· 农业生物环境与能源工程 ·

植物工厂双通道导气通风模式对生菜冠层热交换的影响

张一含[1,2]，仝宇欣[1,2※]，张 义[1,2,3]，陈 灿[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；3. 中国农业科学院西部农业研究中心，昌吉 831100）

摘 要：针对植物栽培空间气流低而导致的植物生长缓慢和生理性病害频发等问题，该研究优化设计了一种装配式双通道导气栽培系统，并在环境较为稳定的植物工厂内开展栽培试验验证系统有效性。试验栽培材料选用生菜（*Lactuca sativa* cv. Butterhead），试验组采用双通道导气通风模式，冠层气流速度分别设置为 0.6 m/s（T_1）、0.9 m/s（T_2）和 1.2 m/s（T_3），对照组仍采用植物工厂侧进上出的常规通风模式（CK），冠层气流速度为 0.2 m/s，探究不同通风模式对植物生长、叶烧发生率、与周围环境热交换和冠层微环境的影响。结果显示：与 CK 相比，试验处理组生菜的生长、冠层微环境及与周围环境的热交换均较优；T_2 处理下，生菜地上部的干、鲜质量比 CK 处理的分别提高了 24% 和 14%；生菜冠层的微环境及热交换在 T_3 处理下达到最佳；与 CK 处理组相比，T_3 处理下的生菜冠层平均相对湿度和温度分别降低了 8.8% 和 2.8℃，生菜冠层光、暗期显热分别提高了 48.5% 和 52.3%，潜热分别提高了 52.9% 和 37.9%；此外，试验处理还可以有效降低植物工厂内生菜叶烧发生率。综上可知，该双通道导气栽培系统能有效改善植物冠层微环境，提高植物产量和品质，促进植物与周围环境的热交换，同时为植物工厂微环境精准调控提供技术支撑。

关键词：植物工厂；热交换；栽培系统；生菜；通风模式

doi：10.11975/j.issn.1002-6819.202407223

中图分类号：S625.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-6819(2024)-22-0154-07

张一含，仝宇欣，张义，等. 植物工厂双通道导气通风模式对生菜冠层热交换的影响[J]. **农业工程学报**，2024，40(22)：154-160. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407223 http://www.tcsae.org

ZHANG Yihan, TONG Yuxin, ZHANG Yi, et al. Impact of dual channel aeration ventilation on lettuce canopy heat exchange in plant factories[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 154-160. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407223 http://www.tcsae.org

0 引 言

植物工厂随着其规模不断扩大，栽培层数不断增加，以整体环境调控为主导的传统通风模式已逐渐显现出其局限性，难以满足植物栽培空间对气流等环境因子精准调控的需求。在传统通风模式中，植物栽培空间气流速度较低，甚至出现气流停滞区，从而造成其他环境因子，如温湿度、二氧化碳浓度等的不均匀分布，导致植物生长缓慢，并引发生理性病害，如叶烧[1]。此外，较低的气流速度还会影响植物与周围环境的能量与物质交换，如 CO_2 与 H_2O 的交换，进而影响植物光合和蒸腾速率，阻碍植物生长[2-3]。因此，改善植物工厂内通风方式，优化植物栽培空间气流速度及其分布是目前解决上述问题最有效的途径[4]。

近年来很多学者开展了植物栽培空间气流优化调控的研究。AHMED 等[5] 设计了一种直接作用于栽培空间的多风扇气流循环系统，将 7 个风扇（92 mm×92 mm）交替安装于栽培架两侧，使其在植物冠层产生水平方向相反的气流，有效增加了植物冠层的气流扰动，促进植物与周围环境的热交换，减缓了生菜叶烧的发生。然而该方法产生的气流只有效作用于植物冠层上方，由于叶片遮挡使之对冠层内部气流的影响较小，植物冠层内部依然存在气流停滞区。而且装置的存在大幅降低工作人员日常操作的方便性。为了增加植物冠层内部气流扰动，同时降低通风装置对工作人员操作的影响，方慧等[6] 设计了一种导气栽培装置，将通风管道嵌入栽培槽中，该装置仅需与风机连接，便能将气流直接引入植物冠层内部，当入口气流速度为 6 m/s 时，植物冠层气流适宜区域占比达到 56.3%，平均速度为 0.15 m/s。该装置光期的降温效果明显，与常规通风方式相比，光期植物冠层平均温度和湿度分别降低了 1.3℃ 和 11.4 个百分点。该通风装置在一定程度上提高了通风效率，但固定的栽培槽结构增加了运输难度且降低了使用灵活性，单行栽培的结构限制了栽培密度，提高了装置生产成本。

针对以上问题，本研究设计了一种装配式双通道导气栽培装置，在将通风管道与栽培槽进行一体化设计的同时，使装置各部位实现装配化，摆脱了植物种类、栽培长度和栽培密度等的限制，提升运输和安装效率。通过开展栽培试验，探究不同通风模式对植物生长、与周围环境热交换和冠层微环境的影响，以期为立体栽培空间微环境精准调控提供技术支撑。

收稿日期：2024-07-25 修订日期：2024-10-09

基金项目：内蒙古自治区重点研发计划项目（2022YFDZ0086）；中国农业科学院科技创新工程（CAAS-IEDA-T07）；“天池英才”引进计划

作者简介：张一含，研究方向为农业工程与信息技术。

Email：244457219@qq.com

※通信作者：仝宇欣，博士，研究员，研究方向为农业生物环境工程。

Email：tongyuxin@caas.cn

1　材料与方法

1.1　装置结构

双通道导气栽培装置结构如图 1 所示，本试验装置参数为：长 1.0 m，宽 0.31 m，高 0.12 m，栽培板上交错设置 12 个栽培孔，通风管道上设有 6 个通风孔，孔径为 5 mm，通风孔与水平面夹角为 45°，两根通风管道共设置 12 个通风孔，栽培密度为 36 棵/m^2。

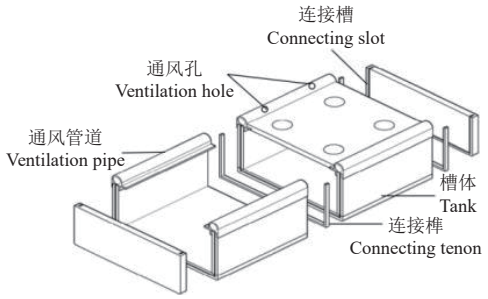


图 1　栽培槽结构

Fig.1　The structure of cultivation tank

1.2　试验设计

本试验在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所顺义试验基地人工光植物工厂内进行，设置 1 个对照组（CK）和 3 个试验组，其中 CK 使用植物工厂侧进上出的常规通风方式，能够在生菜冠层产生 0.2 m/s 的气流，试验组则使用双通道导气栽培系统，根据前人研究[7]，植物冠层气流速度在 0.1～1.0 m/s 时，植物生长速率随着气流速度增加而增加，因此，试验组设置的 3 个冠层气流速度分别为 0.6 m/s（T_1）、0.9 m/s（T_2）和 1.2 m/s（T_3）。试验过程中将试验组植物工厂侧面进风口用塑料膜密封，双通道导气栽培槽之间使用 Φ20 的 PVC 管连接，PVC 管道一端连接风机（JYQ-75，河南九叶风公司），通过控制风机的功率在其额定功率的 50%、75% 和 100%，以保证各处理获得设定的冠层气流速度。试验期间植物生长环境参数设定如下：光期 12 h（07：00—19：00）、暗期 12 h（19：00—07：00），光、暗期温度分别为 22、21℃，相对湿度分别为 55% 和 60%，CO_2 浓度均为 600 μmol/mol，LED 光强设置为 250 μmol/(m^2·s)，光谱为类太阳光谱。

1.3　材料准备

本试验选用奶油生菜（*Lactuca sativa* cv. Butterhead）为试验材料，种子购于北京鼎丰现代农业有限公司。选取大小均匀、颗粒饱满的种子于常温黑暗环境下催芽 48 h，再转移到光强为 150 μmol/(m^2·s) 的白光下育苗，光/暗期温度为 22℃/20℃，相对湿度为 55%，采用霍格兰营养液，育苗 14 d 后，选取长势一致的幼苗随机分配至各处理中。

1.4　测定指标

1.4.1　生菜生长指标

生菜移栽后第 25 天，各处理随机选取 10 株生菜，使用电子天平（Si-234，USA）测量生菜的地上部和地下部鲜质量，并测量其叶片数，随后将生菜的地上部和地下部放入烘箱，80℃ 烘干 72 h 至恒质量，并测量干质量。选择各处理生菜的最大叶，测定其叶长和叶宽。

1.4.2　气体交换参数

生菜移栽后第 21 天，各处理随机选取 10 株生菜，使用便携式光合测定仪（Li-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA）测定由内到外第 3 层完全展开功能叶的气孔导度和蒸腾速率，测定过程中，叶室参数设定如下：光强 250 μmol/(m^2·s)、CO_2 浓度 600 μmol/mol、温度 22℃、气体流速 500 μmol/s，待仪器测量界面读数稳定时记录相关参数。

1.4.3　环境参数

试验期间使用传感器（LR5001，HIOKI, JAPAN）记录各处理的冠层温度和相对湿度，数据记录间隔为 1 min，测点布置如图 2a 所示。移栽后第 7、14、21 天，使用热线风速仪（Climomaster6501BG, KANOMAX, Japan）测定各处理冠层气流速度，测点布置如图 2b 所示，每个测点有 50 个数据，最终结果取平均值。使用 K 型热电偶 (Omega engineering, stamford, CA, USA）测量各处理叶片温度，选取由内到外第 3 层完全展开功能叶，每个处理随机选取 10 株生菜用于测量。

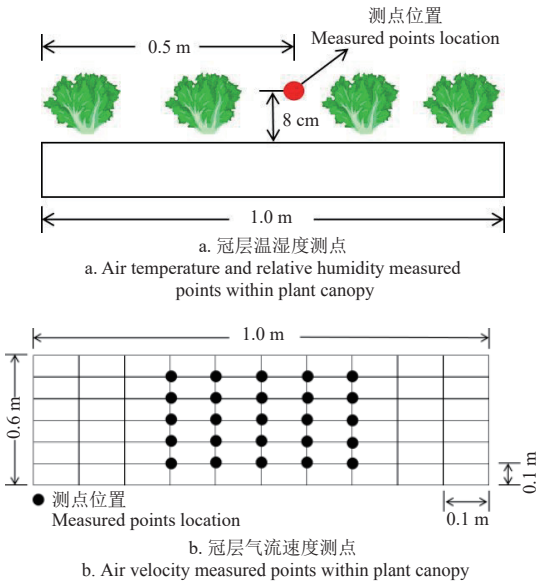


图 2　冠层温湿度与气流速度测点

Fig.2　Air temperature, relative humidity and air velocity measured points within plant canopy

1.5　计算方法

在稳态条件下，基于以下 4 个假设并利用能量平衡方程计算潜热和显热。

假设：1）生菜冠层照明均匀，2）生菜叶片两侧无温差，3）生菜叶片为水平板状，4）忽略生菜与周围壁面的辐射热交换。

基于以上假设，叶片的能量平衡可以计算为潜热和显热之和[8]，即：

$$R_{ab} = S_h + L_h \tag{1}$$

式中 R_{ab} 为叶片吸收的短波辐射（W/m^2），S_h 为传入或传出生菜叶片的显热（W/m^2），L_h 为生菜吸收或释放的

潜热（W/m^2）。

1.5.1 显 热

根据牛顿冷却定律计算生菜植株的显热（S_h）[9]。

$$S_h = 2h_c(T_l - T_a) \tag{2}$$

式中 h_c 为平均对流换热系数（W/(m^2·K)），T_l 为叶片温度（K），T_a 为空气温度（K）。h_c 为努赛尔函数，定义为

$$h_c = k_a \frac{Nu}{L_l} \tag{3}$$

式中 k_a 为边界层空气的导热系数（W/（m^2·K）），L_l 为叶片在风速方向上的特征长度（m）[10]，计算为生菜长度和宽度的平均值，k_a 由式（4）计算[9]。

$$k_a = (6.84\times10^{-5})T_b + 5.62\times10^{-3} \tag{4}$$

式中 T_b 为边界层空气温度，计算为空气温度（T_a）与叶片温度（T_l）的平均值。在人工光植物工厂中叶片温度低于空气温度[5]，对于比空气冷的表面，Nu 可由式（5）计算[10]。

$$Nu = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3} \tag{5}$$

式中 Re 为雷诺数，Pr 为普朗特数（空气为 0.70），Re 取决于边界层中空气的运动粘度和空气速度。Re 由式（6）计算[9]。

$$Re = \frac{V_a L_l}{v_a} \tag{6}$$

式中 V_a 为空气速度（m/s），v_a 为空气的运动粘度（m^2/s），v_a 由式（7）计算[9]。

$$v_a = 9\times10^{-8}T_b - 1.13\times10^{-5} \tag{7}$$

1.5.2 潜 热

潜热与植株的蒸腾速率有关，可由式（8）计算[11]。

$$L_h = L_{h,mol} M_w \lambda_E \tag{8}$$

式中 $L_{h,mol}$ 为蒸腾速率，M_w 为水的摩尔质量（0.018 kg/mol），λ_E 为蒸发潜热（2.45×10^6 J/ kg），根据叶片的热传导和水汽传递总电导，采用叶片中的饱和水蒸气浓度和周围空气中水蒸气的浓度计算 $L_{h,mol}$[12-13]。

$$L_{h,mol} = g_{tv}(C_{w-l} - C_{w-a}) \tag{9}$$

式中 g_{tv} 为叶片的热传导和水汽传递总电导率（m/s），C_{w-l} 为叶片中的饱和水蒸气浓度（mol/ m^3），C_{w-a} 为周围空气中的水蒸气浓度，g_{tv} 可由式（10）计算[9]。

$$g_{tv} = \frac{g_{bv} g_{sv}}{g_{bv} + g_{sv}} \tag{10}$$

式中 g_{bv} 为叶片边界层阻力的倒数（m/s），g_{sv} 为气孔导度（m/s）。g_{bv} 可由式（11）计算[9]。

$$g_{bv} = \frac{a_s h_c}{\rho_a C_{Pa} Le^{1-n}} \tag{11}$$

式中 a_s 是叶片蒸腾表面积的一部分，对于两边都有气孔的叶片为 1.0[11]，ρ_a 是干燥空气的密度（1.2 kg/m^3），C_{pa} 是干燥空气的比热（1 010 J /(kg·K)），n 是经验常数（通常情况下为 1/3），Le 为路易斯数，可由式（12）计算。

$$Le = \frac{\alpha_a}{D_{AB}} \tag{12}$$

式中 α_a 为空气的热扩散系数（m^2/s），D_{AB} 为空气中水蒸气的二元扩散系数（m^2/s）。二者可确定为 T_b 的函数[9]。

$$\alpha_a = (1.32\times10^{-7})T_b - 1.73\times10^{-5} \tag{13}$$

$$D_{AB} = (1.49\times10^{-7})T_b - 1.96\times10^{-5} \tag{14}$$

至此得到计算 g_{bv} 所需的所有变量，对于 g_{sv}，可由式（15）计算[11]。

$$g_{sv} = g_{sv,mol} R_{mol} \frac{T_a}{P_{w-a}} \tag{15}$$

式中 $g_{sv,mol}$ 为气孔对水蒸气的导度（mol/(m^2·s)），R_{mol} 为一般气体常数，P_{w-a} 为空气中水蒸气的压力，可由克拉柏龙方程计算[14]。

$$P_{w-a} = 11\exp\left(\frac{\lambda_E M_w}{R_{mol}}\right)\left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T_a}\right) \tag{16}$$

式中 M_w 为水的摩尔质量（0.018 kg/mol），λ_E 为蒸发潜热（2.45×10^6 J/kg），至此可算出 g_{tv}。

回到式（9），式（9）中的 C_{w-l} 可由式（17）计算。

$$C_{w-l} = \frac{P_{w-l}}{R_{mol} T_l} \tag{17}$$

式中 P_{w-l} 为叶片中的饱和水汽压，可由式（18）计算[15]。

$$P_{w-l} = f\left(a\times\exp\left(\frac{bT_l}{C + T_l}\right)\right) \tag{18}$$

式中 a、C 为经验系数，分别为 611.12 和 257.14，f 和 b 同样为经验系数，可由式（19）和式（20）计算[15]。

$$f = 1.007 + 3.46\times10^{-8}P_{w-l} \tag{19}$$

$$b = 18.678 - \left(\frac{T_l}{234.5}\right) \tag{20}$$

式中 P_{w-l} 为叶片中的水汽压力，将式（16）中的 T_a 替换为 T_l 即可算出，式（9）中的 C_{w-a} 可由式（21）计算。

$$C_{w-a} = \frac{P_{w-a}}{R_{mol} T_a} \tag{21}$$

1.5.3 叶烧发生率

移栽后第 25 天，每个处理随机选取 10 株生菜，查看叶烧发生情况，并计算叶烧发生率，生菜叶片出现 2 mm 以上的褐色坏死斑点视为发生叶烧，叶烧发生率由式（22）计算。

$$\text{叶烧发生率}(\%) = \frac{\text{发生叶烧的叶片数}}{\text{总叶片数}}\times100\% \tag{22}$$

1.6 数据分析

使用 SPSS 22.0 软件对数据进行单因素 ANOVA 分析和 LSD 法显著性检验（P<0.05），结果表示为平均值±标准误差，使用 Origin 2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

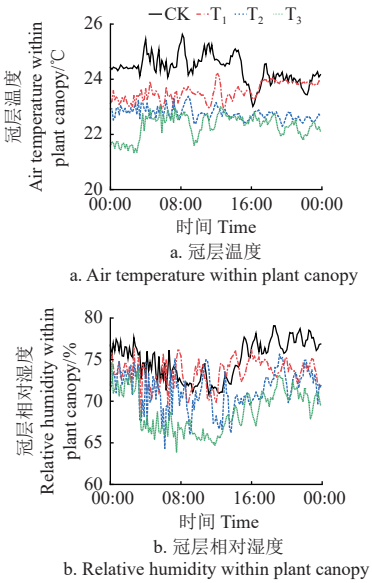
2.1 不同通风模式对植物冠层环境及气流的影响

试验期间植物工厂内温度变化范围为 21～23℃，相对湿度变化范围为 55%～75%，随时间的变化，植物冠

层相对湿度和温度变化如图 3 所示，相对湿度和温度均随气流速度提高而降低，与 CK 相比，T_1、T_2 和 T_3 的平均相对湿度分别降低了 2.1%、4.9% 和 8.8%，平均温度降低了 1.7、2.2 和 2.8℃。试验组冠层相对湿度和温度均低于 CK，其原因是在双通道导气栽培系统通风模式下，气流能够直接作用于植物冠层，而常规通风下，气流受栽培架、植物叶片等的遮挡，无法贯穿整个冠层，对冠层内部气流扰动小，LED 灯板和植物呼吸散发的热量以及蒸腾产生的水汽无法及时被排出，导致植物冠层内相对湿度和温度上升，而在高湿环境下生长的生菜蒸腾作用受阻，进而引发植物生长缓慢，生理性病害频发等问题[16]。

不同处理下植物冠层气流状态如表 1 所示，当冠层气流速度从 0.2 m/s 增加到 1.2 m/ s，生菜的平均对流换热系数提高了 1.4 倍，植物冠层的气流从层流状态先转变为过渡态，当冠层气流速度增加到 0.9 m/s 时，植物冠层气流从过渡态转变为湍流状态，由此可见，提高气流速度对生菜冠层的平均对流换热系数有显著影响（$P<0.05$），并改变气流状态。

综上所述，与常规通风方式相比，双通道导气栽培系统提高了植物冠层内的气流速度，改变了冠层内气流状态进而改善了植物冠层微环境。



a. 冠层温度

a. Air temperature within plant canopy

b. 冠层相对湿度

b. Relative humidity within plant canopy

注：CK 代表使用常规通风模式，冠层气流速度 0.2 m·s^{-1}；T_1、T_2、T_3 代表使用双通道导气通风模式，冠层气流速度分别为 0.6 、0.9 、1.2 m·s^{-1}。下同。

Note: CK represents using the conventional ventilation mode which can generate an airflow velocity of 0.2 m·s^{-1} within plant canopy; T_1, T_2 and T_3 represents treatments using the double aeration ventilation mode with air velocities of 0.6 m·s^{-1}, 0.9 m·s^{-1} and 1.2 m·s^{-1}. The same as below.

图 3　定植 21 天各处理冠层内温度和相对湿度变化

Fig.3　Variation of air temperature and relative humidity of plant canopy under different treatments on day 21 after transplanting

表 1　不同通风模式处理下生菜冠层气流状态

Table 1　Lettuce canopy airflow regime under different ventilation modes

处理 Treatments	冠层气流速度 Air velocity within plant canopy/(m·s^{-1})	叶片特征长度 Characteristic length of the leaf/m	雷诺数 Reynolds number	努塞尔数 Nusselt number	平均对流换热系数 Convective heat transfer coefficient/(W·m^{-2}·K^{-1})	气流状态 Flow regime
CK	0.2	0.085	1 109.52±42.79d	19.51±0.74d	5.93±0.23d	层流
T_1	0.6	0.084	3 286.44±22.63c	33.58±1.14c	10.33±0.36c	过渡态
T_2	0.9	0.089	5 187.54±31.98b	42.16±2.22b	12.33±0.61b	湍流
T_3	1.2	0.089	6 879.25±61.63a	48.56±2.21a	14.28±0.68a	湍流

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note: Different lower case letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$). The same as below.

2.2　不同通风模式对生菜生长和叶烧的影响

生菜的生长指标如表 2 所示，随着冠层气流速度增加，生菜地上部干、鲜质量均先增加后降低，在冠层气流速度为 0.9 m/s 时达到最大值，比 CK 分别提高了 24% 和 14%。

不同冠层气流速度对生菜根系生长和叶片数量均无显著影响（$P>0.05$）。在双通道导气栽培系统中生长的生菜均未发生叶烧，而 CK 出现了叶烧。

表 2　不同通风模式处理下生菜的生长状况

Table 2　Lettuce growth under different ventilation modes

处理 Treatments	地上部鲜质量 Shoot fresh weight/g	地上部干质量 Shoot dry weight/g	地下部鲜质量 Root fresh weight/g	地下部干质量 Root dry weight/g	叶烧发生率 Tipburn occurrence/%	总叶片数
CK	49.8±1.9c	2.5±0.2b	10.6±0.8a	0.6±0.1a	20.9±4.5a	20.8±0.8a
T_1	55.2±2.2bc	2.7±0.3ab	9.7±0.6a	0.5±0.1a	0b	20.4±0.6a
T_2	56.7±4.1a	3.1±0.4a	10.2±1.2a	0.6±0.1a	0b	20.8±1.6a
T_3	53.9±4.5b	2.7±0.4ab	9.4±1.5a	0.6±0.1a	0b	20.6±0.9a

提高植物产量和品质是设施生产的两个主要目标。本试验中，生菜产量随气流速度增加而提高，可归因于叶片边界层阻力降低导致的 CO_2 吸收和 H_2O 扩散的增强[17]。大量研究表明，在较低气流速度条件下，植物的光合速率亦较低，主要是因为停滞的气流限制了植物的 CO_2 吸收速率。此外，较低气流速度还会抑制植物的蒸腾作用，进而降低了水分和营养物质向植物茎叶的运输速率，最终影响植物生长和品质。在冠层气流速度达到 1.2 m/s 时，生菜产量反而下降的原因可能是过高的气流速度导致生菜蒸腾速率过高，叶片水势降低，导致气孔导度减小，影响了产量[18-20]。

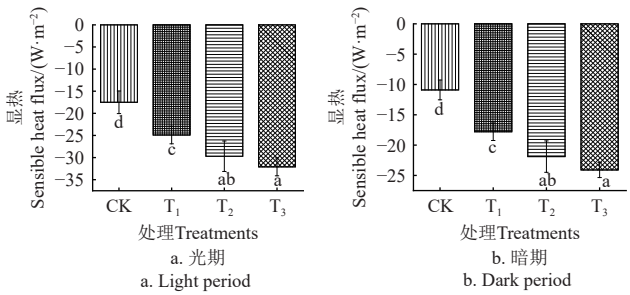
此外，气流能够有效缓解叶菜生理性病害，如叶烧的发生。在设施中，低气流速度导致的环境高湿而引发的叶烧已成为造成其经济损失的一个重要原因。叶烧是

一种由植物缺钙而引起的生理性病害，其症状为叶缘皱缩、失绿，最终干枯为褐色纸状[21]。研究表明，当植物生长速度较快，新生组织细胞壁的形成与扩大导致对钙元素的需求量增加，而植物对钙元素的吸收量无法满足其需求量时即会发生叶烧[22-23]。在不影响产量的前提下，增加气流速度，降低生菜冠层内湿度是解决叶烧最有效的途径之一。植物工厂常规通风模式下，室内气流速度通常低于 0.2 m/s。较低的气流速度导致叶片边界层阻力增大，植物的光合作用和蒸腾作用受抑制，而植物体内钙离子的运输主要动力是蒸腾作用，低蒸腾速率导致植物的内叶和新叶容易发生叶烧[24]。本试验中，在双通道导气栽培系统下生长的生菜均未出现叶烧现象，而在植物工厂常规通风系统下生长的生菜发生叶烧。其原因是植物工厂常规通风系统提供的气流速度较低且无法穿透整个冠层区域，而双通道导气栽培系统可以提供稳定、均匀、速度适宜的气流，增加冠层内部和上部气流扰动，增加植物整体蒸腾速率，进而有效缓解了叶烧发生。

2.3 不同通风模式对生菜植株热交换的影响

2.3.1 显 热

显热（S_h）与冠层气流速度及生菜叶片与周围空气的温差成正比，在植物工厂中，植物叶片的温度始终低于周围空气温度，这表明热量从周围空气持续传递到植物叶片。从图 4 可以看出，当冠层气流速度从 0.2 m/s 增加到 1.2 m/s，光期与暗期的 S_h 分别提高了 48.5% 和 52.3%，T_2 与 T_3 处理间无显著性差异，但均显著高于其他两个处理（P<0.05）。



注：不同小写字母表示不同处理间差异显著（P<0.05）。下同。
Note: Different lower case letters indicate significant difference among treatments (P<0.05). The same as below.

图 4 定植 21 天各处理显热

Fig.4 Sensible heat flux of each treatment on day 21 after transplanting

S_h 主要受气流速度和温度的影响，气流速度的增加显著提高了平均对流换热系数（h_c），增强了生菜与周围环境间的换热能力。此外，S_h 还受气流状态的影响，在本试验中，随冠层气流速度的增加，努塞尔数（Nu）和雷诺数（Re）变化范围分别为 19.51～48.56 和 1 109.52～6 879.25，气流状态先从层流状态转变为过渡态，在冠层气流速度为 0.9 m/s 时转变为湍流状态，由此可见，处于层流状态下的气流阻碍了植物与周围环境的热交换过程。

植物与周围环境间的 S_h 还会影响叶片周围的微环境，尤其是叶片边界层温度，这一指标能够影响植物的一些生理过程和热交换。在植物工厂中，使用 LED 灯管，且保持灯管与植物冠层 30 cm 及以上的距离时，到达植物叶片的热辐射不高，导致 T_l 始终低于 T_a，S_h 始终为负[25]，这与本试验研究结果一致。此外，叶片与周围空气的温差随气流速度的增加而减小[26]，由此可见，植物工厂内气流增加对促进植物与周围环境的热交换起到了重要作用。

2.3.2 潜 热

潜热（L_h）是植物进行热交换的第二种形式，主要与蒸腾速率有关。在本试验中，生菜光期和暗期的 L_h 均随冠层气流速度的增加而显著增加（图 5）。当冠层气流速度从 0.2 m/s 提高到 1.2 m/s 时，光期的 L_h 从 34.6 W/m^2 提高到 51.2 W/m^2，暗期的 L_h 从 29.9 W/m^2 提高到 43.1 W/m^2，增加幅度分别为 52.9% 和 37.9%。

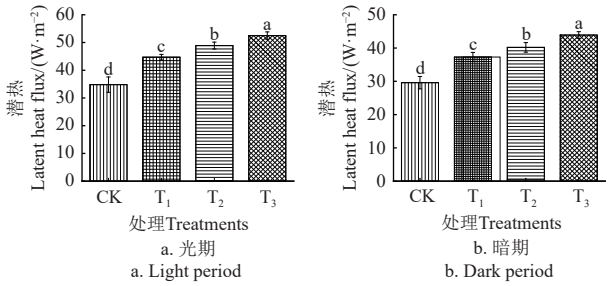


图 5 定植 21 天各处理潜热

Fig.5 Latent heat flux of each treatment on day 21 after transplanting

植物的蒸腾作用是一项重要的生理活动，在避免高温引起的损伤，及促进水分和营养物质的转移过程中起着重要作用。此外，植物冠层气流速度的提高加速了通过气孔传递到叶片表面的水分子的蒸发，进而降低了气孔外的空气绝对湿度和水蒸气浓度，这一过程有效地维持了水扩散的梯度[27]。KITAYA 等[28] 认为在 0.01～1.0 m/s 的气流速度范围内，热量和水分的传递阻力呈递减趋势，本试验中，当气流速度从 0.2 m/s 提高到 1.2 m/s，L_h 增加了 37.9% 及以上，这与 CHINTAKOVID 等[29] 的研究结果亦一致，说明双通道导气通风模式可以有效提高生菜的蒸腾作用。

3 结 论

本研究针对植物工厂内植物生长空间气流速度较低，甚至停滞的现象，以及增加通风装备较为繁琐的问题，优化设计了一种装配式双通道导气栽培槽，在将通风管道与栽培槽进行一体化设计的同时，使装置各部位实现装配化，提高运输和安装效率。为了验证栽培槽的实际应用效果，在植物工厂内开展了栽培试验，测试并分析了不同冠层气流速度下双通道导气通风和常规通风模式下生菜冠层微环境和气流状态的差异，对比了 2 种通风模式对生菜生长和热交换的影响，主要结论如下：

1）双通道导气通风模式下植物冠层的平均相对湿度和温度均低于常规通风模式，当冠层气流速度从 0.2 m/s 提高到 1.2 m/s 时，平均相对湿度和温度分别降低了

8.8% 和 2.8℃；植物冠层内的气流状态和平均对流换热系数也随气流速度的提高而显著变化，气流状态先从层流状态转变为过渡态，并在气流速度为 0.9 m /s 时转变为湍流状态；而平均对流换热系数则提高了 1.4 倍。

2）双通道导气通风模式下生菜生长均优于常规通风模式，且无叶烧发生，而常规通风模式下的生菜出现了叶烧现象。随着气流速度的提高，生菜的地上部干、鲜质量先增加后降低，在气流速度 0.9 m/s 时达到最高值，与对照相比分别提高了 24% 和 14%。

3）生菜植株的显热（S_h）和潜热（L_h）均随冠层气流速度增加而增加，光期的 S_h 和 L_h 增幅分别为 48.5% 和 52.9%，暗期的 S_h 和 L_h 增幅分别为 52.3% 和 37.9%。

综上，该系统能够有效增加植物冠层内气流扰动，改善冠层微环境，提高植物生长速度，减缓叶烧发生，促进植物与周围环境的热交换，同时装配式的结构提高了运输和安装效率，通风管道与栽培槽的一体结构降低了设备的繁琐度，提高了工作人员操作的便利性，可为植物工厂微环境精准调控提供技术支撑。

[参　考　文　献]

[1] SAGO Y. Effects of light intensity and growth rate on tipburn development and leaf calcium concentration in butterhead lettuce[J]. Hortscience, 2016, 51(9): 1087-1091

[2] BAEK M S, YOUN S, KWON J H, et al. Improvement of uniformity in cultivation environment and crop growth rate by hybrid control of air flow devices[J]. Journal of Central South University, 2015, 12: 4702-4708.

[3] SHIBUYA T, TSURUYAMA J, KITAYA Y, et al. Enhancement of photosynthesis and growth of tomato seedlings by forced ventilation within the canopy[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 109(3): 218-222.

[4] ZHANG Y, KACIRA M. Analysis of climate uniformity in indoor plant factory system with computational fluid dynamics (CFD)[J]. Biosystems Engineering, 2022, 220: 73-86.

[5] AHMED H A, TONG Y X, YANG Q C. Lettuce plant growth and tipburn occurrence as affected by airflow using a multi-fan system in a plant factory with artificial light[J]. Journal of Thermal Biology, 2020, 88: 102496.

[6] 方慧，张义，伍纲，等. 植物工厂导气栽培槽通风对冠层环境影响模拟[J]. 农业工程学报，2023，39(16)：208-214.
FANG Hui, ZHANG Yi, WU Gang, et al. Simulation of the effects of ventilation on canopy environment using cultivation bed with draft tube in a plant factory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 208-214. (in Chinese with English abstract)

[7] 吴晨溶，程瑞锋，方慧，等. 基于 CFD 的植物工厂管道通风模拟及优化[J]. 中国农业大学学报，2021，26（1）：78-87.
WU Chenrong, CHENG Ruifeng, FANG Hui, et al. Simulation and optimization of air tube ventilation in plant factory based on CFD[J]. Journal of China Agricultural Univercity, 2021, 26(1): 78-87. (in Chinese with English abstract)

[8] BONAN G. Ecological Climatology: Concepts and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

[9] INCROPERA F P, LAVINE A S, BERGMAN T L, et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 8th Edition[M]. Hoboken: Wiley, 2007.

[10] ZHANG L, LEMEUR R. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 58(3/4): 209-228.

[11] SCHYMANSKI S J, OR D, ZWIENIECKI M, et al. Stomatal control and leaf thermal and hydraulic capacitances under rapid environmental fluctuations[J]. PloS one, 2013, 8(1): e54231.

[12] SCHYMANSKI S J, OR D. Leaf-scale experiments reveal an important omission in the Penman–Monteith equation[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(2): 685-706.

[13] YE H, YUAN Z, ZHANG S. The heat and mass transfer analysis of a leaf[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10: 170-176.

[14] HARTMANN D L. Global Physical Climatology[M]. Amsterdam: Elsevier, 1994.

[15] JONES H G. Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[16] CLARKSON J P, FAWCETT L, ANTHONY S G, et al. A model for sclerotinia sclerotiorum infection and disease development in lettuce, based on the effects of temperature, relative humidity and ascospore density[J]. PLoS One, 2014, 9(4): e940094.

[17] KORTHALS R. Chambers for studying the effects of airflow velocity on plant growth[J]. Biotronic, 1994, 23: 113-119.

[18] MOTT K A, PARKHURST D F. Stomatal responses to humidity in air and helox[J]. Plant, cell and environment, 1991, 14(5): 509-515.

[19] MONTEITH J L. A reinterpretation of stomatal responses to humidity[J]. Plant, Cell & Environment, 1995, 18(4): 357-364.

[20] STRECK N A. Stomatal response to water vapor pressure deficit: an unsolved issue[J]. Current Agricultural Science and Technology, 2003, 9(4): 317-322.

[21] 路军灵，仝宇欣，杨其长. 设施环境下蔬菜干烧心的发生原因及防控策略[J]. 中国蔬菜，2019(9)：24-29.
LU Junling, TONG Yuxin, YANG Qichang. Tipburn occurrence reason of vegetables and its control strategies under protected environment[J]. China Vegetables, 2019(9): 24-29. (in Chinese with English abstract)

[22] WHITE P J. Calcium in plants[J]. Annals of Botany, 2003, 92(4): 487-511.

[23] BANGERTH F. Calcium -related physiological disorders of plants[J]. Annual Review of Phytopathology, 1979, 17: 97-122.

[24] STORY D, MURAT K, KUBOTA C, et al. Lettuce calcium deficiency detection with machine vision computed plant features in controlled environments[J]. Computers and

Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 238-243.

[25] MORROW R C. LED lighting in horticulture[J]. HortScience, 2008, 43(7): 1947-1950.

[26] FUJIWARA M, KUBOTA C, KOZAI T, et al. Air temperature effect on leaf development in vegetative propagation of sweetpotato single node cutting under artificial lighting[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 99(3): 249-256.

[27] SHIBUYA T, KOZAI T. Effects of air current speed on net photosynthetic and evapotranspiration rates of a tomato plug sheet under artifcial light[J]. Environ Control in Biology, 1998, 36(3): 131-136.

[28] KITAYA Y, TSURUYAMA J, SHIBUYA T, et al. Effects of air current speed on gas exchange in plant leaves and plant canopies[J]. Advances in Space Research, 2003, 31(1): 177-182.

[29] CHINTAKOVID W. TOYOKI K. Effect of air current speed on evapotranspiration rate of transplant canopy under artificial light.[J]. Journal of Society of High Technology in Agriculture, 2002, 14(1): 25-31

Impact of dual channel aeration ventilation on lettuce canopy heat exchange in plant factories

ZHANG Yihan[1,2] , TONG Yuxin[1,2※] , ZHANG Yi[1,2,3] , CHEN Can[1,2]

(1. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture*, *Chinese Academic of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*; 2. *Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100081, *China*; 3. *Institute of Western Agriculture*, *Chinese Academic of Agricultural Sciences*, *Changji* 831100, *China*)

Abstract: A stagnant airflow area can often occur in the increasing cultivation layers in a plant factory with artificial light, leading to the low growth of the plant, and even physiologic diseases, like tipburn. Furthermore, stagnant airflow can also lead to uneven distribution of environmental factors in the plant canopy, resulting in uneven growth of plants. The optimal air velocity is in the range of 0.3-1.0 m/s in plant canopy. A ventilation system can effectively solve these challenges. Previous studies have focused on the airflow to the plant cultivation spaces. However, these ventilation systems can only provide a single direction of airflow with low penetration, which is heavily obstructed by leaves, resulting in stagnant airflow zones within the canopy. Besides, the devices can also increase the equipment complexity to decrease operational efficiency. In this study, an assembled system of dual channel aeration cultivation was designed to increase the airflow within the plant canopy using simple equipment with operation convenience. A cultivation experiment was conducted in a plant factory. There was one control group (common aeration ventilation of a plant factory generated an airflow velocity of 0.2 m/s within the plant canopy) and three experiment groups (the dual channel aeration ventilation mode generated the airflow velocity of 0.6 (T_1), 0.9 (T_2) and 1.2 (T_3) m/s, respectively). A systematic investigation was made to explore the impact of different ventilation modes on plant growth, tipburn occurrence, heat exchange with the surrounding environment, and the canopy microenvironment. The results showed that the dual channel aeration ventilation outperformed the conventional one, in terms of the lettuce canopy environment, lettuce growth, and heat exchange capacity. Specifically, the best growth for lettuce plants was observed at a canopy airflow velocity of 0.9 m/s, with a shoot fresh weight of 56.7 g. The optimal canopy environment and heat exchange capacity for lettuce were achieved at a canopy airflow velocity of 1.2 m/s. There was a decrease of 8.8% and 2.8 ℃ in average canopy relative humidity and average air temperature, compared with the control group. The airflow regime was first transitioned from the laminar to a transitional flow and then changed to a turbulent flow at an airflow velocity of 0.9 m/s. The convective heat transfer coefficient was also significantly improved with the increasing airflow velocity. The sensible heat flux in the light and dark periods increased by 48.5% and 52.3%, respectively, while the latent heat flux rose by 52.9% and 37.9%, respectively, with the airflow velocity within the plant canopy increased from 0.2 m/s to 1.2 m/s. Besides, there was no tipburn occurred in the experiment groups, while the tipburn occurrence of the control group was 20.9%. It infers that the dual channel aeration ventilation can be expected to effectively alleviate tipburn. In conclusion, compared with the conventional ventilation mode, dual channel aeration ventilation can effectively enhance the plant canopy environment, plant yield, and quality, as well as heat exchange between plants and their surroundings. And the assembled structure can improve transportation and installation efficiency. Furthermore, the integrated structure of ventilation ducts and cultivation tanks also reduced equipment complexity. This mode can provide technical support to precise microenvironment control in plant factories.

Keywords: plant factory; heat exchange; cultivation system; lettuce; ventilation mode