

张卓, 汪小昆, 赵进, 等. 温室盆栽作物根区加热系统的设计和试验 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(1): 124-132.
ZHANG Zhuo, WANG Xiaochan, ZHAO Jin, et al. Design and experiment of root heating system for greenhouse potted crops[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(1): 124-132.

温室盆栽作物根区加热系统的设计和试验

张卓¹, 汪小昆^{1,2}, 赵进¹, 刘景娜¹, Morice O. ODHIAMBO¹

(1 南京农业大学工学院, 江苏南京 210031; 2 江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏南京 210031)

摘要:【目的】为解决长江三角洲地区冬季没有加温设备的温室或大棚中盆栽作物易受低温冷害的问题, 设计一种适用于矮株作物的根区加热系统。【方法】研制了一种嵌套式双层栽培盆, 夹层采用绝缘脂发泡剂填充, 栽培盆基质内分别放置 2 块 80 W/m²、15 cm×12 cm 的硅橡胶加热板, 加热板由 STM32 单片机输出信号到固态继电器进行加热功率控制, 使用模糊 PID 控制算法, 实时控制作物根区温度到设定值。【结果】根区温度控制相对误差不超过 5%。在连续低温条件下 (连续一周平均气温低于 5 ℃), 当根区温度分别设定为 15、20 和 25 ℃ 时, 相比于对照组, 高度为 25~35 cm 的作物地上部分日间平均温度分别提高 1.4、2.6 和 3.7 ℃, 夜间平均温度分别提高 2.1、2.9 和 4.0 ℃; 且与普通栽培盆相比, 本文设计的保温栽培盆在 3 种不同根区温度下分别节省电能 24.2%、25.3% 和 23.8%。【结论】设计的作物根区加热系统, 在连续低温条件下, 不仅能有效提高作物根区温度, 同时对作物地上部分也具有升温效果, 一定条件下可缓解低温胁迫对冬季作物生长的影响。

关键词: 温室; 温度控制; 作物根区; 栽培盆; 硅橡胶加热板; STM32
中图分类号: S22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)01-0124-09

Design and experiment of root heating system for greenhouse potted crops

ZHANG Zhuo¹, WANG Xiaochan^{1,2}, ZHAO Jin¹, LIU Jingna¹, Morice O. ODHIAMBO¹

(1 College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2 Jiangsu Province Engineering Laboratory for Modern Facilities Agricultural Technology and Equipment, Nanjing 210031, China)

Abstract: 【Objective】To design a root heating system suitable for dwarf crops, so as to solve the problem that potted crops in greenhouse without heating equipment in the Yangtze river delta region are vulnerable to low temperature and cold damage in winter. 【Method】A nested double-layer cultivation pot was designed. The interlayer was filled with insulating fat foaming agent. Two silicone rubber heating plates of 80 W/m² and 15 cm × 12 cm were placed in the substrate of the cultivation pot. The heating plate was controlled by STM32 MCU, which output signals to the solid state relay for heating power control. Fuzzy PID control algorithm was used to control the temperature of the crop root area to the set value in real time. 【Result】The relative error of root zone temperature control did not exceed 5%. Under the condition of continuous low temperature (average temperature below 5 ℃ for a week), when the root zone set temperature was 15, 20 and 25 ℃, the average daytime temperature of the aboveground parts with 30-35 cm height of crops increased by 1.4, 2.6 and 3.7 ℃ respectively compared with the control group, while their average night temperature increased by 2.1, 2.9 and 4.0 ℃ respectively. Compared with the common pot, the pots with root zone temperature of 15, 20, 25 ℃ saved electric energy by

24.2%, 25.3% and 23.8% respectively. 【Conclusion】 Under the condition of continuous low temperature, our system can not only effectively increase the temperature of crop root zone, but also can heat up the aboveground part of crop. Under certain conditions, our system can alleviate the effects of cold stress on winter crop growth.

Key words: greenhouse; temperature control; crop root zone; cultivation pot; silicone rubber heating plate; STM32

长江三角洲地区冬季生产设施作物面临着持续低温弱光的气候问题^[1], 没有加温设备的温室大棚只能依靠积蓄太阳能来提高室内温度, 受天气影响很大, 低温季节的连续阴雨、雪天时, 气温和地温都持续很低, 使得蔬菜作物, 尤其是喜温蔬菜生长迟缓, 甚至出现冷害, 严重影响蔬菜的品质和产量^[2-3]。为了保证作物在低温环境下安全过冬, 一般采用燃煤或者焚烧作物秸秆进行加温, 随着环保压力日渐增加, 选用空气源^[4] 或水源热泵^[5-8] 进行温室加温也是一种新型的加温方式, 但是温室整体环境加热仍然存在电能消耗高、价格昂贵等问题, 采取作物根区加温是一种节能的替代方式^[9]。采用电热元件直接加热作物根区, 加温效果明显、热效率高, 且设计性强, 可根据不同使用场所设计出更符合需求的加热模式。何芬等^[10] 分别采用发热电缆、自限温发热带、碳晶电热膜对育苗根区进行加热, 分析了不同加温材料对栽培基质温度的影响; 张红梅等^[11] 利用一种由金属发热丝嵌入聚丙烯保护膜构成的农用发热膜进行冬季茄果类育苗; 周长吉^[12] 将栽培盆直接放置在地面, 加热管道铺在栽培盆底部, 直接对其加热; 赵云龙等^[13] 将碳晶加热板系统引入番茄栽培设施中, 试验表明将加热板全部掩埋在基质里加温处理番茄幼苗能显著提高番茄的根系活力和光合速率。目前, 大多数根区加热主要适用于育苗环节的栽培, 因此在长江三角洲地区采用根区加热的方式来验证茄果类作物能否安全过冬, 具有非常重

要的意义。

本文拟研制一种保温性能良好的双层嵌套式栽培盆, 将硅橡胶加热板放置于栽培基质中, 加热板由 STM32 微控制器进行加热功率控制, 分析在不同根区温度下作物地上部分温度变化特性, 以为冬季温室中对茄果类作物进行根区加热提供参考。

1 系统总体设计

该系统主要由栽培盆、硅橡胶加热板、发泡剂、触摸屏、继电器、电源、SPI 通信模块、STM32 微控制器及传感器模块等组成。温度传感器与变送电路组成采集模块, 完成设备初始化后, 通信模块将采集的温度信号传送至控制器, 控制器计算采集到的状态值与设定值, 通过在线调整模糊 PID 算法并计算出控制量, 从而控制多路加热板加热功率, 具体工作原理如图 1 所示。

1.1 节能型栽培盆设计

1.1.1 外形设计 设计一种双层嵌套式栽培盆, 外层栽培盆口径尺寸 40 cm×40 cm, 底径 24 cm×24 cm, 高 35 cm; 内层栽培盆口径尺寸 30 cm×30 cm, 底径 18 cm×18 cm, 高 26 cm。将小盆嵌套在大盆内部, 间隙使用发泡剂填充, 间隙底部发泡剂厚度为 8 cm, 四周间隙厚度为 5 cm, 栽培盆内壁两侧各放入硅橡胶电热板, 三维效果图如图 2 所示。发泡剂的主要成分为聚氨酯, 聚氨酯广泛用于建筑、化工、

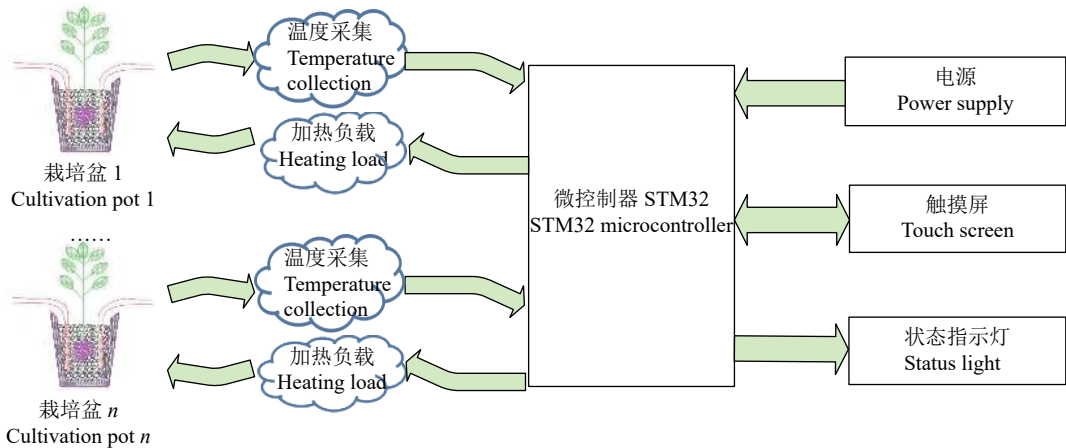


图 1 温度控制系统工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature control system

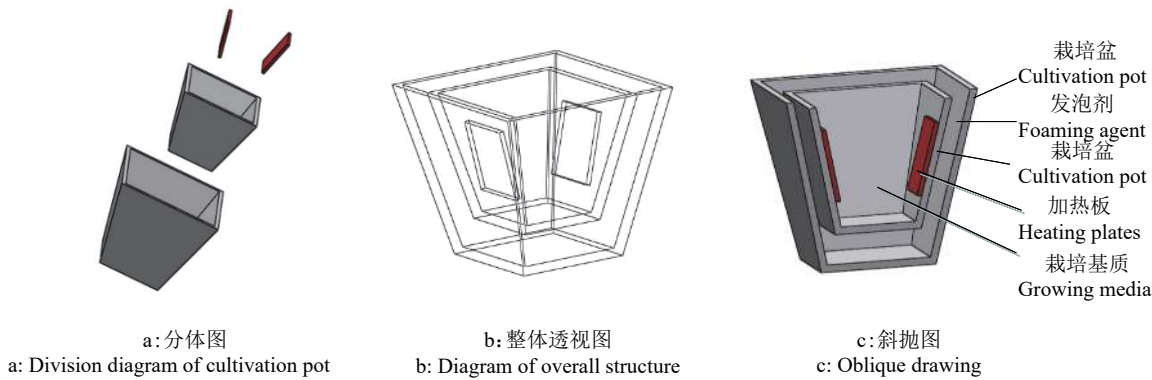


图 2 节能栽培盆结构示意图
Fig. 2 Structure of energy saving pot

电子等领域的一种新兴的有机高分子材料, 该材料导热系数极低, 不易吸水, 具有黏结、密封、隔热等特点, 是一种优质保温材料, 在系统运行时起到隔热保温进而节能的作用。

1.1.2 硅橡胶加热板的设计 加热板采用硅橡胶电热板, 它具有良好的柔韧性, 可与被加热物体紧密接触, 双面散热。电加温线排布如图 3 所示, 外形呈长方形, 长×宽×厚为 150 mm×120 mm×1 mm, 电热板发热形式为面状, 相比电热线以自身为辐散中心呈线性散热, 可避免栽培盆内局部温度过高、受热不均匀等问题, 且相同功率下其表面温度较低, 可减少对植物根系的伤害^[14-16]。

对于稳态的一维平壁导热问题^[17-18], 采用第一类边界条件, 可利用傅里叶定律求解加热板所需的热流量, 其数学描写为:

$$\Phi \int_0^\delta \frac{dx}{A} = - \int_\theta^{\theta'} \lambda dx, \tag{1}$$

即热流量和热流密度为

$$\begin{cases} \Phi = \frac{\theta - \theta'}{\delta/(\lambda A)} = \frac{\lambda A (\theta - \theta')}{\delta} \\ q = \frac{\theta - \theta'}{\delta/\lambda} = \frac{\lambda (\theta - \theta')}{\delta} \end{cases}, \tag{2}$$

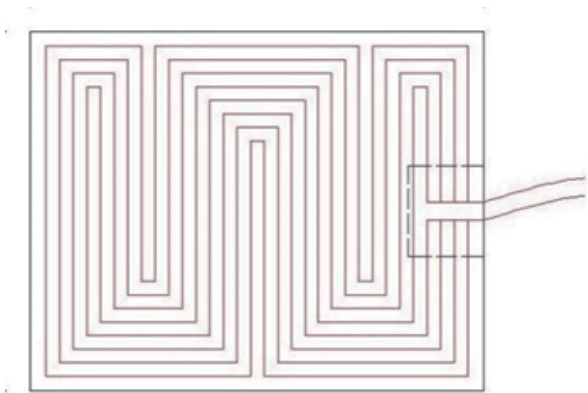


图 3 硅橡胶电热板结构图
Fig. 3 Schematic diagram of silicon rubber heating plate

式中, Φ 为热流量, W ; q 为热流密度, W/m^2 ; θ 、 θ' 为不同平壁面的温度, $^\circ C$; $\delta/\lambda A$ 为平壁的导热热阻, K/W ; δ/λ 为平壁的面积热阻, $m^2 K/W$ 。

以加温栽培盆为模型, 模拟出作物在极端寒冷天气下所需的加温能耗量, 计算以单片加热板加热作物根区为例, 其中栽培盆与硅橡胶加热板厚度不计, 模型示意图见图 4。

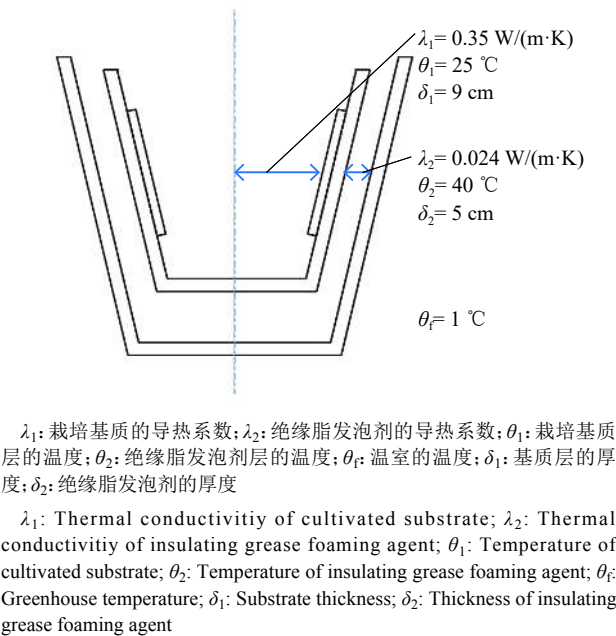


图 4 栽培盆导热示意图
Fig. 4 Schematic diagram of heat conduction in pot

据文献^[19-21]可知辣椒喜温不耐霜冻, 生长期间若长期处于 0~5 $^\circ C$ 以下低温时, 会出现叶绿素减少等冷害表现, 即温室气温 (θ_f) 的极端值范围为 0~5 $^\circ C$, 计算时 θ_f 取 1 $^\circ C$, 试验设定根区温度范围在 15~25 $^\circ C$, 栽培基质层温度 (θ_1) 取最高值 25 $^\circ C$, 此时保温层温度 (θ_2) 维持在 40 $^\circ C$, 将上述数据代入到公式 (3) 和 (4), 得到 2 个方向的热流密度:

$$q_1 = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\delta_1 / \lambda_1} = \frac{\lambda_1 (\theta_2 - \theta_1)}{\delta_1}, \tag{3}$$

$$q_2 = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\delta_2 / \lambda_2} = \frac{\lambda_2 (\theta_2 - \theta_1)}{\delta_2}, \tag{4}$$

加热板的热流为 2 个方向的热流密度之和:

$$q = q_1 + q_2, \tag{5}$$

通过公式 (3)~(5) 算得加热板所需热流密度 q 为 76.7 W/m^2 , 说明在实际试验中采用 80 W/m^2 功率的加热板是较为合理的。

1.2 系统硬件电路设计

系统微控制器选用 STM32F407, 其具有良好的瞬态反应和抗噪声能力, 可保证系统的可靠运行, 温度采集电路采用 I 级 K 型热电偶加调理芯片 MAX6675, 通过 SPI 串口通讯方式将数据传送至 STM32, 每路热电偶单独连接一个温度调理芯片, 通过译码器译码来选择读取的热电偶通道, 输入面板采用 TFT 显示屏, 可通过控制面板设置温度值, 电路原理图如图 5 所示。

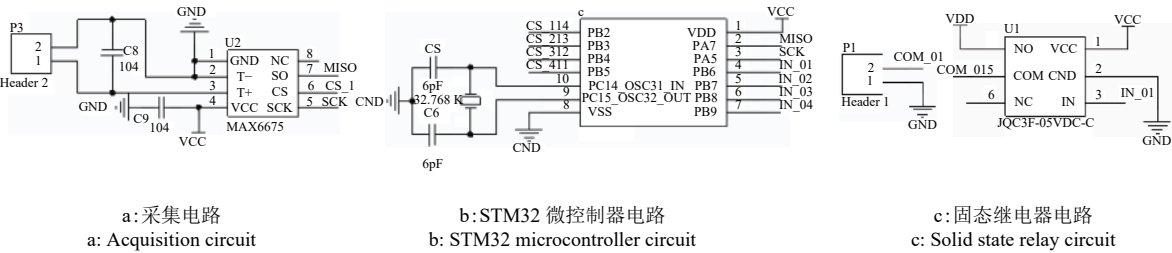


图 5 控制系统电路原理图
Fig. 5 Schematic diagram of control system circuit

1.3 温度控制系统设计

为了确保系统控制根区温度的稳定性, 采用抗干扰能力强、响应迅速的自整定模糊 PID 控制算

法^[22-24]。模糊 PID 控制结构如图 6 所示, 采用二维模糊控制结构, 以温度误差 $e(k)$ 和误差变化率 $ec(k)$ 作为输入, PID 参数调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 作为输出。

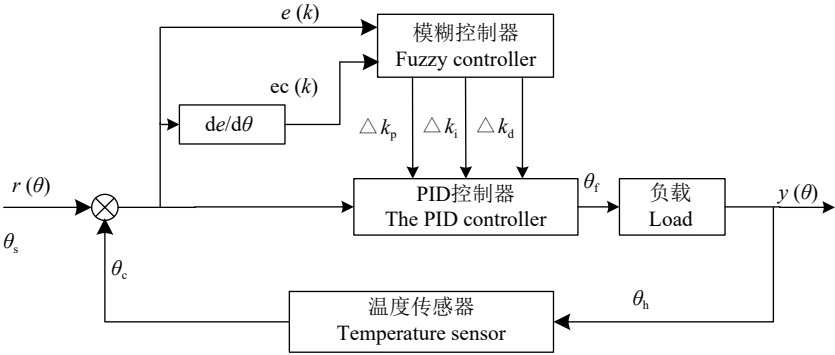


图 6 模糊 PID 控制结构图
Fig. 6 Structural diagram of the PID control block

θ_s : 温度信号的采样值; θ_c : 温度信号的设定值; $e(k)$: 温度信号误差; $ec(k)$: 温度信号误差变化率; $\Delta K_p(k)$ 、 $\Delta K_i(k)$ 和 $\Delta K_d(k)$ 为 PID 控制器的参数调整量; θ_f 、 θ_h 为温度控制量

θ_s : The sampling value of temperature signal; θ_c : The set value of temperature signal; $E(k)$: Error of temperature signal; $EC(k)$: Change rate of $E(k)$; $\Delta K_p(k)$, $\Delta K_i(k)$, $\Delta K_d(k)$ are parameter adjustment quantities of PID controller; θ_p , θ_h are control quantities of temperature

本系统采用三角形隶属度函数, 设定输入输出量的词集取 7 个模糊子集, 即 {NB(负大), NM(负中), NS(负小), Z0(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)}, 其中“大、中、小”表示控制量的程度, “正、负”表示变量的变化趋势方向 (正变化或负变化)。设定初始温度 θ_s , 开始阶段使用开关控制使加热板开始加温, 待土壤温度上升到一定温度后采用模糊 PID 来控制, PID 调节实际温度 θ_c 的范围在 $[\theta_s - \theta_e, \theta_s + \theta_e]$ 内, 误差的变化率 ec 范围在 $[\Delta U_s / T - \theta_{ec}, \Delta U_s / T + \theta_{ec}]$ 内, 则 E 和 EC 的基本论域为 $[-\theta_e, \theta_e]$ 和 $[-\theta_{ec},$

$\theta_{ec}]$ 。根据工程经验, 本文将温度信号误差 e 和温度信号误差变化率 ec 的模糊论域设为 $[-6, 6]$, 控制器输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的论域分别为 $[-0.12, 0.12]$ 、 $[-0.30, 0.30]$ 和 $[-0.09, 0.09]$ 。温度信号误差的量化因子 $K_e = 6 / \theta_e$, 温度信号误差变化率的量化因子 $K_{ec} = 6 / \theta_{ec}$, 这将 e 和 ec 从基本论域范围转换为模糊论域范围, 比例因子分别是 0.020、0.050 和 0.015, 工作时, 系统不断读取 e 、 ec 值, 模糊控制器实时输出 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的值, 根据公式 (6) 得到 PID 算法的 K_p 、 K_i 和 K_d , 从而实现 PID 控制的参数

自整定。

$$\begin{cases} K_p(k) = K_{p_s} + 0.02\Delta K_p(k) \\ K_i(k) = K_{i_s} + 0.05\Delta K_i(k) \\ K_d(k) = K_{d_s} + 0.015\Delta K_d(k) \end{cases}, \quad (6)$$

式中, K_{p_s} , K_{i_s} 和 K_{d_s} 分别为 PID 参数基值。

2 材料与方法

2.1 材料

供试辣椒品种为‘苏椒 5 号’, 该品种的辣椒株高最高可达 50~60 cm, 栽培基质为椰壳 (Galuku Group, 澳大利亚), 辣椒栽培期间定期施用营养液, 试验期间外界气温较南京冬季平均气温偏低、风速适中, 是典型的南方冬季低温弱光气候。试验于 2017 年 11 月 4 日播种于孔穴盘中, 12 月 6 日“四叶一心”时选取长势一致的植株移植到栽培盆中, 进入加温栽培期。

2.2 方法

采用 TP-300 手持式测温仪对根区温度进行检测, 测量时温室内温度 8 ℃。由于栽培基质质地松软, 导热系数较低^[25], 属于热的不良导体, 电热板在基质里放出的热量到达植物根际有一定滞后性, 测量时每个栽培盆设置 5 个测点, 以植物根茎 5 cm 为半径, 深度为 10 cm 的 5 个点, 测量点分布如图 7 所示。设置 3 组根区温度: 15、20 和 25 ℃, 每组温度处理 3 株植株, 对每株植物进行 4 次重复观测, 取平均值作为测量值, 每次测量相互独立。

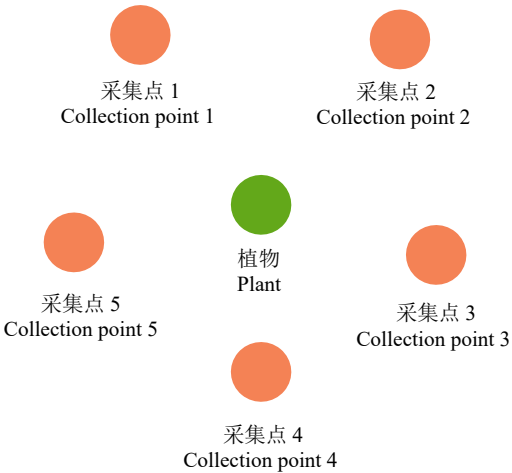


图 7 温度采集点分布图

Fig. 7 Distribution diagram of temperature collection points

作物地上部分 (茎秆、叶片) 温度测量时, 设置根区温度为 15、20 和 25 ℃, 测量时间为每天 05:00, 试验采用的辣椒株高均在 25~35 cm, 且作物外形相似, 对作物地上部分的温度测量分为茎秆和叶片两部分。茎秆上每隔 2 cm 设置为一个测点, 每一叶片

沿着叶脉方向均匀选取 3 个测点, 测点之间间隔相等, 测点分布如图 8、图 9 所示。使用 TYS-4N 型植物营养测定仪对整株作物温度进行测量, 测量时按下测量压头, 使测量位置夹住作物叶片停留约 2~3 s, 直到蜂鸣器发出提示音, 松开测量压头。



图 8 作物茎秆测点示意图

Fig. 8 Schematic diagram of measuring points on crop stem

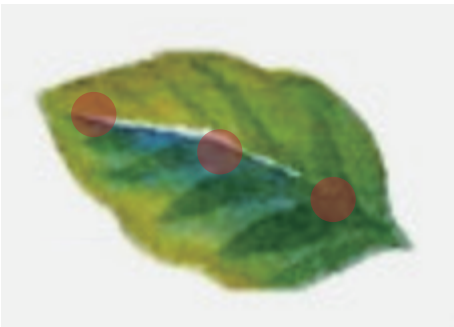


图 9 作物叶片测点示意图

Fig. 9 Schematic diagram of measuring points on crop leaf

对作物地上部分温度进行连续测量, 07:00—21:00 每隔 2 h 测量 1 次。观测点选择作物基底部、作物中部和冠层顶部 3 个高度, 每个高度随机选择 4 个测点, 测点分布如图 10 所示。采用 TYS-4N 型植物营养测定仪测量各个测点的温度, 为避免环境温度的波动对测量结果产生影响, 4 次测量均在 1 min 内完成, 观测值为测点温度的平均值。

为了验证保温栽培盆的节能性, 在相同外界条件下, 比较保温栽培盆与普通栽培盆的耗电量。普通栽培盆为内层保温栽培盆, 即口径尺寸 30 cm×30 cm, 底径 18 cm×18 cm, 高 26 cm, 单层, 不加保温层, 加热板放置同保温栽培盆。在不同根区温度 (15、20 和 25 ℃) 下分别设置 3 组保温盆与 3 组普

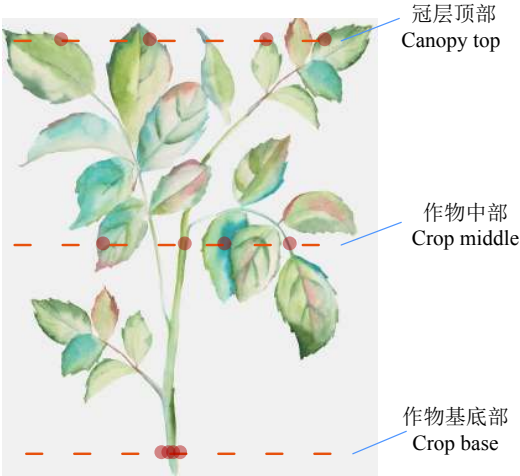


图 10 作物地上部测点分布示意图

Fig. 10 Schematic diagram of measuring points on plant aboveground

通盆, 采用电量检测仪测量每盆作物的耗电量, 每天 5:00 读取电量检测仪的读数, 为当日该盆的能耗量, 持续测量 2 周。最后对保温栽培盆进行实用性分析, 与燃煤锅炉进行经济性比较。

3 结果与分析

3.1 根区温度控制试验

验证系统温度控制准确性的采集结果如表 1 所示。计算温度平均值时, 20℃ 组 2 的测量值与 25℃ 组 2 的测量值为可信度较低的数值, 计算时应剔除, 对剩余的数据进行计算, 保证得到最优的平均值, 由试验结果可知, 实际测得的数据比设定温度偏高, 相对误差保持在 0~4.53%, 该系统有较好的稳定性与精确性。

表 1 根区温度控制试验结果
Table 1 Experiment results of controlling root temperature

测量点 Test point	15℃			20℃			25℃			CK
	组1	组2	组3	组1	组2	组3	组1	组2	组3	
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 1	Group 2	Group 3	Group 1	Group 2	Group 3	
1	15.70	15.80	15.60	20.70	20.70	20.20	25.50	26.00	25.00	8.10
2	16.00	15.60	15.10	21.00	20.60	20.50	25.60	25.70	25.40	8.80
3	15.80	15.50	15.40	20.80	22.30	20.80	25.30	25.40	25.80	8.70
4	15.60	15.40	15.80	20.50	20.50	20.30	25.10	25.60	25.50	8.80
5	15.30	15.30	15.70	20.60	20.60	20.40	25.00	27.00	25.90	9.00
平均值 Average	15.68	15.52	15.52	20.72	20.90	20.44	25.30	25.54	25.52	8.68
相对误差/% Relative error	4.53	3.46	3.46	2.88	4.50	2.20	1.20	2.16	2.08	

3.2 不同根区温度作物地上部温度的日变化特征

由表 2 可知, 在前 3 个晴天试验日中, 中午时段太阳辐射较强, 温室室内温度迅速上升, 在 15、20 和 25℃ 3 种根区处理温度下作物日间平均温度分别为 11.0、12.1 和 13.2℃, CK 日间平均温度为 9.8℃, 说明该系统的加温模式在有太阳辐射的情况下对作物地上部分温度提升效果明显。试验期间温室气温、对照组作物的平均温度和不同根区温度下

作物地上部温度的变化曲线如图 11 所示。由图 11 可知, 作物地上部每日温度变化呈“单峰”曲线变化, 最高温度出现在 12:00—14:00 区间, 同时, 12 月 16、17 日为阴雨天, 是典型的冬季低温弱光天气, 温室内最高气温出现在 16 日 13:00, 温度仅为 11.2℃, 作物地上部温度变化不明显, 日间平均温度为 8.5℃, 夜间平均温度为 6.4℃, 3 组根区加温处理作物的地上部日间平均温度分别为 10.2、11.5 和

表 2 不同根区温度处理的作物地上部平均温度
Table 2 Average temperature of aboveground parts of crop under treatment with different root temperature

θ/℃ Treatment temperature	晴天 Sunny day		阴天 Cloudy day	
	日间 Daytime	夜间 Night	日间 Daytime	夜间 Night
15	11.0±2.08	9.4±1.46	10.2±1.60	8.8±1.58
20	12.1±1.97	10.5±1.04	11.5±1.46	9.7±0.72
25	13.2±1.66	12.0±1.20	12.5±1.93	11.4±0.77
CK	9.8±2.55	7.7±1.50	8.5±1.36	6.4±0.83

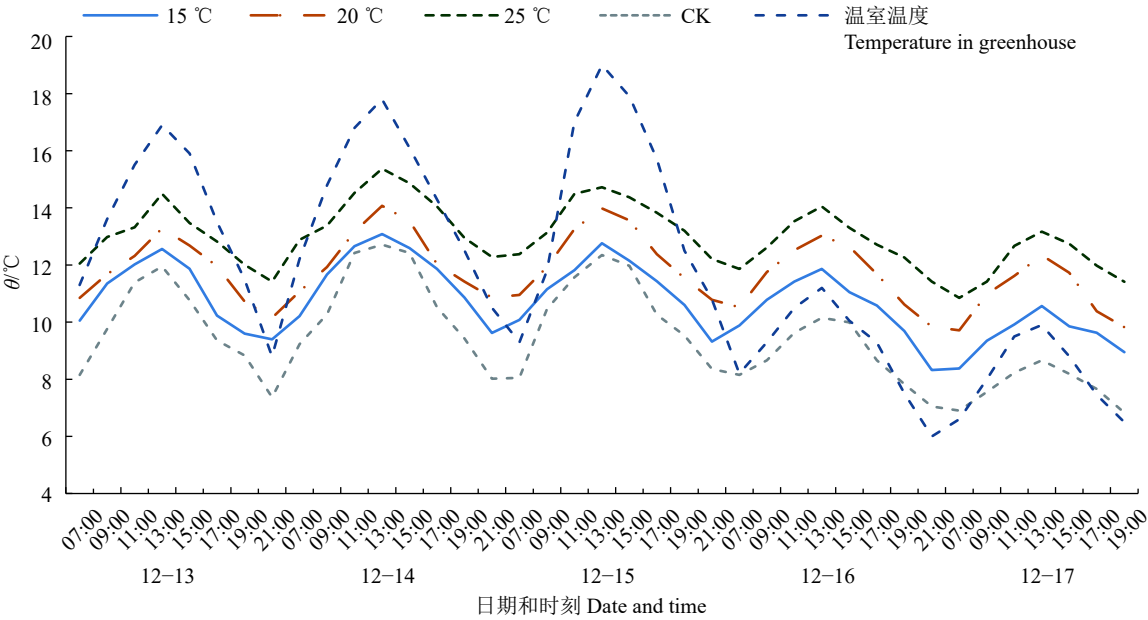


图 11 不同根区温度处理下作物温度日变化及温室气温变化

Fig. 11 Changes in crop temperature and greenhouse temperature under different root zone temperatures

12.5 °C, 夜间平均温度分别为 8.8、9.7 和 11.4 °C, 尽管气温骤降, 作物整体温度略低于前 3 个试验日, 但没有出现大幅度的温度波动, 作物的地上部仍处在一个有利于生长的温度环境。试验期间根区温度为 15、20 和 25 °C 时, 作物冠层温度日间平均提高 1.4、2.6 和 3.7 °C, 夜间平均提高 2.1、2.9 和 4.0 °C。

3.3 不同根区温度对作物地上部温度的影响

为了使作物的温度分布更为直观, 采用 RGB 相机采集作物图像, 基于 Colourbar 绘制作物温度分布图, 结果如图 12 所示。由图 12 可知, 在没有太阳辐射的情况下, 每组作物地上部分温度从底部沿冠层顶部方向呈递减趋势, CK 组作物基部采集最

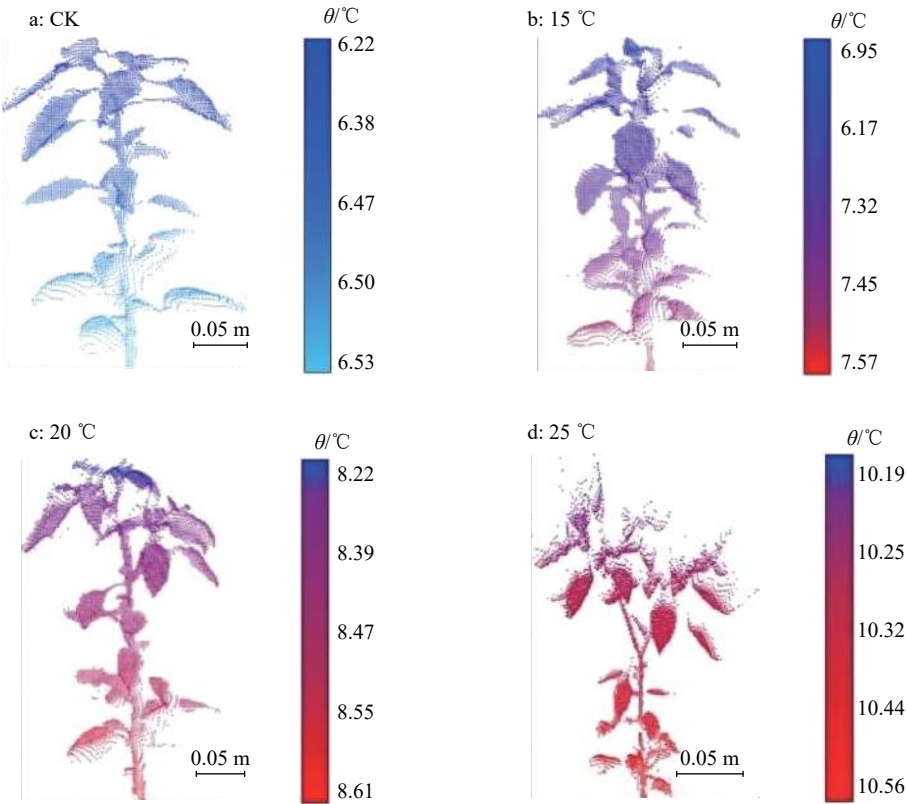


图 12 不同根区温度处理下作物温度分布图

Fig. 12 Crop temperature profiles under different root zone temperatures

高温度为 6.53 ℃, 该组作物在低温下已经出现了叶片皱缩、叶片黄斑等冷害表现, 当给作物根区加热时, 由于栽培盆基质上方没有铺设保温隔热材料, 加热板散发的热量会垂直向上传递, 直接加热作物周围的空气。根区温度为 15、20、25 ℃ 时, 3 组作物测量到的最高温度分别为 7.57、8.61 和 10.56 ℃, 且加温组作物生长状态良好。可见, 本研究提出的作物根区加热的方法可有效地提高作物温度, 避免作物在夜间低温环境下遭受冷害。

3.4 保温栽培盆的能耗与实用性分析

图 13 为保温栽培盆与普通栽培盆的耗电量

试验结果, 温室温度对能耗量有着重要的影响, 当室内温度升高时, 能耗明显降低, 12 月 22 日至 12 月 24 日由于环境温度高, 根区温度为 15 ℃ 时不需要加热板提供热量, 反之温室温度降低时, 根区加热所需能耗明显提升。试验表明填充发泡剂的栽培盆比普通栽培盆节能效果显著, 根区温度为 15、20 和 25 ℃ 时, 普通栽培盆耗能分别为 5.19、7.51 和 9.61 kW·h, 保温栽培盆分别耗能 4.18、5.99 和 7.76 kW·h, 保温栽培盆比普通栽培盆分别节省电量 24.2%、25.3% 和 23.8%, 节能效果明显。

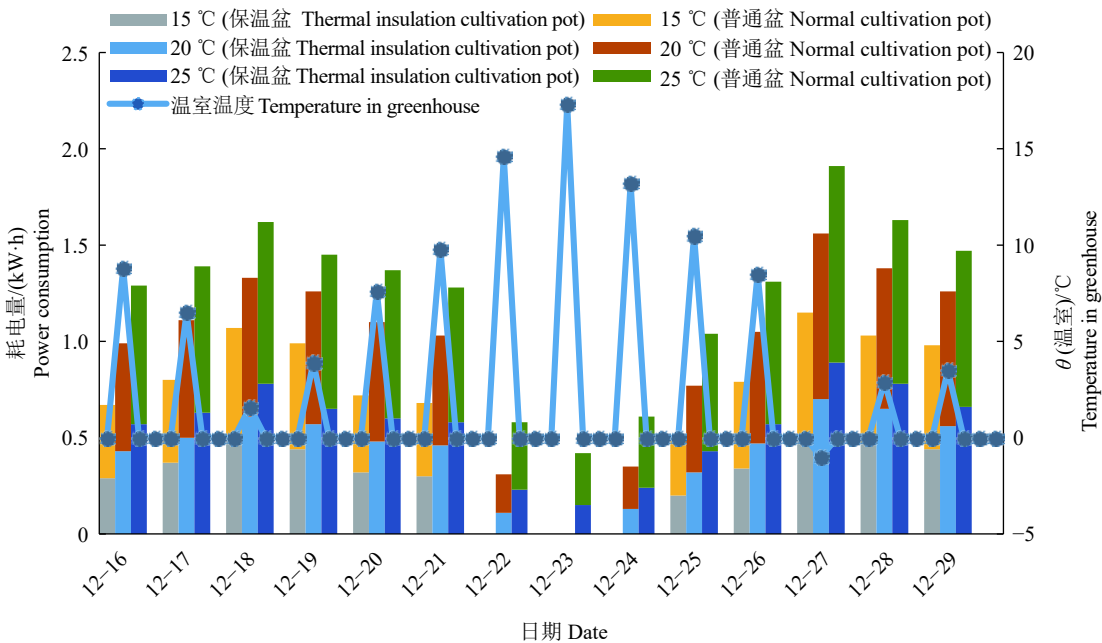


图 13 不同根区温度处理下 2 种栽培盆的耗电量

Fig. 13 Power consumptions of two types of pots under different root zone temperatures

计算单位面积的耗电量, 保温栽培盆的口径为 40 cm×40 cm, 每平方米可放置 6.25 个栽培盆, 但实际种植时考虑盆与盆之间存在一定间隙, 即按 1 m² 放置 4 个保温栽培盆来计算, 一般地 666.7 m² 可栽培辣椒约为 2 600 株, 即采用保温栽培盆种植辣椒可以达到实际生产中的种植要求。以加热到 15 ℃ 为例, 加温栽培 2 周, 每平方米保温栽培盆栽共耗电 16.72 kW·h, 以电费 0.5 元/(kW·h) 计算, 前期投入为每平方米 11 元。采用燃煤锅炉供暖, 达到与保温栽培盆提供相同的热量时, 燃煤量为 2.4 kg/m²[26], 煤的价格每吨 900 元, 前期投入为每平方米 27 元[27], 人工费用为每平方米 2.12 元, 则保温栽培盆电加热与燃煤锅炉的运行总费用分别为 19.36 和 31.28 元。

通过运行费用比较可知, 电费比煤的价格高, 所以保温栽培盆运行的电费会高于燃煤量的费用,

但燃煤锅炉产生的热量在能量传递过程中会有一定损耗, 所以在实际过程中耗煤量会高于理论计算值, 且燃煤锅炉有着高昂的前期投入以及人工费用, 综合比较认为保温栽培盆是一种更为经济的加温方法。燃煤锅炉还存在着环境污染问题, 保温栽培盆可循环利用, 节能效果良好, 从长远性考虑, 保温栽培盆更具经济效益和生态效益, 有一定的实际应用价值。

4 结论与讨论

本文设计的双层嵌套栽培盆具有保温、节能的特点, 栽培盆内置硅橡胶加热板, 加温系统采用模糊 PID 控制, 提高了温度控制精度, 将误差控制在 0~4.53%, 有良好的稳定性与精确性。试验结果表明, 在没有太阳辐射的情况下, 加热作物根部会使

作物地上部分温度往冠层顶部方向递减,当根区温度设置为 15、20 和 25 °C 时,作物冠层温度日间分别平均提高 1.4、2.6 和 3.7 °C,夜间分别平均提高 2.1、2.9 和 4.0 °C,保温栽培盆比普通栽培盆分别节省电量 24.2%、25.3% 和 23.8%,节能效果明显,且相比燃煤锅炉,保温栽培盆有着更低的运行费用,具有实用性,且本系统所采用的聚氨酯发泡剂、硅橡胶加热板、热电偶传感器等元件成本低廉,有助于该系统的后期推广。

根区加温模式不但耗能较低,而且对抵御冬季持续恶劣天气,保证作物安全度过低温冷害期有着重要意义。传统温室加温是通过加热整体环境,然后热量传递到作物各个部分,而根部往往是温度最低的部分;作物根区加热系统往往是根区温度最高,然后温度分布往冠层顶部方向递减,这种温度分布趋势对于抵抗短期的低温冷害具有明显优势,但是对于作物长期的长势,尤其是产量的影响,还需要进一步的试验观测。

参考文献:

- [1] 王艳利,成磊. 浅谈冬季大棚蔬菜种植注意事项 [J]. *种子科技*, 2018, 36(11): 65-67.
- [2] 傅国海,杨其长,刘文科. LED 补光和根区加温对日光温室起垄内嵌式基质栽培甜椒生长及产量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(2): 230-238.
- [3] 廉勇,崔世茂,包秀霞,等. 根区温度对辣椒幼苗生理特性的影响 [J]. *华北农学报*, 2014, 29(5): 156-160.
- [4] 李文,杨其长,张义,等. 日光温室主动蓄放热系统应用效果研究 [J]. *中国农业气象*, 2013, 34(5): 557-562.
- [5] 陈冰,罗小林,毕方琳,等. 温室太阳能与空气源热泵联合加温系统的试验 [J]. *中国农业科技导报*, 2011, 13(1): 55-59.
- [6] 石惠娴,任亦可,孟祥真,等. 植物工厂水蓄能型地下水源热泵供热系统节能运行特性研究 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(23): 157-163.
- [7] EDWARD F, MUDITHA A, WU J Z. Modelling and analysis of a ground source heat pump combined with a PV-T and earth energy storage system[J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 886-891.
- [8] 胡涛,周群,肖仁政,等. 水蓄能地源热泵系统的一种在线优化运行控制 [J]. *太阳能学报*, 2018, 39(2): 496-503.
- [9] 陈祎. 植物根区加热降低温室能源消耗 [J]. *农业工程技术: 温室园艺*, 2008(3): 20.
- [10] 何芬,侯永,李恺,等. 碳晶电热膜根区加温对日光温室育苗环境温度的影响 [J]. *北方园艺*, 2018, 42(23): 60-64.
- [11] 张红梅,金海军,丁小涛,等. 不同加温装置对冬季黄瓜育苗和生长的影响 [J]. *中国瓜菜*, 2012, 25(4): 12-15.
- [12] 周长吉. 周博士考察拾零 (十七) 一种使用太阳能平板集热器提高日光温室地温的方法 [J]. *农业工程技术: 温室园艺*, 2012(8): 18.
- [13] 赵云龙,于贤昌,李衍素,等. 碳晶电热系统在日光温室番茄生产中的应用 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 131-138.
- [14] 杨小平,荣浩鸣,戴小军. 橡胶/碳纤维层压复合导电发热板的电学性能研究 [J]. *橡胶工业*, 2000(1): 9-13.
- [15] 张海桥. 碳晶电热板系统运行调节的实验及模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [16] 李衍素,赵云龙,贺超兴,等. 碳晶电热板在日光温室黄瓜冬季育苗中的应用效果 [J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(6): 126-133.
- [17] 彭东玲,张义,方慧,等. 日光温室墙体一维导热的 MATLAB 模拟与热流分析 [J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(5): 174-179.
- [18] 章熙民,任泽霏,陈钟顺. 传热学[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 15.
- [19] 常彩涛. 辣椒耐低温研究概述 [J]. *辣椒杂志*, 2011, 9(1): 6-8.
- [20] 韩明丽,朱建方,赵根,等. 冬春季低温阴雨雪寡照对蔬菜育苗的不利影响及应对措施 [J]. *长江蔬菜*, 2018 (16): 12-16.
- [21] 吴广霞,唐献龙,杨德光,等. 植物低温胁迫生理研究进展 [J]. *作物杂志*, 2008, 181(3): 17-19.
- [22] 董全成,冯显英. 基于自适应模糊免疫 PID 的轧花自动控制系统 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 30-37.
- [23] 岳文杰,谢守勇. 基于模糊 PID 的温室温度控制器设计与仿真 [J]. *农机化研究*, 2014, 36(4): 194-197.
- [24] HARINATH E, MANN G K I. Design and tuning of standard additive model based fuzzy PID controllers for multivariable process systems[J]. *IEEE T Syst Man Cy C*, 2008, 38(3): 667-674.
- [25] 陆森,任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 13-18.
- [26] 徐刚毅,刘明池,李武,等. 电锅炉供暖日光温室土壤加温系统 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(14): 171-174.
- [27] 柴立龙,马承伟,张义,等. 北京地区温室地源热泵供暖能耗及经济性分析 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 249-254.

【责任编辑 霍 欢】