，平均基根角度可描述根系基部侧根生长的水平夹角，是根系向地性大小的反映. 根宽深比可描述根系横向生长与纵向生长的比例，是根系趋向性生长(趋肥性或趋水性)的反映. 介质不同层次的根长分布率可描述根系在不同介质层次的分布. 而不同区域根长分布率则可进一步详细描述根系在生长介质中的三维空间分布情况，反映了根系在介质中的不对称分布. 上述各三维根构型参数又有内在的联系，可以互为辅证. 例如，平均基根角度与 0~10 cm层的根长分布率和根宽深比显著相关，说明平均基根角度越小，根长在 0~10 cm层的分布率越大，根宽深比也有越大的趋势. 值得指出的是，3 个大豆基因型间的总根长和主根长这两个参数都没有显著差异，说明根构型的差异并不一定与根系的总量(总根长)和根系的绝对深度(主根长)有关，而是与根系在三维空间上的相对分布有关. 这也说明植物能够在不增加根系的生长量或根深的前提下，通过改变根系在三维空间的不同配置来改变根构型，从而对养分胁迫产生一定的适应性 [3].

本研究将植物根系三维构型的定量参数成功地应用到植物营养研究中. 发现平均基根角度、0~10 cm层的根长分布率和根宽深比这 3 个根构型参数与大豆生物量和磷吸收量都呈显著相关(图 5). 上述结果说明，浅根型大豆具有较高的磷吸收效率，因而在低磷情况下具有较高的磷含量和较大的生物量. 这样的结果具有重要的现实意义，因为在田间条件下，有效磷一般都在土壤表层分布较高，而后随着土壤深度增加而有效性递减 [19,33~35]，因此根系越浅，就越有利于对有效磷的吸收，从而提高大豆生物量以及磷效率，这与已经报道的田间实验结果相吻合 [32]. 另一方面，各基因型间的主根长并没有显著差异(表 1)，说明浅根型大豆的根系虽然侧根分布较浅，但其主根也有一定的深度，从而形成了侧根吸收有效磷、主根吸收水分的“伞状根构型”，既有利于提高磷效率，又有一定的抗旱能力 [20].

本研究的方法原理不仅适用于大豆，可能也适用于其他常见的主根系农作物，如菜豆、棉花等根系三维构型的定量描述和分析. 然而对于须根系作物，如水稻、小麦等，由于其根系过于细小和柔软，本研究方法尚有一定的局限性，需要从栽培介质(如改为琼脂糖等透明固体介质)等方面进行改进. 此外，在本研究中，由于光学摄像机等硬件设备的精度限制，一些比较细(如直径小于 0.3 mm)的根未能重建出. 虽然我们的研究侧重整个根系的三维分布概况，而且供试材料中小于 0.3 mm这部分幼根所占的比例不是很大. 例如用根系扫描仪(WinRhizo, Regent Instruments Inc., Canada)测定离体大豆根系的结果表明，小于 0.3 mm部分幼根的根长约占总根长的 5%(廖红等，未发表)，但是这部分根系具有较大的比表面积，而且往往是根毛的主要发生场所，因此这部分幼根在养分吸收方面的作用也不能忽视. 针对这样的特殊问题，在未来的实验中可运用激光摄像机等设备来提高摄像机定标精度，从而使重建图像质量和精度达到更理想的效果 [36].

致谢 感谢陈明浩、林学闾先生对早期图像重建工作的帮助和指导. 本工作受国家重点基础研究发展计划项目(批准号: 2005CB120902)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 30230220)和 McKnight 基金会国际作物合作研究项目(批准号: 05-780)资助.

参 考 文 献

1 Barber S A. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. New York: Wiley-Interscience, 1995. 414—416
2 Bailey H J, Currey J D, Fitter A H, et al. The role of root system architecture and root hairs in promoting anchorage against uprooting forces in *Allium cepa* and root mutants of *Arabidopsis thaliana*. J Exp Bot, 2002, 53: 333—340[DOI]
3 Lynch J P. Root architecture and plant productivity. Plant Physiol, 1995, 109: 7—13
4 Fitter A H. Characteristics and functions of root systems. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U, eds. Plant Roots: The Hidden Half. Basel: Marcel Dekker, 1991. 3—24
5 Bowman D C, Devitt D A, Engelke M C et al. Root architecture affects nitrate leaching from bent grass turf. Crop Sci, 1998, 38: 1633—1639
6 严小龙，廖红，戈振扬，等. 植物根构型特性与磷吸收效率. 植物学通报, 2000, 17(6): 511—519
7 Dossan C, Pages L, Vercambre G. Modelling of the hydraulic architecture of root systems: An integrated approach to water absorption--Model description. Ann Bot, 1998, 81: 213—223[DOI]
8 Guerrero-Campo J, Fitter A H. Relationships between root characteristics and seed size in two contrasting floras. Acta Oecol, 2001, 22: 77—85[DOI]
9 Bidel L P R, Pages L, Riviere L M, et al. MassFlowDyn Ⅰ: A carbon transport and partitioning model for root system architecture. Ann Bot, 2000, 85: 869—886[DOI]
10 Miller D E. Root systems in relation to stress tolerance. HortSci, 1986, 21: 963—970

11 Snapp S S, Kirk W, Román-Avilés B, et al. Root traits play a role in integrated management of Fusarium root rot in snap beans. HortSci, 2003, 38: 187—191

12 Román-Avilés B, Snapp S S, Kelly J D. Assessing root traits associated with root rot resistance in common bean. Field Crop Res, 2004, 86: 147—156[DOI]

13 廖红, 严小龙. 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, 2000, 42(2): 158—163

14 MacFall J S. Visualization of root growth and development through magnetic resonance imaging. In: Flores H E, Lynch J P, Eissenstat D, eds. Radical Biology: Advances and Perspectives on the Function of Plant Roots. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 1997. 57—80

15 罗锡文, 周学成, 严小龙, 等. 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, 2004, 35(2): 104—106

16 Gregory P J, Hutchison D J, Read D B, et al. Non-invasive imaging of roots with high resolution X-ray micro-tomography. Plant Soil, 2003, 255: 351—359[DOI]

17 Stokes A, Fourcaud T, Hruska J. An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees *in situ*: 1. ground-penetrating radar. J Arboricult, 2002, 28(1): 2—10

18 Pierret A, Moran C J, Doussan C, et al. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. New Phytol, 2005, 166: 967—980[DOI]

19 Montgomery K, Heyenga G. Gel tomography for 3D acquisition of plant root systems. In: Bogner M S, ed. Society of Photo-optical Instrumentation Engineers and International Biomedical Optics Society eds. Proceedings of SPIE--The International Society for Optical Engineering. San Jose: The International Society for Optical Engineering, 1998. 3313: 102—104

20 廖红, 戈振扬, 严小龙. 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, 2001, 46(8): 641—646[摘要]

21 Kutulakos K N, Seitz S M. A theory of shape by space carving. Int J Comput Vision, 2000, 38(3): 199—218[DOI]

22 Seitz S M, Dyer C R. Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring. Int J Comput Vision, 1999, 35(2): 151—173[DOI]

23 Huang P S, Hu Q Y, Chiang F P. Error compensation for a 3-D shape measurement system. Opt Engin, 2003, 42(2): 482—486[DOI]

24 Zhong J G, Weng J W. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform. Opt Lett, 2005, 30(19): 2560—2562[DOI]

25 Matusik W, Buehler C, Raskar R. Image-based visual hulls. SigGraph, 2000: 369—374

26 Seitz S M, Dyer C R. Complete scene structure from four point correspondences. In: IEEE, ed. Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision. Cambridge: IEEE Computer Society Press, 1995. 330—337

27 Zhu T L, Fang S Q, Li Z Y, et al. A generalized Hough transform theory and its applications in computer vision. J Comput Inform Syst, 2005, 1(3): 601—607

28 Trucco E, Verri A. Introductory Techniques for 3-D Computer Vision. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998. 123—136

29 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration. Microsoft Computer Technical Report, Redmond, Washington: Microsoft Corporation Publication, 1998. MSR-TR-98-71

30 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术. 北京: 科学出版社, 2000. 138—169

31 劳家柽. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社, 1988. 229—299

32 赵静, 付家兵, 廖红, 等. 大豆磷效率应用核心种质的根构型性状评价. 科学通报, 2004, 49(13): 1249—1257[摘要]

33 Chu W, Chang S. Surface activity of inorganic soil phosphorus. Soil Sci, 1966, 101: 459—464

34 Keter J, Ahn P. Profile characteristics, and form and surface activity of inorganic phosphorus in a deep red Kenya coffee soil (nitosol). J Soil Sci, 1986, 37: 89—97[DOI]

35 Pothuluri J, Kissel D, Whitney D, et al. Phosphorus uptake from soil layers having different soil test phosphorus levels. Agron J, 1986, 78: 991—994

36 Stöcher W, Biegelbauer G. Automated simultaneous calibration of a multi-view laser stripe profiler. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona: IEEE Institute of Electrical and Electron, 2005. 4424—4429

(2006-04-26 收稿, 2006-07-20 接受)