

文章编号:1001-9081(2006)05-1220-03

## 基于生长机的芦苇形态模型可视化研究

唐卫东<sup>1</sup>, 李萍萍<sup>1</sup>, 卢章平<sup>2</sup>

(1. 江苏大学 江苏省现代农业装备与技术重点实验室, 江苏 镇江 212013;

2. 江苏大学 图形技术研究所, 江苏 镇江 212013)

(twd\_1974@126.com)

**摘要:** 兼顾植物生理功能的形态发生模型, 是在计算机上实现模拟植物生长发育的理论依据。通过观察芦苇生长过程中发生的形态及生理变化, 分析了形态结构与生理因子之间的内在关系, 并提出一种基于生长机的芦苇形态建模方法。根据生成的形态模型有效组织芦苇生长时产生的大量数据, 并建立其可视化流程。通过模拟实验, 结果表明该模型能有效地模拟芦苇的生长发育过程。

**关键词:** 生长机; 芦苇; 形态模型; 可视化

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

## Study on morphological model of reed and its visualization based on growth mechanism

TANG Wei-dong<sup>1</sup>, LI Ping-ping<sup>1</sup>, LU Zhang-ping<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology,

Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

2. Centre of Information Management, Institute of Graphics Technology, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

**Abstract:** Morphogenesis model of plant considering its physiological function played the important role in simulating plant growth on computer. After studying morphological and physiological changes of reed during their growth processes and analyzing relations between their characteristics of morphology and physiology, a method for morphological structure modeling of reed based on growth mechanism was introduced. According to this model, visualization algorithm was also presented and large numbers of data resulting from reed development were processed effectively. An example was given and experiment results illustrate the presented model is efficient in simulating reed growth.

**Key words:** growth mechanism; reed; morphological model; visualization

### 0 引言

随着信息技术和计算机技术在农业领域应用的日益深入, 完全依赖植物生理生态模拟已经无法完成对现代农业生产的指导。建立在植物学、计算机图形学、数学、虚拟现实技术等多学科基础之上的虚拟植物技术, 却逐步在现代农业生产决策、虚拟实验、产量预测、分析和控制各种因素对植物生长行为的影响、生长条件的优化、教学科研等方面发挥着重要的理论指导作用<sup>[1]</sup>。虚拟植物技术是植物模拟模型与可视化技术有机结合的产物, 是通过计算机来模拟植物的生长发育状况。为此, 建立符合植物生长发育过程的模拟模型是虚拟植物技术的关键。

单一的形态发生模型, 侧重于从静态角度研究与植物空间结构相关的性质, 忽略了植物学机理, 不能反映植物形态结构的动态变化规律<sup>[2,3]</sup>。采用 L 系统构造的植物模型也无法反映植物生长机理, 后来提出各种改进的 L 系统、函数迭代系统 (IFS)、参考轴技术、分枝矩阵、基于几何可观察量的模型、基于图符的交互式模型、双尺度自动机模型等<sup>[4-7]</sup>, 虽然能模拟植物的生长和形态结构, 但依然无法实现植物生长机理与形态结构的交互模拟。为了真实预测植物生长, 本文以芦苇为例, 在建立该植株的形态发生模型时, 同时考虑影响其生长

发育的生理生态因子, 提出一种构建芦苇生长的形态模型方法, 为其他植物形态建模提供借鉴。

### 1 芦苇的形态及生理生态特性

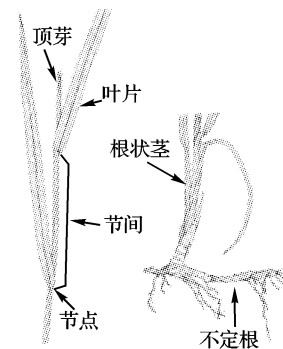


图 1 芦苇的基本形态结构特征

芦苇为多年生禾本科芦苇属植物, 其拓扑结构在很大程度上受茎生长的影响, 而茎的形态基本由顶芽、侧芽、节点与节间组成, 且具有茎粗、秆长的特点; 芦苇的叶、叶鞘、茎、根状茎和不定根都具有通气组织; 由于芦苇种子细小, 虽可繁殖, 但播种出苗后主茎生长不旺, 而由两旁分蘖生长更新以代替主茎, 如图 1 所示。

收稿日期: 2005-11-14; 修订日期: 2006-01-08 **基金项目:** 国家“十五”重大科技专项资助项目 (2003AA601100-3)

**作者简介:** 唐卫东 (1974-), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 主要研究方向: 虚拟植物生长建模、科学计算可视化、计算机图形学; 李萍萍 (1956-), 女, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 植物生长建模、温室控制与管理; 卢章平 (1958-), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士, 主要研究方向: 计算机图形学、科学计算可视化。

芦苇茎的顶端分生组织在外界环境作用下具有很强的细胞分裂能力,产生叶原基和芽原基,并可进一步发育成叶和芽。芦苇通过根部从土壤中吸收水分和无机盐等,再由茎来运输到地上各部分器官,同时,光合作用产生的碳水化合物等有机养料又要通过茎的韧皮部输送到根部及植株的各个器官。此外,芦苇的叶、花等器官都生长在茎上。因此,茎在芦苇生长过程中起着重要作用(如输导和支持等),也是决定芦苇生长趋势的主要器官。

根据实验数据统计分析,每年4、5月份的光照强度和温度都比较适合于芦苇生长,芦苇的叶片光合参数变化较稳定。此外,实验发现净光合速率与太阳有效辐射是决定芦苇生理生态特性的主要因子。

## 2 芦苇生长的形态变化描述

### 2.1 生长机

由于植物生长的过程同时包含了形态结构以及生理生态的改变<sup>[8]</sup>,因此,生长机是指植物生长过程中发生的形态结构和生理生态变化的过程。形态结构是静态地描述植物的几何形态与拓扑结构变化;而生理生态是基于不同的形态结构来提取植物的生长规则,从而动态地反映植物在各个生长阶段的发育状况。

与其他植物一样,芦苇在生长过程中,其形态结构和生理生态特性变化是同时进行并相互影响,如通过叶片光合作用产生的碳水化合物为其余器官(叶、茎、花等)吸收和利用并转化为生物量,产生新的器官和结构,并使已有的器官和结构不断得到扩展;而器官形状结构的改变又影响着芦苇的养分吸收、蒸腾和光合作用等生理生态特性。因此,芦苇的形态结构与生理生态功能之间存在相互影响的作用机制。

### 2.2 芦苇动态生长的形态发生模型

通过对芦苇各个生长阶段的定性研究和定量分析,可以将芦苇生长过程描述如下:从芦苇母茎基部分蘖出的新生分蘖芽开始,由于顶芽分生组织在外界环境作用下具有很强的细胞分裂能力和明显的顶端生长优势,经过一定时间后进一步发育成节间、叶和新的顶芽等器官(如图2所示)。根据实验观察及芦苇属植物的遗传参数,芦苇的茎和叶的发育周期都要经历分化、出现、扩展、衰老等4个相互关联的过程。其中,分化和出现主要受发育因子(如温度和光周期)的影响,而扩展和衰老受生长因子(如植株的水分和养分状况)的影响较大。

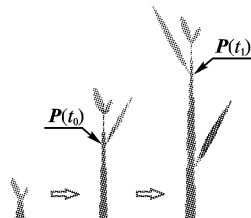


图2 芦苇生长的形态变化过程

在芦苇生长过程中,茎的顶芽在外界环境作用下不断向上生长,并形成节间,继续发育到一定程度后又会在茎的顶端形成新的顶芽和叶片,从而使得芦苇的拓扑空间结构不断变化。由此,可以将芦苇植株的生长发育过程看成是在顶端分生组织不断激励作用下发生的几何形态变化过程。不妨将芦苇形态结构上任意一点所处的状态用位移矢量 $\mathbf{P}$ 表示(假设 $\mathbf{P} = [x, y, z]^T$ ),由于受外界环境及生理生态因子的作用,该点的位移随着时间的推移而不断发生改变。如图2所示,植

株上节点随着芦苇的生长发育,其位移由 $\mathbf{P}(t_0)$ 点变化到 $\mathbf{P}(t_1)$ 点。由于植物生长是一个连续的过程,于是,芦苇动态生长过程发生的几何形态变化就可以用位移 $\mathbf{P}$ 相对于时间 $t$ 变化的微分方程表示如下:

$$d\mathbf{p} = \mathbf{A}(t) \mathbf{P} dt + \mathbf{B}(t) \mathbf{S} dt \quad (1)$$

或用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ b_{31} & b_{32} & \cdots & b_{3n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} dt$$

在式(1)中: $\mathbf{A}(t)$ 为在 $\mathbf{P}$ 点处与芦苇形态结构相关的系数矩阵,其元素由茎的直径、节间距、叶片颜色等变化因子构成; $\mathbf{B}(t)$ 为当芦苇形态变化到 $\mathbf{P}$ 点处时与分生组织激励作用相关的系数矩阵,其元素由各生理生态变化因子构成; $\mathbf{S}$ 为分生组织的激励矢量。

由于芦苇生长是个动态过程,随着时间的变化,在其形态结构发生改变的同时,芦苇的生理生态特性及所处的外界环境条件都会发生相应的变化。因此, $\mathbf{A}(t)$ 、 $\mathbf{B}(t)$ 两个系数矩阵均与时间 $t$ 有关,即随着 $\mathbf{P}$ 点位移的不同而不断发生变化。

这样,通过式(1)就建立了芦苇生长的几何形态变化与其影响因子之间的数学关系。由于芦苇生长的不可逆性,其中经历了一些明显不同的生理阶段,也就是在相同的生理阶段或相同的生理年龄内,芦苇生长表现出一定的相似性。同时,可能由于各种影响因素的作用会导致芦苇生长难以预测,表现出随机性。因此,为了更加合理地描述芦苇动态生长时发生的几何形态变化,可以在上述模型中引入随机作用矢量 $\mathbf{F}$ 与随机作用系数矩阵 $\mathbf{C}(t)$ ,其矩阵元素由生理生态随机作用因子构成。于是,得到了芦苇生长的随机动态过程:

$$d\mathbf{p} = \mathbf{A}(t) \mathbf{P} dt + \mathbf{B}(t) \mathbf{S} dt + \mathbf{C}(t) \mathbf{F} dt \quad (2)$$

通过式(2)就可以真实地预测芦苇在不同因素作用下发生的几何形态变化。

## 3 可视化算法构建

### 3.1 数据组织及其处理

从上述描述芦苇动态生长时其几何形态变化的数学模型中可以发现,当位移矢量 $\mathbf{P}$ 变化时,与之相关的系数矩阵 $\mathbf{A}(t)$ 、激励矢量 $\mathbf{S}$ 及系数矩阵 $\mathbf{B}(t)$ 等都会随之发生相应的改变。因此,芦苇生长过程中出现的数据信息较大,而形态结构与生理生态的相互影响导致信息之间的交互也很频繁。

依据芦苇生长特点及所建立的形态结构变化数学模型,可以将所需处理的数据分为两类:一类为几何形态结构数据;另一类为生理生态特性数据。几何形态结构数据主要与芦苇生长的几何形态和拓扑结构变化有关,如茎、叶、花等器官的描述和对叶序种类、叶片形状、叶柄类型、花序种类、花柄类型等的描述;而生理生态数据则是对处于不同生长阶段的芦苇所需的养分、水分、光照、温度等进行定量计算得到的数据。

利用植物体本身特有的结构(自相似性),采用面向对象技术方法合理组织芦苇生长过程中出现的大量数据,不仅可以减少重复处理这些数据的工作量,节约系统资源,又可以增加系统功能的开放性和可扩充性。

在处理几何形态结构数据时,不妨将芦苇生长过程中各

器官所处的几个形状变化明显的生长阶段图形尺寸进行归一化处理,并存入到相应的器官图形库中。然后,根据以上建立的形态模型,经计算得到相关几何数据信息,由此调用归一化的器官图形样本,再根据芦苇几何形态变化特点,经过几何平移、旋转、缩放等变换形成芦苇各生长阶段的图形(如图3)。

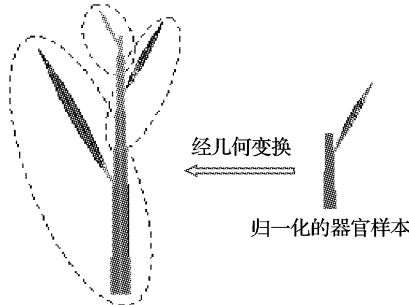


图3 调用归一化器官生成的芦苇形态

在处理生理生态特性数据时,根据芦苇生长时其形态结构变化的阶段性及相似性,对生理生态模型所获得的与形态结构变化密切相关的主要数据指标(如净光合速率、太阳有效辐射等)进行线性化处理,例如在获得分生组织激励作用相关的系数矩阵  $B(t)$  时,可以根据芦苇生长规律对其生长过程进行分阶段处理,即在一定的时段范围内使得芦苇的生理生态特性类似。

### 3.2 可视化流程

在对芦苇生长的几何形态变化进行可视化实现时,先要建立芦苇在不同生长阶段的形态结构变化与生理生态特性之间的内在关系,再根据式(2)构建芦苇生长的几何形态数学模型并进行相应的初始化操作,即对芦苇新生分蘖芽的几何形态、生理生态特性及所处的环境条件等初始化。然后,将芦苇生长过程中由模型计算得到的有关数据信息转换为对应的图形信息,如表示各生长阶段器官的几何形态信息、反映拓扑变化的结构信息等。其可视化算法用图4表示。

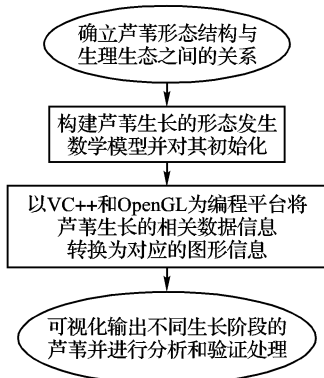


图4 芦苇生长的形态模型可视化流程

通过模型的可视化,不仅可以观察芦苇在各个生长阶段发生的几何形态(茎、叶、花等)和拓扑结构变化(如节间变化),还能对芦苇在不同生长阶段的生理生态特性进行分析,如光合作用、蒸腾作用、养分和水分需求等对芦苇各组织器官的大小、形状、颜色等的影响,从而验证芦苇形态发生模型的有效性。

## 4 模型验证与分析

本文以VC++为编程平台,对芦苇生长过程发生的几何形态变化进行可视化实现,以验证基于生长机的芦苇形态发生模型的可行性和有效性。

为了模拟芦苇在生长过程中出现的形态结构与生理生态变化,在程序执行时设置一个对话框以便对芦苇生长相关的各种参数进行修改,如设置各器官属性参数,如叶片类型、叶与茎的夹角、节间变化等,设定芦苇生长各阶段的生理生态特性参数,如光照强度、水分需求、温度等。

由于芦苇植株的形态结构基本都由不同的器官构成,因此在开发过程中,可以充分利用 OpenGL 提供的核心函数库与实用库函数,对芦苇各器官绘制函数及其属性采用类封装的方式,以便在生成不同生长阶段的芦苇形态时实现对各种器官的调用。包含芦苇各器官的类,其主要代码如下:

```
class CReedOrgan: public CObject
{
public:
void Apex( ); //绘制顶芽
void Internode( ); //绘制节间
void Leaf( ); //绘制叶片
CReedOrgan( );
Virtual ~ CReedOrgan( );
...
public:
struct apex //定义顶芽
{
... //顶芽的属性成员表列
};
struct internode //定义节间
{
... //节间的属性成员表列
};
struct leaf //定义叶片
{
... //叶片的属性成员表列
};
};
```

芦苇动态生长的几何形态绘制主程序部分代码如下:

```
void CReedView::Draw( )
{
...
InitReed( ); //有关数据初始化*/
CreateReed( ); //构造芦苇的形态发生模型*/
DrawReed( ); //依据规则绘制芦苇各生长阶段的形态变化过程*/
...
}
```



图5 不同环境下芦苇生长的形态变化比较

根据芦苇生长特性,在程序中设置不同的生理生态因子,便得到如图5所示的模拟结果,其中,(a)图表示因环境影响到芦苇生理生态功能而使植株主茎和叶子在生长过程中逐渐变得枯黄而死亡;(b)图表示芦苇在优良环境作用下,生理生态功能正常而使植株保持良好的生长状况。

GLSTool作为一个构件软件,挂接在石油测井数据显示软件 WellLogDis 上。WellLogDis 显示测井曲线后,通过 GLSTool 找到要加注释的曲线图形段,先在标识集栏中点击要用的标识,然后点击曲线图形中要注释的图形段附近,相对应的标识就添加到图形中,可以放大缩小和移动此标识到合适的位置(如图6:新疆克拉玛依油田陆22#测井曲线显示,右侧为添加的标识)。这样在某些井段难以用文字或简单图形注释,而用图形标识却可以非常直观地表示出来。

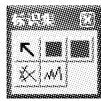


图4 标识集

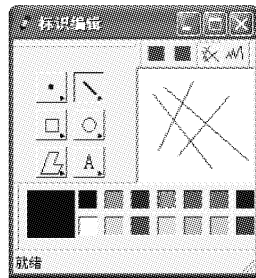


图5 标识的编辑

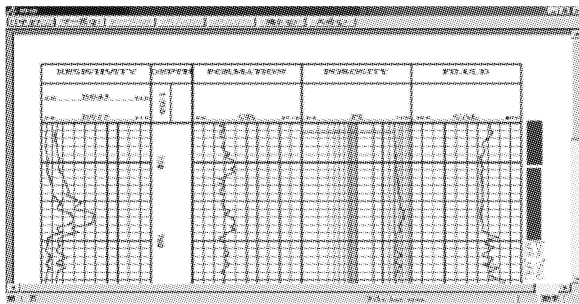


图6 标识粘贴

### 3 结语

为图形曲线添加各种注释可以便于对图形曲线的识别和理解,尤其是添加图形标识更具有直观性和方便性。本文在 VC++ 环境中,通过面向对象编程,充分利用 MFC 所封装的 GDI 类,实现了 GLSTool。GLSTool 可以灵活地进行各种标识的创建、编辑,以及方便地进行标识“粘贴”和伸缩变化,并成功应用于石油测井曲线解释。

#### 参考文献:

- [1] 钟兴水. 测井资料计算机处理解释方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986. 78 - 110.
- [2] MG 克尔兹. 测井分析中的图像处理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. 1, 1 - 81.
- [3] 美国德莱赛-阿特拉斯公司. 测井与解释技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991. 5, 337 - 393.
- [4] 陈建春. Visual C++ 开发 GIS 系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 9, 65 - 235.
- [5] 陈建春. 矢量图形系统开发与编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 1, 57 - 265.
- [6] PROSISE J. MFC Windows 程序设计[M]. 北京博彦科技发展有限公司, 译. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [7] 谭明金. Visual C++ 图形编程技巧与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002. 215 - 227.
- [8] 周长发. 精通 Visual C++ 图像编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 376 - 448.
- [9] 李于剑等. Visual C++ 实践与提高—图形图像编程篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. 87 - 204.
- [10] 刘静华, 王永生. 最新 VC++ 绘图程序设计技巧与实例编程[M]. 北京: 科学出版社 2001. 149 - 272.

(上接第 1222 页)

由前述模拟过程可以发现, 芦苇从幼苗(阶段  $S_1$ ) 发育到其植株成熟(阶段  $S_5$ ), 当影响其生长的环境条件(光照、温度、水分及养分等)发生改变时, 芦苇的生理生态特性会作出相应的反应, 并导致其形态和拓扑结构(如主茎、叶子等)按照一定的规律发生变化。

### 5 结语

根据本文所建立的芦苇形态发生模型, 由芦苇生长过程发生的形态变化模拟结果表明, 考虑了植物生理生态特性的形态发生模型不仅能反映植物生长的形态变化规律, 同时, 通过形态结构的变化也反映了植物的生长发育状况。由于本文模型能连续、动态地模拟芦苇的生长过程, 因此, 它也为量化研究植物生长规律提供理论参考。

鉴于植物种类繁多, 植物生长机理复杂, 植物的生理生态特性与其几何形态变化之间的内在关系也需要靠长期的实验观测和数据统计得到<sup>[9,10]</sup>, 如形态结构与蒸腾作用、呼吸作用、光合作用、土壤、气候、水肥的吸收和利用等之间的内在关系。要将形态变化与生理生态变化两个过程有机地结合起来, 并在此基础上建立精确的植物生长模型, 是今后努力的方向。

#### 参考文献:

- [1] 胡包钢, 赵星, 严红平. 植物生长建模与可视化——回顾与展望[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 816 - 835.
- [2] 展志刚, 王一鸣, REFFYE P, 等. 冬小麦植株生长的形态构造模

型研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 6 - 10.

- [3] 苏中滨, 孟繁疆, 康丽, 等. 基于 Agent 技术虚拟植物模型的研究与探索[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 114 - 117.
- [4] PRUSINKIEWICZ P, HANAN J, MECH R. An L-system-based plant modeling language[A]. Proceedings of ACTIVE 1999, Lecture Notes in Computer Science[C], 1999. 395 - 410.
- [5] PRUSINKIEWICZ P. Art and science for life: Designing and growing virtual plants with L-systems[J]. Acta Horticulturae, 2004, (630): 15 - 28.
- [6] FOURCAUD T, BLAISE F, LAC P, et al. Numerical modeling of shape regulation and growth stresses in trees PART II: implementation in the AMAPpara software and simulation of tree growth[J]. Trees Structure and Function, 2003, 17(1): 31 - 39.
- [7] ZHAO X, REFFYE P, BARTHELEMY D. Interactive simulation of plant architecture based on a dual-scale automation model[A]. Plant Growth Modeling and Applications[C]. Tsinghua University Press, Beijing, China, 2003. 144 - 153.
- [8] HU BG, REFFYE P. Plant growth modeling and visualization[A]. Proceedings of Euro-China Co-operation Forum on the Information Society[C], Beijing, China, 2002. 145 - 169.
- [9] MUNDERMANN L, ERASMUS Y, LANE B, et al. Quantitative modeling of arabidopsis development [J]. Plant Physiology, 2005, (139): 960 - 968.
- [10] ALLEN M, PRUSINKIEWICZ P, DEJONG T. Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: the L-PEACH model[J]. New Phytologist, 2005, (166): 869 - 880.