

基于植株-环境交互的温室黄瓜虚拟生长模型研究^{*}

唐卫东¹ 刘欢¹ 刘冬生¹ 胡雪华² 李萍萍³ 卢章平⁴

(1. 井冈山大学电子与信息工程学院, 吉安 343009; 2. 井冈山大学生命科学学院, 吉安 343009;

3. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 4. 江苏大学图形技术研究所, 镇江 212013)

摘要:以温室黄瓜生长为例,对实验观测数据进行预处理并采用关联分析法获取植株-环境互作信息,依据作物发育动态理论模型建立了植株-环境的信息响应模型和信息反馈模型,再从植株生长的系统变化过程对相关模型进行耦合。运用规则化处理方法与面向对象技术建立植株拓扑演变模型与器官形态发生模型,并构建虚拟植物动态模型。实验表明,模型拟合度均达到95%以上,能较好地虚拟外部环境作用下的植物生长发育,为动态掌握和预测适宜植物生长的温室环境条件提供依据。

关键词: 温室 黄瓜 模型耦合 面向对象技术 虚拟植物

中图分类号: TP391; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)02-0262-07

引言

近年来,信息与计算机技术极大地促进了现代农业的发展,与农田相比,温室具有环境可控的优势并已成为推动现代农业发展的重要载体^[1]。研究表明,作物模型在温室作物生产与环境管理方面发挥重要作用,为此温室作物建模方法受到国内外有关研究者的普遍关注。一些发达国家早期采用关联方法建立作物生长与温室设施之间的函数关系,获得温室环境参数最优值^[2];为了适应温室环境自动化控制需求,采用决策支持系统工具和模糊PID控制相结合的方法,建立基于作物模型的决策支持系统并用于温室环境的模糊决策和预测控制^[3-4]。随着温室环境自动化控制水平的提高,一些研究人员基于Web技术或无线传感网,并在建立不同季节作物产量预测模型等基础上,开发温室环境自动控制系统,利用该系统及作物生长信息对作物生长环境进行自动调控^[5-7]。我国在环境优化调控结合作物生长模型以及控制理论与温室生产过程的结合方面进行了研究,如以黄瓜为研究对象建立了作物对环境因子的响应模型并提出依据生长环境最优和经济性最优原则有利于可控温室环境的优化调控^[8-10]。从已有成果得知,虽然温室植物建模方法具有各自特点和适用场合,但利用植物-环境交互作用规律是构建温室植物模型并将其应用于温室生产与环境调控的基础。

另外,虚拟植物技术已在植物生长状况的跟踪与分析、农业环境监控及病虫害管理等方面得到应用,并成为虚拟农业及现代精细农业研究领域的一种有效工具和方法。如采用Open_L系统理论构建的虚拟作物生长预报模型能够有效预测外部环境入侵或探寻作物受外部环境的影响^[11-12];基于环境参数构建的虚拟作物模型,则能够虚拟作物受外部环境影响的生长过程^[13]。运用虚拟植物模型能够实时动态地虚拟作物受外部环境作用的生长或响应状况,并可借助人工智能方法对作物生长发育时出现的异常情况进行实时监测,具有较好的稳健性和准确性^[14],这为预测适宜作物生长的外部环境条件提供了直观而可靠的科学依据。

本文拟通过温室植株与环境之间的信息传递过程探究植株-环境交互作用关系,建立信息响应模型和信息反馈模型,由此构建反映植株-环境交互作用的虚拟植物动态模型,为提高现代温室作物生产及环境自动化调控水平提供依据。

1 植株-环境互作信息

1.1 实验观测与信息预处理

以温室常见作物黄瓜为对象,在确保水肥正常供给下,先后对春、秋两茬定植后的无土栽培黄瓜生长进行定期观测和取样,其中前茬用于模型构建,后茬用于模型校验。实验采取单蔓整枝并在每个果节留一个果,采用定时定位观测法在温室内随机选定

收稿日期: 2013-02-25 修回日期: 2013-05-03

^{*} 国家自然科学基金资助项目(30771259、31071327)、江西省教育厅2012年度科技计划资助项目(GJJ12465)和井冈山大学博士科研启动项目

作者简介: 唐卫东,副教授,主要从事虚拟植物和温室环境控制研究, E-mail: metangwd@163.com

若干株长势相当的黄瓜幼苗作为长期定株观测的样本,采集茎高、叶龄等形态结构信息。同时,随机选定若干株长势相当的样本进行破坏性测量以测定果实的鲜质量,叶面积测定顶数第 5 片完全展开叶。取平均值作为黄瓜的形态数据,另外,在生育期各阶段和不同天气状况下对黄瓜植株的光合作用、呼吸作用等生理生态指标进行测定,并记录温室内外环境信息。然后对采集的信息进行预处理,即依据生物学与形态学理论采用模糊处理方法从实验观测数据中提取反映植株不同生长阶段特性的叶龄、生物量等形态结构信息和影响温室植物生长的温度、光照强度等环境因子信息。

1.2 获取植株-环境互作信息

根据已有研究及实验观测结果得知,黄瓜植株生长发生的形态结构变化与温度、光照强度等环境因子之间具有较强的内在作用关系。为此,本文采用关联处理方法对植株生长的形态结构信息与温室环境因子信息进行相关性分析。建立所获取的环境信息和植物生理生态信息的数据库,运用数据挖掘技术及统计学理论方法对大量采集数据进行处理和分析,提取影响温室环境条件和植物生长的特征信息。然后,采用遗传算法对所提取的特征进行筛选和优化组合,去掉次要和重复的特征,再将其作为植株-环境交互的基本信息。

2 植株-环境信息传递

2.1 植株-环境互作关系

植物生长是一个与外部环境不断进行信息交互的过程,且温室植物与环境之间的信息传递过程依次经过各自的信息接收、数据处理及信息响应等阶段^[15]。根据实验观测结果得知,温度、光照等构成了影响黄瓜植株功能性状变化的主要环境因子。如随着累积生长度日的提高植株茎高、叶龄及各器官生物量等呈现一定的变化规律,而室内 CO₂ 浓度通常随植株生物量、叶面积指数等变化而不断改变。此外,植株功能性状之间也存在相互关系,如植株发育到一定阶段时其冠层结构通常会影响植株的茎高、叶龄及叶面积指数等。

2.2 信息响应与反馈模型

通过实验观测,黄瓜植株在其生育期内经历了不同的生长阶段,其中,黄瓜的发育进程及发育速率等信息不仅反映了植株各生育阶段的生长特性,还能够对温室环境因子作用进行响应。

由于温室黄瓜在各生育阶段基本处于可控环境条件下,其发育进程受温度影响较大,因此本文采用常见的生长度日即植株在完成某一生育阶段所需要

的累积有效积温为参数来表示黄瓜的发育进程^[16]。虽然黄瓜在各生育阶段的生长特性及其所受环境因子的影响有所不同,但作物生长是一个连续的系统变化过程。因此,发育进程也反映了在外部环境作用下植株以发育速率 v_p 经过 x d 后生长到某一生育阶段的结果。

另外,为了更好地体现植株生长发育的生物学特性及其与外部环境因子的作用关系,依据作物发育动态的理论模型^[17],结合温室黄瓜各发育进程所具有的特性,将黄瓜在不同生育阶段内的发育速率描述为

$$v_p = f_p f_e \tag{1}$$

式中 f_p ——植株不同生育阶段生长发育基本函数
 f_e ——影响植株生长发育的环境因子综合作用函数

由温室黄瓜生长实验观测统计结果得知

$$f_p = e^{\lambda} \tag{2}$$

式中 λ ——植株的基本生育参数,由作物遗传因子确定

在确保水肥正常条件下,温室黄瓜生长主要与温度、光照强度有关,则环境因子综合作用函数

$$f_e = f_t f_l \tag{3}$$

其中 $f_t = g^{\mu}(t)$ $\tag{4}$

$$f_l = g^{\nu}(l) \tag{5}$$

式中 f_t ——温度影响函数

f_l ——光照影响函数

$g(t)$ ——温度影响因子

μ ——温度作用系数,表示植株在不同发育进程对温度的响应程度

$g(l)$ ——光照影响因子

ν ——光照作用系数,表示植株在不同发育进程对光照的响应程度

l ——植株生长发育环境的逐日平均光照长度

t ——植株生长发育环境的逐日平均温度

根据温室作物生长特性及环境变化特点,温度影响因子

$$g(t) = \begin{cases} \frac{t - T_{minj}}{T_{medj} - T_{minj}} & (T_{minj} < t \leq T_{medj}) \\ \frac{T_{maxj} - t}{T_{maxj} - T_{medj}} & (T_{medj} < t < T_{maxj}) \end{cases} \tag{6}$$

式中 T_{minj} 、 T_{medj} 、 T_{maxj} ——植株在第 j 个生育阶段内的最低温度、最佳温度及最高温度

当植株生长发育环境的逐日平均温度小于最低温度或大于最高温度都可能导致作物出现非正常生

长或停滞现象,即当 $t \leq T_{\min j} \cup t \geq T_{\max j}$ 时, $g(t) = 0$ 。

而光照影响因子

$$g(l) = \begin{cases} \frac{l - L_{\min j}}{L_{\text{medj}} - L_{\min j}} & (L_{\min j} < l \leq L_{\text{medj}}) \\ \frac{L_{\max j} - l}{L_{\max j} - L_{\text{medj}}} & (L_{\text{medj}} < l < L_{\max j}) \\ 0 & (l \leq L_{\min j} \text{ 或 } l \geq L_{\max j}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $L_{\min j}$ 、 L_{medj} 、 $L_{\max j}$ ——植株在第 j 个生育阶段内的最小光照长度、最佳光照长度及最大光照长度

根据式(1)和式(3),可得植株发育速率

$$v_p = f_p f_t f_l \quad (8)$$

即
$$v_p = e^{\lambda} g^{\mu}(t) g^{\nu}(l) \quad (9)$$

为了反映植株发育速率随各环境因子参数变化的大小,利用式(9)分别对温度 t 、光照长度 l 求偏导数。当温室温度、光照变化到一定程度(在植株生育阶段内出现临界值即为最大或最小值)时,植株发育速率将达到极限值,即

$$\left. \frac{\partial v_p}{\partial t} \right|_{t = T_{\min j} \cup t = T_{\max j}} = 0 \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial v_p}{\partial l} \right|_{l = l_{\min j} \cup l = l_{\max j}} = 0 \quad (11)$$

为了有效调节不同环境影响因子,对式(9)求逆函数。将 v_p 作为自变量,温度 t 、光照长度 l 分别作为因变量,可将式(9)表示为

$$v_p = \phi(t) \quad (12)$$

式(12)反映了发育速率 v_p 随温度 t 变化的函数关系,而通过对其求逆便得到温度 t 随 v_p 变化的反函数,即

$$t = \phi^{-1}(v_p) \quad (13)$$

同理,可将式(9)表示为

$$v_p = \varphi(l) \quad (14)$$

式(14)反映了发育速率 v_p 随光照长度 l 变化的函数关系,而通过对其求逆便得到光照长度 l 随 v_p 变化的反函数,即

$$l = \varphi^{-1}(v_p) \quad (15)$$

式(12)~(15)不仅反映了温室温度、光照等环境因子对植株生长发育的影响,还能够依据植株生长发育特性对温度、光照等外部环境因子提出具体的参数调控需求,也是植株生长发育对温度、光照等外部环境因子作用的信息反馈模型,该模型为实现温室环境因子参数的有效调控提供了理论依据。

3 模型耦合

在温室可控环境作用下,与植物生长相关的模拟模型包括生理生态模型和形态发生模型,在植物

的生理生态模型中生育期模型是其他相关模型的基础,而形态发生模型主要包括植株拓扑演变模型与器官形态发生模型。受温室温度影响的发育进程能够反映不同生育期的变化过程,且发育进程是植株以发育速率 v_p 经过一定发育时间后生长到某一生育阶段的结果。由式(1)得知,发育速率 v_p 不仅与植株各生育阶段生长发育的基本函数 f_p 有关,还与影响植株生长发育的环境因子综合作用函数 f_e 有关,而根据温室黄瓜生长特性, f_e 主要与温度、光照强度等环境因子有关。为便于说明,本文将 f_p 及 f_e 统称为影响因子变化模型。

依据发育进程的定义,植物生长是一个发育进程不断变化的系统过程,上述模型均在一定程度上存在某种相互关系,如不同生育阶段的影响因子变化模型决定了该阶段的发育速率变化模型,而不同生育阶段的发育速率变化模型又决定了该阶段的发育进程变化模型。按植株生长的时空变化过程对相关模型进行耦合,如图1所示。

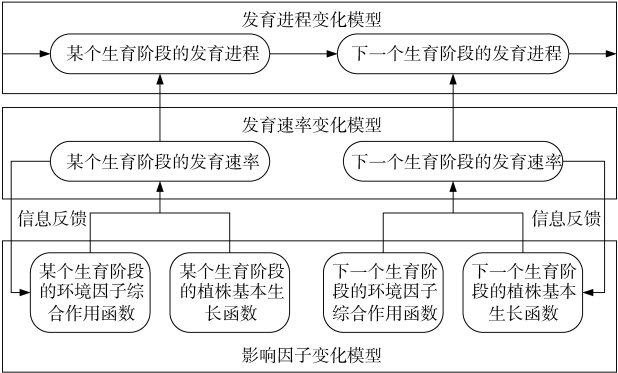


图1 植株不同生育阶段的模型耦合过程

Fig. 1 Program of model coupling with plant development

4 虚拟植物模型构建

4.1 形态结构信息的规则化

植株生长是一个复杂的系统过程,其间不仅发生一些不规则的形态结构变化,还存在较庞大的数据信息。为了构造反映外部环境作用下植物生长特性的虚拟植物模型,需要在实验观测基础上提取植株的形态结构信息并采用量化处理方法对其进行规则化。植株的形态结构信息主要包括植株拓扑结构与器官形态信息,其中,拓扑结构通常反映分枝及出叶方式、茎高、叶龄等与不同生育阶段植株拓扑变化相关的信息,而器官形态信息反映叶、花和果实等与器官形态变化相关的几何形体信息。

4.2 植株拓扑演变模型

根据实验观测结果,定植后的黄瓜植株在各生育阶段其拓扑结构如出叶顺序、开花结瓜方式等均

按一定规律进行演变,可以将其简化为一个不断递归的生长变化过程。为此,针对黄瓜植株生长特点,采用类封装法对植株在不同叶龄发生的生长过程定义(生长单元类)为

```
Class Development unit
{
/* 以下为成员变量声明 */
枝条类成员变量;
叶类成员变量;
花类成员变量;
果类成员变量;
其他成员变量;
/* 以下为成员函数声明 */
茎秆发育动态模型;
叶龄变化动态模型;
叶面积指数动态模型;
光合作用动态模型;
生物量变化动态模型;
其他成员函数;
}
```

由于植株生长可以近似为不同生育期的生长单元重复发生的过程,为此,以上述定义的生长单元类为基础,采用递归方法描述黄瓜植株拓扑演变过程,如图2所示。

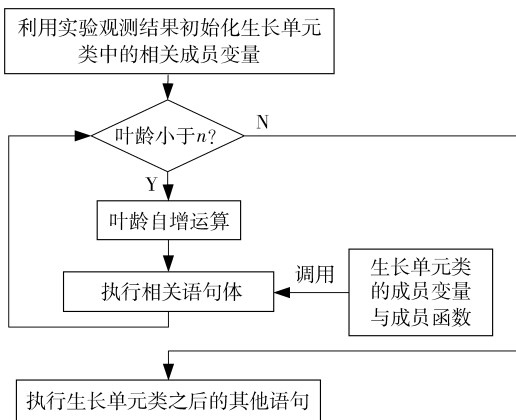


图2 植株拓扑演变流程图

Fig.2 Program of plant topological model

在上述生长单元类定义中的成员变量声明可以运用器官类对不同器官进行声明,而茎秆发育动态模型、叶龄变化动态模型、叶面积指数动态模型、光合作用动态模型及生物量变化动态模型等则可以通过实验结果统计获得。于是,通过生长单元类的声明便可实现植株拓扑演变模型的调用以获得植株拓扑信息。此外,由于黄瓜植株拓扑变化符合L系统理论的相似文法结构,因此,也可以采用L系统方法描述其不同生育阶段的拓扑演变过程。

4.3 器官形态发生模型

实验表明,茎秆、花及果实等各类器官的几何形态通常随着植株拓扑结构的演变而不断发生变化。虽然器官类型不同,但各类器官形态发生过程具有自相似性的特点,因此,采用类封装法对器官生长时发生的几何形态变化定义(器官类)为

```
Class Organ
{
/* 以下为成员变量声明 */
器官形体大小等几何形态变量;
器官颜色、纹理等属性变量;
其他成员变量;
/* 以下为成员函数声明 */
器官生长动态模型;
其他成员函数;
}
```

根据实验观测结果并采用生长曲线或指数曲线等拟合模型可以获得器官类定义中的器官生长动态模型,如通过实验观测可以建立茎秆器官形态(长度、直径)随累积生长度日变化的动态模型。于是,通过器官类的声明便可实现器官形态发生模型的调用以获得器官形态发生信息。受物种基因及外部环境因素影响,除几何大小及颜色品质等有所差异外,同类器官的形体及其形态发生过程基本一致,因此,根据生物学特性及不同生育期特点采用归一化方法将同类器官进行标准化处理,并建立各类器官模型库,通过生长单元类成员的调用便可在计算机上快速绘制各类器官。

4.4 虚拟植物动态模型

植物生长是一个动态变化过程,为了对温室可控环境作用下的植物生长进行可视化,需要构建反映植株-环境交互作用的虚拟植物模型。由于植物生长过程包含大量的数据信息,且信息之间存在一定的关系,而根据植株生长结构特点及其变化规律,针对这些数据信息的组织可以运用面向对象技术与方法,如在构造反映植株拓扑结构变化的生长单元类和反映不同器官形态变化的器官类时均采用了类封装法,这样有利于数据信息的快速处理及节约系统资源和提高效率,同时能增加系统功能的开放性和可扩充性。

如前所述,植物生长时发生的形态结构(植株拓扑结构与器官形态结构)随其发育进程而变化,而根据前面的模型耦合过程得知,植物生长是在各类影响因子(如遗传及外部环境因子)共同作用下不断递进的动态过程。为此,根据植物学特性及其形态结构变化规律,可以采用信息可视化方法构建

反映植株-环境交互作用的虚拟植物动态模型,其构建流程如图 3 所示。

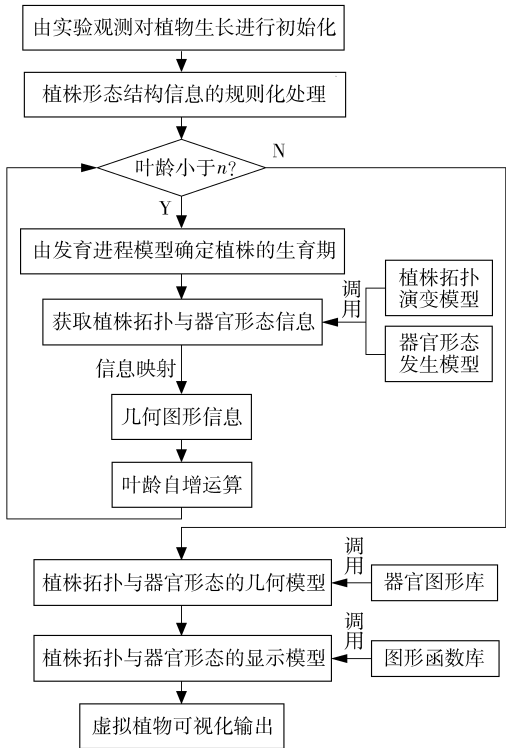


图 3 虚拟植物动态模型构建流程图

Fig. 3 Construction of virtual plant model

从图 3 中可知,为了获取植株拓扑与器官形态信息,可以利用前述的生长单元类和器官类分别进行类对象的声明,即通过调用植株拓扑演变模型与器官形态发生模型获得不同生育期的相关信息,再通过点、线、面等几何信息构造即信息映射方法将植株拓扑与器官形态信息转换为相应生育阶段的几何图形信息。

当植物生育期达到一定阶段后,将不同阶段的几何图形信息进行组合,并调用器官图形库,便可建立植株拓扑与器官形态的几何模型,在此基础上通过调用图形函数库便可建立植株拓扑与器官形态的显示模型,最后在计算机终端进行可视化输出。

5 检验与分析

除保证水肥正常供给外,本文利用温室环境的可控性,使植株各生育阶段的逐日平均温度、逐日平均光照长度等均保持在有利于作物正常生长所需的环境条件下。实验从定植后的幼苗开始直到植株成熟,并以茎秆生长为目标对相关模型进行检验。运用常见的模拟值与观测值之间的根均方差(Root mean square error, RMSE)对上述模型模拟值和实验观测值之间的符合性进行统计分析,

若 RMSE 值越小,则模拟值与观测值的一致性越好,表明模型的预测效果越准确。根均方差的计算公式为

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}{n}}$$

(16)

式中 s_i ——模型模拟值 o_i ——实验观测值
 n ——样本容量 i ——样本序号

同时,利用模拟值与观测值之间 1:1 关系图得到的 r^2 和均方根误差来说明模型的拟合度和可靠性。

利用秋季实验数据对模型进行验证。如图 4 ~ 9 所示,依次为植株株高、茎秆发育速率、出叶数、坐果数、单叶面积和单果质量的模拟值与观测值的比较。由各项指标的观测值与模拟值的相关图得知,株高、茎秆发育速率、出叶数、坐果数、单叶面积和单果质量的模拟结果与 1:1 直线之间的 r^2 和均方根误差分别为 0.958 与 0.224、0.952 与 0.241、0.957 与 0.226、0.954 与 0.236、0.955 与 0.229、0.953 与 0.239。从实验结果得知,运用本文方法得到的模型拟合度均达到 95% 以上,表明模型模拟结果与实验观测值基本一致,与传统建模方法相比,该模型具有较好的可靠性和准确性。

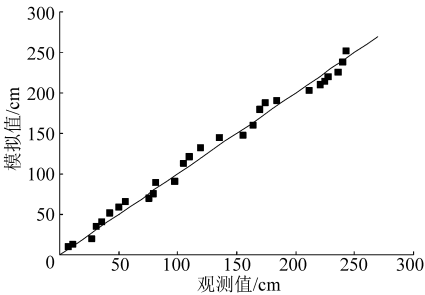


图 4 株高观测值和模拟值的相关图

Fig. 4 Correlation of observation value and simulation value of plant height

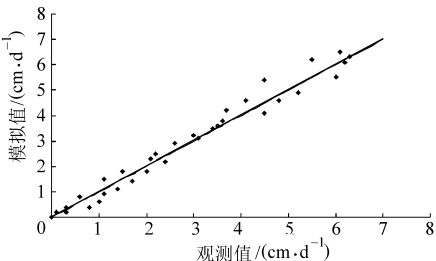


图 5 茎秆发育速率观测值和模拟值的相关图

Fig. 5 Correlation of observation value and simulation value of plant development rate

为了实现对黄瓜植株生长过程的虚拟仿真,以 Visual C + + 6.0 为开发平台,利用开放式图形程序库(OpenGL)提供的核心函数库与实用库函数,设计

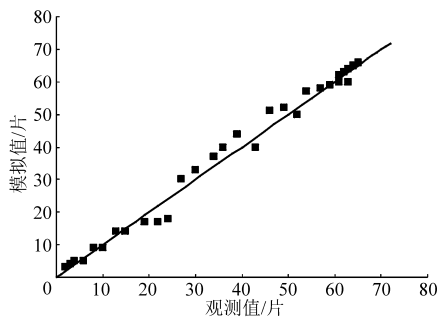


图 6 出叶数观测值和模拟值的相关图

Fig. 6 Correlation of observation value and simulation value of leaf appearance number

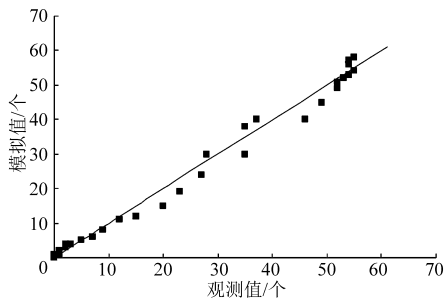


图 7 坐果数观测值和模拟值的相关图

Fig. 7 Correlation of observation value and simulation value of fruit setting number

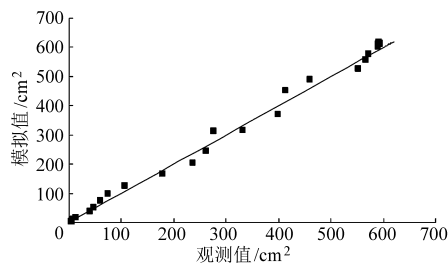


图 8 单叶面积观测值和模拟值的相关图

Fig. 8 Correlation of observation value and simulation value of single leaf area

交互式仿真系统并实现对出叶方式、叶与茎的夹角、果实形状等有关植株形态及各器官的几何参数进行修改,而温度、光照强度等温室环境因子通过实验数据与加载环境因子文件得到。根据所构建的虚拟植物动态模型对适宜环境下的黄瓜植株生长过程进行仿真。图 10 为黄瓜植株在不同生育阶段的生长发育状况。

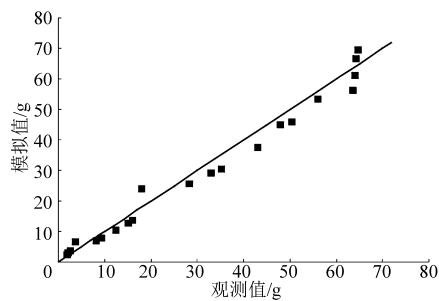


图 9 单果质量观测值和模拟值的相关图

Fig. 9 Correlation of observation value and simulation value of single fruit weight



图 10 植株不同生育阶段的虚拟生长过程

Fig. 10 Virtual plant growth in different stages

6 结束语

依据植物与环境之间的相互作用关系,利用温室环境可控性,通过探究植株与环境之间的信息传递过程建立了植株-环境的信息响应模型和信息反馈模型,并根据植株生长的系统变化过程对相关模型进行了有机耦合。为了在计算机上直观地对植株-环境交互作用下的温室植物生长过程进行重现,在对植株拓扑演变与器官形态发生信息进行规则化描述基础上,运用定量化处理方法与面向对象技术建立了植株拓扑演变模型与器官形态发生模型,并采用信息可视化方法构建了虚拟植物动态模型。最后,以温室黄瓜植株生长为实验对象,从定植后的幼苗开始直到植株成熟,并以茎秆生长为目标对相关模型进行了检验。实验结果反映了模型模拟结果与实验观测值基本一致,表明模型在对温室植物生长发育预测方面具有较好的可行性和有效性。

参 考 文 献

- 1 杨其长,魏灵玲,刘文科,等. 中国设施农业研究现状及发展战略[J]. 中国农业信息,2012(11):22-27.
Yang Qichang, Wei Lingling, Liu Wenke, et al. Research and development strategy of facility agriculture in China[J]. China Agriculture Information, 2012(11):22-27. (in Chinese)
- 2 Seginer I, Hwang Y, Boulard T, et al. Mimicking an expert greenhouse grower with a neural-net policy[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(1):299-306.
- 3 Sigrimis N A, Arvanitis K G, Pasgianos G D. Synergism of high and low level systems for the efficient management of greenhouses [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000,29:21-39.
- 4 van Straten G, Challa H, Buwalda F. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate[J]. Computers and Electronics

- in Agriculture, 2000,26:221–238.
- 5 Bamsey M, Berinstain A, Graham T, et al. Developing strategies for automated remote plant production systems: environmental control and monitoring of the Arthur Clarke Mars Greenhouse in the Canadian High Arctic[J]. Advances in Space Research, 2009, 44(12):1367–1381.
- 6 Fitz Rodríguez Efrén, Kubota Chieri, Giacomelli Gene A, et al. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: a web-based application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(1):105–116.
- 7 Park Dae Heon, Kang Beom Jin, Cho Kyung Ryong, et al. A study on greenhouse automatic control system based on wireless sensor network[J]. Wireless Personal Communications, 2011, 56(1):117–130.
- 8 丁为民,汪小岳,李毅念,等. 温室环境控制与温室模拟模型研究现状分析[J]. 农业机械学报,2009,40(5):162–168.
Ding Weimin, Wang Xiaochan, Li Yinian, et al. Review on environmental control and simulation models for greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):162–168. (in Chinese)
- 9 李萍萍,夏志军,胡永光,等. 温室黄瓜环境管理智能决策支持系统初探[J]. 江苏大学学报,2004,25(1):5–8.
Li Pingping, Xia Zhijun, Hu Yongguang, et al. Preliminary study on intelligent decision support system for cucumber environment management in greenhouse[J]. Journal of Jiangsu University,2004,25(1):5–8. (in Chinese)
- 10 吴帆,毛罕平,张金秀,等. 可控环境下黄瓜光合特性及环境调控参数的优化[J]. 农机化研究,2009,31(10):156–158.
- 11 Liu Xiwei, Masaru Noda, Hirokazu Nishitani. Evaluation of plant alarm systems by behavior simulation using a virtual subject[J]. Computers & Chemical Engineering, 2010, 34(3):374–386.
- 12 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.
- 13 施干卫,范菁,董天阳. 基于环境敏感的植物动态生长模型研究[J]. 计算机应用研究,2007,24(3):223–225.
Shi Ganwei, Fan Jing, Dong Tianyang. Research on model of plant development based on environment sensitivity[J]. Application Research of Computers, 2007,24(3):223–225. (in Chinese)
- 14 唐卫东,李金忠,刘昌鑫,等. 虚拟植物模型及其构建方法研究综述[J]. 计算机应用研究,2012,29(9):3206–3211.
Tang Weidong, Li Jinzhong, Liu Changxin, et al. Review of study on construction method for virtual plant model[J]. Application Research of Computers, 2012,29(9):3206–3211. (in Chinese)
- 15 唐卫东,朱平,郭晨,等. 温室植物生长数字化模型构建技术[J]. 农业机械学报,2010,41(1):159–162,166.
Tang Weidong, Zhu Ping, Guo Chen, et al. Digital construction of plant growth model in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(1):159–162,166. (in Chinese)
- 16 唐卫东,李萍萍,卢章平,等. 现代温室黄瓜发育动态模型研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(21):6421–6422.
Tang Weidong, Li Pingping, Lu Zhangping, et al. Study on the development dynamic model of cucumber in modern greenhouse[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007,35(21):6421–6422. (in Chinese)
- 17 冯利平,高亮之. 一个作物发育动态理论模型[J]. 中国农业大学学报,1999,4(增刊):16–19.
Feng Liping, Gao Liangzhi. A general crop phenological theory model[J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(Supp.):16–19. (in Chinese)

Virtual Growth Model of Cucumber in Greenhouse Based on Interaction between Plant and Environment

Tang Weidong¹ Liu Huan¹ Liu Dongsheng¹ Hu Xuehua² Li Pingping³ Lu Zhangping⁴

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

2. School of Life Sciences, Jinggangshan University, Ji'an 343009, China

3. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 4. Institute of Graphics Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: It is important to construct virtual plant model based on the interaction between plant and environment for greenhouse environment control. Taking the greenhouse cucumber growth as an example, it would obtain plant-environment interaction information with data pre-processing and association analysis method. According to the crop development theory model, the information response model as well as information feedback model could be established. Moreover, the models could be coupled with the plant development process. The plant topological model and organ morphological model would be founded using regularization method and object-oriented technology, and the virtual plant model could be constructed. The experimental verification results indicated that the goodness of fit of models could be up to 95%, and improved that the presented method was effective in simulating the plant development under the interaction of environment, which also provided valuable evidences for dynamical control and prediction of greenhouse environment conditions fitting to plant growth.

Key words: Greenhouse Cucumber Model coupling Object-oriented technology Virtual plant