

基于 CFD 的 LED 补光灯模型构建与验证

张晨^{1,2} 方慧^{1,2*} 程瑞锋^{1,2} 杨其长^{1,2} 吴晨溶^{1,2} 杨利^{1,2}

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;

2. 农业农村部 设施农业节能与废弃物处理重点实验室,北京 100081)

摘要 为明确植物工厂 CFD 环境模拟中 LED 补光灯的边界条件设置,构建单层 LED 补光栽培架(原型),并根据原型在 CFD 软件中建立规格一致的栽培架三维模型,对三维模型进行模拟分析,将得到的模拟值与原型实测值进行对比分析,验证 LED 灯边界条件设置的可行性。在模型中将 LED 补光灯分为反应器和灯罩两部分,反应器为 LED 补光灯的灯板,设置为热源边界条件,根据红、蓝灯珠数量及其对应的光电转化效率计算其单位体积散热量,灯罩为 LED 补光灯表面的塑料壳,起保护灯珠的作用,设置为导热材料,将三维模型的风速、温度模拟值与栽培架原型的实测风速值、温度值进行对比,结果表明:1)栽培架三维模型中 LED 补光灯的散热量为 $34\ 166\ \text{W}/\text{m}^3$; 2)通过模拟值与实测值对比,30 个测点实测风速值与 CFD 模拟风速值的均方根误差为 0.06,46 个测点实测温度值与 CFD 模拟温度值的均方根误差为 2.63,模拟值与实测值吻合良好。在植物工厂 CFD 模拟中,可以将 LED 补光灯反应器设置为热源、灯罩设置为导热材料。

关键词 植物工厂; 环境模拟; 计算流体力学 (CFD); 热源; LED 补光灯

中图分类号 S625

文章编号 1007-4333(2020)11-0105-08

文献标志码 A

Simulation and verification of LED lamp model based on CFD

ZHANG Chen^{1,2}, FANG Hui^{1,2*}, CHENG Ruifeng^{1,2}, YANG Qichang^{1,2}, WU Chenrong^{1,2}, YANG Li^{1,2}

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agriculture Structures,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract In order to identify boundary condition of LED light in CFD environment simulation of plant factory, a single-layer production system was constructed. According to the prototype, a 3D model of the cultivation frame with the same size was built in CFD software. The 3D model was simulated and analyzed, and the simulated value was compared with the measured value of the prototype, which verified the feasibility of setting LED lamp boundary conditions. In the model, the LED lamp was divided into reactor and lampshade. The reactor was set as the boundary condition of heat source. Based on the numbers of red and blue bulbs and the corresponding electro-optical conversion efficiency, the heat dissipation per unit volume was calculated. The lamp shade is a plastic shell on the surface of the LED lamp, which was set as a heat conduction material. The measured values of airflow speed and temperature on the cultivation system were compared with the simulated values. The feasibility of setting LED lamp reactor as heat source and lamp shade as heat conduction material in CFD model was verified. The results showed that: 1) The heat dissipation per unit volume of LED lamp in the three-dimensional model of cultivation system was $34\ 166\ \text{W}/\text{m}^3$; 2) The root-mean-square error of the measured and simulated wind speed values at 30 measurement points is 0.06 and the root-mean-square error of the measured and simulated temperature value at 46 measurement points is 2.63. In conclusion, it is feasible to set LED supplementary light reactor as heat source and lamp shade as heat conduction material in CFD simulation of plant factory.

Keywords plant factory; environmental simulation; computational fluid dynamics; energy source; LED lamp

收稿日期: 2012-03-10

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2018BBF02012); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2019XK21-01)

第一作者: 张晨, 硕士研究生, E-mail: 837158075@qq.com

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

植物工厂是在完全密闭或半密闭条件下通过高精度环境控制,通过人工调控的方法实现作物在垂直立体空间中进行周年计划性生产的高效农业系统。在植物工厂中,人工光源是植物生长的唯一能量与信号源,也是植物工厂系统设计至关重要的组成部分^[1-3]。早期的植物工厂主要使用的人工光源有高压钠灯、金属卤化物灯和荧光灯等,少数使用冷阴极管进行试验和应用,这些光源存在光谱匹配不理想、光质不能满足植物生长需求、光能利用率低和不能调控光强等缺点,不适应于植物工厂中为植物提供光照,直到LED冷光源突破传统光源限制成为植物工厂光环境调控技术的新型光源并应用于植物工厂补光领域这些问题才得以解决^[4-7]。

自20世纪90年代来,计算流体力学(CFD)技术开始应用于农业领域,目前CFD技术已被证明是一种有效和成熟的工具,可用于分析受控环境农业(设施农业)中的流体动力学、热力学和复杂的流体现象^[8-11]。目前植物工厂内部补光装置以LED植物补光灯为主,LED光源具有发热小,光配方精确可控、寿命长和光衰减缓慢等优点^[6,12-13]。虽然LED补光灯是一种冷光源,但由于其电光转化效率一般为30%~40%,仍有60%~70%的电能转化为热能并以热量的形式散逸到周边环境^[14-15]。而目前针对植物工厂内部环境中气流场和温度场的CFD模拟大多忽略LED植物补光灯的散热量影响,仅研究空载(忽略植物工厂内部作物和LED灯具,甚至于忽略作物栽培架)条件下的植物工厂内部温度场和气流场的分布情况,这样的模拟结果不能反映实际生产中植物工厂中的环境状况^[16]。为精确模拟植物工厂环境,刘焕等^[17]通过实测LED灯板的温度,将温度值设置为灯板的边界条件,考虑灯板散热对植物工厂热环境的影响,但在实际生产中灯板温度与周围环境温度有关,并非为固定值,而是随环境温度波动而变化。因此,植物工厂环境模拟中首先需要确定LED补光灯在CFD模型中的边界条件。Zhang等^[18]在模拟单层栽培装置气流走向时,将整个荧光灯管考虑为热源,并构建三维CFD模型对整个栽培系统进行模拟和验证。LED补光灯主要由波长为660 nm的红光和波长为460 nm的蓝光组成,其发光原理和结构与荧光灯不同^[12],因此在CFD模型中荧光灯的边界条件参数不能为LED补光灯所用。

关于植物工厂CFD环境模拟中LED补光灯边界条件的相关研究尚未见报道。本研究根据LED

补光灯的发光特点在三维模型中对LED灯边界条件进行设置,进行风速和温度的模拟研究,将取得的模拟值与原型栽培架中的实测风速值、温度值进行对比分析以验证LED灯边界条件设置的可行性,旨在明确植物工厂CFD环境模拟中LED灯边界条件的设置方法,以为后续植物工厂环境模拟提供关键参数。

1 材料与方法

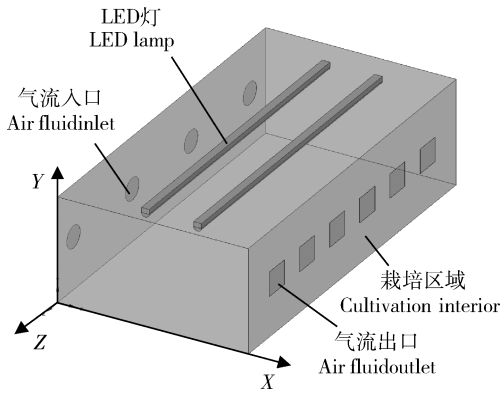
1.1 栽培装置

本试验在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所环境工程实验室中进行,所构建的植物生长架规格为:长×宽×高=1.4 m×0.7 m×0.4 m,栽培架6个壁面均用厚度为0.002 m的PVC板进行密封。栽培架采用侧进侧出式通风模式,在栽培架侧壁面均匀布置4个进风口,在另一侧壁均匀布置6个出风口(图1)。进风口直径为0.1 m,相邻进风口的中心间距为0.4 m,在进风口处安装对流风扇,风扇额定电压为12 V,额定电流为0.60 A。出风口规格为:宽×高=0.1 m×0.1 m,相邻2个出风口之间的间距为0.2 m。栽培架内部顶端安装2根LED植物补光灯管(广州市智卉光田农业科技有限责任公司),间距为0.2 m,灯型号为IGL-T8-36BIR11,额定电压为DC51 V,额定功率为37 W,额定电流为0.7 A。每根LED补光灯管由220个红色灯珠和20个蓝色灯珠组成,红色LED灯珠(波长655 nm)与蓝色LED灯珠(波长455 nm)的电功率分别为0.15和0.21 W。

在Workbench中Geometry模块中创建植物工厂及内部栽培架的三维模型,以试验模型西南方下角点为原点(0,0,0),正东方向为 x 轴的正方向,垂直向上为 y 轴的正方向,正南方向为 z 轴的正方向(图1)。

1.2 测点布置

在LED植物补光灯铝合金反应器和灯罩的两侧和中间位置布置温度测点,两根灯管共布置温度测点12个,单根LED灯管测点布置,见图2(a)。取 $x=0.365$ m的 yo z截面,在 y 轴0.10,0.20和0.30 m处,在 z 轴0.09,0.39,0.69,0.99和1.29 m处分别布置温度和风速测点,共计布置15个测点(图2(b))。选取 $z=0.69$ m的 xoy 截面,在 y 轴0.10,0.20和0.30 m处,在 x 轴0.02,0.20,0.38,0.56和0.73 m处分别布置温度和风速测点,共计布置15个测点(图2(c))。在每个进风口处分别布置1个温度和风速测点,共计布置4个测点。



植物生长架规格为：长×宽×高=1.4 m×0.7 m×0.4 m；植物生长架壁厚为 0.002 m；进风口为圆形，4 个，直径为 0.1 m，相邻进风口中心间距为 0.4 m；出风口为正方形，6 个，规格为：宽×高=0.1 m×0.1 m，相邻 2 个出风口之间的间距为 0.2 m；植物补光灯管长 1.2 m，由 220 个红色灯珠和 20 个蓝色灯珠组成。下同。

The length, width and height of the plant growth frame were 1.4 m, 0.7 m and 0.4 m respectively; The wall thickness of the plant growth frame is 0.002 m; There are four circular air intakes with a diameter of 0.1 m, and the distance between adjacent air intakes centers is 0.4 m; There are altogether 6 square air intakes, whose width and height are all 0.1 m, and the spacing between the two adjacent air intakes is 0.2 m; The plant supplementary lamp tube is 1.2 m long and consists of 220 red beads and 20 blue beads. The same below.

图 1 试验用单层植物栽培装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of monolayer plant cultivation apparatus for experiment

温度传感器选用铜-康铜 T 型热电偶线，其精度为 ±0.2 °C。数据采集仪使用 ECR7100-A16-R06-PW6-SU-MD-VAC 型记录仪(杭州逸控科技有限公司)，数据采集仪用于自动记录热电偶线采集的温度值，数据采集间隔为 3 min。气流速度测量使用 6501-BG 型热线风速仪(日本 Kanomax 公司)，风速测量范围 0.01~5.00 m/s，风速测量公差范围为标准值的 ±2%，工作温度范围 -20~70 °C，相对湿度范围 2%~98%，气压范围为 -5~5 kPa。

1.3 LED 补光灯散热量计算

LED 补光灯虽然为冷光源，但其并不能将电能全部转化成光能，仍旧有大部分电能被转化成热能并以热量的形式散逸在周边环境中，而且 LED 补光灯的电光转化效率因灯的型号和生产厂商等因素会存在一定差异^[19]。Nelson^[14] 比较在电流为 700 mA 时不同类型 LED 补光灯的光热转化效率，研究发现冷白色 LED 灯、红色 LED 灯和蓝色 LED 灯的电光转化效率分别为 33%、32%和 49%。本试验采用的红蓝 LED 补光灯由 220 枚红灯珠和 20 枚蓝灯珠组成，其热功率计算式为：

$$E = n_r \times E_r \times (1 - \eta_r) + n_b \times E_b \times (1 - \eta_b) \quad (1)$$

式中： E 为 LED 补光灯热功率，W； n_r 为红灯珠数量，枚； n_b 为蓝灯珠数量，枚； E_r 为红灯珠电功率，W；

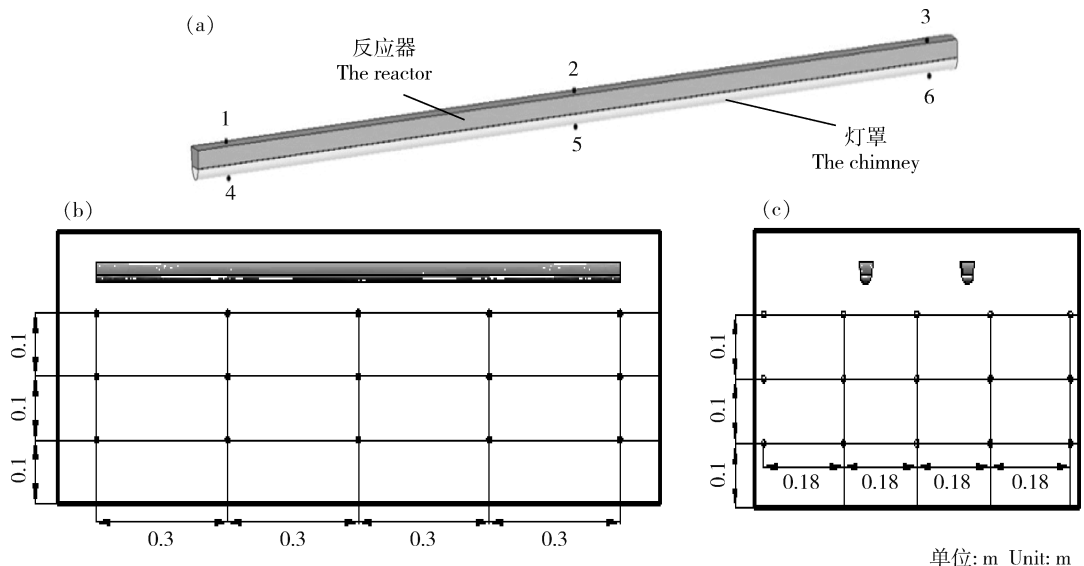


图 2 LED 灯表面温度测点布置图(a)、yoz (b)与 xoy (c)截面温度及风速测点布置图

Fig.2 The layout of LED light surface temperature measuring points (a), yoz (b) and xoy (c) cross-section temperature and wind speed measuring points

E_b 为蓝灯珠电功率, W; η_r 为红灯珠电光转化效率; η_b 为蓝灯珠电光转化效率。

LED 补光灯作为单层栽培架系统的唯一热源, 由 LED 补光灯表面通过体积对流损失的热量作为 CFD 模型系统的能量项, 该能量项的值由下式求得^[18]:

$$q = \frac{E}{V_{LED}} \quad (2)$$

式中: q 为单位体积热功率, W/m^3 ; V_{LED} 为热源体积, m^3 。

2 结果与分析

2.1 数学模型

2.1.1 CFD 建模与网格划分

模拟分析采用 CFD 软件中的 Design Modeler 模块和 ANSYS Meshing 模块对栽培装置进行建模和网格划分, 采用 FLUENT 18.1 对栽培区域进行模拟计算。利用 Design Modeler 模块创建与单层补光栽培架原型相同尺寸的栽培装置三维模型, 在模型中将 LED 补光灯分为反应器和灯罩两部分, 反应器为 LED 补光灯的灯板, 设置为热源边界条件, 根据红、蓝灯珠数量及其对应的电光转化效率计算其单位体积散热量, 灯罩为 LED 补光灯表面的塑料壳, 起保护灯珠的作用, 设置为导热材料。将 LED 补光灯的反应器和灯罩设置为固体区域, 栽培空间设置为流体区域。将构建的三维模型输入到 ANSYS Meshing 模块中, 利用 Proximity and Curvature 方法进行网格划分, 并对 LED 灯及周围进行网格加密处理, 共生成 731 986 个网格,

146 916 个节点, 网格最大偏斜度为 0.65, 最小偏斜度为 7.50×10^{-4} , 平均值为 0.23, 网格质量优^[20]。

2.1.2 控制方程

模拟区域可由质量、动量和能量守恒方程来描述。计算时采用标准 k- ϵ 方程求解, 控制方程包括连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程、k(湍流动能方程)和 ϵ (耗散率)方程, 这些方程可由如下通用方程来表示^[21]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\vec{v}) = \text{div}(\Gamma_\phi\text{grad}\phi) + S_\phi \quad (3)$$

式中: ϕ , 通用变量; ρ , 密度, kg/m^3 ; \vec{v} , 速度矢量, m/s ; Γ_ϕ , 广义扩散系数; S_ϕ , 源项。

$\phi=1$ 时, 该方程为连续性方程(质量守恒方程); $\phi=\vec{v}=[u, v, w]$ 时, 该方程为动量守恒方程; $\phi=T$ 时, 该方程为能量守恒方程。其中 u, v 和 w 是 \vec{v} 分别是在 3 个方向的速度标量; T , 温度, K。

2.1.3 边界条件及材料属性

将植物栽培装置模型进行简化, 栽培装置内部空间设置为空气介质, 气流由进风口进入栽培装置内部, 然后从出风口流出, 带走 LED 补光灯产生的热量。栽培装置围护结构设置为壁面(Wall); LED 补光灯反应器设置为热源, 通过计算得到 LED 补光灯发热功率 24.6 W, 单位放热功率为 $34\ 166\ W/m^3$; 进风口设置为速度入口(Velocity-inlet), 进风速度为 2.20 m/s, 进风温度为操作环境温度实测值 299 K; 气流出口设置为压力出口(Pressure-outlet), 压力为 0 Pa, 出口回流温度为操作环境温度 299 K。所有材料热物理属性, 见表 1。

表 1 材料热物理属性

Table 1 Thermo physical properties of materials

| 介质 Dielectric | 密度/ (kg/m^3) Density | 比热/ ($J/(kg \cdot K)$) Specific heat | 热导率/ ($W/(m \cdot K)$) Thermal conductivity | 动力粘度/ ($kg/(m \cdot s)$) Dynamic viscosity | 热膨胀系数/ (1/K) Thermal expansion coefficient |
|------------------|--------------------------------|--|--|---|---|
| 空气 Air | 1.225 | 1 006.43 | 2.42×10^{-2} | $1.789\ 4 \times 10^{-5}$ | 3.43×10^{-3} |
| 玻璃 Glass | 2 500 | 670.00 | 0.74 | | |
| 铝 Aluminium | 2 719 | 871.00 | 202.40 | | |

2.1.4 计算方法

对构建的三维模型进行稳态求解, 湍流模型选用标准 k- ϵ 湍流模型。梯度项选用最小二乘法; 压力项

选用标准算法; 动量、能量和粘性项都选用一阶迎风格式, 以达到更快收敛。将能量项的松弛因子设置为 10^{-6} , 其余项皆设置为 10^{-3} 以判断结果是否收敛。

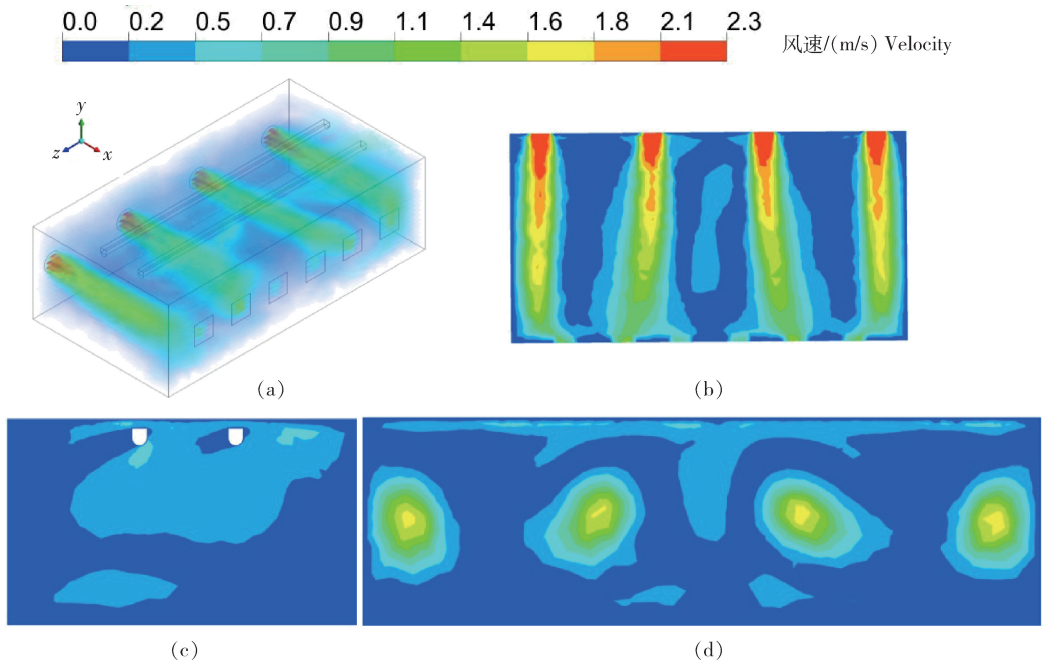
2.2 CFD 仿真结果与验证

2.2.1 风速仿真结果与验证

1) 仿真结果 由图 3 可知,气流由进风口进入栽培区域后经出风口离开栽培装置,气流速度 $> 0.7 \text{ m/s}$ 的区域主要集中在从进风口到出风口的位置,呈 4 个气流束,气流速度的大小由进风口向出风口递减,进风口处风速最大,风速值为 2.3 m/s ,出风口处风速最小,风速值为 0.9 m/s ,风速值处于 $0.9 \sim 2.3 \text{ m/s}$ 的空气流体体积为 0.05 m^3 ,占总裁培区域体积的 12.5% 。除 4 个气流束所在位置外,

单层栽培装置内部其他位置风速较小,风速值主要集中在 $0 \sim 0.5 \text{ m/s}$,处于该气流速度之间的空气流体为 0.35 m^3 ,占总裁培区域体积的 87.5% 。

2) 风速值对比 由图 4 可知,总体上看,风速实测值与 CFD 模拟值相比,平均绝对误差为 0.08 m/s ,平均百分误差为 18.9% ,30 个测点实测风速值与 CFD 模拟值的均方根误差为 0.06 ,CFD 风速模拟值与风速实测值吻合度良好。因此本试验所构建的单层栽培架装置实际内部气流分布情况与模拟情况吻合良好,能够进行 LED 植物生长灯的模拟试验。



(a) 栽培架内部空间气流速度分布云图; (b) $y=0.215 \text{ m}$ 时, xoz 平面风速分布云图; (c) $z=0.69 \text{ m}$ 时, xoy 平面风速分布云图; (d) $x=0.365 \text{ m}$ 时, yoz 平面风速分布云图

(a) Contours of spatial wind speed distribution inside the cultivation frame; (b) Cloud map of xoz plane airflow speed distribution when $y=0.215 \text{ m}$; (c) Cloud map of xoy plane airflow speed distribution when $z=0.69 \text{ m}$; (d) Cloud map of yoz plane airflow speed distribution when $x=0.365 \text{ m}$

图 3 单层植物栽培装置气流速度分布云图

Fig. 3 Wind speed distribution clouds in plant cultivation system

2.2.2 温度仿真结果与验证

1) 仿真结果 由图 5 可知,高温区域主要集中在 LED 补光灯反应器及其周围空间。LED 补光灯反应器是整个装置的热源,其温度最高为 315 K 。由图 5(b) 可知,整个栽培架的上部空间温度要高于下部空间,LED 灯为整个装置的热源,也是整个装置的高温区域,温度自 LED 补光灯反应器往下递减,在装置下部位置与室温 299 K 一致。

LED 补光灯的反应器温度要明显高于灯罩的温度,且背风面 LED 补光灯的温度明显高于

迎风面 LED 补光灯,温度相差 2 K (图 5)。LED 补光灯反应器附近温度高于栽培架装置内部温度,背风侧 LED 补光灯表面平均温度为 315 K ,迎风侧 LED 补光灯表面平均温度为 313 K ,其主要原因是迎风侧补光灯周围气流速度高于背风侧补光灯周围气流速度,导致迎风侧对流换热更充分。

2) 温度值对比 由图 6 可知,共计布置温度测点 46 个,其中测点 1~15 位于 $x=0.365 \text{ m}$ 的 yoz 截面,测点 16~30 位于 $z=0.69 \text{ m}$ 的 xoy 平面,测

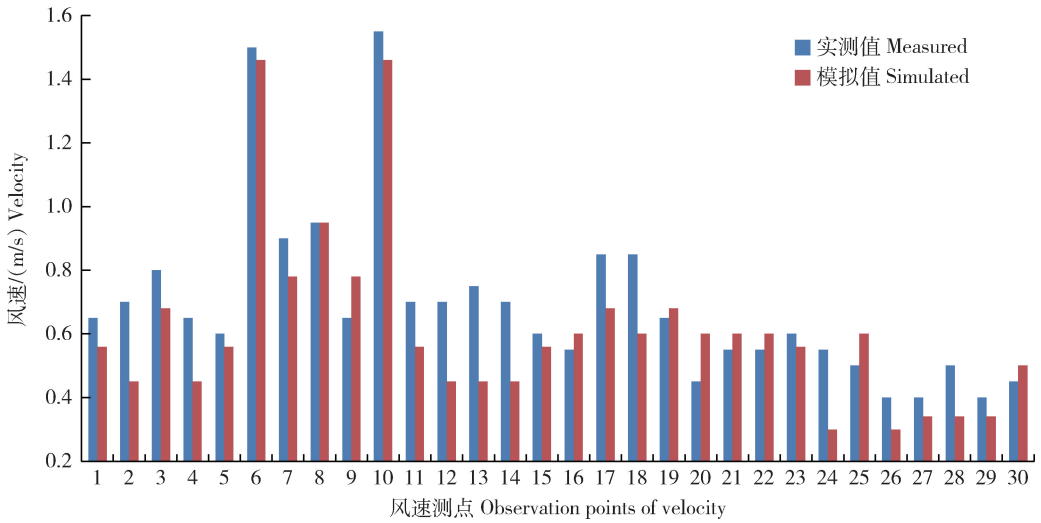
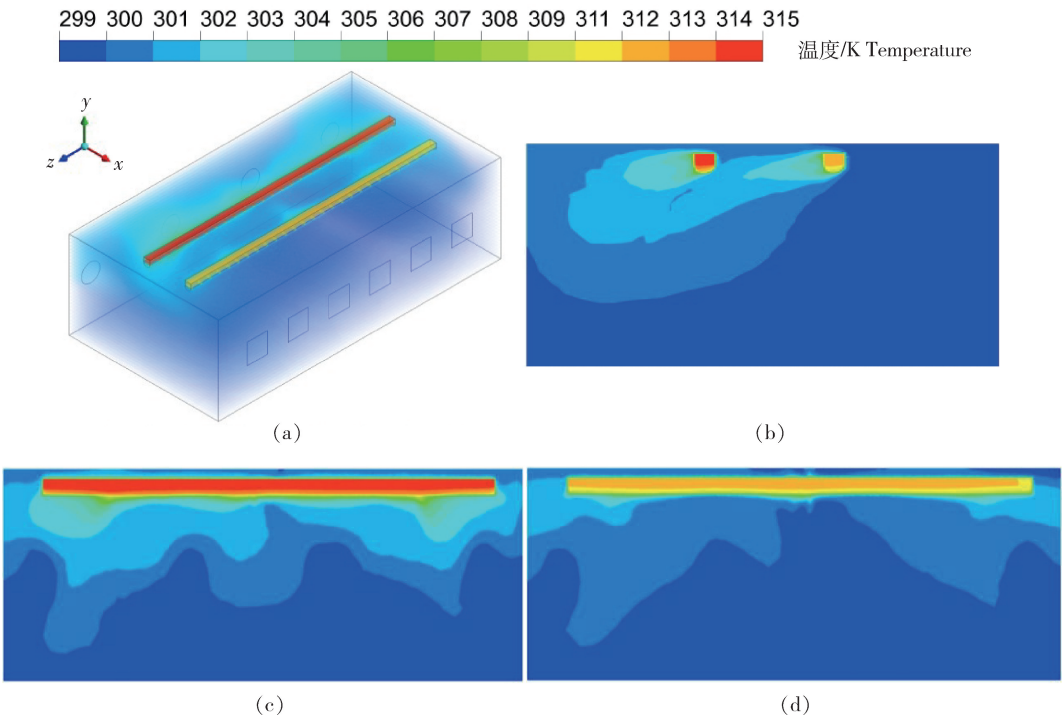


图4 单层植物栽培装置内部风速实测值与模拟值对比

Fig. 4 Comparison between measured and simulated airflow speed in the monolayer plant cultivation device



(a)栽培架内部空间温度分布模拟图;(b) $z=0.69$ m时, xoy 平面温度分布云图;(c) $x=0.265$ m时, $yo z$ 平面温度分布云图;(d) $x=0.465$ m时, $yo z$ 平面温度分布云图

(a) Simulation diagram of spatial temperature distribution inside the cultivation shelf; (b) Cloud map of xoy plane temperature distribution when $z=0.69$ m; (c) Cloud map of $yo z$ plane temperature distribution when $z=0.265$ m; (d) Cloud map of $yo z$ plane temperature distribution when $z=0.465$ m

图5 单层植物栽培装置内部空间温度分布云图与平面温度分布云图

Fig. 5 Spatial and planar temperature distribution cloud diagram of monolayer plant cultivation device

点 31~42 位于 LED 补光灯反应器和灯罩上,测点 43~46 位于装置进风口处。总体上看,温度实测值与 CFD 模拟值相比,平均绝对误差为 1.5 °C,平均

百分误差为 10%,46 个测点实测温度值与 CFD 模拟温度值的均方根误差为 2.63,46 个测点实测温度值与 CFD 模拟值吻合度良好。

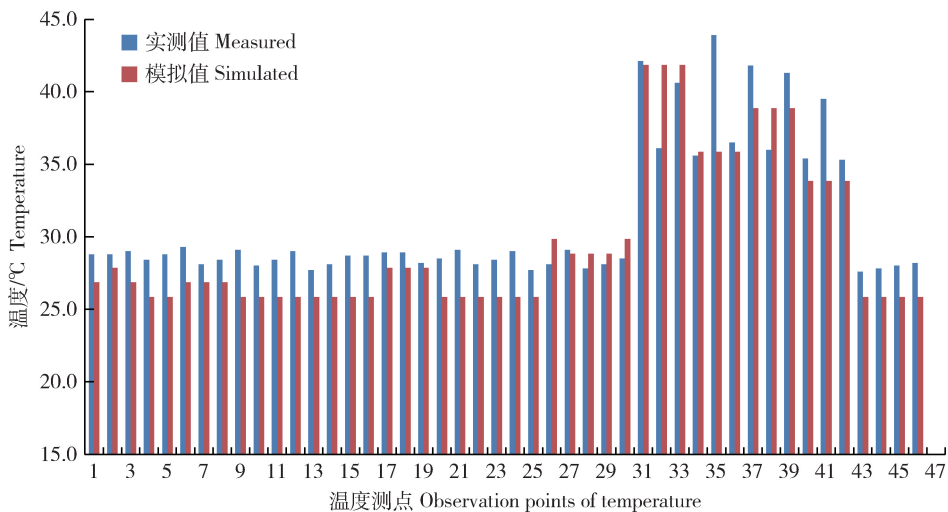


图 6 单层植物栽培装置内部温度实测值与模拟值对比

Fig. 6 Comparison between the measured and the simulated temperature in the monolayer plant cultivation device

3 讨论与结论

本研究模型建立时将 LED 补光灯分为反应器和灯罩两部分,反应器为 LED 补光灯的灯板,设置为热源边界条件,根据红、蓝灯珠数量及其对应的电光转化效率计算其单位散热量 $34\ 166\ \text{W}/\text{m}^3$,灯罩为 LED 补光灯表面的塑料壳,起保护灯珠的作用,设置为导热材料。

通过模拟值与实测值对比,30 个测点实测风速值与 CFD 模拟风速值的均方根误差为 0.06,46 个测点实测温度值与 CFD 模拟温度值的均方根误差为 2.63,模拟值与实测值吻合良好。该结果验证了在植物工厂 CFD 模拟中,将 LED 补光灯反应器设置为热源,灯罩设置为导热材料是可行的。在后续利用 CFD 软件进行植物工厂内部气流场和温度场的模拟运算时,可以将 LED 灯管分为反应器和灯罩两部分,将反应器设置为热源边界条件,灯罩设置为导热材料,根据红、蓝灯珠的数量及对应的电光转化效率计算其单位散热量,并将其设置为 LED 补光灯的边界条件进行后续模拟运算。

本研究是在空置的单层栽培架中进行,并未考虑植物影响,但在实际生产型植物工厂中,植物对气流和温度的影响较大。Sase 等^[22]在风洞实验室中测试了番茄冠层的阻力系数为 0.31,Tamimi 等^[23]将该结果应用到温室 CFD 环境模拟中,并且在 CFD 模型中考虑了番茄冠层蒸腾对温度的影响,该模型模拟值与实测值非常吻合^[23]。因此,下一步的

研究中还需测试植物工厂常规栽培叶菜的阻力系数与蒸腾速率,考虑植物冠层对气流和温度的影响,使植物工厂 CFD 模型更具实用性。

参考文献 References

- [1] 杨其长,张成波. 植物工厂概论[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2005
Yang Q C, Zhang C B. *Introduction to Plant Plants* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2005 (in Chinese)
- [2] 杨其长. 植物工厂与垂直农业及其资源替代战略构想[J]. 文明, 2011(3): 8-9
Yang Q C. Plant factory and vertical agriculture and its resource substitution strategy[J]. *Civilization*, 2011(3): 8-9 (in Chinese)
- [3] 杨其长. 植物工厂的发展策略[J]. 科技导报, 2014, 32(10): 20-24
Yang Q C. Developmental strategy of plant factory[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(10): 20-24 (in Chinese)
- [4] Kozai T, Chun C, Ohyama K. Closed systems with lamps for commercial production of transplants using minimal resources [J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 630: 239-254
- [5] 刘文科,杨其长. 设施园艺半导体照明及其研发中的科技问题[J]. 照明工程学报, 2014, 25(6): 8-11
Liu W K, Yang Q C. Facility horticultural semiconductor lighting and its technological problems in research and development[J]. *Journal of Lighting Engineering*, 2014, 25(6): 8-11 (in Chinese)
- [6] 刘文科,杨其长. 设施园艺半导体照明[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2016
Liu W K, Yang Q C. *Facilities Garden Semiconductor*

- Lighting [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2016 (in Chinese)
- [7] 陈红豆. 植物工厂中LED光环境调控系统的研究与设计[D]. 天津:天津职业技术师范大学, 2016
Chen H D. Research and design of LED light environment control system in plant plant[D]. Tianjin: Tianjin Vocational and Technical Normal University, 2016 (in Chinese)
- [8] Lee I B, Short T H. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2000, 43(3): 745-753
- [9] Bournet P E, Khaoua S A O, Boulard T. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98: 224-234
- [10] Baeza E J, Pérez-parra J J, Montero J I, Bailey B J, López J C, Gázquez J C. Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104: 86-96
- [11] 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 and Forest Meteorology*, 2009, 149: 1050-1062
- [12] 魏灵玲. LED光源在密闭式植物苗工厂的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008
Wei L L. Application of LED light source in closed plant seedling plant [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [13] 闻婧. LED红蓝光波峰及R/B对密闭植物工厂作物的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009
Wen J. Effects of LED red & blue wave crest and R/B on plant crops of closed plants[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009 (in Chinese)
- [14] Nelson J A, Bugbee B. Supplemental greenhouse lighting: Return on Investment for LED and HPS fixtures[J]. *Controlled Environments*, 2013, 2: 1-9
- [15] 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. Research progress on heat dissipation technology and thermal interface materials of high-power LED[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(6): 749-755 (in Chinese)
- [16] Lim T G, Kim Y H. 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
- [17] 刘焕, 方慧, 程瑞锋, 杨其长. 基于CFD的人工光植物工厂气流场和温度场的模拟及优化[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(5): 108-116
Liu H, Fang H, Cheng R F, Yang Q C. Simulation and optimization of the air flow and temperature in plant factory with artificial light based on CFD [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(5): 108-116 (in Chinese)
- [18] Zhang Y, Kacira M, An L L. A CFD study on improving air flow uniformity in indoor plant factory system[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 147: 193-205
- [19] Thimijan R W, Heins R D. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure, a review of procedures for interconversion [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1983, 18(6): 818-822
- [20] 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 mesh quality evaluation index [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(3): 368-377 (in Chinese)
- [21] 程秀花. 温室环境因子时空分布CFD模型构建及预测分析研究[D]. 南京: 江苏大学, 2011
Cheng X H. CFD model construction and prediction analysis of spatial and temporal distribution of greenhouse environmental factors[D]. Nanjing: Jiangsu University, 2011 (in Chinese)
- [22] Sase S, Kacira M, Boulard T, Okushima L. Wind tunnel measurement of aerodynamic properties of a tomato canopy [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2012, 55(5): 1921-1927
- [23] Tamimi E, Kacira M, Choi C Y, An L L. Analysis of microclimate uniformity in a naturally vented greenhouse with a high-pressure fogging system [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2013, 56(3): 1241-1254

责任编辑: 吕晓梅