利用相似理论实现植物根系 参数的动态预测

红^b, 严小龙^b, 罗锡文^a, 熊俊涛^a 钟 南。廖

(华南农业大学 a 工程学院: b 资环学院, 广东 广州 510642)

[摘 要] 应用特殊设计的营养袋纸培系统试验方法,对大豆根系的生长过程进行了研究。结果表明,大豆根 系在营养袋纸培系统中的生长曲线呈 s 形: 该方法在一定程度上可模拟植物根系的实际生长过程。此外, 利用相似 理论获得了实际根系生长过程中的各根构型参数。

[关键词]	营养	\$袋纸	培系统;	植物根系;	相似理论;	根构型	
[中图分类	号]	$S11^+$	1; \$565.	101	[文献杨	识码]	A

根系是固定植物体,摄取、运输和储存营养物 质,及合成一系列有机化合物的重要器官。植物根系 的形态构型(根构型)因土壤环境的不可见性和复杂 性而难以原位观察、测定、其定量研究一直是国内外 根系生物学研究的难点和热点之一。长期以来,人们 试图通过各种方法来解决这一难题。 传统的钉板法 容器法、气培法、管栽法、网袋法等[1],均需要先进行 破坏性取样,使根系与土壤分离,然后进行测量,这 使得整个取样和测量过程不仅耗时费力,而且很难 实现根系的原位取样和准确测量: 同位素示踪法、地 下根室及微根室研究法 X 射线断层扫描法和核磁 共振法等^[2], 虽可获得原位的观测数据, 但由于设备 昂贵,限制了其在研究根系实际生长过程中的应用。 严小龙和廖红等^[3,4]在研究豆科作物根构型与磷获 取的有效性时,特别设计了一种"根构型培养模拟" 的方法,即营养袋纸培系统试验方法,该方法将待测 的种子胚芽放入特殊的营养袋中培养, 使根系附着 在纸袋的平面上生长,便于直接放在扫描仪上处理, 可进行多次重复测量而不影响其生长。营养袋纸培 系统试验方法简便易行,耗时少,成本低,避免了破 坏性取样,所获得的根构型参数在一定程度上能够 反映实际根构型参数^[3,4],很适合用于根系生长过程 的研究。

相似理论是模型模拟试验的重要理论依据。通 过研究基于相似理论建立的模型系统来揭示实际系

统的形态特征和本质,这种方法原来主要应用在力 学、计算机模拟仿真技术等领域,但由于其在科学研 究中具有重要作用而备受重视并已逐步渗透到各个 领域。廖红^[4]等通过试验观察和比较,证明这种特殊 设计的营养袋纸培系统所获得的根构型几何参数与 实际根构型参数具有一定的相似性,但没有从理论 上进行说明,也没有用来研究根系动态数据的获取。 本试验首次依据相似理论,借助于营养袋纸培系统 试验所获得的二维根系生长数据,获得了实际根系 生长的三维数据。该方法可为其他生物学试验研究 提供借鉴。

[文章编号] 1671-9387(2005)10-0089-05

材料与方法 1

1.1 试验材料

本试验以广东省博罗县当地常用的大豆品种 (本地二号)为材料。

1.2 营养袋纸培系统试验

营养袋纸培系统^[4]由蓝色无磷吸水纸(美国 Anchor Paper 公司生产)、含孔径为0.5mm 均匀小 孔的聚乙烯塑料袋 支撑架以及营养液等部分组成 (图1)。该系统能使根系正常生长,同时也能将根构 型原位固定在二维平面上。供试大豆种子催芽后,放 入竖立的发芽纸筒中,在500 μ mol/L CaSO₄ 溶液中 培养 2~ 3 d, 待胚根长至 2 cm 左右且基根尚未分化 时,移苗到营养袋纸培系统,本试验根据基金项目需

0

[[]收稿日期] 2005-07-08

[[]基金项目] 国家自然科学基金项目(30370845,60375005);国家自然科学基金重点项目(30230220)

[[]作者简介] 钟 南(1965-),女,湖北荆州人,副教授,硕士生导师,主要从事计算机在农业方面的应用研究。 [通讯作者] 罗锡文(1945-),男,湖南株洲人,教授,博士生导师,主要从事农业工程研究。

要设低磷处理,同时设 20 个相同的样本,其营养元 素 (化合物)的含量为: P 0 2 μ mol/L, KNO₃3 000 μ mol/L, Ca (NO₃)₂ 2 000 μ mol/L, (NH₄)₂SO₄ 500 μ mol/L, MgSO₄ 250 μ mol/L, KCl 25 μ mol/L, H₃BO₃ 12 5 μ mol/L, MnSO₄ 1 μ mol/L, ZnSO₄ 1 μ mol/L, CuSO₄0 25 μ mol/L, (NH₄)_dMorO₂₄0 25 μ mol/L 和Fe-N a-EDTA 25 μ mol/L.



图1 营养袋纸培系统示意图

Fig 1 Specially designed paper pouch system 幼苗在室内控温控光(昼/夜温度为 25/20 , 昼光强为400 μmol/(m² · s))条件下生长。自移苗后 第2 天开始,每天下午17:00 进行根构型参数的原位 测定,总生长时间15 d,测试10 d。采用数字化扫描 仪将长在蓝色营养纸上的根系原位图像扫描存入计 算机,然后用专门的图像分析软件W inRH IZO(加拿 大Regent Instruments 公司生产)直接获取总根长、 根表面积、根体积、根系平均直径等几何参数。使用 直尺、量角器,采用直观的方法直接在蓝色营养纸袋 的根系原位图上量取大豆根系的主根长、基根长、基

根夹角、基根数和侧根数。

1.3 盆栽试验

试验土壤为采自广东省博罗县杨村试验基地的 赤红壤土(属低磷土壤)。为了保证根构型,在赤红壤 土中掺入同质量的沙子。因为土壤中的一部分养分 会被土壤固定,所以应向赤红壤土中添加营养成分, 使盆栽土壤的营养成分稍高于纸培系统。本次盆栽 试验所用赤红壤土的主要营养元素(化合物)含量 为:P03 μ mol Λ ,KNO33000 μ mol Λ ,Ca(NO3)22 000 μ mol Λ ,(NH4)2SO4500 μ mol Λ ,Ca(NO3)22 000 μ mol Λ ,(NH4)2SO4500 μ mol Λ ,MgSO4500 μ mol Λ ,MgCl25 μ mol Λ ,MnSO415 μ mol Λ ,Zn-SO415 μ mol Λ ,CuSO405 μ mol Λ ,NH4NO3400 μ mol Λ ,(NH4)MoO24025 μ mol Λ ,Fe-Na-ED-TA 25 μ mol Λ ,K2SO4300 μ mol Λ 和Na2BAO705

μmol/L。种植10盆。

试验在华南农业大学根系生物学研究中心温室 中进行,共种植大豆 10 盆,待其在自然光照条件下 生长 90 d 后,直接从盆中拔出根,将根清洗干净后 放在扫描仪上,其几何参数的获取方法与营养袋纸 培系统试验中数据的获取方法相同。

2 结果与分析

2.1 营养袋纸培系统试验

从20个根系样本中,选出根构型生长较好的样 本, 求出其每天各个测量项目的平均值, 并分别用 M icrosoft Excel 软件进行曲线拟合,得出各测量项 目与生长时间的数学拟合模型,其结果见表1。由表 1 可知, 在营养袋纸培系统试验中, 根系的大部分几 何参数如总根长、主根长等,从第1天开始增加,到 接近第10天时基本不再变化:而基根总长和侧根数 量从第2天开始增加,到接近第10天时基本不再变 化;基根数量从第2天起开始增加,第3天后便不再 增加,这说明植物根系各部分的生长过程是不同步 的。如果将根的各部分从开始生长到开始停止生长 这段时间称为生长周期,则根系各部分具有不同的 生长周期。在对生长周期内根系各部分的几何参数 用M icrosoft Excel 软件进行曲线拟合时发现, 这些 参数随时间都以三次多项式函数拟合最好,曲线呈 S 形。总根长和主根长的生长曲线分别见图2 和图3. 其余略去。

一般用生长函数来描述植物生长随时间连续变 化的过程,因此在营养袋纸培系统中,大豆根系的生 长函数可表示为:

$$G(t) = \begin{cases} 0 & 0 & t & T_{1} \\ y(t) = at^{3} + bt^{2} + ct + d & T_{1} & t & T_{2} \\ y(T_{2}) & t & T_{2} \end{cases}$$
(1)

式中,*G*(*t*)为根系的各几何参数,如主根长等;*t*为 生长时间;*a*,*b*,*c*,*d*为多项式函数的系数,依几何参 数不同而不同;*T*₁,*T*₂为各几何参数开始生长和开 始停止生长的时间。

孙广玉^[5]利用框架法测定了大豆根系在田间的 三 维生长过程,表明大豆根系实际生长过程呈 S 型 曲线变化,符合高等植物的生长规律^[6],而本试验纸 培大豆的根系生长函数也是 S 型曲线。廖红等^[4]分 别利用纸培与砂培试验对菜豆根系生长进行了研 究,并比较了生长中某一时刻 2 种栽培系统的根构型几 的根构型参数,结果发现 2 种栽培系统的根构型几

90

何参数具有相关关系。这说明纸培试验的根生长过 程与根的实际生长过程具有几何相似性和运动相似 性。由于纸培试验容易实现,而根在实际生长过程中

的几何参数难以获取,因而可利用二者的相似性来 估算实际根生长的根构型几何参数。

表1 纸培试验每天所获得的大豆根系几何参数平均值及其拟合多项式

Table 1 The average value of the geometrical parameters of the soybean root grow th in

specially designed paper pouch system and their fit polynomials

生长时间/d Grow th tin e	总根长/mm Total length of roots	主根长/mm Length of tap root	基根总长/mm Total length of basal roots	根总体积/ cm ³ Volume of roots	根表面积/ cm ² Surface area of roots	根直径 变化/mm Change of roots diam eter	基根数量 Number of basal roots	侧根数量 N um ber of lateral roots
0	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
1	70 00	69.70	0 00	0 00	2 17	0 00	0 00	0 00
2	233 00	139. 20	91.50	0 10	5.47	0 25	4 24	5 00
3	590 00	208 30	285 90	0 13	11.70	0 37	4 43	26 00
4	816 00	241.50	377. 20	0 15	15 50	0 40	4 43	37.00
5	916 00	255 80	421.00	0 19	17.03	0 41	4 43	41.00
6	993 00	265 30	457.80	0 20	17. 67	0 43	4 43	45 00
7	1 043 00	271.00	504 30	0 20	18 20	0 44	4 43	52 00
8	1 080 00	274 30	515 50	0 20	18 73	0 44	4 43	55.00
9	1 153 00	276 00	541.80	0 20	19.37	0 46	4 43	64 00
10	1 222 00	277. 30	551.60	0 20	19.66	0 49	4 43	68 00
拟合多项式 Fit po lynom ia l	- 0 266 t^3	0 453 t^3	0 864 <i>t</i> ³	0 001 <i>t</i> ³	0 003 t^3	0 003 t^3	$0 643 t^3$	0 098 t^3
	- 8 696 t^2	- 11. 666 t ²	- 23 281 t^2	- 0 014 t^2	- 0 333 t^2	- 0 052 t^2	- 5 881 t^2	- 2 162 t^2
	+ 239. 51 t	+ 99. 735 t	+ 223 77 t	+ 0 110 t	+ 5 080 t	+ 0 335 t	+ 17. 38 t	+ 20 892 t
y =	- 82 252	- 7.915	- 220 92	- 0 088	- 1. 314	- 0 262	- 12 142	- 21.867







2 2 盆栽试验结果

一般认为,大豆根系在接近 60 d 时即停止生 长^[5]。为了获得盆栽大豆和纸培大豆根系的相似常 数,在盆栽的10 个样本中,取5 个用来测量根系生长



图3 大豆主根长与时间的关系曲线

Fig 3 Curve of relationship between length

of tap root with grow th time

60 d 时的几何参数; 另 5 个用来测量根系生长 30 d 时的几何参数, 作验证用。分别取各参数平均值, 结 果见表 2。

Table 2 A verage value of the geometrical parameters of the soybean root systems grow th in the flow erpots

生长 时间/d Grow th tim e	总根长/mm Total length of roots	主根长/mm L ength of tap root	基根总长/mm Total length of basal roots	根总体积/ cm ³ Volume of roots	根表面 面积/cm ² Surface area of roots	根直径 变化/mm Change of roots diam eter	基根数量 Number of basal roots	侧根数量 Number of lateral roots
30	6 257. 00	400 00	4 037. 28	1. 35	108 25	0 53	43	420 33
60	11 281. 50	450	5 400	1. 50	146 05	0. 574	45	700

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3 相似理论分析结果

高等植物各器官,包括根系的生长,一般都要经 历慢速生长、快速生长和停止生长3个阶段,其曲线 呈S形变化,其生长函数一般也可表示成式(1)的形 式^[6]。如纸培试验结果分析所述,营养袋纸培系统试 验的根生长过程与根的实际生长过程具有几何相似 性和运动相似性。在生长周期内,根系的生长速率可 表示为:

$$v = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$$

式中, v 为根的各几何参数; t 为时间。

设营养袋纸培系统试验为系统1,实际根生长为 系统2。由于两系统相似,根系生长的各对应量应互 成比例[7].即:

$$\frac{t_2}{t_1} = \ddot{\mathbf{x}} \equiv \frac{y_2}{y_1} = \ddot{\mathbf{x}} \equiv \frac{y_2}{y_1} = \ddot{\mathbf{x}} \equiv (2)$$

根据前面的纸培试验统计和拟合结果,可表示 为:

$$y_1 = at_1^3 + bt_1^2 + ct_1 + d$$
 (3)

对上式求导,则:

$$v_1 = 3at_1^2 + 2bt_1 + c \tag{4}$$

由式(2)可知:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{T_{22}}{T_{21}} = \, \ddot{R} \, \Xi \tag{5}$$

将式(3)和式(5)代入式(6),从而可求出实际根 系生长 y2 的三次多项式表示式, 据此求出实际根系 各几何参数的生长函数(表3)。

同时,对求出的 y₂和已知的 y₁求导后代入式

例如, 欲求总根长的y 2。已知T 12= T 11= 0, T 22= 60, T 21= 10, 可求得:

$$y_{2} = \frac{y_{2}(60)}{y_{1}(10)} \left[\frac{a}{216} t_{2}^{3} + \frac{b}{36} t_{2}^{2} + \frac{c}{6} t_{2} + d \right]$$
(7)

其中从表2 中查得y2(60) = 11 281. 50 mm, 从表1 查 得y1(10)=122200mm,拟合的函数式见表3。

表3 大豆根系各部分几何参数的实际函数式 Table 3 Genometrical parameters of the actual soybean root systems according to function (7)

因变量 Dependent variable	总根长/mm Total length of roots	主根长/mm Length of tap root	基根总长/mm Total length of basal roots	根总体积/ cm ³ Volume of roots	根表面积/ cm ² Surface area of roots	根直径 变化/mm Change of roots diam eter	基根数量 Number of basal roots	侧根数量 Number of lateral roots
	- 0. 011 $4t^3$	0 003 $41t^3$	0 039 $2t^3$	0 000 $02t^3$	0 000 $1t^3$	0 000 $014t^3$	0 030 $2t^3$	0. 004 $62t^3$
y =	$-2.23t^2$	- 0 $526t^2$	- 6 331 $1t^2$	- 0 002 $9t^2$	- 0 068 $7t^2$	- 0 001 $69t^2$	- 1. $66t^2$	- 0 618 $2t^2$
	+ 368 53t	+ 26 98t	+ 365.12t	+ 0 137 6t	+ 6 29t	+ 0 065 3t	+ 29.43t	+ 35. 844 <i>t</i>
	- 759.35	- 12 846	- 2 162 81	- 0 657 75	- 9.76	- 0 306 891	- 123 362 7	- 225. 1

24验证

以盆栽第30天时大豆根系几何参数的实测值.

与按表3中公式计算所得的结果进行比较,对比结

果见表4。 表4 第30天时大豆根系各部分几何参数的实测值与计算值比较

Table 4 Comparison calculation results according to Table 3 with test result on the 30th day of grow th

项目 Item	总根长/mm Total length of roots	主根长/mm Length of tap root	基根总长/ mm Total length of basal roots	根总体积/ cm ³ Volume of roots	根表面积/ cm ² Surface area of roots	根直径 变化/mm Change of roots diam eter	基根数量 Number of basal roots	侧根数量 Number of lateral roots
实测值 Result of test	6 257.00	400 00	4 037. 28	1. 35	108 25	0.53	43	420 33
计算值 Result of calcula- tion	7 982 44	415. 224	4 151. 2	1. 427	119.81	0 512	80 94	418 58

由表4 可知,基根数量的计算结果与实测结果 差别很大,这是由于纸培试验中根系的基根数量在 第3天开始已停止增加,因此根据相似理论,盆栽大 豆的基根数量在第18 天后也不再增加, 第30 天的基 根数量应与第60天的相同,即为45(表2)。这说明在 利用相似理论预测实际根系的几何参数时,要按式 (1) 表示的3个时间段分段考虑。

表4 中除了基根数量外,其余的计算结果均与 试验结果基本吻合。引起基根数量误差的原因是多 方面的,如:无论是纸培还是盆栽,所用数据都取其 平均值: 盆栽取样是破坏性取样: 根系结构分枝繁 多,粗细不一,相互遮挡、交叉,即使是专用的根系扫 描仪和参数分析软件,也难以精确得到其几何参数, 如表1中的根总体积,在第6天以后基本没有增加,

这显然是不可能的; 计算中实际根系开始停止生长的时间*T*² 也是靠经验决定的。这些因素只能在试验 设计和结果分析时尽量避免或减少。

3 结 语

1)营养袋纸培系统试验结果表明,营养袋纸培 系统试验所获得的根系各几何参数随时间均呈S形 曲线变化,并具有不同步的生长过程和不同的生长 周期。

 2)分析和试验结果表明,营养袋纸培系统中根 系生长与实际根系生长具有相关关系。根据相似理 论,只要完成简便易行的营养袋纸培系统试验和盆 栽试验, 就可在一定程度上预测实际根系的生长过 程。

3)相似理论是模拟试验的主要依据,因此在设 计模拟试验时,要按相似理论的要求和研究目的来 设计试验,尽可能做到各方面相似,如材料相似,边 界条件相似,初始条件相似,几何相似等。

4) 在根系研究中, 相似理论的运用也有其局限 性。本研究设计的相似试验主要用于研究根系养分 获取时根系的生长, 在研究土壤的机械强度、通气性 对根生长的影响时, 由于纸培试验不能模拟土壤的 阻力、通气性等环境因素(相似条件不同), 故不能采 用。

[参考文献]

- [1] 程建峰, 潘晓云, 刘宜柏 作物根系研究法最新进展[J]. 江西农业学报, 1999, 11(4): 55-59.
- [2] 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[J] 农业机械学报,2004,35(2):104-107.
- [3] 严小龙, 廖 红, 杨 茂 根构型分析在豆科作物磷效率研究中的应用[J]. 中国农业科技导报, 1999, (1): 40-43.
- [4] 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[J]. 植物学报, 2000, 42(2): 158-163.
- [5] 孙广玉 大豆根系生长和活性特点的研究[J]. 大豆科学, 1996, 15(4): 317-320
- [6] Prusinkiewicz P, Hammel M, M jolsness E A nimation of plant development [J]. Computer Graphics, 1993, 27(3): 351-360
- [7] 李之中, 卢 薇 模型模拟试验方法的探讨[J]. 山西机械, 2001, (1): 21-22

Doping geometrical parameters of plant root systems grow th using theory of similarity

ZHONG Nan^a, LIAO Hong^b, YAN Xiao-long^b, LUO Xi-wen^a, XDNG Jun-tao^a

(a College of Engineering; b College of Resources and Environment, South China Agriculture University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract: The grow th of soybean root systems using the method of specially designed paper pouch system was researched. It was proved that actual root grow the could be modeled with the method of specially designed paper pouch system at certain extent. The geometrical parameters of the actual plant root grow the can be abtained with the help of theory of similarity.

Key words: method of specially designed paper pouch system; plant root system s; theory of similarity; root architecture