

高菊玲, 刘永华. 基于风扇差速调节的微型植物工厂温度精准控制[J]. 江苏农业学报, 2020, 36( 6 ): 1543-1550.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.06.026

## 基于风扇差速调节的微型植物工厂温度精准控制

高菊玲<sup>1,2</sup>, 刘永华<sup>1,2</sup>

(1. 江苏农林职业技术学院机电工程学院, 江苏 句容 212400; 2. 江苏省现代农业装备工程中心, 江苏 句容 212400)

**摘要:** 微型植物工厂环境的精准调控是实现其智能化控制的前提, 但是已有的环境调控方式存在各栽培层温度差异较大的问题。本研究提出在微型植物工厂内部加入混风通道并采用风扇差速调节的方式, 在计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)模拟仿真中设定目标温度为 20 ℃, 通过软件计算得到各栽培层的进风量分别为 0.018 9 m<sup>3</sup>/s、0.023 6 m<sup>3</sup>/s、0.028 1 m<sup>3</sup>/s。通过风速调节旋钮对进风量进行调节, 通过各层风扇的差速调节来实现各栽培层的均匀调温。结果表明, 在目标温度为 20 ℃的条件下, 控温设备持续工作 60 min 后, 未使用混风通道和风速差速调节控温方式的传统微型植物工厂内第 1、第 2 栽培层的温度为 19 ℃, 而第 3 栽培层的温度为 24 ℃, 温差达到了 5 ℃; 使用混风通道和风速差速调节控温方式下的微型植物工厂, 各栽培层的温度均为 20.5 ℃左右。由结果可知, 在加入混风通道并且进行风扇差速调节后, 各栽培层的环境温差得到了有效改善。

**关键词:** 微型植物工厂; CFD 模拟仿真; 风扇差速调节; 混风通道; 精准控制

**中图分类号:** S626.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)06-1543-08

## Research on precise temperature control of mini-plant factory environment based on fan differential adjustment technology

GAO Ju-ling<sup>1,2</sup>, LIU Yong-hua<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China; 2. Jiangsu Modern Agricultural Equipment and Engineering Center, Jurong 212400, China)

**Abstract:** Achieving precise control of the mini-plant factory environment is the prerequisite for its intelligent control, but the previous environmental control methods have the problem of large temperature differences among cultivation layers in mini-plant factory. In this study, a mixed air channel was added in the micro plant factory, and the method of fan differential adjustment was adopted. In the computational fluid dynamics (CFD) simulation, the target temperature was set at 20 ℃, and the air intake volume of each cultivation layer was 0.018 9 m<sup>3</sup>/s, 0.023 6 m<sup>3</sup>/s and 0.028 1 m<sup>3</sup>/s. The air inlet volume was adjusted by the wind speed adjustment knob, and the uniform temperature adjustment of each cultivation layer was realized by the differential adjustment of the fans. The experimental results showed that when the target temperature was 20 ℃ and the temperature-control equipment continued to work for 60 min, the temperature of the first, second and third cultivation layers was 19 ℃, 19 ℃ and 24 ℃ in the micro-plant factory without the mixing channel and the wind

speed differential adjustment, the temperature difference reached 5 ℃. The temperature of each cultivation layer was about 20.5 ℃ under the temperature control mode of mixed air channel and wind speed differential adjustment. In conclusion, the environmental temperature difference of each cultivation layer has been effectively improved by using the mixed air channel and fan differential adjustment.

**Key words:** mini-plant factory; computational flu-

收稿日期: 2020-10-23

基金项目: 2019 年度江苏省高校优秀科技创新团队项目(设施园艺智能装备)

作者简介: 高菊玲(1981-), 女, 江苏泰兴人, 硕士, 副教授, 研究方向为智能农业装备、农业物联网等。(E-mail) 89059025@qq.com

通讯作者: 刘永华, (E-mail) 271681387@qq.com

id dynamics (CFD) simulation; fan differential adjustment; mixed air channel; precise control

气候异常、水资源短缺及土地资源的日益减少是加剧世界粮食危机的重要因素。与此同时,全球人口始终保持急剧增长,联合国的预测数据显示,2050 年全球人口将增加至  $9.8 \times 10^9$  人<sup>[1]</sup>,其中城镇人口约占 66%<sup>[2]</sup>。为了解决全球粮食短缺问题,一种新的种植方式——“植物工厂”应运而生。植物工厂由隔热且几乎密闭的类似仓库结构的栽培设施组成,包括人工光源、空调、空气循环风扇、二氧化碳与营养液供应装置及环境调控装置等<sup>[3-5]</sup>。与农业生产用的大型植物工厂相比,微型植物工厂是为那些没有户外种植条件的城镇居民开发设计的,使他们能够享受室内种植的乐趣。目前,微型植物工厂被广泛应用于教育机构、餐厅、办公场所及医院等。由于微型植物工厂在结构尺寸上的限制,使得生菜、紫苏等叶菜类作物成为其主要栽培对象。近年来,微型植物工厂在中国、日本、韩国等许多国家逐渐流行起来,为城镇居民生活提供了一种新的休闲娱乐方式<sup>[6]</sup>。

在传统的商用型植物工厂中,为了消除光源及其他设备产生的热量,一般用空调进行环境温度的控制,同时降低由植物蒸腾作用造成的环境湿度。此外,空调还能够加速植物工厂内部的空气循环,达到提高作物光合作用能力及蒸腾速率的目的,并且实现植物工厂内部环境温度的均匀分布<sup>[6]</sup>。微型植物工厂由于其内部小环境的气候特点,在使用小型空调设备进行环境调控的过程中,由于冷空气下沉,容易引起下层温度与上层温度差异过大,导致能源损耗。更为严重的是,当上层栽培架达到设定温度时,底层温度低于作物的最佳生长温度,导致作物产量减少甚至发生冻害。因此,有必要对微型植物工厂内各栽培架之间的温度进行统一精准调控,从而降低微型植物工厂的能耗并增加产量,促进其规模化生产应用。

微型植物工厂环境参数的优化分析是实现其环境精准调控的前提条件,有研究者采用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)对微型植物工厂的湿热环境数值进行分析,结果表明,微型植物工厂中部及以下位置的环境温度较低,导致同一作物不同部位所处的环境温度差异较大,此外温度变化梯度受通风过程中气流流动的影响较大<sup>[7]</sup>。但该研究只是通过模拟仿真进行了基本分析,没有

提出切实有效的解决措施。江苏大学的左志宇等<sup>[8]</sup>通过微型植物工厂内的环境控制参数优化试验,分别研究植物工厂内温度、湿度和循环风速 3 种因素对作物净光合速率和蒸腾速率的影响,并在不同风速条件下对植物工厂内气流场、温度场进行了 CFD 仿真分析,结果表明,植物工厂上层采用低速循环模式,下层采用高速循环模式,有利于植物工厂内部温度均匀,并且有利于作物生长。但是由于冷空气下沉,在设备运行初期使得绝大多数冷空气被底层风扇抽入底部的栽培层,导致各层之间温度的变化较大。因此,本研究提出在风扇进风口与空调之间加入混风通道,待通道内充满冷空气后再打开风扇,从而保证上层风扇能够抽入足量冷空气。此外,本研究对微型植物工厂内的循环风扇进行差速调节,使得微型植物工厂内各层环境温度能够得到同步调控,减少各栽培层之间的温度差异,保持作物品质的稳定性,同时能够为今后微型植物工厂环境精准控制策略的制定提供理论基础。

## 1 系统搭建及试验设计

### 1.1 外形结构及网格划分

如图 1 所示,本研究设计的微型植物工厂的长×宽×高为 840 mm×540 mm×1 380 mm,使用铝型材料搭建而成,共 4 层,从下往上分别为第 1 层、第 2 层、第 3 层和第 4 层,其中第 1~3 层为植物栽培区域,第 4 层为控制区域。栽培区域与空调连接处设有混风通道(长×宽×高为 130 mm×480 mm×1 180 mm),首先将空调出风口的冷空气引入混风通道,待通道内的空气温度达到设定值后,打开风扇,对环境温度进行控制。循环风扇安装在每层植物栽培室的右侧(风扇外径尺寸为 120 mm×120 mm),通过风速调节旋钮调节循环风扇的电阻,从而对循环风扇的出风量进行调节。栽培区域采用红蓝发光二极管(LED)灯(WEN-T8H, WEGA Plant Lighting Company, China)作为光源提供光能,红、蓝光源比为 83:17。红色 LED 灯的峰值波长为 660 nm,波长范围为 600~700 nm。蓝色 LED 灯的峰值波长为 450 nm,波长范围为 400~500 nm。采用 SOLIDWORKS Flow Simulation 建立微型植物工厂的 CFD 数值模型,边界条件及其初始化参数设置见表 1。将计算域划分



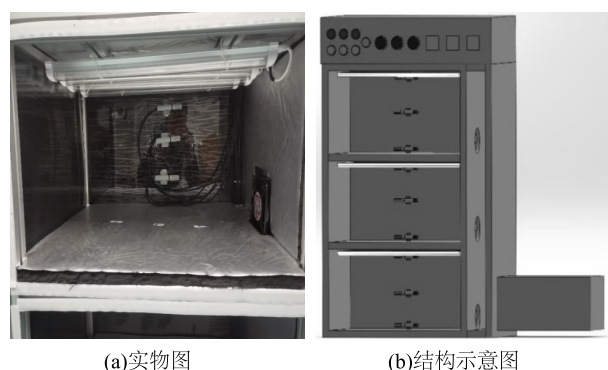


图2 温度传感器的布置

Fig.2 Schematic diagram of temperature sensor

为了分析微型植物工厂内各栽培层温度随时间的变化趋势,采用 SOLIDWORKS 软件建立微型植物工厂的三维模型,并建立关于环境温度的 CFD 数值模型,结合各截面的温度场分布与实测环境温度进行理论分析,探究微型植物工厂内各栽培层温度的变化规律,模拟分析在控温设备运行条件下,微型植物工厂内各栽培层之间的温度变化情况。在每个栽培层内设置 3 个温度场截面,3 个截面与 LED 光源的距离分别为 100 mm、200 mm、300 mm。

**1.2.3 风扇差速调节微型植物工厂温度场分析**  
传统微型植物工厂由于空调出风孔安装在微型植物工厂底部,且冷空气有下沉的特性,导致大部分冷空气被循环风扇输送至底部栽培层内,使得各栽培层温差过大。为了解决微型植物工厂内部各栽培层温度差异过大的问题,实现栽培层温度的精准调控,本研究在传统微型植物工厂的基础上加入混风通道,首先在通道内部完成充分降温,随后打开循环风扇对栽培空间进行调温,目标温度为 20℃,每隔 1 min 记录 1 次温度。为了得到各层风扇的具体转速,首先在 CFD 数值模型中设置最终内部环境温度(20℃)作为约束条件,将各层温度变化趋势一致作为控制目标,通过仿真计算得到各栽培层的进风量。随后通过风速调节旋钮调节各个风扇的转速,使得各栽培层的进风量与模拟值一致。

## 2 结果与分析

### 2.1 人工光源对微型植物工厂不同栽培层温度的影响

从图 3 可以看出,在植物补光灯打开且没有任何降温设备的条件下,各栽培层温度随时间的增加

而上升,且各层温度的变化趋势基本一致。各层的起始温度与环境温度接近,环境温度在前 5 min 几乎不变,随后逐渐升高;在第 30 min,第 1、第 2、第 3 栽培层的温度分别为 30.9℃、31.6℃、32.5℃,随后变化趋势逐渐放缓;在第 60 min,各层温度有较大差异,且第 3 栽培层温度最高,其次分别为第 2、第 1 栽培层。

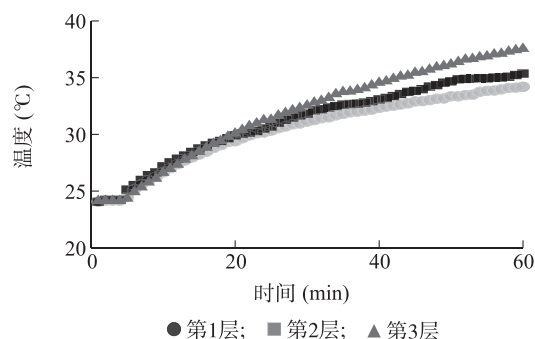


图3 人工光源对不同栽培层温度的影响

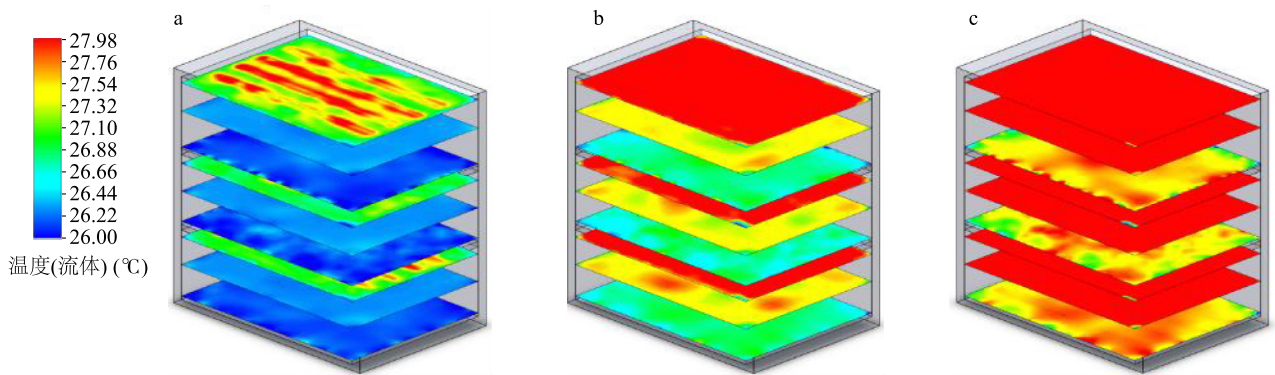
Fig.3 Effects of artificial light source on the temperature of different cultivation layers

图 4 为 LED 光源完全打开时通过 CFD 模拟仿真得到的各栽培层截面温度场的分布云图,其中图 4a 是 LED 光源打开 5 min 后的温度场分布图,由于 LED 光源发热,此时热能主要集中在各栽培层顶部的光源附近,栽培层顶部的温度约为 27℃。图 4b 是 LED 光源打开 15 min 后的温度场分布图,LED 光源产生的热量与下层栽培空间产生热交换,栽培槽中部的温度升高至 28℃左右,栽培槽底部的温度仍在 26℃左右。图 4c 是 LED 光源打开 30 min 后的温度场分布图,此时微型植物工厂整体的温度升高且同一栽培层上部的温度高于下部,上部、中部的温度约为 30℃,下部的温度约为 28℃。

### 2.2 传统控温方式下微型植物工厂不同栽培层温度的变化

从图 5 可以看出,在循环风扇风速一致的传统微型植物工厂内,各栽培层之间的温度调控能力差异较大。从各栽培层的温度变化曲线可以看出,在同时打开植物补光灯、降温设备及循环风扇的条件下,第 1、第 2 栽培层的温度在运行前 10 min 左右保持不变,第 3 栽培层的温度则缓慢升高。随后各栽培层的温度逐渐下降;在运行 60 min 后,第 1、第 2 栽培层的温度已经低于设定值(20℃),且这 2 个栽培层的温度变化趋势几乎一致。第 3 栽培层温度的下降





a:LED 光源打开 5 min 后的温度场分布云图;b:LED 光源打开 15 min 后的温度场分布云图;c:LED 光源打开 30 min 后的温度场分布云图。

图4 LED 光源完全打开时各栽培层截面温度场分布云图

Fig.4 Temperature field distribution of each cultivation layer with LED light source

速度明显低于第 1、第 2 栽培层。此外,在第 1、第 2 栽培层温度已经达到设定温度(20 °C)的情况下,第 3 栽培层的温度仍然高于设定值,约为 24 °C,导致降温设备仍处于工作状态。

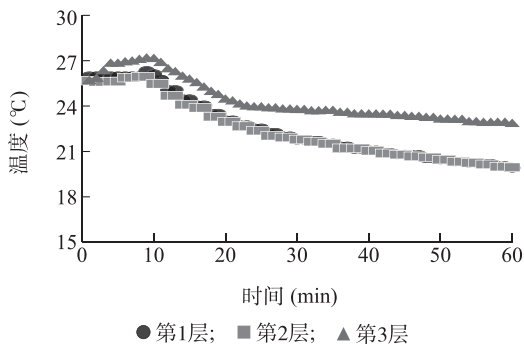


图5 传统控温方式下各栽培层的温度变化

Fig.5 Temperature change of each layer under traditional temperature control mode

在传统控温方式下,通过 CFD 模拟仿真得到各栽培层截面温度场的分布云图(图 6)。结果表明,制冷设备在工作 5 min 后,第 1、第 2 栽培层的温度明显低于第 3 栽培层(图 6a),且距循环风扇较近区域的温度低于其他区域。制冷设备在工作 15 min 后,第 1、第 2 栽培层的温度显著下降,第 3 栽培层的温度逐渐下降,但仍高于第 1、第 2 栽培层(图 6b)。在制冷设备工作 30 min 后,第 1、第 2 栽培层的温度为 19 °C 左右,略低于设定温度(20 °C),而第 3 栽培层的温度为 22 °C 左右,高于设定温度(图 6c)。

### 2.3 基于风扇差速调节的微型植物工厂不同栽培层温度的变化

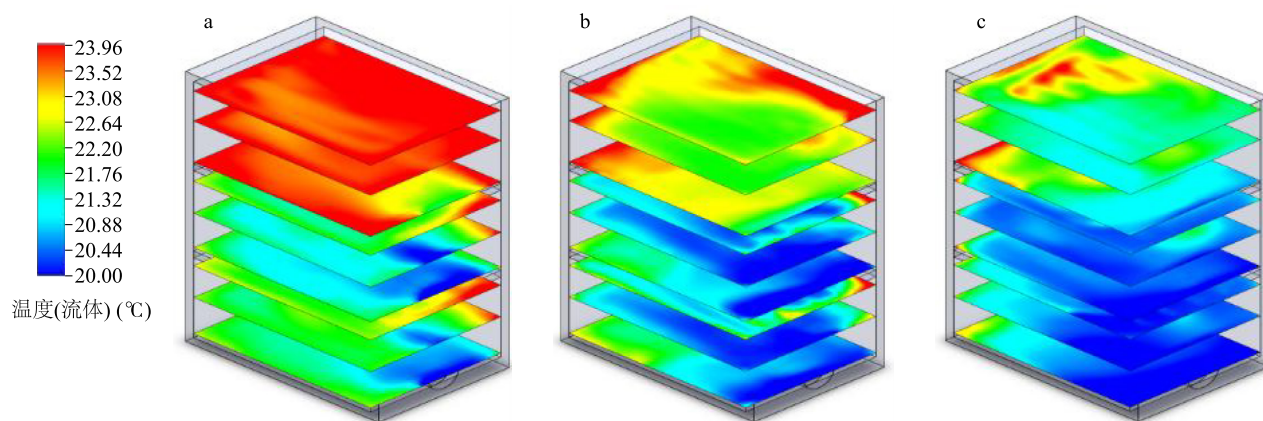
图 7 为在降温设备打开,循环风扇关闭条件下

通过 CFD 模拟仿真得到的混风通道温度场分布云图。图 7a、图 7b、图 7c 分别为混风时间为 1 min、2 min、4 min 时的温度场分布云图。结果表明,在混风时间为 4 min 时,混风通道内的温度达到均匀状态。图 8 为设置最终内部环境温度(20 °C)的条件下,进行差速调节后通过 CFD 模拟仿真得到的各栽培层截面的温度场分布云图。图 8a、图 8b、图 8c 分别为差速调节 5 min、15 min、30 min 后各栽培层截面的温度场分布云图。通过模拟仿真,计算得到第 1~3 栽培层的进风量分别为 0.018 9 m<sup>3</sup>/s、0.023 6 m<sup>3</sup>/s、0.028 1 m<sup>3</sup>/s。为了验证仿真的准确性,在样机上进行试验,混风时间为 4 min。混风结束后,采用仿真计算结果调节各循环风扇的进风量,作出温度的变化曲线。

图 9 为采用差速调节后各栽培层温度的变化曲线。前 4 min 为混风时间,此时植物补光灯和空调打开,循环风扇关闭,用混风通道进行充分降温,各栽培层温度上升,随着混风结束,循环风扇打开,各栽培层的温度迅速下降,20 min 后下降趋势逐渐放缓,最后 3 个栽培层的温度均为 20.5 °C 左右,同步接近设定值(20 °C)。

## 3 讨论

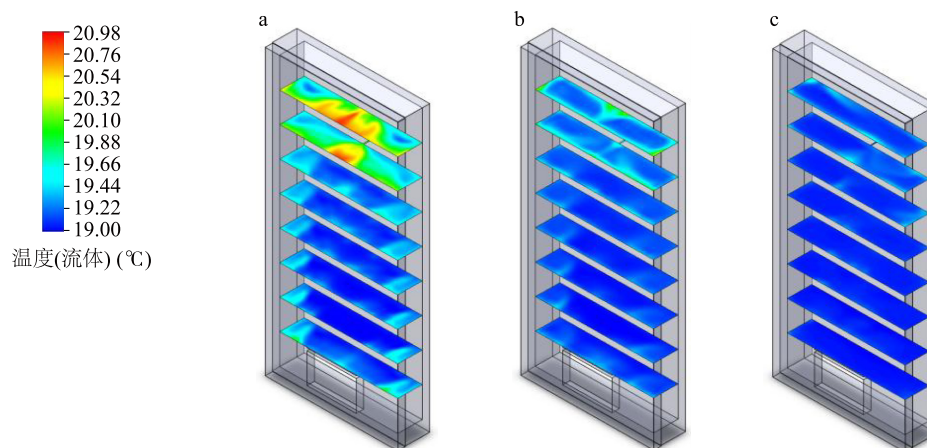
在没有降温设备的情况下,打开补光灯 1 h 后微型植物工厂的环境温度就达到 40 °C,导致生菜等叶菜类作物无法生长<sup>[10]</sup>。虽然 LED 光源具有发光效率高、发热量低等特点<sup>[11-12]</sup>,但在微型植物工厂的小气候特点背景下,LED 光源的发热仍然是引起栽培空间内温度升高的主要原因。因此,如何进一



a: 制冷设备运行 5 min 后的温度场分布云图; b: 制冷设备运行 15 min 后的温度场分布云图; c: 制冷设备运行 30 min 后的温度场分布云图。

图 6 传统控温方式下各栽培层截面温度场分布云图

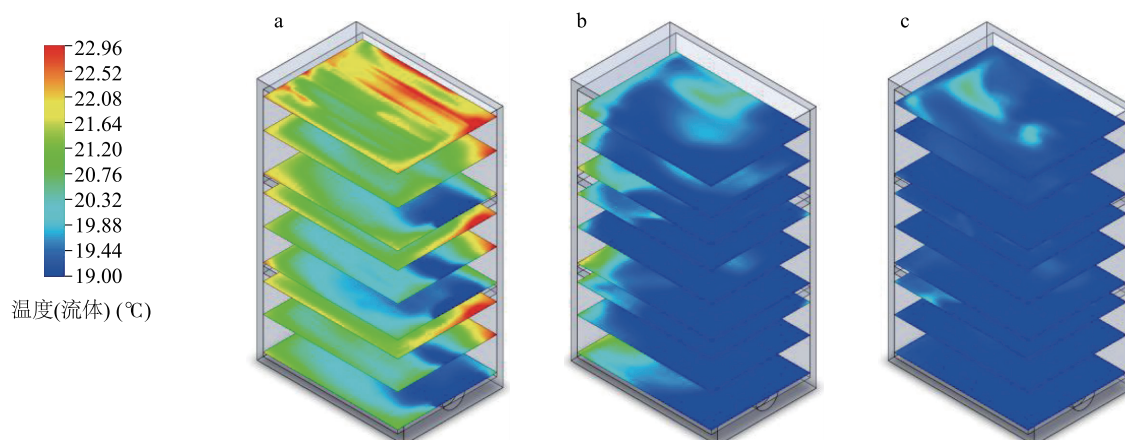
Fig.6 Temperature field distribution of each cultivation layer under traditional temperature control mode



a: 混风 1 min 后的温度场分布云图; b: 混风 2 min 后的温度场分布云图; c: 混风 4 min 后的温度场分布云图。

图 7 混风通道的温度场分布云图

Fig.7 Temperature field distribution in mixed air channel



a: 差速调节 5 min 后的温度场分布云图; b: 差速调节 15 min 后的温度场分布云图; c: 差速调节 30 min 后的温度场分布云图。

图 8 采用差速调节的各栽培层截面温度场分布云图

Fig.8 Temperature field distribution in each cultivation layer after adopting differential adjustment

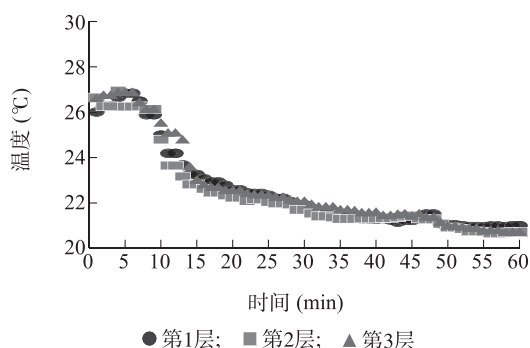


图9 采用差速调节后各栽培层温度的变化

Fig.9 Temperature change of each cultivation layer after adopting differential adjustment

步降低 LED 光源的发热量,对于降低植物工厂降温设备的能耗至关重要。研究结果说明,微型植物工厂配置降温设备是实现作物正常生长及实现环境精准控制的必要条件<sup>[3-4,13]</sup>。

目前已有的微型植物工厂已经基本能够满足作物的正常生长,实现内部环境的控制<sup>[14-16]</sup>,但存在栽培空间内上下层温度差异明显、底层(栽培层)温度偏低、上层温度过高等问题,而且这种问题会随着微型植物工厂栽培空间的增加变得更加严重,不仅降低了环境控制的精准性,还会造成电能的浪费。

通过 CFD 仿真,设定微型植物工厂最终的内部环境温度(20℃),比较采用传统控温方式、混风通道进行风扇差速调节的温度场分布云图。结果显示:(1)在传统控温方式下,制冷设备工作 30 min 后,第 1、第 2 栽培层温度为 19℃左右,略低于设定温度(20℃),而第 3 栽培层温度为 22℃左右,高于设定值。(2)采用混风通道进行风扇差速调节时,设备运行 4 min 后混风通道内的温度达到均匀状态,此时 1~3 栽培层的进风量分别为 0.018 9 m<sup>3</sup>/s、0.023 6 m<sup>3</sup>/s、0.028 1 m<sup>3</sup>/s。基于 CFD 仿真得出的进风量,在设计、制作的微型植物工厂内进行测试,4 min 混风结束后,打开循环风扇,各栽培层内的温度迅速下降,20 min 后下降趋势逐渐放缓,最后 3 个栽培层的温度同步下降至 20.5℃,接近设定值(20℃)。

## 4 结论

本研究在原有的微型植物工厂基础上加入了混风通道,解决了因上层循环风扇无法抽取到足够多的冷空气而导致无法对上层栽培空间进行有效温度

控制的问题。本研究对传统降温方式进行了改进,提出了各层循环风扇的差速调节,在 CFD 数值模型中设置最终内部环境温度(20℃)作为约束条件,并将各层温度的变化趋势一致设为控制条件,通过仿真计算,得到各栽培层的进风量分别为 0.018 9 m<sup>3</sup>/s、0.023 6 m<sup>3</sup>/s、0.028 1 m<sup>3</sup>/s。通过风速调节旋钮,调节各个风扇的转速,使得各栽培层的进风量与模拟值一致。使用混风通道和风速差速调节控温方式的微型植物工厂各栽培层温度均为 20.5℃左右,与传统控温方式相比,各层温差有效降低,极大地增强了各栽培层环境温度的精准性。但是由于各微型植物工厂的尺寸、栽培层数及制冷设备出风量差异较大,不能完全照搬本研究结果,因此接下来应进一步建立通用模型,提高此微型植物工厂混风通道和风扇差速调节控温方式推广的便利性。

## 参考文献:

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables[Z]. Working Paper NO ESA/P/WP/248, 2017.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World urbanization prospects: the 2014 revision [Z]. Working Paper NO ST/ESA/SER.A/366, 2015.
- [3] KOZAI T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: concept, estimation and application to plant factory[J]. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 2013, 89(10): 447-461.
- [4] KOZAI T. Sustainable plant factory: closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce[J]. Acta Horticulturae, 1004(1004): 27-40.
- [5] FALSTER D S, WESTOBY M. Leaf size and angle vary widely across species: what consequences for light interception? [J]. New Phytologist, 2003, 158(3): 509-525.
- [6] KOZAI T, NIU G H, TAKAGAKI M, et al. Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production [M]. London: Academic Press, 2015:423.
- [7] 贾鹤鸣,张 森,宋文龙,等. 基于 CFD 的微型植物工厂湿热环境数值分析[J].林业工程学报,2018,3(6):122-127.
- [8] 左志宇,徐 超,毛罕平,等. 微型植物工厂环境控制参数优化试验研究[J].农机化研究,2020,42(12):150-155.
- [9] 茅 艳. 人体热舒适气候适应性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
- [10] 宋云鹏,刘凯歌,龚繁荣.不同生菜品种苗期耐热性的综合评价[J].浙江农业学报,2015,27(2):176-181.
- [11] 杨其长,徐志刚,陈弘达,等.LED 光源在现代农业的应用原理与技术进展[J].中国农业科技导报,2011,13(5): 37-43.

- [12] 赵 敏,陈志平,张巨勇.大功率 LED 灯的热分析与热设计[J]. 机电工程,2012,29(2): 220-223.
- [13] KOZAI T, KUBOTA C, CHUN C, et al. Necessity and concept of the closed transplant production system[M]//Kubota C, Chun C. Proceedings for the International Symposium on Transplant Production in Closed System. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 2000: 3-19.
- [14] 鞠红艳,李 季,孙艺哲,等. 微型植物工厂 LED 多光谱补光系统的设计与应用[J]. 吉林农业大学学报,2020, 42(1): 113-118.
- [15] 闫梦笛,富诗语,徐明阳,等. 家庭微型植物工厂景观营造初探[J]. 居舍,2019(18): 112.
- [16] HANG T, LU N, TAKAGAKI M, et al. Leaf area model based on thermal effectiveness and photosynthetically active radiation in lettuce grown in mini-plant factories under different light cycles[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 252: 113-120.

(责任编辑:徐 艳)