

光伏驱动基质控温系统对温室番茄根区的降温效果

张 勇, 倪欣宇, 张柯新, 许英杰

(西北农林科技大学园艺学院, 农业农村部西北设施园艺工程重点实验室, 杨凌 712100)

摘 要: 在温室中经常出现短期或持续的高温工况, 通常温室内温度环境调控的方法为整体降温, 该方法通常会出现无法达到有效降温或高能耗的问题。为解决上述问题, 更好地实现温室的周年生产, 该研究提出了一种以光伏作为能量来源, 以无机相变材料作为储能工质, 结合生态智能的环境控制策略, 对番茄根区应对高温工况, 实现安全连续生产进行了试验研究。结果表明, 在温度较高的夏季晴天需 2 次各约 1 h 的降温, 阴、雨天各仅需 1 次约 1 h 降温, 其余时段充分利用系统的保冷作用即可达到维持作物舒适生长环境的要求。在试验工况下, 典型晴天(2018 年 7 月 18 日)、阴天(2018 年 6 月 30 日)、雨天(2018 年 7 月 1 日)与对照组温度变化相比, 该系统实际将试验组基质的平均温度分别降低了 8.65、11.38、11.47 °C, 使番茄根区温度在日间始终低于最高耐受温度(33 °C), 夜间温度控制在发育的最适温度(22 °C)左右。试验进行到第 17 天时对照组植株全部死亡, 试验组保持良好生长状况。该研究所提出的温室控温方法中, 保温种植槽单位面积的制冷功率为 510.42 W/m², 基质平均温度降低 9.03 °C, 实现了温室能耗的大幅度降低, 而且能够长时间维持降温的效果。使用生态智能种植基质控温的方法和系统, 可以实现在超低能耗条件下, 解决温室番茄的抗高温安全生产问题。

关键词: 光伏; 温室; 生态智能; 根温; 相变材料; 夏季

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.024

中图分类号: S625.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0212-08

张 勇, 倪欣宇, 张柯新, 许英杰. 光伏驱动基质控温系统对温室番茄根区的降温效果[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 212—219. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.024 http://www.tcsae.org

Zhang Yong, Ni Xinyu, Zhang Kexin, Xu Yingjie. Cooling performance for tomato root zone with intelligent ecological planting matrix temperature control system driven by photovoltaic in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 212—219. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.024 http://www.tcsae.org

0 引 言

截至 2017 年, 中国设施园艺面积达 370 万 hm², 约占世界设施园艺总面积的 80.43%, 居世界第一^[1]。在温室生产中经常出现短期或持续的高温工况, 很难实现温室周年供应。而对设施内温度控制的研究当前只侧重于设施内作物冠层温度的控制, 其中较多的为利用遮阳^[2]和自然通风进行降温^[3-5], 通常还会联合对雾的控制改变温室内温度^[6-10]; 还可以建造新的系统和控制设备来进行降温^[11-14]。通过传统降温方式, 虽降温措施成本低、实用性强, 但总体来说各降温措施主要对温室白天降温, 对夜间降温效果明显较差。王吉庆等^[15]的研究指出当单位温室面积实际制冷功率为 157.5 W/m² 时, 温室内平均温度较室外降低 1.0 °C。与此同时, 利用水源热泵^[16]、地热能水平埋管系统^[17]、光伏发电辅助闭式土壤-空气热交换器^[18-19]、地下空气通道^[20]等热交换系统也有降温

潜力不足、建造成本高等缺点, 很难应用推广。

太阳能作为最清洁、安全的可再生能源, 既可在进行农业生产的过程中获得额外的电能, 也可缓解能源压力和增加土地利用^[21]。将太阳能光伏发电技术与温室的结合的技术已有很多并已基本成熟^[22-25]。相变材料(phase change material, PCM)属于功能材料, 具有良好的相变蓄热能力^[26]。因此, 该材料的应用对节能减排方面具有重要意义。

针对日光温室内部光温环境的研究侧重于春、秋、冬 3 个季节, 而对日光温室夏季气候条件下温室内的温度环境监测和分析很少^[27], 为此, 本试验以低能耗、高效降温为核心, 一方面对夏季日光温室环境指标监测分析空白进行了补充和细化, 另一方面在充分发挥植物本身抗热性能的基础上, 提出在日光温室内部通过光伏板供能的自动控温装置对番茄根部进行降温的新方法, 在低设备投资、低能耗消耗及高效灵活控制方面均有一定的突破。通过本试验的生态智能种植基质控温系统达到了在夏季极端高温条件下, 让番茄安全越夏并开花结果的效果。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 试验温室

本试验温室采用的是张勇等^[28-30]设计的一种新型结构的蓄热墙体日光温室, 如图 1 所示。供试日光温室位

收稿日期: 2019-07-16 修订日期: 2020-02-11

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-05-05); 宁夏回族自治区重点研发计划重大项目(2016BZ0901); 节能日光温室结构优化与配套技术开发研究(2017ZDXM-NY-057); 设施农业采光蓄热技术提升研究与示范(2016KTCL02-02)

作者简介: 张 勇, 副教授, 博士, 主要从事温室建筑结构及光热环境和建筑园艺研究。Email: Landscape@nwsuaf.edu.cn。

中国农业工程学会高级会员: 张勇(E041200715S)

于陕西省杨凌示范区杨家庄西北农林科技大学园艺学院校外试验场, 北纬 $34^{\circ}17'21.33''$, 东经 $108^{\circ}05'27.44''$ 。长度, 试验温室坐北朝南, 东西延长 15 m, 跨度 9 m, 脊高 4.5 m, 透明覆盖材料为 (耐高温聚酯) PET 膜。本次试验所搭建的温控试验平台及整个后期作物的培养均于该温室中进行。

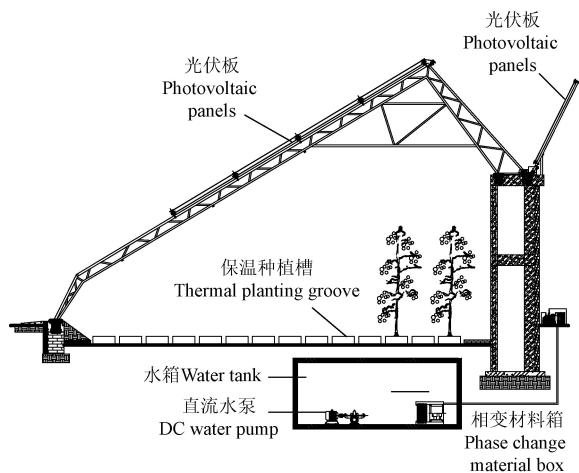


图 1 日光温室结构图^[29]
Fig.1 Structure diagram of solar greenhouse

1.1.2 生态智能种植基质控温系统

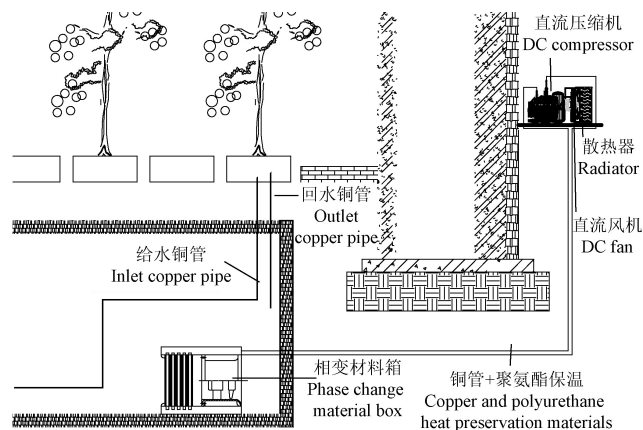
生态智能种植基质控温系统设计如图 2 所示, 光伏板为整个系统唯一能量源, 直接供系统直流压缩机制冷和为配套蓄电池充电 (系统蓄电池容量为 400 Ah)。控温系统分为两部分, 第一部分由直流压缩机、直流风机、散热器组成 (图 2a)。直流压缩机外接铜管延长至水箱中对水箱中单独封装的总质量为 110.30 kg 的无机相变材料进行降温 (铜管外露部分用聚氨酯包裹, 防止冷量流失) 用以储存冷量。相变材料质量配比为: CaCl_2 : 水: 硼砂 = 337.5: 241.5: 1, 放热量 148.30 J/g (温度区间 $5.75 \sim 0.72^{\circ}\text{C}$), 吸热量 130.10 J/g (温度区间 $26.32 \sim 35.41^{\circ}\text{C}$)。第二部分主要由水箱、水泵和保温种植槽组成 (图 1)。水箱中的水通过相变材料箱的换热系统与其内部的低温相变溶液进行热量交换, 并通过水泵驱动进入外径 8 mm 的种植槽底部铜管中, 铜管在种植槽中的布置如图 2b 俯视图所示, 呈 S 型布置, 共 2 层, 每层 4 根; 每根铜管之间间隔均为 40 mm。具体保温槽内钢管以及温度测点立面分布见图 2b 主视图。

保温种植槽底部为 $350 \text{ mm} \times 4\,000 \text{ mm}$ EPS (聚苯乙烯) 夹心板, 左右侧面均为 $500 \text{ mm} \times 4\,000 \text{ mm}$ 尺寸的 EPS 夹心板 (厚度 100 mm), 用发泡聚氨酯填充各块 EPS 夹心板间的缝隙。2 个保温种植槽垂直于温室后墙南北放置, 两槽间距 1 500 mm, 置于温室中央位置并装入 130 mm 厚度的基质。基质上盖 $350 \text{ mm} \times 3\,800 \text{ mm}$ EPS 板, 并用电热刀在指定位置分别开 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 开口以便于作物种植。

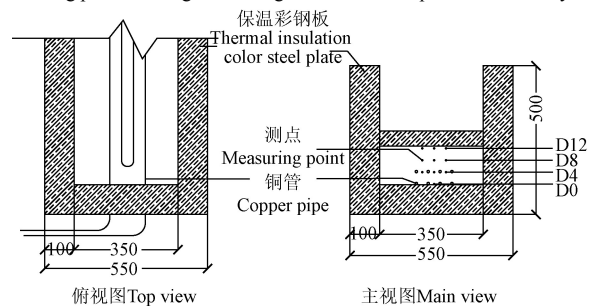
1.2 试验方法

为了最大程度地节能, 本试验采用了生态智能的控制策略对试验组基质温度进行调控。该控制策略充分发

挥植物本身的耐热特性, 控制方式拟合生态的昼夜温度节律。即在正午时段将根区温度控制在番茄根区最高温之下 (33°C) 保证其安全渡过正午高温时段; 而在夜间, 充分利用温室外界的相对低温, 将根区 ($50 \sim 100 \text{ mm}$ 距基质表面) 温度控制在最适温度范围 ($20 \sim 23^{\circ}\text{C}$), 进而使其能在较低能耗下实现最适的夜间温度。



a. 生态智能种植基质控温系统降温部分
a. Cooling part of ecological-intelligent substrate temperature control system



b. 保温种植槽内铜管布置和温度测点图
b. Distribution of copper pipe and temperature measurement points in heat preservation tank

注: D0、D4、D8、D12 分别为距离保温槽底部 0、40、80、120 mm 处。
Note: D0, D4, D8, and D12 are 0, 40, 80, and 120 mm away from the bottom of the heat preservation tank, respectively.

图 2 生态智能种植基质控温系统

Fig.2 Ecological-intelligent substrate temperature control system

具体方法: 直流压缩机与光伏板直连, 依照光伏最大发电功率满负荷制冷并将冷量存储在相变材料中, 多余电量储存在光伏板连接的蓄电池中, 用以维持需要降温时系统的正常运行。当种植系统需要降温时, 开启水箱中的直流水泵, 驱动水通过试验组种植槽中的管路实现对植株根区降温, 同时在水箱中通过换热器实现与相变材料的热量交换。当种植槽基质根区核心温度在白天达到 $(30 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ 、入夜前达到 $(28 \pm 4)^{\circ}\text{C}$ 时直流水泵启动, 直至白天降至 $(27 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, 夜晚 $(22 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 停止工作, 其他时段只需保温即可。反复控制植物根区温度在白天不超过 33°C , 夜间处于 22°C 左右的最适温度下生长。对照组的保温种植槽结构及内部基质均与试验组相同, 但其中无管道铺设, 且不进行任何降温处理, 仅对其中所种植番茄进行日常管理。

1.2.1 测试仪器

基质温度采用 T 型热电偶温度传感器 (精度

$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$), 连接到 34970A 数据自动采集仪 (美国 Agilent 公司生产) 进行测定。采用哈尔滨物格电子仪器公司生产的多路环境测试仪 (PDE-KI) 对室内外光照及空气温度、湿度进行测定, 其温度测量精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测量范围为 $-30\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 相对湿度 (RH) 精度为 $\pm 3\%$; 光照强度测量范围为 $0\sim 200\ 000\text{ lux}$, 精度为 $\pm 5\%$; 各监测指标每隔 10 min 自动记录 1 次瞬时值。采用 testo875-2ipro 高清晰红外热像仪 (德国仪器国际贸易 (上海) 有限公司生产, 视场角 32° (水平) $\times 23^{\circ}$ (垂直), 像素为 320 (水平) $\times 240$ (垂直), 温度测量范围为 $-30\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 帧频范围为 $9\sim 33\text{ Hz}$, 工作温度为 $-15\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 存储温度为 $-30\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) 获取番茄苗全株的热象图, 比热容采用 XRY-II 蓄热系数测试仪 (湘潭市仪器仪表有限公司生产) 进行测定。

1.2.2 温室环境测定

由于中国大部分地区的日光温室在夏季均面临高温高湿的巨大考验, 甚至由于高温高湿无法正常使用; 为模拟系统在极端状态下的有效性和可靠性, 本试验采用了极限状态的设计方法, 在试验期间温室处于全密闭状态, 底通风及顶通风和门等通风装置均处于全关闭状态, 遮阳系统以及湿帘等降温设备也均未启动, 即温室内为闷棚状态下的无其他任何降温措施的极端高温高湿环境。

在供试温室内布置 3 个温湿度测点, 2 个光照测点。温湿度测点分别布置在温室长度方向 4 等分截面处, 跨度方向中部, 位于地面上 $1\ 500\text{ mm}$ 高度; 光照测点在温室长度方向 1/2 等分截面处, 跨度方向 3 等分截面处 (两试验保温种植槽中间), 位于地面上 500 mm 高度处 (与试验保温种植槽高度持平)。

1.2.3 基质温度处理

因番茄根部为须根, 故选取距基质表面 50 mm (离保温种植槽底部 80 mm , 即 D8) 深度的温度为标准作为根区温度参考温度 (简称根区核心温度)。利用上文所述控制原理对试验组基质进行温度控制。由于试验期间基质处于几乎是密闭状态的保温种植槽中, 故除植物吸收外, 基质蒸发相对较少, 故 $3\sim 4\text{ d}$ 进行 1 次浇水, 分别于浇水 (浇水前测量) 当天和第 2 天 $07:00$ 测量基质湿度。

将安捷伦传感器探头埋于保温槽内待测温度基质层深度, 即测量分别距槽底 0 (D0)、 40 (D4)、 80 (D8)、 120 mm (D12, 基质表层) 的基质温度 (见图 2b)。基质湿度测点为保温种植槽纵向三等分截面, 横向及竖向二等分截面处。对照组测点位置与试验组相同。

1.2.4 植株管理

番茄幼苗 (金棚 14-6, 西安金鹏种苗有限公司) 于 7 月 6 日移栽入试验槽中, 选取长势相近的 24 棵番茄苗分别栽种试验组与对照组的保温种植槽中, 每组 12 棵, 除对试验组降温外, 所有植株统一进行常规田间管理。

1.3 数据处理

本文试验数据采用 Origin、SPASS22.0 以及 Excel 进行数据分析及二维图表的制作。

2 结果与分析

2.1 室内外光照强度、湿度对比分析

图 3 分别为 3 种典型天气下当日 $00:00\sim 24:00$ 间的室、内外光照及温湿度变化曲线。由图 3 所示, 3 种典型天气状况下, 室内外光照及温湿度变化曲线在 $06:00\sim 20:00$ 期间总体呈现为抛物线型, 其余时段变化较为平缓。晴天曲线较平滑, 阴天和雨天气曲线波动相对较多。

典型晴天的室内外光照强度、湿度对比分析如图 3a 所示。室内、外光强从 $06:30$ 开始剧烈升高, 在 $12:20$ 达到当日峰值分别为 $41\ 266$ 、 $69\ 078\text{ lux}$, 至 $20:00$ 时光强降至平稳。湿度均从 $06:30$ 开始下降, 且室外湿度降低幅度大于室内, 室内、外湿度分别在 $13:10$ 和 $17:00$ 时达到最低点 27% 、 38% ; $09:00\sim 17:00$ 室外湿度始终高于室内, $17:00$ 后室内、外湿度开始增加, 室内湿度增加速率明显高于室外, 产生明显差异。

典型阴天的室内外光照强度、湿度对比分析如图 3b 所示。室内、外光强从 $06:30$ 开始剧烈升高, 在 $12:50$ 均达到当日峰值分别为 $40\ 898$ 、 $76\ 092\text{ lux}$, 至 $20:00$ 时光强降至平稳。湿度均从 $06:30$ 开始下降, 分别在 $13:30$ 和 $15:00$ 时达到最低点 27.3% 、 44.0% , $08:30\sim 17:30$ 室内湿度明显低于室外湿度, $17:30$ 后室内湿度开始高于室外, 且差距逐渐增大。

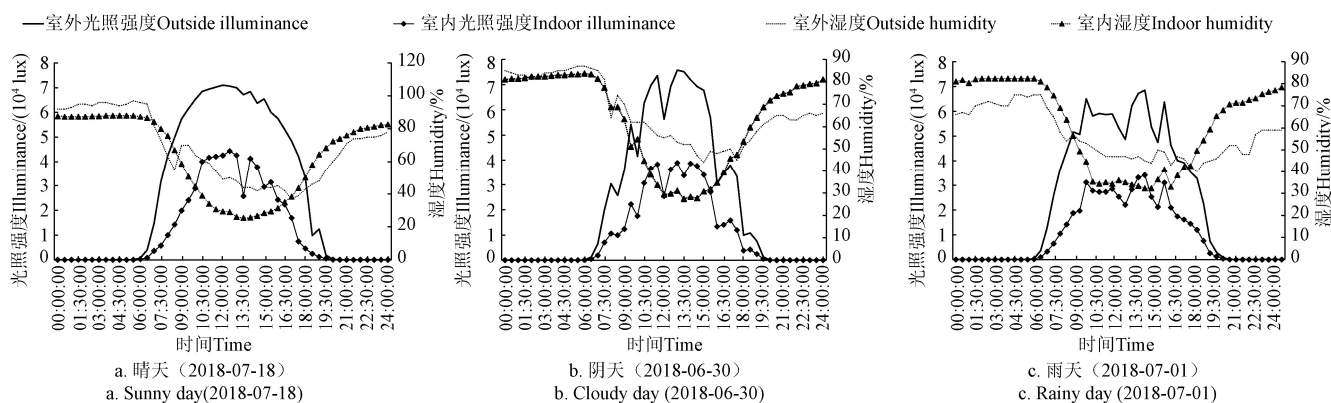


图 3 不同天气光照强度和湿度变化

Fig.3 Changes in illuminance and humidity in different weather conditions

典型雨天的室内外光照强度、湿度对比分析如图 3c 所示。室内、外光强从 06:30 剧烈升高, 在 14:10 达到当日峰值分别为 34 073、68 532 lux, 降至 20:00 曲线均变为平稳; 09:00—16:00 有较明显波动。湿度均从 06:30 开始下降, 分别在 14:10 和 17:30 时达到最低点 32.3%、40.0%。

2.2 不同深度基质温度的对比分析

试验中基质始终处于相对密闭的保温种植槽中, 蒸发量较小; 且其湿度的维持是为了准确保持基质的储热能力和维持番茄正常生长的土壤含水率, 故将试验组和对照组基质水分含量始终控制在同一水平。相对于基质温度的变化, 湿度变化相对较小, 因此湿度单独测量、不做比较分析, 将其始终控制在 62% 左右。

图 4 为 3 种典型天气下的不同深度基质温度及室内、外温度的变化曲线图。由图 4 可以看出, 在 06:00—19:00 之间室内外温度呈近似抛物线形状, 室内峰值及变化幅度显著高于室外, 且 3 d 中每天的 24 h 内的室内温度始终高于室外温度。

2.2.1 典型晴天

由图 4a 可以得出, 典型晴天的室内、外最高温度分别为 66.10、43.25 °C。当日 15:00 时, 试验组 D8 处温度到达 30.85 °C, 此时进行当日第 1 次降温, 持续运行 1 h 至 16:00 时 D8 处温度降至 26.93 °C, 压缩机停止后持续降温 30 min 后为 25.04 °C, 降温时段降了 3.92 °C, 总共降低 5.81 °C; 试验组 D0 及 D4 处温度曲线呈直线急剧下降, 降温结束后 30 min 内温度持续降低但不明显, 16:30 后温度开始逐渐回升。19:00 进行第 2 次降温, 持续 1 h, 第 2 次降温: 试验组 D8 温度从 26.23 °C 降至 20:00 的 21.94 °C, 降低了 4.29 °C, 后持续降至最低 20.89 °C 共降低 5.34 °C, 次日 03:00 时温度缓慢回升至 24.23 °C。试验组 D0、D4 虽起始温度不同但与 15:00 的降温部分曲线同样呈直线下降, 20:00 时降温结束后温度持续下降 30 min 后开始回升, 但回升速率明显低于降温速率, 23:00 后温度回升曲线趋于平缓。故试验组 D8 处温度变化趋势与 D0、D4 相同, 但温度变化幅度更小且曲线更平缓; D12 处从第一次降温开始一直呈缓慢下降趋势, 22:00 开始趋于平稳。与试验组相比, 对照组各深度基质温度均未有明显变化, 且不同深度温度差别不大且全部高于试验组所有深度处的基质温度, 且始终高于 30 °C。而对照组在 00:00—10:00 期间温度曲线始终呈小幅度下降, 而后开始缓慢上升至 18:30 后再度缓慢下降, 不同深度基质温度仅在 09:00—19:00 之间有较为明显差别。

试验组和对照组 24 h 内 D8 处最高温度分别为 31.9 和 36.7 °C, 最低温度分别为 21.4 和 30.5 °C, 且试验组 D8 处 24 h 间未超过 33 °C, 夜间几乎始终处于最适温度, 而对照组所有深度温度曲线均处于试验组之上, 且高于 30 °C。

2.2.2 典型阴天

由图 4b 可以得出, 典型阴天的室内、外最高温度分别为 64.20、38.40 °C, 仅在 19:00 进行了 1 次降温。试验

组各不同深度处的温度曲线在 00:00—15:00 之间的变化趋势及温度与 7 月 18 日相似; 15:00 后除 D12 曲线有小幅度升高又下降的趋势外, 其他各深度曲线仍逐渐上升且数值较为接近。

19:00 开始降温后试验组 D8 处从 19:00 的 30.70 °C 至 20:00 的 25.43 °C, 降低了 5.27 °C, 至最低点 23.23 °C 共降低 7.47 °C, 而后温度极缓慢回升至次日 03:00 为 25.13 °C。试验组 D0 和 D4 处温度直线下降, 20:00 时降温结束后 30 min 内温度没有太大改变, 然后温度呈对数曲线逐渐升高, 23:00 后曲线趋于平缓。试验组 D0、D4 与 D8 处温度变化趋势大致相同, 但温度变化幅度更小且曲线更平缓; D12 处始终呈缓慢下降趋势, 22:00 开始趋于平稳。

试验组和对照组 24 h 内 D8 处最高温度分别为 30.70 和 38.03 °C, 最低温度分别为 22.03 °C 和 31.93 °C。且试验组 D8 处温度在 24 h 内始终符合试验要求而对照组温度过高。

2.2.3 典型雨天

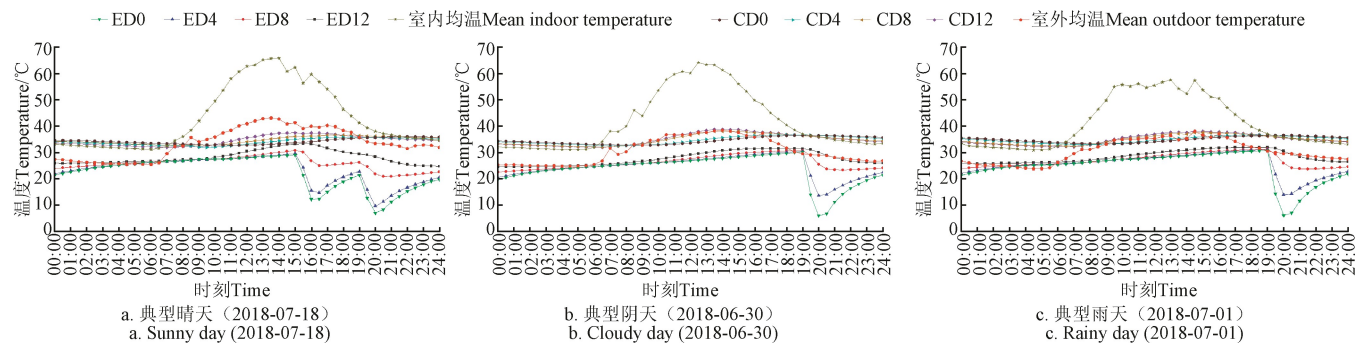
典型雨天仅在 19:00 进行了 1 次降温, 各温度变化如图 4c 所示, 当日最高室内、外温度分别为 57.58、38.10 °C。整体试验组和对照组温度变化曲线均与阴天差别不大。试验组 D8 处从 19:00 的 31.37 °C 降到 20:00 的 25.97 °C, 降低了 5.40 °C; 停止后持续降温至最低点 23.80 °C 共降低 7.57 °C, 而后的温度回升十分缓慢, 至次日 03:00 为 25.40 °C。对照组所有深度基质温度亦始终高于 30 °C。

试验组和对照组 24 h 内 D8 处最高温度分别为 31.37 和 37.70 °C, 最低温度分别为 23.00 和 32.43 °C。试验组 D8 处温度始终符合试验要求, 对照组温度过高。

2.3 根区温度指标分析

为确保试验数据的可靠性及普遍性, 本文对 3 种典型天气各做了 3 次重复试验, 并记录数据。对 D8 处温度的日最高、最低温度及其日较差(日最高温与最低温之差)和日平均温度分别求平均值, 如图 5 所示。由图 5 可以得出, 3 种天气下, 试验组最大值分别为 31.26、29.92、27.89 °C, 对照组最大值分别为: 37.77、35.68、33.89 °C; 即试验组比对照组分别低 6.51、5.76、6.00 °C。进行降温处理的试验组 3 种天气下 D8 处日最高、最低温度以及日平均温度均明显低于对照组温度, 而日较差明显高于对照。试验组的平均温度维持在 25~26 °C 之间, 稳定程度高于对照组。

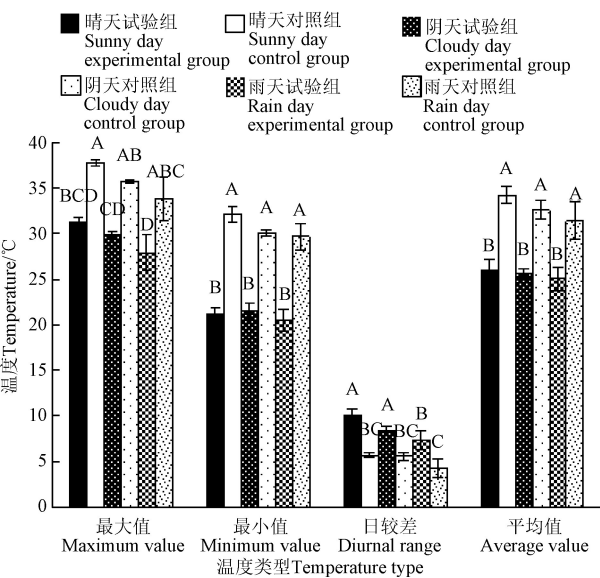
除根区核心温度外, 本文还对基质整体温度进行了分析计算, 为准确反映基质温度分布, 将试验组每相邻 2 个深度测点的平均温度作为该层基质的平均温度, 再对不同层的平均温度 2 次平均得到该组基质的整体平均温度; 对照组计算方法相同。具体各温度值见表 1, 从表 1 中可直观的得到各深度测点测得温度及基质整体的平均温度。故由表 1 得出, 本系统典型晴、阴、雨天降温期间实际将试验组基质的平均温度(典型晴天降温 2 次, 故此处为 2 次的平均值)分别降低了 8.65、11.38、11.47 °C。



注：ED0、ED4、ED8、ED12 分别为试验组 D0、D4、D8、D12 处；CD0、CD4、CD8、CD12 分别为对照组 D0、D4、D8、D12 处。
Note: ED0, ED4, ED8 and ED12 are the positions of experimental group D0, D4, D8, and D12, respectively; CD0, CD4, CD8 and CD12 are the positions of control group D0, D4, D8 and D12, respectively.

图 4 典型天气室内外温度与基质温度的变化曲线

Fig.4 Variation curve of indoor and outdoor temperature and matrix temperature in typical weathers



注：不同字母表示各组间差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Different letters indicate significant different among groups at 0.05 level.

图 5 典型天气根区核心温度 (D8 处) 极值、平均值及日较差
Fig.5 Maximum, minimum, average and diurnal range of temperature in the root core zone (D8) of typical weathers

表 1 典型天气不同时刻下各测点温度降低情况

时刻 Time	降温 Reduced temperature/%	
	试验组 Experimental group	对照组 Control group
2018-07-18 16:00	8.83	-0.20
2018-07-18 20:00	8.42	0.15
2018-06-30 20:00	11.66	0.28
2018-07-01 20:00	17.85	0.37

2.4 试验番茄生长状态分析

2.4.1 植株热场分布及分析

图 6a 为从植株顶端的热象俯视图，表现了植株的热场分布情况。由图可知，进行降温处理后的试验组植株根部温度最低，由根部向上温度逐渐升高；而未降温的对照组植株整株均呈现相对高温状态。

图 6b 为分别在试验组及对照组随机选取 3 株植株的热象主视图，由图可以看出试验组的保温种植槽内温度较低，植株底部茎秆温度也相对较低；对照组槽内温度较高，且植株整体温度较高。

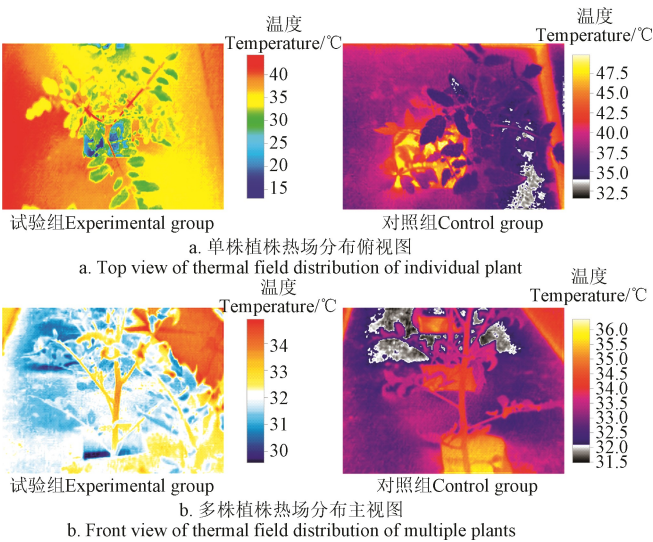


图 6 植株热场分布图

Fig.6 Thermal field distibution of plants

2.4.2 植株生理含水量分析

7 月 22 日，对照组番茄植株全部死亡，试验组植株全部存活。在试验组与对照组各取一株该组别内最壮的苗进行对比，并分别对其根、茎、叶的干、鲜质量及含水率进行了对比，得到结果如下表 2。

表 2 不同根温处理下植株各部分含水率

组别 Group	根 Root			茎 Stem			叶 Leaf		
	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	含水率 Water content	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	含水率 Water content	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	含水率 Water content
	/g	/g	%	/g	/g	%	/g	/g	%
E	2.35	0.54	77.02	22.81	2.29	89.96	28.43	5.12	81.99
C	0.46	0.14	69.57	1.69	1.04	38.46	2.86	2.34	18.18

注：E 为试验组；C 为对照组。
Note: E represents experimental group; C represents control group.

试验中所有植株在试验开始时生长状况相同。由表2得出, 在试验进行一段时间后, 对照组植株根、茎、叶部分的鲜质量均远低于试验组; 对照组根部含水量略低于试验组, 而茎、叶部分含水量均远低于试验组。由表观亦可明确判定对照组植株已完全死亡, 而试验组植株仍具有生命活力。由此得出, 经过根部降温处理的植株的根、茎、叶的生长情况明显优于对照组。

2.5 能耗分析

试验采用的多晶硅光伏板单块峰值功率为 275 W, 试验总共用 8 块多晶硅光伏板, 装机功率 2 200 W。蓄电池参数为 12 V 400 Ah; 试验用直流压缩机额定功率为 930 W, 能效比 2.68; 直流风机功率 115 W; 直流水泵功率 180 W。经测量: 每个槽中基质总质量为 210 kg, 经测得平均含水率为 56%, 基质比热容为 2 649.70 J/(kg·K), 每次工作时间 1 h。相关能量计算方程为 (计算中温度数据以 7 月 18 日第 1 次降温为例):

$$E_1 = c \cdot m \cdot (\Delta T_1 - \Delta T_2) \quad (1)$$

$$E_2 = 3.6 \times 10^6 \frac{P_{\text{压}}}{10^3} \cdot \text{cop} \cdot t \quad (2)$$

$$E_3 = 3.6 \times 10^6 \frac{(P_{\text{压}} + P_{\text{风机}} + P_{\text{水泵}})}{10^3} \cdot t \quad (3)$$

式中 E_1 为保温种植槽中基质每次降温所需能量, J; E_2 为压缩机输出的能量, J; E_3 为每次降温所有机械总耗能, J; c 为基质实测比热容, J/(kg·K); m 为基质总质量, kg; ΔT_1 和 ΔT_2 分别为试验组和对照组降温时段分层后槽内基质平均温差, °C; 其中, $\Delta T_1 = T_a - T_b$ ($T_a = 30.59$ °C, $T_b = 21.76$ °C), T_a 、 T_b 分别为试验组降温时段分层后槽内基质降温开始时刻的平均温度、降温结束时刻的平均温度, °C; $\Delta T_2 = T_c - T_d$ ($T_c = 35.67$ °C, $T_d = 35.87$ °C), T_c 、 T_d 分别为对照组降温时段分层后槽内基质降温开始时刻的平均温度、降温结束时刻的平均温度, °C; $P_{\text{压}}$ 为直流压缩机输出功率, W; cop 为能效比; t 为直流压缩机工作时间, h; $P_{\text{风机}}$ 为直流风机功率, W; $P_{\text{水泵}}$ 为直流水泵功率, W。

经计算得出 E_1 、 E_2 、 E_3 分别为 5.03×10^6 、 8.97×10^6 、 4.41×10^6 J。将生态智能种植基质控温系统消耗能量转化为基质冷量的效率 (E_1 与 E_2 的比值) 为 0.56。

Qiu 等^[31]对西北地区日光温室短季节栽培番茄高产种植密度研究结果显示, 适宜的番茄种植密度为 4.4~5.6 株/m², 故以 5 株/m² 计算, 本试验以每组 12 株番茄计算, 经计算, 保温种植槽单位面积的制冷功率为 510.42 W/m², 基质平均温度降低 9.03 °C。

用于基质冷却的冷量初期贮藏于相变材料箱中的相变材料中, 且一般可对全部相变材料制冷存入冷量, 以便及时取用。为防止冷量损失等情况的产生, 也为了使之适用于类似文中典型晴天的需对根区进行 2 次降温的情况, 本次使用相变材料质量较大, 确保了储存冷量大于 1 次制冷过程基质所需冷量。

储存于相变材料中的冷量 $E_{\text{蓄冷1}}$ 可用式 (4) 说明:

$$E_{\text{蓄冷1}} = Q_{\text{吸}} \cdot m_1 \quad (4)$$

式中 $Q_{\text{吸}}$ 为储存于相变材料中的相变材料的吸冷量, J, 实际取值为 148.30 J/g; m_1 为实际应用相变材料总质量, 实际取值为 110.30 kg。经计算得出 $E_{\text{蓄冷1}} = 16.36 \times 10^6$ J, 远大于每次降温所有机械总耗能 E_3 , 故在各种天气状况下, 所用相变材料均可放出足够的冷量保障系统运行。

3 讨 论

在本试验条件下, 未进行降温处理的番茄植株仅存活了 17 d, 而在第 17 天时, 根部进行降温处理过的植株长势良好, 仅少部分顶端叶片有高温灼伤, 叶片略卷曲, 茎部及根部未呈现出明显影响, 且后期试验组植株均正常开花结果。

王吉庆等^[15]的研究指出当单位温室面积实际制冷功率为 157.50 W/m² 时, 温室内平均温度较室外降低 1 °C, 且当降温设备停止运行后无法长时间保持已有制冷效果, 而且在其研究中未对番茄实际生产效果进行论述, 实际效果不得而知。而本生态智能种植基质控温系统中, 保温种植槽单位面积的制冷功率为 510.42 W/m², 基质平均温度降低 9.03 °C, 且夏季高温晴天共 2 h 降温处理, 其他天气仅需 1 h 降温, 当天内其他时段无需其他处理即可保持基质温度处于适宜作物生长范围。即本试验使用 8 块 275 W 的光伏板控制了 210 kg 的基质温度; 且试验期间停止降温后可持续保证降温效果, 所栽植番茄成功越夏并开花结果。本试验各部分能量均有一定富余量, 故实际中或可达到更好的使用效果, 更加节能。

该能耗远远小于对整个温室空气进行降温所需能耗, 同时也实现了在高温高湿环境下的温室精准控温。而且相较于其他基质降温方式本试验系统采用以光伏为电力能源驱动制冷设备的方式, 大大提高了该系统的绿色节能性能; 系统相变材料的使用及保温种植槽的构建, 均使本系统蓄冷能力较高, 而且在实践生产中能够进行离网运行, 提高了系统在分散分布温室中运用的经济性和可靠性。

为模拟系统在极端状态下的有效性和可靠性, 本试验采用了极限状态的设计方法, 即试验系统在相对极端状态下的性能, 进而保障系统在非极端情况下的可靠性和节能性。因此当系统在高温状态时能够将根区温度控制到适合温度范围, 在实际生产条件下系统可以消耗更少的能耗就能实现控制根区温度的目的。但仅对番茄苗期的根区低能耗控温下安全越夏的相关内容进行了研究, 对于结合通风、遮阳和其他调节改善温室内部环境措施的温室环境下进行根部温度控制的夏季降温及冬季升温效果以及多因子耦合的根区温度处理效果有待进一步的研究。由于项目地选择的不同, 环境条件不同, 本系统可根据实际情况改变相变材料种类和用量。

4 结 论

1) 本生态智能控温系统有效地实现了在温室高温工况下的植栽根区温度的控制。在晴、阴、雨天各取连续 3 d, 试验组根区 (D8 处) 平均最高温度分别为 31.26、29.92、

27.89 °C；比对照组分别低 6.51、5.76、6.00 °C。在典型晴、阴、雨天，室内最高温度分别为 66.10、64.20、57.58 °C 的工况下，与对照组温度变化相比，该系统降温期间实际将试验组基质的平均温度分别降低了 8.65、11.38、11.47 °C。

2) 本生态智能控温系统确保了试验番茄在极端高温的工况下，正常生长和开花结果。通过试验对比分析，仅通过根部温度控制装置对番茄根部进行降温的方法对番茄成功越夏产生了极明显的效果。生长状况相同的植株，在试验进行 17 d 时，试验组与对照组的根、茎、叶的鲜质量产生了较大的差异，且从外观、热像图的分析均可得出对照组植株已经死亡；而试验组长势良好并最终正常开花结果。

3) 本生态智能控温系统实现了低能耗温室制冷。在本试验工况下，温室番茄安全抗高温每天运行 1 h 需 4.41×10^6 J 能量，保温种植槽单位面积的制冷功率为 510.42 W/m²，基质平均温度降低 9.03 °C。

[参 考 文 献]

- [1] 瞿剑. 中国设施园艺面积世界第一[N]. 科技日报, 2017-08-22[2019-05-06].
- [2] Li Yongxin, Li Baoming, Wang Chaoyuan, et al. Effects of shading and roof sprinkling in venlo-type greenhouse in summer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(5): 127–130.
李永欣, 李保明, 王朝元, 等. Venlo 型温室外遮阳和屋顶喷淋系统夏季降温效果(英文)[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 127–130. (in English with Chinese abstract)
- [3] Mutwiwa U N, Elsner B V, Tantau J H, et al. Cooling naturally ventilated greenhouses in the tropics by near-infrared reflection[J]. Acta Horticulturae, 2007, 801: 259–266.
- [4] Li Angui, Huang Lin, Zhang Tongfeng. Field test and analysis of microclimate in naturally ventilated single-sloped greenhouses[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 479–489.
- [5] Fuchs M, Dayan E, Presnov E. Evaporative cooling of a ventilated greenhouse rose crop[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2006, 138: 203–215.
- [6] García M L, Medrano E, Sánchez-Guerrero M C, et al. Climatic effects of two cooling systems in greenhouses in the Mediterranean area: External mobile shading and fog system[J]. Biosystems Engineering, 2011, 108(2): 133–143.
- [7] López A, Valera D L, Molina-aiz F D, et al. Sonic anemometry to evaluate airflow characteristics and temperature distribution in empty Mediterranean greenhouses equipped with pad-fan and fog systems[J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(4): 334–350.
- [8] Katsoulas N, Savvas D, Tsirogiannis I, et al. Response of an eggplant crop grown under Mediterranean summer conditions to greenhouse fog cooling[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 123(1): 90–98.
- [9] Perdignes A, García J L, Romero A, et al. Cooling strategies for greenhouses in summer: Control of fogging by pulse width modulation[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(4): 573–586.
- [10] Villarreal-Guerrero F, Kacira M, Fitz-Rodríguez E, et al. Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 134(2): 210–221.
- [11] Shukla A, Tiwari G N, Sodha M S. Experimental study of effect of an inner thermal curtain in evaporative cooling system of a cascade greenhouse[J]. Solar Energy, 2008, 82(1): 61–72.
- [12] Kittas C, Katsoulas N, Bartzanas T. Characterization and analysis of the effects of greenhouse climate control equipment on greenhouse microclimate and crop response[J]. Acta Horticulturae, 2011, 893(12): 117–132.
- [13] Issam M, Ali A, Ahind D R. Enhancement of evaporative cooling system in a greenhouse using geothermal energy[J]. Renewable Energy, 2017, 111: 321–331.
- [14] Sethi V P, Sharma S K. Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications[J]. Solar Energy, 2007, 81(12): 1447–1459.
- [15] 王吉庆, 张百良. 几种降温措施在温室夏季降温中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 257–260.
Wang Jiqing, Zhang Bailiang. Application of some cooling measures for greenhouse cooling in summer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(9): 257–260. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙维拓, 张义, 杨其长, 等. 基于水源热泵的日光温室夏季夜间降温试验[J]. 农业现代化研究, 2017, 38(5): 885–892.
Sun Weituo, Zhang Yi, Yang Qichang, et al. Nighttime cooling of solar greenhouse in summer based on water source heat pump system[J]. Research of Agricultural Modernization, 2017, 38(5): 885–892. (in Chinese with English abstract)
- [17] Mongkon S, Thepa S, Namprakai P, et al. Cooling performance assessment of horizontal earth tube system and effect on planting in tropical greenhouse[J]. Energy Conversion & Management, 2014, 78: 225–236.
- [18] Yildiz A, Ozgener O, Ozgener L. Energetic performance analysis of a solar photovoltaic cell(PV) assisted closed loop earth-to-air heat exchanger for solar greenhouse cooling: An experimental study for low energy architecture in Aegean Region[J]. Renewable Energy, 2012, 44: 281–287.
- [19] 余敏. 日光温室土壤—空气换热系统的对比试验与整场解[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
Yu Min. The Experimental Comparison Study and Whole-field Simulation on Sunlight Greenhouse with Earth to Air Heat Exchange System[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [20] 周长吉. 中国日光温室结构的改良与创新(二): 基于主动储放热理论的墙体改良与创新[J]. 中国蔬菜, 2018(3): 1–8.
- [21] Xue J. Photovoltaic agriculture-new opportunity for photovoltaic applications in China[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1–9.
- [22] 严芳芳, 张曙光, 索雪松, 等. 农业大棚太阳能供电数据采集系统设计[J]. 农机化研究, 2013, 35(5): 103–106.
Yan Fangfang, Zhang Shuguang, Suo Xuesong, et al. The design of solar-powered agricultural greenhouse nodes' data acquisition system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(5): 103–106. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王立舒, 徐子哲, 贾棋然, 等. 农业温室太阳能供电系统最大功率点跟踪算法设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 234–240.
Wang Lishu, Xu Zizhe, Jia Qiran, et al. MPPT algorithm design of agricultural greenhouse solar power supply system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 234–240. (in Chinese with English abstract)
- [24] 尚超, 马长莲, 孙维拓, 等. 我国光伏设施园艺发展现状及趋势[J]. 农业工程, 2017, 7(6): 52–56.
Shang Chao, Ma Changlian, Sun Weituo, et al. Development status and trends of photovoltaic facilities horticulture in China[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(6): 52–56. (in Chinese with English abstract)

- [25] 邱镇辉, 王琳基. 绿色能源在温室中应用的展望[J]. 福建农机, 2009(3): 49—51.
- [26] 王安琪, 孟多, 赵康, 等. 相变材料在建筑围护结构及建筑设备中的节能应用[J]. 能源与节能, 2019(5): 64—68. Wang Anqi, Meng Duo, Zhao Kang, et al. Energy-saving application of phase change material in building enclosure structure and building equipment[J]. Energy and Energy Conservation, 2019(5): 64—68. (in Chinese with English abstract)
- [27] 赵子征, 彭高军, 辛本胜. 夏季日光温室环境条件分析[J]. 北方园艺, 2005(4): 20—21.
- [28] 张勇. 一种主动调控土壤空气温湿度度的温室 ZL201621050351.4[P]. 2017-04-05.
- [29] 张洁, 邹志荣, 张勇, 等. 新型砾石蓄热墙体日光温室性能初探[J]. 北方园艺, 2016(2): 46—50. Zhang Jie, Zou Zhirong, Zhang Yong, et al. Performance of heating storage gravel wall solar greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2016(2): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张勇, 邹志荣. 一种装配式日光温室太阳能自主蓄放热后墙 ZL 201320595948.7[P]. 2014-04-09.
- [31] Qiu R J, Song J J, Du T S, et al. Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 130: 44—51.

Cooling performance for tomato root zone with intelligent ecological planting matrix temperature control system driven by photovoltaic in greenhouse

Zhang Yong, Ni Xinyu, Zhang Kexin, Xu Yingjie

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

Abstract: Short-term or continuous high-temperature conditions usually occur during summer greenhouse production. However, the existing cooling measures either fail to achieve effective cooling effects or consume excessive energy. In order to better realize the annual output of the greenhouse, this study used an ecological intelligent planting matrix temperature control system to cool more efficiently in the summer. The system combined control strategies with ecological intelligence to study the safe production of tomato under high temperature conditions. It was driven by photovoltaics, and the excess power was stored in the battery to maintain the system's operation under adverse weather. The system controlled the temperature of the plant root zone not over 33 °C during the day and around 22 °C at night. When the system needed to cool down, the DC water pump in the water tank was turned on to drive the water to cool the root zone of the plant through the pipes in the thermal planting groove of the experimental group, and at the same time, the heat exchange with the phase change material was realized by the heat exchanger in the water tank. The matrix temperature at different depths of the substrate in experimental group and control group was compared to evaluate cooling performance of the system. The results showed that it was necessary to cool down twice to reach the appropriate temperature, and it took one hour each time on sunny day in the summer. It took only one time to cool down on cloudy or rainy day. Compared with the control group under the experimental conditions, the average matrix temperatures of experimental group were reduced by 8.65, 11.38, 11.47 °C respectively on sunny (2018-07-18), cloudy (2018-06-30) and rainy (2018-07-01) days. The data of the average temperature of the three weathers were calculated by taking the data of sunny, cloudy and rainy days for three consecutive days. The average maximum temperatures at the D8 of the experimental group were 31.26, 29.92, and 27.89 °C, respectively, which were 6.51, 5.76, and 6.0 °C lower than the control group. The root zone temperature of tomato in experimental group was always lower than the highest tolerance temperature (33 °C) of tomato root during the day, and kept the optimum temperature (20-23 °C) throughout the night. All tomato plants in the control group died on the 17th day of the experiment, while plants in the experimental group still grew well and after that they even blossomed and bore fruit. Under this test condition, it took 4.41×10^6 J energy to run the system at a time, and the cooling power per unit area of the thermal planting groove was 510.42 W/m², as the average matrix temperature was reduced by 9.03 °C. It was far less than the energy consumption required for cooling the entire greenhouse air, and it could meet the high demand for precise temperature control of greenhouses in humid and high-temperature environments. In conclusion, in the case of ultra-low energy consumption, the temperature control method of the ecological intelligent planting matrix temperature control system could be used to solve the problems of high temperature tolerance and safe production of greenhouse tomato planting.

Keywords: photovoltaic; greenhouse; ecological intelligence; root temperature; phase change materials (PCM); summer