



王德睿,王宇欣,常雪森,王青峰,王平智.可替换式相变蓄放热系统的开发及其对日光温室热环境的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(10):305-314.
WANG Derui,WANG Yuxin,CHANG Xuemiao,WANG Qingfeng,WANG Pingzhi. Development of replaceable phase change heat storage and release system and its influence on the thermal environment of solar greenhouse[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10): 305-314.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.26

可替换式相变蓄放热系统的开发及其对日光温室热环境的影响

王德睿 王宇欣* 常雪森 王青峰 王平智

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘 要 针对我国北方冬季夜间日光温室室内低温,多数相变系统若出现材料相变温度等不匹配温室实际生产需要,难以更换相变系统内部相变材料的问题,研究开发一种可替换式的相变蓄热系统,并筛选出2种适用于我国北方地区日光温室冬季夜间加温的相变材料。采用差示扫描量热法(DSC)测试相变材料的物性特征;采用对照试验,研究可替换式相变蓄热系统对于北京地区日光温室冬季夜间的加温效果以及对室内番茄生长的影响。结果表明:1)硬脂酸丁酯熔点和凝固点分别为15.77和18.38℃,十五烷熔点和凝固点分别为8.47和8.72℃;硬脂酸丁酯熔化与凝固过程中的相变潜热分别为111.6和111.5 J/g,十五烷熔化与凝固过程中的相变潜热分别为135.8和138.7 J/g;2)与对照温室相比,试验温室夜间最低温度和夜间平均温度最高可分别提高1.7和1.9℃;3)试验温室夜间地表下10和15 cm处的最低土壤温度平均高出对照温室0.8和0.3℃;平均土壤温度分别高出0.7和0.3℃;4)在无法接收太阳辐射、室内温度最低的阴雪天,试验温室气温比对照温室最高高0.8℃,平均高0.5℃;5)试验温室中番茄的株高、茎粗、叶面积与对照温室相比分别提高1.9%、1.5%、3.9%。相变系统能够有效提高试验温室冬季夜间温度,有利于番茄植株的生长。

关键词 日光温室;相变材料;温度;番茄

中图分类号 S625

文章编号 1007-4333(2024)10-0305-10

文献标志码 A

Development of replaceable phase change heat storage and release system and its influence on the thermal environment of solar greenhouse

WANG Derui, WANG Yuxin*, CHANG Xuemiao, WANG Qingfeng, WANG Pingzhi

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

Abstract In view of the indoor low temperature of solar greenhouse at night in winter in northern China, and the problem that it is difficult to replace the phase change materials in the phase change system if the material phase change temperature does not match the actual production needs of the greenhouse in most phase change systems, an alternative phase change heat storage system is developed, and two types of phase change materials suitable for the night heating of solar greenhouse in winter in northern China are identified. The physical properties of phase change materials are measured by differential scanning calorimetry (DSC). A controlled experiment was conducted to study the effect of an alternative phase change heat storage system on the night heating of a solar greenhouse in Beijing in winter and on the growth of tomato. The results showed as follows: 1) The melting point and freezing point of butyl stearate

收稿日期: 2023-10-31

基金项目: 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金资助项目(L212068)

第一作者: 王德睿(ORCID:0009-0000-4591-6440),硕士研究生,E-mail:wdr9909@163.com

通讯作者: 王宇欣(ORCID:0000-0003-0291-495X),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

were 15.77 and 18.38 °C, and the melting point and freezing point of pentadecane were 8.47 and 8.72 °C, respectively. The latent heat temperatures of transformation during melting and solidification of butyl stearate were 111.6 and 111.5 J/g, respectively, and temperatures during melting and solidification of pentadecane are 135.8 and 138.7 J/g, respectively. 2) Compared with the control greenhouse, the minimum night temperature and maximum night average temperature of the test greenhouse are increased by 1.7 and 1.9 °C, respectively; 3) The minimum soil temperatures at 10 and 15 cm below the surface of the test greenhouse at night was 0.8 and 0.3 °C higher than that of the control greenhouse on average; The average soil temperatures was 0.7 and 0.3 °C higher, respectively. 4) On the cloudy and snowy days, when the solar radiation could not be received and the indoor temperature was at the lowest, the temperature of the test greenhouse was the maximum 0.8 °C higher than that of the control greenhouse, and the average 0.5 °C higher; 5) In addition, compared with those in the control greenhouse the plant height, stem diameter and leaf area of tomatoes in the test greenhouse were increased by 1.9%, 1.5% and 3.9%, respectively. The phase change system can effectively increase the night temperature of the test greenhouse in winter, and the thermal environment of the test greenhouse is more conducive to the growth of tomato plants.

Keywords solar greenhouse; phase change materials; temperature; tomato

日光温室以太阳光为主要热源,通过墙体和地面蓄放热以及夜间覆盖保温等措施,实现不加温或少加温满足作物对适宜温度的需求^[1-2]。因我国北方冬季夜间室外气温较低,传统日光温室的蓄热隔热性能较差,温室往往需要燃烧煤炭、天然气、秸秆等进行供暖,造成能源消耗与环境污染^[3]。相变材料作为一种功能性材料,温度高时吸收热量储能,待温度降低时释放热量,可以充分发挥其对太阳能资源的“移峰填谷”作用^[4]。将其应用于日光温室可以实现夏季降温、冬季升温,促进可再生太阳能资源的高效利用,进而节约不可再生能源,减小环境污染,促进设施园艺绿色可持续发展。

近年来,国内外已对相变材料在日光温室中的应用进行了诸多研究。王冬晴等^[5]和Meng等^[6]将相变材料封装至PVC管材中外挂于室内北墙内表面,构成相变蓄放热系统,前者可提高冬季夜间气温1 °C;后者可提高21.1%的有效积温。李彦荣^[7]添加 $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 对 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 改性,封装在塑料方管中制备成不同厚度的相变墙板,发现2~3 cm厚度放蓄热比最高,为90%。赵梦菲^[8]将制备的石蜡/膨胀石墨-硅藻土复合相变材料与水泥混合,涂抹在温室墙体内部,晴天与多云天气下分别可提高室内温度1.7和0.5 °C。目前其常见的应用方式有2种:1)作为蓄热介质^[9-10]或独立的蓄热单元^[5-6]应用于蓄热装置;2)与建筑材料混合^[11-12]、砌筑^[13-14]、填充^[7,15]构建相变蓄热墙体。在应用过程中也会存在相变板材储能密度低且易渗漏^[13]、材料相变温度

不适宜导致不能充分蓄放热等问题。

针对材料相变温度等不匹配温室实际生产需要,大多数相变蓄放热系统难以更换相变材料的问题,本研究旨在开发一种可替换式相变蓄放热系统,根据不同地区冬季温室实际生产需要,更换相变材料种类,以达到调节日光温室冬季夜间热环境的作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 相变蓄放热系统

本研究中相变蓄放热系统由不锈钢箱体(箱体A和箱体B)、聚丙烯(PP)塑料广口试剂瓶(500 mL)和相变材料组成。箱体A的尺寸(长×宽×高)为1 030 mm×140 mm×700 mm,箱体B的尺寸(长×宽×高)为735 mm×140 mm×700 mm,考虑到所在试验区域果实成熟季会有顾客采摘,为防止顾客误食,故箱体采用对开门设计,放入相变材料瓶后,可将箱门锁住。2种尺寸箱体内均可放置3层相变材料瓶,箱体A每层可放置10个相变材料瓶,箱体B每层可放置7个相变材料瓶。箱体背面紧贴墙体,打入4枚膨胀螺栓,北墙悬挂17台箱体A,7台箱体B,西墙悬挂5台箱体A。22台箱体A中装配硬脂酸丁酯,7台箱体B中装配十五烷。聚丙烯具有耐酸碱、盐溶液及有机溶剂的腐蚀、抗压耐摔等诸多优良特性,该试剂瓶还有螺口设计,密封性好,解决了封装相变材料易泄露的问题。

1.1.2 相变材料

我国北方冬季昼夜温差大,1种相变材料相变温度区间狭窄,难以维持冬季夜间温度需求,故选用2种相变温度有差距的材料进行梯次放热。为减缓前夜室内温度下降,相变温度高的相变材料先放热,之后相变温度较低的相变材料放热,以此稳定后半夜室内热环境。经查阅文献以及对多种相变材料进行差示扫描量热法(DSC)

测试,本研究选用硬脂酸丁酯和十五烷2种相变材料。

采用DSC-TG平台(美国TA公司,温度精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,加热速率为 $0.01\sim 200^\circ\text{C}/\text{min}$,氮气氛围,升降温速率为 $1^\circ\text{C}/\text{min}$,硬脂酸丁酯和十五烷测温范围分别为 $0\sim 40$ 和 $-5\sim 30^\circ\text{C}$)对相变材料的相变温度和相变潜热进行测试,得出其DSC曲线见图1。

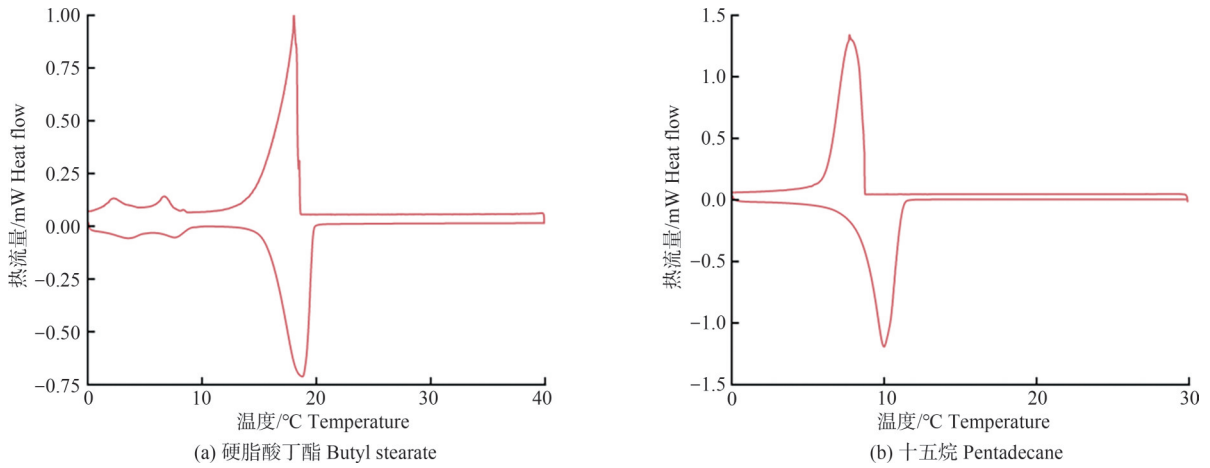


图1 相变材料的DSC曲线

Fig. 1 DSC test curve of two phase-change materials

热流密度为正值时,相变材料放热,反之吸热。硬脂酸丁酯熔化的起始温度为 15.77°C ,峰值温度为 18.78°C ,熔化过程相变潜热为 111.6 J/g ;凝固的起始温度为 18.38°C ,峰值温度为 18.02°C ,凝固过程相变潜热为 111.5 J/g 。十五烷熔化的起始温度为 8.47°C ,峰值温度为 9.99°C ,熔化过程相变潜热为 135.8 J/g ;凝固的起始温度为 8.72°C ,峰值温度为 7.72°C ,凝固过程相变潜热 138.7 J/g ,符合系统梯次放热要求。即夜间硬脂酸丁酯先凝固放热,十五烷相变温度较低,可应对极端寒冷天气。

1.1.3 相变材料用量及蓄热量

硬脂酸丁酯用量为 283.8 kg ,十五烷用量为 56.6 kg 。

理论蓄热量 Q 为硬脂酸丁酯潜热量和显热量 Q_{Lb} 、 Q_{Sb} ,十五烷潜热量和显热量 Q_{Lp} 、 Q_{Sp} ,PP塑料瓶显热量 Q_{pp} 之和,公式为:

$$Q = Q_{Lb} + Q_{Sb} + Q_{Lp} + Q_{Sp} + Q_{pp} \quad (1)$$

其中:

$$Q_{Lb} = M_b \times L_b \quad (2)$$

$$Q_{Lp} = M_p \times L_p \quad (3)$$

$$Q_{Sb} = M_b [C_{b,s}(T_{b,m} - T_{b,i}) + C_{b,l}(T_{b,f} - T_{b,m})] \quad (4)$$

$$Q_{Sp} = M_p [C_{p,s}(T_{p,m} - T_{p,i}) + C_{p,l}(T_{p,f} - T_{p,m})] \quad (5)$$

$$Q_{pp} = M_{pp} \times C_{pp}(T_{pp,f} - T_{pp,i}) \quad (6)$$

式中: M_b 为硬脂酸丁酯质量, kg ; L_b 为硬脂酸丁酯相变潜热, kg/kJ ; M_p 为十五烷质量, kg ; L_p 为十五烷相变潜热, kg/kJ ; $C_{b,s}$ 、 $C_{b,l}$ 分别为硬脂酸丁酯固体比热容和液体比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; $T_{b,i}$ 、 $T_{b,m}$ 、 $T_{b,f}$ 分别为硬脂酸丁酯初始温度、相变温度、最终温度, $^\circ\text{C}$; $C_{p,s}$ 、 $C_{p,l}$ 分别为十五烷固体比热容和液体比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; $T_{p,i}$ 、 $T_{p,m}$ 、 $T_{p,f}$ 为十五烷初始温度、相变温度、最终温度, $^\circ\text{C}$; C_{pp} 为PP塑料瓶比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; $T_{pp,f}$ 、 $T_{pp,i}$ 分别为PP塑料瓶最终温度和初始温度, $^\circ\text{C}$ 。

根据式(1)~(6)计算得可替换式相变蓄放热系统理论蓄热量为 $68\,868.57\text{ kJ}$ 。

本研究的理论蓄热量超出马承伟等^[16]研究的

为提高占地面积 200 m² 的温室夜间室内温度 2~3 °C 需补充的热量 24~60 MJ。

1.2 试验方案

1.2.1 日光温室概况及试验时间

试验地点位于北京市昌平区金六环农业园(40°11'(N), 116°15'(E)), 园内 E1 号日光温室为试验温室, 温室东西长 50 m, 南北跨度为 6.9 m, 北墙高度 2.1 m, 脊高 3 m。温室北墙及后屋面为聚苯板且涂抹防裂水泥砂浆, 东西墙采用红砖堆砌, 表面均涂抹水泥砂浆, 前屋面覆盖材料采用聚乙烯塑料薄膜。沿温室东西方向在温室中央采用双层 PO 塑料膜将温室一分为二。西侧温室作为试验温室, 其后墙内表面装配相变蓄放热系统; 东侧温室作为对照温室, 后墙不作任何处理。夜间采用保温被覆盖, 08:00 开启, 16:00 关闭。

温室内种植‘京采 8 号’番茄, 土壤栽培, 覆地

膜。番茄共种植 30 垄, 垄面宽 50 cm, 1 垄种植 2 行, 行距 30 cm, 株距 40 cm, 单行 12 株, 1 垄 24 株。试验温室与对照温室种植管理与通风情况一致。

试验时间为 2023-01-15—02-28 冬季最冷的 45 d。其中, 晴天 19 d, 多云 23 d, 阴天、小雪和大雪各 1 d。

1.2.2 数据测量及测点布置

1) 无线数据采集单元。PT100 传感器、数据采集模块、无线传输模块依次连接, 组成相变系统热环境的数据采集单元。采用 32 个昆仑中大 PT100 传感器进行日光温室的多点温度数据测量, 温度数据采集精度为 ±0.1 °C; 2 台昆仑中大 16 路数据采集仪进行温度数据的采集, 测试期间的温度数据采集设置为每 10 min 采集 1 次; 并采用济南有人 USR-G780 V2 通讯模块进行实时数据的传输(图 2), 实现在移动端数据随时随地观测。

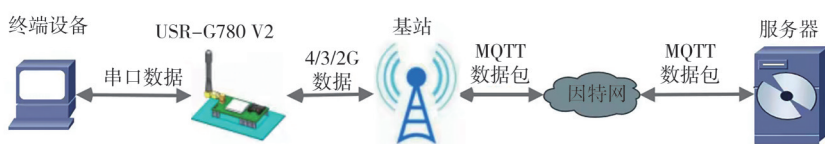


图 2 通讯模块数据传输示意图

Fig. 2 Communication module data transmission diagram

2) 测点布置。

试验温室和对照温室分别布置 16 个温度测点(室内温度测点进行遮光处理), 测点位置见图 3。

① 室内外气温测点 13 个: 布置在温室东西长的 3 等分点, 跨度为 1、3 和 5 m 处, 离地表 0.75 和 1.50 m 处; 室外气温测点 1 个, 从温室长度中部伸出室外, 悬挂于室外高 2 m 处。

② 室内土壤温度测点 2 个: 土壤温度测点布置在各温室中央, 距地表 0.10 和 0.15 m 深度处。

③ 北墙温度测点 1 个: 北墙温度测点均布置在温室北墙的中央。

3) 温度数据分析方法。

在未安装相变装置时, 每个温室安装 5 个空气测点, 确定其温度平均值相同, 排除两温室基础温度差异。在分析温度数据时, 取两温室内各部位测点的平均值作为该时刻的温度数值。

4) 番茄生长指标测定。

采取五点取样法, 每个点选取 4 株长势一致的番茄, 于 2023-01-18、02-08、02-28, 定株测量番茄植株株高、茎粗、叶面积。株高用钢卷尺测量植株茎基部至生长点的距离^[17]; 茎粗采用数显游标卡尺测量植株中部处横、纵直径后取平均值^[18]; 选取植株中部 3 片完全展开的叶片, 用直尺测量叶长、最大叶宽。叶面积(LA)计算公式^[18]为:

$$LA = 0.347 \times (L \times W) - 10.7 \quad (7)$$

式中: L 为叶长, cm; W 为最大叶宽, cm。

2 结果与分析

2.1 试验期间室外气温变化

试验期间室外气温变化见图 4, 室外气温为 -17.6~20.9 °C。01-24T20:12—01-25T2:42, 室外平均温度持续低于 -10 °C; 01-25T2:52—8:12, 室外平均温度持续低于 -15 °C, 在 01-25T7:32 出现试验期间最低温 -17.6 °C。

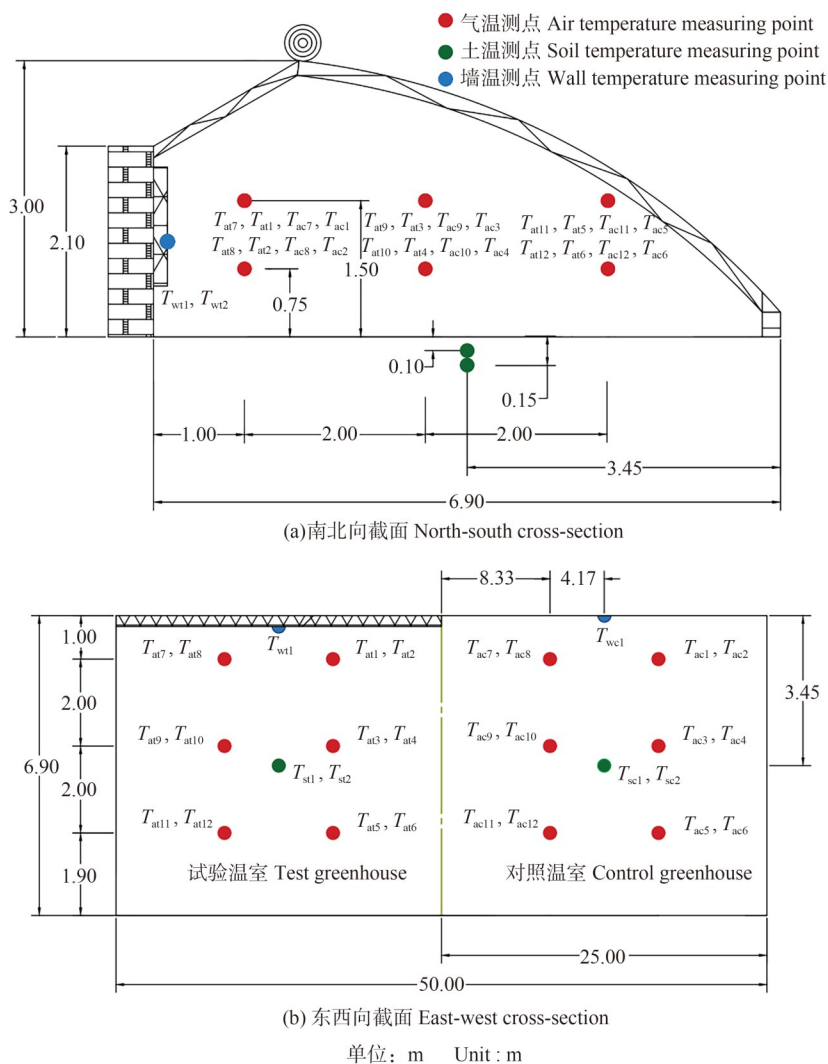


图 3 温室温度测点布置

Fig. 3 Greenhouse temperature measuring point arrangement

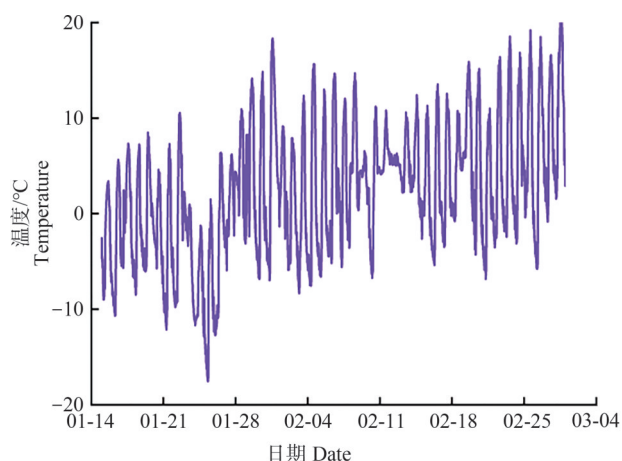


图 4 试验期间室外温度变化

Fig. 4 Change of Outdoor temperature during the test

2.2 相变蓄放热系统夜间加温效果

2.2.1 相变蓄放热系统对室内空气温度的提升效果

试验期间,试验温室夜间最低气温始终高于对照温室(图 5(a))。在对照温室夜间最低气温低于 10 °C 的夜晚,试验温室最低气温比对照温室高 0.8 °C,其中有 5 d 试验温室最低气温比对照温室提高 1 °C 以上。在 01-23—01-28 持续低温下(日最低值: -17.6~ -6.0 °C),试验温室最低气温比对照温室提高 0.5 °C 以上,其中 01-24 提高了 1.7 °C, 01-28 提高了 1.2 °C。证明相变系统对温室内的加温效果明显。

相变系统对室内气温的提升效果,不仅体现在提升温室内夜间最低气温,还体现在对夜间温室气

温的整体提升(图5(b))。试验期间,室外夜间平均气温在 $-15.6\sim 5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在室外夜间平均气温低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下,试验温室夜间平均温度比对照温室的夜间平均气温高 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$;在室外夜间平均气温低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下,试验温室夜间平均

温度比对照温室的夜间平均气温高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在01-24寒潮来临时,试验温室比对照温室的夜间平均气温高 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。01-24—01-26,室外夜间平均温度在 $-11.1\sim -15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 波动,试验温室比对照温室的夜间平均气温高 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

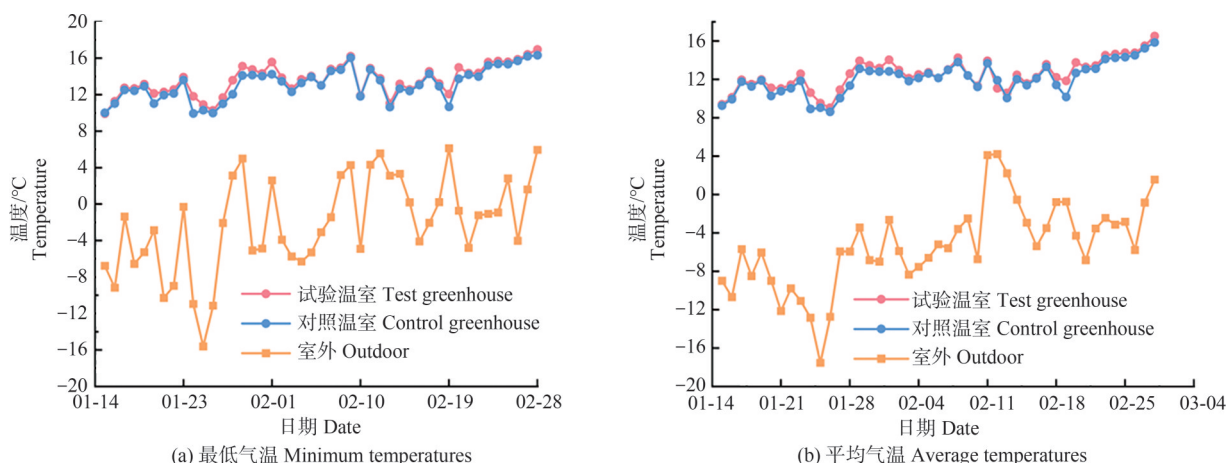


图5 试验和对照温室室内及室外气温

Fig. 5 Test and compare the indoor and outdoor temperature of the greenhouse

2.2.2 相变蓄放热系统对室内土壤温度的提升效果

对室内土壤温度测量分2个时间段(2023-01-14—01-25, 2023-02-19—03-01)进行,结果见图6。试验温室的夜间最低土壤温度一直高于对照温室。

01-14—01-25, 试验期间最冷时间段, 试验温室

与对照温室相比, 夜间不同土壤深度的最低土壤温度提升情况为: 地表下10 cm处, 平均提高 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (最高: $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$); 地表下15 cm处, 平均提高 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (最高: $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)。在01-24—01-25最冷的2天, 与对照温室相比, 试验温室地表下10、15 cm处的最低土壤温度依次平均高出 0.9 、 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

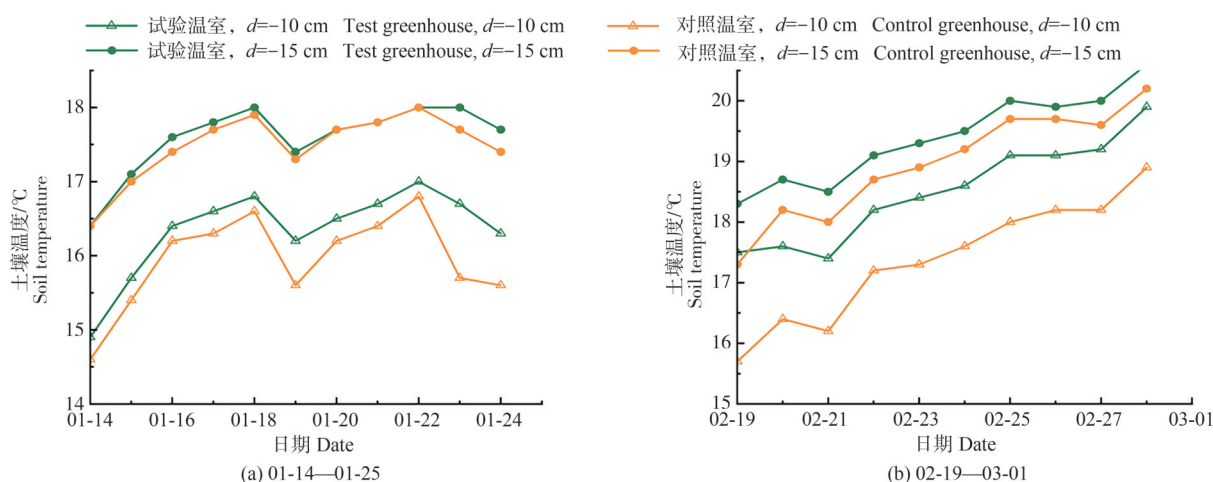


图6 试验和对照温室夜间不同土壤深度(d)最低土壤温度

Fig. 6 Test and control greenhouse night minimum soil temperature at different soil depths (d)

02-19—03-01, 冬季气温回升时间段, 试验温室与对照温室相比, 夜间不同土壤深度的最低土壤温

度提升情况为: 地表下10 cm处, 平均提高 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (最高: $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$); 地表下15 cm处, 平均提高 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (最

高: 1.0°C)。在此测试期间 02-20—02-21 最冷的 2 天, 与对照温室相比, 试验温室地表下 10、15 cm 处的最低土壤温度高出 1.5 和 0.8°C 。

01-14—01-25, 试验温室与对照温室相比, 夜间不同土壤深度的平均土壤温度提升情况为: 地表下 10 cm 处, 平均温度提高 0.4°C (最高: 0.6°C); 地表下 15 cm 处, 平均温度提高 0.2°C (最高: 0.3°C)。期间最冷的 2 天, 与对照温室相比, 试验温室夜间地

表下 10、15 cm 处的平均土壤温度分别高出 0.6 、 0.2°C 。

02-19—03-01, 试验温室与对照温室相比, 夜间不同土壤深度的平均土壤温度提升情况为: 地表下 10 cm 处, 平均提高 0.9°C , 最高提高 1.7°C ; 地表下 15 cm 处, 平均提高 0.3°C , 最高提高 1.0°C 。在此测试期间最冷的 2 天, 与对照温室相比, 试验温室地表下 10、15 cm 处的最低土壤温度分别高出 1.3 、 0.8°C 。

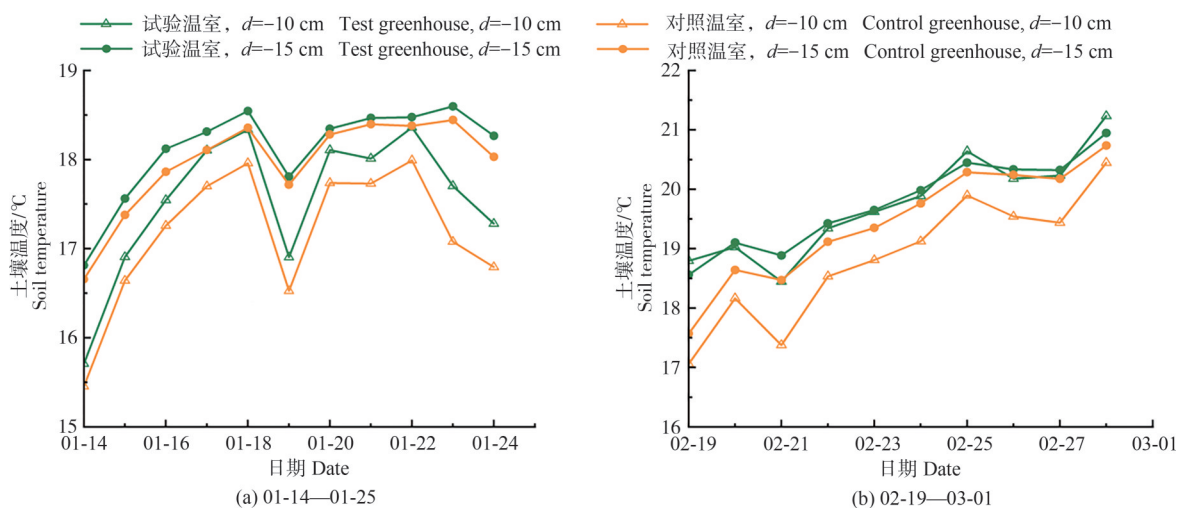


图 7 试验和对照温室夜间不同土壤深度(d)平均土壤温度

Fig. 7 Test and control greenhouse night average soil temperature at different soil depths (d)

2.2.3 相变蓄放热系统对北墙表面温度的影响

试验温室北墙温度的波动明显小于对照温室 (图 8)。试验温室因相变系统遮挡北墙接收太阳辐射, 故导致白天试验温室的北墙温度普遍低于对照温室, 试验温室与对照温室北墙温度最大差值

为 -4.2°C (2023-02-04T10:05)。但在夜间无太阳辐射后, 相变系统不仅向室内空气放热, 也向温室北墙放热, 试验温室比对照温室北墙温度最高高 1.7°C (2023-01-24T05:42)。综上可见, 相变系统在夜间放热性能优良。

2.3 相变蓄放热系统在典型天气下对室内空气温度的提升效果

选取试验期间气温最低的 01-23T08:00—01-26T08:00 (晴天)、02-21T08:00—02-24T08:00 (阴天) 和 02-11T08:00—02-14T08:00 (雪天), 试验和对照温室及室外气温变化见图 9。

总体看, 夜间试验温室的温度持续高于对照温室。以最冷日 01-24 为例, 8:00 掀开保温被时, 试验温室气温比对照温室高 1.9°C , 可见相变系统在夜间持续放热, 加温效果明显。掀开保温被后室内接收太阳辐射, 气温逐渐升高, 从 9:10—11:00 对照温室的气温高于试验温室, 说明在这一时间段, 试验温室中相变系统在吸收热量。温室于 12:00—13:00 达到最高温 30°C 以上, 此阶段试验温室气温一直略低于

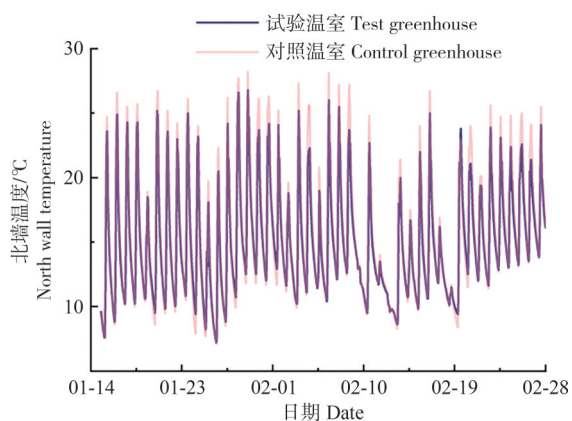


图 8 试验和对照温室北墙表面温度

Fig. 8 Test and control the surface temperature of the north wall of the greenhouse

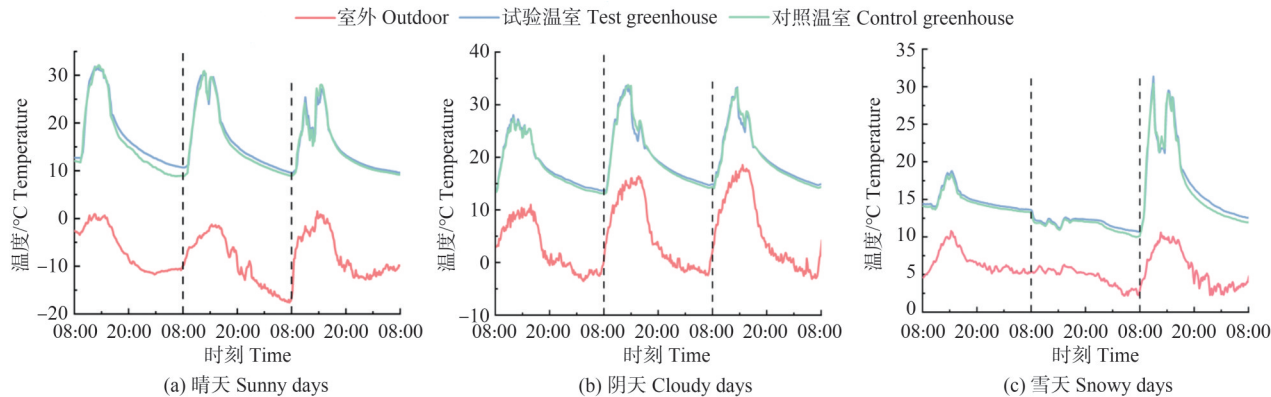


图9 典型天气下试验和对照温室室内及室外气温

Fig. 9 Test and compare indoor and outdoor temperature of greenhouse under typical weather

对照温室,说明相变系统吸热阶段可以起到抑制日光温室高温的作用。温室于13:00—14:00开启上通风口通风,室内气温有显著下降。14:00后关闭上通风口,温室密闭,继续接收太阳辐射进行蓄热。16:00时下放保温被,试验温室气温为22.5℃,尚未达到硬脂酸丁酯的凝固点,故相变蓄热系统此时进行显热放热。但从17:00后,两温室的气温降至18℃左右,达到了硬脂酸丁酯的凝固点,开始进行潜热放热,17:00至次日8:00,试验温室气温持续比对照温室高,期间最高提高1.1℃,平均提高0.8℃。

3天连阴天,夜间试验温室的温度均高于对照温室,试验温室的日温差低于对照温室。以02-22为例,在掀开保温被时,试验温室气温比对照温室高0.5℃,之后室内气温慢慢升高,在12:00—16:00试验温室气温持续低于对照温室,两温室温差最高为2.5℃,说明相变系统在这一时间段进行蓄热,起到了午间降温的作用。夜间温度下降至硬脂酸丁酯

的凝固点,相变系统进行潜热放热,20:00—次日8:00,夜间气温最高提升0.6℃,平均提高0.4℃,试验温室最大温差较对照温室低了2.5℃,表明相变系统可以降低午间高温,提高夜间低温的效果。

因阴雪天,室内无法接收到充分的太阳辐射,室内气温一直较低,但可以看出在此期间,试验温室的气温持续高于对照温室,可见在缺乏太阳辐射的情况下,相变系统能保持持续放热,在02-12T20:00—02-13T08:00,试验温室气温比对照温室最高高0.8℃,平均高0.5℃。

2.4 相变蓄放热系统对日光温室中番茄生长发育的影响

表1示出试验温室与对照温室番茄的生长情况。总体看,试验温室中番茄的株高在生长阶段均大于对照温室。在01-18、02-08、02-28,试验温室中番茄株高比对照温室分别高2.9、3.6、3.4 cm,测试结束时,试验温室番茄比对照温室高1.9%,说明相

表1 试验和对照温室番茄生长指标比较

Table1 Comparison of tomato growth indexes between test and control greenhouse

日期 Date	株高/cm Plant height		茎粗/mm Stem thickness		叶面积/cm ² Leaf area	
	试验温室	对照温室	试验温室	对照温室	试验温室	对照温室
	Test greenhouse	Control greenhouse	Test greenhouse	Control greenhouse	Test greenhouse	Control greenhouse
01-18	123.7±13.1a	120.8±11.2a	12.57±0.7a	12.32±0.6b	17.0±1.9a	16.3±2.3a
02-08	154.7±9.2a	158.3±10.8b	14.73±0.5a	14.45±0.6b	21.0±1.6a	20.6±2.7b
02-28	178.3±8.1a	175.0±8.9b	15.84±0.5a	15.61±0.5b	25.0±2.5a	24.1±2.3b

注:同行数据后不同小写字母表示两温室同一时期同一指标差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the peer data indicate that the two greenhouses have significant differences in the same index during the same period ($P<0.05$).

变系统冬季运行对日光温室中番茄植株株高具有一定的促进作用。3次测量中,试验温室中番茄茎粗均大于对照温室。试验温室中番茄茎粗比对照温室分别粗0.25、0.28、0.23 mm。02-28测试时,试验温室番茄茎粗较对照温室高1.5%,表明试验温室环境更利于番茄茎粗增加。在番茄生长期,试验温室中番茄植株平均叶面积均大于对照温室。02-28试验温室中番茄平均叶面积为25.02 cm²,比对照温室高0.95 cm²,提升了3.9%。说明相变系统的应用促进了番茄叶片的生长。

3 结 论

本研究针对日光温室中相变蓄放热系统若出现材料相变温度等不匹配温室实际生产需要时,难以更换相变系统内部相变材料的问题^[3,5],开发了一种可替换式的相变蓄热系统,根据不同地区冬季温室实际生产需要,更换相变材料种类,以达到调节日光温室冬季夜间热环境的作用。单一的相变材料放热区间狭窄,无法保证夜间温度稳定^[3,8,15],故本研究选用2种相变温度有差距的相变材料梯次放热。

本研究筛选出硬脂酸丁酯和十五烷2种适用于我国北方冬季夜间日光温室加温的相变材料,设计可替换式相变蓄热系统并应用于日光温室进行对照试验,结果如下:

1) 试验周期内(2023-01-15—02-28, 45 d),相变蓄放热系统可分别提高室内夜间最低温度与平均温度1.7和1.9℃。

2) 试验周期内,相变蓄放热系统可分别提高夜间地表下10和15 cm处的最低土壤温度0.8和0.3℃;提高平均土壤温度0.7和0.3℃。

3) 在寒冷晴天、连续阴天以及雪天等不良天气下,相变蓄放热系统均具有良好的升温效果。特别是在无法接收太阳辐射、室内温度最低的阴雪天,相变系统也能持续放热,试验温室气温比对照温室最高高0.8℃,平均高0.5℃。

4) 冬季测试阶段结束,试验温室内番茄株高、茎粗、叶面积比对照温室分别提高1.9%、1.5%和3.9%,说明相变蓄放热系统调节试验温室内热环境使之更有利于番茄植株生长。

综上,本研究的设计的相变蓄放热系统在提高冬季夜间温度、抵御极端天气等方面表现出良好的

效果,而且该系统安装拆卸方便,且易于更换相变材料,对新旧温室均可进行改造,但还有较大的提升潜力。主要可以通过以下2点进行改良:一是增大相变材料的用量以增强系统的集热能力;二是制备具有更高潜热量的新型相变材料。今后可以通过计算流体力学(CFD)来探索相变系统在日光温室中的传热情况,为改良系统提供更好的思路。

参考文献 Reference

- [1] 杨仁全, 马承伟, 刘水丽, 周增产, 刘文玺, 吴松. 日光温室墙体保温蓄热性能模拟分析[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(5): 449-453
Yang R Q, Ma C W, Liu S L, Zhou Z C, Liu W X, Wu S. The imitation analysis of heat preservation and capability of the wall of solar greenhouse [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University: Agricultural Science*, 2008, 26(5): 449-453 (in Chinese)
- [2] 吴照学, 汤俊超, 梁伟, 宋家帅, 龚维政, 鲍恩财. 适用于苏北地区日光温室的相变材料筛选与测试[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 264-272
Wu Z X, Tang J C, Liang W, Song J S, Gong W Z, Bao E C. Screening and testing of suitable phase change materials for solar greenhouses in northern Jiangsu [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(9): 264-272 (in Chinese)
- [3] Zhang L, Xu P, Mao J C, Tang X, Li Z W, Shi J G. A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study[J]. *Applied Energy*, 2015, 156: 213-222
- [4] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009
Zhang R Y. *Phase Change Materials and Phase Change Energy Storage Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)
- [5] 王冬晴, 庄云飞, 张滴滴, 程杰宇, 王平智, 赵淑梅. 分级相变储放热系统在日光温室中的应用效果[J]. 太阳能学报, 2022, 43(12): 104-111
Wang D Q, Zhuang Y F, Zhang D D, Cheng J Y, Wang P Z, Zhao S M. Application effect of graded phase-change heat storage and release system in solar greenhouse [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(12): 104-111 (in Chinese)
- [6] Meng F K, Chu Q. Heat storage and release performance experiment of externally hung phase change solar greenhouse in severe cold regions of Northeast China-Taking Fuxin City as an example[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106411
- [7] 李彦荣. 适于温室应用的相变墙板设计与测试[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020
Li Y R. Design and testing of phase change wallboard for greenhouse applications [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [8] 赵梦菲. 日光温室墙体用复合相变材料的研制与应用[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023
Zhao M F. Development and application of composite phase change materials for solar greenhouse walls [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [9] 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
- [10] Berroug F, Lakhal E K, El Omari M, Faraji M, El Qarnia H. Thermal

- performance of a greenhouse with a phase change material north wall[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(11): 3027-3035
- [11] Wu Y P, Wang T. Preparation and characterization of hydrated salts/silica composite as shape-stabilized phase change material via sol - gel process[J]. *Thermochimica Acta*, 2014, 591: 10-15
- [12] 胡琳娜. 石蜡-十六胺/陶粒复合相变储热材料研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022
- Hu L N. Study on paraffin-hexadecylamine/ceramsite composite phase change thermal storage material [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [13] 周莹. 日光温室复合相变保温材料的研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2017
- Zhou Y. Study on composite phase change thermal insulation material in solar greenhouse [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [14] 王宏丽. 相变蓄热材料研发及在日光温室中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013
- Wang H L. Development of phase change materials and application in solar greenhouses[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013 (in Chinese)
- [15] 丁聪. 相变墙板复合储能材料的制备与性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022
- Ding C. Study on preparation and properties of composite energy storage materials for phase change wallboard [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022 (in Chinese)
- [16] 马承伟, 赵淑梅, 程杰宇, 徐微微. 日光温室太阳能热利用技术的能效分析[J]. 农业工程技术, 2017, 37(22): 10-15
- Ma C W, Zhao S M, Cheng J Y, Xu W W. Energy efficiency analysis of solar energy heat utilization technology in solar greenhouse [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2017, 37(22): 10-15(in Chinese)
- [17] 李佳璠, 宋梦圆, 许盟盟, 高丽红, 谢越. 不同有机肥处理对番茄生长、产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(12): 173-180
- Li J F, Song M Y, Xu M M, Gao L H, Xie Y. Influences of different organic fertilizer treatments on growth, yield and quality of tomato[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(12): 173-180 (in Chinese)
- [18] Blanco F F, Folegatti M V. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants[J]. *Horticultura Brasileira*, 2003, 21(4): 666-669

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 王德睿, 中国农业大学硕士研究生, 连续2年获得硕士学业一等奖学金。主要从事农业生物环境与能源工程专业研究, 研究方向为相变材料在日光温室中冬季加温的应用。曾参与国家自然科学基金项目、北京市自然科学基金项目各1项。



通讯作者简介: 王宇欣, 博士, 副教授。主要从事农业生物环境与能源工程专业研究, 主持多项省部级科研项目, 发表论文20余篇, 主编或参编《设施园艺工程与栽培技术》、《固体废物处理处置与资源化》等著作。