

单栋塑料温室内多因子综合 CFD 稳态模拟分析\*

郝飞麟<sup>1</sup> 沈明卫<sup>2</sup> 何勇<sup>2</sup> 冯雷<sup>2</sup>

(1. 浙江树人大学生物与环境工程学院, 杭州 310015; 2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

**摘要:** 为分析单栋塑料温室内的综合环境:气流场、温度场、湿度场、CO<sub>2</sub> 浓度场,建立了包括温室内外空间、室内作物和土壤层等的温室环境几何模型。将温室内的湿空气看作水蒸气、CO<sub>2</sub> 和干空气的混合气体,在分析温室中太阳辐射、作物与环境的质热交换,动量及质能传递过程的基础上,对单栋塑料温室内的环境因子进行了稳态模拟。温室内热辐射传递过程采用蒙特卡罗法模拟方法;将室内作物简化为连续固体换热模型,采用剪应力输运模型(SST)表述温室内的空气紊流。结果显示:温室通风对温度、湿度和 CO<sub>2</sub> 分布的影响很大,温室内部上风向温度低,湿度小,同时 CO<sub>2</sub> 浓度也不高;温室下风向作物冠层的环境未达到优化状态;模型的预测值低于实测值,但变化规律相似,温度、湿度、CO<sub>2</sub> 含量的预测相对误差分别低于 8%、6% 和 7%。

**关键词:** 单栋塑料温室 温度场 湿度场 CO<sub>2</sub> 浓度 多因子综合分析 稳态模拟

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0297-08

引言

温室内作物-环境之间的预测和调控是一个涉及多因子的耦合系统,由于各环境因子的变化相互牵制,分析研究比较繁复。随着计算流体力学(CFD)求解技术的发展以及在农业领域的应用<sup>[1-7]</sup>,越来越多的研究者利用这一工具对设施农业环境进行了研究探索<sup>[2-10]</sup>。由于温室系统需要考虑的因素多并且过程比较复杂,因此在已有研究中多以宏观能量(热)、质量(水分、CO<sub>2</sub>)守恒方程为理论基础<sup>[3,6,8-11]</sup>,考虑的目标因素往往较少<sup>[2-9]</sup>,与实际情况有一定的差别。

温度、湿度和 CO<sub>2</sub> 浓度对作物生长和作物病害等有直接的影响<sup>[1,9,11]</sup>,是温室环境研究和栽培实践中重要的管理和控制因子,这些因子在与气流运动、辐射、蒸发凝结、作物蒸腾与呼吸等过程中,遵循动量、质量、能量传递的相关定律,全面、详细的理论研究十分困难和繁复,因此在相关研究上多采用简化和假设<sup>[1-11]</sup>。本文拟在详细分析温室系统各部分质能传递过程的基础上,构建包含室内作物在内的温室环境微观模型,对我国南方地区广泛采用的单栋塑料温室内的温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度空间分布进行稳态模拟分析和实验,以了解和掌握温室的环境变化特点,提高温室环境管理水平。

1 几何模型

为使模拟参数便于与实测值比较,选择位于杭州市农业科学研究院实验基地的一座尺寸(长×宽×高)为 25.0 m×7.0 m×4.0 m 的单栋塑料温室为研究对象,其具体结构及尺寸见图 1,温室屋脊呈东西走向,配有两侧窗和顶窗,室内栽有结果前期的 3 行番茄,每行的高度实测平均为 1.23 m,宽度平均 1.5 m,行间距平均 0.6 m。计算分析区域包含与温室接触的一部分外部空间,外部空间的尺寸(长×宽×高)为 175.0 m×49.0 m×16.0 m,比按照流体力学理论推荐的外部计算空间尺寸要大<sup>[7-8]</sup>。温室覆盖材料为 LDPE,厚度为 0.12 mm。土壤层计算厚度的确定采用实验的方法,将不同深度土壤的温度进行测量,取全天温度随时间变化小于 1.0℃的那一层的深度作为计算厚度,在实验周的测量值为 1.1 m。

网格的划分采用非结构化四面体网格,结构界面处、结构壁面处、进出口处采用加密处理,以适应精细分析,整个计算分析域的几何模型共划分网格 4 018 454 个,其中温室结构 1 103 255 个。网格质量检验使用 Ansys CFX<sup>®</sup> 程序的网格统计分析功能,3 项指标(网格正交角度,网格最大与最小控制体积比,盘面比)均合格,优质比例为 88%、90%、100%。

收稿日期: 2013-10-04 修回日期: 2013-11-05

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100705)

作者简介: 郝飞麟,高级工程师,主要从事环境工程研究,E-mail:haofeilin@qq.com

通讯作者: 沈明卫,副教授,主要从事农业生物环境工程研究,E-mail:shendu@zju.edu.cn

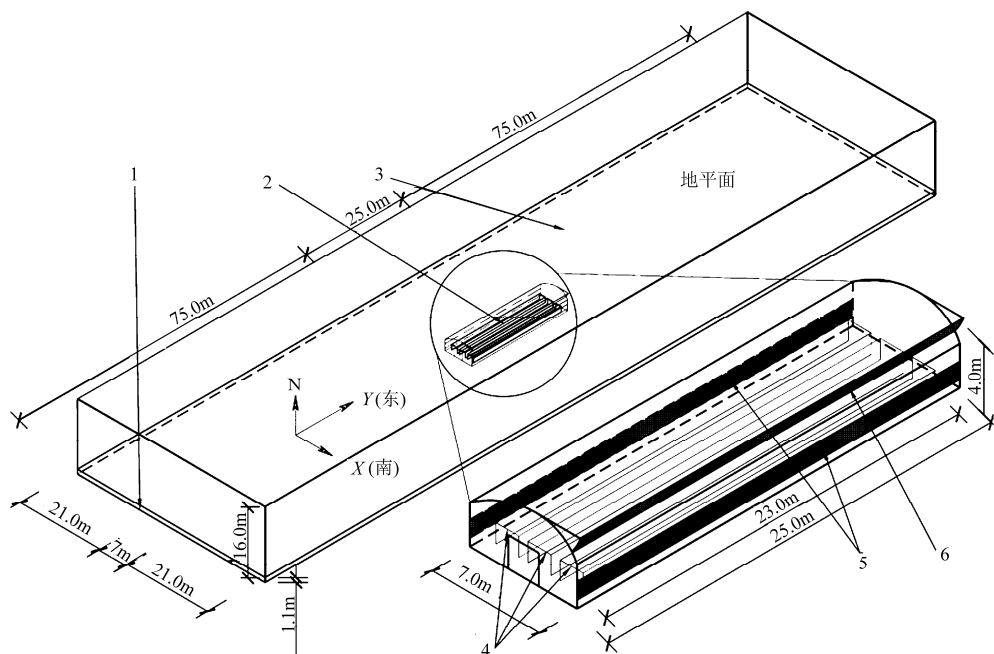


图 1 温室计算几何模型

Fig.1 Schematic view of the simulated greenhouse

1. 温室下部土壤 2. 单栋塑料温室 3. 温室外部计算域 4. 番茄植株 5. 侧窗 6. 顶窗

2 模拟理论

温室内空气简化为含水蒸气和 CO<sub>2</sub> 的湿空气,多组分气体可以按单相流来处理,也可看作是由空气、水蒸气和 CO<sub>2</sub> 组成的多相流<sup>[12]</sup>来模拟。本文将其视作多组分的单相流,这样可以将热辐射模型包含在内。其控制方程为在 N-S 方程基础上,增加质量守恒传输控制方程<sup>[12]</sup>。

传输控制方程

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_i U_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_j (U_{ij} - U_j) - \overline{\rho_i'' U_j''}) + S_i$$

(1)

其中  $U_j = \sum (\rho_i U_{ij}) / \bar{\rho}$   
式中  $\rho_i$ ——单位混合气体体积中  $i$  组分的质量, kg/m<sup>3</sup>  
 $U_{ij}$ ——混合气体中  $i$  组分的质量平均速度矢量, m/s  
 $U_j$ ——研究对象的质量平均速度场矢量  
 $\bar{\rho}$ ——混合气体某时刻的平均密度, kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_i (U_{ij} - U_j)$ —— $i$  组分相对于混合气体的相对质量流量, kg/s  
 $\overline{\rho_i'' U_j''}$ —— $i$  组分的平均质量流量, kg/s  
 $S_i$ —— $i$  组分的源项

组分守恒方程

$$\sum_{i=1}^{N_c} Y_i = 1$$

(2)

其中  $Y_i = \rho_i / \bar{\rho}$   
式中  $Y_i$ —— $i$  组分的质量分数  
能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j H) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \sum_i^{N_c} \Gamma_i h_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} + \frac{\mu_i}{Pr_i} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_E$$

(3)

式中  $H$ ——混合气体的焓, J  
 $p$ ——混合气体压力, Pa  
 $\lambda$ ——混合气体的热传导率, W/(m·K)  
 $T$ ——混合气体的温度, K  
 $\Gamma_i$ —— $i$  组分的分子扩散系数, kg/(m·K)  
 $h_i$ —— $i$  组分的焓, J  
 $\mu_i$ ——气体的湍流粘度, Pa/s  
 $Pr_i$ ——气体的湍流普朗特数  
 $S_E$ ——能量源, W/s

以流体及流体控制方程为基础,分析温室环境各部分的能量输入输出过程,补充相应方程,构建温室环境湿热模型。温室各部分主要热交换类型见表 1。

2.1 太阳辐射

太阳辐射包括散射光与直射光,其直射光线的入射角度为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} \cos \theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h \\ \cos \alpha = (\sin \delta - \sin \varphi \cos \theta) / (\cos \varphi \sin \theta) \end{cases}$$

(4)

其中  $\sin \delta = 0.397\,95 \cos(0.985\,63(N - 173))$   
式中  $\theta, \alpha$ ——太阳的天顶角和方位角, (°)

表 1 模型中温室环境系统组成各部分之间的热交换类型

Tab.1 Heat exchange type between different components of greenhouse environment system

| 环境组成 | 太阳 | 周围大气  | 覆盖材料  | 室内空气  | 室内作物  | 下部土壤  |
|------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 太阳   |    | 辐射    | 辐射    | 辐射    | 辐射    | 辐射    |
| 周围大气 | 辐射 |       | 辐射、对流 | 辐射、对流 | 辐射、对流 | 辐射、对流 |
| 覆盖材料 | 辐射 | 辐射、对流 |       | 辐射、对流 | 辐射    | 辐射    |
| 室内空气 | 辐射 | 辐射、对流 | 辐射、对流 |       | 辐射、对流 | 辐射、对流 |
| 室内作物 | 辐射 | 辐射    | 辐射    | 辐射、对流 |       | 辐射、传导 |
| 下部土壤 | 辐射 | 辐射、对流 | 辐射    | 辐射、对流 | 辐射、传导 |       |

$\varphi$ ——当地纬度, 试验场所 GPS 实测为 30. 272°N  
 $\delta$ ——太阳赤纬, (°)  
 $N$ ——计算时的天数, 从 1 月 1 日算起  
 $h$ ——时角, 正午为 0, 一天变化  $2\pi$ ,  $[-\pi, \pi]$  对应 0 ~ 24 h

太阳辐射的强度用太阳辐射仪测量, 其中散射光线占总辐射的量估计为 0. 31<sup>[13]</sup>。

2.2 热辐射

温室系统各组成部分发出的总热辐射按黑体的热辐射近似<sup>[12]</sup>为

$$E_b(T) = n^2 \sigma T_1^4 \tag{5}$$

式中  $n$ ——物体材料的折射率  
 $\sigma$ ——斯特藩-玻尔兹曼常数  
 $T_1$ ——物体的绝对温度, K

其中  $\sigma = 5. 669\ 6 \times 10^{-8}\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

通过空间任意面的辐射热流为

$$q^R(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{n}) = \int_0^\infty \int (s, \boldsymbol{n}) I_\nu(\boldsymbol{r}, s) \text{d}\Omega_s \text{d}\nu \tag{6}$$

式中  $\boldsymbol{r}$ ——参考坐标系下面的位置向量  
 $\boldsymbol{n}$ ——参考坐标系下面的法向量  
 $\boldsymbol{s}$ ——参考坐标系下面的方向向量  
 $I_\nu(\boldsymbol{r}, s)$ ——随面位置和方向变化的辐射强度,  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $\nu$ ——辐射(电磁波)频率, Hz  
 $\Omega$ ——空间物体角度

计算时, 假定各参与换热的物体均为灰体, 即其辐射发射、发射、吸收强度与入射辐射的频率无关。

当辐射(电磁波)通过由两物体接触的交界面时, 电磁波发生折射和反射<sup>[12]</sup>, 界面反射率为

$$\rho_r = \frac{1}{2} \left( \frac{\tan^2(\theta_{r1} - \theta_{r2})}{\tan^2(\theta_{r1} + \theta_{r2})} + \frac{\sin^2(\theta_{r1} - \theta_{r2})}{\sin^2(\theta_{r1} + \theta_{r2})} \right) \tag{7}$$

式中  $\theta_{r1}$ 、 $\theta_{r2}$ ——电磁波在物质 1 和 2 中的反射角(对应入射角和折射角)

热辐射(电磁波)在温室系统中的传播过程(透射、吸收、反射)十分复杂, 精确的辐射传输方程的求解和计算十分困难, 目前多采用近似计算的方法<sup>[6, 12, 14]</sup>, 由于有与固体(温室覆盖层、土壤等)之间

的辐射换热, 离散坐标(DO)法求解不再适用<sup>[12]</sup>, 本文采用蒙特卡罗(Monte Carlo model)方法进行近似求解, 可以达到与 DO 相当或更高的精度<sup>[12, 15]</sup>。

2.3 水分交换及作物与周围环境的热交换

在增加水蒸气的换热模型后, 温室內栽培作物与周围物质的热交换可以从其机理上进行模拟: 作物热辐射、作物蒸腾及呼吸传质引起的对流、辐射和潜热交换过程。作物的蒸腾可用 Penman - Monteith 公式估计其水蒸气产生量<sup>[3-4, 11, 16]</sup>

$$E_t = \frac{\Delta R_n^{crop} + \frac{\rho_a C_p}{r_{ac}} [e_s(T_i) - e_i(t)]}{\lambda_w \left[ \Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_{ac}} \right) \right]} \tag{8}$$

其中  $\Delta = \frac{2\ 504\ 000}{(T_i - 35. 86)^2} e^{17. 27(T_i - 273. 16)/(T_i - 35. 86)}$   
 $e_s(T_i) = 610. 78 e^{[17. 269\ 4(T_i - 273. 13)]/[237. 3 + (273. 13 - T_i)]}$   
 $\lambda_w = 1\ 000 [2\ 500. 8 - 2. 366\ 8(T_i - 273. 13)]$

式中  $\Delta$ ——饱和水气压-温度曲线上的斜率, Pa/K  
 $T_i$ ——作物附近室内空气温度, 本文用每垄作物的平均温度代替, K

$R_n^{crop}$ ——作物冠层所得净辐射, 其取值通过调用辐射计算变量得到,  $\text{W}/\text{m}^2$

$\rho_a$ ——空气密度, 取  $1. 225\ \text{kg}/\text{m}^3$   
 $C_p$ ——空气定压比热容, 取  $1\ 006. 7\ \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$   
 $r_{ac}$ ——作物空气阻力, 用文献[17]附录推荐的公式计算, s/m

$e_s(T_i)$ ——冠层气温下的饱和水气压, Pa  
 $e_i(t)$ —— $t$ 时刻空气水蒸气压, Pa  
 $\lambda_w$ ——水的汽化潜热放热系数,  $\text{J}/\text{kg}$   
 $\gamma$ ——湿度计算常数, 取  $66\ \text{Pa}/\text{K}$   
 $r_s$ ——作物叶片的气孔阻力, 用文献[17]附录推荐的公式计算, s/m

温室通风研究时多将室内作物简化为网状体, 主要突出其对气流阻碍方面的作用与特性, 而宏观的换热研究多将其简化成“大叶”或“小叶”模型, 突出其与室内空气的对流换热特征<sup>[6, 14]</sup>。在模拟过程中, 由于网状体的假设很难将室内作物与温室其它组成部分之间的辐射换热包含在理论模型中, 因此

模拟中将室内作物简化为类似“大叶”的连续体,以充分考虑其对流和辐射换热过程。热传导存在于土壤与温室覆盖层以及温室土壤与作物根系,考虑到温室覆盖层与下部土壤接触面较小,其热传导可以忽略。室内作物根系与土壤的热传导过程复杂,相关研究也未涉及,研究中将其简化为土壤的导热率。

在栽培期间由于灌溉,温室内地面比较湿润,其水分蒸发不可忽略,其蒸发量可估算为<sup>[3]</sup>

$$E_s = \beta_s \frac{h_{sa} [e_s(T_s) - e_i(t)]}{\lambda_w \gamma} \tag{9}$$

式中  $\beta_s$ ——表征地面潮湿程度的系数,略潮湿,取 0.42<sup>[3]</sup>

$h_{sa}$ ——土壤表面与空气的对流换热系数,由经验公式计算,  $W/(m^2 \cdot K)$

$e_s(T_s)$ ——土壤表面温度下饱和水气压, Pa

由水分蒸发引起的显热与潜热计算详见文献[18]。

2.4 紊流模型

实验现场的风速实测值在 0.5 ~ 2.5 m/s 之间,相对于尺寸较大的温室计算域,雷诺数较低,前人的研究多采用高雷诺数的  $k - \varepsilon$  方程描述<sup>[6,14]</sup>。本文采用同属涡流粘度模型(Eddy-viscosity models)类的剪应力输运模型(Shear-stress-transport, SST)<sup>[12]</sup>,它是  $k - \varepsilon$  和  $k - \omega$  紊流模型的结合和改进,在预测流体与壁面的分离和低雷诺数近壁面流动方面有明显的优势<sup>[12]</sup>, SST 为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) &= \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \\ \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 + P_{\omega b} \end{aligned} \tag{10}$$

式中  $k$ ——紊流动能  $\omega$ ——紊流频率  
 $\mu_t$ ——紊流动力粘度  $\mu$ ——层流动力粘度  
 $\sigma_{k3} \beta', \sigma_{\omega 2}, \alpha_3, \beta_3$ ——模型混合常数,取值与  $F_1$  有关

$P_k$ ——由粘性力产生的紊流动能  
 $P_{kb}, P_{\omega b}$ ——浮力对紊流的影响因子  
 $F_1$ ——混合函数  
 $U_j$ —— $j$  方向的流体速度

2.5 作物与环境的 CO<sub>2</sub> 交换过程

温室的 CO<sub>2</sub> 交换主要围绕作物的光合作用过程和模型,同时考虑通风及室内土壤呼吸的 CO<sub>2</sub> 挥发,可表示为<sup>[19-20]</sup>

$$P_{CG} = \sin \left( \frac{\pi}{44} \right) (T - 7) \frac{I - 37.21}{7.0121 + 0.0568(I - 37.21)} \tag{11}$$

$$P_s = P_{s,0} 3^{(T - 273.15)/10} \tag{12}$$

式中  $P_{CG}$ ——番茄的光合速率,  $\mu mol/(m^2 \cdot s)$   
 $I$ ——作物冠层的平均光强,  $J/(m^2 \cdot h)$   
 $P_s$ ——土壤的呼吸强度,  $g/(m^2 \cdot s)$   
 $P_{s,0}$ ——土壤在 0℃ 时的 CO<sub>2</sub> 释放量,  $g/(m^2 \cdot s)$

3 温室内环境 CFD 模拟与分析

模拟采用 Ansys CFX® 12.1 进行,并将模拟结果与实验实测参数进行对照(2011 年 6 月 27 日和 6 月 20 ~ 30 日进行的现场实验,详见文献[18],在温室内 3 垄作物上部 0.2 m、1.4 m 处吊装两层自记录温湿度传感器(ZDR - F20),每层沿作物长度上均布 3 套,3 垄 2 层共 18 套(s111 ~ 113, s121 ~ 123, s131 ~ 133; s211 ~ 213, s221 ~ 223, s231 ~ 233),其中 s111 ~ 113 是南边垄离地 0.2 m 高度处依次距温室东部山墙 4.2 m、12.5 m 和 20.8 m 放置, s121 ~ 123 为中间垄离地 0.2 m 高度处依次距温室东部山墙 4.2 m、12.5 m 和 20.8 m 放置, s131 ~ 133 是西边垄离地 0.2 m 高度处依次距温室东部山墙 4.2 m、12.5 m 和 20.8 m 放置。相应地, s211 ~ 213、s221 ~ 223、s231 ~ 233 分别为离地 1.4 m 处的对应点。采用泵吸式红外二氧化碳检测仪测定 CO<sub>2</sub> 体积分数(分辨率为  $1 \times 10^{-6}$ ),一些环境参数如大气温度、湿度、风速、太阳辐射、地温等取自现场实验时的气象站(PC - 3)、辐射仪(PC - 2GL)和土壤温度计记录的数据。大气温度在计算域高度方向上取定值,室外风速在高度方向上按对数规律分布<sup>[14]</sup>,风向南偏西 15°。太阳辐射有直射和散射两部分,直射部分的角度按式(4)计算,方向向量为(0.305, 0.952, 0.759)。模拟的一些主要初始条件、参数取值、模型选取见表 2。温室的部分模拟结果见图 2 ~ 7,模拟预测值与实测值的对比见表 3。

图 2 为温室两个典型截面上空气流速向量,其中图 2a 表示温室中部垂直纵截面上的流速矢量,左边为南,为外界风吹来的方向,配有侧窗和顶窗,右侧为北,配有侧窗。可以看到有比较明显的环流运动:气流从南边侧窗、顶窗流入(顶窗流入气流速度相对较大),一部分受温室阻挡向上,一部分在温室内形成一个先上后下的较为规则的流动,然后从北部侧窗流出,气流速度有所提高,带走温室内的热量和水蒸气;气流受温室形状和室内作物影响,产生几个明显的小环流:分别为作物之间、作物与温室壁面

表 2 模拟的一些设置和参数取值

Tab.2 Model settings and parameters in the simulation

| 项目     | 取值及设置                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 温室覆盖材料 | 密度 $\rho=900\text{ kg/m}^3$ ; 定压比热容 $C_p=2\,550\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ; 导热率 $\lambda=0.29\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ; 折射率 $n=1.7$ ; 吸收率 $\alpha=0.1$ ; 反射率 $r=0.1$                                                                                                                           |
| 温室下部土壤 | 密度 $\rho=1\,600\text{ kg/m}^3$ ; 定压比热容 $C_p=2\,200\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ; 导热率 $\lambda=0.80\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ; 折射率 $n=1.92$ ; 吸收率 $\alpha=0.88$ ; 反射率 $r=0.12$                                                                                                                     |
| 室内作物番茄 | 与空气混合后密度 $\rho=560\text{ kg/m}^3$ ; 定压比热容 $C_p=2\,100\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ; 导热率 $\lambda=0.19\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ; 折射率 $n=2.77$ ; 吸收率 $\alpha=0.45$ ; 反射率 $r=0.1$                                                                                                                   |
| 室内室外空气 | 密度 $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$ ; 定压比热容 $C_p=1\,006.7\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ; 导热率 $\lambda=0.024\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ; 折射率 $n=1.0$ ; 吸收率 $\alpha=0.15$ ; 反射率 $r=0$ ; $C_p(\text{CO}_2)=851\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$                                                                   |
| 环境参数   | 初始气温 $T_a=27.8^\circ\text{C}$ ; 初始大气压 $p=101\,325\text{ Pa}$ ; 土壤深层温度 $T_s=20.8^\circ\text{C}$ ; 太阳辐射强度 $0.57\text{ MJ/(m}^2\cdot\text{h)}$ ; 离地 $10\text{ m}$ 处风速 $u_{\text{wind}}=1.79\text{ m/s}$ ; 室/内外初始空气平均相对湿度: $82\%/64\%$ ; 室内/外初始 $\text{CO}_2$ 浓度: $6.90\times10^{-4}/4.30\times10^{-4}$ |
| 模拟模型   | 空气: 变组分单相流处理 (Variable Composition Mixture), NS 方程, SST 紊流, Density Difference Model 浮力; Monte Carlo Model 换热/热辐射。其它: 蒸发/蒸腾; 呼吸等                                                                                                                                                                    |
| 求解方法   | 有限体积法, 全隐式多网格耦合求解                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 求解方案   | 高分辨率, 双精度                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 收敛准则   | RMS, $1.0\times10^{-4}$                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 迭代参数   | 步长 $1\text{ s}/100\text{ s}$ ; 步数: 675                                                                                                                                                                                                                                                              |

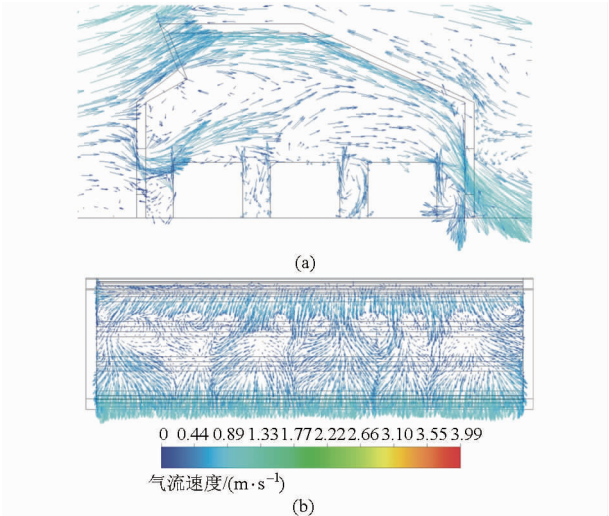


图 2 温室内部典型截面上的风速矢量图

Fig.2 Wind flow vector in typical section of greenhouse

(a) 温室中部横截面 (b) 温室距地 1.4 m 高的水平截面

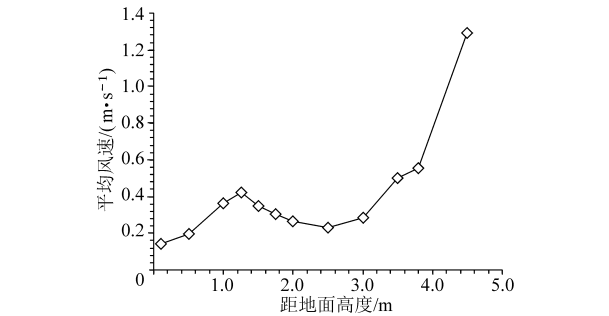


图 3 温室内平均风速沿高度变化模拟曲线

Fig.3 Modeled vertical profile of mean wind speed

之间、温室右侧肩部和中间作物冠层上部。由于外界风速较小,温室内部紊流并不剧烈,整体比较平顺。图 2b 为温室内距地面 1.4 m 高度水平截面上的气流矢量,上部为南,下部为北,可以看出气流从

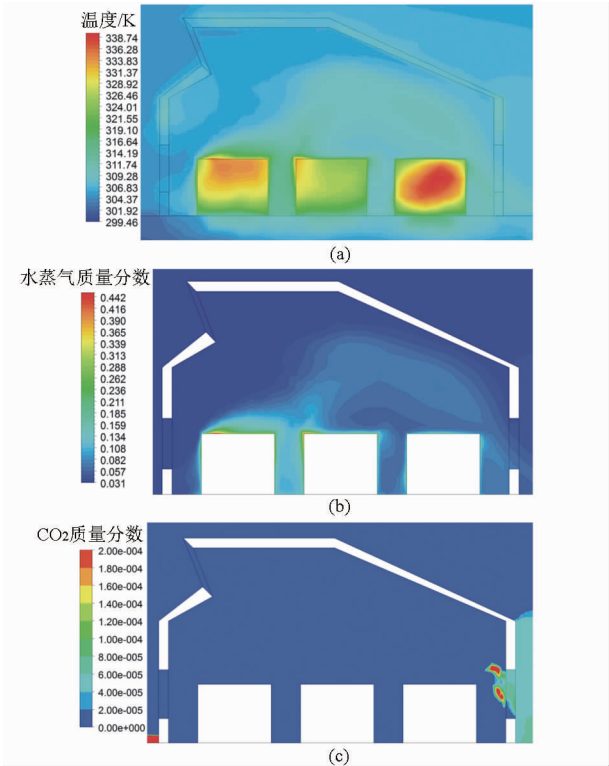


图 4 温室中部横截面上的温度、含水量、CO<sub>2</sub> 质量分数分布情况

Fig.4 Temperature, water vapour mass fraction and CO<sub>2</sub> mass fraction contour in middle section of the greenhouse

(a) 温度分布 (b) 水蒸气含量分布 (c) CO<sub>2</sub> 质量分数分布

上部平缓地流入,在下部侧窗流出,受作物及高度方向环流的影响,尤其是第一垄作物的影响,气流形成多个环流,呈现总体规则、局部相对复杂的流动状态;图 3 所示为温室内部的平均流速随高度变化的情况,可以发现温室内的平均风速低于室外风速(4.5 m 高度),温室内的风速在地表面附近较低,然

后随着高度的增加逐渐增大,在作物冠层偏下部达到最高,此时的空气流动以紊流为主,然后逐渐下降,在距离地面 2.5 m 处又开始增加,急速上升至最大(温室靠近顶窗的顶部),此时的平均风速仍远低于外界风速。模拟结果显示:温室内平均风速为 0.31 m/s(最大风速 1.76 m/s),外部计算空间平均风速 1.19 m/s,室内平均风速比室外减小 70% 以上。

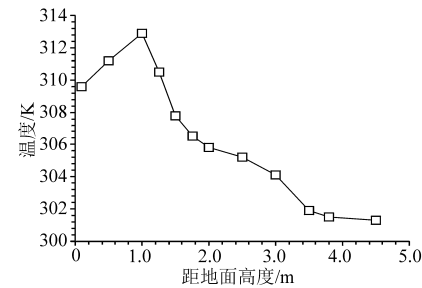


图5 温室内平均温度沿高度变化模拟曲线  
Fig.5 Modeled vertical profile of mean temperature

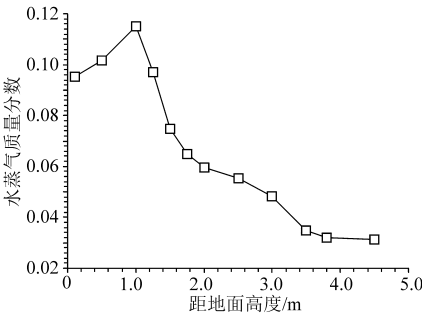


图6 温室内水蒸气平均含量沿高度变化模拟曲线  
Fig.6 Modeled vertical profile of mean water mass fraction

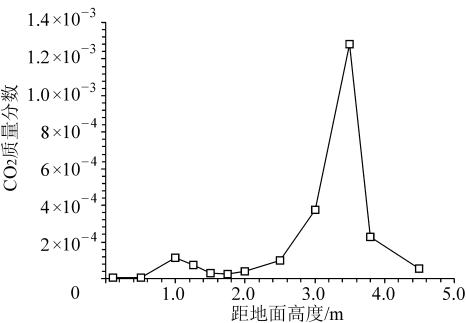


图7 温室内 CO<sub>2</sub> 平均含量沿高度变化模拟曲线  
Fig.7 Modeled vertical profile of mean CO<sub>2</sub> mass fraction

图 4a 所示为温室中部纵截面上的温度分布情况,呈现作物区域温度高、作物上层温度低且相对均匀的特点,与温室中部纵截面气流对照可以发现,南边靠近进风侧窗和顶窗的区域的温度明显比气流流出温室的区域低,尤其是温室顶部,而通常情况下实测时温室顶部的温度会相对较高,而模拟中温度顶部温度低的原因主要是通风带来温度转移的结果所致。在温室下风侧的作物及周边区域出现相对较高温度,这与实际观察得到的结果相符。图 5 为温室

内部的平均温度随高度变化的情况,温室冠层区域的温度比室外气温高 6℃ 左右,最高温度出现在作物冠层部位,地面附近温度高于温室顶部;从模拟的数据发现:温室内空气的温度变化幅度较大,室内平均气温 31.2℃,90% 以上的气温数据的差别在 6.3℃ 以内。

图 4b 所示为温室中部纵截面上水蒸气质量相对含量的分布云图(水蒸气质量与干空气质量之比)。总体上看水蒸气的含量受气流影响较大,温室上部区域空气的水蒸气含量较下部低且分布均匀,水蒸气含量高的区域主要集中在温室中部作物垄的两侧和上部,温室出风口侧由于气流速度较高,与外界交换量较大因而水蒸气含量相对低些。作物垄间及上部高湿的环境对作物生长不利。模型虽考虑了由于密度差引起的流体组分上浮,但从结果来看水蒸气的上升运动不明显,可能是由于室内气流的流动减弱了这种效果。图 6 为温室内部的水蒸气含量随高度变化的情况,与温度的变化一致,最大值出现在作物冠层周围,其相对湿度高于室外 20% 左右。从模拟结果来看,室内空气平均相对湿度变化范围为 63% ~ 100%,平均为 91%。

图 4c 为温室中部纵截面上 CO<sub>2</sub> 质量分数的分布情况,可以发现其分布比较均匀,气流对其分布有一定的影响,室内较高的浓度出现在下风向,由气流运动造成的浓度在出风口侧窗附近。图 7 为温室内部的 CO<sub>2</sub> 含量随高度变化的情况,可见温室内部 CO<sub>2</sub> 的浓度(尤其是作物冠层区)总体上与室外相近,但相对较高浓度区域不在作物生长需要的地方,这也说明温室 CO<sub>2</sub> 管理的复杂性。

表 3 所列为温室内撷取 6 个测点的温室环境参数模拟值与实测值的对照。可见,模型的预测值与实测值的变化规律相似,总体上模拟预测值偏低一些,温度预测的相对误差小于 8%(以℃ 计算),水分含量预测的相对误差不超过 6.0%(以相对湿度计算),CO<sub>2</sub> 含

表 3 温室内参数实测值与理论模拟值的对比  
Fig.3 Simulated and measured values  
inside the greenhouse

| 测量点                         | S112    | S122    | S132    | S212    | S222    | S232    |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 湿度模拟值/%                     | 77      | 80      | 92      | 82      | 83      | 66      |
| 湿度测量值/%                     | 81      | 84      | 97      | 85      | 85      | 70      |
| 温度模拟值/℃                     | 30.8    | 331     | 30.4    | 34.9    | 34.3    | 31.2    |
| 温度测量值/℃                     | 28.5    | 30.7    | 28.0    | 32.5    | 32.3    | 30.3    |
| CO <sub>2</sub> 质量分数<br>模拟值 | 0.072 1 | 0.068 4 | 0.069 2 | 0.057 5 | 0.054 9 | 0.055 1 |
| CO <sub>2</sub> 质量分数<br>测量值 | 0.075 2 | 0.073 0 | 0.073 5 | 0.062 0 | 0.058 7 | 0.058 9 |

量预测的相对误差小于7% (以  $\mu\text{mol/mol}$  计算),但绝对误差相对较大,这很可能是由于将作物作无差异性的、简化为固体的假设所造成的。

#### 4 结论

(1) 在分析温室环境各组成部分湿热交换过程的基础上,利用 CFD 手段对温室内的温度、湿度和  $\text{CO}_2$  浓度同时耦合预测进行了探索,其中将温室内的湿空气看作水蒸气、 $\text{CO}_2$  和干空气的混合气体。结果显示,温室通风对温度、湿度和  $\text{CO}_2$  分布的影响很大,温室内部上风向温度低,湿度小,同时  $\text{CO}_2$  浓度也不高;温室下风向的作物冠层区域的环境未达

到优化的状态。

(2) 探索了利用蒙特卡罗法跟踪热辐射的传递过程,并尝试了将温室内栽培作物简化为连续固体模型进行换热考虑,紊流模型采用 SST 模型。将模型的预测值与实测对比发现,各参数的预测值普遍低于实测值,但变化规律基本相同,其中温度、湿度、 $\text{CO}_2$  含量的预测相对误差分别低于8%、6%和7%。

(3) 温室热环境涉及内容较多且耦合性较强,CFD 技术的优越性表明其在这方面具有极大的发展潜力,但基础的试验研究如作物与周围介质的微观质能交换以及作物合适模型的探索对预测精度有重要的作用。

#### 参 考 文 献

- 1 Bartzanas T, Kacira M, Zhu H, et al. Computational fluid dynamics applications to improve crop production systems [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93:151 – 167.
- 2 程秀花,毛罕平,倪军. 温室环境-作物湿热系统 CFD 模型构建与预测[J]. 农业机械学报, 2011,42(2):173 – 179. Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Ni Jun. Numerical prediction and CFD modeling of relative humidity and temperature for greenhouse-crops system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2):173 – 179. ( in Chinese)
- 3 何芬,马承伟,张俊雄. 温室湿度动态预测模型建立与实验[J]. 农业机械学报, 2009,40(10):173 – 177. He Fen, Ma Chengwei, Zhang Junxiong. Dynamic forecasting model of humidity in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10):173 – 177. ( in Chinese)
- 4 吴飞青,张立彬,胥芳,等. 机械通风条件下玻璃温室热环境数值模拟[J]. 农业机械学报,2010, 41(1):153 – 158. Wu Feiqing, Zhang Libin, Xu Fang, et al. Numerical simulation of the thermal environmental in a mechanically ventilated greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):153 – 158. ( in Chinese)
- 5 Keesung Kim, Leong-Yeol Yoon, Hyuck-Jin Kwon, et al. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2):245 – 255.
- 6 Pierre-Emmanuel Bournet, Thierry Boulard. Effect of ventilation configuration on the distributed climate of greenhouse: A review of experimental and CFD studies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2):195 – 217.
- 7 Boulard T, Fantnassi H, Roy J C, et al. Effect of greenhouse ventilation on humidity of inside air and in leaf boundary-layer[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125(3 – 4):225 – 239.
- 8 毕玉革,麻硕士,崔红梅,等. 北方干寒地区日光温室  $\text{CO}_2$  预测模型建立与动机试验[J]. 农业机械学报,2010, 41(12):183 – 189. Bi Yuge, Ma Shuoshi, Cui Hongmei, et al. Forecasting model of  $\text{CO}_2$  concentration of solar greenhouse in the northern drought cold area and experimental verification in winter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):183 – 189. ( in Chinese)
- 9 Klaring H P, Hauschild C, Heibner A, et al. Model-based control of  $\text{CO}_2$  concentration in greenhouse at ambient levels increases cucumber yield[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143:208 – 216.
- 10 高志奎,高荣孚,何俊萍,等. 温室茄子 (*Solanum melongena* L.) 光合数学模型与光合生化模型模拟分析[J]. 生态学报, 2007, 27(6):2265 – 2271. Gao Zhikui, Gao Rongfu, He Junping, et al. Analysis of photosynthetic simulation by a biochemical model or mathematical model in greenhouse eggplant[J]. ACTA Ecological Sinica, 2007, 27(6):2265 – 2271. ( in Chinese)
- 11 Teitel M, Atias M, Barak M. Gradient of temperature, humidity and  $\text{CO}_2$  along a fan-ventilated greenhouse [J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2):166 – 174.
- 12 ANSYS Inc. ANSYS CFX Manual [M]. ANSYS Inc., 2009.
- 13 李万彪. 大气物理-热力学与辐射基础 [M]. 北京:北京大学出版社,2010:177 – 180.
- 14 Tomas Norton, Da-Wen Sun, Jim Grant, et al. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(12):2386 – 2414.
- 15 吴真,贺俊芳,吴登科,等. 蒙特卡罗模拟光通过大气后的时间分布[J]. 强激光与粒子束,2011, 23(3):779 – 782. Wu Zhen, He Junfang, Wu Dengke, et al. Simulation of transmitted light through atmosphere by Monte Carlo method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3):779 – 782. ( in Chinese)
- 16 Boulard T, Fantnassi H. Effect of greenhouse ventilation on humidity of inside air and in leaf boundary-layer[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125(3 – 4):225 – 239.

17 Majdoubi H, Boulard T, Fatnassi H, et al. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6-7):1050-1062.

18 郝飞麟,沈明卫,张雅. 单栋塑料温室内温度场 CFD 三维稳态模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(12):222-228.  
Hao Feilin, Shen Mingwei, Zhang Ya. 3-D steady simulation of temperature pattern inside single plastic greenhouse using CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):222-228. (in chinese)

19 侯加林. 温室番茄生长发育模拟模型研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.

20 董仁涛. 日光温室 CO<sub>2</sub> 浓度预测模型[D]. 北京:中国农业大学,2005.

# Three Dimensional Steady Simulation of Microclimate Pattern inside Single Plastic Greenhouse Using Computational Fluid Dynamics

Hao Feilin<sup>1</sup> Shen Mingwei<sup>2</sup> He Yong<sup>2</sup> Feng Lei<sup>2</sup>

(1. College of Biology and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China  
2. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** To explore the microclimate factors, such as air-flow, temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration inside a single-span plastic greenhouse, an environmental model was established including components of greenhouse such as inner and outer space, plant and soil layer, etc. The air was assumed to be composed of dry gas, water vapor and CO<sub>2</sub>. Based on the solar radiation, mass-thermal exchange of plant-environment, transmitting process of energy and momentum of various parts, three dimensional simulation was executed to predict the pattern of temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration. The Monte Carlo method was adopted in the model of thermal-radiation transport process. Plant was simplified as continuous solid medium, and shear stress transport (SST) model was used in air turbulence analysis. The results showed that the ventilation pattern had an obvious effect on distribution of temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration. The values of temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration in upwind area were low, and the environment in downwind area was not favorable for crop growing. Generally, the predicted values were a little lower than those of the measured, while the trend was similar. The relative error values of temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration were less than 8%, 6% and 7%, respectively.

**Key words:** Single-span plastic greenhouse Temperature Humidity CO<sub>2</sub> concentration Multi-factor generalized analysis Steady simulation