

王纪章, 周 静, 李萍萍. 基于 Agent 的温室作物生长过程模拟系统[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(3): 557-562.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.03.011

## 基于 Agent 的温室作物生长过程模拟系统

王纪章, 周 静, 李萍萍

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 针对目前温室作物生长模型重用性和共享性差的问题, 建立了基于 Agent 的温室作物生长模拟系统, 分析了模型集成的模型 Agent、管理 Agent、通信传输系统和模型目录服务器的结构和功能, 建立了基于 XML 的温室作物生长模拟 Agent、目录服务器和 Agent 间通信表示方法, 采用程序-逻辑混合 (PLM) 方法实现模型表示。以 JADE 平台为基础, 开发了温室作物生长模拟系统软件。以黄瓜生长模型进行了系统测试, 结果表明本系统所建立的温室黄瓜生长模型能实现温室黄瓜生长的模拟。

**关键词:** 温室; 生长模型; 黄瓜; Agent

**中图分类号:** S126      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2016)03-0557-06

## Crop growth simulation model for greenhouse crops based on Agent

WANG Ji-zhang, ZHOU Jing, LI Ping-ping

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education/Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** To find a solution to poor generality and reusability of crop growth model, the framework of greenhouse crop growth simulation model was established based on Agent. The structure and function of model Agent, management Agent, communication Agent, and communication transport system and model catalog service agent were analyzed. Based on XML, the communication between Agent and catalog service system was achieved. And the model was described based on program logic mixed (PLM) method. Based on JADE platform, the software for greenhouse crop growth simulation model was developed. The system could realize the simulation of cucumber growth.

**Key words:** greenhouse; growth model; cucumber; Agent

上世纪 80 年代中期, 在大田作物生长发育模拟模型研究日趋完善和成熟的基础上, 国内外开始把生长发育模拟模型工具应用于温室蔬菜作物研究, 并取得了很大进步<sup>[1]</sup>。经过几十年温室作物模型

的研究, 积累了大量作物模型和算法, 但这些研究成果分散在各研究单位<sup>[2-13]</sup>。虽然目前已经建立了相应软件平台, 如 TOMGRO 系统<sup>[2]</sup>、HORTISIM 系统<sup>[3]</sup>、TOMSIM<sup>[4]</sup>系统等, 但是这些系统中模型形式较固定。

已有通用作物模型模拟框架以作物生理生态过程为基础, 结合作物分类法和面向对象的建模方法构建系统, 且系统能实现作物生长模拟<sup>[14-16]</sup>。但是, 此类系统对模拟的作物生理生态过程依赖性较大, 模型共享和可重用性受到限制, 模型开发人员必须熟悉整个模型建模过程才能使用。本研究基于多 Agent 方法建立作物模拟模型, 以实现模型库的集

收稿日期: 2015-12-01

基金项目: 中国博士后基金项目 (2015M580400); 江苏省博士后基金项目 (1501112B); 江苏大学高级人才启动基金项目 (14JDG188); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (苏政办发[2014]37 号)

作者简介: 王纪章 (1981-), 男, 江苏靖江人, 博士, 副研究员, 主要从事设施农业信息技术研究, (E-mail) whxh@ujs.edu.cn.

成与重用功能,并开发温室作物模拟模型库系统通用平台,为建立温室环境调控决策支持系统提供模型库系统,同时也为实现温室作物-环境系统的数字模拟和数字化设计提供技术平台。

## 1 系统基本结构

图 1 为基于 Agent 的作物模型库系统框架,系统包括数据层、模型集成层和访问层。数据层是模型库的基础,主要是用于数据、文档、程序代码等数据的存储和管理,通过 Wrapper Agent 与模型集成层建立数据接口。模型集成层是模型库系统的核心,其架构是基于 FIPA 标准<sup>[17]</sup>的模型集成,包括模型 Agent、管理 Agent、通信传输系统和目录服务器。访问层是模型库系统与用户的接口,用户通过访问 Agent 对模型库系统进行访问。

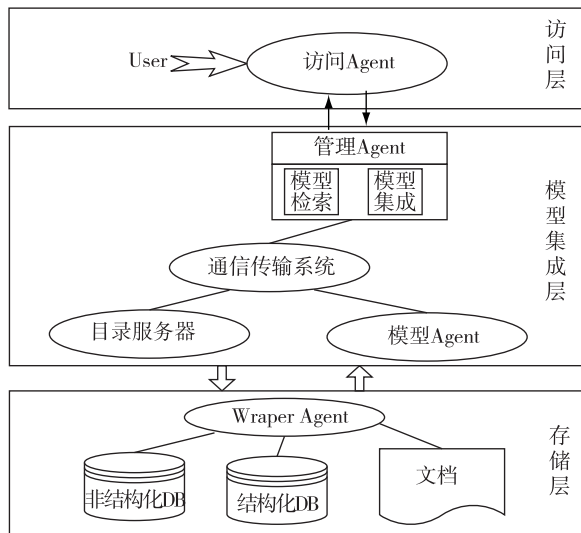


图 1 基于多 Agent 的作物模型库系统框架

Fig.1 The frame of crop simulation model based on Agent

## 2 基于 XML 的温室作物生长模拟 Agent 表示

### 2.1 基于程序-逻辑混合的模型 Agent 表示

模型的程序-逻辑混合 (Program-logic mixed, PLM) 方法是结合模型常用的程序表示法和逻辑表示法的优点,使模型具有与问题求解程序紧密耦合,且具有较强逻辑推理和重用功能的一种模型表示方法<sup>[18]</sup>。在基于 PLM 的模型表示方法中,包括程序和逻辑两部分,程序部分采用模型公共接口实现对不同编程语言的模型的重用,模型公共接口类包括

设定参数 (setParameters)、执行程序 (executeModel)、获取结果 (getResult) 等方法,系统通过模型公共接口对模型进行添加、修改、删除等操作。逻辑部分采用模型配置文档表示,采用基于 XML 描述,包括模型的名称、属性、输入输出参数、模型类及位置等。具体定义如表 1 所示。

表 1 模型描述的配置文件

Table 1 Configuration document of the model

```
<Model_Agent>
  <Ma_ID></Ma_ID>
  <Ma_Attribute>
    <Ma_Name> </ Ma_Name> ' 模型名称
    <Ma_Category> </ Ma_Category> ' 模型类别
    <Ma_Comment> </ Ma_Comment> ' 模型注解
    .....
  </ Ma_Attribute>
  <Ma_Belief> ' 模型参数
  <Input Parameters> ' 输入参数
    <Parameters1> .....</Parameters1>
    <Parameters2> .....</Parameters2>
    .....
  </Input Parameters>
  <Output Parameters1> ' 输出参数
  <Parameters1> .....</Parameters1>
  <Parameters2> .....</Parameters2>
  .....
  </OUTput Parameters>
  </Ma_Belief>
  <Ma_Desire>
  </Ma_Desire>
  <Ma_Intention> ' 模型实现
    <Path> </ Path> ' 路径
    <Class Name> </ Class Name> ' 类名称
    <Path></Path>
  </Ma_Intention>
  <Ma_State></ Ma_State>
</Model Document>
```

### 2.2 基于 XML 模型目录描述

在构建作物模型时,一般包括多个子模型,而各子模型之间存在参数和数据的相互联系,同时模型中需要有前置模型来获取相关信息,如干物质积累模型中需要光合作用和呼吸作用模型才能进行构建,而干物质分配模型又需要有干物质积累模型作为前置模型。本系统采用基于 XML 的树形结构描述和查询功能实现模型模拟过程的构建。表 2 为基于 XML 的目录服务器描述的基本结构。

### 2.3 基于 XML 的 Agent 通信协议描述

为适应基于 Agent 的分布式模型库系统的要求,同时提高系统中的开发效率,考虑 XML 语言具有平台无关性,并已在 WEB 服务中被广泛使用,本系统中采用 XML 语言实现 Agent 通信协议描述。

当 Agent 需要进行通信时,利用 XML 将所要发送的消息内容通过 ACL 消息规则封装为消息的有效负载(表 3),并加入到消息的传输队列中<sup>[19-20]</sup>。在 Agent 通信过程中,消息负载将所建立的 XML 转化为字节流,并通过通信系统进行传输,当接收 Agent 收到消息后将字节流根据解码规则进行解码,并根据 XML 规则解析为 Agent 消息。

表 2 模型目录的 XML 描述文档

Table 2 Document of model catalog based on XML

<Model_Catalog>
<MC_ID></MC_ID>
<MC_Attribute>
<MC_Name> </ MC_Name> '模型目录名称
<MC_ID> </ MC_ID> '模型目录编号
<MC_Comment> </ MC_Comment> '模型目录注解
.....
</MC_Attribute>
< MC_SUB> '子模型目录
< SubModel1> '子模型 1
<Model_ID>.....</ Model_ID>
<Model_Name>.....</ Model_Name>
.....
</SubModel1>
<SubModel2> '子模型 2
<Model_ID>.....</ Model_ID>
<Model_Name>.....</ Model_Name>
.....
</SubModel2>
.....
<Output Parameters1> '输出参数
<Parameters1>.....<Parameters1>
<Parameters2>.....<Parameters2>
.....
</MC_SUB>
</Model_Catalog>

### 3 模型求解过程

图 2 为模型的求解过程,当收到模型集成的问题目标时,通过管理 Agent 访问模型目录服务器,查询是否存在直接求解模型。如果存在直接求解模型,直接将求解任务发送给模型 Agent,并通过模型 Agent 加载模型计算程序进行程序计算,并向访问 Agent 发送计算结果,并通过人机接口供用户使用。如果不存在直接求解模型,则将模型分解为子问题,并通过各子问题合作将问题目标解决结果发送给访问 Agent。如果子问题也无法求解,则将问题进一步分解,如系统中没有相关解决方案,系统确认是否有新建模型,若有新模型输入则输入新模型,返回加载计算单元进行模型计算,如没有新建模型,则输出失败信息。

表 3 FIPA-ACL 消息的 XML 表示

Table 3 The messages of FIPA-ACL based on XML

<Fipa_message>
<Inform></Inform> '消息结构
<Sender> '发送 Agent
<Agent_identifier>
<Name></Name> 'Agent 名称
<Address> 'Agent 地址
<URL>...</URL>
<Port>...</Port>
</Address>
...
</Agent_identifier>
</Sender>
<Receiver> '接收 Agent
<Agent_identifier>
<Name></Name> 'Agent 名称
<Address> 'Agent 地址
<URL>...</URL>
<Port>...</Port>
</Address>
...
</Agent_identifier>
</Receiver>
<Content>...</Content> '消息内容
<Reply_with> '消息结果反馈的 Agent
<Agent_identifier>
<Name></Name> 'Agent 名称
<Address> 'Agent 地址
<URL>...</URL>
<Port>...</Port>
</Address>
...
</Agent_identifier>
</Reply_with>
<Ontology> '消息参数描述
<DataTypeProperty>
<Object_Property></Object_Property> '对象属性
<Class> '类描述
<RdfID>...</RdfID>
<SubClassof>...</SubClassof>
...
</Class>
<Relation></Relation> '本体相互关系
</DataTypeProperty>
</Ontology>
</ Fipa_message>

## 4 基于 JADE 的温室黄瓜生长模拟系统软件开发

### 4.1 软件开发环境

系统的软件开发平台主要包括:

- (1) 操作系统:采用微软 Windows 2003 Server;
- (2) Java 运行平台:采用 JDK 1.7;
- (3) WEB 服务器:采用 Apache Tomcat 7.0.27.0;
- (4) 数据库平台:MySQL 5.6;
- (5) Java 开发平台:采用 Netbeans 7.2;
- (6) Agent 开发平台:采用 JADE 4.2(Java Agent Development Framework) 平台, JADE 是一个完全由

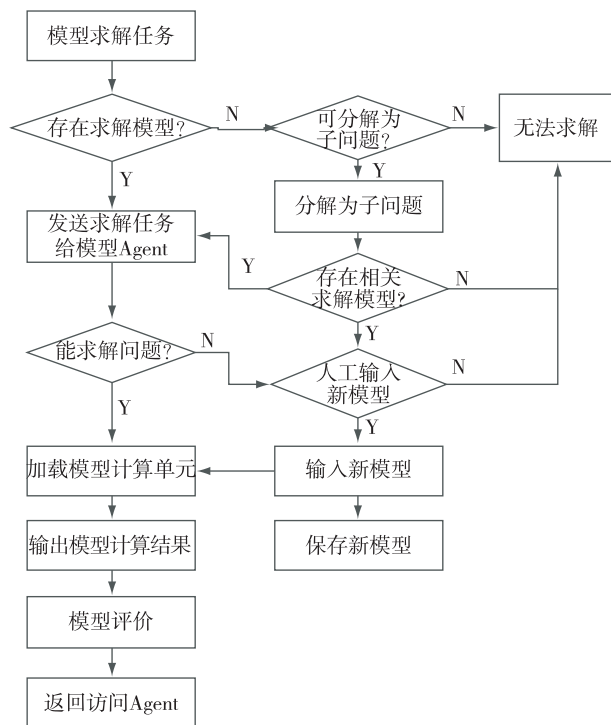


图2 模型求解过程

Fig.2 Solving process of the model

Java 语言开发的一个软件框架,并且符合 FIPA 规范<sup>[21-22]</sup>。

## 4.2 系统结构

图3为所建立的基于Agent的温室作物生长模拟模型库系统(Greenhouse crop simulation model base system, GCSMB),主要包括作物管理模块、模型管理模块、项目管理模块和用户管理模块。

作物管理模块:主要是对所建立的模型作物类别和特性进行管理,包括作物的类别、生长过程的描述等。

模型管理模块:主要是对各模型进行管理,包括模型的作物类别、模型的参数、模型描述文档、模型的程序、模型目录库等。

项目管理模块:主要是实现模型的检索和集成,包括作物类别、模拟过程的定义、项目描述文档等。

用户管理模块:主要是对不同类型的用户管理,包括建模用户、项目管理用户和普通用户的管理。

## 5 系统应用实例

### 5.1 模型管理实例

模型管理过程包括模型的新建、管理和删除等

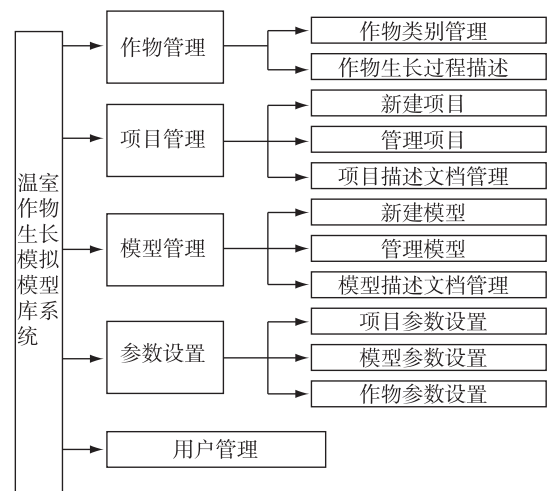


图3 温室作物生长模拟模型库系统架构

Fig.3 System architecture of greenhouse crop simulation model base

过程。通过新建模型建立新模型,定义模型的名称和路径,并保存至模型的目录中。通过图4可以实现模型的浏览和编辑。



图4 模型管理

Fig.4 Model management

### 5.2 建模项目实例

为实现建模项目测试,以温室黄瓜生长过程为例,在目录服务器中定义了基于生理过程的温室黄瓜生长过程模拟目录,用户通过与系统交互,选择相应的模型,并构建成温室作物生长过程模型库系统。基于作物生理过程的温室黄瓜生长发育过程模拟模型包括光合作用模型、生长发育进程模型、干物质积累模型、干物质分配模型和器官生长模型,其中器官生长模型包括根、茎、叶和果实的生长模拟模型<sup>[23]</sup>。

图5为新建项目页面,通过在界面中选择模拟的作物,并定义项目名称和项目ID,系统将建立新项目描述的XML文件,并调用模型库查询适合所选



择作物的模拟过程描述,并显示相应的模型名称。用户可以通过查看模型的详细内容。用户通过选择相应的模拟过程,即可生成整个项目,并保存至项目描述 XML 文件,供模拟项目调用。



图 5 新建模拟项目

Fig.5 New project

### 5.3 作物生长模拟建模测试

为测试作物生长模拟模型的预测结果,在镇江市瑞京农业科技示范园现代化 Venlo 玻璃温室内进行黄瓜栽培试验。播期为 2 月中旬。该温室冬季采用煤炉和保温幕的方式供暖,夏季采用湿帘风机和高压喷雾降温,黄瓜生长后期考虑成本停止加热或

降温措施。栽培方式采用袋栽,袋内为珍珠岩和蛭石 3:2 配比的基质。袋子为枕头式,每袋种植 4 株水果黄瓜,株行间距均匀,植株栽培密度为  $1 \text{ m}^2$  2.5 株。

在整个生育期内每隔 7 d 左右进行破坏性取样,每次取长势均匀一致的 3 株黄瓜,将根、主茎、叶柄、叶、花果各部分分解,分别测定各部分鲜质量,然后在烤箱中  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  杀青 20 min 后,继续在  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下烘至恒质量,分别称量各个部分的干质量(精确到  $0.01 \text{ g}$ )。每株黄瓜每次果实成熟采收后都分别称质量,并记录采收日期。在各个时期采收的黄瓜果实中,选取大小不同的果实称鲜质量,然后在烘箱中  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  杀青 20 min,  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$  烘至恒质量,之后称量干质量(精确到  $0.01 \text{ g}$ ),计算干物质含量。

以温室黄瓜干物质积累与分配为例进行模型测试。根据用户对干物质积累和分配模型需求,测试模型输入参数为有效积温,输出参数为干物质积累量、地上和地下部分分配量。根据模型的输入和输出参数,系统选择干物质积累模型和干物质分配模型进行模拟,模拟结果见表 4。从表 4 中可以看出通过本系统所建立的温室黄瓜生长模型能实现温室作物生长的模拟。

表 4 黄瓜生长发育过程模拟结果

Table 4 Simulated results of greenhouse cucumber growth

日期	有效积温 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )	单株干物质积累量(g)			单株地上部分干物质分配量(g)			单株地下部分干物质分配量(g)		
		模拟值	实测值	误差	模拟值	实测值	误差	模拟值	实测值	误差
2月25日	73	0.129	0.217	-0.088	0.128	0.172	-0.044	0.001	0.045	-0.044
3月10日	151	0.223	0.390	-0.167	0.221	0.320	-0.099	0.002	0.071	-0.069
3月25日	367	1.007	0.583	0.424	0.997	0.496	0.501	0.009	0.086	-0.077
4月9日	482	2.235	8.913	-6.678	2.214	8.472	-6.258	0.021	0.441	-0.420
4月22日	806	17.932	17.648	0.284	17.542	16.998	0.544	0.391	0.650	-0.259
5月6日	940	35.124	36.323	-1.199	34.142	34.960	-0.818	0.982	1.363	-0.381
5月22日	1 165	68.616	56.200	12.416	66.671	54.682	11.989	1.945	1.518	0.427
5月28日	1 258	77.818	68.208	9.610	75.612	66.187	9.425	2.206	2.021	0.185
6月12日	1 663	90.220	91.107	-0.887	88.014	88.977	-0.963	2.206	2.130	0.076

## 6 结论

为实现对模型的共享和重用性,提出了基于多 Agent 的温室作物生长模拟模型库系统。主要包括:

(1) 根据温室作物生长模拟模型库系统的需求,建立了基于多 Agent 的温室作物生长模拟模型库系统体系,将作物模拟模型库系统分为访问层、模型集成层和存储层,并对系统功能进行了分析。

(2) 对模型 Agent、模型管理 Agent、用户访问 A-

gent、模型目录服务器和通信服务器的功能进行了详细设计。针对模型表示的特点,提出了基于程序-逻辑混合(PLM)结构的模型表示方法,提高了模型库系统的跨平台兼容性。建立了基于XML的模型目录和通信协议描述方法。

(3)基于JADE平台开发了温室作物生长模拟模型库系统,系统能实现对模型的管理、集成和调用,并采用温室黄瓜生长发育过程模型对系统进行了测试,结果表明该系统能实现所设计功能。

### 参考文献:

- [1] 李永秀,罗卫红. 温室蔬菜生长发育模型研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 307-312.
- [2] JONES J W, DAYAN E, ALLEN L H, et al. A dynamic tomato growth yield model (TOMGRO) [J]. Transaction of the ASAE, 1991, 34(2): 663-672.
- [3] GIJZEN H, HEUVELINK E, CHALLA H, et al. HORTISIM: A model for greenhouse crops and greenhouse climate[J]. Acta Horticulture, 1998, 456: 441-450.
- [4] HEUVELINK E. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development[J]. Annals of Botany, 1999, 83(4): 413-422.
- [5] MARCELIS L F M, Elings A, Bakker M J, et al. Modelling dry matter production and partitioning in sweet pepper[C]// Stanghellini C, Heuvelink E, Marcelis L F M, et al. III International symposium on models for plant growth, environmental control and farm management in protected cultivation. Wageningen, Netherlands; ISHS Acta Horticulturae, 2006: 121-128.
- [6] MARCELIS L F M, ELINGS A, DE VISSER P H B, et al. Simulating growth and development of tomato crop[C]// Romano A. International Symposium on Tomato in the Tropics. Faro, Portugal; ISHS Acta Horticulturae, 2008: 101-110.
- [7] WIECHERS D, KAHLEN K, STÜTZEL H. Dry matter partitioning models for the simulation of individual fruit growth in greenhouse cucumber canopies [J]. Annals of Botany, 2011, 108(6): 1075-1084.
- [8] 李娟,郭世荣,罗卫红. 温室黄瓜光合生产与干物质积累模拟模型[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 241-244.
- [9] 李萍萍,王多辉,邓庆安. 温室生菜生长动态及生产潜力的模拟模型[J]. 生物数学学报, 1999, 14(1): 77-81.
- [10] 李萍萍,夏志军,胡永光. 利用 Delphi 开发温室黄瓜生长动态模拟系统[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2003, 24(4): 13-16.
- [11] 李萍萍,周静,王纪章,等. 温室黄瓜生育期预测的正弦指数模型[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 325-329.
- [12] 周静,王纪章,李萍萍,等. 温室水果黄瓜叶片扩展及干物质再分配动态模拟模型[J]. 北方园艺, 2011(12): 10-13.
- [13] 李青林,毛罕平,李萍萍. 黄瓜地上部分形态-光温响应模拟模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 122-127.
- [14] 姜海燕,朱艳,徐焕良,等. 作物模型资源构造平台(CMRCP)的构建研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 170-175.
- [15] 姜海燕,朱艳,汤亮,等. 基于本体的作物系统模拟框架构建研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1207-1214.
- [16] 王纪章,李萍萍,吴燕明. 基于WEB的作物模型库系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 178-182.
- [17] 宋旭东,方向明,刘晓冰. 基于 FIPA-Agent 的 DSS 模型库的研究[J]. 微计算机信息, 2008(5): 251-253.
- [18] 蔡树彬,明仲,李师贤,等. 基于本体的模型集成[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 713-719.
- [19] 袁爱进,曹立明,王小平. 一种基于 FIPA ACL 和 XML 的 Agnet 通信语言[J]. 微型电脑应用, 2003, 19(7): 46-47.
- [20] 谢创丰,黄穗. 基于 JADE 平台的 MAS 通信协议封装研究与设计[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(21): 4988-4990.
- [21] 于卫红. 基于 JADE 平台的多 Agent 系统开发技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [22] FABIO B, GIOVANNI C, DOMINIC G. Developing multi-agent systems with JADE [M]. England: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [23] 周静. 温室水果黄瓜生长发育模拟模型研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.

(责任编辑:张震林)