

基于生长动力学的芦苇属植株虚拟生长模型

唐卫东^{1*}, 李萍萍², 李金忠³

(1. 井冈山大学 电子与信息工程学院, 江西 吉安 343009;

2. 现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室(江苏大学), 江苏 镇江 212013;

3. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

(* 通信作者电子邮箱 metwd@163.com)

摘要:针对植株形态建模过程中由于缺乏生理生态特性而导致模型无法真实再现植株生长发育规律的问题,提出了一种基于生长动力学的植株形态变化模型构建方法。以芦苇属植株为例,首先研究了植株生长动力学特性,并以有效积温、生长速率变化等为驱动力构造了植株形态建成模型;其次,应用开放式 L 系统(Open-L)方法描述了植株冠层拓扑演变过程;最后,通过耦合植株拓扑与器官形体的几何模型及显示模型,给出了植株虚拟生长模型构建算法。实验结果表明,该方法实现了植株形态的可视化,并反映了植物生长机理,有利于动态掌握和预测植物生长发育状况。

关键词:生长动力学;芦苇属植株;形态;虚拟生长

中图分类号: TP391.9; S126 **文献标志码:** A

Virtual development model of plant-reed based on growth kinetics

TANG Weidong^{1*}, LI Pingping², LI Jinzhong³

(1. School of Electronics and Information Engineering, Jinggangshan University, Ji'an Jiangxi 343009, China;

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology,

Ministry of Education and Jiangsu Province (Jiangsu University), Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

3. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Due to the lack of physiological and ecological characteristics while modeling plant morphology, the law of plant development cannot be expressed in the model. To solve this problem, a new plant morphology modeling method was proposed based on growth kinetics. Taking the plant-reed as an example, firstly, the growth kinetics of plant was studied, and the morphological model of plant was constructed based on the effective accumulated temperature and growth rate. Then the topological change of plant canopy structure was described using Open L-systems (Open-L) method. Finally, the algorithm of constructing virtual plant development model was presented by coupling with the geometric model and displaying model of plant topology and organs. The simulation results demonstrate that the proposed method is effective and feasible in visualizing the morphogenesis of plant and reflecting its growth mechanism, which also provides valuable evidences for dynamical control and prediction of plant development.

Key words: growth kinetics; plant-reed; morphogenesis; virtual development

0 引言

植株形态变化仿真是数字农业及虚拟植物研究领域备受关注的问题。采用传统的统计或经验模拟模型分析和预测植株生长发育过程中的形态结构变化规律既不直观又难以满足数字农业等现代农业生产发展的需求^[1]。随着计算机与信息技术的迅速发展,近年来国内外一些研究者采用可视化方法或虚拟植物技术构建植株形态模型,如 Prusinkiewicz 等^[2-6]采用 L 系统及其扩展形式(如开放式 L 系统)描述了植株拓扑变化规则,罗燕等采用分形(Fractal)算法实现了竹子的仿真^[7]。采用 L 系统及其扩展形式或分形方法对于有规则的植株形体仿真效果较好,但难以满足植株形态及器官演变的复杂性和多样性。针对其不足,Harder 等基于随机函

数的方法构建了虚拟植物模型^[8];而为了进一步考虑植株整体与器官个体的协同变化,袁琪等采用双尺度自动机建立了玉米植株的拓扑结构模型^[9]。

上述方法常结合真实感绘制技术、结构-功能互反馈模型、信息融合与重构等手段构建虚拟植物模型。然而,在运用这些方法建模时往往因为追求逼真的模拟效果而忽略了与植株生长相关的生理生态特性,或者因为植株及其生长环境的复杂性而对植株形态进行大量简化使得模型仿真结果难以真实反映植物生长发育规律。另外,多数研究表明,植株形态仿真在植株培植、整枝及环境优化等方面具有重要的参考作用。但是,由于植株形态结构及其与外部环境之间交互作用的复杂性,目前国内外针对如何将植物生长机理运用于植株形态发生模型的构建研究较少,这也是该领域的研究热点和难点。

收稿日期: 2014-11-06; **修回日期:** 2015-01-05。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(30771259, 31071327);江西省教育厅 2012 年度科技计划项目(GJJ12465);井冈山大学博士科研启动项目(JGSU201111)。

作者简介: 唐卫东(1974-),男,江西吉安人,副教授,博士,主要研究方向:虚拟植物、信息可视化; 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; 李金忠(1976-),男,江西吉安人,副教授,博士研究生,主要研究方向:人工智能。

如通过构造植株茎顶生长函数来描述芦苇形态变化过程,能够较好地体现植株茎顶生长规律,但无法反映植株冠层拓扑结构及器官形体随外部主要环境因子的互作关系^[10]。

基于以上分析,本文以芦苇属植株为例,考虑植株生长的动力学特性,并以植株地上部冠层形态变化为研究对象,将影响植株生长发育的主要环境因子及生长速率等作为驱动力,构造植株形态建成模型,并利用植株虚拟生长模型实现植株形态变化过程的仿真,为植株生长发育过程中的株型改良、整枝及生长条件优化等提供理论依据和技术参考。

1 植株生长动力学特性

对于芦苇属植物而言,除了根系是植株吸收土壤水分、养分的重要器官,植株地上部的主茎在很大程度上影响冠层叶部器官的光合作用、呼吸作用及蒸腾作用等生理生态功能。已有研究表明,植物生长是一个由微观到宏观的生命活动过程,植株的生长、发育及演变过程具有显著的动力学特性^[11]。如根系对水肥的吸收是保证植株个体正常生长、发育及演变的前提,根系将所吸收的水分及养分向上运输到植株的地上部分,这是植株个体生存的基本动力,而冠层叶部器官将光合产物通过主茎运输到根部,确保根部器官进行正常的生长发育,同时也促进根部对水分与养分的吸收。

由于植株在其生长发育过程中受到光照、温度等外部环境因子作用,从而使得植株冠层形态结构不断发生变化,如植株的主茎、叶等器官形体变化。其中,主茎不仅是植株拓扑结构演变的基本单元,也是构成植株冠层结构的主要部分,其形体变化在一定程度上影响冠层部分的着生器官如叶片等生长发育。研究表明,主茎的形态发生过程不仅是植株生长发育进程特征的体现,还是温度、光照等外部环境因子共同作用的结果。由于植株生长速率、生长发育进程等动力学参数能够反映植株冠层形态结构变化特征,为此,植株生长的动力学特性可以通过主茎等器官形体变化来体现。

此外,在外部环境因子作用中,温度对芦苇属植株主茎等器官的形态变化影响较大,且与单纯采用时间尺度相比,植株生长随所需外部温度(即积温)的变化更能从宏观角度反映植株发育状况。针对从定植后的植株幼苗开始发育到植株成熟,根据生长速率在各生长阶段的差异性,本文将植株整个生长过程分为幼苗期、生长初期、迅速生长期及成熟期等阶段,即植株生长经历了由慢到快再到慢的不同阶段。

2 有效积温与生长速率

植株的茎秆、叶等地上部器官是芦苇属植物完成其生理生态功能的主要载体,也是构成芦苇属植株冠层内部结构的重要部分,因此,植株地上部器官的形态变化状况在一定程度上能反映芦苇属植株的生长发育水平。依据植株生长动力学特性,植株从定植后的幼苗开始到发育成熟,植株地上部器官的形态发生过程可以利用有效积温、生长速率的变化来描述。

2.1 有效积温

植株生长到一定天数时的积温 $pregdd_n$ (单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$) 表示为:

$$pregdd_n = \sum_{i=1}^n t_{di} \quad (1)$$

其中: t_{di} 表示日平均温度, n 表示定植后植株所处的生长天数。

有效积温 gdd 即生长度日(单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$) 表示^[12] 为:

$$gdd = \sum_{i=1}^n (t_{di} - t_b) \quad (2)$$

其中: t_b 表示植株发育所需的最低临界温度值,该值随芦苇属植物不同且由实验观测确定,在植株生长期內一般都有 $t_b < t_{di}$ 。

第 j 个生长阶段的有效积温 g_j 表示为:

$$g_j = \sum_{i=1}^{m_j} (t_{dj} - t_b) \quad (3)$$

其中: g_j 表示第 j ($j \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$) 个生长阶段的有效积温,该值依芦苇属植物不同而由实验观测确定; t_{dj} 表示第 j 个生长阶段内的日平均温度; m_j 表示植株在第 j 个生长阶段的生长天数。

2.2 生长速率

生长速率 v_p 随温度变化的关系表示为:

$$v_p = (t_{dj} - t_b) / g_j \quad (4)$$

其中: t_{dj} 表示植株在第 j 个生长阶段内的日平均温度。根据芦苇属植物的不同可将 t_b 和 g_j 设为固定值,则 v_p 仅随 t_{dj} 变化。

根据式(4),将植株生长到一定天数时所处的生长进程 p_s 表示为:

$$p_s = j - 1 + v_p m_{ji} \quad (5)$$

其中: m_{ji} 表示植株在第 j 个生长阶段所处的生长天数。

在模拟植株生长进程时所需要的温度 t_{dj} 为第 j 个生长阶段内的日平均温度。为便于准确地模拟植株在任意生长阶段所处的生长进程,采用逐日平均温度,即植株的生长进程可表示为:

$$p_s = j - 1 + \frac{1}{g_j} \sum_{k=1}^{m_{ji}} (t_{dk} - t_b) \quad (6)$$

其中: t_{dk} 表示植株在第 j 个生长阶段的逐日平均温度,即该阶段植株生长到第 k 天时的日平均温度。

上述式子能够连续动态地模拟植株的生长进程,又由于植株生长到任一阶段时的生长度日为 gdd ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$),则生长进程 p_s 也可表示为:

$$p_s = j - 1 + \frac{gdd}{\sum_{m=0}^j g_m} \quad (7)$$

依据植株各生育期的观测结果及气象资料数据,计算植株在各生长进程内的生长度日值,可以获得植株在第 j 个生长阶段的有效积温 g_j ,将其称为各生长阶段的生长度日参数。

在利用生长进程模型模拟植株生长进程时, gdd 通过气象资料的每日平均温度计算得到, j 的值通过比较 $\sum_{m=0}^j g_m$ 与 gdd 的大小来确定。

3 植株形态建成模型

芦苇属植株地上部冠层结构主要由茎秆和叶形态组成,为此,植株形态建成模型包括茎秆形态发生模型和叶形态发生模型。

3.1 茎秆形态发生模型

茎秆形态的变化主要表现为茎秆长度和直径两方面。

3.1.1 茎秆长度

由实验观测并利用社会科学统计软件包(Statistical Package for the Social Science, SPSS)对定植后的植株在幼苗

期主茎与有效积温对应点进行计算机曲线拟合,分别选择Growth曲线、指数曲线、双曲线、S形曲线、Logistic曲线等拟合模型,其中,指数曲线拟合得到的相关系数均比其他模型大,表明幼苗期主茎呈现为指数生长,此时,茎秆长度 L_s 随有效积温 gdd 的变化关系可表示为:

$$L_s(gdd) = L_{s0} \exp(\mu_1 v_1 (gdd - g_0)); g_0 < gdd \leq \sum_{m=0}^1 g_m \quad (8)$$

其中: v_1 表示植株在幼苗期的生长速率; g_0 表示植株进入幼苗期时的有效积温; L_{s0} 表示植株定植时的茎秆长度; μ_1 表示修正系数,该值随芦苇属植物不同且由实验观测确定。

当植株进入生长初期后生长速率逐渐提高,从计算机曲线拟合结果得知茎秆生长依然呈现为指数曲线形式,此时,茎秆长度 L_s 随有效积温 gdd 的变化关系可表示为:

$$L_s(gdd) = L_{s1} \exp(\mu_2 v_2 (gdd - \sum_{m=0}^1 g_m)); \sum_{m=0}^1 g_m < gdd \leq \sum_{m=0}^2 g_m \quad (9)$$

其中: v_2 表示植株在生长初期的生长速率; μ_2 表示修正系数,该值随芦苇属植物不同且由实验观测确定; L_{s1} 表示植株结束幼苗期时的茎秆长度。 L_{s1} 可表示为:

$$L_{s1} = L_{s0} \exp(\mu_1 v_1 g_1) \quad (10)$$

当植株进入迅速生长期时,由于植株生长速率较为稳定,从计算机曲线拟合结果得知茎秆一般呈现为线性生长,此时,茎秆长度 L_s 随有效积温 gdd 的变化关系可表示为:

$$L_s(gdd) = L_{s2} + \mu_3 v_3 (gdd - \sum_{m=0}^2 g_m); \sum_{m=0}^2 g_m < gdd \leq \sum_{m=0}^3 g_m \quad (11)$$

其中: v_3 表示植株在迅速生长期的生长速率; μ_3 表示修正系数,该值随芦苇属植物不同且由实验观测确定; L_{s2} 表示植株结束生长初期时的茎秆长度。 L_{s2} 可表示为:

$$L_{s2} = L_{s1} \exp(\mu_2 v_2 g_2) \quad (12)$$

结合式(10),即有:

$$L_{s2} = L_{s0} \exp(\mu_1 v_1 g_1 + \mu_2 v_2 g_2) \quad (13)$$

当植株进入成熟期时,由于植株生长速率迅速下降,茎秆生长逐渐变慢,此时,茎秆长度 L_s 随有效积温 gdd 的变化关系可表示为:

$$L_s(gdd) = L_{s3} + \mu_4 v_4 (gdd - \sum_{m=0}^3 g_m); \sum_{m=0}^3 g_m < gdd \leq \sum_{m=0}^4 g_m \quad (14)$$

其中: v_4 表示植株在成熟期的生长速率; μ_4 表示修正系数,该值随芦苇属植物不同且由实验观测确定; L_{s3} 表示植株结束迅速生长期时的茎秆长度。 L_{s3} 可表示为:

$$L_{s3} = L_{s2} + \mu_3 v_3 g_3 \quad (15)$$

当植株生长到一定时间,即有效积温超过 $\sum_{m=0}^4 g_m$ (即有效积温达到饱和)时,茎秆生长停止,此时,茎秆长度 L_s 达到最大值 L_{s4} ,即:

$$L_s(gdd) = L_{s4}; \sum_{m=0}^4 g_m < gdd \quad (16)$$

结合式(14),即有:

$$L_{s4} = L_{s3} + \mu_4 v_4 g_4 \quad (17)$$

3.1.2 茎秆直径

随着植株茎秆长度的变化,茎秆也在不断增粗,而茎秆直径 L_D 随有效积温 gdd 的变化较缓慢,根据计算机曲线拟合结果得知植株的各个生长阶段基本都符合指数曲线生长特性。为此,本文将植株在各生长阶段的生长速率的平均值 \bar{v} 作为植株在整个生育期的生长速率来描述茎秆直径的动态变化,即:

$$\bar{v} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_j \quad (18)$$

$$L_D(gdd) = L_{D0} \exp(\mu \bar{v} (gdd - g_0));$$

$$g_0 < gdd \leq \sum_{m=0}^4 g_m \quad (19)$$

其中: v_j 表示植株在第 j 个生长阶段的生长速率; L_{D0} 表示植株定植时的茎秆直径; μ 表示修正系数,该值随芦苇属植物不同且由实验观测确定。

由于植株生长到一定时间,即有效积温达到饱和时,茎秆生长停止,此时,茎秆直径不再发生变化。

3.2 叶形态发生模型

叶形态主要由叶柄和叶片两部分构成,其中,叶柄与茎秆类似,其形态变化主要体现在叶柄长度、直径上,而叶片形态变化主要表现为叶片长度和宽度两方面。由于各个叶柄及叶片出现次序不同,使得叶柄长度、直径和叶片长度、宽度随所需积温的变化与茎秆不同。

1) 出现叶柄、叶片所需积温的确定。

根据各叶柄、叶片开始出现时所需积温的差别,出现叶柄、叶片所需的有效积温表示为:

$$bhgdd_m = hgdd + \sum_{k=1}^n sg_k \quad (20)$$

其中: n 表示叶柄或叶片的个数, $bhgdd_m$ 表示植株叶柄或叶片从定植至开始出现所需的有效积温, $hgdd$ 表示植株从定植至第1个叶柄或叶片开始出现所需的有效积温。 $hgdd$ 的计算公式如下:

$$hgdd = \sum_{i=1}^N (t_{di} - t_b) \quad (21)$$

其中: N 表示从定植至第1个叶柄或叶片开始出现的天数, t_{di} 、 t_b 的含义与前面相同。

sg_k 表示植株各个叶柄或叶片先后出现时所需的热时间间隔(有效积温)。本文采用等隔期描述^[13],计算方法如下:

$$sg_k = d_k (t_{dj} - t_b) \quad (22)$$

其中: d_k 表示等隔期天数, t_{dj} 、 t_b 的含义与前面相同。

2) 叶柄长度和直径。

叶柄长度 B_s 的变化与茎秆长度和直径的变化过程类似,从计算机曲线拟合结果得知其符合S型曲线生长,因此,叶柄长度可表示为:

$$B_s(gdd) = B_{s0} \exp(\mu_m v_m (gdd - bhgdd_m));$$

$$bhgdd_m < gdd \leq \sum_{m=0}^4 g_m \quad (23)$$

其中: v_m 表示各个叶柄的生长速率,其求解方法与前面相同; μ_m 表示对应的修正系数,该值随芦苇属植物不同且由实验观测确定; B_{s0} 表示首次出现叶柄的初始长。

与茎秆形态变化类似,随着叶柄长度的变化,叶柄也在不断增粗,而叶柄直径 B_D 随有效积温的变化较缓慢,从计算机曲线拟合结果得知其基本都符合指数曲线生长特性。为此,本

文将各个叶柄的生长速率的平均值 \bar{v}_m 作为叶柄在整个生育期的生长速率来描述叶柄直径的动态变化,即:

$$\bar{v}_m = \sum_{m=1}^n v_m / n \quad (24)$$

$$B_0(gdd) = B_{D0} \exp(\bar{\mu}_m \bar{v}_m (gdd - bhgdd_m));$$

$$bhgdd_m < gdd \leq \sum_{m=0}^4 g_m \quad (25)$$

其中: n 的含义同上; B_{D0} 表示首次出现叶柄的叶柄直径; $\bar{\mu}_m$ 表示修正系数,该值随芦苇属植物不同且由实验观测确定。

当植株生长到一定时间,即有效积温达到饱和时,叶柄生长停止,此时,叶柄长度和直径不再发生变化。

3) 叶片长度和宽度。

为便于观测,叶片长度、宽度通常取叶片的最大长度和宽度。叶片长度 Y_s 的变化与叶柄长度的变化过程类似,从计算机曲线拟合结果得知其符合 S 型曲线生长,因此,叶片长度可表示为:

$$Y_s(gdd) = Y_{s0} \exp(\mu_n v_n (gdd - bhgdd_m));$$

$$bhgdd_m < gdd \leq \sum_{m=0}^4 g_m \quad (26)$$

其中: v_n 表示各个叶片的生长速率,其求解方法与前面相同; μ_n 表示对应的修正系数,该值随芦苇属植物不同且由实验观测确定; Y_{s0} 表示首次出现叶片的初始长。

根据实验观测,芦苇属植物叶片器官具有相似生长现象,叶片宽度的变化与其长度成一定比例关系,因此,叶片宽度可表示为:

$$Y_D(gdd) = \zeta Y_s \quad (27)$$

其中:比例系数 ζ 随芦苇属植物不同且由实验观测确定。

当植株生长到一定时间,即有效积温达到饱和时,叶片生长停止,此时,叶片长度和宽度不再发生变化。

4 虚拟生长模型构建

4.1 植株冠层拓扑演变

从茎秆和叶的形态发生模型得知,芦苇属植株冠层拓扑结构主要由茎秆和叶柄形成,因此,植株的拓扑结构也将随着有效积温的增加而不断发生变化。针对植株拓扑结构的自相似性,本文采用开放式 L 系统 (Open L-systems, Open-L) 描述植株拓扑演变过程^[14]。

下面以一个简单的植株拓扑结构模型为例来说明采用 Open-L 系统描述植株拓扑演变过程。其中,有关符号 (如 +、-、[、]、? 等) 的含义请详见文献[2-3]。

Axiom;

H;

Production;

第1步 H:cond1→S[+H][-H]B?gdd;

第2步 B>?gdd:cond2→D;

第3步 ?gdd→δ;

第4步 D>δ→0;

其中:公理 (Axiom) 中的 H 表示定植后的植株茎秆原型 (顶芽),其参数为上述茎秆长度和直径的变化模型,产生式 (Production) 中的 B 表示叶柄,其参数为上述叶柄长度和直径的变化模型。该模型描述了植株茎秆和叶柄的形态发生过程:公理表示定植后的植株从顶芽 H 开始生长;在产生式中,第1步是指在未超过最大株龄 (以 cond1 表示) 的条件下,当

获得一定有效积温 (以 gdd 表示) 时,顶芽 H 演变为茎秆 S、新的顶芽 H 和叶柄 B;第2步是指当叶柄 B 出现新的侧芽后 (以 cond2 表示),而有效积温又无法满足时,则叶柄会出现生长停滞现象 (以 D 表示);第3步是指有效积温达到饱和 (以 δ 表示);第4步是指植株的茎秆和叶柄生长停滞。

4.2 器官形体处理及调用

除了茎秆和叶柄,其他器官如叶片等形体结构在其生长发育过程中具有自相似性,为此,本文采用归一化方法将该类器官形体变化进行处理^[5],并依据各类器官形体结构运用非一致有理 B 样条 (Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS) 技术与器官图形化函数模块构造不同的器官形体库以供调用。如图1所示,依据植株拓扑演变规律,在植株不同生长阶段调用归一化器官过程。依据着生器官的类型及位置,在植株不同生长阶段其他归一化器官也可以同时被调用,方法类似。

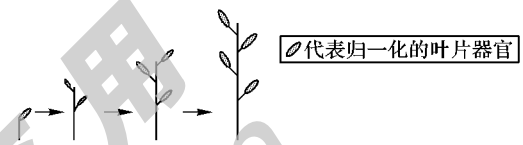


图1 植株不同生长阶段调用归一化器官示意图

4.3 虚拟生长模型构建算法

为了在计算机上动态观测植株拓扑演变及相关器官形体变化过程,需要建立植株虚拟生长模型。该模型主要由生成植株形态的几何模型与显示模型构成。构造几何模型时主要依据植株茎秆和叶柄的形态发生模型获得植株拓扑演变过程,再调用归一化器官形体库,并采用平移、旋转、缩放等变换方法获得着生在植株不同位置的器官几何图形信息,由此得到处于不同生长进程的各类器官形体。构造显示模型时依据不同生长进程特性,结合器官纹理、阴影及光照函数模块,生成能够在计算机上直观动态显示的信息。最后,通过耦合植株拓扑与器官形体的几何模型及显示模型得到植株生长过程的可视化信息。具体算法描述如下:

第1步 根据植株生长所处环境条件确定有效积温,由实验观测结果初始化植株生长信息;

第2步 利用所构建的茎秆、叶柄形态发生模型,根据 Open-L 系统描述植株拓扑演变规则,获得植株冠层拓扑变化过程;

第3步 调用器官形体库,结合植株拓扑与器官形体的几何模型,获取不同生长阶段的植株拓扑与器官形体的几何信息;

第4步 调用图形库函数模块,获取不同生长阶段的植株拓扑与器官形体的显示信息;

第5步 依据植株不同生长进程特性,对第3步和第4步获得的植株拓扑与器官形体的几何信息和显示信息进行耦合,生成植株形态变化的可视化信息。

5 实验与分析

实验在江苏省镇江市滨江湿地进行,以湿地优势种群芦苇为对象,该芦苇属一年生植物,由于营养期内植株的茎秆、叶柄、叶片等器官形态变化较大且在整个生长期经历时间最长,而生殖期植株形态趋于稳定,为此,本文不考虑穗、花及果等器官形体变化。为获得芦苇营养期的形态数据,先后两年

从幼苗开始直到植株成熟对芦苇进行了观测,第一年用于模型构建,第二年用于模型检验。考虑到实验区芦苇生长条件相同,且植株的茎秆、叶柄、叶片等器官在幼苗期、生长初期、迅速生长期及成熟期等各阶段形态变化相对较稳定,在确保实验观测前提下为了尽量减少实验对芦苇种群生长环境的影响,在采用非破坏性测量和破坏性测量方法时每隔一周随机选取长势相当的 4 株植株作为观测样本。然后,对样本按不同的观测指标分别进行统计,其中,叶柄和叶片取植株顶数第 5 片完全展开叶,将上述观测结果取平均值作为芦苇的形态信息。

为便于比较,本文采用典型的均方根误差(Root Mean

Square Error, RMSE)对上述模型模拟值和实验观测值之间的一致性进行比较分析,当 $RMSE$ 越小,模拟值与观测值的吻合性越好,表明模型的预测性越好。 $RMSE$ 的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (obs_i - sim_i)^2}$$

(28)

其中: obs_i 表示实验观测值, sim_i 表示模型模拟值, m 表示样本容量。

于是,利用实验观测值与模拟值之间 1:1 关系图得到的相关系数平方 r^2 和 $RMSE$ 来分析模型的拟合度和可靠性。通过实验观测数据对模型进行验证,如图 2 所示,依次为植株茎秆、叶柄和叶片器官形态参数的观测值与模拟值的相关图。

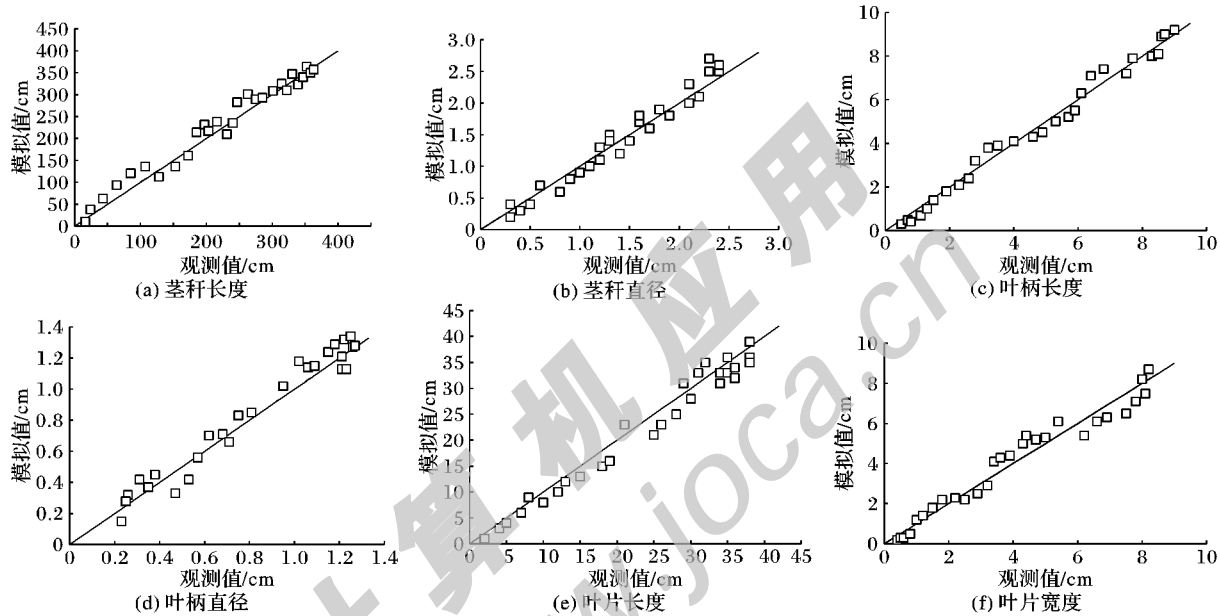


图 2 植株各器官形态参数观测值和模拟值的相关图

植株各器官形态参数的观测值与模拟值之间的相关系数平方 r^2 和 $RMSE$ 统计结果如表 1 所示。

表 1 器官观测值与模拟值的相关系数平方与 RMSE

器官	参数	r^2	RMSE
茎秆	长度	0.957	0.225
	直径	0.953	0.233
叶柄	长度	0.959	0.223
	直径	0.955	0.229
叶片	长度	0.954	0.231
	宽度	0.956	0.227

从以上实验统计结果得知,运用本文方法构建的模型其拟合度均在 95% 以上,表明模型模拟结果与实验观测值具有较好的一致性,与采用传统的数理统计建模方法相比,该模型具有较好的可靠性和准确性。

此外,为了实现植株形态变化的计算机仿真,利用 VC++ 6.0 编译平台,开发了一个基于生长动力学的植株虚拟生长可视化系统。根据生长动力学特性及植株形态变化规律,本系统利用开放式图形库(Open Graphics Library, OpenGL)提供的基本图形函数模块及有关纹理、阴影及光照函数模块,设计了植株生长基本属性对话框,用于修改植株类型、出叶方式、叶柄与主茎夹角等拓扑结构属性信息和器官类型及加载归一化器官库等器官形体属性信息,在有效积温等外部环境

驱动下可以实现芦苇植株形态的可视化模拟。

运用本文提出的基于生长动力学的植株虚拟生长模型,通过修改植株生长相关属性信息,可以依次得到植株连续生长动态仿真结果。图 3 为植株在不同生长阶段的形态变化,图 3(a)反映了植株冠层拓扑结构演变过程,图 3(b)反映了植株在拓扑演变过程中通过调用归一化器官形体后植株形态变化规律。

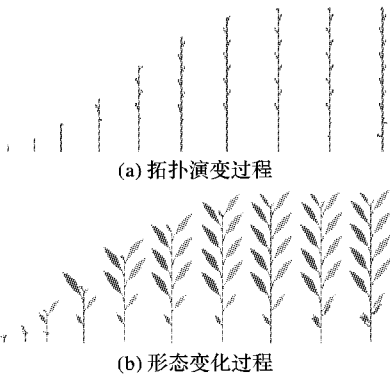


图 3 植株在其生长过程中的形态变化仿真

从以上有关植株生长过程的仿真实验得知,从定植后的植株幼苗开始,由于生长速率在不同生长阶段的变化,如幼苗期和生长初期的生长速率相对较慢,而进入迅速生长期后生长速率显著提高,该阶段植株各器官发育较快,到了成熟期植

株生长速率迅速下降并趋于停止,此时各器官发育已成熟。

6 结语

本文通过对植株生长动力学特性进行分析,以有效积温、生长速率等作为植株生长的驱动因素分别构建了茎秆、叶的形态发生模型。针对植株拓扑结构的自相似性,采用 Open-L 系统方法描述了植株冠层拓扑演变过程,通过器官形体归一化并耦合植株拓扑与器官形体的几何模型及显示模型建立了植株虚拟生长模型。实验仿真结果表明了所构建的模型不仅能反映植株形态变化规律,而且利用植株生长过程的可视化,能够为植物生产的动态跟踪与管理提供参考。

本文考虑以积温作为主要因素影响植株形态变化且是在无环境胁迫的理想情形下,该模型对于芦苇属植株形态变化仿真效果较好。鉴于植物类型繁多且形态变化各异,探究植株形态及生理生态功能随光照、温度、水分及养分等环境因子的变化规律尚需经过长期而大量深入的研究工作。

参考文献:

- [1] HU B, ZHAO X, YAN H, *et al.* Plant growth modeling and visualization — review and perspective[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(4): 567–584. (胡宝钢, 赵星, 严红平, 等. 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] PRUSINKIEWICZ P, SAMAVATI F, SMITH C, *et al.* L-system description of subdivision curves[J]. *International Journal of Shape Modeling*, 2003, 9(1): 41–59.
- [3] PRUSINKIEWICZ P. Art and science for life: designing and growing virtual plants with L-systems[J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 630: 15–28.
- [4] HOLLY D, ADAM R, DAVID H, *et al.* Modelling biomechanics of bark patterning in grasses[J]. *Annals of Botany*, 2014, 114(4): 629–641.
- [5] TANG W. Study on virtual plant technology based on plant growth model — dominant plant-reed in the Beigu-mountain wetland as a case[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007: 97–102. (唐卫东. 基于生长模型的虚拟植物技术研究——以北固山湿地优势植物芦苇为例[D]. 镇江: 江苏大学, 2007: 97–102.)
- [6] MEBATSION H K, BOUDON F, GODIN C, *et al.* A novel profile based model for virtual representation of quasi-symmetric plant organs[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 75(1): 113–124.
- [7] LUO Y, WU Z, GUO X, *et al.* Bamboo simulation based on fractal algorithm[J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science*, 2010, 33(12): 138–144. (罗燕, 吴中福, 郭选昌, 等. 分形算法的仿真“竹”的实现[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2010, 33(12): 138–144.)
- [8] HARDER L, PRUSINKIEWICZ P. The interplay between inflorescence development and function as the crucible of architectural diversity[J]. *Annals of Botany*, 2013, 112(8): 1477–1493.
- [9] YUAN Q, ZHOU S. Study on the topological structure model of corn based on dule-scale automation[J]. *Journal of Qiqihar University: Natural Science*, 2010, 26(1): 5–8. (袁琪, 周淑秋. 基于双尺度自动机的玉米拓扑结构模型研究[J]. *齐齐哈尔大学学报: 自然科学版*, 2010, 26(1): 5–8.)
- [10] TANG W, LI P, LU Z. Study on morphological model of reed and its visualization based on growth mechanism[J]. *Journal of Computer Applications*, 2006, 26(5): 1220–1222, 1231. (唐卫东, 李萍萍, 卢章平. 基于生长机的芦苇形态模型可视化研究[J]. *计算机应用*, 2006, 26(5): 1220–1222, 1231.)
- [11] ZHAN F, YANG D. Relationships among light conditions, crown structure and branch longevity: a case study in osmanthus fragrans and metasequoia glyptostroboides [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 984–992. (占峰, 杨冬梅. 光照条件、植株冠层结构和枝条寿命的关系——以桂花和水杉为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 984–992.)
- [12] CAO W, LUO W. Crop system simulation and intelligent management[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 58–73. (曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 58–73.)
- [13] ZHAO Z, YUE Y, NIE K, *et al.* Morphological simulation model for stem and branch morphogenesis in pepper[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(9): 1409–1413. (赵泽英, 岳延滨, 聂克艳, 等. 辣椒茎枝形态发生模拟模型研究[J]. *南方农业学报*, 2012, 43(9): 1409–1413.)
- [14] TANG W, LIU C, LI P, *et al.* Virtual plant model based on Open-L system and recursive expression[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(1): 167–170. (唐卫东, 刘昌鑫, 李萍萍, 等. 基于 Open-L 系统及递归表示的虚拟植物模型[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(1): 167–170.)
- [4] SABATER J, SIERRA C. Social ReGreT, a reputation model based on social relations[J]. *ACM SIGecom Exchanges — Chains of Commitment*, 2001, 3(1): 44–56.
- [5] ZIEGLER C N, LAUSEN G. Spreading activation models for trust propagation[C]// *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on e-Technology, e-Commerce and e-Service*. Piscataway: IEEE Press, 2004: 83–97.
- [6] MÁRMOL F G, PÉREZ G M. Providing trust in wireless sensor networks using a bio-inspired technique[J]. *Telecommunication Systems*, 2011, 46(2): 163–180.
- [7] BEDI P, SHARMA R. Trust based recommender system using ant colony for trust computation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(1): 1183–1190.
- [8] MÁRMOL F G, MARÍN-BLÁZQUEZ J G, PÉREZ M G. LFTM, linguistic fuzzy trust mechanism for distributed networks[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2012, 24(17): 2007–2027.
- [9] WANG H, ZHANG Y. AraTRM: attack resistible ant-based trust and reputation model[C]// *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Computer and Information Technology*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2014: 652–657.
- [10] CARCHIOLO V, LONGHEU A, MALGERI M, *et al.* Trust assessment: a personalized, distributed, and secure approach[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2012, 24(6): 605–617.
- [11] WIERZBICKI A, KASZUBA T, NIELEK R, *et al.* Improving computational trust representation based on Internet auction traces [J]. *Decision Support Systems*, 2013, 54(2): 929–940.
- [12] HOFFMAN K, ZAGE D, NITA-ROTARU C. A survey of attack and defense techniques for reputation systems[J]. *ACM Computing Surveys*, 2009, 42(1): Article No. 1.
- [13] MÁRMOL F G, PÉREZ G M. TRMSim-WSN, trust and reputation models simulator for wireless sensor networks [C]// *ICC 2009: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1–5.

(上接第 990 页)