

温室地上环境因子模型研究综述

张宁¹, 谭亲跃¹, 张戈风²

(¹西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; ²东华大学信息科学与技术学院, 上海 201600)

摘要:为了完善温室环境模型, 实现生产过程最优控制, 本研究从温室地上环境模型类型入手, 以环境因子、静态模型为划分依据, 分析总结了单因子环境模型、多因子综合模型、静态模型的研究进展和存在问题, 归纳了温室模型的简化方法。指出温室环境控制的主要问题仍是缺乏精确的环境模型。最后在能量、质量和物质等平衡关系基础上, 考虑作物品质、产量及经济成本, 提出了运用现代优化控制理论, 建立精准的温室环境模型, 将成为今后的研究方向。

关键词:温室; 环境模型; 环境因子; 静态模型; 动态模型

中图分类号: S24

文献标志码: A

论文编号: casb17100094

Ground Environment Factor Model in Greenhouse: A Review

Zhang Ning¹, Tan Qinyue¹, Zhang Gefeng²

(¹College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100;

²College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201600)

Abstract: The objective is to improve the greenhouse environment model and achieve the optimal control of the production process. Based on the over ground environment in greenhouse, the environmental factors and the static and dynamic models are used as the standards of division, the research progress and existing problems in the single-factor environmental models, multi-factor integrated models, the static and dynamic models are analyzed and summarized. Furthermore, the simplified methods of greenhouse models are concluded. Lack of accurate models is the main issue regards to greenhouse environment control. Finally, on the basis of the balance of energy, quality and material and in consideration of crop quality, yield and economic cost, it is proposed that the establishment of the accurate greenhouse environment model with modern optimal control theory is the future research direction.

Keywords: greenhouse; environmental model; environmental factors; static models; dynamic models

0 引言

以温室为主要形式的设施栽培是一种集约化的农业生产技术。温室环境模型作为温室内外环境、作物和控制设备之间相互作用与内在关系的定量描述, 对温室设计和环境调控都具有重要作用^[1-2]。近年来温室环境建模已经取得了阶段性成果, 但应用到实际温室控制后效果不明显。最主要的原因就是缺乏温室系统精确的环境模型, 温室环境控制仍然达不到精准控制

的目标。温室环境是一个时变性、非线性和滞后性的复杂系统, 需要从温室地上环境模型类型入手, 分析温度、湿度和光照等基本参量影响下的单因子环境模型, 以及多个环境参数相互制约下的多因子综合模型构建的过程, 研究控制理论方法下的静态模型、动态模型和动静态结合模型过渡过程, 用线性方法简化非线性模型的处理过程, 剖析现有模型构造中存在的问题, 同时运用现代优化控制理论, 平衡能量、质量、物质和耗散

基金项目:国家自然科学基金项目“一种非线性和冲击性负荷与电网耦合的机理及电能质量研究”(51577157); 西安市科技计划项目农业科技创新计划“温室自适应优化智能控制技术”(NC1504(1)); 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目“双馈异步变速恒频风力发电对电能质量的影响研究”(2452015053)。

第一作者简介:张宁, 女, 1970年出生, 新疆巴里坤人, 副教授, 硕士, 研究方向: 农业电气化及自动化。通信地址: 712100 陕西杨凌渭惠路23号 西北农林科技大学水利与建筑工程学院40#(原水科所)、西北农林科技大学水利与建筑工程学院, Tel: 029-87082901, E-mail: znaw@nwfau.edu.cn。

收稿日期: 2017-10-27, **修回日期:** 2017-12-30。

等关系,并考虑作物品质和产量,核算经济成本,建立精准的温室环境模型。本研究围绕上述问题进行分析论证,以期对温室环境模型的完善和实现生产过程最优控制提供参考。

1 温室环境模型的类别

从广义上说,温室环境模型由与农作物生长相关的地上环境模型和地下环境模型组成。地上环境主要考虑温室内空气温度和农作物叶片温度,空气相对、绝对湿度,光照等影响植物生长的因子;地下环境需要考虑作用于农作物本身的土壤温度湿度、酸碱度和各种营养成分^[3]。本研究从影响温室的地上环境因子入手,将温室环境数学模型分为单因子环境模型和多因子综合模型,其中单因子模型主要考虑温度、湿度、光环境、通风、作物蒸腾和 CO_2 等模型。多因子综合模型是同时考虑多个环境因子而建立模型,比如光照、温湿度和通风换气的综合模型,温湿度和 CO_2 综合模型,水汽平衡和 CO_2 综合的模型。其模型分类如图1所示。

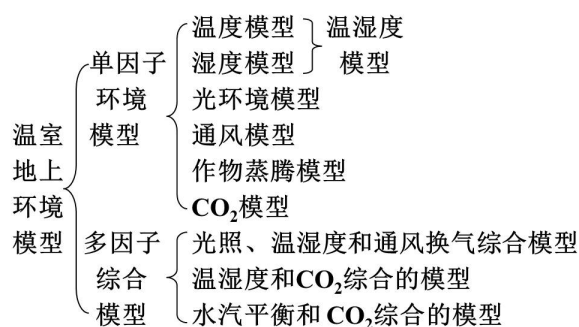


图1 温室地上环境模型分类

2 单因子环境模型的研究进展

2.1 温湿度模型

2.1.1 温度模型 20世纪70年代初Iwakiri和Kimball分析日间温室热传递和模拟温室能量平衡时,认为温室内气温是室外大气温度、覆盖材料表面净辐射、室内地表面净辐射等边界条件函数^[14-15],并用温室热量平衡原理建立模型。后来还提出了涵盖植物能量交换及储存的模拟模型^[7],在温室温湿气候能量预算中综合考虑内部空气温度及植物冠层温度的平衡^[16]。

20世纪90年代中国展开温室温度场及温度变化特性模拟研究。如温室温度和热通量的动态模拟,寻找各种几何参数与室内温度环境指标之间的关系,日光温室不同季节温度变化的规律^[17-19]等,都是在考虑了温室内作物层、室内空气和覆盖物之间的传导、对流、太阳和热辐射后,对温度变化与热量状态进行的分析。

2.1.2 湿度模型 湿度对作物生长和温室内的潜热交换

有重要作用,是继温度后又一个影响温室内部环境的主要因素。国内最初通过温室质能平衡方程建立湿度环境数学模型^[20]。在试验中,描绘上海地区不同季节荷兰式玻璃温室晴、阴天温度及湿度要素的水平及垂直分布状况^[21]。后来通过多点式温、湿度记录仪寻找温湿度变化规律,或用小风量强制通风降低室内空气湿度^[22-23],分析温室高湿成因及其相应的解决办法。

在国外Hand和Bakker发现低湿环境易造成温室作物的水分胁迫,高湿又易引起作物病虫害,危害更为严重,为此发明了许多温室降湿装置^[24-25]。

2.2 光环境模型

20世纪80年代国外对连栋、单栋温室,以及按比例放大和缩小的温室光照模型进行入射太阳辐射研究,为温室大棚结构、光屋面倾斜角和几何设计提供了依据。还模拟作物光合作用,提出温室作物的物理、生化光环境模型^[26-27]。为了设计更合理的温室结构,研究入射光的分布情况,使用矢量几何模拟连栋温室直射光分布,通过改变农作物行间走向控制光强,得出太阳光直射透光率与不同屋檐倾斜角之间的关系^[28-30],这些研究都有一定的实用价值。

中国是20世纪90年代初着手研究日光温室入射光及光分布的。主要用入射光理论模拟温室光环境模型,和分析温室弧形屋顶日光量直接辐射光照的分布情况^[31-32]。随后陆续出现模拟日光温室直射光环境方法、动态模拟新型节能日光温室光环境、不同结构日光温室补光^[33-34]等。这些研究对光温性能理论研究和优化起到了一定的作用。

2.3 通风模型

通风换气可以调节温室内部温度、湿度和二氧化碳浓度。尤其在寒冷的冬天,常用通风换气消除温室内空气中过多的水分,更利于农作物的生长。温室通风包括自然通风和强制通风^[35]。在不出现极端天气状况的条件下,自然通风就可以得到良好的效果。Morris等^[36]发现了自然通风对温室内外环境 CO_2 的影响,Jong^[37]研究连栋温室自然通风情况,Boulard^[38]建立了简单的风压作用温室气候模型,分析了空气交换速率受室内外空气温差和通风受风速的影响。20世纪末建立了一套应用广泛的气流流动、室内外空气交换率和室内气候控制等模型,用来研究自然通风特性^[39-40],还应用流体动力学模拟不同风速、风向,不同位置的顶窗、侧窗对温室温度场、压力场的影响^[41],分析温室天窗不同开度的自然通风性能及存在的局限性。

国内科学家在考虑外界大气条件、光照、蒸腾蒸发等因素后,研究了夏季遮阳温室的最优通风量存在和

变化规律,设计出温室通风微环境调节控制系统,利用热压、风压等原理,采用天窗、侧窗等方式,在连栋薄膜温室中获得了较为满意的自然通风换气效果^[42-44],大大节约了温室能耗。

2.4 作物蒸腾模型

蒸腾作用是温室主要的环境指标之一,也是衡量质量平衡不可缺少的部分。国外科学家最早发现蒸腾作用在夏天大约消耗室内近70%的太阳能,还发现喷雾能降低作物的蒸腾速率,找到了蒸腾速率与太阳辐射、VPD等因素的关系,及作物日生长VPD的反应规律,以此研制新型蒸腾测量装置^[45-47],对温室灌溉系统进行控制。

国内研究者用经验模型、能量平衡方程和紊流扩散模型等计算蒸腾量,对土壤水分蒸散与蒸腾作了动态数值模拟,研究了作物茎流变化规律及与环境因子的相互关系,观测冠层微气候和蒸腾速率,分析主要影响蒸腾的环境因素,通过测量作物蒸腾速率,建立蒸腾作用模型^[48-52]。这些结果对研究现代温室不同季节、不同栽培作物的蒸腾作用,寻找冠层蒸腾过程、肥水灌溉与周围环境因子内在关系都起到了实际作用。

2.5 CO₂模型

CO₂的浓度也是影响农作物的重要因素。CO₂浓度主要与农作物本身的光合作用、呼吸作用、通风及施肥有关。早期建立的CO₂质量平衡模型^[3],只统计温室内CO₂肥料的、农作物呼吸作用产生的和土壤本身呼吸作用释放出的CO₂速率的,不考虑通风换气所导致的CO₂浓度净交换量和农作物光合作用固有的CO₂速率。目前一般用CO₂平衡模型^[41],其表达式见公式(1)。

$$C_g = C_v + G(C_{(i)}, T_i) + \rho h \frac{dC_{(i)}}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

其中, C_g 为CO₂释放速率, $g[CO_2]/(m^2 \cdot s)$; C_v 为通风、空气渗透产生的CO₂流动速率, $g[CO_2]/(m^2 \cdot s)$; $G(C_{(i)}, T_i)$ 为光合作用消耗的CO₂速率, $g[CO_2]/(m^2 \cdot s)$; ρ 为该时刻温室内空气密度, g/m^3 ; h 为温室的平均高度, m ; $\frac{dC_{(i)}}{dt}$ 为CO₂的含量变化率。

在温室环境模型建立中,单因子模型的研究的确起到了积极的作用,但是建立单个因子模型时,总是离不开其他相关因子的影响力。单独调整某个因子时,作物很难获得最优长势,为此产生了构造温室多因子综合模型思想。

3 多因子综合模型的研究进展

温室通过对温度、湿度、光照及CO₂等环境因素的控制,以达到满足植物生长的最佳条件^[4]。当某一环

境因素发生改变时,必须考虑因素之间的相互影响,整体上作系统调整,建立温室多因子综合模型,获取最佳结果。本研究主要讨论光照、温湿度和通风换气多因子综合模型,温湿度和CO₂浓度多因子综合模型,水汽平衡和CO₂平衡多因子综合模型等。

3.1 光照、温湿度和通风换气多因子综合模型

20世纪中叶,根据热量和质量平衡原理,温室环境建立了的综合气候模型,以达到精确模拟真实温室内的光照、温湿度、室内外的通风换气、少数农作物蒸腾作用的目标^[3],实现对温室高效、精准的控制。

3.2 温湿度和CO₂浓度多因子综合模型

近年来大量出现以能量平衡方程和质量平衡方程建立温室温湿度、CO₂浓度等多因素综合模型。比如用碳元素守恒来建立CO₂模型^[3],或者以能量平衡机理分析温室通风、热水管道、覆盖层等主要的交换热量过程^[41]等。在进行实际计算时,温室内主要考虑采暖设备和太阳辐射发出的热量,通风设备消耗、覆盖物与外界交换的损失、作物蒸腾损耗的热量,忽略作物呼吸放出的、光合作用吸收的、土壤与空气交换的等热量,以简化能量平衡的关系^[53]。

3.3 水汽平衡和CO₂平衡多因子综合模型

温室的物质平衡机理模型由水汽平衡和CO₂平衡构成,温室湿度取决于水汽平衡^[41]。温室物质平衡方程一般在温室开启增湿或除湿设备后,考虑空气中增加或减少的水分、通风及空气渗透损失水分、覆盖物上凝结的水蒸气等^[54]。针对特定结构条件下温室空气CO₂模型,以碳元素质量平衡原理来建立^[3]。

依据能量、质量和物质等平衡方程关系建立的多因子综合模型的确取得了一定的成果,但没有权衡耗散平衡关系,没有考虑作物产量、品质,也没有核算作物生长的经济成本。再加上温室系统目标、对象和环境的复杂性,真正建立多因子综合协调精准模型并不容易。

4 按静、动态模型划分温室地上环境模型

在进行温室内部环境状态模型模拟中,模型可分为基本的稳态模型,即静态模型,复杂的动态模型和处于前2个之间的折中模型3种基本状态类型^[42]。按静、动态模型划分温室环境模型的状态、类型、处理方法和特点见表1所示。

(1)静态模型比较简单,但精度较低。世界上早期主要是利用静态分析和实验方法对温室进行气候研究^[36,55]。20世纪60年代进入了用静态方法预测建模和控制室内空气温度的时代^[56-57]。后来还建立了较为完善的温室气候的黑箱模型、太阳能房屋的灰箱模型^[58]

表1 按静、动态模型划分温室环境模型分类表

状态	模型类型	处理方法	特点
稳态	早期静态模型	静态分析和实验方法	计算比较简单,精度低。
	黑箱模型、灰箱模型	高阶系统简化为一阶系统	依据辨识系统拟合的输入输出数据。
	机理模型(白箱模型)	物理学定律、生理学原理、 能量和质量守恒定律	未知参数多,移植性和适应性差、成本高, 难以实现计算机控制。
	辨识模型	实验建模	得到设计所需要的各种数据,但试验周期较长,实验耗资大。
非稳态	动态模型	优化控制温室和作物需求双方的动态关系	计算过程时需较长,受气象数据影响,精度高。
	动静态结合模型	通过静态能量需求模型改进	加快运行速度,适宜于长期模拟,精度一般。

和静态模型^[59]等。从温室物理过程的高阶系统,简化为一阶系统进行分析,依据辨识系统拟合输入、输出数据,研究温室对作物的舒适性。

国内外为适应不同的应用需要,还建立了机理模型和辨识模型等多种温室环境模型。机理模型是依据物理学定律、生理学原理、能量和质量守恒定律等进行机理分析建立模型,又称白箱模型。但未知参数多,测量仪器昂贵,费时费力,再加上温室材料老化或损坏,种植作物不确定性,模型移植性和适应性差,难以实现计算机控制^[60]。辨识模型的实验建模可以得到设计所需要的各种数据,但试验周期较长,实验模型耗资很大^[61]。这两种模型实属静态模型范畴。

(2)动态模型精度高,但计算过程时需较长,受气象数据影响。例如用非稳态模型模拟被控环境对象^[62],可得到温室内外空间上的空气压力、流速和温湿度等环境因子随室外气候参数、时间变化的规律。或者以温室内、外温度控制为目标,建立作物温室小气候动态模型,优化温室气候、动态评价蒸腾性能、调控温度动态模式^[63-65]等。

(3)动静态结合模型是将温室的静态能量模型改进为动静态结合模型,精度一般^[66]。起先是估算温室太阳能的需求,逐渐延伸到对生物反应降耗的动静态研究。后来Joliet改进的HORTICERN模型解决了这些问题,加快了运行速度,且适宜于长期模拟^[67]。

5 温室环境模型的简化方法

由于温室内的环境具有时变性、大惯性、滞后性,数学模型建立影响因素多,计算复杂,优化程序冗余^[68],故许多温室环境模型还需要不断进行简化处理。常用的简化方法有静态模型改进为动态模型和非线性模型线性化处理两种。

(1)静态模型向动态模型的改进。在温室环境静态模型简化方面,Takami^[7]首先提出一种热静态模型向动态模型的改进方法,还有用热能平衡方法简化

模拟仿真温室数学模型,用温室气候物理动态模型代替静态模型,建立温室综合线性控制模型,优化加热方法控制温度范围^[69-71]等,这些均证实了在综合控制温室因素、提高系统精度、降低能耗等方面,动态模型比静态模型更有效、更经济性。

(2)非线性模型线性化。针对非线性温室系统,一般用二阶线性方程优化模型,建立多个面向对象的动态目标,计算组合模型^[72-74]。后来相继用系统辨识方法、最小二乘法、统计方法简化处理温室环境预测或者控制机理模型,把温度作为输出变量参数,或者考虑温湿度、土壤表面与空气热交换量等作为多输入多输出变量,将模型线性化处理,并对不含有升(降)温渐变系统温室模型进行了线性控制,从而对不同作物、不同环境条件的多个温室参数进行设定或联合动态控制,弥补单一因子控制环境的缺陷,建立作物组合模型^[75-76]。虽然温室环境模型的简化方法很多,但由于处理的方法不同,对不同作物和不同环境下的多个温室参数动态控制方法也不同,用何种方法才能取得合理可靠的简化效果,还需要建立完善的评估评价体系来衡量。

6 展望

由于影响温室环境模型的因素较多,为了优化温室调节系统、最大化节能和优化作物生长环境,构建一个完善的温室环境系统模型,是合理设计温室内外环境和优化作物生长以达到精准调控的前提。本研究从温室地上部分环境模型分类入手,对目前温室的单个环境因子和多因子综合模型,静态、动态模型及其简化方法的发展现状作了分析和论述。然而在模型构造中仍然存在如下几个方面的问题:一是用单个因子模型调整单个因子总是会引起其他相关因子的变动,作物很难获得最优长势。构建的多因子综合模型虽然可以弥补单因子模型的缺陷,但多以能量、质量和物质等平衡关系为基础建立,没有权衡耗散平衡关系,没有考虑作物产量、品质,也没有核算作物生长的经济成本。二

是温室环境的静态模型简单,但精度低;动态模型精度高,比静态模型有效、经济,但受环境参数影响大,计算过程花费时间长;改为相结合的动静态模型,精度不够理想。对非线性模型线性化处理,虽属于作物组合模型,但由于处理的方法不一,对不同作物和环境下的多个温室参数动态控制方法不一,也没有建立完善的评估评价体系来衡量何种方法更为合理可靠。为此,在现有温室地上环境模型研究成果基础上,解决这些问题可以以下3个方面进行考虑。

(1)建立精准的温室模型。温室环境受到许多因素的影响,而且这些因素彼此相互作用,为了能更好地制定调控策略,既要了解温室内部各环境因子之间的关系,又要考虑作物产量和品质,核算生长的经济成本,建立一个全面的、完善的模型。

(2)温室环境模型需要进一步的简化。由于环境条件的多变,模型的建立日趋复杂、冗余,可靠性明显降低,数据处理量增大,控制周期延长,工作效率偏低,温室环境模型需要进一步的简化。模型的简化方法很多,采用何种简化手段才能与实际情况相吻合,必须通过反复验证,不断完善策略思想,优化模型结构,建立更为合理的简化模型。

(3)充分运用现代控制理论优化温室模型,实现智能化、自动化的温室环境控制。现代温室环境控制方法要求把温室设计归纳为控制理论的数学优化模型。当然在套用现有数学优化控制方法建模时,需要考虑实际温室环境与严谨的数学模型之间的配合问题,验证模型计算结果与实际测试效果的一致性,使其更符合温室生产模式的需求,从而提高控制精度和作业效率,增强作业者的舒适性及安全性,使作物最优生长,实现真正的智能控制。

参考文献

- [1] 赵斌.基于RBF网络的北方温室温湿度控制机理的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [2] 王丽艳.基于MATLAB的温室作物适宜环境参数优化与调控技术研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2008.
- [3] 邱增帅.温室大棚环境参数控制[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.
- [4] 邱斌.太阳能温室温度的机电模糊控制研究[D].长沙:长沙理工大学,2004.
- [5] Spanomitsios G K. SE—Structure and Environment: Temperature Control and Energy Conservation in a Plastic Greenhouse [J]. Journal of Agricultural Engineering Research,2001,80(3):251-259.
- [6] Businger J. The glasshouse (greenhouse) climate. In: Physics of plant environment [M]. Amsterdam: North Holland Publishing Co., 1963:277-318
- [7] Takami S, Uchijima Z. A model of the greenhouse with a storage-type heat exchanger and its Verification [J].Journal of Agricultural Meteorology,1977,33(3):155-166.
- [8] Bot G P A. Greenhouse climate: from physical processed to a dynamic model[D]. Netherlands:Wageningen Agricultural University,1983.
- [9] Jolliet O. Hortitrans, a Model for Predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses [J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1994,57(1):23-37.
- [10] 李元哲,吴德让,于竹.日光温室微气候的模拟与实验研究[J].农业工程学报,1994,10(1):130-136.
- [11] 陈青云,汪政富.节能型日光温室热环境的动态模拟[J].中国农业大学学报,1996,1(1):67-72.
- [12] 杨晓光,郑瑞生,郑海山.日光温室气象环境综合研究(四):日光温室地温场模拟初探[J].农业工程学报,1994,10(1):150-156.
- [13] 邓玲黎,李百军,毛罕平.长江中下游地区温室内温度湿度预测模型的研究[J].农业工程学报,2004,20(1):263-266.
- [14] Iwakiri S, Uchijima Z. Temperature regime and heat transfer In a glasshouse at the daytime [J]. Agric. Meteorol.Tokyo,1971,26(4): 197-207.
- [15] Kimball B A. Simulation of the energy balance of a greenhouse[J]. Agric. Meteorol,1973,11:243-260.
- [16] Levit H J, Gaspar R. Energy budget for greenhouse in humid-temperate climate[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1988,42 (2-3):241-254.
- [17] 王绍金,崔绍荣.温室温度和热流通量的动态模拟[J].浙江农业大学学报,1993,19(2):42-45.
- [18] 李振海,崔引安.日光温室几何参数与室内温度环境的关系[J].沈阳农业大学学报,1995,26(1):58-63.
- [19] 邹志荣,王乃彪.日光温室温度变化与热量状态分析[J].西北农业学报,1997,6(1):58-60.
- [20] 汪小岳.南方现代化温室小气候模拟及其能耗预测研究[D].南京:南京农业大学,2003.
- [21] 贺芳芳.上海地区荷兰玻璃温室中温湿要素之分布特征[J].上海农业学报,2000,16(2):17-22.
- [22] 张亚红,陈端生.日光温室空气湿度环境及除湿技术研究: II. 强制通风的降湿效果及效应[J].宁夏农学院学报,2000,21(2):46-50.
- [23] 余纪柱,金海军.塑料三连栋温室的温、湿度变化规律初探及相应调控措施[J].上海农业学报,2002,18(4):63-69.
- [24] Bakker J C. Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables [D]. Netherlands: Wageningen Agricultural University,1991.
- [25] Campen J B, Bot G P A. SE—Structures and Environment: Design of a Low- Energy Dehumidifying System for Greenhouses [J]. Journal of Agricultural Engineering Research,2001,78(1):65-73.
- [26] Gijzen H, Cate J A T. Prediction of the response of greenhouse crop photosynthesis to environmental factors by integration of physical and biochemical models[J].Acta Horticulturae,1988,229(25):251-258.
- [27] Gijzen H, Vegter J G, Nederhoff E M. Simulation of greenhouse crop Photosynthesis: validation with cucumber, sweet pepper and tomato[J]. Acta Horticulturae,1990,268(6):71-80.

- [28] Dezwart H F. Determination of Direct Transmission of a Multispan Greenhouse Using Vector Algebra [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 56(1):39-49.
- [29] Li S, Kurata K, Takakura T. Direct solar radiation penetration into row crop canopies in a lean-to greenhouse [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(2-3):243-253.
- [30] Soriano T, Montero J I, Sanchez-guerrero M C, et al. A Study of Direct Solar Radiation Transmission in Asymmetrical Multi-span Greenhouses using Scale Models and Simulation Models [J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(2):243-253.
- [31] 吴毅明, 曹永华, 孙忠福, 等. 温室采光设计的理论分析方法: 设施农业光环境模拟分析研究之一[J]. 农业工程学报, 1992, 8(3):73-80.
- [32] 陈瑞生, 郑海山, 张建国, 等. 日光温室气象环境综合研(三): 几种弧形采光屋面温室室内直射光量的比较研究[J]. 农业工程学报, 1992, 8(4):78-82.
- [33] 宋希强, 彭春生, 等. 新型节能日光温室光环境动态模拟及其数值实验[J]. 海南师范学院学报: 自然科学版, 2001, 14(2):48-50.
- [34] 王静, 崔庆法, 林茂兹. 不同结构日光温室光环境及补光研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4):86-89.
- [35] 张军. 温室环境系统智能集成建模与智能集成节能优化控制[D]. 上海: 上海大学, 2013.
- [36] Morris L G, Winspear K W. The effect of solar radiation on measurement of glasshouse air temperature [J]. Technical memorandum, 1954, (102):9-12.
- [37] Jong T D. Natural ventilation of large multi-span greenhouse [D]. Ph. D. Thesis, Netherlands: Wageningen Agricultural University, 1990.
- [38] Boulard T, Baille A. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1993, 65(3-4): 145-157.
- [39] Bailey B J, Teitel M. Constraints, limitations and achievements in greenhousenaturalventilation[J]. Acta Horticulture, 2000, 534(1):21-30.
- [40] Fatnassi H, Boulard T, Demrati H, et al. SE—Structures and Environment: Ventilation Performances of a large canarian type greenhouse equipped with Insect-proof Nets[J]. Acta Horticulture, 2002, 82(1):97-105.
- [41] Kamaruddin R, Montero J L, Bailey B J. Effect of ventilator configuration on ventilation in a tropical crop protection structure [J]. Acta Horticulture, 2002, 578(11):105-111.
- [42] 缪荣. 夏季遮阳温室的最优通风量[D]. 南京: 南京农业大学, 1999.
- [43] 卢江. 温室通风控制系统设计[D]. 南京: 南京农业大学, 1999.
- [44] Boulard T, Wang S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100 (1):25-34.
- [45] Katsoulas N, Bailllel A, Kittas C. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 106(3):233-247.
- [46] Montero J I, Anton A, Munoz P, et al. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses [J]. Agricultural and Forest Meteorolog, 2001, 107(4):323-332.
- [47] Dayan E, Fuchs M, Plaut Z, et al. Transpiration of roses in greenhouses [J]. Acta Horticulturae, 2001, 554(25):239-249.
- [48] 吴文勇, 杨培岭, 刘洪禄, 等. 温室土壤-植物-环境连续体水热运移研究进展[J]. 灌溉排水, 2002, 21(1):76-79.
- [49] 王绍辉, 任理, 张福墁. 日光温室黄瓜栽培条件下土壤水分动态的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4):110-114.
- [50] 彭致功, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 日光温室条件下茄子植株蒸腾规律的研究[J]. 灌溉排水, 2002, 21(2):47-50.
- [51] 汪小昆, 罗卫红, 丁为民, 等. 南方现代化温室黄瓜夏季蒸腾研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11):1390-1395.
- [52] 罗卫红, 汪小昆, 戴剑锋, 等. 南方现代化温室黄瓜夏季冬季蒸腾测量与模拟研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1):59-65.
- [53] Walker J N. Predicting temperatures in ventilated greenhouse[J]. Transactions of the ASAE, 1965, 3(8):445-448.
- [54] 高倩. 温室大棚环境参数控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [55] Whittle R M, Lawrence W J C. The climatology of glasshouses II: Ventilation [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1960 (5):36-41.
- [56] Businger J. The glasshouse (greenhouse) climate. In: Physics of Plant Environment[M]. North-Holl and Publ Co. Amsterdam, 1963: 20-101.
- [57] Yabuki K, Imazu T. Studies on the temperature control of glasshouse I: On the temperature and the heat balance in an empty unventilated glasshouse [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 1961, 30(2):171-177.
- [58] Bot G P A. Greenhouse simulation models[J]. Acta Horticulturae, 1989, (245):315-325.
- [59] Chiapale J, Kittas CV, illele O D. Estimation regionale des besoins de chauffage des serres[J]. Acta Horticulturae, 1981, 115(1):493-502.
- [60] 李晋, 秦琳琳, 岳大志, 等. 试验温室温度系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7):1869-1875.
- [61] 吴飞青, 张立彬, 胥芳, 等. CFD技术在温室通风中的应用[J]. 农机化研究, 2008(6):1-5.
- [62] 邵磊. Venlo型温室热湿环境数值分析研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- [63] Bakker J C, Bot G P A, Challa H, et al. Greenhouse climate control an integrated approach[M]. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 1995:278.
- [64] Zwart F A D. model to evaluate the performance of heating devices in horticulture[D]. Netherlands: Wageningen Agricultural University, 1996.
- [65] 李志伟, 王双喜, 高昌珍, 等. 以温度为主控参数的日光温室综合环境控制系统的研制与应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3):68-71.
- [66] Short T H, Breuer J J G. Greenhouse energy demand comparisons for the Netherlands and Ohio, U.S.A.[J]. Acta Horticulturae. 1985, 174 (18):145-153.
- [67] Jolliet O, Danloy L, Gay J B, et al. HORTICERN: an improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse [J]. Agricultural and Forest Meteorology. 1991, 55(3-4):265-294.
- [68] 周晨松. 智能温室控制系统[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2001.
- [69] Takakura T. Climate Control to Reduce Energy Inputs[J]. Acta Horticulturae, 1989, 245(54).
- [70] Tantau H J. On-line Climate Control[J]. Acta Horticulturae, 1989, 248(26):217-222.
- [71] Bailey B J, Seginer I. Optimum Control of Greenhouse Heating [J].

Acta Horticulturae,1989, 245(69):512-518.

[72] Var Hentene J. Model Based Design of Optimal Multivariable Climate Control systems[J]. Acta Horticulture,1989,248(36):301-306.

[73] Gauthier L, Guay R. An object-oriented Design for Greenhouse Climate Control System[J]. Transactions of the ASAE,1990,33(3): 999-1004.

[74] Stanghellini C, Meurs W T M V. Environment Control of Crop Transpiration [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992,51(1-4):297-311.

[75] Young P, Chotai A. Data-Based Mechanistic Modeling, Forecasting and Control [J]. IEEE Control Systems,2001,21(5):14-27.

[76] Litago J, Baptista F J, Meneses J F. Statistical Modelling of the Microclimate in a Naturally Ventilated Greenhouse [J]. Biosystems Engineering,2005,92(3):365-381.