

日光温室根区热环境相变调控系统设计及性能试验

王宇欣 刘爽 王平智 时光莹

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为探索一种节能高效的日光温室热环境调控模式,以鞍Ⅱ型日光温室为原型制作试验温室模型并设计了相配套的日光温室根区热环境相变调控系统,包括相变集热单元、潜热储存与交换单元、根温调节单元、循环泵组和循环管路5部分,并制定出系统热性能测试方案。通过对比试验,研究系统在单路循环模式下运行对日光温室模型室内空气、栽培基质不同深度温度的调节效果,以及对温室模型中紫叶生菜幼苗生长指标的影响。结果表明,冬季运行条件下,系统可以有效蓄积太阳辐射热,实现日光温室的高效能量收集和热环境调控,减少室内空气温度波动,提高基质根区温度。典型晴天天气测试时,试验温室20 cm深度处基质平均温度均高于对照温室。此外,与对照温室相比较,试验温室中生菜幼苗的株高、茎粗、单株叶面积、最大叶宽可分别提高13.4%、11.9%、79.1%、35.3%,表明试验温室热环境更利于紫叶生菜幼苗的生长。

关键词: 日光温室; 根区; 热环境; 相变集热; 调控系统

中图分类号: S214 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0294-11

Application Effect of Greenhouse Root Zone Thermal Environment Control System with Latent Functionally Thermal Fluid

Wang Yuxin Liu Shuang Wang Pingzhi Shi Guangying

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore an energy-efficient thermal environment control model in greenhouse, the application of thermal environment phase change control system was studied in solar greenhouse. A solar greenhouse root zone thermal environment control system was designed and built, including the phase change thermal unit, latent heat storage and exchange unit, root temperature control unit, circulation pump group and circulation pipeline. The latent functionally thermal fluid was used as liquid heat transferring medium in the heat collection, delivery and release of solar radiation. The system included three different work modes, and the thermal performance testing project was formulated. In winter of 2014, the operation performance of the designed system and application effect on lettuce seedlings were tested through controlled experiment of three different operation conditions, using two greenhouse models with the same construction and root zone thermal environment control system. The results indicated that the designed system significantly reduced the indoor air and shallow substrate temperature fluctuations in experimental greenhouse model, and significantly lowered the everyday highest indoor temperature and obviously increased root zone temperature of root zone substrates in winter, thus improving balance of temperature distribution among substrate layers with different depths. During the whole winter test process, the everyday highest indoor air temperature and the average fluctuation range of air temperature were averagely decreased by 7.2% and 5.1%, respectively, and the average 20 cm depth root zone temperature and the average fluctuation range were increased by 15.1% and 39.0%, respectively. Among the three operation stages, system performances of the stage with flow rate of 3~4 L/min was the

收稿日期: 2016-04-10 修回日期: 2016-05-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B020107)和北京市自然科学基金项目(3132026)

作者简介: 王宇欣(1967—),男,副教授,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: meller@163.com

optimum one, with the most obvious increases of average temperature and average fluctuation range of 20 cm deep substrate, as well as the most significant rise in reduction percentages of temperature differences between 5 cm deep and 20 cm deep substrates. In addition, the plant height, stem diameter, leaf area per plant and width of maximum leaf of lettuce seedlings in the model were increased by 13.4%, 11.9%, 79.1% and 35.3%, respectively. Overall, the effect of the system was remarkable in sunny days. In conclusion, the phase change heat collecting system can effectively control the air the root zone thermal environment in greenhouse and promote seedling growth of vegetables.

Key words: solar greenhouse; root zone; thermal environment; phase change thermal energy storage; regulatory system

引言

我国设施蔬菜栽培面积逐年扩大,其中日光温室约占 20%,主要分布在北方^[1],但普遍存在冬季夜间室内气温、地温偏低的现象。调查发现,北方现有大部分温室冬季室内气温、地温仍难以达到蔬菜生产要求,只适宜一些耐寒、半耐寒类蔬菜的生长^[2]。开发一种根温调控系统,调节低温环境下作物生长期内的根区温度,改善日光温室蔬菜生产的根区热环境,将有助于根系的正常生命活动,从而促进蔬菜作物生长。目前设施农业生产中常见的加温系统仍以化石燃料等非可再生资源消耗为主,加温能耗占总运行成本的比重大,是影响温室生产效益的直接因素^[3],因此,开发高效节能的温室热环境调控系统非常必要。

现有的日光温室集热系统多以空气或水为载热介质,系统蓄放热效率及增温效果仍有较大改善空间。相变材料作为一种高蓄热密度的潜热蓄放热材料^[4],于 20 世纪 70 年代已开始出现在温室采暖应用中,当时发现将 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 封装于气溶胶罐对温室的蓄热加温效果显著优于岩土材料^[5]。相变储能技术在温室节能领域的研究不断深入和趋于多样化,应用方向仍以太阳能的利用及温湿度调控为主,还有少数关于相变储能对温室光照强度影响^[6]方面的研究。目前相变材料在温室中的应用方式主要有以直接混合^[7-9]、浸渍^[10]、填充^[11-12]等形式与建筑材料结合构建相变储能墙体,或作为蓄热介质应用于独立蓄热装置^[13-15]或蓄放热系统的蓄热单元^[16-17]中等,很少用于直接改善整个集热系统的蓄放热效率。而潜热型功能热流体(LFTF)作为相变材料的一种液态应用形式,可在航空航天器、电子元器件、冷却系统、废热回收系统等领域中实现较好的蓄放热效果^[18]。现有研究中,针对相变微胶囊悬浮液型潜热型功能热流体的实际应用研究仍较少,如 DIACONU 等^[19]研究了质量分数为 45% 的微胶囊悬浮液作为太阳能低温蓄热系统介质的集热性能,将

螺旋盘管浸没在微胶囊乳液中进行自然对流传热,结果表明微胶囊悬浮液的对流换热系数显著高于相同条件下的水媒对流换热系数。

本文在现有研究基础上^[20-21],设计一种日光温室根区热环境相变调控系统,以潜热型功能热流体为传热工质,利用潜热型功能热流体的相变蓄热与强化对流传热收集白天的太阳辐射热,用于调节温室内作物根区温度,进行日光温室的冬季夜间增温,并制定相应的系统热环境调控性能测试方案,采用对比试验方法,分析相变调控系统用于日光温室冬季热环境调控的可行性。

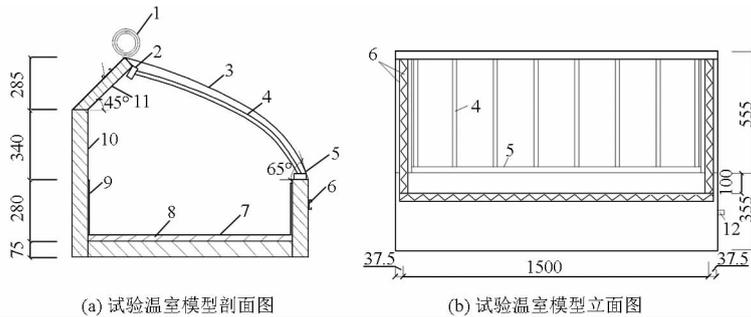
1 日光温室根区热环境相变调控系统

1.1 试验温室模型概况

试验搭建 2 栋材料、结构、尺寸完全相同的日光温室模型,安装完全相同的根区热环境相变调控系统,分别作为试验温室和对照温室。所设计搭建的日光温室模型尺寸及结构如图 1 所示。

以鞍 II 型日光温室为原型,按剖面尺寸约 7:1 同比例缩小设计搭建试验温室模型,模型长度 1.575 m,宽度 1.150 m,跨度 1.000 m,总高度 0.980 m,脊高度 0.625 m,后墙高度 0.340 m,后屋面仰角约 45°,前屋面底角 65°。覆盖材料包括塑料薄膜和保温被,骨架结构包括前屋面骨架,围护结构包括墙体和底板。

试验温室模型前屋面骨架为可开合式,由间距 20 cm 的弧形 DN15 镀锌圆钢管两端焊接在镀锌矩形管上组成,骨架上端矩形管通过合页固定在模型屋脊处,下端可自由开合。围护墙体和底板均选用厚度 75 mm 的岩棉夹心彩钢板,兼具保温和防火的功能。模型侧墙底角处开有出线孔,用于引出模型内部的热电偶线。模型内部紧靠西墙内壁放置一个长度 1.20 m、宽度 1.00 m、高度 0.25 m 的不锈钢板栽培槽,栽培槽内铺设人工栽培基质模拟日光温室土壤环境。栽培槽底部与模型底板间铺设一层厚度 30 mm 的保温隔热垫层。



(a) 试验温室模型剖面图

(b) 试验温室模型立面图

图1 试验温室模型结构图

Fig. 1 Drawings of solar greenhouse models

1. 保温被 2. 合页 3. 透光覆盖材料 4. 前屋面骨架 5. 可开合自由端(镀锌矩形管) 6. 卡簧卡槽 7. 保温隔热垫层
8. 底板 9. 栽培槽 10. 围护墙体 11. 后坡围护结构 12. 出线孔

1.2 日光温室根区热环境相变调控系统

系统包括相变集热单元、潜热储存与交换单元、根温调节单元、循环泵组和循环管路5个主要部分。相变集热单元沿日光温室模型骨架布置,潜热储存与交换单元置于模型后墙外侧,根温调节单元的散热盘管水平铺设在温室模型底板上,2组循环泵组安装在温室模型外,通过循环管路分别与相变集热单元和根温调节单元相连。

1.2.1 相变集热单元

相变集热单元由高热导率、外径16 mm的无缝紫铜管构成,铜管与屋面骨架的镀锌圆管平行布置,并在上下两端与镀锌圆管骨架固定在一起。铜管内填充潜热型功能热流体作为液态蓄放热介质,利用流体内相变材料的熔融相变过程在温室前屋面处高效蓄积太阳辐射热,用于温室模型内部空间降温或根区加温。

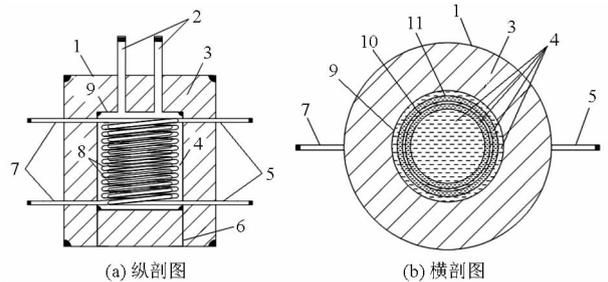
1.2.2 潜热储存与交换单元

潜热储存与交换单元设计成一种外形为圆柱体的潜热蓄热式螺旋管热交换器,结构包括壳体外壁、壳体内胆、岩棉隔热保温层及内外嵌套的螺旋换热盘管4部分,如图2所示。热交换器的壳体外壁高度为70 cm,底面直径为65 cm;壳体内胆高度为40 cm,底面直径为35 cm。内圈螺旋换热铜管中心线直径为25 cm,外圈中心线直径为30 cm。

热交换器的壳体外壁和壳体内胆均由不锈钢板焊接而成。壳体内胆上表面设置2个向上延伸至壳体外壁上表面以外的进出水口,与壳体外壁上表面钢板焊接固定。壳体内胆底板下焊接“ \square ”形内胆支撑,支撑脚固定在壳体外壁的底板内表面。壳体外壁与内胆间填充厚度15 cm的岩棉隔热保温层。

热交换螺旋盘管置于壳体内胆的内腔中,包括内圈螺旋换热铜管和外圈螺旋换热铜管,由无缝紫铜管弯制而成。内、外圈螺旋换热铜管以同一轴线内、外嵌套,内圈螺旋换热铜管的螺旋数为外圈螺旋

换热铜管的1.2~2.0倍。内、外圈换热铜管两端的进出水口均延伸至壳体外壁外。此外,内、外圈螺旋换热铜管腔内填充的潜热型功能热流体采用逆流操作工况。



(a) 纵剖面图

(b) 横剖面图

图2 潜热蓄热式螺旋管热交换器内部结构示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of inner structure of spiral-tube heat exchanger with latent heat storage

1. 壳体外壁 2. 内胆进出水口 3. 岩棉隔热保温层 4. 液态换热介质 5. 内圈铜管进出水口 6. 内胆支撑 7. 外圈铜管进出水口 8. 螺旋换热铜管 9. 壳体内胆 10. 内圈螺旋换热铜管 11. 外圈螺旋换热铜管

1.2.3 根温调节单元

根温调节单元包括根温调节盘管和混水中心。根温调节盘管内流动的液态换热介质既可通过放热进行冬季根区加温,也可通过集热进行夏季根区降温;混水中心可调节根温调节盘管进水端水温,防止供回水温差过大导致栽培基质温度过快上升或下降。根温调节盘管水平铺设并嵌在保温隔热垫层的盘管槽中,采用迂回形布管方式,盘管铺设总长度约5.7 m。混水中心悬挂固定在温室模型侧墙内壁上。

1.2.4 循环泵组

系统设置2组完全相同的循环泵组,每个循环泵组包括3个并联的循环水泵。2个循环泵组分别为集热铜管和根温调节盘管内的液态介质流动提供动力。系统用水泵为同一型号的回流阀型直流水泵,组内3个循环泵具有不同的额定功率及流量,由大到小依次为60 W、5 L/min,30 W、3 L/min,15 W、1.5 L/min。通过3个循环泵的切换可控制管路流

量变化,从而分别实现系统相变集热单元和根温调节单元的不同蓄放热速度。

1.2.5 循环管路

循环管路选用耐高温铝塑复合管。循环管路上连接补水竖管、排水排气竖管和放水龙头,用于更换和补充管道内的液态换热介质。

1.3 系统工作原理

该日光温室根区热环境相变调控系统,基于相变集热原理,以潜热型功能热流体为蓄放热介质,吸收蓄积白天多余的太阳辐射热用于调节室内空气及根区基质温度。如图 3 所示,系统几乎不占用日光

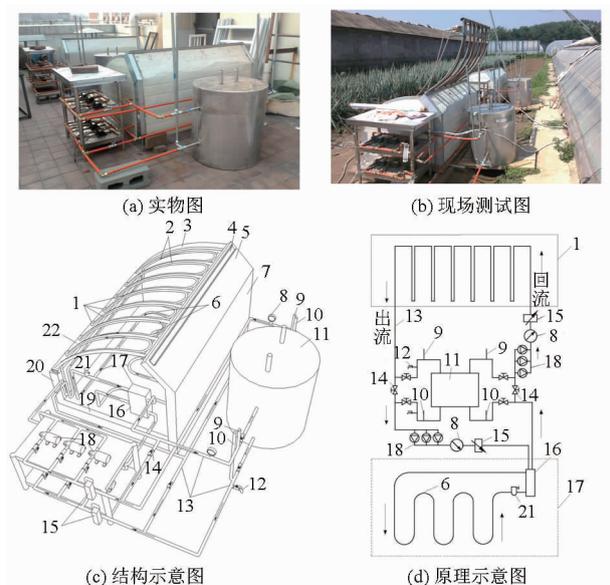


图 3 日光温室根区热环境相变调控系统图

Fig. 3 Schematic diagrams of root zone thermal environment control system

1. 相变集热单元 2. 前屋面骨架 3. 侧墙 4. 卡槽卡簧 5. 后坡 6. 根温调节盘管 7. 后墙 8. 压力表 9. 排水排气竖管
10. 补水竖管 11. 潜热储存与交换单元 12. 放水龙头 13. 循环管路 14. 阀门 15. 流量计 16. 混水中心 17. 根温调节单元
18. 循环泵组 19. 底板 20. 围护墙体 21. 排气阀 22. 镀锌矩形管

温室内部的栽培操作空间,且基本不影响日光温室内部采光,可较大限度利用太阳能。相变集热单元和根温调节单元两者通过循环管路分别连接至潜热储存与交换单元形成双路循环,也可通过球阀切换,不经过潜热储存与交换单元而直接相连形成单路循环。针对不同季节条件,基于太阳能相变蓄热的日光温室热环境调控可通过以下 3 种主要工作模式实现:

(1)“相变集热单元—根温调节单元”热环境调控工作模式为日光温室冬季工作模式。相变集热单元和根温调节单元两者通过循环管路直接相连形成单路循环。白天相变集热单元集热管道吸收照射其上的太阳辐射热并传给蓄热管道内的潜热型功能热

流体,潜热型功能热流体利用其相变蓄热与强化对流传热的特点,将热量输送至根温调节单元,并蓄积在栽培基质中。

(2)“相变集热单元—潜热储存与交换单元—根温调节单元”热环境调控工作模式为冬季工作模式。相变集热单元和根温调节单元均通过循环管路连接至潜热储存与交换单元形成双路循环。白天,相变集热单元将蓄积了太阳辐射热的潜热型功能热流体输送至潜热储存与交换单元,将热量储存在热交换器中。夜间温度降低时,通过循环泵循环,潜热型功能热流体将白天蓄积的热量从热交换器输送至根温调节单元。

(3)“相变集热单元/根温调节单元—潜热储存与交换单元”热环境调控工作模式为夏季工作模式。相变集热单元和根温调节单元分别连接至潜热储存与交换单元形成彼此独立的双路循环。白天,相变集热管道内潜热型功能热流体的不断流动持续蓄积带走太阳辐射热,并通过热交换将热量释放至潜热储存与交换单元。夜间,通过根温调节盘管内潜热型功能热流体的循环流动将基质蓄积的热量输送并释放至潜热储存与交换单元。

2 试验材料与方法

2.1 供试蔬菜

供试蔬菜为苗龄约 30 d 的紫叶生菜幼苗。冬季系统测试试验前,筛选长势接近、生长指标无显著差异的幼苗,将其置于两日光温室模型中进行苗期生长的对比试验,每个模型设置 3 组重复。

2.2 供试相变材料

供试相变材料以潜热型功能热流体的形式注入循环系统的管道中。供试潜热型功能热流体为石蜡/密胺树脂相变微胶囊悬浮液,以质量比 1:1 的乙二醇/水混合液为基液,石蜡/密胺树脂微胶囊为原料,以 15% 的质量分数向基液中添加相变微胶囊颗粒粉末,并均匀混合。单路循环模式下,注满单个模型系统管道所需流体体积约为 7 L。

2.3 试验时间与地点

冬季系统测试试验的时间为 2015 年 1 月 7 日—2 月 16 日,其中,1 月 25 日—1 月 28 日为数据采集调试阶段,1 月 29 日—2 月 16 日为系统运行效果及叶菜育苗效果测试阶段。

试验在中国农业大学通州区试验基地——北京国际都市农业科技园(39.9°N,116.8°E)的露天环境中进行,试验温室模型与对照温室模型均沿东西走向摆放在基地南园 1 号日光温室外、正对温室跨中位置的整平空地上,坐北向南,两温室模型南侧无

遮挡。试验期间模型系统运行所需电力引自1号日光温室内部。

2.4 测试项目与方法

2.4.1 环境数据测量与测点布置

2.4.1.1 数据采集单元

热电偶、数据采集仪和计算机依次连接,组成热环境相变调控系统的数据采集单元。采用铜-康铜“T”型热电偶进行系统模型内的多点温度数据测量。采用安捷伦 Agilent 34970A 型数据采集仪进行温度数据的采集及存储,温度数据采集精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,仪器自身内存可存储约 50 000 个采集数据。本试验所用数据采集仪配备 20 个通道的 34901A 数据采集模块和 40 个通道的 34908A 数据采集模块各 1 个,从 60 个通道中筛选出采集数据误差相对较小的通道连接热电偶进行温度数据采集。测试期间的温度数据采集设置为每 2 min 采集一次。每个温室模型的热电偶线汇成一束,穿过前屋面下墙体上的引线孔,进入 1 号温室内分别连接数据采集仪。

2.4.1.2 测点布置

如图 4 所示,每个温室模型内外共布置 21 个温度测点(太阳直射处测点进行避光处理),分别为:

(1) 室内外气温测点 7 个。其中,模型室内气温测点 6 个,均位于栽培槽上方跨中位置的同一竖直面上。跨度方向距离后墙内表面 25 cm 处垂直分布 3 个测点,分别距基质表面 10 cm (NA1)、25 cm (NA2)、40 cm (NA3);距离后墙 50 cm 处垂直分布 2 个测点,分别距基质表面 10 cm (MA1)、25 cm (MA2);距离后墙 75 cm 分布 1 个测点;距基质表面 10 cm (SA1);室外气温测点 1 个(OA)。

(2) 根区浅层栽培基质温度测点 4 个。垂直分布于栽培槽平面中心点处,分别距离基质上表面 5 cm (S1)、10 cm (S2)、15 cm (S3) 及 20 cm (S4)。

(3) 墙体表面温度测点 6 个。其中,温室模型后墙内、外表面温度测点各 2 个,内表面 2 个测点(ONW)分别与外表面 2 个测点(NW)位于同一位置;西墙内表面温度测点 2 个(WW)。

(4) 前屋面结构温度测点 4 个。其中,透光覆盖材料内表面(IF)、外表面(OF)温度测点各 1 个,两测点位于薄膜内外两侧相对的位置;相变集热铜管管壁温度测点 2 个(P)。

2.4.2 幼苗生长指标测定

冬季试验期内,生菜幼苗自 2 月 3 日测量初始生长指标后移入日光温室模型栽培槽,之后分别于 2 月 7 日、2 月 12 日、2 月 16 日早上从模型中取出浇水并测量生长指标。测定的幼苗生长指标主要包括株高、茎粗、单株叶面积、单株叶片数、单株最大叶

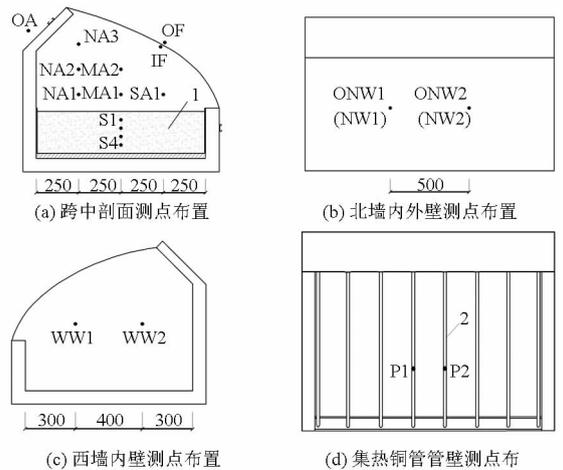


图 4 日光温室模型温度测点布置图

Fig. 4 Layouts of temperature measuring points in greenhouse models

1. 栽培基质 2. 相变集热铜管

长度等。株高用直尺测量,为幼苗子叶着生点下端至幼苗心叶顶端的距离^[22]。茎粗用游标卡尺测量,测点为幼苗子叶着生点下部 0.5 cm^[22]。叶面积测量采用长宽系数法,苗期生菜的单片真叶面积选取散叶生菜叶面积计算公式,即叶长 \times 叶宽 $\times 2/3$ ^[23]。幼苗真叶叶面积之和即单株叶面积^[22]。

2.5 数据处理方法

将两模型各个温度测点在每 10 min 内的 5 个温度数据作为 5 个重复,求取平均值作为该测点每隔 10 min 的温度,并将其用于方差分析。将温室模型同一部位温度测点采集的数据求取平均值作为模型该部分的平均温度分布变化。

采用软件 Microsoft Excel 2003 进行试验数据整理与制图,采用软件 SPSS 19.0 进行对比试验的独立样本 *T* 检验方差分析,在 0.05 水平上进行试验组与对照组数据的差异显著性比较。

系统运行测试开始前,首先对两模型所处位置的室外空气温度及模型各部分初始温度进行对比,分析两模型初始状态下各部分温度是否存在显著差异,以排除试验过程中模型摆放位置及结构差异引起的系统误差。

3 系统运行相关参数

3.1 系统运行初始环境参数对比

试验开始前于 2015 年 2 月 1 日(多云)—2 月 2 日(霾)对两模型各部分静态初始温度进行对比,如表 1 所示。方差分析结果表明,系统运行阶段开始前,两模型室内空气、北墙内壁、西墙内壁等各部分温度均无显著差异,试验过程中可以排除模型结构及摆放位置差异引起的系统误差。

表 1 冬季系统运行前两模型各部分初始平均温度

Tab. 1 Average temperature of different parts in two greenhouse models before system operation

模型	室内空气	北墙内壁	西墙内壁	铜管管壁	膜内表面	浅层基质
试验温室	5.6 ± 11.2	6.0 ± 11.8	5.5 ± 11.4	5.1 ± 11.3	3.2 ± 9.1	2.9 ± 4.0
对照温室	5.2 ± 10.6	5.3 ± 11.2	5.1 ± 10.8	6.0 ± 12.5	2.4 ± 8.8	2.3 ± 3.6

试验开始前,于 2015 年 2 月 1 日至 2 月 2 日对两温室模型的室外气温变化进行对比。如图 5 所示,测试期间,两温室模型的室外气温变化趋势一致。试验温室所处位置室外空气比对照温室所处位置的平均气温低 0.2℃,但独立样本 *T* 检验结果表明,两温室模型所处位置室外气温差异不显著。

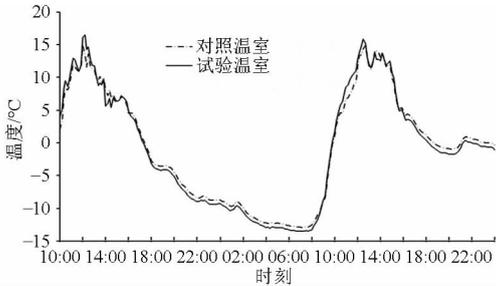


图 5 冬季试验前两温室室外气温对比

Fig. 5 Outdoor air temperature of two models before winter test

两温室模型室内平均气温分布如图 6 所示。约 09:00 掀开保温被,保温被开启前两温室模型室内气温接近室外空气温度,开启后两温室模型室内气温迅速上升。16:30 盖上保温被,两温室模型室内气温缓慢下降,但始终高于室外气温。两温室模型的室内气温变化趋势基本一致,且方差分析结果表明,两温室模型的室内平均气温无显著差异。

3.2 系统运行模式

本试验冬季测试阶段,试验温室的热环境调控系统采用单路循环工作模式,即“相变集热单元—根温调节单元”热环境调控工作模式,对照温室内系统始终处于关闭状态。试验温室通过 3 阶段运行 3 种不同功率的循环泵调节管道内的介质流速,从而对比分析液体流量变化对温室热环境调控效果的影响。试验温室模型的系统管道中注入已制备好的潜热型功能热流体作为相变蓄放热介质,对照温室

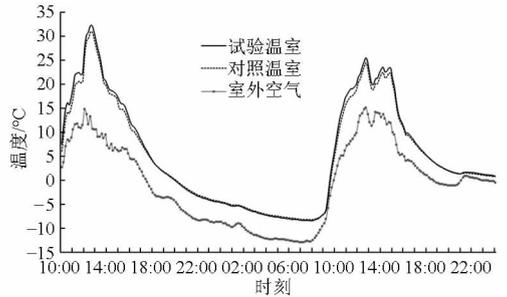


图 6 冬季试验前两温室室内平均气温对比

Fig. 6 Indoor air temperature of two models before winter test

模型系统管道中注入质量比 1:1 的乙二醇/水混合液。试验温室室内气温超过 30℃ 时,循环水泵开启;低于 25℃ 时,循环水泵关闭,室内气温超过 35℃ 时,开启棚膜下角的风口放风,直至室内气温降至 30℃ 时关闭风口。两温室模型的栽培槽中填满相同体积、相同湿度的栽培基质。

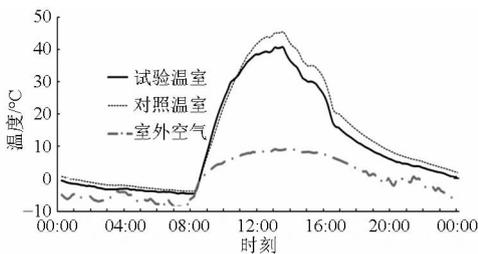
4 结果与分析

4.1 典型晴天条件下系统运行效果

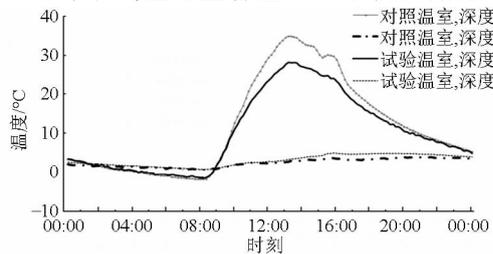
4.1.1 工质流量 1.0 ~ 1.5 L/min 阶段 (15 W 循环泵运行)

选取 2015 年 2 月 5 日(晴天)作为典型日期分析系统运行对试验温室模型中室内空气温度和浅层基质温度变化的影响。两温室模型的室内跨中气温及浅层基质温度对比如图 7 所示。当天的室外最低气温为 -6.1℃,循环水泵开启时刻为 10:20,泵关闭时刻为 16:10,1 d 内系统运行时长为 5.8 h。

方差分析结果表明,同一时刻模型室内 6 个测点的温度无显著差异,故可用跨中气温值比较两温室模型室内气温。如图 7a 所示为 24 h 内两温室模型室内跨中位置 (MA1、MA2) 空气平均温度对比。系统运行前,两温室模型内气温变化趋势一致,它们的跨中气温无显著差异。系统开始运行后,两温室



(a) 两温室模型跨中平均气温对比



(b) 两温室模型浅层基质温度对比

图 7 两温室模型室内空气及浅层基质温度变化曲线 (2015-02-05)

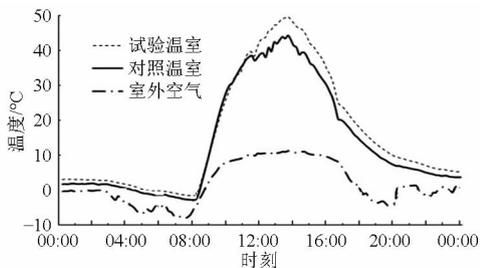
Fig. 7 Changes of air and substrate temperature in two greenhouse models

模型内跨中气温温差逐渐增大,试验温室跨中气温显著低于对照温室。对照温室的跨中空气最高气温为 45.4°C ,最低气温为 -3.8°C ,平均气温 13.2°C 。试验温室在系统运行条件下的跨中最高气温为 40.7°C ,出现在13:30,与对照温室最高温度同时出现,比对照温室低 4.7°C ;最低气温比对照温室低 0.9°C 。

如图7b所示为24 h内两温室模型室内浅层基质温度变化对比,两温室模型中,栽培基质5 cm深度处的温度变化规律与跨中空气温度变化相似,且系统运行条件下试验温室5 cm深度处基质温度白天显著低于对照温室,夜间与对照温室无显著差异。20 cm深度处温度波动幅度明显小于5 cm深度处,由于热量传递在时间上的延迟性,基质温度的峰值阶段出现在下午临近傍晚时分。试验温室内,5 cm深度处基质的最高温度为 28.1°C ,比对照温室低 6.8°C ;凌晨最低温度为 -1.5°C ,比对照温室高 0.4°C ;平均温度为 10.3°C ,比对照低 1.7°C ,即低14.2%。栽培基质20 cm深度处温度全天高于对照温室,最高温度为 5.0°C ,出现在15:50,比对照温室高 1.5°C ;最低温度为 0.7°C ,比对照温室高 0.2°C 。

4.1.2 工质流量 $2.0\sim 2.5\text{ L/min}$ 阶段(30 W循环泵运行)

选取2015年2月11日、12日(晴天)分析系统运行对试验温室模型中室内空气温度和浅层基质温

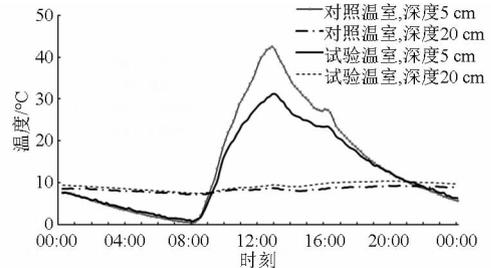


(a) 两模型跨中平均气温对比(02-11)

度变化的影响。两温室模型的室内跨中气温及浅层基质温度对比如图8所示。当天的室外最高气温为 11.1°C ,出现在13:40,最低气温为 -8.3°C ,循环泵开启时刻为10:05,关闭时刻为16:20,1 d内系统运行时长为6.2 h。

如图8a所示,两温室模型跨中气温的整体变化趋势与15 W水泵运行阶段相似,系统运行期间,两温室模型跨中气温温差逐渐增大。试验温室在系统运行条件下的跨中气温最高为 44.4°C ,出现在13:40;最低气温比对照温室低 0.5°C ,平均气温比对照温室低 1.2°C 。24 h内,试验温室模型与对照温室的最大温差为 7.6°C ,出现在14:20。

由图8b可知,系统运行条件下试验温室5 cm深度处基质温度白天显著低于对照温室,夜间则略高于对照温室。20 cm深度处温度波动幅度明显小于5 cm深度处,温度峰值延迟,出现在下午临近傍晚时分。试验温室5 cm深度处基质的最高温度为 31.2°C ,比对照温室低 11.3°C ;最低温度为 0.8°C ,比对照温室高 0.4°C ;平均温度为 12.8°C ,比对照低 1.9°C ;与对照温室5 cm基质温度最大温差为 11.5°C ,出现在12:40,夜间基质温度至第2日9:00前均高于对照温室,平均比对照温室高 0.5°C ,即夜间平均增温幅度为12.8%。栽培基质20 cm温度全天高于对照温室,最高温度为 10.5°C ,出现在19:50,比对照温室高 1.1°C ;最低温度为 7.4°C ,比对照温室高 0.2°C ;平均温度为 9.2°C ,比对照温室高 0.7°C 。



(b) 两模型浅层基质温度对比(02-12)

图8 两温室模型室内空气及浅层基质温度变化曲线(2015-02-11—2015-02-12)

Fig. 8 Changes of air and substrate temperature in two greenhouse models

4.1.3 工质流量 $3.0\sim 4.0\text{ L/min}$ 阶段(60 W循环泵运行)

选取2015年2月14日(晴天)作为典型日期分析系统运行对试验温室模型中室内空气温度和浅层基质温度变化的影响。两温室模型的室内跨中气温和浅层基质温度对比如图9所示。当天的室外最高气温为 11.8°C ,出现在14:50,最低气温为 -8.3°C 。循环泵开启时刻为11:20,关闭时刻为15:50,1 d内系统运行时长为4.5 h。

如图9a所示,系统运行前,两温室模型跨中气

温无显著差异,系统开始运行后,试验温室跨中气温开始低于对照温室直至差异显著,系统停止运行后,夜间试验温室跨中气温始终显著低于对照温室。试验温室在系统运行下的跨中最高平均气温为 34.6°C ,出现在13:30,与对照温室最高温度同时出现,比对照温室低 2.7°C ;最低气温比对照温室低 1.5°C ,平均气温比对照温室低 1.6°C 。24 h内,试验温室与对照温室的最大温差为 3.2°C ,出现在14:50。

由图9b可知,栽培基质5 cm深度处温度变化规律与跨中空气温度变化相似,且系统运行条件下

试验温室 5 cm 深度处基质温度白天显著低于对照温室,20 cm 深度处温度波动幅度明显小于 5 cm 深度处,且基质峰值温度延迟出现在下午临近傍晚时分。试验温室内,5 cm 深度处基质最高温度为 27.4℃,比对照温室低 7.0℃;最低温度为 1.3℃,比对照温室高出 0.5℃;平均温度为 11.6℃,比对照温室低 2.5℃,即低 19.1%;与对照温室 5 cm 深度处

基质温度的最大温差为 7.2℃,出现在 12:40,夜间基质温度至第 2 日 09:30 前均高于对照温室,平均比对照温室高 0.6℃。栽培基质 20 cm 深度处温度全天高于对照温室,最高温度为 9.6℃,出现在 20:10,比对照温室高 1.3℃;最低温度为 6.9℃,比对照温室高 0.3℃;平均温度为 8.6℃,比对照温室高 0.8℃。

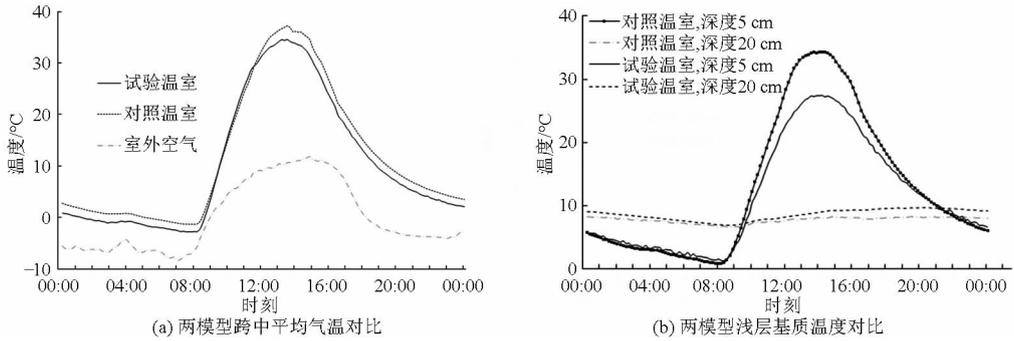


图9 两温室模型室内空气及浅层基质温度变化曲线(2015-02-14)

Fig.9 Changes of air and substrate temperature in two greenhouse models

4.2 各阶段总体运行效果

4.2.1 工质流量 1 ~ 1.5 L/min 阶段(15 W 循环泵运行)

如表 2 所示,表中所列温度来自温室模型中 6 个室内气温测点数据得出的平均温度变化。系统运行阶段,试验温室的室内空气温度与对照温室有显著差异,最高温度显著下降,最低温度无显著差异或略有提高,试验温室气温波动范围比对照温室显著减小。

如表 3 所示,晴天条件下 5 cm 深度处,试验温室基质日平均温度比对照温室降低 1.6℃;温度波

动范围平均比对照降低 20.9%;20 cm 深度处,试验温室基质日平均温度比对照温室升高 0.8℃。

表 2 15 W 循环泵运行条件下两温室模型室内空气温度变化
Tab.2 Changes of indoor air temperature in two greenhouse models under 15 W pumps running condition ℃

日期	对照温室			试验温室		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均
2015-02-04(晴)	34.2	-3.0	9.6	31.8	-3.3	8.5
2015-02-05(晴)	45.9	-3.9	13.2	41.2	-4.2	11.6
2015-02-06(多云)	40.6	-3.6	10.8	38.4	-4.2	9.6
2015-02-07(阴)	29.8	-1.7	6.9	30.7	-3.0	6.3

表 3 15 W 循环泵运行条件下两温室模型浅层基质温度变化

Tab.3 Changes of substrate temperature in two greenhouse models under 15 W pumps running condition ℃

日期	5 cm 深度						20 cm 深度					
	对照温室			试验温室			对照温室			试验温室		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
2015-02-04	26.1	-1.4	9.1	20.3	-1.1	7.7	2.5	0.0	1.3	3.7	0.5	2.2
2015-02-05	34.9	-1.9	12.0	28.1	-1.5	10.3	3.8	0.5	2.4	5.0	0.7	3.0
2015-02-06	31.0	-1.3	10.8	24.9	-1.1	9.2	5.3	2.5	3.9	5.3	1.8	3.8
2015-02-07	23.7	1.4	8.0	20.6	0.6	7.1	10.1	4.3	6.6	7.0	3.9	5.1

4.2.2 工质流量 2.0 ~ 2.5 L/min 阶段(30 W 循环泵运行)

如表 4 所示,系统运行阶段,试验温室的室内空气温度与对照温室有显著差异,最高温度显著下降,试验温室气温波动范围比对照显著减小。晴天条件下,试验温室室内最高气温比对照温室平均降低 4.1℃。

如表 5 所示,晴天条件下,5 cm 深度处,试验温室基质日平均温度比对照温室降低 2.2℃。20 cm

深度处,试验温室基质日平均温度比对照温室升高 0.5℃。

因此,本运行阶段与 15 W 水泵运行阶段相比,试验温室 20 cm 深度处基质平均温度增加,系统的热环境调控效果相对较好。

4.2.3 工质流量 3.0 ~ 4.0 L/min 阶段(60 W 循环泵运行)

如表 6 所示,晴天条件下,试验温室的室内最高气温比对照温室显著下降。

表4 30 W 循环泵运行条件下两温室模型室内空气温度变化

Tab.4 Changes of indoor air temperature in two greenhouse models under 30 W pumps running condition °C

日期	对照温室			试验温室		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均
2015-02-09(晴)	40.8	-4.7	10.6	37.2	-5.5	9.3
2015-02-10(晴)	45.5	-3.8	12.1	42.4	-4.4	11.1
2015-02-11(晴)	49.9	-1.8	16.3	44.9	-2.4	14.5
2015-02-12(晴)	46.8	-2.4	13.4	42.1	-3.3	12.3

表5 30 W 循环泵运行条件下两温室模型浅层基质温度变化

Tab.5 Changes of substrate temperature in two greenhouse models under 30 W pumps running condition °C

日期	5 cm 深度						20 cm 深度					
	对照温室			试验温室			对照温室			试验温室		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
2015-02-09	35.6	-2.4	11.5	26.9	-1.9	9.5	6.5	4.0	5.5	7.1	3.8	5.8
2015-02-10	39.8	-1.4	12.9	30.7	-0.9	11.0	7.3	4.8	6.2	8.0	4.6	6.6
2015-02-11	44.1	0.7	16.7	32.7	1.0	13.9	8.9	5.8	7.5	9.9	6.0	8.2
2015-02-12	42.5	0.4	14.8	31.2	0.8	12.9	9.4	7.2	8.5	10.5	7.4	9.2

表6 60 W 循环泵运行条件下两温室模型室内空气温度变化

Tab.6 Changes of indoor air temperature in two greenhouse models under 60 W pumps running condition °C

日期	对照温室			试验温室		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均
2015-02-13(晴)	42.4	-3.4	12.6	38.6	-4.5	10.8
2015-02-14(晴)	37.3	-1.4	12.0	35.1	-2.3	11.1
2015-02-16(多云)	45.1	-2.1	16.4	40.9	-2.4	15.3

表7 60 W 循环泵运行条件下两温室模型浅层基质温度变化

Tab.7 Changes of substrate temperature in two greenhouse models under 60 W pumps running condition °C

日期	5 cm 深度						20 cm 深度					
	对照温室			试验温室			对照温室			试验温室		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
2015-02-13	38.8	-0.6	13.9	29.4	-0.1	11.7	9.0	6.8	8.1	9.8	7.1	8.9
2015-02-14	34.4	0.8	13.2	27.4	1.3	11.6	8.3	6.6	7.8	9.6	6.9	8.6
2015-02-16	40.7	-0.5	15.8	31.0	0.5	13.2	7.4	4.1	5.5	13.6	4.5	8.1

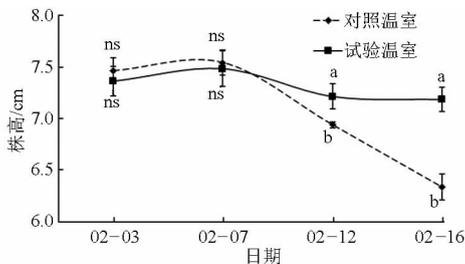


图10 两温室模型内幼苗株高变化对比

Fig. 10 Comparison of seedling height changes of lettuce in two models

对照温室,但差异不显著。

2月7日以后,对照温室中幼苗株高持续下降,试验温室幼苗株高先明显下降,后趋于平缓,且2月12日、16日试验温室中幼苗株高均显著高于对照温

如表7所示,系统运行阶段内,晴天条件下,5 cm 深度处,试验温室基质日平均温度比对照温室平均降低 1.9°C;20 cm 深度处,试验温室基质日平均温度比对照温室升高 0.8°C。

与另外2个阶段相比,60 W 循环泵运行条件下,栽培基质不同深度上温度分布更加均衡,并且试验温室20 cm 深度处基质平均温度均高于对照温室,说明系统可实现较好的“削峰填谷”效果,能够

有效调控温室热环境。

4.3 冬季系统运行对温室模型内叶菜幼苗生长形态指标的影响

4.3.1 对紫叶生菜幼苗株高和茎粗的影响

紫叶生菜幼苗的株高和茎粗变化对比如图10、图11所示。可知2月3日两温室模型中幼苗的株高、茎粗均无显著差异。放入温室模型中后,2月7日试验温室中幼苗的株高和茎粗略有增大,稍高于

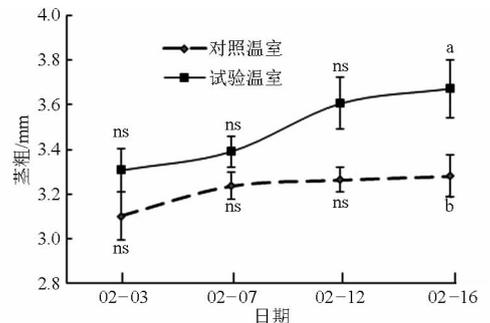


图11 两温室模型内幼苗茎粗变化对比

Fig. 11 Comparison of stem diameter changes of lettuce in two models

室。这说明测试期内系统运行对温室模型中紫叶生菜幼苗的株高可起到一定的促进作用。测试结束

时,试验温室幼苗株高为 7.18 cm, 比对照高出 0.85 cm。

生菜幼苗放入温室模型中后,两模型中幼苗的茎粗均呈现上升趋势,其中对照温室生菜幼苗的茎粗略有上升后变化趋于平缓,试验温室中幼苗的茎粗稳定增大,说明试验温室中环境更有利于紫叶生菜幼苗茎粗的增加。至测试结束,试验温室幼苗的茎粗为 3.67 mm,显著高于对照温室幼苗,比对照温室幼苗高 0.39 mm,即高约 11.9%。

4.3.2 对生菜幼苗叶片生长的影响

如图 12 所示为测试期内两温室模型中幼苗单株叶面积及单株叶片数的变化情况对比。测试期内,试验温室幼苗单株叶面积增加速度明显大于对照温室,至测试结束,试验温室幼苗的平均单株叶面积为 60.38 cm²,显著大于对照温室幼苗的单株叶面积 33.72 cm²,比对照温室幼苗大 26.66 cm²,即提高约 79.1%。

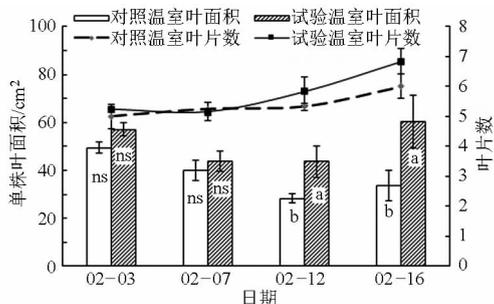


图 12 两温室模型内幼苗叶片生长变化对比

Fig. 12 Comparison of seedling leaf growth changes of lettuce in two models

此外,两温室模型中幼苗的叶片数增加趋势基本一致,测试期内试验温室幼苗的叶片数略高于对照温室。测试期结束时,试验温室生菜幼苗的平均单株叶片数为 6.83,比对照温室提高 0.83,即提高约 13.8%。

如图 13 所示为测试期内两温室模型中幼苗单株平均最大叶宽及叶片宽长比的变化情况对比。至测试结束,试验温室幼苗的单株最大叶宽平均为 5.64 cm,显著高于对照温室幼苗最大叶宽 4.17 cm,比对照温室幼苗提高了 1.47 cm,即提高约 35.3%。

两温室模型中幼苗的叶片宽长比增加趋势基本一致,测试结束时,试验温室生菜幼苗的叶片平均宽长比为 1.16,试验温室幼苗的叶片宽长比比对照温室提高 0.07,即提高约 6.4%。

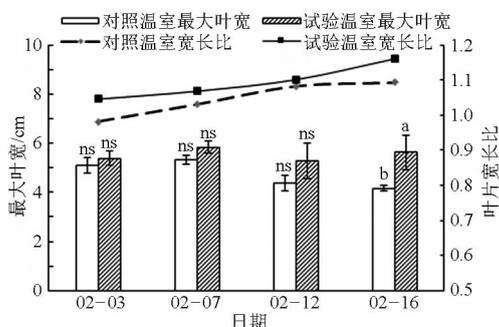


图 13 两温室模型内幼苗叶片尺寸变化对比

Fig. 13 Comparison of seedling leaf size changes of lettuce in two models

5 结论

(1) 考虑冬季作物生长对冠层空气和根区基质的热环境需求,设计了一整套日光温室热环境相变调控系统,可以有效蓄积太阳辐射热,实现日光温室的高效能量收集和热环境调控,减少室内空气温度波动,提高基质根区温度,并且使不同深度层基质温度分布更加均匀。

(2) 冬季测试期间,晴天典型天气测试显示,试验温室的室内气温、基质 20 cm 深度处温度与对照温室有显著差异。栽培基质 5 cm 深度处温度变化规律与跨中空气温度变化相似,且系统运行条件下试验温室 5 cm 深度处基质温度白天显著低于对照温室,20 cm 深度处基质温度波动幅度明显小于 5 cm 深度处,由于热量传递在时间上的延迟性,基质温度的峰值阶段出现在下午临近傍晚时分。

(3) 冬季测试阶段结束后,试验温室内紫叶生菜幼苗的株高、茎粗、单株叶面积、最大叶宽等均显著优于对照温室,分别比对照温室提高 13.4%、11.9%、79.1% 和 35.3%,单株叶片数及叶片宽长比无显著差异,表明试验温室内热环境相对更有利于紫叶生菜幼苗的生长。

参 考 文 献

- 喻景权.“十一五”我国设施蔬菜生产和科技进步及其展望[J]. 中国蔬菜,2011(1):11-23.
YU Jingquan. Progress in protected vegetable production and research during ‘The Eleventh Five-year Plan’ in China [J]. China Vegetables, 2011(1):11-23. (in Chinese)
- 王铁臣. 京郊日光温室应用调查报告[J]. 农业工程技术·温室园艺,2009(1):13-15.
- 李南南. 日光节能温室相变墙体材料应用的前景分析[J]. 北方园艺,2011(16):77-78.
LI Nannan. Prospect analysis on application of phase change wall materials in solar greenhouse [J]. Northern Horticulture, 2011(16):77-78. (in Chinese)
- ZALBA B, MAR N J M, CABEZA L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis

- and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(3): 251-283.
- 5 王宏丽, 邹志荣, 陈红武, 等. 温室中应用相变储热技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 304-307.
WANG Hongli, ZOU Zhirong, CHEN Hongwu, et al. Research advances in technologies of phase-change heat storage and its application in greenhouses[J]. Transactions of the CAAE, 2008, 24(6): 304-307. (in Chinese)
- 6 PIELICHOWSKA K, PIELICHOWSKI K. Phase change materials for thermal energy storage[J]. Progress in Materials Science, 2014, 65: 67-123.
- 7 陈超, 李琢, 管勇, 等. 制作方式对日光温室相变蓄热材料热性能的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊1): 186-191.
CHEN Chao, LI Zhuo, GUAN Yong, et al. Effects of building methods on thermal properties of phase change heat storage composite for solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 1): 186-191. (in Chinese)
- 8 周增产, 杨仁全, 卜云龙, 等. 用于日光温室的蓄热式墙体: 中国, 201362895[P]. 2009-12-16.
ZHOU Zengchan, YANG Renquan, BU Yunlong, et al. Regenerative wall for solar greenhouse; CN, 201362895 [P]. 2009-12-16. (in Chinese)
- 9 胡钧, 和树森. 新能源相变储能抗菌智能调控温室大棚: 中国, 101836564A[P]. 2010-09-22.
HU Jun, HE Shusen. Antibacterial intelligent greenhouse with phase change energy storage apparatus; CN, 101836564A [P]. 2010-09-22. (in Chinese)
- 10 王宏丽, 李晓野, 邹志荣. 相变蓄热砌块墙体在日光温室中的应用效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 253-257.
WANG Hongli, LI Xiaoye, ZOU Zhirong. Application of brick wall with phase change rice husk in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 253-257. (in Chinese)
- 11 ZALEWSKI L, JOULIN A, LASSUE S, et al. Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material[J]. Solar Energy, 2012, 86(1): 208-219.
- 12 崔秋娜. 相变储能墙板在温室中的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
CUI Qiona. Application of phase change energy storage wall in the solar greenhouse[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 13 朱孝钦, 陆建生, 孙加林, 等. 用六水氯化钙作为相变材料的换热器储热性能研究[J]. 无机盐工业, 2007, 39(8): 56-58.
ZHU Xiaojin, LU Jiansheng, SUN Jialin, et al. Research on heat storage performances of the heat exchanger using calcium chloride hexahydrate as phase-change material[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2007, 39(8): 56-58. (in Chinese)
- 14 刘军. 太阳能相变储热管: 中国, 101324378[P]. 2008-12-17.
LIU Jun. Solar phase change thermal storage pipe; CN, 101324378 [P]. 2008-12-17. (in Chinese)
- 15 王宏丽, 邹志荣, 裘莉娟, 等. 一种适用于日光温室的相变储热循环装置: 中国, 202587972U[P]. 2012-12-12.
WANG Hongli, ZOU Zhirong, QIU Lijuan, et al. Phase change thermal storage cycling apparatus suitable for solar greenhouse; CN, 202587972U [P]. 2012-12-12. (in Chinese)
- 16 王坤, 刘强, 张大战, 等. 农业温室太阳能集储热系统: 中国, 101755638A[P]. 2010-06-30.
WANG Kun, LIU Qiangqiang, ZHANG Dazhan, et al. Agricultural greenhouses solar thermal storage system; CN, 101755638A [P]. 2010-06-30. (in Chinese)
- 17 BENLI H, DURMUŞ A. Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating[J]. Solar Energy, 2009, 83(12): 2109-2119.
- 18 FAFID M M, AL-HALLAJ S. Microchannel heat exchanger with micro-encapsulated phase change material for high flux cooling; US, 8109324[P]. 2012-02-07.
- 19 DIACONU B M, SZABOLCS V, OLIVEIRA A C. Experimental study of natural convection heat transfer in a microencapsulated phase change material slurry[J]. Energy, 2010, 35(6): 2688-2693.
- 20 方慧, 杨其长, 梁浩, 等. 日光温室浅层土壤水媒蓄放热增温效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 258-263.
FANG Hui, YANG Qichang, LIANG Hao, et al. Experiment of temperature rising effect by heat release and storage with shallow water in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 258-263. (in Chinese)
- 21 方慧, 杨其长, 张义. 基于热泵的日光温室浅层土壤水媒蓄放热装置试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 210-216.
FANG Hui, YANG Qichang, ZHANG Yi. Experimental study on shallow soil assisted heat release-storage system with water-water heat pump in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 210-216. (in Chinese)
- 22 刘爽, 王宇欣, 刘志丹. 生物氢烷工程沼渣用于油菜及菠菜育苗的效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 225-232.
LIU Shuang, WANG Yuxin, LIU Zhidan. Application effect of biohythane residue on Brassica and Spinacia seedling production [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 225-232. (in Chinese)
- 23 刘敏. 蚯蚓粪复合基质的原料配比研究及其对生菜和观赏番茄生长的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
LIU Min. The study of material proportion in vermicompost substrates and its influence to the growth of romaine lettuce and ornamental tomato[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008. (in Chinese)