

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.035

南方连栋塑料温室冬季通风除湿开窗优化^{*}

何科爽¹ 孙丽娟² 黄震宇¹ 刘正鲁³ 陈大跃¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081;
3. 上海孙桥现代农业园区, 上海 201210)

【摘要】 连栋塑料温室主要依靠日光蓄热, 冬季为保温需要长时间密闭以避免室内热量流失, 这就导致室内形成高湿环境, 使栽培作物易患病虫害。以有效除湿和减小室内热量损失为目标, 以十一连栋塑料温室为研究对象, 建立全尺度计算流体力学模型(CFD模型)。在顶窗通风工况下, CFD模型的有效性经实验数据验证, 其计算值与各测点湿度的实验值变化趋势吻合, 且差异在5%以内; 并利用该模型研究了不同开窗组合(侧窗、顶窗和顶窗加侧窗)对温室内空气流场和湿度场的影响。仿真结果表明, 顶窗通风是一种较理想的通风组合, 能够在3 min内完成作物冠状层的除湿。除湿结束后, 室内平均相对湿度从92%降至68%, 湿度分布均衡性较好, 且热损失较小, 能满足冬季温室保温、除湿的要求。

关键词: 连栋塑料温室 除湿 自然通风 计算流体力学

中图分类号: S625 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0186-06

Optimization of Vent Configuration for Ventilation Dehumidification in Multi-span Plastic Greenhouses

He Keshi¹ Sun Lijuan² Huang Zhenyu¹ Liu Zhenglu³ Chen Dayue¹

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3. Sunqiao Modern Agricultural Development Zone, Shanghai 201210, China)

Abstract

Multi-span plastic greenhouses mainly depend on solar heat storage. In winter, greenhouse is closed for prolonged periods for thermal insulation to avoid indoor heat being lost. Therefore, this would lead to indoor high humidity and consequently the occurrence of crop diseases. For making a good compromise between dehumidification effectiveness and indoor heat loss prevention, a full-scale computational fluid dynamics (CFD) model was developed based on an 11-span plastic greenhouse. Firstly, the model was validated by comparing experimental humidity with CFD simulations under roof ventilation. CFD simulations had similar trends to those of the experiments, with less than 5% difference. Then, the validated model was used to investigate the influences of vent configurations (i. e. side, roof and side plus roof) on the airflow pattern and humidity field inside the greenhouse. Simulations showed that roof ventilation tended to be the best. With the roof ventilation, dehumidification in the crop canopy could be achieved in 3 min. After dehumidification, relative humidity was reduced from 92% to 68% and indoor humidity homogeneity was good. Moreover, responding heat loss was less. Therefore, this ventilation mode is able to meet the requirements of thermal insulation and dehumidification under winter climate conditions.

Key words Multi-span plastic greenhouse, Dehumidification, Natural ventilation, Computational fluid dynamics

收稿日期: 2011-11-30 修回日期: 2012-01-15

^{*}上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字(2009)第8-1号)

作者简介: 何科爽, 博士生, 主要从事温室环境控制、温室小气候数值模拟研究, E-mail: lovejessie@sjtu.edu.cn

通讯作者: 陈大跃, 教授, 博士生导师, 主要从事农业装备、温室智能控制研究, E-mail: dychen@sjtu.edu.cn

引言

湿度是影响温室作物生长重要的环境因子之一。由于栽培作物的蒸腾作用,温室内空气易趋于高湿状态。高湿环境会给作物生长带来诸多不利影响,如易生病虫害、钙缺失等^[1]。为维持适宜的湿度水平,需要用相应的除湿措施。当前,温室空气除湿有多种方法,如自然通风除湿^[2]、热泵除湿^[3]、机械通风结合热交换器除湿^[4]等。国内外研究主要集中在各除湿措施的除湿效果评估和相应能耗问题上^[5-7]。其中使用最广泛的是自然通风结合人工加热,这种除湿方法操作成本低,特别在冬季能满足温室除湿、保温的管理要求。

近十年来,连栋塑料温室由于具有种植面积大、建造成本低、结构简单等优点在长三角地区逐渐推广使用。然而这类温室通常缺乏除湿和保温设备,在冬季潮湿和寒冷的气候,一般依赖开窗通风来除湿,这就易导致室内热量的大量流失而使气温急剧下降。为有效解决温室冬季开窗兼顾作物除湿和保温的要求,本文建立连栋塑料温室二维 CFD 模型,以数值方法研究不同开窗组合(顶窗、侧窗及顶窗加侧窗)的温室内空气流动模式及对室内湿度场分布的影响,并通过对不同开窗组合通风效果(热量损失值、除湿效率等)的评估,最终确定最优的开窗通风组合和相应的通风时间。

1 数值建模

1.1 本构方程

连栋塑料温室由于尺度较大,其瑞利数较大,室内气流通常可认为是湍流流动^[8]。空气流动同时满足能量守恒方程、动量守恒方程、质量守恒方程,上述方程可用通用形式描述^[9]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}(\phi)) + S \quad (1)$$

式中 ϕ ——通用传输量 ρ ——流体密度
 \mathbf{u} ——流体速度矢量
 Γ ——广义扩散系数
 S ——广义源项

式(1)在直接计算湍流运动时对内存空间和计算速度的要求非常高,通常引入湍流模型进行简化处理。本文选择标准 $\kappa - \varepsilon$ 模型^[10]作为湍流模型。在温室通风研究中,该模型收敛性较好,且计算结果和实验数据有较好的吻合度^[11-12]。同时考虑到近壁区湍流未充分发展,故采用标准壁面函数法处理。激活 Boussinesq 模型,把温差引起的浮力升项加入到动量守恒方程的源项;激活组分模型,空气假设为

水蒸气和干空气的混合物,彼此之间没有发生化学反应。因此,通风过程中各组分的传输满足组分守恒定律。

1.2 几何建模和网格生成

考虑到实际风向和温室朝向几乎垂直,故三维模型可等效简化为二维^[13],计算量可大为减小。自然通风时,连栋塑料温室小气候环境受外界边界层气候的影响,因此建模时计算域将温室外的区域包括在内,其大小应以不影响温室内流场的特性为准,这里设为温室长、宽的 4 倍和 8 倍。为得到数值计算的网格无关解,反复尝试不同密度的网格,最终生成 440 789 个网格。温室内和外部的计算域网格尺寸分别为 0.1 m 和 0.3 m,网格类型分别是四边形和三角形的非规则网格,在流场梯度变化较大区域(如通风口、土壤等)进行局部网格加密,以便捕获这些重要区域的流场特征。

1.3 边界条件

模型求解的精度依赖边界条件的准确设定。进口边界:进口空气被认为是不可压缩的;计算域(迎风向)的入口为速度进口边界,大气边界层的风剖面符合对数规律,即^[14]

$$U_w = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{z+z_o}{z_o}\right) \quad (2)$$

$$u^* = \frac{Ku_h}{\ln((h+z_o)/z_o)} \quad (3)$$

式中 U_w ——外界风速 u^* ——摩擦速率
 u_h ——参考风速 z ——离地高度, m
 h ——参考高度,取 2 m
 K ——冯卡门系数,取 0.42
 z_o ——地面粗糙度,取 0.015 m

出口边界:出口的流体假设为已充分发展的流体,设为压力出口;计算域顶部:对称边界条件;覆盖物假定为绝热、无滑移的壁面,并忽视壁面厚度,认为内外侧温度相等。温室各栋的土壤温度假设为等温。边界条件主要是依据现场采集的实验数据,具体如表 1 所示。

防虫网以多孔介质来处理,其计算公式为 Darcy - Forcheimer 方程,防虫网的渗透率 C_f 和惰性因子 K_p 分别根据经验公式计算^[15]

$$K_p = 3.44 \times 10^{-9} \alpha^{1.6} \quad (4)$$

$$C_f = 4.3 \times 10^{-2} \alpha^{-2.13} \quad (5)$$

式中 α ——防虫网的孔隙率

温室内种植的番茄尚处于生长初期,作物较矮且蒸腾量小,故在模型中忽略作物的流阻特性以及和室内空气的热量耦合。

表1 CFD模型的边界条件

Tab.1 Boundary condition used in the CFD model

参数	数值
进口空气温度/°C	9.8
重力加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	9.81
空气密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.246
空气比热容 $C_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	1006
空气导热系数 $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	0.025
空气热扩散系数 β/K^{-1}	3.53×10^{-3}
空气动力粘度 $\mu/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	1.7722×10^{-5}
空气湍流强度/%	5
空气湍流尺度/m	3
外部土壤温度/°C	13
内部土壤温度/°C	18.7/19.6/20.4/21.3/22.4 (第1栋至第5栋)
薄膜温度/°C	12.6
侧墙温度/°C	11.6
隔离膜温度/°C	14.8
风速 $u/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.2
风向/(°)	92
防虫网渗透率 C_p/m^2	1.82×10^{-9}
防虫网惰性因子 K_p/m^{-1}	0.1017

1.4 求解步骤

整个求解过程分2个步骤:首先对CFD模型进行稳态求解,求解方式主要是利用分离求解器以求解压力耦合方程组的半隐式方法(Simple)进行迭代计算求解,先以一阶迎风格式计算,至收敛后以二阶迎风格式计算直到再次收敛为止。稳态求解结束后设置室内外温、湿度值作为初始条件,选用PISO算法进行非稳态计算,该算法在求解瞬态问题时有计算速度快、收敛性好等优势;时间离散选用一阶隐式。非稳态计算时采用固定步长计算,步长设为0.05 s。每次迭代的最大步数设为20步。求解时能量的残差收敛标准值为 10^{-6} ,其他变量的残差收敛标准值均为 10^{-3} 。数值仿真采用Ansys Workbench 12.0的Ansys Fluent作为通用CFD解算器,选择Gambit 2.3.16为前处理软件。数值仿真是在AMD phenom™ II 6 CPU,主频3.21 GHz,内存3.12 GB的计算机上进行。

2 实验

2.1 实验温室

实验温室为上海市浦东新区孙桥现代农业园区十一连栋塑料温室(北纬 $31^{\circ}18'$,东经 $121^{\circ}63'$),南北朝向。其覆盖物是0.12 mm厚的LDPE聚乙烯

膜。温室占地总面积 1980 m^2 ,长30 m,宽66 m,脊高4.3 m,檐高3 m。温室南北墙各有3扇门,所有侧墙均装通风窗;温室每栋圆拱屋面的两侧均装顶窗,除第1栋和第11栋只在单侧安装顶窗。窗口类型为1 m宽的卷膜式通风窗,且均安装了24目防虫网(网线直径:0.22 mm,网孔尺寸:1 mm×1 mm)。温室结构及室内测点的布局如图1所示。

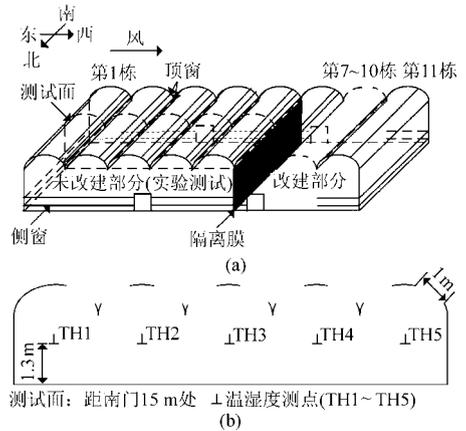


图1 连栋塑料温室示意图

Fig.1 Schematic diagram of the multi-span greenhouse

(a) 结构图 (b) 测点布局图

由图可知,温室分改建部分和未改建部分,用塑料膜隔离。隔离膜为0.1 mm厚的LDPE聚乙烯膜。与未改建部分比,改建部分主要安装了湿度风机、内外遮阳系统、循环风机和内幕帘。而现场实验是在未改建部分进行,选择距温室南门15 m的中间截面为测试面,并选定位于每栋中央离地1.3 m高位置作为室内空气温、湿度测点。

2.2 实验方法

实验时间为2011年3月2日13:00~14:10,冬春季的晴天,天气较稳定,风向为东风。温室内种植着0.2 m高的番茄,其叶面积指数较小。温室平时保持密闭状态,仅在中午进行少量通风。室内湿度较高,通常在90%以上,其湿源主要来自室内土壤和作物长时间的蒸发。测试前做好温室密封工作,提前把温室缝隙补上。测试分两阶段:①首先在温室密闭状态下测试。②20 min后,打开所有顶窗至最大位置,一直保持至测试结束。测试方法与过程如下:①温室内空气温、湿度值的测量分别用PH100TMPA型温度传感器(精度:0.3°C,测量范围:-20~50°C)和PH100HUMA型湿度传感器(精度:±5%,测量范围:10%~95%),为防止光照对测量精度的影响,温、湿度传感器均安装在轻型百叶箱中。②土壤表温的测量用CA380型手持式红外测温仪(精度:±2°C,测量范围:-32~380°C)进行手动记录,平均每10 min测试1次;薄膜温度的测

量用铂电阻 PT100 (精度: 0.15°C)。③室外气候的测量用 Global Water 公司 WE800 型自动气象站,其传感器主要为: WE550 型风速传感器 (准确度: $\pm 0.3\text{ m/s}$, 测量范围: $0 \sim 45\text{ m/s}$) 和 WE570 型风向传感器 (精度: $\pm 2\%$, 测量范围: $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$)、WE300 型辐射传感器 (精度: $\pm 1\%$, 测量范围: $0 \sim 1\,500\text{ W/m}^2$)、WE700 型温度传感器 (精度: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 测量范围: $-50 \sim 50^{\circ}\text{C}$) 和 WE600 型湿度传感器 (精度: $\pm 2\%$, 测量范围: $0 \sim 100\%$)。气象站放在离温室东侧迎风方向 15 m 远处。所有传感器在测试前均经过标定接到自制的信号调理板上并通过 RS232 接口连到 PC 机。现场信号采集用 ADLINK 公司生产的数据采集卡 PCI9112 和 PCI9118, 以 PC 机为主控单元, 用 LabView 程序设计的温室环境测试程序。其采样频率为 5 Hz , 持续采样 70 min 。现场实验结束后, 所有的采集数据均取平均值处理。

3 结果与讨论

3.1 CFD 模型的验证

当外界风向为东风且风速为 2.2 m/s 时, 在顶窗通风工况下, 温室各空气测点的湿度测量值和 CFD 计算值如图 2 所示。

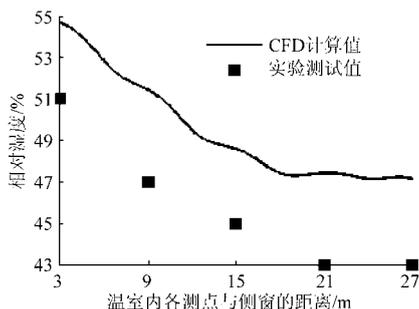


图 2 温室内湿度模拟值与实验值的比较

Fig. 2 Comparison of measured and simulated relative humidity inside the greenhouse

由图可知, 顶窗通风时, 温室内各测点相对湿度的测试值比外界空气湿度 (43%) 普遍要高 $0 \sim 8\%$ 。从变化趋势上看, 各点的实测湿度值和 CFD 计算值保持一致, 即相对湿度均随着测点与顺风侧窗距离的增大而减小。实验数据普遍要比仿真结果略低, 其主要原因是连栋塑料温室存在着不可避免的风冷渗透现象, 其数值的绝对误差在 5% 范围内, 实验数据证实了 CFD 模型的有效性。

3.2 实验与仿真结果分析

3.2.1 温室内空气温湿度随时间的变化特征

在温室内各空气测点 (TH1 ~ TH5) 中择取位于温室正中央测点 (图 1b 中的 TH3) 的温、湿度值代表整个温室空气温、湿度值。图 3 给出了该测点温、

湿度值在代表性的测试时段内 ($13:00 \sim 13:45$) 的变化情况。

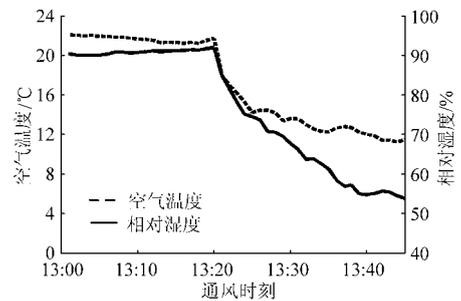


图 3 温室内空气温湿度变化曲线

Fig. 3 Time-dependent profiles of air temperature and relative humidity inside the greenhouse during the measurement

根据图 3 所示, 当温室处于密闭状态时 (即 $13:00 \sim 13:20$), 温室内的温、湿度值分别稳定在 22°C 和 92% 。一旦顶窗打开, 外界干冷空气 (9.8°C 气温和 43% 相对湿度) 进入温室后, 与室内湿热空气 (22°C 气温和 92% 相对湿度) 发生接触。由于两股空气存在着明显的温、湿度梯度差, 这就产生了明显的对流运动, 进而引起温室大量的热量 (潜热与显热) 损失而直接导致在刚开窗后的几分钟内室内温、湿度值下降得非常迅速。随着通风时间的增加, 对流运动由于内外空气温、湿度差的变小而逐渐减小, 因此室内空气温、湿度值的降速也逐渐变慢。到 $13:45$ 时, 其降速已变得非常平缓, 此时空气的温、湿度值已降至 11.5°C 和 54% 。

3.2.2 开窗配置对温室内空气流场的影响

根据表 1 所给的边界条件求稳态解得到不同开窗组合下温室室内的气流矢量图, 如图 4 所示。

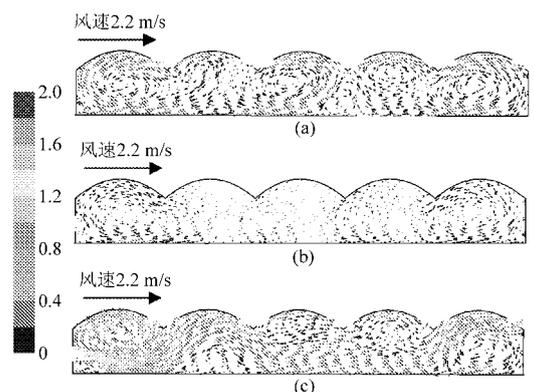


图 4 连栋塑料温室的正中间横向截面空气流场模拟图

Fig. 4 Computed air velocities vectors of multi-span plastic greenhouses (a central transverse section)

(a) 顶窗通风 (b) 侧窗通风 (c) 顶窗加侧窗通风

根据图 4 可知, 不同开窗方式会导致室内截然不同的空气流动模式。当顶窗打开时, 各栋内均出现明显的顺时针气流, 温室内空气混合性较好, 并在

作物冠状层呈现自西向东的流向;当侧窗打开时,外界气流进入侧窗后往近处流动,在第1栋内形成逆时针的空气循环,而其他栋内的空气流动几乎停滞;当顶窗和侧窗同时打开时,第1栋的顶部形成较明显逆时针气流。外部气流绝大多数从侧窗进入温室,从第5栋的顶窗离开温室。与侧窗通风比,顶窗的开启使室内空气流通性增强,速率增大。

3.2.3 湿度流场的瞬态变化特征

稳态结果求得后进行瞬态计算,其初始值假定通风窗开启之时(即2011年3月2日13:20)温室内的空气温、湿度值。室内温度为 22°C 、湿度为92%;室外温度为 9.8°C 、湿度为43%。其求解得到的顶窗、侧窗以及顶窗加侧窗这3种通风模式室内湿度场的时间分布变化,如图5所示。

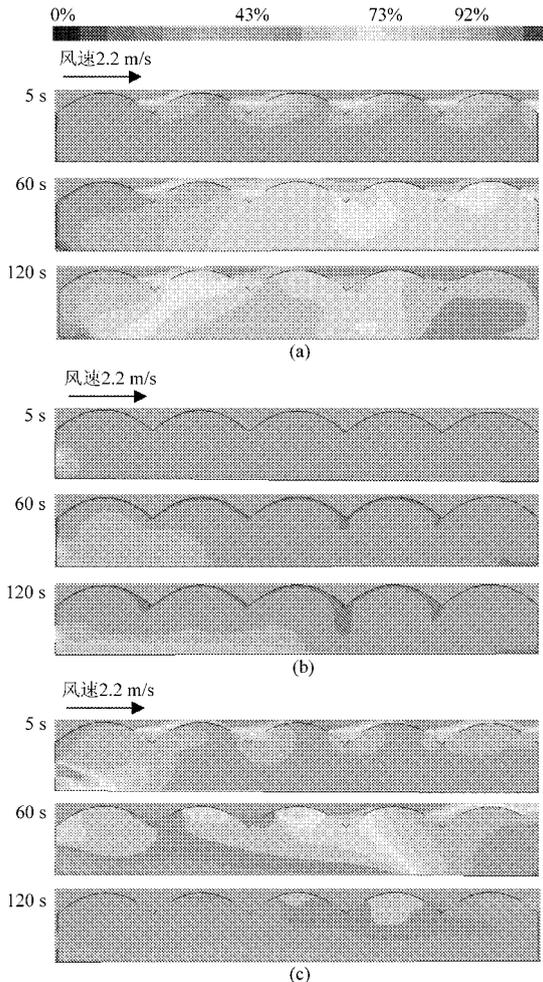


图5 连栋塑料温室内正中间横向截面相对湿度的非稳态分布

Fig.5 Unsteady distribution of relative humidity inside multi-span plastic greenhouses (a central transverse section)

(a) 顶窗通风 (b) 侧窗通风 (c) 顶窗加侧窗通风

根据图5可知,当顶窗通风时,温室除湿首先从近顶窗的区域开始,1 min后可见第4栋和第5栋的除湿几乎同时进行。2 min后,第2栋至第4栋内作

物冠状层的相对湿度均达到控制目标值(设为75%),而第1栋内的作物冠状层相对湿度达到目标值共需3 min;当侧窗通风时,温室除湿首先从第1栋的近侧窗区域开始,到1 min时在该区域通风窗以下空间的相对湿度从92%降至85%以下,而其他栋的相对湿度几乎没发生变化。2 min后,除湿范围稍有扩大,然而大部分区域还是处于初始状态(92%),最终完成除湿需要16 min;当顶窗加侧窗通风时,通风至1 min后大多数区域(包括作物冠状层)空气相对湿度小于75%;2 min后,作物冠状层相对湿度已降至53%以下。

3.2.4 不同通风模式的除湿效果

表2给出3种不同开窗的除湿效果。

表2 不同开窗组合下的除湿效果

Tab.2 Evaluation of dehumidification effect under various vent configurations

评估参数	侧窗	顶窗	顶侧窗
除湿时间/s	960	180	45
冠状层最低温度/ $^{\circ}\text{C}$	13.2	12.1	10.8
平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	16.7	14.6	15.0
平均相对湿度/%	82	68	71
相对湿度偏差/%	6.3	7.5	14.5
显热损失量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	41.4	276.9	621
潜热损失量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	90.7	608.7	1365

从图5和表2可知,要达到理想的除湿目标(作物冠状层相对湿度小于目标值75%),侧窗、顶窗以及顶窗加侧窗这3种通风模式所需的最短除湿时间分别为960 s、180 s和45 s。从通风效果看,当侧窗通风时,除湿过程中室内热损失较少,但除湿时间明显较其他通风方式长,除湿结束后室内平均湿度高达82%,说明其除湿效率较差;当顶窗加侧窗通风时,除湿速度快但热量损失大,同时室内湿度偏差较大,说明湿度分布不均匀性,这显然会影响作物正常生长。综合比较,顶窗通风是一种较理想的冬季通风模式,与侧窗通风相比,除湿速度快、效果好。与顶窗加侧窗通风比,除湿效果与之相当,但热量流失是前者一半。从番茄生长所要求的环境看,一般番茄白天生长的适宜温度范围为 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$,在温室密闭状态下,室内气温(22°C)能达到作物生长的适宜温度范围。然而一旦通风除湿结束,温室平均气温会降至适宜范围以外,冠状层气温则更低。因此,无论是哪种开窗方式,在完成除湿任务以后很难维持室内空气在适宜温度范围内。对于空气湿度而言,大多数作物(包括番茄)适宜的相对湿度范围为45%~75%。当顶窗或顶窗加侧窗通风完成除湿以

后,室内的相对湿度能满足作物正常生长的湿度要求;而当侧窗通风完成除湿以后,尽管冠状层相对湿度已降至 75% 以下,但温室空气平均相对湿度还是高达 81%。这就意味着温室内其他空间的空气湿度非常高。在除湿结束温室重新关窗后,这样的高湿空气直接导致作物冠状层的相对湿度在对流作用下又会较快地上升至 75% 以上。

4 结论

(1) CFD 计算值与实验测得温室内各空气测点的平均湿度值基本吻合,误差在 5% 范围内,且有相同的变化趋势。实验结果证实 CFD 模型的有效性,其求解结果能真实地反映温室内湿度的真实分布规律。

(2) 通风模式的不同会引起室内空气流动模式的巨大差异,进而影响除湿的效果。顶窗通风时,对流活动较明显,室内空气混合性较好,导致除湿速度较快;侧窗通风时,空气速率较低,部分区域的空气流动近乎停滞,导致较长的除湿时间;顶窗加侧窗通风时,室内空气速率高,除湿速度较快,在短时除湿的过程同时造成大量的热损失。

(3) 顶窗通风是最适合冬季除湿的通风模式,其除湿效果与顶窗加侧窗通风相当,但热量损失不到其一半;与侧窗通风比,除湿速度快且除湿效果较好,且除湿结束后温室平均相对湿度要小 14%。该通风模式下只需 3 min 就能完成作物冠状层除湿,这意味着通风开始至 3 min 即可关窗,超过该时间会带来不必要的热损失。

参 考 文 献

- Hand D W. Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops [J]. *Acta Horticulturae*, 1998, 229:143 ~ 158.
- Kittas C, Bartzanas T. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations [J]. *Buildings and Environment*, 2007, 42(10): 3 774 ~ 3 784.
- Chassériaux G. Heat pump for reducing the humidity in plasticgreenhouses [J]. *Plasticulture*, 1987, 73: 29 ~ 40.
- De Hallaux D, Gauthier L. Energy consumption due to dehumidification of greenhouses under Northern latitudes [J]. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 1998, 69(1): 35 ~ 42.
- Perdigones A, Valiñol V, García J L, et al. Experimental results and modeling of humidity control strategies for greenhouses in continental and coastal settings in the Mediterranean region. II: modeling of strategies [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2008, 6(2): 199 ~ 204.
- Campen J B, Bot GPA, de Zwart H F. Dehumidification of greenhouses at northern latitudes [J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 86(4): 487 ~ 493.
- Zhu Gao, Huiqing Guo, Robert Brad, et al. Greenhouse dehumidification in cold regions [C]. ASABE Annual International Meeting Pittsburgh, Pennsylvania, 2010.
- 侯翠萍, 马承伟. FLUENT 在研究温室通风中的应用[J]. *农机化研究*, 2007, 29(7): 5 ~ 9.
Hou Cuiping, Ma Chengwei. Study applying fluent in greenhouse ventilation [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007, 29(7): 5 ~ 9. (in Chinese)
- 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: 7 ~ 11.
- Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3(2): 269 ~ 289.
- 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.
- 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 ~ 157.
Wu Feiqing, Zhang Libin, Xu Fang, et al. Numerical simulation of the thermal environment in a mechanically ventilated greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(1): 153 ~ 157. (in Chinese)
- Bournet P E, Boulard T. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 74(2): 195 ~ 217.
- Richard P J. Appropriate boundary condition for computational wind engineering model using the $\kappa - \epsilon$ turbulence model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 46 ~ 47: 145 ~ 153.
- Miguel A F. Airflow through porous screens: from theory to practical considerations [J]. *Energy and Building*, 1998, 28(1): 63 ~ 69.