

## 基于模型的温室加温控制目标优化系统研究

戴剑锋<sup>1</sup>, 罗卫红<sup>1\*</sup>, 乔晓军<sup>2</sup>, 王 成<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学农学院, 南京 210095; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

**摘 要:** 温室加温控制目标的设定合理与否, 直接影响温室作物生长及温室环境调控的能耗。本研究以温室作物生长模拟模型和温室加温能耗预测模型为基础, 建立了基于模型的温室加温控制目标计算机优化系统。系统包括一个数据库(温室、作物以及气象资料)和三个模型(作物生长模拟模型、温室加温能耗预测模型以及加温控制目标优化模型)。系统的输入主要为温室类型、温室结构、覆盖材料、作物信息以及室外气象资料, 系统输出主要为作物干物质生产量、温室加温能耗量以及干物质生产能耗量利用效率最高和生物量最高的温室白天和夜间的加温控制目标(温度设置点)。以 2003 年 1 月 20 日~2 月 20 日上海孙桥现代农业开发区 Venlo 型自控玻璃温室水果型黄瓜生产为实例进行分析, 结果表明, 在上海地区冬季进行温室水果型黄瓜生产时, 在开花至果实采收初期将白天和夜间加温控制目标分别设为 23℃ 和 17℃ 时可以获得最高的干物质生产量; 将白天和夜间的温室加温的温度分别设为 20℃ 和 15℃ 能够使黄瓜干物质生产的能耗量利用效率达最大, 并能够使黄瓜干物质产量也处于较高的水平。本研究建立的基于模型的温室加温控制目标优化系统为中国温室气候控制中温度的优化调控提供了理论依据和决策支持。

**关键词:** 作物生长模型; 能耗预测模型; 能量平衡; 干物质生产; 能耗量利用效率; 加温控制目标

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup> 1; S161.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2006)11-0187-05

戴剑锋, 罗卫红, 乔晓军, 等. 基于模型的温室加温控制目标优化系统研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 187-191.

Dai Jianfeng, Luo Weihong, Qiao Xiaojun, et al. Model-based decision support system for greenhouse heating temperature set point optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 187-191. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

温室环境调控的目的是在给温室作物提供适宜的生长环境、发挥其最大生产潜力的同时最大限度地节省资源。温室环境控制的关键之一是设定合理的控制目标。在众多温室环境控制目标中尤以温度控制目标的设定最重要。因为温室温度控制目标的设定合理与否直接影响温室作物生长发育和温室环境控制能耗, 从而影响温室生产的经济效益。由于作物生长模拟模型能够定量预测不同温室温度对作物生长速率和产量的影响, 温室能耗预测模型可以预测温室在不同温度控制目标下所需的能耗量, 因此两者成为优化温室温度控制目标的有力工具。

关于优化温室加温控制目标的研究国外已有一些报道。Seginer 等报道了温室生菜生产白天温度控制目标的优化方法<sup>[1]</sup>。Chalabi 等利用当地的气象预报资料和温室能耗预测模型, 以能耗最低为目标对温室温度的实时控制进行了优化<sup>[2]</sup>。Spanomitsios 综合考虑了节能和温室作物产量, 建立了适合地中海地区的塑料薄膜温室的温度控制目标优化模型<sup>[3]</sup>。Trigui 用模型对 Venlo 型温室的温度控制目标进行了优化研究<sup>[4]</sup>。Körner 将

温室控制模型 KASPRO 与温室环境控制目标生成模型 SPG(Set Point Generator)耦合, 研究了 Venlo 型玻璃温室的最优温度控制策略<sup>[5]</sup>。Tchamitchian 等报道了应用于番茄生产的基于知识库的决策支持系统 SERRISTE, 可以生成每日各项气候控制目标<sup>[6]</sup>。国外这些研究在理论方法上为研究中国温室环境调控的优化提供了参考。但已有的这些研究中所采用的模型参数主要是针对西欧国家或地中海地区的温室和气候特点确定的。由于中国的气候特点与西欧和地中海地区有显著差异, 这些研究结果尚不能直接应用于中国温室环境调控优化, 在将这些模型应用于中国温室环境控制目标的优化之前, 必须利用中国的试验资料对模型进行校正和检验。

中国针对温室温度控制目标优化的研究报道较少, 当前温室环境控制系统控制目标的设定主要由温室作物生产管理者凭经验自定, 或者以获得最高的作物生长量为原则来设定温室温度控制目标而忽略了温室生产的经济效益(温室的加温能耗)。控制效果难以达到最优<sup>[7,8]</sup>。而综合考虑温室运行能耗和作物生产两个方面来进行温室温度控制目标优化的研究在中国尚未见报道。本研究基于我们前期研究建立的温室作物生长模拟模型和温室冬季加温能耗预测模型, 建立了一个基于模型的温室加温控制目标计算机优化系统, 为中国温室环境控制的优化提供理论依据和决策支持。

## 1 系统结构与模型描述

### 1.1 系统结构与功能

系统结构功能如图 1 所示。系统由作物生长模型、温室加温能耗预测模型、温室加温控制目标优化模型以

收稿日期: 2005-02-22 修订日期: 2006-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(60073028); 国家“十·五”863 计划项目(2001AA247023)

作者简介: 戴剑锋(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事设施农业环境模拟与调控方面的研究。南京 南京农业大学农学院, 210095。

Email: daijf@njau.edu.cn

\*通讯作者: 罗卫红(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 南京 南京农业大学农学院, 210095。Email: lwh@njau.edu.cn

及数据库等部分组成<sup>[9-11]</sup>, 可以实现作物干物质生产量的预测、温室小气候预测、温室运行能耗量预测、温室加温控制目标优化以及系统维护和帮助等功能。

系统数据库包括温室参数(不同类型的温室几何结构参数以及覆盖材料的物理特性)、作物参数(作物生长三基点温度, 即作物生长的下限温度、上限温度和最适温度范围)以及室外气象数据。系统的输入主要包括温

室类型、覆盖材料以及几何结构参数, 温室加热系统功率和热效率, 作物种类、播期、种植密度和室外气象数据(温度、湿度、太阳辐射以及风速)。系统输出主要为温室小气候要素、作物干物质生产量、温室加温能耗量和不同温室作物生产目标(作物干物质生产消耗的能量利用效率最大、作物干物质生产量最高)下的温室加温最优控制目标。

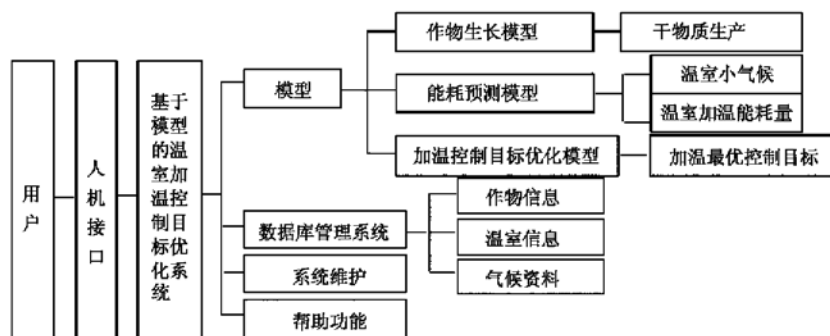


图1 系统结构与功能示意图

Fig. 1 Structure and function of the system

## 1.2 干物质生产模型

作物任意一天的总干物质生产量 Biomass ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) 可以由初始干物量与每日的干物质增长速率计算得到

$$B(i+1) = B(i) + \Delta W \quad (i = 1, 2, 3 \cdots) \quad (1)$$

$$\Delta W = (DTGA \times 30/44 - RM)/ASRQ \quad (2)$$

式中  $B(i+1)$  和  $B(i)$  —— 分别为第  $i+1$  天和第  $i$  天的总干物质生产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $\Delta W$  —— 每日干物质生产量增长速率,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ;  $DTGA$  —— 每日冠层的总光合量,  $\text{kg}(\text{CO}_2)/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ;  $ASRQ$  —— 每生产  $1 \text{ kg}$  干物质所需的葡萄糖 ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) 量, 取值为  $1.45 \text{ kg}(\text{CH}_2\text{O})/\text{kg}^{[12]}$ ;  $30/44$  —— 将  $\text{CO}_2$  转换成  $\text{CH}_2\text{O}$  的分子量的比值;  $RM$  —— 维持呼吸消耗量,  $\text{kg}(\text{CH}_2\text{O})/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。 $DTGA$  和  $RM$  的具体计算方法见文献[9]。

## 1.3 温室加温能耗预测模型

根据能量平衡原理, 温室加温所需要的能耗量计算公式<sup>[11]</sup> 为

$$q_h = (h_c A_s + \rho C_p G) \Delta T / A_g + q_s + q_{s,s} - (1-f) \tau S_o \quad (3)$$

式中  $q_h$  —— 温室加温所需能耗量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $h_c$  —— 温室覆盖材料的传热系数, 与温室覆盖材料特性和室外风速有关<sup>[13]</sup>,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $A_s$  和  $A_g$  —— 分别为温室表面积和温室内地表面积,  $\text{m}^2$ ;  $\rho$  —— 空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_p$  —— 空气的定压比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $G$  —— 温室通风量, 与温室结构类型, 室外风速, 通风窗面积及开度等因素有关<sup>[14]</sup>,  $\text{m}^3/\text{s}$ , 其计算方法见文献[10];  $\Delta T$  —— 温室内外气温差,  $\text{K}$ ;  $q_s$  —— 室内空气与土表的显热交换量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $q_{s,s}$  —— 温室土壤的横向传热,  $\text{W}/\text{m}^2$ , 具体计算可以参考文献[15];  $f$  —— 温室作物蒸腾以及土表

蒸发耗能占进入温室内部太阳辐射的比例, 无量纲;  $\tau$  —— 温室太阳辐射透过率, 与温室结构、覆盖材料、时间(太阳高度角和方位角)有关, 其具体计算方法参见文献[16];  $S_o$  —— 室外太阳总辐射,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $f \tau S_o$  为进入温室内的太阳辐射能( $\tau S_o$ )中用于作物蒸腾和土表蒸发所消耗的部分, 因其不影响温度的变化而被称为潜热, 因此,  $(1-f) \tau S_o$  为进入温室内的太阳辐射能中可以用于温室升温的部分。

室内空气与土表的显热交换量  $q_s$  可由下式求出<sup>[17]</sup>

$$q_s = \rho C_p \Delta T_s / r_a \quad (4)$$

式中  $\Delta T_s$  —— 温室内空气与土表的温度差,  $\text{K}$ ;  $r_a$  —— 土表的边界层空气动力学阻抗,  $\text{s}/\text{m}$ 。

$$f = (\lambda E + \lambda ET) / (\tau \times S_o) \quad (5)$$

式中  $\lambda$  —— 水的蒸发潜热,  $2.45 \times 10^6 \text{ J}/\text{kg}$ ;  $E$  —— 作物蒸腾速率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $ET$  —— 土表蒸发速率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\tau$  —— 温室太阳辐射透过率;  $S_o$  —— 室外太阳辐射,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。作物蒸腾速率  $\lambda E$  和土表蒸发速率  $\lambda ET$  可根据修正的 Penman-Monteith 方程, 在温室小气候模型部分计算获得<sup>[10]</sup>。

温室某个时段内的加温所需消耗的能量  $Q(\text{MJ}/\text{hm}^2)$  可以通过对  $q_h$  在这段时间内的积分得到

$$Q = \left( \int_{t_b}^{t_e} q_h dt \right) / 10^2 \quad (6)$$

式中  $t_b$ 、 $t_e$  和  $d_t$  —— 分别为加热的起始、结束时间以及积分时间步长,  $10^2$  为  $\text{J}/\text{m}^2$  转换为  $\text{MJ}/\text{hm}^2$  的单位转换系数。

## 1.4 加温控制目标优化模型

作物干物质生产消耗的能量利用效率  $EUE$  (Energy-consumption Use Efficiency,  $\text{kg}/\text{MJ}$ ), 即温室加温每消耗  $1 \text{ MJ}$  的能量作物所生产的生物量( $\text{kg}$ ), 可

由下式算得

$$EUE = B/Q \quad (7)$$

式中,  $B$  和  $Q$  可分别在干物质生产模型和温室加温能耗预测模型部分计算得到。

系统运行时, 根据系统数据库中作物的生长下限温度( $T_b$ ) 和最适生长上限温度( $T_{ou}$ ) 按公式(8)~(11) 自动生成一组“白天-夜间”加温实时控制目标组合“ $T_{set,d}(i) - T_{set,n}(j)$ ”。在日落前 1 h, 温室的温度控制目标开始由白天( $T_{set,d}$ ) 转为夜间( $T_{set,n}$ ) 时, 系统按照 2℃/h 的速率对  $T_{set}$  进行调整, 直至设定值达到  $T_{set,n}$ ; 同样, 在日出前 1 h, 当温室的温度控制目标开始由  $T_{set,n}$  转为  $T_{set,d}$  时, 系统按相同的速率对  $T_{set}$  进行调整, 直至设定值达到  $T_{set,d}$ 。

$$T_{set,d}(i) = Int(T_{b,d}) + i \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N_d) \quad (8)$$

$$N_d = Int(T_{ou,d}) - Int(T_{b,d}) + 1 \quad (9)$$

$$T_{set,n}(j) = Int(T_{b,n}) + j \quad (j = 0, 1, 2, \dots, N_n) \quad (10)$$

$$N_n = Int(T_{ou,n}) - Int(T_{b,n}) + 1 \quad (11)$$

式中  $T_{set,d}$  和  $T_{set,n}$ ——分别为白天和夜间温室温度实时控制目标;  $T_{ou,d}$ ,  $T_{b,d}$ ,  $T_{ou,n}$ ,  $T_{b,n}$ ——分别为作物白天最适生长上限温度、下限温度和夜间最适生长上限温度、下限温度;  $Int$ ——取整函数, 即取不大于其后的括弧中的数值的整数, 如  $Int(2.5) = 2$ 。然后, 系统分别根据公式(1)~(2) 和公式(3)~(6) 分别计算出与每一加温实时控制目标组合“ $T_{set,d}(i) - T_{set,n}(j)$ ”相对应的作物干物质生产量  $B(i,j)$  和温室加温所需的能耗量  $Q(i,j)$ 。

以作物生产能耗量利用效率最高为目的的最优控制目标为与

$$EUE = Max[(B(i,j)/Q(i,j)) \quad i = 0, 1, 2, \dots, N_d, j = 0, 1, 2, \dots, N_n] \quad (12)$$

相对应的“ $T_{set,d}(i) - T_{set,n}(j)$ ”组合。

以干物质生产量最高为目的的最优控制目标为与  $Max[(B(i,j)), i = 0, 1, 2, \dots, N_d, j = 0, 1, 2, \dots, N_n]$  相对应的“ $T_{set,d}(i) - T_{set,n}(j)$ ”组合。

## 2 系统实现与案例分析

### 2.1 系统的实现

系统在中文 Windows 2000 操作平台上开发, 采用多媒体软件设计输入输出和友好的人机界面, 通过菜单、对话框、图形等方式与用户进行交互, 用户可以按预定目标输入参数, 采用面向对象的程序设计语言 Visual Basic 6.0 完成, 其中的系统数据库采用 Microsoft Access 设计。系统各模块可以独立使用。系统可以在 Windows98 以上版本独立运行。

### 2.2 案例分析

以位于上海孙桥现代农业开发区(31.3°N, 121.4°E) 的 Venlo 型自控玻璃温室黄瓜生产为案例, 利用本研究建立的系统对 2003 年最冷的一个月(1月20日到2月20日) 进行模拟决策, 确定该时期温室白天和

夜间的最优加温控制目标。系统运行中, 夜间和白天的加温控制目标范围分别为 13~21℃和  $T_{set,n} - 25$ ℃。因白天温度控制目标设定值要不低于夜间温度控制目标设定值, 因此, 此处系统运行时, 白天的温度控制目标设定值的范围表示为  $T_{set,n} - 25$ ℃。

#### 1) 温室及作物基本情况

温室南北走向, 覆盖材料为 4 mm 厚浮法玻璃, 长 172 m, 54 跨, 每跨跨度 3.2 m, 也即宽 172.8 m。配屋顶通风窗, 每跨屋顶的东西两侧各有通风窗数目为 43, 每个通风窗长 2 m, 宽 0.9 m, 最大开度为 23 度, 温室肩高和脊高分别为 4 m 和 4.8 m。温室加温锅炉的功率为 5.6 MW, 供热效率为 0.85(厂家提供的数值)。温室地表覆盖塑料薄膜, 采用栽培槽栽种黄瓜 (*Cucumis Sativus* L. cv Printo), 栽培基质为珍珠岩, 采用营养液滴灌系统进行自动灌溉。黄瓜播期为 2002 年 12 月 5 日, 种植密度 2.8 株/m<sup>2</sup>, 模拟期间作物处于开花至采收初期, 叶面积指数 LAI 范围为 2.06~3.0。

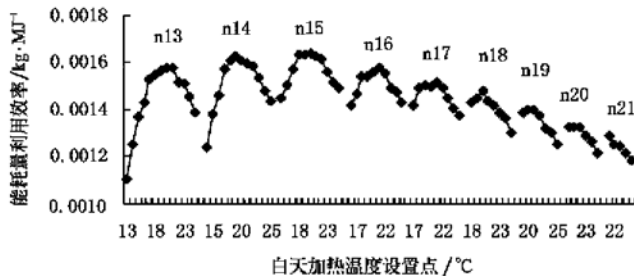
#### 2) 模型参数的确定

本实例中, 温室内地表面覆盖有塑料薄膜, 公式(3) 中的  $q_s$  和(5) 中的土表蒸散  $\lambda ET$  在本实例中可以忽略不计。土壤横向失热  $q_{s,s}$ , 与温室通过覆盖层的失热相比, 本文也忽略不计。针对 Venlo 型温室的能耗预测模型参数取值如下: 根据 Boulard 和 Draoui 的研究<sup>[14]</sup>, 自然通风中流量系数取 0.644, 综合风压系数取 0.09; 根据我们三个冬季温室内外太阳辐射的实际观测数据在本实例中对公式(3) 中温室太阳辐射透过率  $\tau$  取值为 0.6。针对黄瓜的作物生长模型参数取值如下<sup>[9]</sup>: 单叶最大光合速率取值 48 kg(CO<sub>2</sub>)/(hm<sup>2</sup>·h); 光能初始利用效率取值为 0.45 kg(CO<sub>2</sub>)/(hm<sup>2</sup>·h)/(W/m<sup>2</sup>); 作物冠层消光系数取值为 0.8; 呼吸作用的温度系数  $Q_{10}$  取值为 2。

#### 3) 案例分析结果

根据公式(1)~(12) 和确定的模型参数以及 2003 年 1 月 20 日至 2 月 20 日期间室外每小时气象资料, 运行该系统(积分时间步长为 2 min), 模拟计算出不同的加温控制目标下温室的加温能耗量以及作物干物质生产量与相应的能耗量利用效率, 结果如图 2 和图 3 所示。当夜间加温控制目标固定不变时, 温室黄瓜生产的能耗量利用效率  $EUE$  随着白天加温控制目标的增加而呈单峰型曲线变化(图 2)。比较不同的加温控制目标组合下  $EUE$  峰值发现, 当白天和夜间加温控制目标分别设为 20℃和 15℃时, 其  $EUE$  为所有加温控制目标组合中的最大值。系统推荐的此温度控制目标设定值与上海农科院经过 7 年生产经验摸索出的既保证黄瓜生产量又节能的加温控制目标(白天和夜间加温控制目标分别设为 21℃和 15℃) 基本一致。本系统对黄瓜干物质生产量的模拟预测结果表明, 将白天和夜间加温控制目标分别设为 23℃和 17℃时可以获得最高的干物质生产量(图 3), 这与荷兰温室公司推荐的加温控制目标(白天和夜间加温控制目标分别设为 23℃和 18℃) 是基本一致的。但将白天和夜间加温控制目标分别设为 23℃和

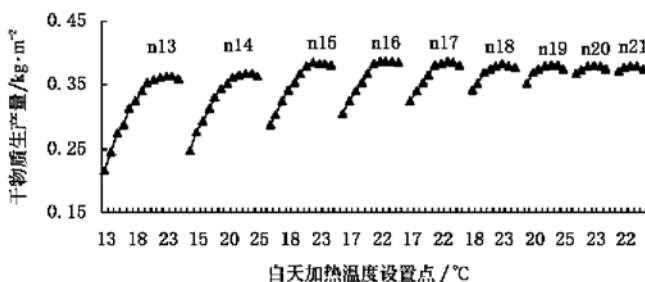
17℃时,干物质产量比白天和夜间加温控制目标分别设为 20℃和 15℃时仅高 5%,而能耗值却升高了 16%,相应的干物生产能耗量利用指数 *EUE* 降低了 13%。因此,在这段时期将白天和夜间的温室加温的温度分别设为 20℃和 15℃能够使黄瓜干物质生产的能耗量利用系数达最大,同时黄瓜干物质产量也能够处于较高水平。



注: n13, ..., n21 分别表示相应曲线的夜间加温控制目标为 13, ..., 21℃

图 2 模拟的不同白天和夜间加温控制目标下干物质生产能耗量利用效率

Fig. 2 Simulated biomass production energy use efficiency under different daytime and nighttime temperature set points for heating



注: n13, ..., n21 分别表示相应曲线的夜间加温控制目标为 13, ..., 21℃

图 3 模拟的不同白天和夜间加温控制目标下黄瓜干物生产量

Fig. 3 Simulated cucumber biomass production under different daytime and nighttime temperature set points for greenhouse heating

### 3 讨论与结论

产品价格等经济因素是进行温室生产温度优化控制中必须考虑的因素,在当前条件下,中国温室产品价格的变化无固定的规律可循,产品的价格预测具有一定的难度,因此,目前本系统没有将此因素考虑进去。本研究针对中国温室环境控制中加温温度控制目标设定只凭经验、难以达到最优的问题,建立了基于模型的温室加温控制目标计算机优化系统。案例分析结果表明,该系统优化的温室加温控制目标具有一定的可靠性。由于本研究采用的是基于温室环境物理过程的温室能耗预测模型和基于作物生理生态过程的作物生长模拟模型,其原理具有机理性和普适性,针对不同类型的温室和作物对模型参数进行调整后,系统便可以用于不同类型温室不同作物生产的温室加温控制目标优化,以克服传统的凭生产者的经验来设定加温控制目标所带

来的局限性。本研究建立的系统不仅为进一步研究和开发适合中国气候特点的温室温度优化自动控制系统奠定了基础,而且还可以与已有的温室温度自动控制系统配套使用,实现在线控制,从而优化温室的温度控制。同时本系统对温度控制目标的优化,可以给温室生产者提供决策支持,对于手动操作控制的温室同样具有指导意义。但本系统的实用性有待应用到实际生产中进行进一步的检验。

### [参 考 文 献]

- [1] Seginer I, Shina G, Albright L D, et al. Optimal temperature setpoints for greenhouse lettuce [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1991, 49: 209–226.
- [2] Chalabi Z S, Bailey B J, Wilkinson D J. A real-time optimal control algorithm for greenhouse heating [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1996, 15: 1–13.
- [3] Spanomitsios G K. Temperature control and energy conservation in a plastic greenhouse [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 80(3): 251–259.
- [4] Trigui M, Barrington S, Gauthier L. A strategy for greenhouse climate control, Part I: Model development [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 78(4): 407–413.
- [5] Körner O, Bakker M J, Heuvelink E. Daily temperature integration: a simulation study to quantify energy consumption [J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 87(3): 333–343.
- [6] Tchamitchian M, Martin-Clouaire R, Lagier J, et al. SERRISTE: A daily set point determination software for glasshouse tomato production [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006, 50: 25–47.
- [7] 高 强, 王贺辉, 韩淑敏. 温室环境智能控制系统的研究 [J]. *节水灌溉*, 2005, 4: 31–33.
- [8] 邓璐娟, 张佩渝, 龚幼民, 等. 温室环境多级控制系统及优化目标值设定的初步研究 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(5): 119–122.
- [9] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 用辐射积法模拟温室黄瓜叶面积、光合速率与干物质产量 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21: 131–136.
- [10] 戴剑锋, 罗卫红, 徐国彬, 等. 长江中下游地区 Venlo 型温室温湿度以及黄瓜蒸腾模拟研究 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(5): 107–112.
- [11] 戴剑锋, 罗卫红, 李永秀, 等. 基于小气候模型的温室能耗预测系统研究 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39(11): 2313–2318.
- [12] Gijzen H. Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops [M]. Amsterdam: Simulation Report CABO-TT 28, 1992: 1–22.
- [13] Bailey B, Cotton R F. Glasshouse thermal screen: influence of single and double screens on heat loss and crop environment [M]. NJAE Dep note DN/G/821, 1980, 15pp.
- [14] Boulard T, Draoui B. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: Measurements and data

- analysis [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1995, 61: 27–36.
- [15] 周长吉, 杨振声, 冯广和. 现代温室工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 342.
- [16] Critten D L. A general analysis of light transmission in greenhouses [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1986, 33: 289–302.
- [17] Goudriaan J. Crop micrometeorology: A simulation study [M]. Wageningen: Pudoc, 1977: 249.

## Model-based decision support system for greenhouse heating temperature set point optimization

Dai Jianfeng<sup>1</sup>, Luo Weihong<sup>1</sup>, Qiao Xiaojun<sup>2</sup>, Wang Cheng<sup>2</sup>

(1. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. National Engineering Research Centre for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Temperature set points for greenhouse heating affect not only greenhouse crop growth development, but also energy consumption for greenhouse climate control. A greenhouse crop growth model and an energy consumption estimation model for greenhouse heating, both were validated under subtropical climate conditions, were integrated to develop a model-based decision support system for temperature set point optimization for greenhouse heating. The system consists of a database (including information about greenhouse, crop and climate data) and three models (a crop growth simulation model, an energy consumption estimation model and a set points optimization model). The input of the system includes greenhouse information, crop information, and outside climate data. The output of the system includes biomass production and energy consumption for heating at different temperature set points for greenhouse heating. The temperature set points for greenhouse heating can then be optimized according to the highest ratio of biomass production to energy consumed or highest biomass production. The scenario study results show that, in the greenhouse cucumber production from the flowering to early harvesting stage in Shanghai, the highest biomass production can be achieved when daytime and nighttime temperatures for greenhouse heating are set at 23°C and 17°C, respectively; while the highest biomass production EUE for cucumber production can be achieved when the two set points are set at 20°C and 15°C, respectively. From a practical point of view this system developed in this study may permit improvement in greenhouse climate control in subtropical climate conditions.

**Key words:** crop growth simulation model; energy consumption prediction model; energy balance; biomass production energy-consumption use efficiency; temperature set point for greenhouse heating