

烟草根系生长的三维模拟仿真

席磊¹, 冀亚丽¹, 汪强¹, 张龙龙¹, 马新明²

(1 河南农业大学 信息与管理科学学院, 河南 郑州 450002; 2 河南农业大学 农学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 形态可视化技术是虚拟植物研究的关键技术之一. 本研究以烟草根系为对象, 将系统分析方法和数学建模技术应用于烟草根系的形态建成, 通过对烟草根系形态数据的定量分析, 并结合前人的研究成果, 构建了烟草根系生长模型(纵向伸展速率、横向伸展速率、根系生长方向)、根系分枝模型(分枝方向、分枝位置、分支数量)等. 以此为基础, 运用计算机图形学技术, 构建了烟草根系虚拟生长系统. 运行结果表明该系统能较好地模拟烟草根系的形态特征, 能较逼真的实现烟草根系生长过程的虚拟显示.

关键词: 烟草根系; 植物虚拟; 三维可视化

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)04-0106-05

Three-dimensional Visual Simulation of Tobacco Root Growth

XI Lei¹, JI Ya-li¹, WANG Qiang¹, ZHANG Long-long¹, MA Xin-ming²

(1 College of Information and Management Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2 College of Economics and Management, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Morphology visualization is one of the key technologies for constructing virtual plants. By applying the system analysis principle and mathematical modeling technique to the morphogenesis, the model for simulating root morphogenesis development of tobacco was developed through the quantitative analysis of the experimental data and integrating the existed theory and knowledge. The model includes root growth and root branching submodel. The root growth submodel can quantitatively describe vertical and horizontal extension rate and growth direction. The root branching submodel can describe branching direction, branching location and number of branches. Based on the model and computer graphics technology, the virtual growth system for tobacco root was constructed. The operational results of the system show that the system can primarily realize the visual description of growth process of tobacco root.

Key words: tobacco root system; virtual plant; 3-dimension visualization

1 引言

20 世纪 80 年代以来, 虚拟作物研究进展迅速, 已成为农业科学研究的前沿领域之一. 国内外已先后对玉米、小麦、水稻开展了虚拟研究^[1-5]. 根系是作物重要的组成器官之一, Diggle^[6]建立了第一个关于根系年龄、位置、根段取向的三维模型. 经过 20 多年的发展, 研究人员采用 L 系统、分形方法、参考轴技术、植物三维重建法对多种植物建立了根系虚拟生长模型^[7-11]. 由于根系生长环境的不可视性以

及测量技术的局限性, 对根系的模拟研究发展迟缓, 对烟草根系的研究更是少有报道. 烟草是一种特殊的经济作物, 其根系生长具有双峰现象, 对烟草品质产生直接影响. 文中在总结前人研究成果并分析烟草根系形态建成试验数据的基础上, 建立烟草根系生长发育模型, 在 Visual C++ 平台上, 借助 OpenGL 构建基于形态模型的烟草根系虚拟生长系统, 初步实现对烟草根系生长过程中形态特征的可视化表达, 以期为虚拟作物的研究提供技术基础.

收稿日期: 2009-03-29; 修回日期: 2009-05-29

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2008AA10Z220); 河南省重点科技攻关项目(082102140004)

2 系统研究方法

2.1 烟草根系的生长规律

烟草的根属直根系,由主根、侧根和不定根三部分组成.在适宜的温、湿度和气体交换条件下,幼根突破种皮伸长出来.幼根钻出种皮后即向地屈曲而发生根毛,根茎逐渐伸直,根尖入土固定展开子叶后开始独立生活.烟草幼苗从第一片真叶出现后,根系生长迅速,而地上部分生长缓慢,过3~5日,第二片真叶出现时,主根上就发生侧根.不同类型的根在土壤中的走向不同,主根可下扎2m以上,但70%~80%的根系集中于16~50cm的土层内,烟根的横向分布为25~28cm^[12].

2.2 烟草根系生长模型

本研究采用根箱法设置实验,建立了根系生长发育模型、根系水分吸收模型和茎叶与根系生长物质分配模型.根系生长发育模型用于确定根空间分布随时间的变化,该模型包括:(1)根系生长子模型,由纵向伸展速率、横向伸展速率模型和根系生长方向模型构成;(2)根系分枝子模型,由分枝方向、分枝位置、分枝数量、分枝年龄、分枝间距和分枝密度模型构成.物质分配模型用于控制根段生长,根系生长受到每个时间段分配到根系的物质量影响,如果分配到根系的可吸收量少于潜在的需要量,根段停止生长.模型描述及相关参数提取见参考文献[13-14].

2.3 设计方法

将烟草根系看成一组分枝轴:一级分枝(一级侧根)连接在主根上,二级分枝(二级侧根)连接在一级分枝上,其余可类推.每天新的分枝轴都可能产生,已有的根轴都可能生长和分枝.要确定根系的空间位置,必须知道根上足够多点的空间坐标,假定根轴由一系列生长方向不同的线性根段组成,这些根段是在有限时间段内所有生长分枝的顶点移动到新的位置发展而成的,这样仅需两点坐标就可以确定其空间位置.

模拟过程中,以根系积温生长周期1d为步长,在每个时间步长内,首先根据根系生长和根系分枝模型,获得每个生长周期内所有存活根段的更新(根段在三维上的相关性连接、分枝级别、空间坐标、几何尺寸、分枝次序等),并以此作为根系参数(根系长度、数量、根长指数、根长密度等)计算依据;然后应用物质分配规则,获得根个体分配的物质量,同时根据根段周围土体的土壤阻力和土壤温度条件计算新

根的潜在吸收需要量,如果分配到根系的可吸收量少于潜在的需要量,所有根段将相应的退缩回去.根系模拟流程如图1所示.

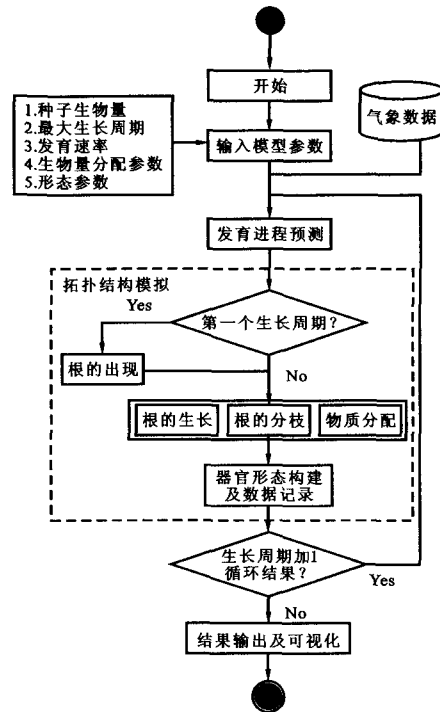


图1 烟草根系生长模拟的流程

3 关键技术

3.1 数据结构

该数据结构包含的信息有:(1)根尖与根段的端点位置空间坐标,由此可确定根的生长方向;(2)根的生理年龄,根的属性标志之一,确定了根或根段的生理年龄,根的几何尺寸参数、分枝状况、生长过程中向性因子的大小、轴向角的大小等参数也就相应确定,从而可确定根的行为特征;(3)根的生长年龄,反映该根从其母轴上产生到当前生长周期所经历的周期数,主要是用来表征同一生理年龄的根在不同的生长年龄具有相同的扩展速率;(4)数据指针用以建立数据间的逻辑关系.

```
struct rootdata          //存放根系数据的数据结构
{
    float x1,y1,z1;      //存放根段的起始点
    float x2,y2,z2;      //存放根段的终点
    int phy-age;           //存放根段的生理年龄
    int growth-age;        //存放根段的生长年龄
    struct rootdata * next; //链表中指向下一个数据的指针
    struct rootdata * pre;  //链表中指向上一个数据的指针
    struct rootdata * f;    //指向其父节点的指针
}
```

3.2 根的伸展方向

基于 Pages 等根系生长方向模型(见图 2(a)), 本系统暂不考虑根系生长的土壤等环境因素, 并且假定根系在匀质土壤中生长, 生长环境相对优越, 没有受到较大的环境胁迫, 这样根系在当前生长周期内的最终生长方向取决于三类因素的影响: 根系前一个周期的生长方向、向地性和随机因素, 如图 2(b)所示. 因此, 新根尖 D_N 的空间伸展方向可表示为

$$D_N = D_{N-1} + D_G + D'_N \quad (1)$$

式中, 根系前一个周期的生长方向 D_{N-1} , 用这条根所在直线的方向余弦函数表示为

$$D_{N-1} = (\cos(\alpha_{N-1}), \cos(\beta_{N-1}), \cos(\gamma_{N-1})) \quad (2)$$

根系所受到的向地性影响 D_G 是根系向下生长的趋势, 它是一个指向地心的向量, 表示为

$$D_G = (0, \tau_N, 0), \tau_N \text{ 是根的向地性调整系数} \quad (3)$$

随机因素影响 D'_N 是在原方向基础上发生的轴向角与径向角偏差, 是对生长方向影响较小的修正量, 用 Φ 和 θ 表示(见图 2(c)), Φ 和 θ 其取值区间分别为 $0 \sim 30^\circ$ 和 $-180^\circ \sim 180^\circ$.

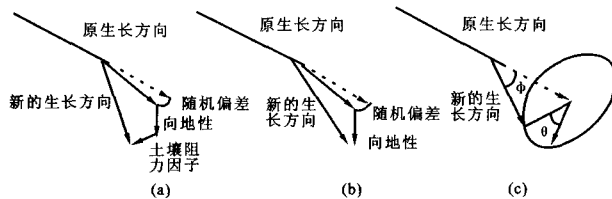


图 2 根的伸展方向

3.3 根的分枝位置

由于顶端优势的原因, 侧根产生于母根上一定范围内^[15]. 如图 3(a)所示, 系统设定主根基部无侧根区长为 L_B , 顶点无侧根区长为 L_A , 当根轴长度大于 L_B 和 L_A 之和才会有侧根产生. 如图 3(b)所示, 分枝点 B 、 C 均发生于根段 AD 上, 类似于 B 、 C 的点的数量决定了根段 AD 的分枝密度. 系统中假定 B 、

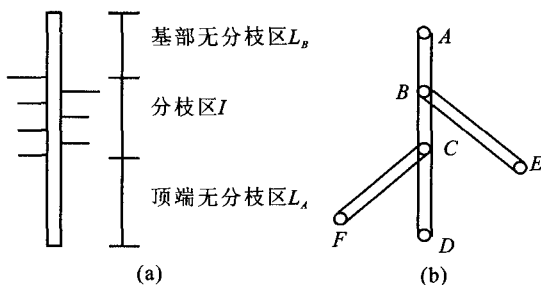


图 3 根轴的分枝位置

C 两点可以发生于根段 AD 上任意位置, 如果 D 点坐标是已知的, 那么可以通过一个位置系数 ϵ 与 A 、 D 的坐标确定分枝根轴的起始点 B 和 C . ϵ 是在 $[0, 1]$ 上分布的随机量, 定义 ϵ :

$$\epsilon = \frac{|AB|}{|BD|} \quad (4)$$

这样, 根 AD 上任意点 B 发生的根轴起始点坐标为

$$\begin{aligned} x_B &= (\epsilon \cdot x_D + x_A) / (1 + \epsilon) \\ y_B &= (\epsilon \cdot y_D + y_A) / (1 + \epsilon) \\ z_B &= (\epsilon \cdot z_D + z_A) / (1 + \epsilon) \end{aligned} \quad (5)$$

3.4 根的分枝方向

根的分枝方向, 由两个参数来决定, 即轴向分枝角度 β 和径向分枝角度 α , 如图 4 所示. 母根的方向矢量 u 通过垂直面旋转轴向角 β 可形成 u' , 这一矢量通过旋转径向角 α 得到矢量 u'' , 即新的分枝方向. 所以, 新的分枝根轴的方向可由下式计算得到:

$$u'' = [R(u, \alpha)]u' = [R(u, \alpha)][R(n, \beta)]u$$

根轴的分枝方向具有一定的不确定性, α 和 β 其取值区间分别为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和 $0^\circ \sim 90^\circ$.

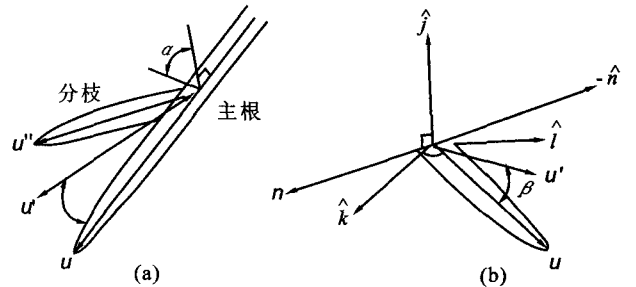


图 4 根轴的分枝方向

3.5 数据连接方式

模拟过程中定义两个指向该类数据的指针, p_0 与 p_1 , p_0 表示指向已经不再分枝的根段, p_1 指向将要分枝的根段. 图 5 所示为四个生长周期内, 根系生长发育过程数据间的关系表达. 图 5(a)所示为根系初始结构, 它是根系最基本的数据单元. 图 5(b)~图 5(d)中不同的字母代表不同的根单元, 数字代表根的级别. 系统给定根系的模拟规则如下: 一级根上发生二级根, 但根尖产生的根仍为同级根; 一级根生长一个周期, 可进行分枝, 二级根生长两个周期可进行分枝, 其他级别的根依次类推.

第一个生长周期: $p_0 \rightarrow A_1$

第二个生长周期: 判断根龄、根级别与分支条件, 形成两个指针链

$$p_1 \rightarrow A_1$$

$$p_0 \rightarrow B_2 \rightarrow C_2 \rightarrow D_1$$

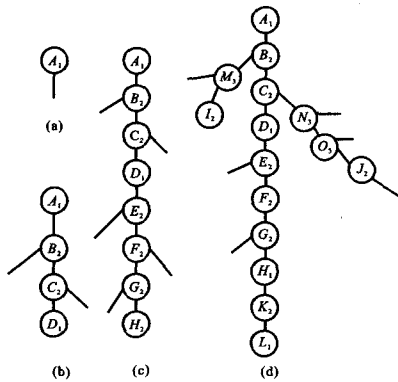


图5 根轴的分支方向

第三个生长周期:

$$p_1 \rightarrow A_1 \rightarrow D_1$$

$$p_0 \rightarrow B_2 \rightarrow C_2 \rightarrow E_2 \rightarrow F_2 \rightarrow H_1$$

第四个生长周期:

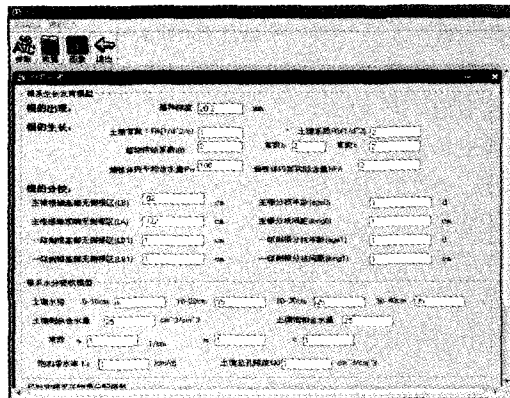
$$p_1 \rightarrow A_1 \rightarrow D_1 \rightarrow B_2 \rightarrow C_2 \rightarrow H_1$$

$$p_0 \rightarrow M_3 \rightarrow I_2 \rightarrow N_3 \rightarrow O_3 \rightarrow J_2 \rightarrow E_2 \rightarrow F_2 \rightarrow$$

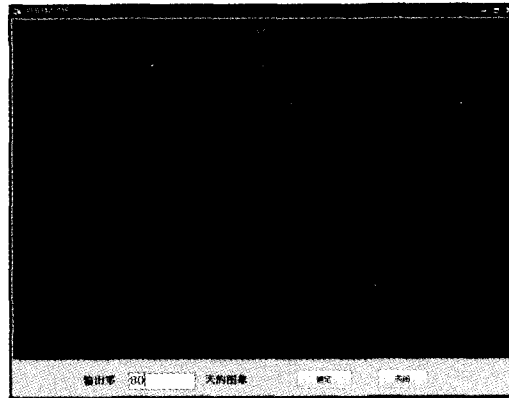
$$G_2 \rightarrow K_2 \rightarrow L_1$$

4 系统的实现

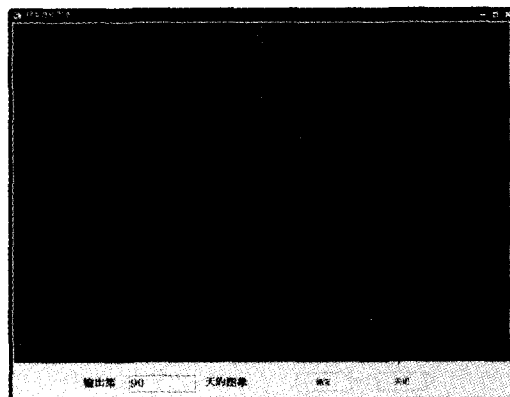
基于烟草根系生长发育模型,在 Visual C++ 平台上,借助 OpenGL 构建烟草根系虚拟生长系统.系统运行时,根据输入的参数(播种深度、土壤常数、分枝年龄、土壤导水率、形态参数、生物量分配等)和气象数据(日照时间、土壤温度、大气密度、大气压力、气温等),可得到不同生育阶段烟草根系生长发育的根系参数(根系长度、根系数量、根长指数、根长密度、表面积、体积以及水分吸收和干物质分配等)和三维可视化结果,用户可以直观地从各个角度看到烟草根系的生长发育和分布情况.见图6.



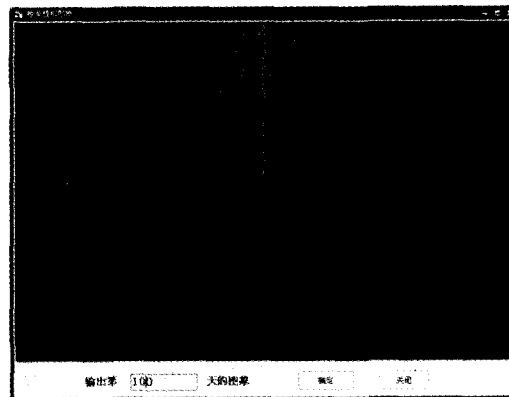
(a)



(b)



(c)



(d)

图6 烟草根系生长发育可视化结果

5 结束语

通过对烟草根系形态建成过程中根系结构、生长和分布特点规律的观测研究,以及前人的研究成果,构建了描述烟草根系形态变化的数学模型,应用

计算机图形学技术建立了烟草根系虚拟生长系统.系统能够在模拟根系三维动态生长的同时,完成根系各生长参数的计算,较真实地反映了烟草根系的生长发育规律,其结果和实际的烟草根系生长发育过程基本一致.该系统可作为研究烟草根系生长发

育的工具,并为植物根系生长过程的相关研究提供帮助.

参考文献:

- [1] 刘秀海,肖伯祥,郑文刚,等. 玉米虚拟生长研究综述[J]. 玉米科学,2006,14(2):164-167.
- [2] 冯利平,高亮之,金之庆,等. 小麦发育期模拟模型研究[J]. 作物学报,1997(23):418-424.
- [3] 伍艳莲,曹卫星,汤亮,等. 基于 OpenGL 的小麦形态可视化技术[J]. 农业工程学报,2009,25(1):121-126.
- [4] 刘慧,汤亮,张文字,等. 基于模型的可视化水稻生长系统的构建与实现[J]. 农业工程学报,2009,25(9):148-154.
- [5] Penning de Vries F W T, Jansen D M, Ten Berge H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth of several annuals crops[M]. Netherlands: Pudoc. Wageningen, 1989.
- [6] 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):169-178.
- [7] 王功明,郭新宇,赵春江,等. 虚拟植物根系生长模型分析和比较[J]. 作物研究,2006(3):281-285.
- [8] 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):147-154.
- [9] 邓旭阳,周淑秋,郭新宇,等. 玉米根系几何造型研究[J]. 工程图学学报,2004(4):62-66.
- [10] 冯斌,杨培岭. 植物根系的分形及计算机模拟[J]. 中国农业大学学报,2000(5):96-99.
- [11] 张吴平,李保国. 棉花根系生长发育的虚拟研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(1):283-286.
- [12] 杨林波,邵惠芳,章新军,等. 烟草根系研究进展[J]. 烟草科技,2002(10):45-48.
- [13] 马新明,杨娟,熊淑萍,等. 烟草根系形态发育模拟模型[J]. 中国农业科学,2005,38(12):2421-2427.
- [14] 马新明,席磊,熊淑萍,等. 大田期烟草根系构型参数的动态变化[J]. 应用生态学报,2006,17(3):373-376.
- [15] Lungley D R. The growth of root systems: a numerical computer simulation model[J]. Plant and Soil, 1973(38):145-159.

作者简介:

席磊 男,(1972-),副教授.研究方向为智能系统与植物虚拟.

冀亚丽 女,(1979-),硕士,讲师.研究方向为图像处理与模式识别.

汪强 男,(1979-),硕士,讲师.研究方向为图像处理与模式识别.

张龙龙 男,(1986-),硕士.研究方向为网络存储系统.

马新明 男,(1963-),教授,博士生导师.研究方向为精准农作与信息技术.

(上接第 105 页)

- [3] Lisa F Rau, Paul S Jacobs. Creating segmented databases from free text for text retrieval[C]// proceedings of the 14th international conference on research and development in information retrieval. Chicago, Illinois: ACM Press, 1991:337-346.
- [4] Paul S Jacobs. Joining statistics with NLP for text categorization[C]//proceedings of the third conference on applied natural language processing. Trento, Italy: ACM Press, 1992:178-185.
- [5] Yang Y. Expert network: effective and efficient learning from human decisions in text categorization and retrieval [C]//Proceedings of the 17th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval. Dublin, Ireland: ACM Press, New York, 1994:13-22.
- [6] 李士勇,梁家荣,唐志刚. 基于危险理论的 web 文本挖掘研究[J]. 微计算机信息,2007,27:170-171.
- [7] 亓洪标,李安,胡柏青. 基于 XML 的 web 文本挖掘方法与模型研究[J]. 微计算机信息,2006,26(11):196-197.
- [8] 贾志娟,胡明生. 基于网格的 Multi-Agent web 文本挖掘系统[J]. 微计算机信息,2006,26(7):266-268.

作者简介:

余燕芳 女,(1976-),讲师.研究方向为计算机信息安全与智能化信息处理.