

田悦,赵萍,李永奎,等. 虚拟植物研究现状与建模方法分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(22):14-19.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.22.003

# 虚拟植物研究现状与建模方法分析

田悦<sup>1</sup>, 赵萍<sup>1</sup>, 李永奎<sup>1</sup>, 张丽君<sup>1</sup>, 张国志<sup>2</sup>, 路颖<sup>2</sup>

(1. 沈阳农业大学工程学院, 辽宁沈阳 110161; 2. 辽宁省建平县农业技术推广中心, 辽宁朝阳 122400)

**摘要:**虚拟植物是现代数字化农业和精准农业核心部分之一,在计算机、农业、林业、教学等领域应用前景广阔。根据研究策略和研究难点不同将研究对象分为地表上植物模型和根系模型 2 个部分。针对地表上植物(茎叶系统)模型,在阅读大量国内外文献的基础上,按研究尺度不同将各学者研究成果分为植物整体形态模拟、植物器官三维建模、植物生长过程模拟、植物结构-功能并行模拟四大类,并分别综述其研究现状;针对根系模型,从农业角度出发,综述常见农作物根系生理生态模型的研究进展。综合以上植物模型的研究方法,对虚拟植物建模方法进行总结分析。最后简述了虚拟植物研究重点与难点并对其发展趋势进行展望。

**关键词:**虚拟植物;建模方法;模型构建;研究现状

**中图分类号:** S126 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)22-0014-05

虚拟植物是在计算机技术的基础上,通过植物学、植物生态学、土壤学、信息科学、应用数学和可视化技术等多种理论或技术建立的数学模型<sup>[1]</sup>。现代农业机械设计离不开计算机的帮助,而将虚拟植物模型引入计算机辅助分析,从而建立机械部件与植物系统动力学可视化仿真模型,不仅能提高农业机械设计精度,还能大大缩短试验周期,减少地域和空间的限制<sup>[2]</sup>。同时,作为数字化农业科学研究领域的关键技术之一<sup>[3]</sup>,虚拟植物的三维可视化研究在虚拟农田试验、自然景观再现、新型作物培育、植物生长周期模拟等方面应用前景广泛<sup>[4-6]</sup>。然而由于植物形态千差万别、生理过程复杂多样,国内还未出现完善的虚拟植物模拟平台。如何构建出结构写实、形态逼真的三维模型并实现其与环境的交互作用仍是目前研究的热点与难点。本文从地表上植物(茎叶系统)模型和根系模型 2 方面入手,综述虚拟植物的研究现状,并在阅读大量国内外文献的基础上,对虚拟植物建模方法进行总结分析,最后对虚拟植物发展趋势进行展望。

## 1 茎叶系统虚拟模型国内外研究进展

应用领域不同,虚拟植物模型对选择影响因素、模拟精度和简化策略的要求也各不相同。目前对虚拟植物三维可视化的研究可细分为植物整体形态模拟、植物器官三维建模、植物生长过程模拟、植物结构-功能并行模拟 4 种类型<sup>[7-9]</sup>。

### 1.1 植物整体形态模拟

植物整体形态模拟是指单纯地获取植物外部形态结构,旨在绘制形态逼真的植物图形,主要应用于游戏场景绘制、广告创意、图形教学等<sup>[10]</sup>。植物形态模拟分为静态模型<sup>[11-13]</sup>

和动态模型<sup>[14-15]</sup>,许多学者在简单模型的基础上进行进一步研究,考虑结构特征和品种特征,力求得到贴合实际、符合自然规律的植物模型。Honda 于 1971 年首次完成对树木结构的计算机模拟<sup>[16]</sup>;Bragg 等针对不同树种提出相应方案,实现了对北方森林整体形态的模拟<sup>[17]</sup>;罗燕等基于分形算法和改进的粒子系统随机分布算法完成了对竹和竹群三维形态的模拟<sup>[18]</sup>;陈涛在模型中添加了光照、可调节参数,以改变植物生长方向,构建出具有趋光性的植物模型<sup>[19]</sup>;陈传臻利用改进的树影绘制算法,得到任意太阳高度角和方位角时的树影,并对其着色,增强了模型的真实感<sup>[20]</sup>;董春胜等以槐树模型为例,通过调整迭代函数系统(IFS)码的参数来控制树枝旋转角度,从而模拟出树枝受风力影响时的形态<sup>[21]</sup>;高桂桂设计三维树木模型可视化系统,增加场景与环境绘制模块,模拟出树木与环境的复合系统(图 1)<sup>[22]</sup>。



图1 简单森林景观模拟效果<sup>[22]</sup>

### 1.2 植物器官三维建模

植物器官的三维建模是虚拟植物的重要组成部分,其最终目的是建立强大的三维器官库,一方面为模拟不同类型植物提供“库”的支持<sup>[23-24]</sup>,另一方面用于研究某一确定器官的生理活动功能。不同于对整体形态的研究,对植物器官建模时要更加精确化、系统化,目前重点研究的植物器官主要包括叶、花、果实和茎秆<sup>[25]</sup>。Smith 等建立了猕猴桃果实和藤架的三维模型,并通过可视化技术用不同颜色表征果实各项属性<sup>[26]</sup>;Hong 等通过调节叶脉的三维形态获得具有卷曲效果

收稿日期:2018-01-15

基金项目:国家自然科学基金(编号:51505305);辽宁省沈阳市科技计划(编号:F15-199-1-20)。

作者简介:田悦(1994—),女,河北唐山人,硕士研究生,主要从事机械设计及理论方向研究。E-mail:15640300563@163.com。

通信作者:赵萍,博士,副教授,主要从事农业机械现代设计理论与方法研究。E-mail:zhaopingxdg@163.com。

的叶片<sup>[27]</sup>;张颖提出一种基于器官表面主要特征的建模方法,并结合两步纹理映射方法模拟出茄子各器官的三维模型<sup>[28]</sup>,但上述研究均未考虑植物器官随植物成长而发生的形变,只模拟出针对某一时期的器官模型。陆声链等提出了一种基于质点-弹簧系统的植物器官变形模拟方法(图2)<sup>[29]</sup>,可以满足大多数植物器官在正常生长条件下的变形模拟。

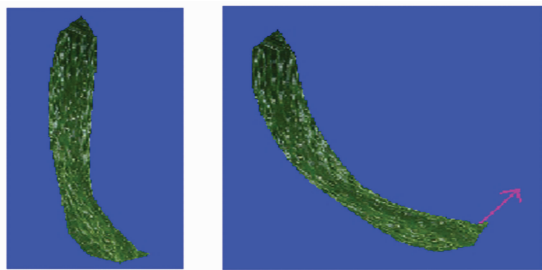


图2 黄瓜初始状态(左)与变形后状态(右)<sup>[29]</sup>

### 1.3 植物生长过程模拟

模拟植物生长过程可以直观地观察植物生长过程中形态结构的变化,在短时间内浏览植株的整个生命周期,了解植物生长规律,节省实地种植的时间和劳动量<sup>[30-31]</sup>。目前对植物生长过程的模拟朝着参数化、系统化、品种特定化方向发展,

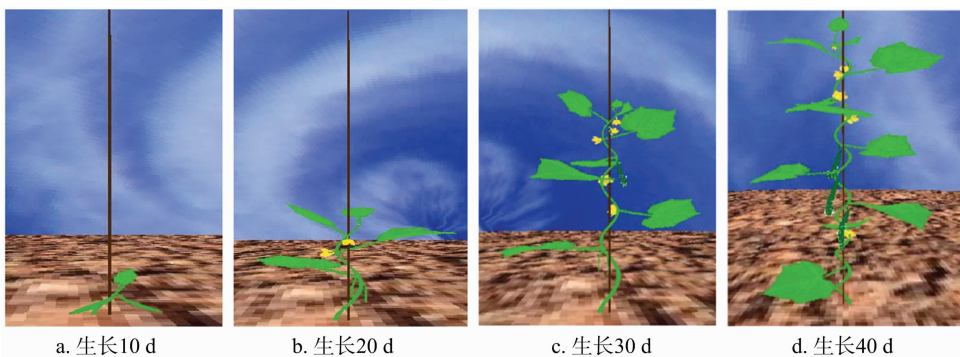


图3 单株黄瓜生长过程模拟<sup>[40]</sup>

### 1.4 植物结构-功能并行模拟

在外部环境作用下,植物通过光合作用形成光合产物,随后将形成的同化物分配给植株各器官,得到新的同化物的器官又通过呼吸作用等生理生态过程使其形态结构发生变化,而改变后的植株形态又将影响植物新阶段的生理生态过程,这种能够反映植物与环境交互作用的模型称为植物结构-功能并行模型<sup>[41-43]</sup>。总的来说,就是指在阳光、空气、土壤、水分等环境因素作用下的植物生长模型,该模型的难点在于植物形态发生模型和生理生态模型的耦合<sup>[44]</sup>,多应用在农、林业研究,是当前国内外虚拟植物生长模型构建的主要发展方向。

国外学者 Perttunen 等结合树的结构和功能,建立了 LIGNUM 碳分配模型<sup>[45-46]</sup>;Fan 等提出了结构-功能互反馈的建模方法,能够有效地反映出植物形态与功能之间的内在联系<sup>[47]</sup>;Kennedy 等建立植物结构-功能模型并认为,多准则优化是在模拟植物冠层水平整体功能过程中必不可少的工具<sup>[48]</sup>;Ruiz-Ramos 等建立可截获光源的冠层叶面积与植株的生长关系,从而构建出三维蚕豆作物参数化动态模型——ALAMEDA 模型<sup>[49]</sup>;Gao 等基于标号算法,结合基本生长单元,建立由生长状态链和生态模型组成的改进的植物结构-

这就意味着虚拟植物的形态结构更忠于植物学原理。Jallas 等将植物三维结构模型和形态模型进行整合,产生一个类似电影的动画,从而显示植物生长过程,该系统可以模拟 1 种或几种植物平行生长<sup>[32]</sup>;Yin 等提出一种综合考虑植物质量的建模方法,该模型可动态地反映植物的平行生长过程<sup>[33]</sup>;林形省借鉴 LParser 虚拟植物生长软件设计并实现了 ParaLsys 软件,旨在实现单株植物生长过程模拟的可视化,用户可以调取任何时刻的植物状态并调试各个视图的模型参数<sup>[34-36]</sup>;李纪永提出了一种基于 Logistic 生长函数的建模方法用以建立植物生长模型,并以大豆为例模拟大豆植株的动态生长过程,该方法可推广到其他类似作物<sup>[37]</sup>;耿瑞平等提出一种基于状态空间的植物生长模型,将虚拟植物视为一个系统,各分生组织作为系统的输入,并将植物生长看作状态矢量在空间的轨迹,该模型符合植物生长规律,物理意义明确<sup>[38]</sup>;赵星等建立双尺度自动机模型,根据植物生长特性确定 2 种尺度状态,通过这 2 种状态的组合和循环模拟出植物生长过程,该模型简化了植物生长参数,且易与实测参数结合<sup>[39]</sup>;杨沛以黄瓜植株为研究对象,通过设计黄瓜生长试验,建立器官生长数学模型,设计黄瓜生长可视化系统,该系统既可显示各器官三维模型,又可模拟植株连续性生长过程,其模拟效果见图 3<sup>[40]</sup>。

功能模型<sup>[50]</sup>。

国内学者唐卫东等构建了芦苇结构-功能模型,考虑到光照和温度的影响,将芦苇生长模型与形态模型的生长信息有机融合在一起,该方法对植物生长发育有较好的预测性,且可行性较高<sup>[51-52]</sup>。李子巍等将基于光作用的植物生长模型与形态结构结合起来,并利用该模型对绿萝生长过程进行模拟,反映出不同光照环境对植物生长的影响<sup>[53-54]</sup>。马培良将冠层光照模型与形态模型相结合,构建出基于结构-功能反馈机制的虚拟水稻模型<sup>[55]</sup>。

## 2 虚拟根系国内外研究进展

大量资料显示<sup>[56-58]</sup>,目前对虚拟植物的研究多集中在地上部分,对根系生长模拟的研究相对滞后。根是植物的营养器官又起着固定作用,因此根系结构对植物生长至关重要<sup>[59-60]</sup>。关于根系模型的研究多从农业角度出发,对生理生态过程与形态变化过程并行模拟,研究对象也比较集中,主要包括水稻<sup>[61-62]</sup>、小麦<sup>[63-64]</sup>、玉米<sup>[65-66]</sup>、大豆<sup>[67-68]</sup>等农作物。相对于茎叶系统,虚拟根系研究的难点在于植物根系三维数据的获取,由于根系生长在地表以下,其结构复杂,测量难度

大,导致其研究结果与实际情况仍具有一定的差距<sup>[69]</sup>。

国外学者 Lynch 等建立了 SimRoot 模型,可连续观看根系生长过程,并将该模型应用于评估不同根形的资源利用效率<sup>[70]</sup>;Pagès 等提出了 Root Typ 根系通用模型,但没有考虑环境因素的影响<sup>[71]</sup>;Somma 等建立了可以用来观测水分及养分与根系活动之间动态关系的数学模型<sup>[72]</sup>;Heeraman 等采用 X 射线断层摄影技术获取大豆根系的数字信息及三维图像<sup>[73]</sup>。

国内学者钟南等通过生物试验,获取大豆生长函数,建立

大豆根系生长模型,探索大豆根系在低磷土壤条件下的动态生长规律<sup>[74-75]</sup>;杨娟等对烟草根系进行系统分析和数学建模,实现了对烟草根系生长过程的模拟<sup>[76-77]</sup>;徐其军等通过进行水稻田间试验,观测分析根尖生长模式,实现了对不同品种、水分及氮素条件下的水稻生长过程模拟(图 4),并实现了对根系间碰撞检测与响应<sup>[78-79]</sup>;杨乐等用“根箱法”观测水稻根系空间分布特性,并建立三维形态模型,该模型对水稻根系生长具有较好的预测效果<sup>[80]</sup>。

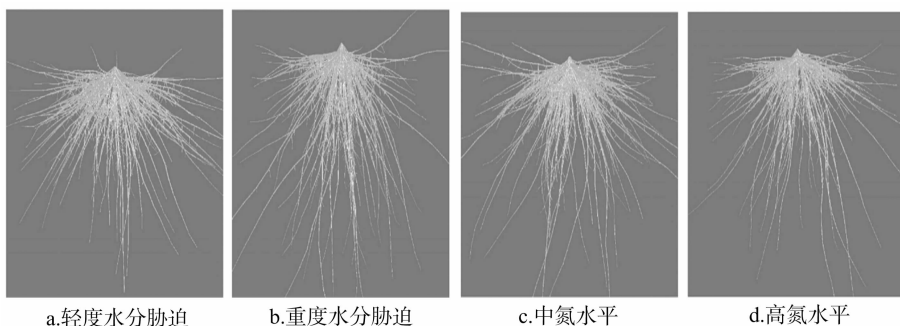


图4 不同氮素和水分处理下水稻根系在拔节期的三维形态<sup>[79]</sup>

### 3 虚拟植物建模方法总结与分析

综合以上国内外茎叶系统或根系系统模拟方法的研究,归纳起来主要包括基于几何参数的建模方法和基于图像处理的建模方法 2 类。

#### 3.1 基于几何参数的建模方法

**3.1.1 L-系统** L-系统(L-system)是描述植物形态结构最常用的方法,最早由美国生物学家 Aristid Lindenmayer 提出。1 个字符集合、1 个初始公理和几条产生式就构成一个简单的 L-系统(DOL 系统),之后在其基础上相继提出上下文相关的 L-系统、随机 L-系统、参数 L-系统和微分 L-系统<sup>[81]</sup>。L-系统的本质为字符串并行重写系统,即根据产生式规则不断替代原始字符串,且所有替代操作同时进行,经过有限次迭代后,对产生的字符串进行几何解释,从而生成植物模型<sup>[82-83]</sup>。该方法易理解,具有表达形式多样、定义简单、结构化程度高和易于实现等特点。

**3.1.2 迭代函数系统** 迭代函数系统是描述自然界中不规则对象的有力工具,最早由美国数学家 Michsel Barnsley 提出<sup>[84]</sup>,其基本思想是认为研究对象的整体和部分在仿射变换的意义下具有自相似结构,通过求取仿射变换系数来定义 IFS 码,从而描述植物各级枝条的偏转角度、锥度、扭曲度及子干与母干之间的比例尺度,通过有限次迭代,构造出植物模型<sup>[85-86]</sup>。该方法是分形自然景观模拟的理论基础,但仅限于模拟视觉逼真的植物图形,不适用于实际植物生长过程及生理生态模型的构建。

**3.1.3 参考轴技术** 参考轴技术又称自动机模型,是建立植物生长模型的典型随机过程方法,最早由法国农业国际合作研究发展中心(CIRAD)的 de Reffye 等提出<sup>[87-88]</sup>,其理论基础是马尔可夫链理论,结合“状态转换图”方式描述植物生长规律<sup>[89]</sup>,由法国国际发展农业研究中心的研究人员(AMAP)开发的系列软件就是在其理论上实现的。此外,自 1997 年起中国科学院自动化研究所与法国国际发展农业研究中心

开始了基于参考轴技术的合作研究,致力于开发通用植物生长软件(GreenScilab)<sup>[90]</sup>。参考轴技术可以很真实地描述植物生长、发育及死亡等过程,但该方法不易理解,需要扎实的理论基础。

**3.1.4 粒子系统** 粒子系统是一种为“模糊”对象建模的方法,最早由美国科学家 Reeves 等提出,由许多粒子组成,通过绘制粒子本身与粒子运动轨迹来描述植物模型<sup>[91-92]</sup>。该方法适用于描述数量较多、精度要求不高的场景,如草地、森林等,但不适于描述植物的生理生态结构<sup>[93]</sup>。

#### 3.2 基于图像的建模方法

**3.2.1 传统的图像处理建模方法** 运用图像处理技术获取物体的三维模型是目前计算机图形学领域研究的热点,其基本原理是通过输入多幅二维投影图信息,根据实际情况采取不同程度的处理措施,获取物体的二维几何信息和拓扑信息,然后再根据算法建立起三维立体模型<sup>[94]</sup>。该方法具有成本低、真实感强等优点,但普遍适应性差,即一种处理方法只适用于一类物体,生成效果受外界干扰大,且越复杂的模型处理图像的数量与难度越大。应用该方法,李云峰等分别实现了对叶图像的提取及表面重建和植物三维模型的构建<sup>[95-96]</sup>。

**3.2.2 基于三维扫描仪获取植物形态** 随着科学技术的革新,三维扫描技术越来越成熟,尤其是激光三维扫描仪的应用,可以有效地获取物体三维特征,其基本思想是通过目标物体进行扫描,获取点云数据,然后对点云数据进行预处理和重建优化<sup>[97]</sup>。市场上的三维扫描仪已逐步走向成熟,其优点在于型号丰富、文件输出格式多样,自带定标与图像处理系统,操作简便,通用性高。缺点是价格昂贵,且在处理形态复杂、枝条遮挡严重的植物时,信息缺失严重。目前,基于三维扫描技术获取植物形态仍处于摸索阶段,王剑等以 Polhemus Fastscan 手持式激光扫描仪为例,探索了将三维扫描技术应用于虚拟植物三维模型构建方法<sup>[98]</sup>。Wang 等利用激光扫描和现场数据,实现了对番茄植株三维形态的模拟<sup>[99]</sup>。



## 4 结束语

虚拟植物是实现数字农业、精准农业的有效手段,对明确植物生长规律具有重要意义。国内许多高校与科研院所都开展了虚拟植物的研究,但目前来看都是围绕植物器官、光照影响、水分影响等某一点展开的,还没有建立完善的虚拟植物模拟体系,仍处于摸索阶段。建立通用的模拟平台是虚拟植物发展的一个必然趋势,但这无疑是一项巨大工程,现阶段虚拟植物技术在游戏场景绘制、图形教学、广告宣传等不需精确描述领域的应用效果较好。但在机械仿真分析、虚拟农田试验、育种选型等领域尚未得到广泛应用,究其原因:(1)关于植物结构-功能模型的研究不够写实,目前的研究大多只考虑 1 或 2 种环境因素对植物生长的影响,而实际的影响因素多且复杂,此外,植物生理活动过程难以直接观测,很多机理难以量化表达,这就造成了模型的局限性;(2)目前的研究大多将地上与地下模型分开,而关于根-冠一体化的研究少之又少,但实际植物生长过程中,根系的生理活动与植物生长密不可分,因此,实现根-冠一体化建模也是下一阶段的重要研究方向。此外,模型的真实性检验和可视化技术也是虚拟植物研究领域中的难题,如何构建出可以真正应用到农业生产中的虚拟植物模型,还有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Guo Y, Fourcaud T, Jaeger M, et al. Plant growth and architectural modelling and its applications[J]. *Annals of Botany*, 2011, 107(5): 723-727.
- [2] 马 军. 计算机辅助设计技术在机械设计中的应用探讨[J]. *煤炭技术*, 2011, 30(5): 249-251.
- [3] 曹卫星, 朱 艳, 田永超, 等. 数字农作技术研究的若干进展与发展方向[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(2): 281-288.
- [4] 刘 丹, 诸叶平, 刘海龙, 等. 植物三维可视化研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(1): 23-31.
- [5] 敬 松. 虚拟植物三维生长过程模型构建的关键技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [6] Prusinkiewicz P. Modeling plant growth development[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2004, 7(1): 79-83.
- [7] 胡包钢, 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.
- [8] 赵春江, 陆声链, 郭新宇, 等. 数字植物研究进展: 植物形态结构三维数字化[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(17): 3415-3428.
- [9] Barthélémy D, Caraglio Y. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny[J]. *Annals of Botany*, 2007, 99(3): 375-407.
- [10] 胡海清. 虚拟植物生长建模可视化技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [11] 刘文进. 基于迭代函数系统的树木模拟[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2005.
- [12] Godin C, Caraglio Y. A multiscale model of plant topological structures[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1998, 191(1): 1-46.
- [13] Oppenheimer P E. Real time design and animation of fractal plants and trees[C]//Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1986, 20(4): 55-64.
- [14] 翟 旭. 三维树木建模技术方法研究[D]. 北京: 首都师范大

- 学, 2012.
- [15] 唐丽玉, 王灵霞, 陈崇成, 等. 生长模型驱动的单株杉木三维动态模拟[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(6): 668-674.
- [16] Honda H. Description of the form of trees by the parameters of the tree-like body: effects of the branching angle and the branch length on the shape of the tree-like body[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1971, 31(2): 331-338.
- [17] Bragg D C, Roberts D W, Crow T R. A hierarchical approach for simulating northern forest dynamics[J]. *Ecological Modeling*, 2004, 173(1): 31-94.
- [18] 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*, 2010, 33(12): 138-144.
- [19] 陈 涛. 基于 L-系统实现植物模拟的关键技术研究[J]. *河南科学*, 2010, 28(2): 179-181.
- [20] 陈传臻. 基于迭代函数系统的植物仿真建模研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2008.
- [21] 董春胜, 荣 霞. 三维迭代函数系统植物模拟[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(5): 712-715.
- [22] 高桂桂. 基于分形的三维树模型研究及可视化系统研建[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [23] 滕鹏举, 肇书同, 李红军. Java3D 平台的植物器官建模与生长模拟[J]. *软件*, 2014, 35(9): 11-15.
- [24] Ogawa K. Consideration of translocation into a growth model of a plant organ[J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(12): 1492-1494.
- [25] 戴青玲, 李青林, 张胜波. 植物叶建模研究现状和发展趋势[J]. *九江学院学报*, 2009(6): 20-22.
- [26] Smith G S, Curtis J P, Edwards C M. A method for analysing plant architecture as it relates to fruit quality using three-dimensional computer graphics[J]. *Annals of Botany*, 1992, 70(3): 265-269.
- [27] Hong S M, Simpson B, Baranowski G V. Interactive venation-based leaf shape modeling[J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2005, 16(3/4): 415-427.
- [28] 张 颖. 虚拟植物可视化关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [29] 陆声链, 赵春江, 郭新宇, 等. 基于物理的植物器官实时变形模拟[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(24): 6587-6591.
- [30] 卢章平, 张 楠, 李铁骑, 等. 虚拟植物整体生长研究现状与展望[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(8): 295-297.
- [31] Watanabe T, Room P M, Hanan J S. Virtual rice: simulating the development of plant architecture[J]. *International Rice Research Newsletter*, 2001, 26(2): 60-62.
- [32] Jallas E, Sequeira R, Martin P, et al. Mechanistic virtual modeling: coupling a plant simulation model with a three-dimensional plant architecture component[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2009, 14(1): 29-45.
- [33] Yin Y Y, Chen L F. Visual plant sticks growth model and Three-Dimensional visualization[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1049/1050: 1347-1350.
- [34] 林形省. 基于 L 系统的虚拟植物生长算法研究及软件实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [35] Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1990: 109-110.
- [36] Noser H. A 3D animation system for functional simulation, visualization, and control of dynamic processes based on Parallel rewriting[D]. University of Zurich, 2003.

- [37]李纪永. 基于 L-系统的虚拟植物形态建模方法研究[D]. 济南:山东师范大学,2013.
- [38]耿瑞平,涂序彦. 虚拟植物生长模型[J]. 计算机工程与应用, 2004(14):6-8.
- [39]赵 星,de Reffye P,熊范纶,等. 虚拟植物生长的双尺度自动机模型[J]. 计算机学报,2001,24(6):608-615.
- [40]杨 沛. 黄瓜生长三维可视化模拟技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [41]Barnsley M F, Demko S. Iterated function systems and the global construction of fractals [J]. Proceedings of the Royal Society of London,1985,399(1817):243-275.
- [42]唐卫东,刘 欢,刘冬生,等. 基于植株-环境交互的温室黄瓜虚拟生长模型研究[J]. 农业机械学报,2014,45(2):262-268.
- [43]Kurth W. Morphological models of plant growth: possibilities and ecological relevance[J]. Ecological Modeling,1994,75/76:299-308.
- [44]杜德彭. 基于功能特征的三维植物叶形构建方法研究[D]. 济南:山东师范大学,2013.
- [45]Perttunen J, Sievänen R, Nikinmaa E. LIGNUM: a model combining the structure and the functioning of trees[J]. Ecological Modelling, 1998,108(1/2/3):189-198.
- [46]Perttunen J, Sievanen R S, Nikinmaa E, et al. LIGNUM: a tree model based on simple structural units[J]. Annals of Botany,1996, 77(1):87-98.
- [47]Fan Z Q, Si C J, Cao H W. Virtual plant modeling based on mutual feedback of function-structure [J]. Agricultural Science & Technology,2011,12(12):1972-1974.
- [48]Kennedy M C. Functional-structural models optimize the placement of foliage units for multiple whole-canopy functions[J]. Ecological Research,2010,25(4):723-732.
- [49]Ruiz-Ramos M, Mínguez M I. ALAMEDA, a structural-functional model for faba bean crops: morphological parameterization and verification[J]. Annals of Botany,2006,97(3):377-388.
- [50]Gao S C, Chen G, Fu Z L, et al. A functional-structural model of virtual plant based on the labeling algorithm and the growth state chain[J]. Applied Mechanics & Materials,2014(543/544/545/546/547):2075-2083.
- [51]唐卫东. 基于生长模型的虚拟植物技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2007.
- [52]唐卫东,李萍萍,卢章平. 虚拟植物系统模型耦合构建技术[J]. 农业机械学报,2008,39(5):94-98.
- [53]李子巍,淮永建,付 慧. 基于光作用的虚拟植物生长模拟与可视化研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(4):81-86.
- [54]李子巍. 基于光作用的虚拟植物生长模拟研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [55]马培良. 基于结构-功能反馈机制的虚拟水稻模型研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2009.
- [56]Hackett C, Rose D A. A model of the extension and branching of a semihal root of barley, and its use in studying relations between root dimensions II. Results and inferences from manipulation of the model [J]. Australian Journal of Biological Sciences,1972,25(4):681-690.
- [57]嵇晓雷. 分形理论应用于植物根系形态分布的研究进展及其应用前景[J]. 安徽农业科学,2010,38(25):13693-13694.
- [58]廖成章,余翔华. 分形理论在植物根系结构研究中的应用[J]. 江西农业大学学报,2001,23(2):192-196.
- [59]Zheng Y, Gu S, Edelsbrunner H, et al. Detailed Reconstruction of 3D plant root shape [J]. International Conference On Computer Vision (ICCV),2011,24(4):2026-2033.
- [60]苗玉新. 大田作物根系研究法概述[J]. 黑龙江农业科学,2005(3):50-52.
- [61]刘永霞,岳延滨,刘 岩,等. 基于生物量的水稻根系生长动态模型[J]. 江苏农业学报,2011,27(4):704-709.
- [62]Yan D C, Zhu Y, Wang S H, et al. A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice [J]. Plant Production Science,2006,9(2):93-105.
- [63]姚 芳,曹 扬,王文永. 虚拟植物小麦根系生长建模与研究[J]. 产业与科技论坛,2014,13(20):59-61.
- [64]Bingham I J, Wu L H. Simulation of wheat growth using the 3D root architecture model SPACSYS: validation and sensitivity analysis[J]. European Journal of Agronomy,2011,34(3):181-189.
- [65]廖 丹. 基于微分 L 系统的虚拟玉米根系生长模拟研究[D]. 长春:东北师范大学,2010.
- [66]Pagès 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.
- [67]张青蓉. 虚拟植物根系的构建及其生长约束条件的研究[D]. 长春:东北师范大学,2007.
- [68]贾银江,苏中滨,郑 萍. 基于 L 系统的大豆根系模型构建及可视化[J]. 农机化研究,2012,34(9):52-54.
- [69]Soethe N, Lehmann J, Engels C. Root tapering between branching points should be included in fractal root system analysis [J]. Ecological Modelling,2007,207(2/3/4):363-366.
- [70]Lynch J P, Nielsen K L, Davis R D, et al. SimRoot: modeling and visualization of root systems [J]. Plant and Soil,1997,188(1):139-151.
- [71]Pagès L, Vercambre G, Drouet J L, et al. Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture [J]. Plant and Soil,2004,258(1):103-119.
- [72]Somma F, Hopmans J W, Clausnitzer V. Transient three-dimensional modeling of soil water and solute transport with simultaneous root growth, root water and nutrient uptake [J]. Plant and Soil,1998,202(2):281-293.
- [73]Heeraman D A, Hopmans J W, Clausnitzer V. Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-ray computed tomography [J]. Plant and Soil,1997,189(2):167-179.
- [74]钟 南,罗锡文,秦 琴. 基于生长函数的大豆根系生长的三维可视化模拟[J]. 农业工程学报,2008,24(7):151-154.
- [75]钟 南. 植物根系生长的三维可视化模拟[D]. 广州:华南农业大学,2006.
- [76]杨 娟. 烟草根系生长发育动态模拟模型及其可视化研究 [D]. 郑州:河南农业大学,2004.
- [77]席 磊,冀亚丽,汪 强,等. 烟草根系生长的三维模拟仿真 [J]. 微电子学与计算机,2010,27(4):106-110.
- [78]徐其军. 基于模型的水稻根系可视化研究[D]. 南京:南京农业大学,2010.
- [79]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.
- [80]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.

陈有庆,顾峰玮,吴 峰,等. 我国花生机械化收获科技创新概况与发展思考[J]. 江苏农业科学,2018,46(22):19-23.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.22.004

# 我国花生机械化收获科技创新概况与发展思考

陈有庆,顾峰玮,吴 峰,王 冰,胡志超

(农业部南京农业机械化研究所,江苏南京 210014)

**摘要:**花生是我国最具国际竞争力的优质优势油料作物,且发展潜力大,但目前我国花生机械化收获占比还较低,仅为 30% 左右。科技创新是影响花生机械化收获水平发展的重要因素。阐述我国花生机械化收获科技创新现状,即起步晚、支持少、队伍小、发展快、成效大、与产业需求差距大、须破解的难题多;分析我国花生机械化收获科技创新存在的问题,即投入少、队伍小、条件弱,须要破解的技术难题多、难度大,三元(高校、科研院所、企业)共为创新主体,两元(政府和企业)投入长期并存的创新模式尚未形成;并对如何推进我国花生机械化收获科技创新工作进行思考。

**关键词:**花生;机械化收获;科技创新;技术难题;发展思考

**中图分类号:** S225.7<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)22-0019-05

## 1 我国花生产业现状

花生是我国最具国际竞争力的优质优势油料作物<sup>[1]</sup>,常年种植面积约占全球的 17.6%,产量约占全球的 37.0%,分

别居世界第 2 位、第 1 位。随着我国农业现代化发展和产业结构战略性调整加快,花生产业在我国的重要地位和产业特点日益凸显,加快花生生产机械化发展已成为我国农机化发展的重点和热点<sup>[2]</sup>。

### 1.1 花生产业国际地位高

联合国粮食及农业组织的数据显示,2014 年全球花生收获面积为 2 654.166 万  $\text{hm}^2$ ,产量为 4 391.54 万 t。种植面积在前 10 位的国家分别为印度、中国、尼日利亚、苏丹、坦桑尼亚、塞内加尔、尼日尔、乍得、美国、刚果(图 1、图 2),产量在前 10 位的国家分别为中国、印度、尼日利亚、美国、苏丹、坦桑尼亚、阿根廷、缅甸、乍得、塞内加尔(图 3、图 4)。可见,除美国以外,其他发达国家鲜有花生规模化种植,花生种植主要集中在亚洲、非洲、南美洲等发展中国家。

收稿日期:2017-07-10

基金项目:现代农业花生产业技术体系(编号:CARS-13-收获机械化);国家自然科学基金(编号:51375247);国家科技支撑计划(编号:2013BAD08B00);土下果实收获机械创新团队。

作者简介:陈有庆(1981—),男,江苏南京人,硕士,副研究员,主要从事土下果实生产机械化研究。Tel:(025)84346251;E-mail:89081229@qq.com。

通信作者:胡志超,硕士,研究员,主要从事土下果实生产机械化研究。Tel:(025)84346246;E-mail:zchu369@163.com。

[81] Měch R, Prusinkiewicz P. Visual models of plants interacting with their environment[J]. Proceedings of Siggraph, 1996:397-410.

[82] Prusinkiewicz P. Art and science for life: designing and growing virtual plants with L-systems[J]. ISHS Acta Horticulturae, 2004(630):15-28.

[83] 张 喆,王爱新,李春友. 基于 L-系统的虚拟植物生长模型设计[J]. 农机化研究, 2008(10):54-56.

[84] 孙红伟. 基于迭代函数系统(IFS)的植物形态模拟与实现[D]. 兰州:兰州交通大学, 2013.

[85] 朱 华,姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2011:98-130.

[86] Barnsley M F. Fractals Everywhere[M]. 2ed. Academic Press, 1993:94-109.

[87] de Reffye P, Edelin C, Françon J, et al. Plant models faithful to botanical structure and development[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1988, 22(4):151-158.

[88] Fourcaud T, Blaise F, Barthelemy D, et al. A functional model of tree growth and tree architecture[J]. Silva Fennica, 1997, 31(3):297-311.

[89] 夏 宁,李爱双,苏柱华,等. 虚拟植物生长技术及其农业应用[J]. 广东农业科学, 2009(9):218-223.

[90] 赵春艳. 向日葵生长模型的构建方法研究[D]. 长春:东北师范

大学, 2010.

[91] Reeves W T, Blau R. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle system[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1985, 19(3):313-322.

[92] Reeves W T. Particle systems - A technique for modeling a class of fuzzy objects[J]. ACM Transactions on Graphics, 1983, 2(2):91-108.

[93] 屈洪春. 虚拟植物智能生理引擎及关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.

[94] 王宁皎,莫国良,张 引,等. 植物的三维建模研究进展[J]. 计算机应用研究, 2005(11):1-3, 37.

[95] 李云峰. 叶图像提取研究及虚拟植物可视化实现[D]. 重庆:重庆大学, 2005.

[96] 胡伟熾. 基于图像的植物建模技术的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.

[97] 王宁宁,尹文广,黄秦军,等. 三维扫描技术在获取杨树树冠结构特征参数上的应用[J]. 林业科学, 2015, 51(5):108-116.

[98] 王 剑,周国民. 利用激光扫描仪获取植物三维模型的方法[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(1):104-106.

[99] Wang T, Dickinson J K, Lang S, et al. Building a parametric 3D tomato plant model using laser scans and field data[J]. Modeling and Simulation, 2007(1):374-379.