

文章编号:1000-582X(2011)06-110-07

生理过程模糊神经推理的虚拟植物

朱庆生¹, 郭明伟¹, 屈洪春¹, 黄启中²

(1. 重庆大学 计算机学院, 重庆 400044; 2. 重庆市农业科学院 重庆 401329)

摘要:提出一种基于模糊神经生理过程推理系统的植物生长模型。该模型基于机器学习理论,从测量的数据中自动学习拟合植物器官生长函数,提取植物生长规律。在植物生长发育过程中,源库器官根据其生长函数响应虚拟环境,并进行生产、分配、利用同化物。同时器官功能部分的变化反馈到结构部分,对表示植物结构信息的 L 文法字符串进行修改。当生长环境变化时,模型自动调整生长函数的参数和 L 文法,在环境中进行优化选择,最终形成适应当前虚拟环境的植物。基于辣椒实验仿真表明,该方法能够准确提取植物生长函数和结构规律,逼真地展现植物对生长环境的响应和适应。

关键词:模糊神经推理;生长函数;L 文法;同化物;虚拟植物

中图分类号:TP391.01

文献标志码:A

Virtual plant based on fuzzy neuron Inference of physiology process

ZHU Qing-sheng¹, GUO Ming-wei¹, QU Hong-chun¹, HUANG Qi-zhong²

(1. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chongqing Academy of Agricultural Science, Chongqing 401329, P. R. China)

Abstract: A fuzzy neuron inference of physiological process (FNI-PP) based virtual plant growth model is proposed. Using machine learning theory, the model can automatically learn and fit the plant growth function according to measured data and extract the plant growth rules. During plant growth, the source and sink organs respond the surrounding virtual environment according to its inbuilt growth function, and produce, allocate and consume assimilates as well as update the L-grammar representing the plant structure. The model can automatically adjust parameters of the growth function and the L-grammar to respond the environmental heterogeneity. Cayenne-based simulations show that the model can accurately extract the growth function and the structural pattern of the plant, and vividly demonstrate the response to environment.

Key words: fuzzy neuron Inference; growth function; L-grammar; assimilate; virtual plant

虚拟植物是近年数字农业和虚拟现实等交叉学科领域兴起的研究热点^[1],目的是将复杂的植物生长发育过程与环境因素的关系用动态、直观的虚拟场景展现出来,满足虚拟农业实验研究的需要。当前的虚拟植物研究,包括以计算机图形学为基础的植物形态三维仿真,以植物生理学、细胞生物学等学

科为基础的植物生理过程的数值模拟,以及将两者结合的植物功能结构模型^[2]。虚拟植物涉及生理作用和环境因素之间复杂的交互过程,因此功能结构模型是最忠实于植物生长和发育规律的方法,吸引了众多学者的研究。Perttunen 等将树木的冠层模型与光合生理模型结合,建立了 LIGNUM 模型^[3];

收稿日期:2010-11-22

基金项目:国家 863 计划课题资助项目(2006AA10Z233);国家自然科学基金资助项目(60773082)

作者简介:朱庆生(1956-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事图像处理,虚拟现实等方向研究,(Tel)13808396394;
(E-mail)qs Zhu@cqu.edu.cn。

Allen 等使用 L+C 系统模拟桃树的结构生长和电阻电路模拟同化物的分配,建立了 L-PEACH 模型^[4]。这些模型的参数获取或者非常复杂,或者依靠人工经验,难以全面反应植物生长规律。

植物的生长发育实质上是同化物产生、分配、吸收利用和积累的过程。同化物的分配模式虽然具有一些规律如就近供应,优先供应生长中心,同侧运输以及源库单位等,但一般由生长区和贮藏区的具体要求决定^[5]。植物不同生长阶段,生长区和贮藏区不同,同化物分配可能差异很大。目前的分配模型以源库关系模型机理性最强、生理过程最全面,如 Thornley 等根据 Münch 理论提出的压力流模型^[6],具有较好的实验效果。从同化物分配规律出发,以源库关系模型为理论基础,提出一种生理过程模糊神经推理(fuzzy neuron inference of physiological process, FNI-PP)的植物生长模型。模型采用模糊神经推理系统自动提取植物的生长行为规律,采用 L 文法描述植物的分枝结构规则,建立生长控制算法控制虚拟植物生长发育。首先介绍模型及其功能组成。接着重点介绍植物生长规律和模型系统的运行。最后通过仿真实验验证模型的有效性。

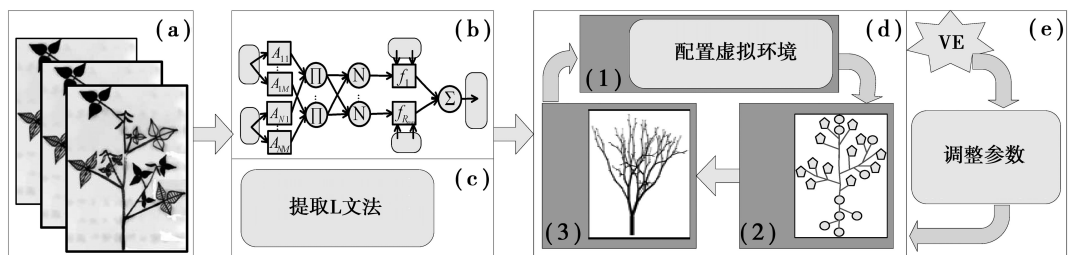


图1 植物生长模型结构示意图

1.2 数据采集

植物器官可按照同化物的生产和供应关系分为源和库两类。源定义为,通过光合生产或由贮藏物质转化产生同化物的组织或器官,如功能叶等。库定义为,参与分配、吸收利用或贮藏同化物的器官,如嫩叶、花、根等。源供应同化物的潜力称为源压,而库吸收同化物的潜力用库压衡量。源压最直观的指标是叶片光合生产率^[7],通过测定释放的 O_2 确定。库压由呼吸消耗率和扩展速率。分别通过测定释放的 CO_2 和较长时间内器官的体积确定。如图 1(a)所示,使用仪器对实际植物测定,采样植物生理数据和分枝结构数据。使用相机在 360° 范围内间隔 60° 拍摄照片进行图像采集。使用图像处理 and 模式识别技术自动提取植物的分枝结构信息^[8]。

1.3 生长规律提取

针对同种植物采集其在不同生长环境下的生理

1 系统模型

1.1 模型框架

基于 FNI-PP 的植物生长模型框架如图 1 所示。模型使用人工智能学习算法拟合复杂的植物生长函数,自动、全面提取人工不易发现和表示的生长规律。拟合的生长函数可以准确地计算同化物产生和分配。采用压力流模型对同化物进行分配。同化物驱动植物生长发育,迭代和修改 L 文法字符串。同时,模型实时检测环境变化,调整参数,适应环境变化。实验证明,该方法能有效模拟虚拟植物感受虚拟环境的生长发育过程,为准确预测光、温、水、肥等环境因素对农作物生长影响提供了一种可行思路。模型通过测量植物(a)的生理数据并进行统计和学习,拟合出植物的生长函数(b)和提取出表示植物分枝结构的 L 文法(c)。在虚拟植物生长发育过程中(d),通过配置虚拟环境参数(1),计算和分配同化物(2),以及迭代修改 L 文法字符串(3)使得虚拟植物能实时感应环境(e),当环境发生变化时,能自动调整参数适应环境。

过程数据,使用统计分析方法和模糊神经网络学习算法分析得到该种植物的生长过程数据。如图 1(b)所示,使用统计方法得到植物寿命概率 $P(Age_p)$,器官寿命概率 $P(Age_o)$ 、最大体积概率 $P(V_{max})$ 或面积概率 $P(S_{max})$,单位体积干物质重量 $Den(Age_o)$ 。 $P(Age_p)$ 表示植物 Age_p 时以概率 $P(Age_p)$ 死亡, $P(Age_o)$ 表示器官 Age_o 时以概率 $P(Age_o)$ 成熟脱落, $P(V_{max})$ 、 $P(S_{max})$ 表示器官体积 V_{max} 或面积 S_{max} 时,以概率 $P(V_{max})$ 或 $P(S_{max})$ 发育或转化新器官或者停止扩大体积。

植物器官生长函数是描述植物生长发育最重要的生理信息。本模型拟合的生理过程函数有叶片光合生产率,器官生长率与呼吸消耗率。模糊推理系统非常适合描述植物生长和环境条件因素的不确定性,例如叶片在光强“较弱”时,光合效率“较低”。因此,使用生理过程模糊神经推理系统来学习拟合植

物生长函数。

植物结构是植物生理性状的外在表现,受控于植物基因表达和环境状况,随生长而动态变化,结构的提取和描述非常复杂,使用L系统描述^[9]。如图1(c),根据文献[8]中提出的方法对采集的植物结构信息进行统计,获得植物生长单元集,建立隐马尔科夫树模型,提取各组织器官几何与拓扑结构的状态转移关系,最后转换为描述植物结构的公理和L产生式集。

1.4 植物生长控制

从同化物的产生、分配、利用角度模拟植物生长。植物生长受到环境的支持和影响。首先配置植物生长环境,如图1(d)中(1)。地上光照和地下矿物质是对植物生长最重要的环境因素。地上环境因素,如CO₂、O₂、湿度等,对植物整株影响均匀。由于

植物自身遮挡,光照强度和光照时间存在局部差异^[10]。地下环境因素,如水分和矿质元素N、P、K等,在土壤中相对固定,不同部位根系获得不同量的物质^[11],生长速度不同。

根据配置的虚拟环境,调用拟合的生长函数,计算得到源压、库压。如图1(d)中(2),根据文献[4,12]压力流模型,进行同化物分配。器官利用获取的同化物,进行形态建成和生长发育,对L字符串进行修改和迭代,展现虚拟植物生长发育,如图1(d)中(3)。植物总能适应复杂变化环境。如图1(e),模型中植物能够实时感应环境,并调整适应环境变化。当感应到环境变化时,模型调整P(Age_p)、P(Age_o)、P(V_{max})、P(S_{max})及生理过程推理系统的参数,重新拟合生长函数。同时可以对L文法的产生式及参数进行调整,修改植物结构。

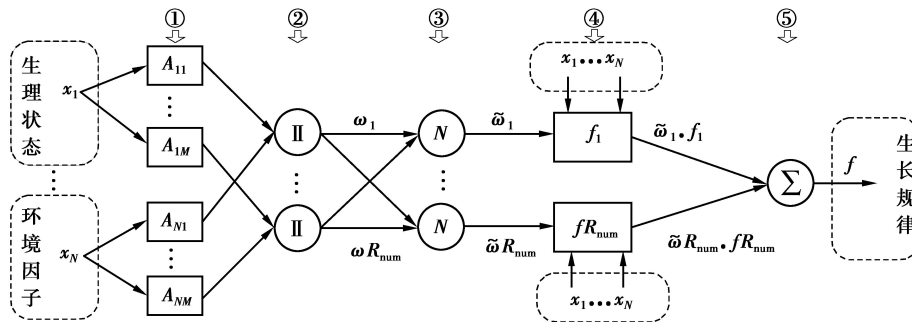


图2 FNI-P 结构图

2 生理过程

2.1 生长函数拟合

基于自适应模糊神经推理系统^[13]的思想,通过对植物生理过程进行模糊神经推理来拟合植物生长函数。结构如图2所示。该生理推理系统有5层组成:

第①层,从植物生理学的角度,将生理状态和环境因子输入 x_i 分解成 M 个模糊集,进行模糊化。例如植物年龄 $x_1 = \{\text{幼苗期, 营养生长期, 生殖期, 成熟期, 衰老期}\}$,叶片生长年龄 $x_2 = \{\text{幼叶期, 扩展期, 功能叶期, 衰老期}\}$,温度 $x_3 = \{\text{低温, 适温, 高温}\}$ 。计算输入 x_i 模糊集 A_{ij} 的隶属度函数

$$\mu_{A_{ij}}(x_i, \theta_{ij}) = [1 + (x_i - c_{ij})^{2b_{ij}} \cdot a_{ij}^{-2b_{ij}}]^{-1} \quad (1)$$

$\theta_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ 为隶属度函数前件参数集。

第②层,实现模糊推理系统前件部分模糊“与”运算,输出每条模糊规则激励强度

$$\omega_k = \prod_{j \in [1, 2, \dots, M]} \mu_{A_{ij}}(x_i, \theta_{ij}), i \in [1, 2, \dots, N], \quad (2)$$

其中 R_{num} 为模糊规则数。

第③层,输出各条规则归一化激励强度

$$\tilde{\omega}_k = \omega_k \cdot (\sum_j \omega_j)^{-1}, j = 1, 2, \dots, R_{num} \quad (3)$$

第④层,计算每条规则输出

$$f_i = p_{i1}x_1 + p_{i2}x_2 + \dots + p_{iN}x_N + r_i, \quad i = 1, 2, \dots, R_{num} \quad (4)$$

其中所有 $\{p_{ij}, r_i\}$ 组成后件参数集。

第⑤层,计算所有规则的输出之和 f ,拟合得到所需要的生长函数:叶片潜在光合生产率 f_{PR} 、各个器官的潜在生长率 f_{ER} 及呼吸消耗率 f_{RR}

$$f = \sum \tilde{\omega}_i \cdot f_i, i = 1, 2, \dots, R_{num} \quad (5)$$

推理系统的前件参数集和后件参数集都是未知参数,根据Jang提出的“混合学习算法”,使用采集的样本集训练优化获得。

2.2 源库同化物分配

根据拟合的生长函数,可以计算时刻 t 年龄 i 的叶片面积 S_{it} 及当前环境光合生产率 f_{PRt} ,此时叶片源压 SO_{it} 由式(6)计算得出。

$$SO_{it} = C_{SO} \cdot f_{PRt} \cdot S_{it} \quad (6)$$

其中 $C_{SO} \in (0, 1)$,为源压与光合生产率的关系常数,可根据实验数据计算得出。时刻 t 年龄 o 的器

器官体积 V_{ot} , 单位体积干物质重量 Den_{ot} , 当前环境器官生长率和呼吸消耗率为 f_{ERt} 、 f_{RRt} , 则此时器官库压 SI_{α} 由器官生长率和呼吸消耗率决定, 如式(7)

$$SI_{\alpha} = Den_{ot} \cdot f_{ERt} + V_{ot} \cdot f_{RRt}, \quad (7)$$

库同化物实际获取量 SI_{ac} 受到库压和库优先权及环境因素共同影响, 可以使用下式表示

$$SI_{ac} = f(\text{phy}) \times f(\text{con}) \times f(\text{env}), \quad (8)$$

其中 $f(\text{phy})$ 为生理因素影响函数, 如器官年龄、植物生长阶段、器官重量等。 $f(\text{con})$ 中 con 为器官与植物连接点处的同化物浓度, 由压力流模型计算得出。 $f(\text{env})$ 为温度、水分等环境因素影响函数。方程(8)通过生理推理系统拟合的器官生长率和呼吸消耗率计算得到。测量并拟合得到在正常生长条件下, 器官生长率和呼吸消耗率与生理因素、环境因素及器官与植株连接点同化物浓度的关系为 $f_{ER}(\text{phy}, \text{con}, \text{env})$ 、 $f_{RR}(\text{phy}, \text{con}, \text{env})$, 则

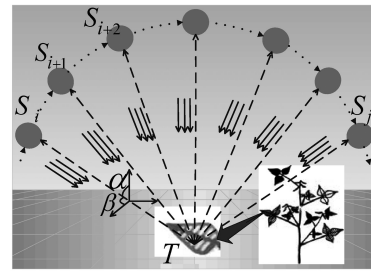
$$SI_{ac} = Den_{ot} \cdot f_{ER}(\text{phy}, \text{con}, \text{env}) + V_{\alpha} \cdot f_{RR}(\text{phy}, \text{con}, \text{env}). \quad (9)$$

在植物生长发育中, 计算出所有源压和库压后, 使用压力流模型中牛顿拉普森方法计算每个器官与植物连接点的同化物浓度。根据式(9)即可得到此时每个库器官的实际同化物获取量, 然后进一步迭代计算连接点的同化物浓度。

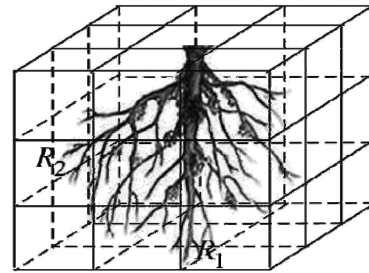
3 系统运行

3.1 虚拟环境

地上光照存在局部差异, 需要对每个器官分别考虑, 建立如图 3(a)地上虚拟光照环境模型。其余环境因素则具有统一程度的影响。根据(a)可以计算每个叶片获得的光能。图中 S_i, \dots, S_j 为不同太阳高度角时的虚拟光照, 太阳高度角随地方时变化, 由 α, β 确定, 虚拟光照强度 P_i 也发生变化, 以太阳高度角投射虚拟光线。对于叶片 T , 从太阳高度角方向投影确定叶片被照面积 A_i , 及一天直接光照时间 L , 则该叶片一天获得的光能由方程(10)计算得到。



(a)地上虚拟光照环境



(b)地下虚拟土壤环境

图 3 虚拟环境下根采生长速度差异

$$E = \int_1^L P_i \cdot A_i. \quad (10)$$

地下虚拟土壤环境如图 3(b)所示, 虚拟植物根系生长环境被划分成若干方格, 根尖 R_1, R_2 所处的土壤环境条件可能不同, 分配得到的同化物量有差异, 导致根系的生长速度也不同。

3.2 生长控制

植物器官在分配同化物后需要利用, 模型对 L 文法字符串的参数修改或进行产生式迭代, 实现器官体积扩展和生长发育。当同化物供应不足时, 器官生长处于抑制状态, 生长缓慢甚至脱落。当同化物供应充足时, 器官体积扩展, 当器官扩展到一定体积且达到某一生长阶段时, 需要转化或发育成新的器官, 此时要进行 L 产生式的迭代。植物生长控制如表 1 描述。

表 1 植物生长控制算法表

算法 1: 虚拟植物生长控制。
输入: 1. 虚拟植物生长函数和结构信息(公理和产生式集)。 2. 虚拟环境。
输出: L 文法字符串和 3D 植物图像。
①初始化。将公理初始化作为初始的 L 字符串, 生长阶段 k 初始为 1。
②分配同化物。在当前虚拟环境条件下, 根据当前 L 字符串和 2.2 部分所述, 对所有器官分配同化物。
③利用同化物。
I. 修改源器官生长状态。对所有源器官 so :
If(so 产生同化物不足以供给自身), Then(删除 L 字符串中 so 对应字符。修改下一个源器官);
If(so 产生同化物向外输出), Then(以概率 $P(\text{Age}_{so})$ 决定器官 so 是否成熟脱落);
If(脱落)Then(删除 L 字符串中 so 对应字符)Else(根据 so 生长率修改 字符串对应字符参数);;

续表

II. 修改库器官生长状态。对所有库器官 si ：
 以概率 $P(\text{Age}_{si})$ 决定器官 si 是否成熟脱落, If(成熟脱落) Then(删除 L 字符串中 si 对应字符。修改下一个库器官)；
 以概率 $P(\text{v}_{sik})$ 决定器官 si 能否发育转化新器官, If(发育转化) Then(使用 L 文法产生式迭代替换 L 字符串中 si 对应字符。修改下一个库器官)；
 If(器官 si 分配的同化物 $SI_{si} \leq \text{器官呼吸消耗}$) Then(删除 L 字符串对应器官的字符)
 Else(SI_{si} 减去器官当前呼吸消耗得到干物质净增量 w , 除以 Den_{si} 得到器官 si 的实际扩展体积 v , 根据 w 和 v 修改 L 字符串对应器官的几何参数。修改下一个库器官)；
 ④以概率 $P(k)$ 决定虚拟植物是否死亡: If(死亡) Then(算法结束) Else
 { If(根分配不足同化物) Then(算法结束)
 Else($k+1 \rightarrow k$, 各存活器官年龄自增 1, 更新当前虚拟环境, 跳到②继续执行;) }

3.3 环境交互

模型检测当前环境下可繁殖(其种子同化物量必须不小于某值)后代小于某阈值 N_p 时, 可以认为植物难以适应当前环境^[14], 需要进行适应性调整。 N_p 根据实际植物生长统计得到。同种植物生理限制一般稳定, 因此参数调整后, 最大光合速率和最大呼吸速率不能超过调整前的最大值。结构调整, 一方面通过对产生式中叶片、分枝角度及其他参数修改实现; 另一方面通过增加、删除、修改产生式中 L 字符实现。根据适应度函数衡量参数调整效果。适应度函数选取可繁殖后代数

$$f(p) = | \text{child}_{p_seed} |. \quad (10)$$

其中 $\text{ass}_{p_seed} \geq \text{ass}_{seed}$ (ass_{seed} 表示一粒可繁殖种子的最少生物量)。环境因素具有一定的波动性, 假定其符合某概率分布, 使用蒙特卡洛方法^[15] 随机生成符合该概率分布的虚拟环境测试集。在该测试集中, 优化选择适应当前环境的虚拟植物。

4 仿真实验

以重庆市农业科学院温室大棚辣椒为例进行研究。从 2008 年 3 月 15 日至 9 月 15, 标记测量大棚

内 600 株辣椒, 间距 20~25 cm, 行距 35~40 cm。大棚可控制光照、 CO_2 、湿度等。由于源库之间具有一定的相关性, 两者相互制约, 为了计算潜在源压和库压, 必须设计合理的实验^[16], 测量潜在光合速率、各类器官潜在生长率和呼吸消耗率。为了计算库竞争时库器官的同化物实际获取量, 需要测量在一般竞争情况下的各类器官生长率和呼吸消耗率。

选取 200 株辣椒标记为 A 组, 通过去叶的方法, 减少源的数量, 使用仪器测量叶片在不同环境因素(如 O_2 、 CO_2 、光照等)时的潜在光合速率和呼吸速率。计算得到叶片一昼夜的潜在光合生产率 PR_{\max} (光合生产量减去呼吸消耗)。选取 200 株辣椒标记为 B 组, 通过去花、去芽、供给外源糖使测量器官得到充分的同化物供应, 实现最大程度生长, 在不同环境因素下测定器官(芽、嫩叶、花、根、茎)的潜在生长率 ER_{\max} 和潜在呼吸消耗率 RR_{\max} 。最后 200 株辣椒标记为 C 组, 不做任何处理, 测量其在一般竞争情况下的生长率 ER_{ac} 和呼吸消耗率 RR_{ac} , 并采集其结构信息。测量生理数据在 IBM xSeries 346(CPU: Intel Xeon 3 400, 内存: 2GB) 服务器上学习训练拟合生长函数, 各生长函数平均训练时间如表 2 所示。

表 2 各生长函数平均训练时间

生长函数	PR_{\max}	ER_{\max}	RR_{\max}	ER_{ac}	RR_{ac}
时间/s	9 320	9 668	6 754	8 335	10 992

如图 4 所示, 为拟合得到的主要生长函数, 图 4(a-1)为辣椒叶片源压与年龄关系图, 白点为检验取样数据, 黄色曲线为趋势线, 图示幼叶期源压为 0, 此时叶片吸收同化物维持生长, 随着年龄增长, 叶片扩展, 源压逐渐增长, 进入功能叶期, 源压稳定在较高水平, 叶片衰老时, 源压很快降低为 0。图 4(a-2)为源压与光合总量关系图, 光合总量较少时, 叶片合成的同化物主要供给自身消耗, 源压为 0, 随着光合总量的增加, 其源压直线增长, 当达到光饱和点, 源压不再增长。图 4(b-1)为辣椒果实库压与年龄关系图, 从图可见, 果实库压先随年龄增加而增加, 后随

着年龄增加而缓慢下降, 直到果实成熟降为 0。图 4(b-2)说明果实库压先随着同化物含量增长而缓慢增加, 而后又逐渐降低, 当同化物含量最大时, 库压降为 0。

图 4(c-1)为果实同化物获取量与连接辣椒植株点处的同化物浓度关系图, 可见果实实际的同化物获取量随着同化物浓度的增大而缓慢增加, 当浓度趋于饱和时, 其获取量不再增加。图 4(c-2)为果实同化物获取量与水分胁迫的关系图, 水分胁迫从 0 到 1 变化, 即完全胁迫到不胁迫变化, 果实同化物获取量先快速增加, 后趋于平缓增加。

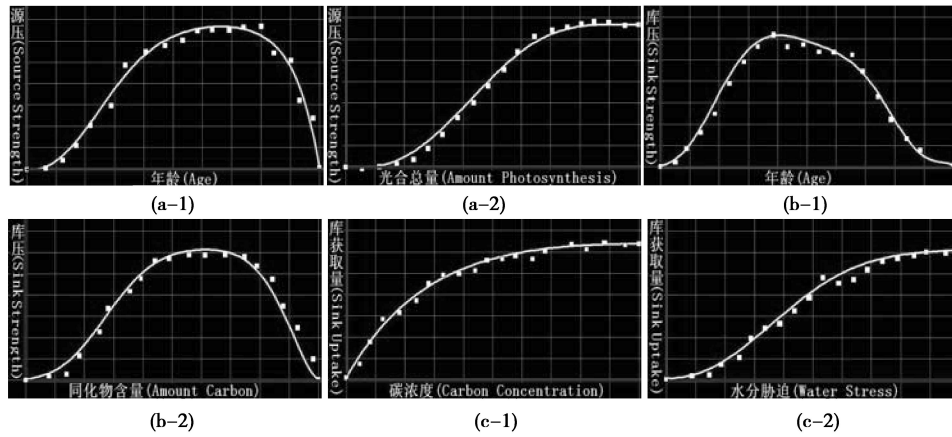


图 4 主要生长函数

如图 5 所示,(a-1)为生长 50 d 的真实辣椒,(a-2)为同期虚拟辣椒。(b-1)为右侧长期单向光照射生长 50 d 左右的真实辣椒,(b-2)为对应虚拟辣椒。(c-1)为在右侧土壤相对干旱,左侧土壤富含水分,生长 80 天形成的左根系向水的真实辣椒,(c-2)为对应虚拟辣椒。(d-1)、(d-2)分别为在持续干旱环境中,经过 20

代、30 代调整适应和优选,生长 100 d 时的虚拟辣椒。(e-1)、(e-2)分别为正常环境生长 100 天的虚拟辣椒和真实辣椒。(d-1)、(d-2)、(e-1)、(e-2)对比可见于旱环境中辣椒的逐步适应,根系逐步扩大,地上株体逐步缩小,分枝和果实减少,叶片变小并相互遮挡,以减少蒸腾散发水分,形成较大根冠比。

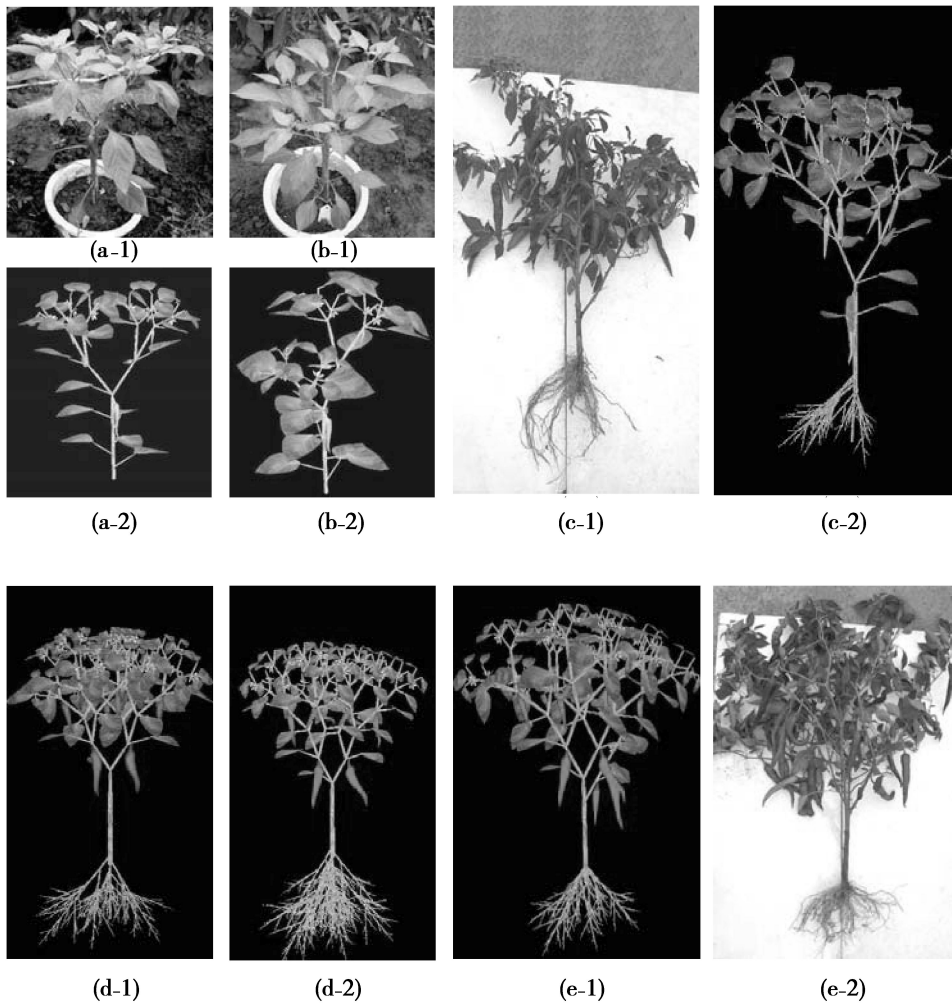


图 5 虚拟辣椒生长发育

5 结 论

对实际测量数据进行统计分析和机器学习,建立植物功能结构模型,有效展示了虚拟环境因素对虚拟植物生长发育的影响。通过实验,如图5所示,验证了植物向光生长和向源生长现象,以及植物对环境的适应和调整。

生长函数的拟合基于对大量实测数据的统计分析和学习,因此建立的模型可以很好的反应植物实际的生长规律。例如在测量植物生长数据时,向光的部分器官,感受了丰富的光照,器官生长旺盛,扩展迅速,即具有较大器官生长率和呼吸消耗率。这一规律必然通过生理推理系统学习拟合得到。

库器官根据分配的同化物决定生长动作。以概率 $P(\text{Age}_0)$ 决定器官是否成熟脱落,以概率 $P(V_{\max})$ 决定器官体积是否继续扩大或者是否发育新器官。这样使器官的生长发育具有规律性和随机性。但是,器官的生长发育还具有很大的模糊性。可以建立描述器官生长行为的模糊推理模型,将更逼真的展现出植物的生长发育。

参考文献:

- [1] GUO Y. Plant modeling and its applications to agriculture [C] // 2nd International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications. November 13-17, 2006, Beijing, China. CHINA: IEEE Computer Society, 2006.
- [2] GODIN C, SINOQUET H. Functional structural plant modeling[J]. *New Phytologist*, 2005, 166(3): 705-708.
- [3] MUYSKENS M. The fluorescence of lignum nephriticum: a flash back to the past and a simple demonstration of natural substance fluorescence[J]. *Journal of Chemical Education*, 2006, 83(5): 765-768.
- [4] 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(3): 869-880.
- [5] 刘颖慧, 贾海坤, 高琼. 植物同化物分配及其模型研究综述 [J]. *生态学报*, 2006, 26(6): 1981-1992.
LIU YING-HUI, JIA HAI-KUN, GAO QIONG. Review on researches of photo-assimilates partitioning and its models [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1981-1992.
- [6] HOLT TA T, VESALAT T, SEVANTO S, et al. Modeling xylem and phloem water flows in trees according to cohesion theory and Munch hypothesis[J]. *Trees*, 2006, 20(1): 67-78.
- [7] HEUVELINK E, BUISKOOL R P M. Influence of sink-source interaction on dry matter production in tomato[J]. *Annals of Botany*, 1995, 75: 381-389.
- [8] QU H C, ZHU Q S, ZENG L Q, et al. Automata-based L-Grammar extraction from multiple images for virtual plants[C/OL] // the Third International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications. Adelaide, Australia, September 28-October 1, 2008. [2008-09-24]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?tp=&arnumber=4656709.
- [9] PRUSINKIEWICZ P, LINDENMAYER A. The algorithmic beauty of plants [M]. New York: Springer Verlag, 1996.
- [10] CHELLE M, ANDRIEU B. Modelling the light environment of virtual crop canopies[C] // Workshop on Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production. March 5-8, 2006, Wageningen, The Netherlands. [S. l.]: Springer Science Business Media, 2006.
- [11] PARK S J, HWANG C S, VLEK P L G. Comparison of adaptive techniques to predict crop yield response under varying soil and land management conditions[J]. *Agricultural Systems*, 2005, 85(1): 59-81.
- [12] LACOINTE A, MINCHIN P E H. Modeling phloem and xylem transport within a complex architecture[J]. *Functional Plant Biology*, 2008, 35(9/10): 772-780.
- [13] TERZI O, KESKIN M E, TAYLAN E D. Estimating evaporation using ANFIS[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2006, 132(5): 503-507.
- [14] BORNHOFEN S, LATTAUD C. Competition and evolution in virtual plant communities: a new modeling approach[J]. *Natural Computing*, 2008, 8(2): 349-385.
- [15] WOLFGANG J. Quasi-Monte carlo sampling to improve the efficiency of monte carlo EM [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2005, 48(4): 685-701.
- [16] DEJONG T M, GROSSMAN Y L. Quantifying sink and source limitations on dry matter partitioning to fruit growth in peach trees[J]. *Physiologia Plantarum*, 1995, 95: 437-443.

(编辑 侯 湘)