doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.023

基于微分 L -系统的水稻根系三维生长模型研究

杨　乐[1,2]　彭　军[1]　杨红云[2]　易文龙[2]

(1. 江西农业大学计算机与信息工程学院, 南昌 330045;
2. 江西省高等学校农业信息技术重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 植物根系结构是其根系的空间构型,水稻根系结构表现出高度的多样性。为了探明水稻根系结构和分布规律,利用水培法开展试验,测定不同生长时期的根系三维空间坐标和形态参数,对水稻根系结构进行高精度的测量。统计分析所测试验数据,确定了根节点的初始位置、各级枝根的生长方向以及根系的生长函数。通过整合水稻根系的拓扑结构,量化其生物学特征,提出基于微分 L -系统的水稻根系三维生长模型,以描述水稻根系生长规律,并检验该模型输出结果的精度。借助 Visual C + + 和 OpenGL 标准图形库实现了水稻根系三维生长可视化模拟系统,直观再现了水稻根系动态的生长过程。对比分析表明,系统对总根长、根表面积和根体积的平均模拟拟合度分别为 96.82%、95.86% 和 93.96%。

关键词: 水稻根系; 微分 L -系统; 三维生长模型; 可视化

中图分类号: S511; TP391　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0208-07

Three Dimensional Growth Modeling of Rice Root Based on Differential L - System

YANG Le[1,2]　PENG Jun[1]　YANG Hongyun[2]　YI Wenlong[2]

(1. *College of Computer and Information Engineering*, *Jiangxi Agricultural University*, *Nanchang* 330045, *China*
2. *Key Laboratory of Information Technology in Agriculture*, *College and Universities of Jiangxi Province*, *Nanchang* 330045, *China*)

Abstract: The architecture of rice roots is the spatial configuration of its roots, which shows a high diversity. To explore the architecture and distribution characteristics of rice roots, hydroponics method experiments were conducted to measure three dimensional spatial coordinates and morphological parameters of rice roots at different growth stages, which quantified the structure of rice roots with high accuracy. After analyzing the experimental data, the initial position of the root node, growth direction of branches and the root growth function were determined. Three dimensional growth modeling of rice roots based on differential L - system was proposed to describe its growth rule by analyzing the topological structure and quantifying their biological characteristics, and the output accuracy of the model was tested. Visual C + + and OpenGL standard graphics library were used to implement the three-dimensional visualization simulation system for rice root growth, and the dynamic growth process of rice roots was visually reproduced. Analysis results indicated that the average simulated fitness of the total root length, surface area and volume were about 96.82%, 95.86% and 93.96%, respectively. Therefore, the model can express the morphological characteristics and growth rules of rice roots at different growth stages, and the results may form a base for forthcoming study on the relationship between morphological structure changes of rice roots at different growth stages and their physiological and ecological factors.

Key words: rice roots; differential L - system; three dimensional growth model; visualization

收稿日期: 2019 - 04 - 04　修回日期: 2019 - 05 - 30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61862032、61762048、61562039)

作者简介: 杨乐(1979—),男,副教授,主要从事软件形式化和自动化以及农业信息技术研究,E-mail: jxnzhyangle@163.com

通信作者: 彭军(1981—),男,副教授,主要从事农业信息化、电子商务和知识工程研究,E-mail: totato@126.com

0　引言

植物根系主要用来吸收周围土壤中的水分和营养离子[1]，植物可以通过根系结构的变化来适应环境。水稻是我国主要粮食作物之一[2]，根系是水稻不断生长的“发动机”，其形态指标直接影响水稻的生长发育、营养水平和产量水平。根系建模是虚拟水稻可视化模型中重要的组成部分，可以弥补实际田间试验周期过长、环境因素随机波动等不足。根系建模的研究方法包括：制作出土根系手绘图[3]；非侵入性技术，如计算机断层扫描[4-5]、核磁共振成像[6]或中子射线透照术[7-8]等；以及数学建模和仿真模拟[9-14]。PAGES 等[9]和 DIGGLE[15]首次提出了三维根系模型，这些模型运用基于规则的方式描述根系中每条枝根生长和分支的拓扑结构。LYNCH 等[10]和 SPEK[11]以可视化为研究重点，建立了新的根系生长模型。PAGES 等[16]提出一种名为 Root Typ 的通用模型，用于全局分析和定量根系的架构，并简化了架构多样性的表示。DUSSERRE 等[17]提出从土壤剖面上的根交点估算旱稻根长密度的简单通用模型。LEITNER 等[18]引入根系生长的参数 L-系统模型，该模型能够再现 3 个不同的根系拓扑图。GE 等[19]利用旱稻根系结构参数建立了三维可视化仿真模型。CLARK[20]介绍了一种新的三维成像和软件平台，用于在幼苗发育过程中对三维根系性状进行高通量表达。赵春江等[21]提出一种植物根系逐部位交互式精确设计方法，并在玉米根系建模中予以应用。徐其军等[22]构建基于形态特征参数的水稻根系几何模型，实现不同生长条件下水稻根系生长动态的三维可视化。YIN 等[23]利用双尺度自动机和 L-系统相结合方法，构建了水稻根系形态结构模型。张玉等[24]采用 $Y = a(1 - b^X)$ 建立了根系纵向和横向分布模型。文献[25-28]通过分析水稻根系生长发育过程中的变化规律，利用作物模拟技术建立了水稻根系形态发育数学模型。TSUNG 等[29]构建了水稻根系的三维图像，并从三维图像中对表型性状进行了量化。

上述模型多基于形态参数和生理机能、规则与拓扑结构、根长密度和土壤的关系以及 L-系统与根系生长参数等，而动态连续仿真模拟根系生长进程的模型相对较少。传统 L-系统模拟植物根系的准确度不佳，模拟效果不理想。本研究改进微分 L-系统的产生式，结合生长函数，提出基于微分 L-系统的水稻根系三维生长模型，以实现水稻根系三维生长可视化模拟系统，从而直观地再现不同水稻品种和不同氮素水平下根系动态连续的生长过程。

1　材料与方法

1.1　试验材料

2017—2018 年，在江西农业大学农学试验站运用水培法开展两轮水稻栽培试验，以江西地区推广的水稻作为试验供试对象。在实验室的温室里，采用飘浮育苗[30]的方式进行水稻培育。定制 128 个透明玻璃缸，在玻璃缸中盛有水稻生长所需的培养液，在泡沫塑料板上钻一个直径为 1 cm 的圆孔，再把泡沫塑料板盖在玻璃缸上，将稻株主茎通过泡沫塑料板上圆孔插入培养液，使茎基部垂直地插入水下 2 cm，每个玻璃缸中培育两株水稻。

1.2　试验方法

每轮试验栽培 256 株水稻，每次选取 8 株水稻作为测量样本，分别测定根系在玻璃缸中的各项形态参数指标和分枝根的发根位置。借助 WinRHIZO 根系分析系统分析水稻根系图像[31]，测量根长、根质量和直径等，统计分析总根长、表面积和体积的平均值。通过 Polhemus FASTRAK 三维仿真运动追踪定位系统测定分枝根的空间坐标点，测量枝根与根轴的夹角，记录其生长方向。此外，用数码相机直接从玻璃缸侧面拍摄水稻根系的生长情况，利用计算机实时控制数码相机，定点定时拍摄根系生长情况，试验装置如图 1 所示。所有的测量、统计和拍摄结果均保存到数据库中，方便后续模型的检验以及可视化模拟的实现。

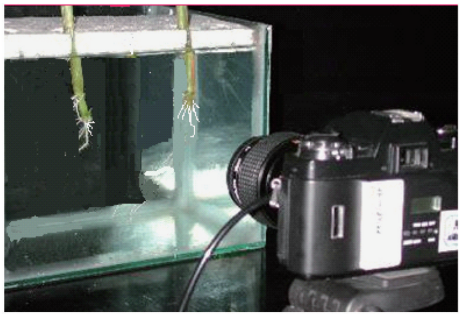


图 1　试验装置

Fig. 1　Experimental facility

2　水稻根系三维生长模型参数选择

2.1　水稻根系形态特征

依据发根位置的不同，水稻根系可以划分成种子根和不定根两种。种子根是由种子的胚根直接生长发育而成，数量只有 1 条，在幼苗时期负责吸收植株生长所需要的水分和养分等。不定根是整个水稻根系的主体部分，是由植株基部茎节（包括分蘖节）产生的根。直接由不定根产生的分枝根称为 1 级枝根，由 1 级枝根产生的分枝根称为 2 级枝根，直至 6

级枝根。不定根在育苗期的发根数量并不多,随着水稻生长速度的加快,发根数量不断增加。到抽穗期前后,水稻根系的总量达到顶峰,形成了纵横交错的各级枝根。根据试验数据和不定根的特点,不定根的发根数量会随水稻生长阶段的不同而发生相应的变化,不定根上产生 1 级枝根的时间大概是在 3 叶期后,而后随着从茎节上产生不定根的同时,又可能从 1 级枝根上产生 2 级枝根。研究表明,茎节最上面所产生的不定根,其产生的分枝根的数量越多,分枝根的级次就越高;相反,茎节下部所产生的不定根,其产生的分枝根的数量相对越少,分枝根的级次就越低。水稻根系从形态和拓扑结构来看,不定根和各级枝根存在明显的自相似性,表现出水稻根系分生的分形特征。水稻根系构成示意图如图 2 所示。

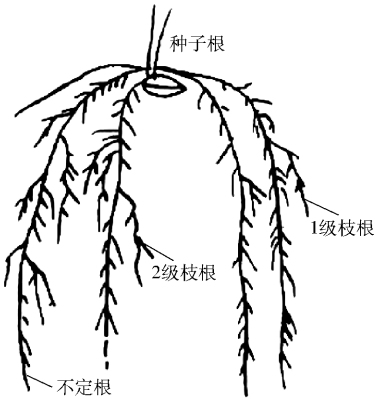


图 2 水稻根系构成示意图

Fig. 2 Root architecture of rice

2.2 根节点初始位置

将种子根的发根位置作为坐标系原点(x_0,y_0,z_0),根系垂直向下生长。根据几何空间向量及三维坐标运算准则[25],根节点 i 的坐标(x_i,y_i,z_i)可表示为

$$\begin{cases} x_i = (1 - \mathrm{rand}(1))x_{i-1} + \mathrm{rand}(1)x_{i+1} \\ y_i = (1 - \mathrm{rand}(1))y_{i-1} + \mathrm{rand}(1)y_{i+1} \\ z_i = (1 - \mathrm{rand}(1))z_{i-1} + \mathrm{rand}(1)z_{i+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中 rand(1)——0 ~ 1 之间的随机函数

$(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$——根节点 $i-1$ 的初始位置坐标

$(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$——根节点 $i+1$ 的初始位置坐标

2.3 根节点生长方向

水稻根系的各级分枝根具有自相似的拓扑结构,因此,设置 α、β、γ 3 个角度来描述分枝根的生长方向,如图 3 所示。上级根节点的生长方向和产生的随机偏差共同影响着各级分枝根的生长方向。试验数据表明,在水平方向上分枝根呈现均匀分布的状态,生长方向在垂直方向(γ 方向)上会随机地发生偏转。根节点的生长方向($\boldsymbol{D}_i$)表示为

$$\boldsymbol{D}_i = \boldsymbol{D}_{i-1} + \boldsymbol{D}_g + \boldsymbol{\zeta}_i \quad (2)$$

其中 $\boldsymbol{D}_{i-1} = (x_{i-1}\cos\alpha_{i-1}, y_{i-1}\cos\beta_{i-1}, z_{i-1}\cos\gamma_{i-1})$

$\boldsymbol{D}_g = (0, \lambda_i, 0)$

式中 $\boldsymbol{D}_{i-1}$——上级根节点的生长方向

$\boldsymbol{D}_g$——指向地心的向量,表示根节点不断往下生长的方向

λ_i——根节点向地生长的调整系数

$\boldsymbol{\zeta}_i$——根节点在垂直方向上产生随机偏转的影响因子

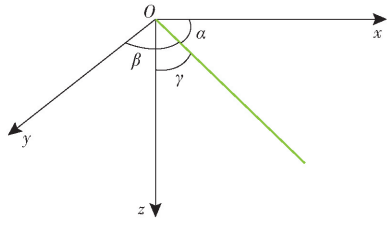


图 3 根节点的生长方向

Fig. 3 Growth direction of root node

1 级枝根和 2 级枝根具有不同的生长特点。将 1 级枝根在 γ 方向上的统计划分成 7 个不同的角度范围,每个角度都有各自的发根概率,统计表明当 γ 处于 0° ~ 90°之间时,根系发根概率较大,其他角度范围的发根概率较小,如表 1 所示。试验数据表明,2 级枝根的 γ 在 30° ~ 60°内随机取值。

表 1 γ 与发根概率的性能统计

Tab. 1 Performance statistics of γ and rooting probability

γ/(°)	0 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 45	45 ~ 60	60 ~ 75	75 ~ 90	>90
发根概率/%	0.069	0.121	0.221	0.291	0.156	0.098	0.044

2.4 根系生长函数

生长函数用来描述水稻根系各生长要素(如根长)在自然生长条件下随时间变化而产生的连续变化的过程。水稻根系总根长随土层深度的变化情况如图 4 所示。图 4 表明,水稻总根长在分蘖期和成熟期差异明显,分蘖期的总根长不到 50 cm,成熟期的总根长接近 100 cm。但是,水稻根系在分蘖期的入土深度比成熟期的入土深度更深,分蘖期的入土深度接近 30 cm,而成熟期的入土深度不到 25 cm,表明水稻根系生长的前期入土相对较深,而后期入土相对较浅。在 0 ~ 10 cm 的土层深度内,水稻总根长在分蘖期和成熟期都表现为随着入土深度的增加

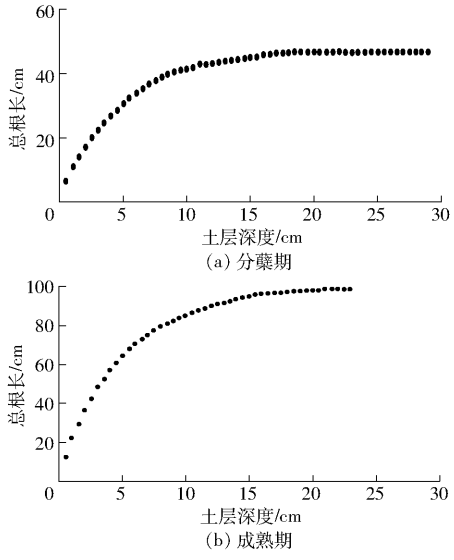


图 4　水稻根系总长度随土层深度的变化曲线

Fig. 4　Changes of total rice root length with soil depth

几乎呈线性增长，生长速度较快；在 10 ~ 30 cm 的土层深度内，虽然水稻总根长随着入土深度的增加而增长，但生长速度明显变缓。水稻根系的生长速度函数表示为

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\begin{cases}6v\dfrac{x_{\max}-x_{\min}}{T^2}\left(1-\dfrac{t}{T}\right)t & (T_1\leqslant t\leqslant T_2)\\ 0 & (t>T_2)\end{cases} \tag{3}$$

其中　　$T=T_2-T_1$

式中　$x_{\max}$、$x_{\min}$——水稻根系生长长度的最大值和最小值

T——根系生长周期

v——根系生长速度调控参数，取 0 ~ 1，通过设定 v 值能调控各级枝根的生长速度

t——生长时间

T_1——开始生长的时间

T_2——结束生长的时间

3　水稻根系三维生长模型

约 75% 的水稻根系生长在土壤中[32]，根系的生长环境复杂多变，而根系外在结构变化过程就是一个不断自我“重复”的过程。本文结合根节点的初始位置、生长方向以及生长函数，在模型中引入并改进微分 L-系统，提出了基于微分 L-系统的水稻根系三维生长模型，模型产生式如下

$$\begin{cases}V:\{Advroot,Firbroot,Secbroot\}\\ \omega:\{Advroot(0),Firbroot(0),Secbroot(0)\}\\ P:\{P_1,P_2,P_3,P_4,P_5\}\\ P_1:Advroot(l,x,y,z,\alpha,\beta,\gamma):\langle t\rangle Advroot\left(l+\dfrac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t},x',y',z',\alpha',\beta',\gamma'\right)\left(n_f\times\dfrac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}\times Firbroot(0)\right)\\ P_2:Firbroot(l,x,y,z,\alpha,\beta,\gamma):\langle t,p_i\rangle Firbroot\left(l+\dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t},x',y',z',\alpha',\beta',\gamma'\right)\left(n_s\times\dfrac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}\times Secbroot(0)\right)\\ P_3:Secbroot(l,x,y,z,\alpha,\beta,\gamma):\langle t,p_i\rangle Secbroot\left(l+\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t},x',y',z',\alpha',\beta',\gamma'\right)\\ P_4:Firbroot(l,x,y,z,\alpha,\beta,\gamma):\langle X,Y,Z\rangle Firbroot(l,x,y,z,\alpha',\beta',\gamma')\\ P_5:Secbroot(l,x,y,z,\alpha,\beta,\gamma):\langle X,Y,Z\rangle Secbroot(l,x,y,z,\alpha',\beta',\gamma')\end{cases} \tag{4}$$

式中，V 表示水稻根系三维生长模型的各级枝根集合，$Advroot$、$Firbroot$、$Secbroot$ 分别表示不定根、1 级枝根和 2 级枝根；ω 表示模型的初始公理集合，$Advroot(0)$、$Firbroot(0)$ 和 $Secbroot(0)$ 依次对应不定根、1 级枝根和 2 级枝根的初始状态；P 表示模型中所有产生式的集合，P_1、P_2、P_3 分别为不定根、1 级枝根和 2 级枝根的生长表达式。P_4 和 P_5 分别表示 1 级枝根和 2 级枝根的边界约束条件。如果水稻根系生长到了玻璃缸边界，则需要通过调整根节点的角度和位置坐标来改变其生长方向。m、f、s 分别表示不定根、1 级枝根和 2 级枝根的生长函数；l 表示根长，x、y、z 表示根节点的生长位置坐标值；x'、y'、z' 表示新的坐标值，α'、β'、γ' 表示新的生长方向，新的坐标和新的角度需要根据矩阵运算变化而来；p_i 表示根节点向下生长的概率，X、Y、Z 表示边界的位置坐标集合；n_f 和 n_s 分别表示 1 级枝根和 2 级枝根产生分枝数量的函数。

4　水稻根系三维生长模型验证

4.1　模型检验

为了评估根系三维生长模型预测数据与现场观测数据之间的一致性水平[33]，将平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、模型效率(ME)和一致性指数(AI)相互结合来检验该水稻根系模型的准确性。模型效率和一致性指数的计算公式为

$$M_E=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2} \tag{5}$$

$$A_I=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|O_i'|-\overline{O})^2} \tag{6}$$

式中 n——现场观测总数

P_i——模型预测值

O_i——现场观测值

$\overline{O}$——现场观测值均值

M_E——模型效率

A_I——一致性指数

O_i'——Q_i 的导数

如果 MAE 和 RMSE 的计算值接近于零,表明该模型预测值与观测值非常接近;如果 ME 的值为 1,则表示该模型是一个完美的预测模型;AI 是一种度量预测值与观测值精确度的指标,如果 AI 的值为 1,则表示预测值和观测值完全一致。

4.2 模型验证

为了检验该模型的适用性和精确度,以土层深度 6、12、18、24、30 cm 作为输入参数,对模型进行标定,得到模型的预测数据,再提取这 5 种不同土层深度下水稻根系的实测数据,对模型进行模拟验证,并对结果进行性能统计分析,结果如表 2 所示。MAE 为 0.011 ~ 0.017,RMSE 为 0.019 ~ 0.026,两者都趋近于 0。MAE 和 RMSE 均呈现随土层深度增加而逐渐减小的趋势;ME 为 0.674 ~ 0.821,AI 为 0.839 ~ 0.911,两者都趋近于 1。ME 和 AI 均呈现随土层深度的增加而逐渐增加的趋势。所有的性能参数都表明,在 0 ~ 30 cm 的土层内,模拟效果较好。表明水稻根系在不同土层深度下的实测数据与模型预测数据具有较好的一致性,因此,该三维生长模型可以有效地预测水稻根系在不同土层深度下的根系结构。

表 2 不同土层深度下模型模拟的性能统计

Tab. 2 Model performance statistics of simulation at different soil depths

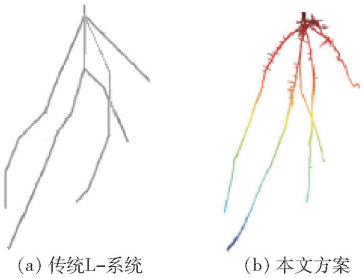
土层深度/cm	MAE	RMSE	ME	AI
0 ~ 6	0.017	0.026	0.674	0.839
6 ~ 12	0.015	0.024	0.785	0.896
12 ~ 18	0.013	0.022	0.789	0.901
18 ~ 24	0.012	0.020	0.793	0.908
24 ~ 30	0.011	0.019	0.821	0.911

5 水稻根系三维生长模型的实现

5.1 两种模拟方案的比较

分别以传统 L-系统和本文方案对水稻根系的形态结构进行可视化模拟,为了让可视化表达的效果更加显著,在本文生长模型中使用渐变色来对根系进行颜色渲染。其仿真结果如图 5 所示。

传统 L-系统经过 3 次迭代之后产生的水稻根系模拟图像如图 5a 所示,根系的主根与各级分枝根较为直立,弯曲程度不够理想,根系表面存在褶皱的情况,根系结构图具有较高的相似性,只能用于粗略表达水稻根系的拓扑结构形状,无法把根系个体细节生动地表现出来;图 5b 是由本文模型生成的水稻根系模拟图,结合微分方程来深入优化根系图像的三维展示效果,表现出了根系生长进程的连续性变化,能够看到各级枝根逐渐伸长的效果,根系的生成图更趋于平滑,直立与弯曲相结合,能够表示水稻根系几何形态的弯曲,生成的根系形态更加自然平滑。



(a) 传统L-系统 (b) 本文方案

图 5 水稻根系形态模拟图

Fig. 5 Simulation diagrams of rice root morphology

5.2 三维可视化仿真系统的实现

依据根节点的初始位置、各级枝根的生长方向以及生长函数,结合基于微分 L-系统的水稻根系三维生长模型,借助 Visual C + + 操作平台和 OpenGL 标准图形库构建了实现水稻根系三维生长可视化仿真系统。为了检验该系统输出结果的精度,将水稻根系的数码图像与同时期的系统仿真模拟图像进行对比,正常施肥和水分的条件下水稻根系第 30、45、60、75 天对照效果如图 6 所示。进一步对不同品种的水稻根系进行三维可视化模拟,图 7 是模拟金优 458、株两优 819 和中嘉早 17 水稻根系在第 45 天时的生长情况,图 8 是淦鑫 203 在低氮、中氮和高氮 3 种氮素水平下根系的三维形态模拟图。

为了检验水稻根系三维生长可视化模拟系统生成根系图像的精确程度,分别对总根长、根表面积和根体积进行模拟值和实测值的对比分析,结果如图 9 所示。统计分析结果表明,系统在总根长、根表面积和根体积的平均模拟拟合度分别达到了 96.82%、95.86% 和 93.96%,模拟值与实测值相对误差最大值为 3.84%,最小值为 0.68%,平均值为 1.12%。本文模拟系统所生成的水稻根系图像与实测图像较为一致,具有较强的真实感。

6 结束语

运用水培法开展水稻栽培试验,提取根系各类形态参数,利用专业工具统计分析试验数据,确定根节点的初始位置、各级枝根的生长方向以及根系的生长函数,分析水稻根系的拓扑结构,进一步量化生

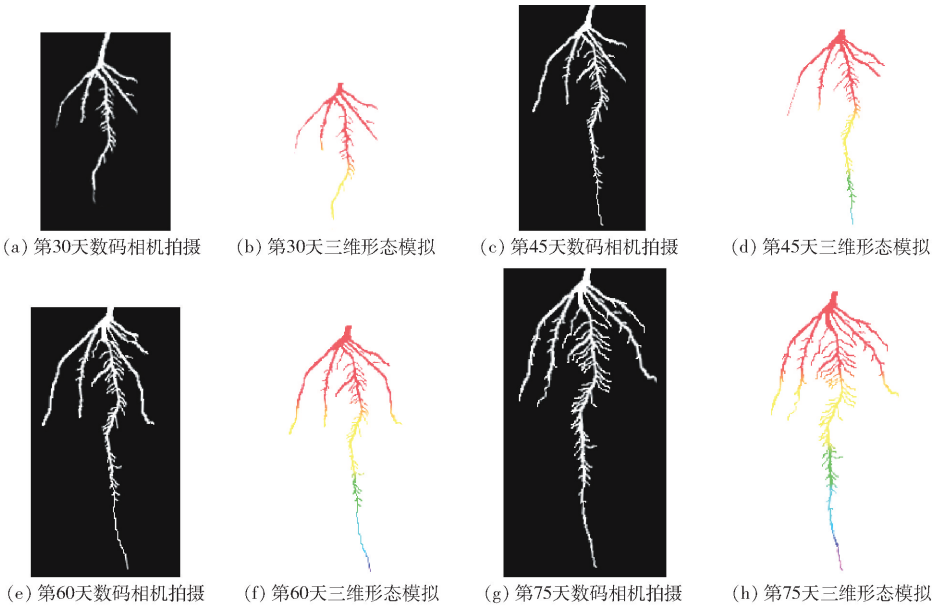


图 6　第 30、45、60、75 天水稻根系对比(淦鑫 203)

Fig. 6　Comparison of rice root on 30, 45, 60 and 75 days (Ganxin 203)

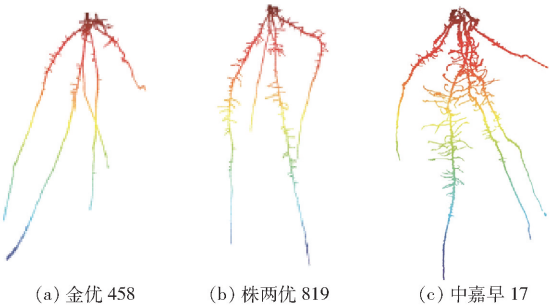


图 7　不同水稻品种根系三维形态模拟图(第 45 天)

Fig. 7　Three-dimensional simulation diagrams of root morphology with different rice varieties (45 days)

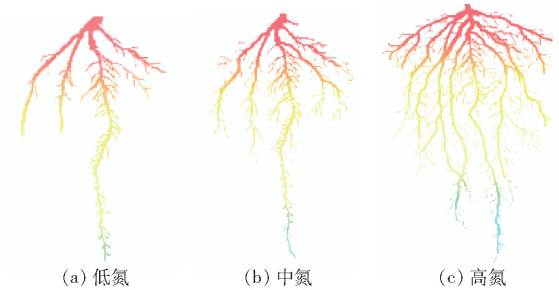


图 8　不同氮素水平下水稻根系三维形态模拟图(淦鑫 203)

Fig. 8　Three-dimensional simulation diagrams of root morphology at different nitrogen rates (Ganxin 203)

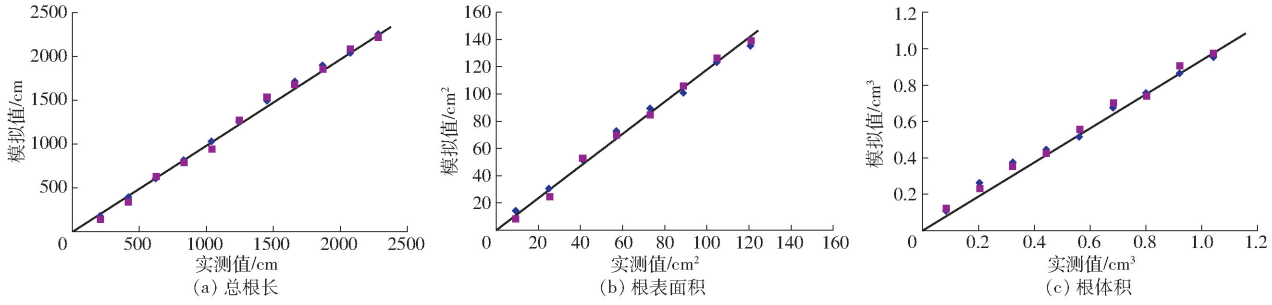


图 9　水稻根系结构实测值与模拟值比较

Fig. 9　Comparison of observed and simulated values of rice root structure

物学特征,总结根系的形态结构与生长特性,构建了基于微分 L-系统的水稻根系三维生长模型,并在三维空间中实现了水稻根系的可视化模拟。模型验证结果显示,MAE 和 RMSE 都接近于 0,ME 和 AI 接近于 1,表明模拟结果与水稻田间实测结果相似度较高。对两种模拟方案进行比较,可视化模拟系统生成的三维水稻根系图像在形态结构上与真实的根系图像非常相似,说明本文系统能够直观地再现水稻根系在田间的生长过程。分析结果表明,该系统生成的根系图像在总根长、根表面积和根体积的平均模拟拟合度较高,变异系数较小,模拟结果达到了显著水平。

参　考　文　献

[1] KRESZIES T, SCHREIBER L, RANATHUNGE K. Suberized transport barriers in arabidopsis, barley and rice roots: from the model plant to crop species[J]. Journal of Plant Physiology, 2018, 227(8):75-83.

[2] 李泽华,马旭,李秀昊,等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018, 49(5):1 - 20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):1 - 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180501&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.001. (in Chinese)
[3] KUTSCHERA L. Wurzelatlas mitteleuropaischer ackerunkrauter und kulturpflanzen[J]. Economic Botany, 1963, 17(4):158 - 159.
[4] FLAVEL R J, GUPPY C N, TIGHE M, et al. Non-destructive quantification of cereal roots in soil using high-resolution X-ray tomography [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(7): 1 - 9.
[5] MAIRHOFER S, ZAPPALA S, TRACY S R, et al. RooTrak: automated recovery of three-dimensional plant root architecture in soil from X-ray microcomputed tomography images using visual tracking [J]. Plant Physiology, 2012, 158(2):561 - 569.
[6] SCHULZ H, POSTMA J A, VAN DUSSCHOTEN D, et al. Plant root system analysis from MRI images, computer vision, imaging and computer graphics [J]. Theory and Application, 2013(359): 411 - 425.
[7] OSWALD S E, MENON M, CARMINATI A, et al. Quantitative imaging of infiltration, root growth, and root water uptake via neutron radiography[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(3):1035 - 1047.
[8] MORADI A B, HÉCTOR M C, ROBINSON B, et al. Neutron radiography as a tool for revealing root development in soil: capabilities and limitations[J]. Plant and Soil, 2009, 318(1 - 2):243 - 255.
[9] PAGES L, JORDAN M O, PICARD D. A simulation model of the three-dimensional architecture of the maize root system [J]. Plant and Soil, 1989, 119(1):147 - 154.
[10] LYNCH J P, NIELSEN K L, DAVIS R D, et al. SimRoot: modelling and visualization of root systems [J]. Plant and Soil, 1997, 188(1):139 - 151.
[11] SPEK L Y. Generation and visualization of root-like structures in a three-dimensional space [J]. Plant and Soil, 1997, 197(1):9 - 18.
[12] DUNBABIN V M, DIGGLE A J, RENGEL Z, et al. Modelling the interactions between water and nutrient uptake and root growth[J]. Plant and Soil, 2002, 239(1):19 - 38.
[13] DOUSSAN C, PIERRET A, GARRIGUES E, et al. Water uptake by plant roots: II-modelling of water transfer in the soil root-system with explicit [J]. Plant and Soil, 2006, 283(1 - 2):99 - 117.
[14] YAN H P. A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth [J]. Annals of Botany, 2004, 93(5): 591 - 602.
[15] DIGGLE A J. Rootmap—a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems [J]. Plant and Soil, 1988, 105(2):169 - 178.
[16] PAGES L, VERCAMBRE G, DROUET J L, et al. Root Typ: a generic model to depict and analyses the root system architecture [J]. Plant and Soil, 2004, 258(1): 103 - 119.
[17] DUSSERRE J, AUDEBERT A, RADANIELSON A, et al. Towards a simple generic model for upland rice root length density estimation from root intersections on soil profile[J]. Plant and Soil, 2009, 325(1 - 2):277.
[18] LEITNER D, KLEPSCH S, KNIEB A, et al. The algorithmic beauty of plant roots—an L - system model for dynamic root growth simulation [J]. Mathematical Modelling of Systems, 2010, 16(6):575 - 587.
[19] GE Y, GE Z, YI H, et al. Visual simulation of upland rice root as related to soil compaction[C]// International Conference on Digital Manufacturing & Automation, IEEE, 2011:1392 - 1394.
[20] CLARK R. 3-dimensional root phenotyping with a novel imaging and software platform [J]. Plant Physiology, 2011, 156(2): 455 - 465.
[21] 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 CSAE, 2007, 23(9): 1 - 6. (in Chinese)
[22] 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 CSAE, 2010, 26(10): 188 - 194. (in Chinese)
[23] YIN Zhengbo, YAO Fang. Construction and visualization of rice roots model based on artificial life [C] // International Conference on Computer Science and Network Technology, IEEE, 2012:539 - 544.
[24] 张玉,秦华东,黄敏,等. 水稻根系空间分布特性的数学模拟及应用[J]. 华南农业大学学报,2013,34(3):304 - 308.
ZHANG Yu, QIN Huadong, HUANG Min, et al. Mathematical simulation of rice root spatial distribution and its application [J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(3): 304 - 308. (in Chinese)
[25] 杨乐,唐建军,何火娇. 水稻根系空间分布特性的三维建模及可视化研究[J]. 江西农业大学学报,2016,38(3):588 - 592.
YANG Le, TANG Jianjun, HE Huojiao. Three dimensional modeling and visualization of spatial distribution of rice root [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2016, 38(3): 588 - 592. (in Chinese)
[26] 杨乐,万韵. 水稻根系生长动态模拟模型及可视化表达[J]. 实验技术与管理,2016,33(8):37 - 40.
YANG Le, WAN Yun. Visualization of dynamic simulation mode on rice root growth [J]. Experimental Technology and Management, 2016, 33(8): 37 - 40. (in Chinese)
[27] 杨乐. 基于 L 系统的水稻根系模型构建及可视化研究[J]. 科技通报,2017,33(5):156 - 158,202.
YANG Le. Modeling and visualization of rice root based on L - system[J]. Bulletin of Science & Technology, 2017, 33(5): 156 - 158,202. (in Chinese)
[28] YANG Le, ZHOU Qiangqiang, WAN Yun, et al. Three dimensional visual simulation of rice root growth[C]// International Conference on Multimedia Technology, IEEE, 2011:3289 - 3292.
[29] TSUNG Hanhan, YAN Fukuo. Developing a system for three-dimensional quantification of root traits of rice seedlings [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018(152):90 - 100.
[30] PUNSALAN A P. The germination of *Helonias bullata* L. (swamp pink) in response to flooded, saturated, and dry conditions [D]. Cullowhee: Western Carolina University, 2013.
[31] 冀荣华, 李想, 祁力钧,等. 盆栽番茄根系三维生长模型构建与实现[J]. 排灌机械工程学报, 2014,32(9):795 - 801.
JI Ronghua, LI Xiang, QI Lijun, et al. Three-dimensional growth modelling and realization for potted tomato root system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(9): 795 - 801. (in Chinese)
[32] ATULBA S L, GUTIERREZ J, KIM G W, et al. Evaluation of rice root oxidizing potential using digital image analysis [J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2015, 58(3):463 - 471.
[33] ENVIRON P W, JYOTIPRAVA C, SARANGI A, et al. Prediction of root zone water and nitrogen balance in an irrigated rice field using a simulation model [J]. Paddy & Water Environment, 2015, 13(3):281 - 290.