

# 基于 CFD 的人工光植物工厂气流场和温度场的模拟及优化

刘焕 方慧 程瑞锋\* 杨其长

(中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室,北京 100081)

**摘要** 为探究植物工厂内风速及温度分布规律,利用计算流体力学软件(Computational fluid dynamics,CFD)建立人工光植物工厂三维模型,将整个植物工厂作为计算域划分网格并进行模拟计算。设计了侧进侧出式、侧进侧上出式、侧进上出式 3 种气流循环模式,并将试验植物工厂设置为上进侧出式。模拟结果表明:风速与温度的平均绝对误差、平均百分误差及均方根误差分别为 0.12 m/s、1.1 °C;11%、4%;0.18 m/s、1.3 °C,与实际测量结果相比模拟准确。3 种优化模式的风速值、温度值及二者均匀性均优于上进侧出式。分析比较植物冠层平面风速及温度值,得出侧进侧出式为最佳气流循环模式。与上进侧出式相比,侧进侧出式平均风速增加 0.51 m/s,均匀性指标变异系数降低 17%,平均温度降低 0.5 °C。

**关键词** 计算流体力学(CFD); 植物工厂; 风速; 温度; 均匀性

中图分类号 S625

文章编号 1007-4333(2018)05-0108-09

文献标志码 A

## Simulation and optimization of the air flow and temperature in plant factory with artificial light based on CFD

LIU Huan, FANG Hui, CHENG Ruifeng\*, YANG Qichang

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture/Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agriculture Structures of Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** 3D model of air ventilation and circulation system was designed to improve the velocity and temperature value and their uniformity in plant factory. CFD (Computational fluid dynamics) was applied to create a three-dimensional model and the whole plant factory was divided into grids and simulated. CFD model was validated through experimental data comparison of the distribution of air flow and temperature. The maximum absolute error, average relative error and root mean square error of wind speed and temperature were 0.12 m/s, 1.1 °C; 11%, 4%; 0.18 m/s, 1.3 °C, respectively, which showed that simulation was accurate. Three cases were studied and compared in this study. The results showed that improve the velocity and temperature value and their uniformity were improved in all three optimized models compared with control. By comparing wind speed and temperature value of plant canopy surface, the average wind speed increased by 0.51 m/s, the coefficient of variation (CV) reduced by 17% and the average temperature reduced by 0.5 °C, was the best air circulation system. This study provided theoretical basis for the design of air circulation system in plant factory.

**Keywords** computational fluid dynamics; plant factory; velocity; temperature; uniformity

人工光植物工厂是一种密闭式生产系统,内部完全采用人工光源 LED(发光二极管)对植物进行照射,以满足植物生长的光合过程。人工光植物工厂由多层立体栽培架、空调、CO<sub>2</sub> 供应装置、营养液

供应装置等组成。室内环境不受外界影响,能够周年使用,节约资源,实现高品质安全生产,具有广阔的发展前景<sup>[1]</sup>。

植物工厂内温度与气流速度是影响植物生长的

收稿日期:2017-07-14

基金项目:科技部“863”计划课题(2013AA103004)

第一作者:刘焕,硕士研究生,E-mail:18101260752@163.com

通讯作者:程瑞锋,副研究员,主要从事农业生物环境工程研究,E-mail:chengruifeng@caas.cn

重要因素<sup>[2]</sup>。温度方面,Deng等<sup>[3]</sup>研究表明叶类蔬菜生长的最适温度为 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;气流速度方面,Kitaya和Thongbai等<sup>[4-6]</sup>研究表明在 $0.01\sim 1.30\text{ m/s}$ 范围内,随着气流速度的增大,叶片光合作用及蒸腾作用逐渐增强。植物工厂热源主要为LED光源,LED虽为冷光源,但输入功率中约80%至85%的能量通过热传导方式散发出去<sup>[7]</sup>。一般LED灯安装在植物正上方 $30\sim 40\text{ cm}$ 处,若LED灯散发的热量不能被及时带走可能导致植物周围局部温度偏高,会对植物生长产生影响。现有植物工厂内温度与气流速度主要通过空调循环系统获得,由于植物工厂进风口与出风口布局不合理导致植物工厂内气流分布不均,尤其是栽培架的影响,导致气流在植物周围形成绕流,植物生长环境中气候不均衡,影响作物蒸腾和光合作用,甚至产生疾病<sup>[8]</sup>。如何合理设计出风口与进风口,使植物工厂内气流速度及温度达到适宜并使两者均匀性提高是一项亟须解决的关键问题。

计算流体力学软件(Computational fluid dynamics,CFD)是以电子计算机为工具的软件系统,具有简单,准确的特点<sup>[8]</sup>。可以准确模拟出温室、植物工厂等空间内的气流及温度分布趋势。Zhang Y等<sup>[9]</sup>利用CFD模拟验证了小型植物工厂内气流组织,并优化设计了管道式通风模式,但该研究没有对植物工厂内温度场分布进行分析。Lim T等<sup>[10]</sup>构建了植物工厂模型,并对模型进行了模拟验证,通过验证的模型模拟了中间过道四种不同进出风口位置下气流分布情况。该研究的不足之处在于没有对温度场进行分析,且在几种优化的气流循环模式下,气流分布结果依旧不理想。Baek M S等<sup>[11]</sup>在人工光型植物工厂中将空调、排风扇、内部风扇的开启设置为不同的案例,使用CFD模拟出植物工厂内部气流及温度,并选出最适宜植物生长的通风案例。总体来说,植物工厂气流方面的研究非常少,本研究拟以中国农业科学院内典型人工光植物工厂为研究对象,模拟验证其内部气流场及温度场,并设计3种气流组织循环模式,旨在为人工光植物工厂的设计与建造提供参考。

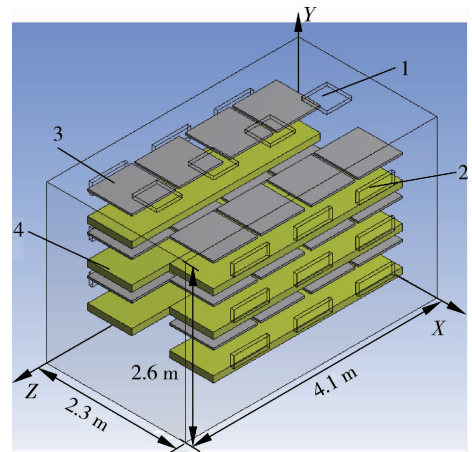
## 1 材料与方 法

### 1.1 试验植物工厂

本试验在北京市中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所内人工光植物工厂中进行,植物工

厂规格为:长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=4.10\text{ m}\times 2.30\text{ m}\times 2.60\text{ m}$ 。该植物工厂位于室内,其内部环境不受室外环境、季节因素影响。四周墙壁及屋顶所用材料为聚苯乙烯夹芯板,厚 $75\text{ mm}$ 。内部东西两侧分别放置一个栽培架,栽培架分为3层,每层规格为:长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=3.00\text{ m}\times 0.70\text{ m}\times 0.60\text{ m}$ ,最下面一层距地面高度为 $0.50\text{ m}$ 。

植物工厂内人工光源全部由功率可调节的LED灯板组成,最大功率为 $480\text{ W}$ 。LED灯板位于每一层栽培架上方,每层栽培架放置4个LED灯板。植物工厂内空调送风系统采用顶部(墙顶)送风,两侧(东西两侧墙)回风的模式。墙顶沿南北方向在中部均匀布置4个送风口,规格为:长 $\times$ 宽 $=0.40\text{ m}\times 0.40\text{ m}$ 。东西两侧墙各均匀布置9个的回风口,规格为:长 $\times$ 宽 $=0.57\text{ m}\times 0.18\text{ m}$ 。内部没有种植植物,试验在空载植物工厂中进行。在Workbench中的Design modeler模块中创建植物工厂模型,以其下部西北角为原点 $(0,0,0)$ ,正北方向为 $X$ 轴正向,垂直向上为 $Y$ 轴正向,正西方向为 $Z$ 轴正向(图1)。



1. 进风口;2. 回风口;3. LED灯板;4. 栽培架  
1. Inlet fans;2. Outlet fans;3. LED lamps;4. Shelves

图1 试验植物工厂结构

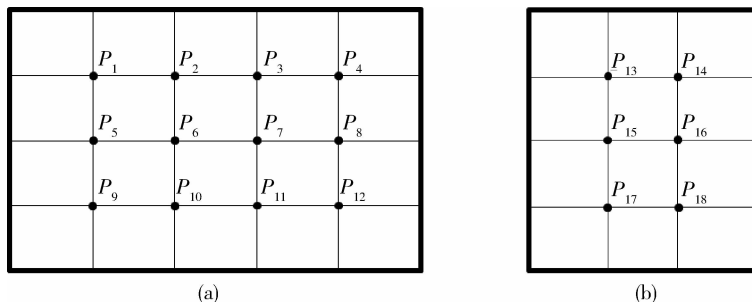
Fig.1 Schematic diagram of experimental plant factory

### 1.2 测点布置

试验中选取 $X=1.15\text{ m}$ 截面,在 $Y=0.70、1.30、1.90\text{ m}$ 高度处各均匀布置4个测点,共12个测点( $P_1\sim P_{12}$ )。选取 $Z=1.60\text{ m}$ 截面,在 $Y=0.70、1.30、1.90\text{ m}$ 高度处各均匀布置2个测点,共6个测点( $P_{13}\sim P_{18}$ ),两个截面共18个测点测量风速值及温度值进行模拟验证;进风口,回风口分别设置两个测点测量风速值与温度值;LED灯板上设置

一个温度测点,测量温度值作为模型运算的边界条件。风速值选用国产 DT-618 式手持风速仪进行测量,其测量精度为  $\pm 0.1$  m/s。温度选用国产铜-康铜热电偶线进行测量,其测量精度为  $\pm 0.2$   $^{\circ}\text{C}$ 。在植物工厂内部中间位置布置 1 个温湿度测点测量植

物工厂内的温湿度值。温湿度测量采用 U12-013 电子式温湿度计,其温度测量精度为  $\pm 0.35$   $^{\circ}\text{C}$ ,湿度测量精度为  $\pm 2.5\%$ 。所有数据通过美国产坎贝尔 CR3000 数据采集仪,每隔 10 min 记录 1 次。截面布点见图 2。



$P_1 \sim P_{18}$  为风速及温度测点。

$P_1 \sim P_{18}$  Measured points of velocity and temperature.

图 2 X=1.15 m 截面(a)与 Z=1.60 m 截面(b)测点布置

Fig. 2 Measured points of sections of X=1.15 m (a) and Z=1.60 m (b)

## 1.3 数学模型

### 1.3.1 CFD 模型方程

采用 CFD 软件 (FLUENT 16.0) 进行模拟计算。将植物工厂内的送、回风过程看做三维、稳态、不可压缩的湍流流动过程;湍流模型选用标准 k- $\epsilon$  模型(k-realizable);近壁面采用标准壁面函数;使用有限体积法对控制方程进行离散;用 SIMPLE 算法(压力耦合方程组的半隐式方法)计算求解压力耦合方程;气流数值计算按照流体力学守恒数学公式计算,即连续性方程、动量方程、能量方程,符合质量、动量、能量守恒定律<sup>[12]</sup>,公式如下:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + \frac{S_T}{c_p} \quad (5)$$

式中: $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间, s;  $\mathbf{v}$  为速度矢量;  $u, v, w$  分别为流体质点速度在  $x, y, z$  方向上的分量;  $\mu$  为黏性系数;  $S$  为源项;  $T$  为温度, K;  $k$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $C_p$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $p$  为压力, Pa。

### 1.3.2 计算域与网格划分

选取整个植物工厂区域作为计算域,网格划分在 Workbench 的 ICEM 模块中进行。由于结构化网格能够较好地控制网格生成质量,计算更容易达到收敛,而六面体网格节点数量在同样求解精度下少于四面体网格数量的一半,易于计算,所以将计算域全部划分为结构化六面体网格<sup>[13]</sup>。由于进风口、出风口、LED 灯板处边界层压力及温度梯度较大,对网格进行边界层加密处理。经过网格独立性检验,最后计算出网格节点数为 3 053 918,网格数量为 3 171 396,网格质量极好<sup>[14]</sup> (Quality=0.999)。网格截面示意图 3。

### 1.3.3 边界条件

将人工光植物工厂模型进行简化。由于该植物工厂为密闭式,不受太阳光影响,所以不考虑太阳辐射;将 LED 灯板简化为温度面(Wall-temperature),温度设定为实测值  $32.0$   $^{\circ}\text{C}$ ,不考虑其内部辐射传热;假设门密封性好,不考虑漏风影响,将四周墙壁及栽培架设为绝热壁面(Wall);设置进风口为速度入口(Velocity-inlet),将进风口处实测的风速值

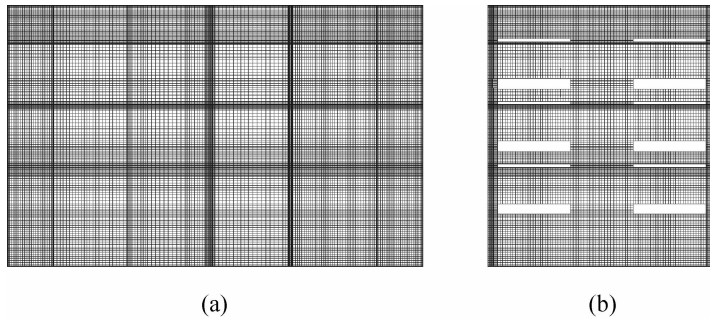


图 3 植物工厂 X=1.15 m(a)与 Z=1.60 m(b)网格截面示意

Fig. 3 Grid model of plant factory of sections of X=1.15 m (a) and Z=1.60 m (b)

1.70 m/s 设为边界条件；设置出风口为压力出口 (Pressure-outlet)，压力设为 0 Pa，进出风温度皆为实测值为 22.5 °C。

### 1.3.4 求解运算

选用 SIMPLE 算法进行压力速度耦合运算。空间离散设置中，梯度项 (Gradient) 选用最小二乘法 (Least Squares Cell Based)；压力项 (Pressure) 选用标准算法 (Standard)；动量 (Momentum)，能量 (Energy) 和粘性项 (Dissipation) 都选用一阶迎风格式 (First Order Upwind)，以达到更快收敛。将能量项 (Energy) 的松弛因子设置为  $10^{-6}$ ，其余项皆设置为  $10^{-3}$  以判断结果是否收敛。

## 2 CFD 仿真结果与验证

### 2.1 CFD 仿真结果

试验植物工厂内气流分布见图 4。从图 4(a)可以看出，进风口下方气流梯度变化剧烈。气流由植物工厂上部 4 个送风口进入后，垂直流下，并集中于进风口下方，在底部形成旋流及涡流。只有少量气流由侧出风口流出，导致栽培架内风速很小。

为探究人工光植物工厂内植物生长区域的风速分布情况，选取每层栽培架的植物冠层平面即  $Y = 0.80, 1.40, 2.00$  m 平面进行分析 (图 4(b))。将  $0.30 \sim 1.00$  m/s 的风速视为植物生长适宜风速， $<0.30$  m/s 及  $>1.00$  m/s 的风速均为不适宜的风速<sup>[15]</sup>。在风速分析中，选取植物冠层平面的最大、最小、平均风速值， $<0.30$  m/s、 $0.30 \sim 1.00$  m/s、 $>1.00$  m/s 的百分率，变异系数 (Coefficient of variation) 分析。其中变异系数是标准偏差与平均值的比值，能够表述均匀性，变异系数越小表明均匀性越好<sup>[16]</sup>。经计算得知，最下层栽培架整体风速比上面两层大，这是由于靠近地面处形成旋流及涡流。植物冠层面区域最大风速位于最下层栽培架，为  $0.41$  m/s；最小风速接近于  $0.00$  m/s；平均风速为  $0.16$  m/s，低于最低适宜风速  $0.30$  m/s。处于适宜风速  $0.30 \sim 1.00$  m/s 的风速仅为  $9\%$ ， $>1.00$  m/s 的风速为  $0\%$ 。有  $91\%$  的区域风速  $<0.30$  m/s，即绝大部分区域风速达不到植物生长适宜风速要求。变异系数为  $57\%$ 。总体而言，此类气流循环模式的风速不符合植物生长需要。

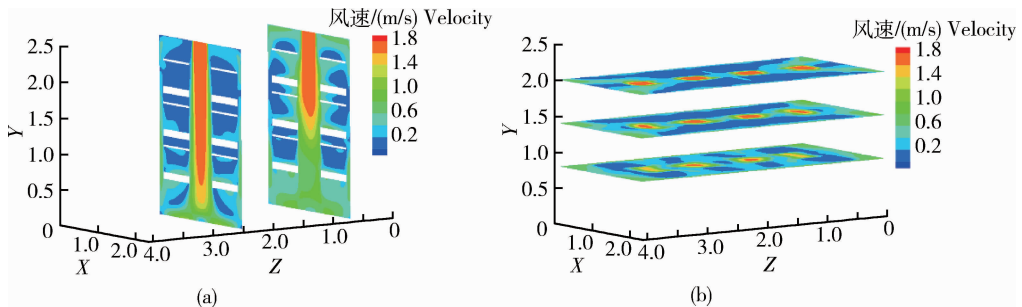


图 4 试验植物工厂 Z=0.70、2.50 m 截面(a)和 Y=0.80、1.40、2.00 m 截面(b)风速分布云图

Fig. 4 Velocity magnitude countours of sections of Z=0.70, 2.50 m (a) and Y=0.80, 1.40, 2.00 m (b) in experimental plant factory

图5为 $Z=0.75、3.00$  m截面的温度分布云图。贴近LED灯板处温度值较大,达到 $30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,温度梯度较大。过道处及栽培架下方温度降低,较为均匀。植物工厂内植物栽培区域整体温度均小于 $26.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,能够满足作物的生长需求。同样分析植物冠层平面温度分布情况,计算得出温度平均值为 $23.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大值 $25.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最小值为 $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,符合植物生长的需求。

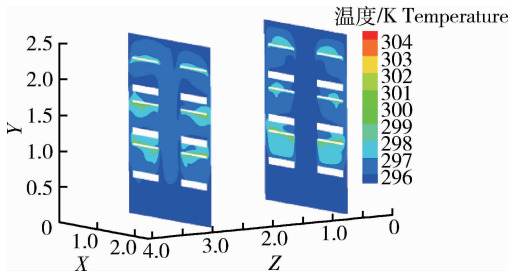


图5 试验植物工厂 $Z=0.75、3.00$  m截面温度分布云图  
Fig.5 Temperature contour of sections of  $Z=0.75、3.00$  m in experimental plant factory

## 2.2 CFD模型验证

### 2.2.1 风速值对比

将18个测点的风速模拟值与实测值进行对比,结果见图6(a)。模拟值与实测值相比,测点11绝对误差最大,为 $0.35\text{ m/s}$ ,位于植物工厂内过道靠近地面处。由于测点15、16风速值过小,不易测量,其百分误差最大,为 $90\%$ ,位于栽培层中层内部。 $X=1.15\text{ m}$ 平面,即东西走向过道中部平面, $1.90\text{ m}$ 高度处4个测点( $P_1\sim P_4$ )平均百分误差为 $12.4\%$ , $1.30\text{ m}$ 高度处4个测点( $P_5\sim P_8$ )平均百分误差为 $13.8\%$ , $0.70\text{ m}$ 高度处4个测点( $P_9\sim P_{12}$ )平均百分误差为 $26.5\%$ 。试验结果表明越靠近风口处,气流模拟越准确。总体上看,风速的模拟值与实测值相比,平均绝对误差为 $0.12\text{ m/s}$ ,平均百分误差为 $11\%$ ,18个测点风速均方根误差为 $0.18\text{ m/s}$ ,模拟值与实测值吻合度较好。

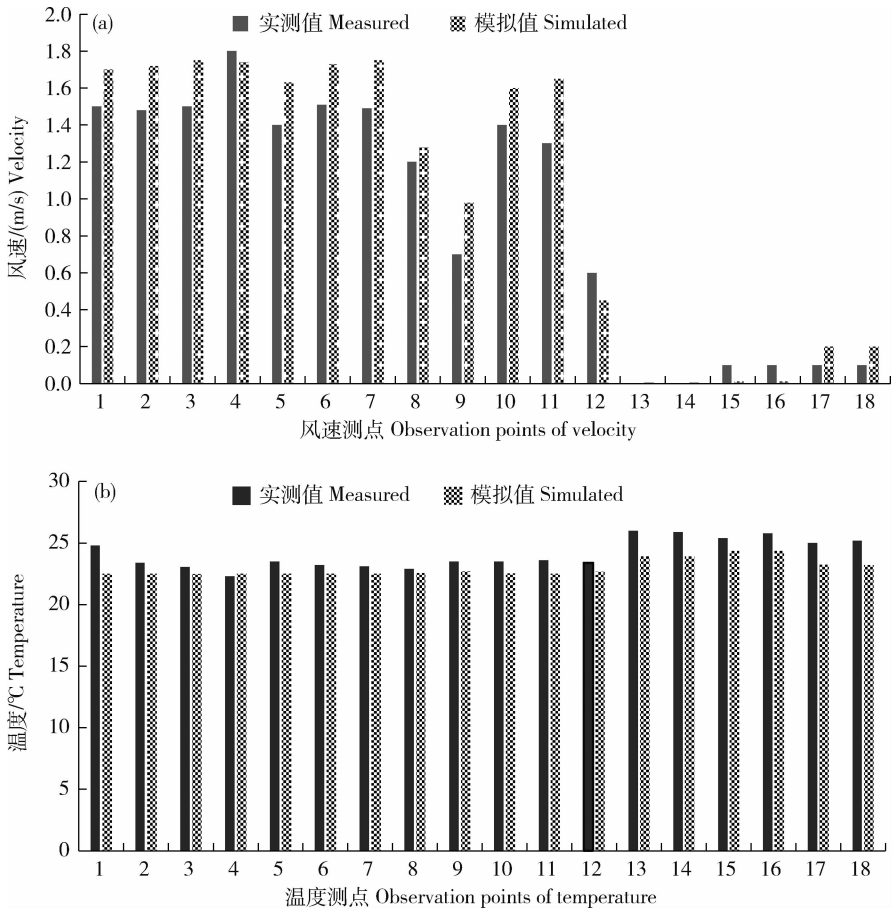


图6 植物工厂内各测点风速(a)及温度(b)模拟值与实测值的比较

Fig.6 Comparison between measured and simulated air velocity (a) and temperature (b) values in plant factory



### 2.2.2 温度值对比

将 18 个测点的温度模拟值与实测值对比,结果见图 6(b),模拟值与实测值相比总体偏小。测点 1 位于植物工厂内过道靠近进风口处,其绝对误差与相对误差最大,分别为 2.3 °C 和 9%。18 个测点的平均绝对误差为 1.1 °C,平均百分误差为 4%,18 个测点温度均方根误差为 1.3 °C。

由于实验员活动及仪器摆放会对气流造成一定影响,风速与温度模拟值与实测值的数值有一定差异,但趋势是一致的,模拟结果有效,可以进行气流组织循环设计<sup>[17]</sup>。

## 3 气流循环组织优化设计

### 3.1 优化方案设计

由于试验植物工厂中气流不能满足植物生长的需要,现在其基础上,改变进、回风口位置,设计出 3 种气流循环模式,即:方案 1,侧进侧出式;方案 2,侧进侧上出式;方案 3,侧进上出式(图 7)。将试验植物工厂作为

对照植物工厂,设置为方案 0。内部栽培架摆放位置及尺寸不变。利用 CFD 模拟并比较各案例中植物生长冠层平面风速及温度分布情况,选出植物冠层平面风速及温度值最适宜,且两者均匀性最佳的案例。

方案 1、方案 2、方案 3 的模型建立及网格划分与方案 0 相同。边界条件设置中将进风口设置为速度入口 (Velocity-inlet),回风口设置为压力出口 (Pressure-outlet)。设定不同案例间通风量相同,以试验植物工厂方案 0 为基准,根据式(6)计算不同案例的进风口速度。

$$u_{in} = \frac{Q}{A_{in}} \tag{6}$$

式中: $u_{in}$ 为进风口处气流速度; $A_{in}$ 为总进风口面积; $Q$ 为总送风量。计算得出方案 0 送风量为 0.448 m<sup>3</sup>/s,方案 1、方案 2 和方案 3 中送风面积分别为 0.923 4、0.923 4、1.846 8 m<sup>2</sup>。由式(6)可得,送风口送风速度分别为 1.178、1.178、0.59 m/s。出风口压力均设为 0 Pa,其余边界条件设置与方案 0 相同。

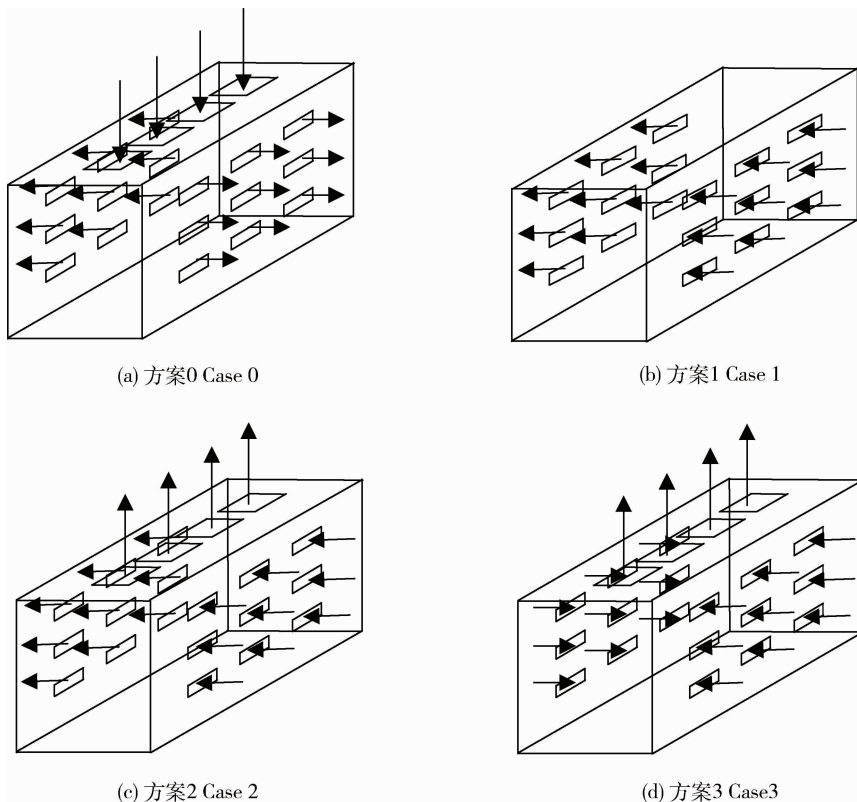


图 7 不同气流循环组织设计

Fig. 7 Various cases for the optimal ventilatin design in the plant factory

### 3.2 优化模拟分析

#### 3.2.1 气流场分析

方案1,即侧进侧出气流循环模式中,气流由东侧进风口流入,由西侧回风口流出。进风口附近风速最大,风速沿流动方向逐渐减弱,到回风口附近增

大(图8(a))。植物冠层平面风速平均值为0.67 m/s;最大风速值位于进风口附近,为1.18 m/s;生长最适宜风速值即0.30~1.00 m/s之间的风速值百分比为82%,所占比例较大;变异系数为40%,与方案0相比较小,表明其均匀性比方案0更高(表1)。

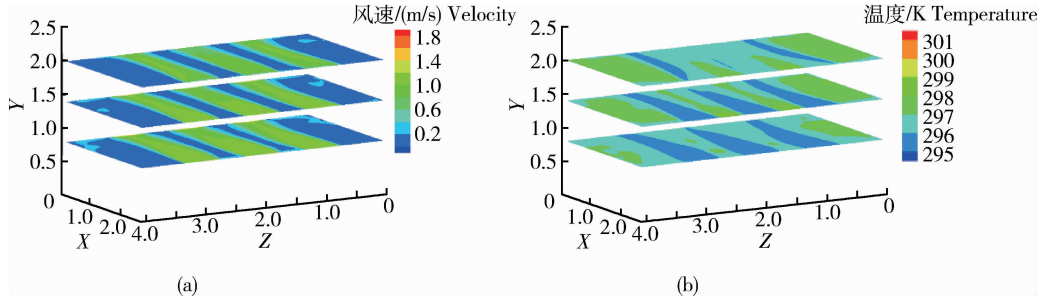


图8 方案1不同截面风速云图(a)和温度云图(b)

Fig. 8 Contours of air velocity (a) and temperature (b) of different sections in Case 1

方案2,即侧进侧上出式气流循环模式,由风速云图可知其风速分布趋势与方案1大致相同。气流由东侧进风口流入后,多数由西侧回风口流出,只有少量气流由上部4个回风口流出(图9(a))。风速

平均值0.64 m/s微小于方案1的0.67 m/s;0.30~1.00 m/s之间的风速百分比为76%,小于方案1的82%;变异系数为43%,其均匀性比方案1差(表1)。

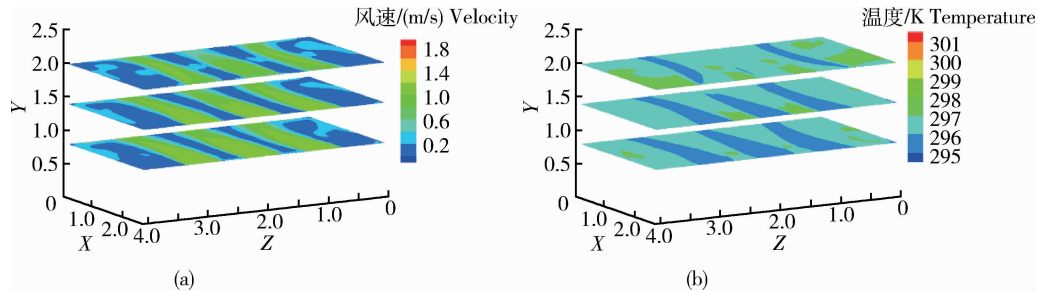


图9 方案2不同截面风速云图(a)和温度云图(b)

Fig. 9 Contours of air velocity (a) and temperature (b) of different sections in Case 2

方案3,即侧进上出式气流循环模式中,气流由东西两侧进风口流入,上部4个回风口流出(图10(a))。由于进风速度较小,其风速最大值0.59 m/s、

平均值0.39 m/s、最小值0.14 m/s在3个设计方案中皆为最小;小于0.30 m/s的风速百分比为29%,在3个方案中最大;变异系数为34%,均匀性最好(表1)。

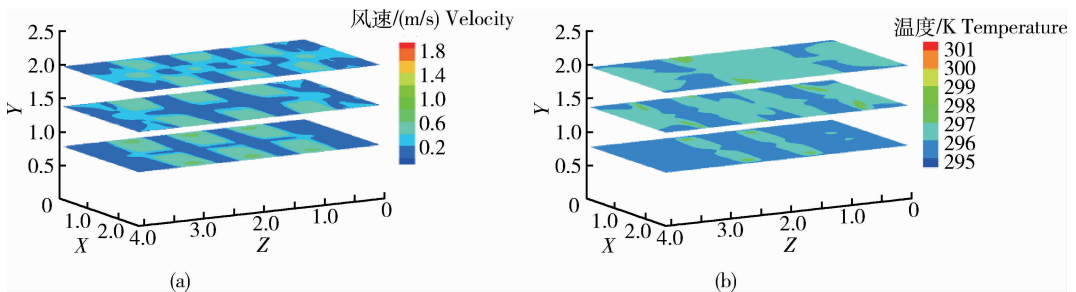


图10 方案3不同截面风速云图(a)和温度云图(b)

Fig. 10 Contours of air velocity (a) and temperature (b) of different sections in Case 3

### 3.2.2 温度场分析

由方案 1、方案 2、方案 3 冠层平面风速分布与温度分布云图(图 8(b)、图 9(b)、图 10(b))对比可知,温度分布趋势与气流分布趋势有一定相关关系。风速值较大区域温度较小,反之,风速值较小区域温

度相对较大。

各气流循环模式下植物冠层平面温度对比分析结果为,方案 0 平均温度最高,为 23.6 °C,方案 3 平均温度最低,为 22.9 °C。最大温度值为方案 1 中的 25.3 °C,最小温度值为方案 2 中的 22.5 °C(表 2)。

表 1 不同气流循环模式植物冠层平面风速

Table 1 Comparison of air velocity value in plant canopy surface in different air circulation systems

气流循环模式 Air circulation system	最大值/ (m/s) Maximum	最小值/ (m/s) Minimum	平均值/ (m/s) Average	百分率/% Percentage			变异系数/% Coefficient of variation
				<0.3 m/s	0.3~1.0 m/s	>1.0 m/s	
方案 0 Case 0	0.41	0.00	0.16	91	9	0	57
方案 1 Case 1	1.18	0.21	0.67	5	82	13	40
方案 2 Case 2	1.18	0.18	0.64	11	76	13	43
方案 3 Case 3	0.59	0.14	0.39	29	71	0	34

表 2 不同气流循环模式植物冠层平面温度

Table 2 Comparison of air temperature in plant canopy surface in different air circulation systems °C

气流循环模式 Air circulation system	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average
方案 0 Case 0	25.2	22.8	23.6
方案 1 Case 1	25.3	22.5	23.2
方案 2 Case 2	25.0	22.5	23.1
方案 3 Case 3	23.9	22.5	22.9

## 4 结 论

本研究利用 CFD 模拟了人工光植物工厂内部风速与温度分布情况,并将模拟值与实测值进行对比,模拟值与实测值吻合,模拟效果良好。风速平均绝对误差为 0.12 m/s,平均百分误差为 11%,均方根误差为 0.18 m/s。温度平均绝对误差为 1.1 °C,平均百分误差为 4%,18 个测点温度均方根误差为 1.3 °C。模拟值与实测值吻合。

设计的 3 种气流循环模式,即方案 1、方案 2、方案 3 的风速值及均匀性均优于方案 0。方案 1 与方案 2 的模拟结果表明上出风口设置对植物工厂内部气流循环影响不大。3 种优化中,方案 1 风速值及位于 0.30~1.00 m/s 的百分比最高。方案 3 的均匀性最佳。综合考虑,方案 1 气流循环模式最佳。

LED 散热对植物生长没有大的影响,生长区域温度均在适宜范围内。方案 3 生长区域平均温度值最小,方案 0 平均温度值最大。温度分布趋势与风速分布趋势大致成反比,风速较大的区域温度相对较低。

本研究基于人工光植物工厂进出风口的位置布局设计了 3 种气流循环模式,在以后的研究中,可将进出风口位置、大小及风口数量考虑为不同因素,设计多个水平的正交试验,给出利于植物生长和节能的植物工厂通风最优设计。此外本研究没有考虑植物对植物工厂内部环境的影响,因为植物的蒸腾作用、呼吸作用以及成熟期蔬菜对气流的遮挡作用会对植物工厂中气流场及温度场产生一定影响,下一步可将植物设置为多孔介质进行模拟计算,探究植物对植物工厂内部环境的影响。



## 参考文献 References

- [1] 古在丰树. 人工光型植物工厂[M]. 北京: 农业出版社, 2014: 21-77  
Kozai T. *Plant Factory With Artificial Light* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 21-77 (in Chinese)
- [2] Majdoubi H, Boulard T, Fatnassi H, Bouirden L. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare canary type greenhouse; An experimental and CFD assisted study[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2009, 149(6-7): 1050-1062
- [3] Deng Z, Song S. Sodium nitroprusside, ferricyanide, nitrite and nitrate decrease the thermo-dormancy of lettuce seed germination in a nitric oxide-dependent manner in light[J]. *South African Journal of Botany*, 2012, 78(1): 139-146
- [4] Kitaya Y. Importance of air movement for promoting gas and heat exchanges between plants and atmosphere under controlled environments[J]. *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*, 2005: 185-193
- [5] Thongbai P, Kozai T, Ohyama K. CO<sub>2</sub> and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 126(3): 338-344
- [6] Kitaya Y, Tsuruyama J, Shibuya T, Kiyota M. Effects of air current speed, light intensity and CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and transpiration of plant leaves[C]. In: *35th COSPAR Scientific Assembly*. Paris: 35th COSPAR Scientific Assembly, 2004: 16478-16485
- [7] 郭常青, 闫常峰, 方朝君, 李文博. 大功率 LED 散热技术和热界面材料研究进展[J]. 半导体光电, 2011, 32(6): 749-755  
Guo C Q, Yan C F, Fang C J, Li W B. Advancement on thermal enhancement and thermal interfacial materials for high power LEDs[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(6): 749-755 (in Chinese)
- [8] 林加勇, 刘继军, 孟庆利, 雷明刚, 童宇, 高云. 公猪舍夏季温度和流场数值 CFD 模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 207-212  
Lin J Y, Liu J J, Meng Q L, Lei M G, Tong Y, Gao Y. Numerical CFD simulation and verification of summer indoor temperature and airflow field in boar building[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(23): 207-212 (in Chinese)
- [9] Zhang Y, Kacira M, An L. A CFD study on improving air flow uniformity in indoor plant factory system [J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 147: 193-205
- [10] Lim T G. Analysis of airflow pattern in plant factory with different inlet and outlet locations using computational fluid dynamics[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 39(4): 310-317
- [11] Baek M S, Kwon S Y, Lim J H. Improvement of the crop growth rate in plant factory by promoting air flow inside the cultivation[J]. *International Journal of Smart Home*, 2016, 10(2): 63-74
- [12] 邓书辉, 施正香, 李保明. 低屋面横向通风牛舍温湿度场 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 209-214  
Deng S H, Shi Z X, Li B M. CFD simulation of temperature and humidity distribution in low profile cross ventilated dairy cattle barn[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9): 209-214 (in Chinese)
- [13] 赵国群, 虞松, 王广春. 六面体网格自动划分和再划分算法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3): 188-192  
Zhao G Q, Yu S, Wang G C. Automatic generation and regeneration algorithm of hexahedral mesh [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(3): 188-192 (in Chinese)
- [14] 李海峰, 吴冀川, 刘建波, 梁宇兵. 有限元网格剖分与网格质量判定指标[J]. 中国机械工程, 2012, 23(3): 368-377  
Li H F, Wu J C, Liu J B, Liang Y B. Finite element mesh generation and decision criteria of mesh quality [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(3): 368-377 (in Chinese)
- [15] Kitaya Y, Tsuruyama J, Kawai M, Shibuya T, Kiyota M. Effects of air current on transpiration and net photosynthetic rates of plants in a closed plant production system [J]. *Transplant Production in the 21st Century*, 2000: 83-90
- [16] 王文森. 变异系数: 一个衡量离散程度简单而有用的统计指标 [J]. 中国统计, 2007, 2007(6): 41-42  
Wang W S. Variation coefficient: A simple and useful statistical measure of the degree of discretization [J]. *China Statistics*, 2007, 2007(6): 41-42 (in Chinese)
- [17] 张芳, 方慧, 杨其长, 程瑞锋, 张义, 柯行林, 卢威, 刘焕. 基于 CFD 模型的大跨度温室自然通风热环境模拟 [J]. 中国农业气象, 2017, 38(4): 221-229  
Zhang F, Fang H, Yang Q C, Cheng R F, Zhang Y, Ke X L, Lu W, Liu H. Ventilation simulation in a large-scale greenhouse based on CFD [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(4): 221-229 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春