

温室环境-作物湿热系统 CFD 模型构建与预测^{*}

程秀花^{1,2} 毛罕平¹ 倪 军¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 扬州大学动物科技学院, 扬州 225009)

【摘要】 以栽有番茄的 Venlo 型两连栋玻璃温室为研究对象, 对作物蒸腾和土壤蒸发与室内外环境因子之间的关系进行了分析。在充分考虑太阳辐射影响和室内水蒸气传输过程基础上, 结合多孔介质模型, 构建了求解温室环境-作物湿热系统的 CFD 数学模型, 并对边界条件的设置进行了探讨。采用 Fluent 软件对不同天气条件和种植密度温室内温度分布模式进行了 3-D 数值模拟与预测。结果表明: 室内温、湿度模拟值与实测值平均相对误差分别为 5.7% 和 2.1%, CFD 模型有效, 边界设置合理。晴天室内作物区平均温度较阴天时高 1.6℃ 左右, 相对湿度约低 3%, 太阳辐射对温、湿度分布有影响; 双密度栽培作物区温度较单密度高 0.8℃, 相对湿度高 19%。温室背风侧温、湿度略高于迎风侧, 作物区温、湿度分布比较均匀, 作物和土壤腾发作用对室内温、湿度分布有影响。

关键词: 温室 温度 相对湿度 计算流体力学 多孔介质 模拟

中图分类号: S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)02-0173-07

Numerical Prediction and CFD Modeling of Relative Humidity and Temperature for Greenhouse – Crops System

Cheng Xiuhua^{1,2} Mao Hanping¹ Ni Jun¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. Collage of Animal Science and Techonology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract

The relations between tomato crops and soil transpiration and the microclimatic factors inside and outside bi-span greenhouse were analyzed. The computational fluid dynamics (CFD) model was used to solve the temperature and relative humidity (RH) distributions based on water vapor transmission and solar radiation with the porous models, and the boundary conditions were discussed. The 3-D temperature numerical simulations were tested by means of Fluent software. The results showed the average relative errors of the simulated and the measured values were 5.7% and 2.1%, respectively. The CFD model and the boundary conditions were proved to be validated. Compared to cloudy days, the average temperature was 1.6℃ higher and relative humidity was 3% lower in sunny days. The solar radiation had an effect on the temperature and RH distributions. The average temperature was 0.8℃ higher and RH was 19% higher for the double density plants than that of single density plants. The temperature and RH distributions were lower near the leeward than the windward inside greenhouse, but a homogeneous pattern was observed in cropping region.

Key words Greenhouse, Temperature, Relative humidity, Computational fluid dynamics, Porous medium, Simulation

收稿日期: 2010-03-29 修回日期: 2010-06-29

^{*} 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200802990009)和江苏大学现代农业装备与技术重点实验室开放基金资助项目(NZ200802)

作者简介: 程秀花, 博士生, 扬州大学讲师, 主要从事温室环境模拟测试及决策研究, E-mail: chengxh97@163.com

通讯作者: 毛罕平, 教授, 博士生导师, 主要从事设施农业环境调控技术研究, E-mail: maohp@ujs.edu.cn

引言

温室作物-环境系统中,室内微环境的分布不仅与室外气候环境及通风布局关系密切,而且与作物的生理活动有较强的耦合作用。随着计算机技术和流体湍流模型的快速发展,计算流体动力学 (computational fluid dynamics, 简称 CFD) 方法逐渐成为研究设施园艺室内外微环境分布的有力工具。Bartzanas 等^[1-3]在考虑作物和空气之间热交换的基础上,针对不同通风工况下温室内气流和温度分布状态进行了 CFD 数值模拟和试验验证,二者吻合良好。但已有文献中并没有给出作物边界的详细设定方法,同时,针对配有防虫网的温室在考虑作物蒸腾和土壤蒸发及室内外相对湿度的研究还未见报道。实际生产中,温室中部分太阳辐射通过作物蒸腾转化为潜热,对室内湿度分布产生影响,因此,考虑作物和土壤腾发情况下对室内微环境分布进行研究十分必要。

本文以栽有番茄的 Venlo 型两连栋玻璃温室为研究对象,在对作物蒸腾和土壤蒸发与室内外环境因子之间关系分析的基础上,结合多孔介质模型、组分传输模型,构建求解温室环境-作物湿热系统的 CFD 数学模型,运用 DO 辐射模型综合考虑温室所在地区的地理位置及太阳高度角对温室微环境的影响,对边界条件的设置进行探讨;采用 Fluent 软件对室内微环境分布进行 3-D 数值模拟,对模拟结果进行验证;针对晴天和阴天,番茄作物采用单行和双行两种不同种植密度,分析比较室内温度和相对湿度空间分布模式。结合 CFD 计算结果制定适当的温室通风调控策略。

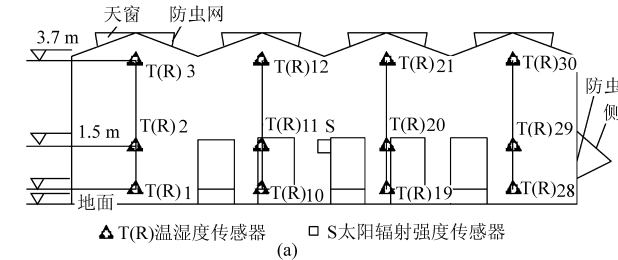
1 材料与方法

1.1 试验温室

试验温室 Venlo 型小屋面两连栋玻璃温室 (北纬 32.11°, 东经 119.27°), 温室结构见文献[4]。

1.2 试验方法

试验于 2008 年 7 月 27 日 7:00 ~ 8:30 进行,通



风工况为东西向天窗与西侧窗全开,试验期间天气晴好,少云。测试的主要参数包括室内外主要气象参数及番茄作物的蒸腾速率、气孔导度及叶面积指数。

1.2.1 室内外环境参数

室外气象参数由安装在地面上方 6 m 处的室外气象站采集并自动存储,存储周期为 10 min,测量项目包括室外温室、相对湿度、风速风向。室内温度、相对湿度、太阳照度、地面温度测量传感器如下:

- ① Microlog 温湿度传感器 (Fourier System Ltd., USA), 温度测量精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度测量精度 $\pm 3\%$, 温度分辨率 0.1°C ($-21 \sim 50^{\circ}\text{C}$), 相对湿度分辨率 1%。测量时对温湿度传感器进行遮光处理,防止太阳辐射对测量结果的影响。
- ② 台湾 TES-1335 型照度计,量测范围 $0 \sim 40 \text{ klx}$, 分辨率 0.01。该数据手动测量,并按照 $1 \text{ W/m}^2 = 250 \text{ lx}$ 的关系^[5]将所测照度值转换为太阳辐射强度值。
- ③ 围护结构、地表温度由 Ti-55 型红外热成像仪 (Fluke Corporation, USA) 测量,分辨率为 320×240 。为减小测量误差,测量距离保持 1 m,镜头垂直于被测表面。
- ④ 普通直角地温计,测量范围 $0 \sim 50^{\circ}\text{C}$, 精度 0.1°C 。
- ⑤ 为获得温室内平均的温、湿度值,将 WatchDog 2900ET 便携式自动气象站气象站 (Spectrum USA, 温度范围 $-20 \sim 100^{\circ}\text{C}$, 精度 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$; 相对湿度范围 $10 \sim 100\%$, 精度 $\pm 3\%$; 太阳辐射强度范围 $0 \sim 1250 \text{ W/m}^2$, 精度 $\pm 5\%$) 置于温室中部距地面高 2 m 处自动采集数据。以上数据的测量采用布点测量法,在温室内沿长度、跨度及高度方向共布 36 个点,如图 1 所示。以上数据除太阳照度的采集周期为 30 min 外,其余数据的采集周期为 10 min,然后取平均值以减小测量误差。

1.2.2 番茄蒸腾速率、气孔导度及叶面积指数

供试番茄为合作 908 粉红番茄,无限生长型,于 2008 年 4 月 11 日定植于栽培槽内,株距为 50 cm,共 5 槽,按照标准种植模式进行管理。试验期间番茄处于成熟期。番茄植株蒸腾速率及气孔导度的测

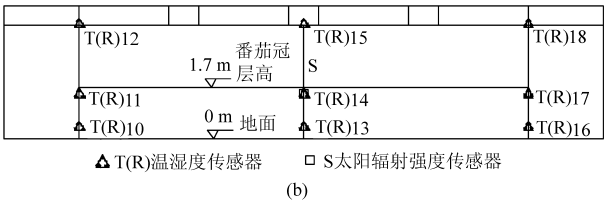


图 1 温室内环境因子测量点分布图

Fig. 1 Measure points of climate factors in greenhouse
(a) 横向中心截面 (b) 纵向中心截面

量采用 Li-6400 光合测定系统(美国 LI-COR 公司)测量。测量时,选取温室内长势良好的 3 株植株,按上、中、下 3 个位置分别选取 1 个叶片进行测量,每个叶片记录 10 个数据,取其平均值作为测量时间内的数据。采用卡尺对叶片的长度和宽度进行测量,并通过回归方法得出作物的叶片面积。

2 温室微环境-作物系统 CFD 建模

2.1 数值模型

2.1.1 控制方程及湍流模型

温室内气体视为由水蒸气和干空气组成的混合气体。假设自然通风情况下温室内气体为定常不可压缩牛顿流体;室内气流流动为湍流;忽略由于空气粘性而引起的能量耗散;水蒸气在整个计算域内没有相变,即水蒸气与干空气仅仅发生单相扩散过程。混合气体在流动过程中遵循质量、动量、能量守恒方程,通用形式为^[6]

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\varphi + J_\varphi) = S_\varphi \tag{1}$$

其中 $J_\varphi = -\Gamma_\varphi \text{grad}\varphi$
式中 φ ——通用传输量
 ρ ——流体密度 t ——时间
 $\mathbf{u}$ ——流体速度矢量
 J_φ ——扩散通量 S_φ ——广义源项
 Γ_φ ——通用变量 φ 的有效交换系数

研究表明,自然通风温室内气流具有较高的湍流特性,采用模拟精度较高的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[6]与式(1)构成封闭方程来求解室内气体的湍流输运过程。壁面使用无滑移壁面条件,近壁处气流流动采用标准壁面函数法,采用 Fluent 软件对以上方程求解获得温室内外温湿度场和气流场的分布状态。

2.1.2 组分传输模型

温室内由于地面和土壤表面水分蒸发,室内空气主要是由水蒸气和干空气组成的混合气体。受太阳辐射的影响,相对湿度在一天中变化较大。自然通风过程中,室内湿空气随气流流动与室外环境不断进行对流和扩散,这个过程可用组分传输守恒方程描述

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \tag{2}$$

其中 $J_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i$
式中 Y_i ——混合物中第 i 种组分的质量分数
 R_i ——化学反应的净产生速率,本文为零
 S_i ——离散相及用户定义的源项引起的额外产生速率

J_i ——第 i 种组分的扩散通量
 $D_{i,m}$ ——第 i 种组分的质量扩散系数

湿空气中水蒸气的质量浓度 Y_w 满足质量守恒方程^[7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_w) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Y_w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w Y_w) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_Y \frac{\partial Y_w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_Y \frac{\partial Y_w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_Y \frac{\partial Y_w}{\partial z}\right) + S_c \end{aligned} \tag{3}$$

2.1.3 辐射模型

离散坐标(DO)辐射模型将笛卡儿坐标系下的辐射传输方程转换为空间坐标系下的辐射强度输运方程,适用于几乎所有光学厚度的介质,尤其适合以玻璃材质作为围护结构的温室热环境模拟。空间坐标系下沿方向 s 的辐射强度输运方程见文献[8]。

2.2 番茄多孔介质模型

稳态、低速、不可压缩空气经过各向同性多孔介质时的空气动力学行为遵循 Darcy-Forchheimer 定律。将番茄视为番茄为固体骨架,室内空气为流体的各向同性多孔介质,气流流过番茄冠层产生压降^[3],其空气动力学行为见文献[9]中的描述。试验番茄在栽培槽中为单行(单密度)种植,其孔隙率 $\varepsilon = 30\%$,渗透率 $K = 0.395 \text{ m}^2$ ^[10],试验期间叶面积密度 $\rho_{\text{LAD}} = 2 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。采用双行(双密度)种植时,其孔隙率 $\varepsilon = 10\%$, $\rho_{\text{LAD}} = 4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

2.3 番茄作物冠层质热交换模型

温室内作物将截获的太阳辐射以显热和潜热的形式与周围空气进行质热交换。根据作物冠层能量平衡原理建立其数学模型^[3]

$$R_n - \frac{\rho c_p I_{\text{LAI}}(T_l - T_i)}{r_a} - \lambda \rho I_{\text{LAI}} \frac{w_l - w_a}{r_a + r_{ls}} = 0 \tag{4}$$

式中 R_n ——作物冠层的净辐射, W/m^2
 c_p ——空气的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 I_{LAI} ——番茄作物的叶面积指数
 T_l ——作物冠层温度, K
 w_l, w_a ——作物冠层和室内空气的绝对湿度, kg/kg
 r_a ——番茄叶片空气动力学阻力, s/m
 r_{ls} ——番茄叶片气孔阻力, s/m , 由试验测得
当室内气流速度小于 0.1 m/s 时, 根据文献[11]有

$$r_a = 840 \left(\frac{d}{|T_l - T_i|} \right)^{0.25} \tag{5}$$

式中 d ——叶片特征长度, 取 0.15 ^[12]。

2.4 土壤蒸发

土壤蒸发通量的计算见文献[9]。

3 数值模拟

3.1 离散化

计算域的选取和网格划分的精细程度会对计算精度产生直接影响。选取温室区域和室外长方体区域为计算域,温室位于长方体区域中心,其背风面距计算域出口的距离满足大于 10 倍建筑物高度的要求^[13],保证流体流动在出口处充分发展。为适应

Venlo 型温室覆盖层及通风口不规则的结构形式,采用非结构化四面体网格对计算域进行划分,并在天窗及侧窗口进行加密处理,以适应流场梯度变化大的要求。番茄栽培区为 17.0 m × 0.9 m × 1.7 m 的平行六面体区域,同样进行网格加密。网格质量按照 EquiAngleSkew 标准进行控制。计算域网格划分如图 2 所示。

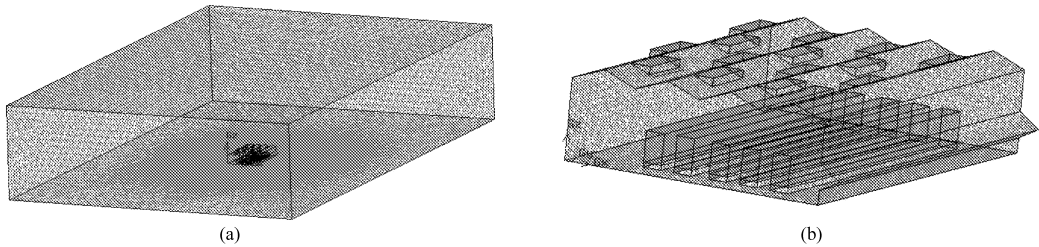


图 2 计算域及温室局部网格划分
Fig. 2 Meshing of computational domain and greenhouse
(a) 计算域网格 (b) 温室-作物网格

3.2 边界条件

3.2.1 进出口及壁面边界条件

设置计算域的目的是为了更好地模拟自然风对温室通风的作用过程,因此,设定其边界上无物质和能量的传递,室外地面按照温度边界条件处理。玻璃温室内外能量通过覆盖层及四周围护结构以对流、热传导和辐射 3 种形式进行热交换,其物性为无滑移的半透明漫灰体壁面。设定覆盖层热边界条件为热流量类型,以模拟覆盖层吸收太阳短波辐射后以自然对流的形式向室内外释放显热,由热传导产生的热交换则通过设定玻璃的导热系数实现。

太阳辐射对温室内微环境分布的影响与太阳方位角及温室的地理位置密切相关。为较真实地模拟以上两方面的影响,采用 Solar Ray Tracing 计算方法,结合实际设定温室所在区域的经纬度及朝向,指定模拟时刻太阳方位角,结合试验时段天气状况设定直射辐射和散射辐射,综合考虑太阳辐射引起的温室效应及温室所在地区地理位置的影响。玻璃设为半透明材质,在 DO 辐射模型中分别设定其对可见光和近红外光的吸收率和透射率,以模拟覆盖层对不同波长短波辐射的选择性,实现辐射的耦合计算。温室四周围护结构均设为耦合型,南侧墙考虑太阳辐射的影响,其余不参与辐射的耦合计算。

3.2.2 作物边界条件

尝试将作物所吸收的显热以体积热源的形式增加到能量方程源项中求解,能量方程具体形式^[8]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}}\right) + S_h \quad (6)$$

其中 $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$ $h = \sum_j m_j h_j + \frac{p}{\rho}$

$h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,j} dT$ $T_{\text{ref}} = 298.15 \text{ K}$ $k_{\text{eff}} = k + k_t$

式中 E ——总能 k ——流体热传导系数
 h ——理想气体的显焓
 m_j ——组分 j 的质量分数
 $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ ——有效粘性应力
 k_{eff} ——有效热传导系数
 k_t ——湍流热传导系数,与所选湍流模型相关

$\frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j J_j$ ——湿空气传输过程中焓的输运
 S_h ——体积热源项

作物吸收太阳辐射通过蒸腾作用转化成的潜热部分以组分源相的形式由式(2)~(3)求解。

3.2.3 土壤边界条件

土壤表面与室内空气间的对流传热以热边界的形式给出,土壤的蒸发则转换为土壤所占空间体积以组分源项的形式在每个计算网格上通过求解组分方程获得。

3.2.4 防虫网多孔介质

防虫网视为一维多孔介质。防虫网的渗透能力^[14] $K_s = 3.44 \times 10^{-9} \alpha^{1.6}$,非线性动量损失系数 $C_{fs} =$

4. $30 \times 10^{-2}/\alpha^{2.13}$, 防虫网孔隙率^[15] $\alpha = (L - d)^2/L^2$, L 为防虫网网孔的大小(即相邻两条网线间的距离), d 为防虫网线的直径。

3.3 初始条件及求解方法

以试验获得的各项数据为初始值: 室外空气和地面温度分别为 32℃ 和 34℃; 室内空气和土壤温度分别为 34℃ 和 28.8℃。室内外相对湿度则分别为 67% 和 55%。进口风速 1.5 m/s, 南风, 风向平行屋脊。作物冠层温度为 32℃, 冠层压降系数为 0.2。基于 FLUENT 6.3 软件平台, 能量、动量方程和水的质量分数的求解采用二阶迎风格式进行离散化处理, 压力-速度耦合方程的求解采用 SIMPLEC 半隐式算法求解, 应用分离式求解器对各守恒方程进行 3-D 数值求解。

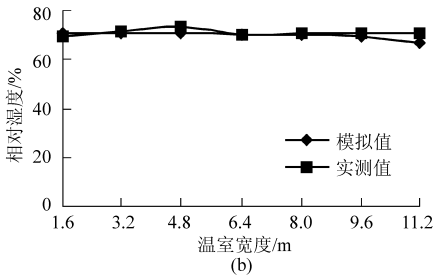
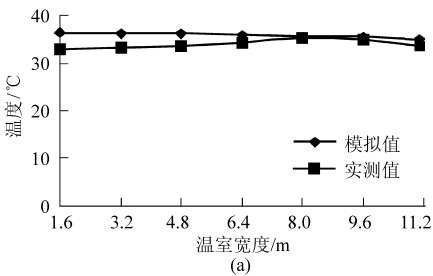


图 3 温室中部测点温、湿度模拟值与实测值
Fig. 3 Simulated and measured temperature & RH values inside greenhouse
(a) 温度 (b) 相对湿度

所建立的 CFD 数值模型有效, 对作物和土壤热交换的边界条件设定正确。

4.2 不同天气条件下室内温湿度空间分布模式

图 4 为晴天(室外太阳辐射强度 $R_a = 377 \text{ W/m}^2$) 和阴天(室外太阳辐射强度 $R_a = 150 \text{ W/m}^2$) 2 种天气条件下, 距北墙为 4、10、16 m³ 个典型位置横截面

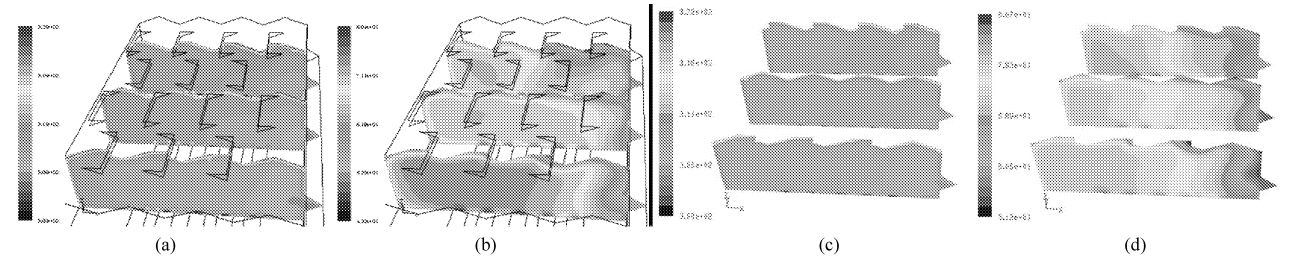


图 4 温室垂直截面温、湿度分布等高线图($\rho_{\text{LAD}} = 2 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $\varepsilon = 30\%$)
Fig. 4 Temperature and RH contours along the vertical sections
(a) 晴天, 温度 (b) 晴天, 相对湿度 (c) 阴天, 温度 (d) 阴天, 相对湿度

图 5 为两种天气条件下距地面高度分别为 1.5 m 和 2.5 m 两个水平上主要节点温、湿度变化及比较。从图中可以看出: 晴天室内温度较阴天时候高, 相对湿度则是阴天较晴天时高, 但不同高度温、湿度变化趋势类似, 可见在其他边界条件不变的情况下, 室外太阳辐射强度对室内微环境空间梯度分

4 结果与分析

4.1 CFD 数值模型验证

温室内番茄单行种植, 自然通风采用东西向天窗和西侧窗联合通风工况下, 晴天室外太阳辐射强度为 377 W/m^2 , 图 3 所示为温室中部 1.5 m 高沿宽度方向各测点平均的温、湿度模拟值与实测值。从图中可以看出: 温度模拟值与实测值吻合良好, 最大相对误差为 10.3%, 平均相对误差为 5.7%; 相对湿度模拟值与实测值最大相对误差和平均相对误差分别为 5.5% 和 2.1%。数值模拟结果能够较真实有效地反映实际温室内温、湿度的空间分布模式。可见, 采用组分传输方程求解湿空气的输运过程及对作物和土壤腾发作用的建模方法是可行的, 本研究

上温室内温、湿度分布云图。从图 4a、4c 中可以看出, 北侧(背风面)西向天窗下方横截面温度较低, 中部次之, 南侧(迎风面)东向天窗下方截面温度较高; 相对湿度的分布则呈北高南低的梯度模式(图 4b、4d), 南北温差为 2 ~ 3℃。温室内东西向温、湿度分布呈东高西低的梯度模式。

布模式影响不大。作物冠层区域温、湿度分布相对比较均匀一致, 晴天作物区温度在 35 ~ 36℃, 相对湿度则在 71% ~ 75% 之间; 阴天作物区温度约 34℃, 相对湿度 70% ~ 80%; 受太阳辐射影响, 该区域晴天时平均温度较阴天时高 1.6℃ 左右, 相对湿度约低 3%。图 5b 所示作物冠层上方区域, 晴天平

均温度较阴天高 1.8℃,相对湿度约低 7%。由模拟结果可知,室内温度高于结果期番茄所能承受的最高温度,过高的环境温度会导致作物叶片气孔关闭,

蒸腾作用降低,因此实际生产中应考虑采用外遮阳配合自然通风的调控方式,以满足作物生长发育适宜的环境要求。

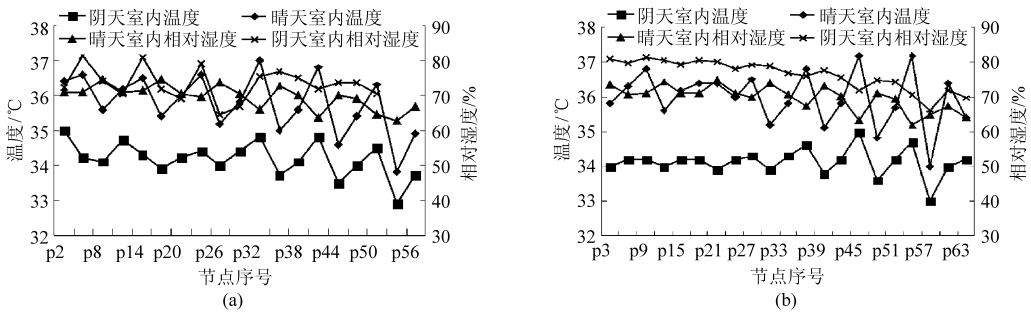


图 5 不同天气条件下室内测点温、湿度变化曲线
Fig. 5 Temperature and RH variety for different weather conditions
(a) 高 1.5 m 平面 (b) 高 2.5 m 平面

4.3 不同种植密度下室内温湿度空间分布模式

栽培槽内番茄采用双行种植的栽培模式,此时叶面积密度 ρ_{LAD} 增大,作物间孔隙率 ε 降低,模拟取 $\rho_{LAD} = 4 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $\varepsilon = 10\%$ 。如图 6 所示,室内温、湿度分布模式与单行种植情况基本类似(图 4),温度分布呈南高北低,相对湿度分布则呈北高南低的梯度模式。

1.5 m 和 2.5 m 2 个水平面上不同节点温、湿度的比较(图中叶面积密度单位: m^2/m^3)。可以发现:双密度栽培时作物区平均温度为 35℃ 左右,相对湿度约 89%,温度较单密度栽时降低约 0.7℃,相对湿度增高 18%。冠层上方对应温、湿度差分别为 0.8℃ 和 19%。随着作物栽培密度增大,由于蒸腾作用向室内散发的水气量增加,导致室内相对湿度升高,显然,作物种植密度对室内湿热微环境分布有明显影响。

图 7 给出了 2 种栽培密度距地面高度分别为

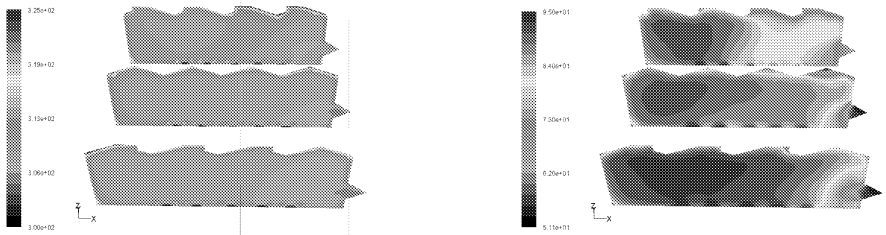


图 6 温室垂直截面温、湿度分布等高线图 ($R_a = 377 \text{ W}/\text{m}^2$, $\rho_{LAD} = 4 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $\varepsilon = 10\%$)
Fig. 6 Temperature and RH contours along the vertical sections
(a) 温度 (b) 相对湿度

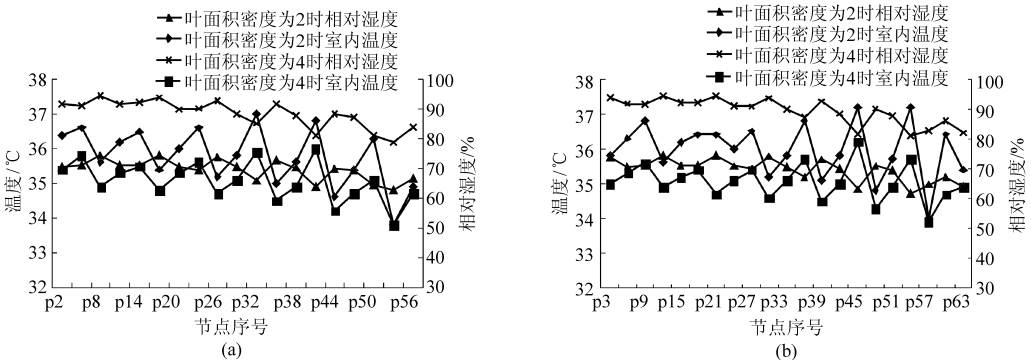


图 7 两种栽培密度下室内温、湿度变化曲线
Fig. 7 Temperature and RH variety for different plants density
(a) 高 1.5 m 平面 (b) 高 2.5 m 平面

综上所述,试验边界条件下室内温度分布呈南高北低,相对湿度呈北高南低的梯度模式。模拟工况室外风向平行于屋脊,室外自然风作用于南侧迎

风面形成正压,受天窗通风的影响,室外较冷的气流进入室内下沉,由于风压作用推动室内湿热气流向背风面的北侧迁移,致使湿热气流在北侧聚集,造成

北侧气温和相对湿度均较高的现象;同时,室外自然风作用于温室外面时形成绕流,侧窗通风口处流动较为复杂,靠近北侧的部分侧窗为进风口,靠近南侧的部分侧窗为出风口,因此,迁移至北侧的湿热气流进一步在侧窗风压作用下向东侧流动,而南侧靠近侧窗附近室内为负压,东侧的湿热空气则会向西侧迁移,因而形成以上所述的温、湿度分布模式。尽管不同天气条件下温室内南北存在明显的温、湿度差异,但中部作物区整体上温、湿度分布比较均匀一致,有利于作物生长发育。

从以上模拟结果还可以看出:东西两侧无作物存在的区域温度高而对应的相对湿度低,而在温室中部作物区这种现象并不明显,相反,温度较高区域对应相对湿度也较高,造成这种现象的主要原因是由于高温导致番茄作物蒸腾作用增强,并将截获的太阳辐射以潜热的形式释放到室内,造成室内空气湿度增加,这也充分说明作物的存在对室内微环境分布有重要影响。

5 结论

(1) 对栽有番茄的玻璃温室在自然通风工况下

室内温、湿度分布进行数值模拟,温室中部测点平均温、湿度的模拟值与实测值的平均相对误差分别为 5.7% 和 2.1%,模拟结果与试验测试结果吻合良好,考虑作物和土壤腾发作用及热对流情况,采用多孔介质模型和组份传输模型所建立的 CFD 数值模型有效。将作物冠层释放的显热按照体积热源项设定,作物冠层产生的潜热及土壤蒸发释放的水气以 H₂O 的源项设定的边界处理方法是正确的。

(2) 温室中部作物区温湿、度分布比较均匀,无作物区具有温度高且对应相对湿度较低的特征,而作物区这种特征不明显,表明作物和土壤腾发作用对室内温、湿度分布有明显影响。温室背风侧温、湿度略高于迎风侧,在夏季实际栽培管理中,应根据季节及室外气象环境的变化给予不同区域不同的灌溉量,为作物正常生长发育提供适宜的环境。

(3) 晴天室内温度较阴天时略高,相对湿度则略低,太阳辐射强度对作物蒸腾影响明显。随着作物种植密度增大室内温度有所降低而湿度明显增加,为防止高温高湿对作物生长发育的不利,应考虑外遮阳与自然通风联合调控的通风方式。

参 考 文 献

- 1 Bartzanas T, Boulard T, Kittas C. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse [J]. Biosystems Engineering, 2004, 88 (4): 479 ~ 490.
- 2 Fatnassi H, Boulard T, Bouirden L. Simulaion of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 118(1 ~ 2): 97 ~ 111.
- 3 Boulard T, Wang S. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34: 173 ~ 190.
- 4 程秀花, 毛罕平, 伍德林, 等. 自然通风玻璃温室热环境时空分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 179 ~ 183.
Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Wu Delin, et al. Numerical simulation of thermal profiles in spatial and temporal field for natural ventilated glasshouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 179 ~ 183. (in Chinese)
- 5 李式军. 设施园艺学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 84.
- 6 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 125.
- 7 李先庭, 李晓锋, 彦启森. 一种求解湿空气温度和相对湿度的 CFD 算法[J]. 暖通空调, 2000, 30(2): 66 ~ 68.
Li Xianting, Li Xiaofeng, Yan Qisen. CFD algorithm for wet air temperature and relative humidity calculation [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(2): 66 ~ 68. (in Chinese)
- 8 FLUENT Inc. FLUENT user's guide[M]. New Hampshire: Fluent Inc., 2003.
- 9 程秀花, 毛罕平, 伍德林, 等. 栽有番茄的玻璃温室内气流场分布 CFD 数值模拟[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2010, 31(5): 510 ~ 514.
Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Wu Delin, et al. CFD simulations of airflow distributions inside glasshouse with tomato crops [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(5): 510 ~ 514. (in Chinese)
- 10 Bartzanas T, Boulard T, Kittas C. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1 ~ 3): 207 ~ 221.

瓜采摘切割点精确空间定位。

(4)对采摘机器人远景定位系统进行补充,实

现了末端执行器的精确定位,试验结果表明,排除温

室复杂光照影响特殊情况,末端执行器定位精度达

到 2 mm,满足采摘作业要求。

参 考 文 献

1 Huanyu Jiang. Measurement of 3-D locations of ripe tomato by binocular stereo vision for tomato harvesting [C]. ASABE Annual International Meeting, Paper Number 084880, 2008.

2 Paula Tarrío. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-D stereoscopic vision [C]. Computers in Agriculture and Natural Resources, 4th World Congress Conference, Publication Number 701P0606, 2006.

3 Naoshi Kondo. A new challenge of robot for harvesting strawberry grown on table top culture [C]. ASAE Annual International Meeting, Paper Number 053138, 2005.

4 van Henten E J. Field test of an autonomous cucumber picking robot[J]. Biosystems Engineering, 2003,86(3): 305 ~ 313.

5 袁挺,李伟,谭豫之,等. 温室环境下黄瓜采摘机器人信息获取[J]. 农业机械学报,2009,40(10): 151 ~ 155.
Yuan Ting, Li Wei, Tan Yuzhi, et al. Information acquisition for cucumber harveating robot in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(10):151 ~ 155. (in Chinese)

6 Kondo N, Nishitsuji Y, Ling P P, et al. Visual feedback guided robotic cherry tomato harvesting[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(6):2331 ~ 2338.

7 van Henten E J, Hemming J, van Tuijl B A J, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. Autonomous Robots,2002,13(3):241 ~ 258.

8 Duke M. Feedback control of manipulator using machine vision for robotic apple harvesting[C]. ASAE Annual International Meeting, Paper Number 053114, 2005.

9 Blasco J. Robotic weed control using machine vision[J]. Biosystems Engineering,2002,83(2): 149 ~ 157.

(上接第 179 页)

11 Campbell G S. An introduction to environmental biophysics[M]. New York: Springer, 1977: 159.

12 Monteith J L, Unsworth M H. Principle of environmental physics[M]. 2nd ed. London: Edward Arnold,1990: 291.

13 吴德铭,郜治. 实用计算流体力学基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2006: 121.

14 Miguel A F. Airflow through porous screens: from theory to practical considerations [J].Energy Building, 1998, 28(1):63 ~ 69.

15 Brundrett E. Prediction of pressure drop for incompressible flow through screens [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1993, 115(2):239 ~ 242.

16 丁为民,汪小昂,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)