

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.038

# 不同风况和开窗配置对夏季单栋塑料温室微气候的影响

何科爽<sup>1</sup> 陈大跃<sup>2</sup> 孙丽娟<sup>3</sup> 刘正鲁<sup>4</sup>

(1.上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240; 2.上海交通大学电子信息与电气工程学院,上海 200240;  
3.中国农业科学院作物科学研究所,北京 100081; 4.上海孙桥现代农业园区,上海 201210)

**摘要:**以华东地区种植着空心菜的单栋塑料温室为研究对象构建其全尺度计算流体力学模型(CFD模型)。该模型经现场实验验证,其计算值与各测点温度实验值变化趋势吻合且差异在1.1℃以内。随后,通过该模型研究不同开窗配置下温室内气流和温度场特征,评估开窗配置对通风率、室内外温差和室内气候均匀性的影响,揭示不同风况下温室微气候形成机理。仿真结果表明,不同开窗配置会产生截然不同的温室微气候场。顶侧窗配置下温室通风率最高,室内外温差最小,能产生较均匀的室内气候,因此最适合于温室夏季通风。不同风况会对温室内气流和温度场产生显著的影响,进而影响温室降温效果和气候均匀性;当外界高温低风速气候条件下,热压通风起主导作用;顶侧窗通风能显著提高温室降温效果,有效降低作物冠层气温。

**关键词:**单栋塑料温室;微气候;风况;开窗配置;计算流体力学

中图分类号:S625 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2017)12-0311-08

## Effects of Wind Regime and Vent Configuration on Microclimate in Tunnel Greenhouses in Summer

HE Keshi<sup>1</sup> CHEN Dayue<sup>2</sup> SUN Lijuan<sup>3</sup> LIU Zhenglu<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China  
2. School of Electronics, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China  
3. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China  
4. Sunqiao Modern Agriculture Development Zone, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** The effects of vent configuration and wind regime on the microclimate in the tunnel greenhouse were numerically investigated. A full scale computational fluid dynamics model (CFD model) was constructed based on a tunnel greenhouse cultivated with water spinach in eastern China. The model was firstly validated by comparing CFD simulations with experimental temperatures. The simulations had similar trends to those of the experiments with less than 1.1℃ of difference. It was then employed to investigate the greenhouse airflow and temperature patterns with different vent configurations, evaluate the effect of vent configuration on the ventilation rate, temperature difference between inside and outside, and the inside climate homogeneity, and reveal the greenhouse microclimate mechanism with different wind regimes. Simulations showed that different vent configurations induced different inside microclimate patterns and ventilation performances. The roof plus side opening provided the highest ventilation rate, the minimum temperature difference and a relatively uniform indoor climate, and thus can be recommended for summer ventilation. Wind regime had a significant impact on the airflow and temperature patterns in the greenhouse, which considerably affected the cooling performance and the indoor climate homogeneity. With the weather conditions of high temperature and low wind speed, thermal driven ventilation played a remarkable effect on the greenhouse microclimate. The roof and side opening can improve greenhouse cooling performance remarkably and reduce air temperature in crop canopy effectively.

**Key words:** tunnel greenhouse; microclimate; wind regime; vent configuration; computational fluid dynamics

收稿日期:2017-03-09 修回日期:2017-04-12

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA10A505)和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(1981—),男,博士后,主要从事温室环境控制和温室微气候数值模拟研究,E-mail: lovejessie@sjtu.edu.cn

通信作者:陈大跃(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备和温室智能控制研究,E-mail: dychen@sjtu.edu.cn

## 引言

单栋塑料温室是我国华东地区最主要设施类型,这类温室依靠自然通风调控室内气候。华东地区属于亚热带气候,夏季时常发生浮力通风,且常遭遇高温、高湿、强辐射、低风速天气。

计算流体力学(CFD)技术作为一种工具用于研究温室自然通风始于 OKUSHIMA 等的工作<sup>[1]</sup>。到20世纪90年代中后期,许多学者借助 CFD 技术研究温室自然通风微气候<sup>[2-9]</sup>。对于华东地区单栋塑料温室,沈明卫等<sup>[10-11]</sup>通过对不同风向下单栋塑料温室内气流场的仿真分析得出了风向对温室内气流分布具有主导作用。王健等<sup>[12]</sup>比较了不同开窗对单栋塑料温室内流场的影响,得出了风压通风下天窗加侧窗是最理想的开窗方案。陈加浪等<sup>[13]</sup>评估了不同风速下增开天窗对单栋塑料温室内流场的影响。郝飞麟等<sup>[14-15]</sup>揭示了自然通风下单栋塑料温室内温湿度场、CO<sub>2</sub>浓度场等多物理场特征。当前,依旧缺乏对极低风速下(小于0.6 m/s)温室微气候特征的系统揭示。本文拟构建单栋塑料温室 CFD 模型,探索开窗配置对温室内微气候场的影响,通过温室通风效果的评估来优化开窗配置。然后,研究极低风速尤其是浮力通风时不同风速和开窗下温室内气流和温度场分布特征和规律。

## 1 数值建模

### 1.1 本构方程

计算流体力学的发展能够使得在计算域的网格上用有限体积法求解输运方程以获得流场,描述三维空间内自由对流下输运现象的守恒方程为<sup>[16]</sup>

$$\frac{\partial(u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(w\phi)}{\partial z} = \Gamma \nabla^2 \phi + S_\phi \quad (1)$$

式中  $\phi$ ——通用变量  $S_\phi$ ——广义源项  
 $\Gamma$ ——广义扩散系数  
 $\nabla^2$ ——拉普拉斯算子  
 $u, v, w$ ——流体速度矢量的组成部分  
 $x, y, z$ ——笛卡尔坐标

式(1)在直接计算湍流运动时对内存空间和计算速度要求非常高,通常引入湍流模型进行简化处理。考虑到单栋塑料温室内空气流动通常是湍流<sup>[17]</sup>,本文选择 RNG  $k-\varepsilon$  模型来进行湍流模拟,采用标准壁面函数法来处理近壁区湍流。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,模型中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,通风过程中各组分传输满足组分守恒定

律。激活 DO 辐射模型来描述温室内外辐射转移对室内气候的影响。在参数设置中,角度离散选项设为默认值。Fluent 只求解 4 个象限,共  $4N_\theta N_\phi$  个方向。每次辐射迭代过程中,流体迭代次数设为 10。

### 1.2 数值建模和网格生成

选择 Gambit 2.3.16 作为 CFD 前处理器进行数值建模和网格生成。数值建模时,考虑到自然通风下单栋塑料温室微气候受大气边界层气候的影响,故计算域将温室外区域包括在内,其范围应以不影响室内流场特性为准。三维 CFD 模型计算域长为 100 m(其中,单栋塑料温室长 30 m,迎风向长 20 m,背风向长 50 m),宽为 40 m,高为 20 m。迎风向长度、背风向长度、高度分别是温室脊高的 6 倍、15 倍、6 倍,能满足文献[18]所规定的外围计算域迎风向长度、背风向长度和高度至少是温室脊高的 3 倍、7 倍和 5 倍的要求。网格划分时,温室外区域采用 Cooper 法以网格密度较疏的六面体单元划分以减少不必要的计算时间;温室内区域采用 TGrid 法以网格密度较密的四面体单元划分以捕捉温室内流场分布;作物冠状层采用 Map 法以网格密度更密的六面体单元划分;考虑到近壁面流场变化梯度大,故生成 4 层边界层;网格走势呈现从内向外辐射状。最终,总网格数约 180 万左右,其中温室内网格数为 50 万,作物冠状层网格数为 5 万。

当实际风向和温室朝向垂直时,三维 CFD 模型通常简化为二维来处理以减小不必要的计算量。二维 CFD 模型外围计算域尺寸为 40 m × 20 m。其中,迎风向长度、背风向长度、高度分别是温室脊高的 10 倍、10 倍、6 倍,能满足文献[18]要求。在网格划分上,整个计算域中温室外区域以尺寸为 0.33 m 的四边形网格来划分,共生成 7 300 个网格,网格走势呈现从内向外辐射状。温室内区域以尺寸为 0.04 m 的三角形网格来划分,共生成 36 106 个网格。作物冠状层内网格做进一步加密,以尺寸为 0.02 m 的四边形网格来划分,该区域内共生成 6 500 个网格。温室壁面上加上 4 层边界层网格。最终,整个计算域内共生成约 50 016 个网格。

### 1.3 边界条件

进口空气假设为不可压缩的;计算域(迎风向)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<sup>[19]</sup>

$$U_w = \frac{u^*}{K} \ln \frac{z+z_0}{z_0} \quad (2)$$

其中

$$u^* = \frac{Ku_h}{\ln \frac{h+z_0}{z_0}} \quad (3)$$

式中  $U_w$ ——外界风速  $u^*$ ——摩擦速率  
 $u_h$ ——参考风速(参考高度 2.0 m 处的测量风速)  
 $h$ ——参考高度,取 2.0 m  
 $K$ ——冯卡门系数,取 0.42  
 $z$ ——离地高度  
 $z_0$ ——地面粗糙度,根据有关标准<sup>[19]</sup>,取 0.015

计算域出口(背风向)流体假设已充分发展,即压力出口;计算域顶部(天空)设为非滑移半透明壁面以加载太阳辐射。室内外地面设为不透明的散射壁面。温室薄膜覆盖物设为有一定厚度的半透明壁面,其漫反射分数设为 20%。所有壁面温度设为固定且均匀分布。在固体壁面上对所有组分均使用零扩散通量。考虑太阳辐射的热效应,材料光学属性对所有波长的辐射假设都为常数,即漫灰辐射。数值模型边界条件来自于现场实验数据,如表 1 所示。

表 1 CFD 模型的边界条件

Tab. 1 Boundary condition used in CFD model

参数	边界条件值	
	2010-08-04	2010-08-29
空气温度/℃	36.0	30.0
重力加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	9.81	9.81
进 密度 $\rho$ /(kg·m <sup>-3</sup> )	1.246	1.165
口 比热容 $C_p$ /(J·(kg·K) <sup>-1</sup> )	1 006.7	1 006.7
空 导热系数 $k$ /(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	0.025	0.026 3
气 热扩散系数 $\beta$ /K <sup>-1</sup>	$3.235 \times 10^{-3}$	$3.299 \times 10^{-3}$
粘度动力 $\mu$ /(kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$1.896 \times 10^{-5}$	$1.868 \times 10^{-5}$
湍流强度/%	5	5
湍流尺度/m	3	3
温室外部土壤温度/℃	38.5	28.4
温室内部土壤温度/℃	45.9	29.6
薄膜温度/℃	40.7	28.2
太阳辐射/(W·m <sup>-2</sup> )	792	110
净辐射/(W·m <sup>-2</sup> )	102	36
风 风速 $u$ /(m·s <sup>-1</sup> )	0.6	1.6
风向/(°)	176	87

辐射模型求解中,所需要材料光学和热学属性见表 2。

防虫网在 CFD 模型中以多孔介质来处理,其产生的阻力可由 Darcy - Forcheimer 方程来表示,防虫网的惰性因子和渗透率分别按照以下经验公式来计算<sup>[21]</sup>

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

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

式中  $K_p$ ——惰性因子  $C_F$ ——渗透率  
 $\alpha$ ——孔隙率,取 0.67

表 2 材料的光学和热学属性

Tab. 2 Material optical and thermal parameters

参数	覆盖物	土壤	作物
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	923	1 600	700
热导率/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	0.33	0.30	0.17
比热容/(J·(kg·K) <sup>-1</sup> )	2 300	890	2 310
吸收率	0.37	0.85	0.46
散射系数	0.3	1.0	0
折射率	1.52	1.92	2.77
发射系数	0.70	0.95	0.65

温室空心菜对室内微气候的影响主要是通过 CFD 模型边界条件的设置来体现。温室作物冠状层在 CFD 模型中以多孔介质来处理,其产生的动量源项可以由 Darcy - Forcheimer 方程来表示。作物对周围空气的阻力是由粘滞阻力和惯性阻力组成<sup>[22]</sup>。考虑到作物冠状层内空气速率很小,因此粘滞阻力通常可以忽略,所以只需要计算惯性阻力。惯性阻力由空气速度  $U$ 、叶面积密度  $I_{LA}$  和作物冠状层阻力系数  $C_d$  决定。叶面积密度  $I_{LA}$  可以根据实验测量得到。作物冠状层阻力系数  $C_d$  可以通过风洞测试得到。对于不同形状和大小的作物差别很小<sup>[23-24]</sup>,本文取  $C_d = 0.26$ 。

作物冠状层与室内空气的能量交换是通过作物蒸腾作用来实现。从能量平衡角度看,温室作物吸收太阳辐射能后,一部分通过蒸腾作用扩散到空气中去,另外一部分通过对流作用与周边空气进行热量交换。因此,室内作物吸收的辐射量等于作物与温室内空气的潜热和显热交换量,可表示为<sup>[25]</sup>

$$R_{abs} = Q_{sen} + Q_{lat} \quad (6)$$

其中  $Q_{sen} = 2I_{LA}\rho C_p \frac{T_c - T_i}{r_a} \quad (7)$

$$Q_{lat} = I_{LA}\rho\lambda \frac{w_c - w_a}{r_a + r_s} \quad (8)$$

式中  $R_{abs}$ ——辐射量  $\lambda$ ——蒸发潜热

$Q_{sen}$ 、 $Q_{lat}$ ——显热和潜热交换量

$r_a$ 、 $r_s$ ——叶片空气动力学阻力和气孔阻力

$T_c$ 、 $T_i$ ——作物叶片表温和作物附近气温

$w_c$ 、 $w_a$ ——作物和附近空气的绝对湿度

$\rho$ ——空气密度

$C_p$ ——固定大气压下空气比热容

对于叶片空气动力学阻力和气孔阻力而言,其值依赖于作物冠状层内空气速度和气候环境。叶片空气动力学阻力和空气速率有关,其表达式可以参照文献[26]。气孔阻力表达式可以参照文献[27]。

作物冠状层动量、质量和能量转移过程可以通过源项加载到基本控制方程中来体现。这些源项通过用户自定义函数耦合到 CFD 模型中。

## 1.4 求解步骤

求解过程是利用分离求解器以求解压力耦合方程组的半隐式方法进行迭代计算求解。选择体积力加权法进行压力离散。求解时,首先以一阶迎风格式计算,到收敛后再以二阶迎风格式计算直到再次收敛为止。在纯浮力通风(外界风速为  $0 \text{ m/s}$ )下,为了快速收敛,求解首先是以低瑞利数开始,为此将重力加速度减小3个数量级,即设为  $0.0098 \text{ m/s}^2$ ,方程离散格式设为一阶离散计算至收敛。在第一步基础上重力加速度设为  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,离散格式依旧不变,求解器设为非稳态分析,计算至收敛。最后,求解器设为稳态分析,离散格式设为二阶离散,计算至收敛。求解时,能量残差收敛标准设为  $10^{-6}$ ,其他变量残差收敛标准设为  $10^{-3}$ 。数值仿真时,选择 ANSYS Workbench 12.0 的 ANSYS Fluent 作为通用 CFD 解算器。所有仿真在 AMD phenom II X4 965, 4 GB 内存的计算机上进行。每个仿真算例计算需要 10 h 才能至完全收敛。

## 2 实验

### 2.1 实验温室

实验温室位于上海市浦东新区孙桥现代农业园区(东经  $121.63^\circ$ ,北纬  $31.18^\circ$ ),屋脊为南北朝向;温室长  $30.0 \text{ m}$ ,宽  $7.9 \text{ m}$ ,脊高  $3.3 \text{ m}$ ;侧窗长  $28.0 \text{ m}$ ,宽  $1.2 \text{ m}$ ,配有防虫网;南北门宽  $1.9 \text{ m}$ ,高  $2.0 \text{ m}$ ;覆盖材料为低聚乙烯薄膜,温室内种植着3排空心菜,高度略有差异。现场实验温室见图1。



图1 华东地区单栋塑料温室

Fig. 1 Tunnel greenhouse in eastern China

### 2.2 实验方法、步骤和过程

整个实验共分2组进行,第1组实验的测试日期为2010年8月4日,华东夏季晴天高温天气。当前风向为南风(即与温室朝向垂直),风速为  $0.6 \text{ m/s}$ 。期间,单栋塑料温室内种植着南北朝向、高度略有差异的3排空心菜。这些空心菜的叶面积指数由作物冠层分析仪测量得  $6.0 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 。现场实验从11:00开始,期间温室所有门窗都处于完全打开状态。外界气象参数由室外温湿度、风向风速、辐射等传感器自动采集,这些传感器放在自制的支架上。该支架放于迎风向距离温室  $20 \text{ m}$  远处,离地高  $2.0 \text{ m}$ 。现场实验是

在温室南北中间截面内。温室内实验测点位置见图2。

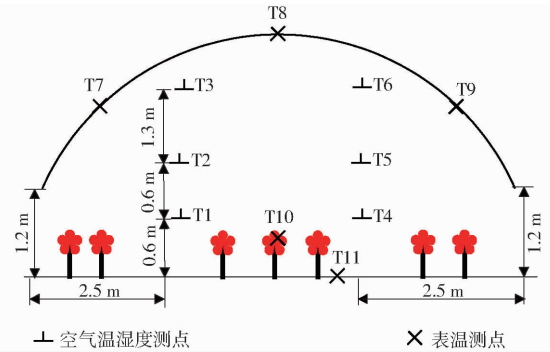


图2 单栋塑料温室实验测点位置图(2010年8月4日)

Fig. 2 Measured position in tunnel greenhouse  
(4, August, 2010)

从图2中看出,空气温湿度传感器(T1~T3, T4~T6)分别放置在温室内距离左右两侧窗  $2.5 \text{ m}$  远处,离地高为  $0.6 \text{ m}$ 、 $1.2 \text{ m}$ 、 $2.5 \text{ m}$ ,用来监测温室内空气湿度的垂直梯度变化。铂电阻 T7~T9 粘贴在薄膜背面,用来测量温室薄膜覆盖物温度;铂电阻 T10 被粘贴在地面,用来测试温室内地面温度;铂电阻 T11 粘贴在叶片的背面,用来测量作物叶片的温度。所有传感器均连接到自制的端子板,通过并口线连接到 PCI9112/9118 数据采集卡进行数据采集。现场工作是 Norco 工控机,运行在工控机上的是基于 LabVIEW 平台的采样程序。其采样频率为  $10 \text{ Hz}$ ,采样时间为  $0.5 \text{ h}$ 。实验期间,外界气候变化稳定。采样结束后,所有气象数据均取均值处理。

第2组实验的测试日期为2010年8月29日,华东多云天气,当前风向与温室朝向几乎垂直,太阳处于最大高度角。现场实验是在温室南北中间截面内。温室内测点位置见图3。

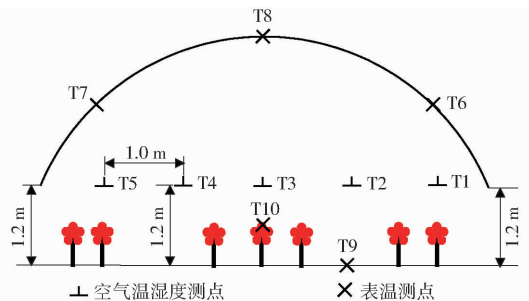


图3 单栋塑料温室实验测点位置图(2010年8月29日)

Fig. 3 Measured position in tunnel greenhouse  
(29, August, 2010)

由图3可得,温室中间截面内沿水平方向依次放置了1排5个空气温湿度传感器(T1~T5),其高度位置距离地面高度  $1.2 \text{ m}$  方向以上,每个传感器相互间隔为  $1.0 \text{ m}$ 。温室内共有5个表温测点,其中薄膜上有3个测点(T6~T8)、地面有1个测点

(T9)、叶片有 1 个测点(T10)。每个测点的温度都是由手持式的近红外测温仪直接测量,平均每 10 min 测量 1 次并做好手工记录。测试期间,单栋塑料温室内种植着 3 排成熟的空心菜,其叶面积指数由作物冠状层分析仪实验测量得  $5.1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 。

现场实验从 11:30 开始,期间温室门窗一直处于完全打开状态,外界气候稳定。室外气象参数由风速、风向、温湿度、辐射等传感器自动采集,这些传感器均放在自制的支架。该支架放于迎风向距离温室 20 m 处,离地高为 2 m。采样频率为 10 Hz,采样数据每 1 min 取一次平均值,采样时间为 60 min。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 CFD 模型的验证

##### 3.1.1 二维 CFD 模型的验证

表 3 给出了当风向垂直于温室朝向时室内各个测点的气温实验值和模拟值。

表 3 风向垂直于温室时温室内各测点的气温实测值和模拟值的比较

测点	模拟值	实测值	偏差
T1	31.2	31.8	0.6
T2	29.8	29.6	0.2
T3	29.3	29.1	0.2
T4	28.5	28.8	0.3
T5	28.2	28.4	0.2

由表 3 可得,温室内气温实验值和模拟值两者误差在  $1.0^\circ\text{C}$  内。其误差来源在于数值模型中忽略了温室地面蒸发作用和室内热空气通过薄膜缝隙向外渗透。因此,所构建的二维 CFD 模型是有效的,它能准确预测单栋塑料温室内气候分布。

##### 3.1.2 三维 CFD 模型的验证

表 4 给出了当风向平行于温室朝向时温室内所有测点气温的实验值和模拟值。

表 4 风向平行于温室时温室内各测点的气温实测值和模拟值的比较

离地高度/m	测点	模拟值/ $^\circ\text{C}$	实测值/ $^\circ\text{C}$	偏差/ $^\circ\text{C}$
0.6	T1	37.4	38.2	0.8
	T4	37.4	38.4	1.0
1.2	T2	37.5	38.3	0.8
	T5	37.4	38.5	1.1
2.5	T3	38.5	37.8	0.7
	T6	38.8	37.7	1.1

从表 4 中看出,当外界风速为  $0.6 \text{ m/s}$  且气温

为  $36.0^\circ\text{C}$  时,温室内各测点气温的实验值和模拟值的偏差在  $0.7 \sim 1.1^\circ\text{C}$  之间,相对误差在 5% 之内。室内气温模拟值都小于实测值,其原因在于数值模型中忽略了温室地面蒸发作用和室内热空气通过薄膜缝隙向外渗透。从整体上看,温室内各点(T1 ~ T6)的气温模拟值和实验值均吻合得较好,误差都在可接受的范围内。因此,所构建的三维 CFD 模型是有效的,它能准确预测夏季浮力通风下单栋塑料温室内气候分布。

#### 3.2 实验与仿真结果分析

由表 1 可知,2010 年 8 月 4 日边界值能反映华东地区夏季典型高温气候,实验期间气候参数值变化幅度小,几乎为固定。因此 CFD 模型中使用该边界值作为输入进行稳态仿真分析。分析侧窗通风下温室内微气候特征,同时人为假设顶窗开启,研究顶窗通风和顶侧窗通风下温室内微气候特征。

##### 3.2.1 开窗配置对单栋塑料温室内微气候场的影响

图 4 给出了当风向与温室朝向垂直时不同开窗配置下单栋塑料温室内气流和温度场。在每组开窗配置下,通风窗打开至最大位置。从图中可以看出,温室内温度场和气流场有着很强的关联性。温室内某些区域经过的气流速率越高,那该区域内气温就越低。反之,温室内某些区域经过的气流速率越低,那该区域内气温就越高。另外,开窗配置对温室内微气候场的影响非常显著,不同开窗配置下温室气流和温度场表现出截然不同的特征。

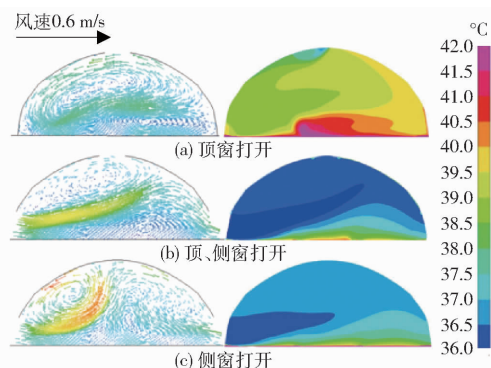


图 4 单栋塑料温室气流和温度场

Fig.4 Airflow and temperature patterns in tunnel greenhouse

当侧窗关闭、顶窗打开时(图 4a),外界空气几乎没有进入到温室内,这就造成温室内空气速率整体较低,尤其是温室作物冠状层内气流几乎处于停滞状态。同时,温室内空气处于自由对流状态,气流混合性较好,作物冠状层的正上方存在着一个较大的循环气流。从温室内温度场分布看,温室内气温分布均匀且温度普遍偏高,温室大部分区域内气温基本都在  $38.5^\circ\text{C}$  以上,尤其是温室作物冠状层内气



温都在 40.0℃ 以上。温室内气温最低点发生在近顶窗部,其值在 36.5℃ 左右。

当侧窗和顶窗都打开时(图 4b),温室内气流显著增强。顺风侧窗和逆风侧窗分别是温室内气流主要进口和出口。同时,温室内还有一小部分热空气是通过顶窗后离开温室。从空气速率分布上看,相比图 4a 温室增开侧窗后室内空气速率明显增大,特别是毗邻顺风侧窗区域内空气速率最高,而到了温室内侧窗高度以上区域空气速率明显减小。室内作物冠层空气处于停滞状态。从温室内温度场分布看,由于室内空气速率增大,温室内气温明显减小。温室内大部分区域气温都是在 36.0~37.0℃ 之间,温室作物冠层气温降至 40.0℃ 以下。

当侧窗打开、顶窗关闭时(图 4c),温室内空气流动模式与图 4b 较为类似,但是室内气流有所减弱。外界空气从温室侧窗进入遇到作物冠层后,由于受到其阻力作用气流往水平偏上方向流动,从而在毗邻温室顶部区域内形成了一个逆时针的强循环气流,直接增强了该区域内空气的混合度。但是,温室其他区域内空气没有得到很好的混合,尤其是温室逆风区内空气相对停滞。从温室内温度场分布看,其与图 4b 类似,但是室内低温区域有所减少。温室内临近顺风侧窗的区域气温在 36.0~36.5℃ 之间,温室内临近逆风侧窗的区域气温在 37.0~37.5℃ 之间。除此之外,温室大部分区域内气温在 36.5~37.0℃ 之间。

### 3.2.2 开窗配置对温室通风率、温差和微气候均匀性的影响

图 5 给出了不同开窗配置和风速下温室通风率和室内外温差的变化情况。可以看出,通风率直接影响着温室降温效果。通风率越高,室内外温差越小;反之,通风率越低,室内外温差越大。同时,开窗配置对温室通风率和室内外温差都有着显著影响。当顶窗通风时,在 0.2、0.4、0.6 m/s 风速下温室通风率几乎为零,这就意味着顶窗的开启对温室通风率的影响极小,几乎可以忽略不计,温室室内外温差

最大(接近 6.0℃),分别是侧窗和顶侧窗通风的 4.5 倍。当侧窗通风和顶侧窗通风时,温室通风率大幅增高,且通风率随着风速的增加而线性增加。当风速为 0.6 m/s 时,温室通风率分别是风速为 0.4 m/s 和 0.2 m/s 时温室通风率的 1.3 倍和 1.8 倍,温室内外温差在 2.0℃ 以内。因此,可以得出侧窗开启对于单栋塑料温室通风率和室内外温差有着决定性的影响。

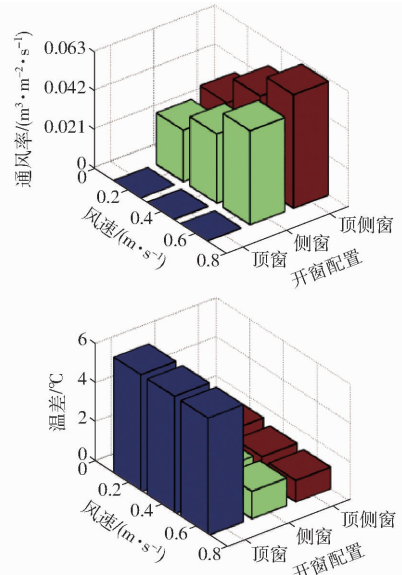


图 5 不同开窗配置和风速下温室通风率和室内外温差变化情况

Fig. 5 Greenhouse ventilation rate and temperature difference between indoor and outdoor with different wind speeds and vent configurations

表 5 给出了不同开窗配置下温室作物冠层空气速度和温度均匀性。可以看出,不同开窗配置下温室内空气均匀性是不同的。当顶窗通风时,温室空气速度和气温的均匀性指标均优于其他 2 种开窗;当侧窗通风时,温室空气速度和气温的均匀性指标均不如其他 2 种开窗;当顶侧窗通风时,其气候均匀性介于顶窗通风和侧窗通风之间。因此,可以得出顶窗的开启对于调节温室微气候均匀性有重要作用。

表 5 3 种开窗配置下温室作物冠层气候均匀性评估

Tab. 5 Climate homogeneity performance evaluation in crop canopy with three different vent configurations

评估参数		侧窗	顶窗	顶侧窗
空气速度均匀性	$(U_{\max} - U_{\min})/U_h$	1.327	0.499	1.215
	$\delta_u/U_h$	0.183	0.117	0.183
气温均匀性	$(T_{\max} - T_{\min})/T_o$	$1.780 \times 10^{-2}$	$1.359 \times 10^{-2}$	$1.586 \times 10^{-2}$
	$\delta_T - T_o/T_o$	$4.27 \times 10^{-3}$	$1.94 \times 10^{-3}$	$4.14 \times 10^{-3}$

表 5 中  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  为温室作物冠层最高和最低空气速率, m/s;  $U_h$  为外界空气参考速率, m/s;  $\delta_u$  为

温室内空气速率标准偏差, m/s;  $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$  为温室作物冠层最高和最低空气温度, °C;  $T_o$  为外界空气温

度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta_{T-T_0}$  为温室作物冠状层与室外温差的标准偏差,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.2.3 不同风况下单栋塑料温室内微气候特征

图 6 给出了当风向平行于温室朝向时 2 种不同开窗配置下(顶窗通风和顶侧窗通风)温室内 3 个截面( $x = -9, 0, 9 \text{ m}$ )上的温度场。

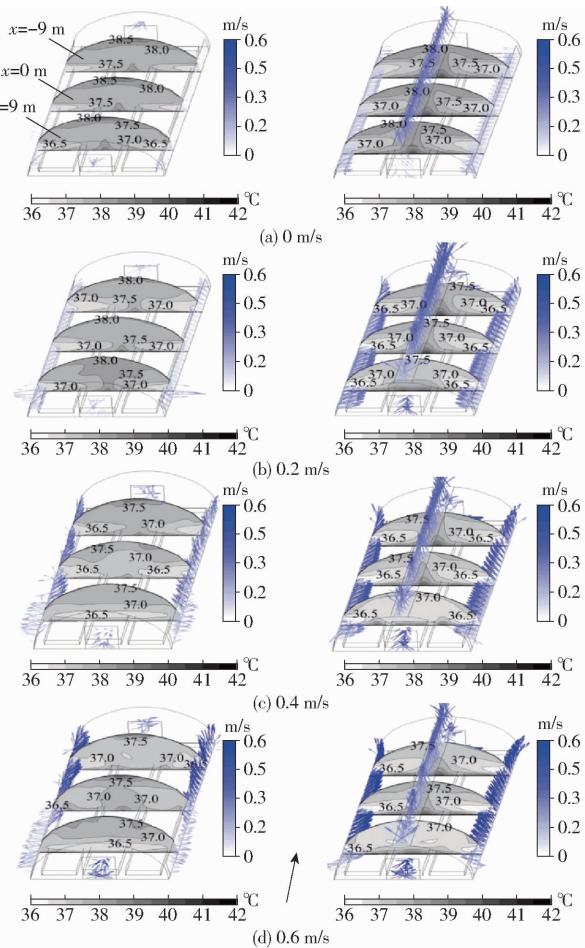


图 6 当风向平行于温室朝向时,不同风速下温室内温度场

Fig. 6 Temperature patterns in greenhouse at different wind speeds with wind direction paralleled to greenhouse orientation

当外界风速为  $0 \text{ m/s}$  时(图 6a),温室内 3 个截面上( $x = -9, 0, 9 \text{ m}$ )都能明显地看到,外界低温、高密度气体从温室侧窗和山墙门进入,由于热压驱动的作用,室内高温、低密度气体形成上升气流聚集在温室顶部区域,其温度达到  $38.5^{\circ}\text{C}$  以上。当顶窗打开时,温室内空气流动模式发生显著变化,室内高温、低密度气体在浮力作用下从温室顶窗流出,温室侧窗、山墙门和顶窗处区域空气流速都较大。从气温分布上看,温室顶部气温在  $38.5^{\circ}\text{C}$  以上区域消失,温室近侧窗区域在  $37.5^{\circ}\text{C}$  以下区域面积增加约 1 倍。

当外界风速为  $0.2 \text{ m/s}$  时(图 6b),温室内空气流动模式与纯浮力通风比发生了变化,外界气流一部

分从迎风向的南山墙门进入温室后从侧窗南边部分流出,其他外部气流都是从侧窗北边部分进入室内。侧窗同时充当进风口和出风口。南山墙门不再只是进风口,其上面部分有空气流出。温室内 3 个截面上( $x = -9, 0, 9 \text{ m}$ )气温大部分都在  $37.5^{\circ}\text{C}$  以上。其中,温室内顶部区域气温在  $38.0^{\circ}\text{C}$  以上,与图 6a 相比下降了约  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。当顶窗打开时,外界气流通过南山墙进入温室后仅有少量从侧窗流出,绝大部分直接从顶窗流出。温室 2 个截面( $x = -9, 0 \text{ m}$ )内温度场相似,温室迎风截面( $x = 9 \text{ m}$ )内作物冠状层低温面积较大。由于室内气流的增大,温室内近侧窗区域温度下降了约  $0.5^{\circ}\text{C}$ ,其值约为  $36.5^{\circ}\text{C}$ 。

当外界风速为  $0.4 \text{ m/s}$  时(图 6c),温室内空气流动模式与风速  $0.2 \text{ m/s}$  时类似。不同的是,随着风速增大,越来越多外界气流通过山墙门进入温室后经过侧窗向外流出。同时,温室内 3 个截面( $x = -9, 0, 9 \text{ m}$ )气温都有了一定的下降。当顶窗打开时,温室内流场变化特征与图 6b 类似,室内气温跟相同风速下侧窗通风时相比降低了  $0.5 \sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 。

当外界风速为  $0.6 \text{ m/s}$  时(图 6d),温室内空气流动模式基本与风速  $0.2, 0.4 \text{ m/s}$  时类似。不同的是,随着风速进一步增大,山墙门已成为温室重要的通风口。同时,温室侧窗南侧部分流出的气流进一步增多。另外一部分气流从侧窗北边部分进入后通过背风向的北山墙门小部分流出。在  $x = 9 \text{ m}$  截面,温室平均气温最低,特别是靠近作物冠状层有很大一块区域气温在  $37.0^{\circ}\text{C}$  以内。在  $x = 0 \text{ m}$  截面,温室高温区域面积最大。由于浮力驱动,高温气体集中在温室顶部。在  $x = -9 \text{ m}$  截面,温室近窗区域气温在  $36.5 \sim 37.0^{\circ}\text{C}$  之间,其他区域气温均在  $37.0 \sim 37.5^{\circ}\text{C}$  之间。当顶窗打开时,温室内流场变化与图 6b、6c 基本类似,温室内温度有进一步的下降。

## 4 结论

(1) 构建了华东地区单栋塑料温室 CFD 模型,通过现场 2 组实验表明了 CFD 计算值与各测点温度实验值基本吻合,两者偏差在  $1.1^{\circ}\text{C}$  以内,相对误差在 5% 以内。构建的 CFD 模型其计算结果能够反映单栋塑料温室内空气温度分布规律。

(2) 不同开窗配置会导致室内气流场分布的不同,进而影响室内温度场。当顶窗通风时,温室内空气处于自由对流状态,气流速率低且混合性好,这导致温室内气温最高,室内大部分区域气温都是在  $38.5^{\circ}\text{C}$  以上且分布均匀。当侧窗通风时,温室内气候显著增强,温室内顺风区形成一个逆时针的循环气流,然而温室内逆风区空气停滞,因此温室内临近

顺风 and 逆风侧窗区域内气温分别是在 36.0 ~ 36.5℃ 之间和 37.0 ~ 37.5℃ 之间。当顶侧窗通风时,其流场形态与顶窗通风时类似,但是室内气流更强且混合性更好。室内大部分区域气温在 36.0 ~ 37.0℃ 之间,而且气温分布较均匀。

(3) 不同开窗配置会引起截然不同的温室通风效果。当顶窗通风时,温室内气候均匀性最好,然而通风率最低,这就导致温室内外温差最大,达到 6.0℃;当侧窗通风时,通风率较高,温室内外温差约为 1.5℃,然而温室内气候均匀性最差;当顶侧窗通风时,温室通风率最高,导致室内外温差最

小,同时也能产生较为均匀的室内气候。因此,综合通风率、室内外温差和气候均匀性这 3 个因素来看,顶侧窗通风是单栋塑料温室夏季最理想的通风配置。

(4) 温室内微气候形成机理和分布特征与外界风况高度相关。外界不同风速会对温室内气流和温度场产生显著影响,进而会影响温室降温效果和气候均匀性。夏季高温气候下,外界风速越低,温室通风受热压驱动越明显。特别是纯浮力通风时,温室增开顶窗后会产生显著的降温效果,可有效降低室内作物冠层温度。

#### 参 考 文 献

- OKUSHIMA L, SASE S, NARA M. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics [J]. *Acta Horticulturae*, 1989, 248: 129 - 136.
- 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.
- KATSOULOS N, BARTZANAS T, BOULARD T, et al. Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(4): 427 - 436.
- OULD KHAOUA S A, BOURNET P E, MIGEON C. Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 95(1): 83 - 98.
- BOURNET P E, OULD KHAOUA S A, BOULARD T. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multispans glasshouse using bi-band radiation model [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98(2): 224 - 234.
- LEE S Y, LEE I B, KWON K S, et al. Analysis of natural ventilation rates of venlo-type greenhouse built on reclaimed lands using CFD [J]. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 2015, 57(6): 21 - 33.
- BENNI S, TASSINARI P, BONORA F, et al. Efficacy of greenhouse natural ventilation: environmental monitoring and CFD simulations of a study case [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 125(1): 276 - 286.
- ZHANG X, WANG H, ZOU Z, et al. CFD and weighted entropy based simulation and optimisation of Chinese solar greenhouse temperature distribution [J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 142: 12 - 26.
- 王新忠,张伟建,张良,等. 基于 CFD 的夏季屋顶全开型玻璃温室自然通风流场分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 332 - 337. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161042&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161042&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.042.
- WANG Xinzhong, ZHANG Weijian, ZHANG Liang, et al. Analysis of flow field for full open-roof glass greenhouse with natural ventilation in summer based on CFD [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 332 - 337. (in Chinese)
- 沈明卫,郝飞麟. 两种风向下单栋塑料大棚内自然通风流场模拟[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 227 - 232. SHEN Mingwei, HAO Feilin. Numerical simulation of airflow distribution inside a tunnel greenhouse under two typical outside wind directions [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(6): 227 - 232. (in Chinese)
- 沈明卫,郝飞麟. 自然通风下栽培番茄的单栋温室内气流场稳态模拟[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(6): 102 - 105. SHEN Mingwei, HAO Feilin. Steady state numerical simulation of airflow pattern in natural ventilated tunnel greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(6): 102 - 105. (in Chinese)
- 王健,汪小昂,丁为民. 风压通风的单栋温室内部流场的 ANSYS CFD 模拟[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(3): 115 - 116. WANG Jian, WANG Xiaochan, DING Weimin. ANSYS CFD simulation of airflow distribution in a tunnel greenhouse under wind driven situation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(3): 115 - 116. (in Chinese)
- 陈加浪,陈大跃,何科爽,等. 单栋塑料大棚在高温低风速下的自然通风数值研究[J]. *农机化研究*, 2011, 33(8): 19 - 22. CHEN Jialang, CHEN Dayue, HE Keshi, et al. Numerical analysis of the natural ventilation in a tunnel greenhouse at high temperature and low-wind-speeds [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(8): 19 - 22. (in Chinese)
- 郝飞麟,沈明卫,张雅. 单栋塑料温室室内温度场 CFD 三维稳态模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(12): 222 - 228. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20121240](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121240). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.040.
- HAO Feilin, SHEN Mingwei, ZHANG Ya. 3-D steady simulation of temperature pattern inside single plastic greenhouse using CFD [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(12): 222 - 228. (in Chinese)
- 郝飞麟,沈明卫,何勇,等. 单栋塑料温室室内多因子综合 CFD 稳态模拟分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 297 - 304. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140948&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140948&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.048.
- HAO Feilin, SHEN Mingwei, HE Yong, et al. Three dimensional steady simulation of microclimate pattern inside single plastic greenhouse using computational fluid dynamics [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 297 - 304. (in Chinese)



- 12 刘兴国,刘兆普,王鹏祥,等. 基于水质监测技术的水产养殖安全保障系统及应用[J]. 农业工程学报,2009,25(6):186-191.  
LIU Xingguo, LIU Zhaopu, WANG Pengxiang, et al. Aquaculture security guarantee system based on water quality monitoring and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6):186-191. (in Chinese)
- 13 朱明瑞,曹广斌,蒋树义,等. 工厂化水产养殖溶解氧自动监控系统研究[J]. 大连水产学院学报,2007,22(3):226-230.  
ZHU Mingrui, CAO Guangbin, JIANG Shuyi, et al. Automatic monitoring and control system of dissolved oxygen levels in recirculating aquaculture[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2007, 22(3): 226-230. (in Chinese)
- 14 高峰,俞立,张文安,等. 基于无线传感网络的作物水份状况监测系统研究与设计[J]. 农业工程学报,2009,25(2):107-112.  
GAO Feng, YU Li, ZHANG Wen'an, et al. Research and design of crop water status monitoring system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2):107-112. (in Chinese)
- 15 袁凯,庄保陆,倪琦,等. 室内工厂化水产养殖自动投饲系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(3):169-176.  
YUAN Kai, ZHUANG Baolu, NI Qi, et al. Design and experiments of automatic feeding system for indoor industrialization aquaculture[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(3):169-176. (in Chinese)
- 16 郭文川,程寒杰,李瑞明,等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报,2010,41(7):181-185.  
GUO Wenchuan, CHENG Hanjie, LI Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):181-185. (in Chinese)
- 17 顾海涛,何康宁,何雅萍. 耕水机的性能及应用效果研究[J]. 渔业现代化,2010,37(4):40-44.  
GU Haitao, HE Kangning, HE Yaping. Research on function and application of biofan[J]. Fishery Modernization, 2010,37(4): 40-44. (in Chinese)
- 18 石礼娟,卢军. 基于随机森林的玉米发育程度自动测量方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):169-174. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170122&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170122&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.022.  
SHI Lijuan, LU Jun. Automatic measurement method for maize ear development degree based on random forest [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):169-174. (in Chinese)
- 19 李震,王宁,洪添胜,等. 农田土壤含水率监测的无线传感器网络系统设计[J]. 农业工程学报,2010,26(2):212-217.  
LI Zhen, WANG Ning, HONG Tiansheng, et al. Design of wireless sensor network system based on in-field soil water content monitoring [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 212-217. (in Chinese)
- 20 WEST R W, PAULSON W L. Jet aeration in activated sludge system[J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1969, 41(10): 164-167.
- 21 宁静红,刘圣春,严雷. 太阳能蔬菜生产配送基地组合系统[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(9):131-135. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120925&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120925&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.025.  
NING Jinghong, LIU Shengchun, YAN Lei. Combined system of solar energy vegetable growth and distribution center [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9):131-135. (in Chinese)

(上接第 318 页)

- 16 PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- 17 BOULARD T, WANG S, HAXAIRE R. Mean and turbulent air flows and microclimatic patterns in an empty greenhouse tunnel [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(2-3): 169-181.
- 18 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.
- 19 RICHARDS P J, HOXEY R P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the  $k-\epsilon$  turbulence model [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 46-47: 145-153.
- 20 WIERINGA J. Updating the davenport roughness classification [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1-3): 357-368.
- 21 MIGUEL A F. Airflow through porous screens: from theory to practical considerations [J]. Energy and Building, 1998, 28(1): 63-69.
- 22 WILSON N R, SHAW R H. A higher order closure model for canopy flow [J]. Journal of Applied Meteorology, 1977, 16(11): 1197-1250.
- 23 MOLINA-AIZ F D, VALERA D L, ALVAREZ A J, et al. A wind tunnel study of airflow through horticultural crops: determination of the drag coefficient [J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(4): 447-457.
- 24 HAXAIRE R. Caracterisation et modelisations des ecoulements d'air dans une serre [D]. Nice: Université de Nice Sophie Antipolis. Faculté des Sciences, 1999.
- 25 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(1-3): 173-190.
- 26 CAMPBELL G S. An introduction to environment physics[M]. New York:Springer, 1977.
- 27 BOULARD T, BAILLE A, MERMIER M, et al. Modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre [J]. Agronomie, 1991, 11(4): 259-274.