

相变蓄热系统对日光温室热环境及草莓产量和品质的影响

李鹏^{1,2}, 张亚红^{1*}, 崔海³, 胡伟^{1,4}, 翟雪宁¹,
张晓丽¹, 王宝华¹, 郭松涛¹, 冯雪¹, 范永申²

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002;

3. 银川能源学院, 永宁 750105; 4. 宜宾学院 川茶学院, 宜宾 644000)

摘要: 为探究相变材料和太阳能空气集热器相结合应用于日光温室梯形墙体后对室内热环境和草莓产量、品质的影响, 对主-被动式蓄热温室 (Tr) 和普通温室 (CK) 的梯形墙体的墙表面温度、根系环境温度、室内外温度、草莓的产量及品质指标进行了测试分析。结果表明, 无论晴阴多云天, Tr 的墙体表面温度、根际温度和室内气温均高于 CK, 且存在显著性差异; Tr 和 CK 的产量分别为 (1 396.60±38.99) kg 和 (969.32±23.78) kg, 与 CK 相比, Tr 增加了 44%。主-被动蓄热系统分别提高了草莓果实中的葡萄糖、果糖、蔗糖含量为 33%、28%和 57%, 同时提高了可溶性糖 17%、糖酸比 75%、维生素 C 30%。该研究结果可为改善温室热环境、提升草莓品质及产量提供参考。

关键词: 日光温室; 墙体; 温度; 草莓; 品质; 产量

中图分类号: S668.404.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)04-0648-07

Effect of phase change thermal storage system on solar greenhouse thermal environment and the yield and quality of strawberry

LI Peng^{1,2}, ZHANG Yahong¹, CUI Hai³, HU Wei^{1,4}, ZHAI Xuening¹, ZHANG Xiaoli¹,
WANG Baohua¹, GUO Songtao¹, FENG Xue¹, FAN Yongshen²

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021;

2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Xinxiang 453002;

3. Yinchuan Energy Institute, Yongning 750105; 4. Sichuan Tea College, Yibin University, Yibin 644000)

Abstract: To explore the effect of the indoor thermal environment on the yield and quality of strawberry, we installed the phase change material and solar air collector in the trapezoidal north wall of solar greenhouse. We analyzed the wall surface temperature, root environment temperature, indoor and outdoor temperature and the difference in the yield and quality indexes of strawberry between trapezoidal wall of active-passive thermal storage greenhouse (abbreviated as Tr) and ordinary greenhouse (abbreviated as CK). The results showed that: the wall surface temperature, root ambient temperature and indoor temperature of Tr were significantly higher than those of CK regardless of any typical weather; the yield in the treatment group (Tr) was (1 396.60±38.99) kg, which was 44% higher than that of CK (969.32±23.78) kg. Active-passive heat storage system could increase the contents of glucose, fructose and sucrose in the strawberry fruit by 33%, 28% and 57%, respectively, and it also increased the contents of soluble sugar by 17%, sugar-acid ratio by 75% and vitamin C by 30%. The results of this study could provide a reference for improving the greenhouse heat environment, and improving the quality and yield of strawberry.

Key words: solar greenhouse; wall; temperature; strawberry; quality; yield

节能型日光温室是在非栽培季节产生更高的产量, 即保证作物所需物候期的最佳温度^[1]。此外, 在温室中提供适宜的温度和湿度有助于减少病虫害和农药的使用^[2]。温室的热环境, 受温室围护结构的

温度和土壤表面辐射温度及空气温度的共同作用^[3], 在冬季冬至日后, 日间太阳辐射不足时, 夜间或甚至日间需要温室加热系统^[1]。在过去的几十年里, 不可再生资源的过度消耗已经导致大气的恶化^[4]。

收稿日期: 2019-12-09

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大项目 (2016BZ0901) 资助。

作者简介: 李鹏, 研究员。E-mail: 1017903990@qq.com

* 通信作者: 张亚红, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: zhyhcau@sina.com

此外, 由于化石资源枯竭, 有必要减少化石燃料消耗的倾向, 并向新能源材料发展^[5-6]。

相变材料作为新型材料, 具有吸热储热功能, 在天气突变的情况下, 可减小温室内部温度骤变, 有利于保持室内环境的温度稳定^[7], 为植株生长提供温度支持。相变材料通过吸收日间太阳辐射, 经过储能可以用于温室夜间放热, 减少冬季温室能耗。Xie 等^[8]将相变材料添加到温室北墙材料里可以增强北墙的热量储存, 夜间放热时长可达 10.3 h。管勇^[9]、王宏丽^[10]等采用不同的相变材料配方, 将所研制的相变材料制砖或者添加到北墙内, 改善温室内的热环境。

太阳能空气集热器是高效利用太阳辐射的新设备, 可以通过空气热交换来加温温室。Lazaar 等^[11]采用了真空管集热器对温室进行供暖, 可使温室内部升高 2℃, Joudi 和 Farhan^[12]的研究验证了太阳能空气集热器系统可提供温室日常供暖需求的 46%。Attar 等^[13]使用带有毛细管聚丙烯换热器的平板太阳能集热器 (FPC) 来加热突尼斯的温室, 可以将冬季 1 000 m³ 温室的加热成本降低 51.8%, 并增加温室的内部气温 5℃。但以上均用单一材料或设备来改善温室热环境。

土质梯形墙体日光温室因其具有良好的保温性和较高的性价比等优点, 在我国西北地区得到了大面积推广^[14-17], 本课题组长期针对西北不同类型的温室进行环境调控研究。温室草莓冬季种植通常采用燃料加温的方式, 而运用太阳能蓄热系统为草莓温室供暖的研究较少。鉴于此, 作者采用在土质梯形墙体的日光温室使用新型混合相变材料和太阳能空气集热器相结合的主-被动式蓄热系统, 试验种植草莓, 分析温室热环境、草莓的品质和产量, 旨在为冬季草莓种植提供适宜温度环境, 草莓提质增产及能源节能减排提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验温室

试验日光温室位于宁夏贺兰县宁夏园艺产业园区 (38°55'N, 106°35'E)。供试温室为西北试-IV 型日光温室, 坐北朝南, 东西延长, 长度 80 m, 跨度 10.0 m, 脊高 4.3 m, 后墙高 3.7 m, 底座宽 2.5 m, 收口 0.9 m, 东西山墙及北墙中部为 1.5 m 厚土梯形捣墙。温室前屋面采用 PO 型长寿无滴膜, 夜间前屋面覆保温被保温, 采用电动机卷帘机。

1.2 测试方法

1.2.1 试验设计 温室沿长度方向等分成 2 个温

室区域, 分别为主-被动式相变蓄热温室 (Tr) 和普通温室 (CK), 2 温室用间距 500 mm 的两层 PO 膜隔断 (采用钢架结构、卡槽、卡簧、棚膜等对温室进行空间分隔)。相变温室的北墙上先采用喷浆工艺将相变材料 (由北京工业大学提供, 主要成分: 石蜡、高密度聚乙烯)、炭黑、水泥砂浆按一定比例用混凝土喷涂机混匀喷涂, 参考相关相变材料在温室内北墙内表面附着厚度的研究^[14-17], 确定以 40 mm 蓄放热性能较好且经济性较高, 故喷涂厚度 40 mm, 通过用预制模板做成 40 mm × 40 mm 木桩框住温室北墙内表面区域进行喷涂, 然后人工夯实抹平。然后在此基础上, Tr 墙体每间隔 2 m 加设沿梯形墙体斜面墙体向内深挖 10 cm 深的竖直空气通道, 上下接口由 200 mm 的 PVC 管连接出来, 深挖的竖直墙体空气通道通过外附石膏板再喷涂 40 mm 相变混合材料密封, 竖直空气通道接口与风机用 200 mm PVC 管连接, 为防止 PVC 管散热用黑色防水保温海绵包裹, 然后风机的管道与外设太阳能空气集热器 (由广西尚迪科技有限公司提供) 相连并用风机进行墙体空气腔的内部空气循环, 形成主-被动式相变蓄热墙体系统。系统剖面图见图 1, 风机运行时间为每日 10:00—16:00。

主-被动式相变蓄热温室 (Tr) 和普通温室 (CK) 内均种植幸香草莓 (由辽宁丹东农科院提供), 两温室田间管理操作相同, 测试期间草莓处于花期到盛果期。每日 12:00—14:00 为通风时间。

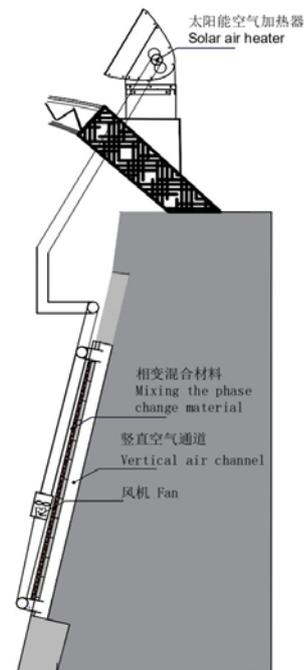


图 1 主-被动式相变蓄热墙体系统

Figure 1 Active-passive phase change in thermal storage wall system

1.2.2 环境测试点分布 墙体测点位于两温室中央,距地面垂直高度 1.85 m 处(墙体中部),墙表面 0 mm 安装温度探头和室内气温测点距后墙 5.0 m,东西方向均为 Tr,CK 温室中央,高 1.5 m。室外气温测点高 1.5 m。土壤温度测点为距土壤表面深 10 cm 处。

1.2.3 测试时间及仪器 (1) 测定时间为 2018 年 2 月 1 日至 2018 年 2 月 28 日,共计 28 d。

(2) 仪器为美国 Campbellsci 公司生产 CR10X-2M、CR800 数据采集器和相关传感器,数据每 10 min 采集 1 次。

1.2.4 草莓果实产量和品质 试验于 2 月 20 日在每个分温室东部、中部和西部分别随机采取着色面积在 80%左右的果实样品,测量 1 m² 果实产量、单果重、果实数量、优质果数和畸形果数,计算平均单果重、优质果率和畸形果率,公式分别为 (1) (2) (3);

果实的可滴定酸、可溶性固形物、可溶性糖含量、维生素 C、糖酸比、葡萄糖、果糖、蔗糖、淀粉和果实硬度测定方法如下:采用酸碱中和滴定法测定可滴定酸含量,采用 WYT-32 手持折光仪测定可溶性固形物含量,采用葱酮比色法测定可溶性糖含量,采用钼蓝比色法测定维生素 C 含量,采用

公式 (4) 计算可得糖酸比,测定葡萄糖、果糖含量,蔗糖含量参考齐红岩等^[21]的方法,采用 KM-1 型果实硬度计测定果实硬度。

$$\text{平均单果重 (g)} = \frac{\text{总个数}}{\text{总产量}} \quad (1)$$

$$\text{优质果率 (单果重} > 25 \text{ g)} = \left(\frac{\text{优质果个数}}{\text{总个数}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{畸形果率} = \left(\frac{\text{畸形果个数}}{\text{总个数}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

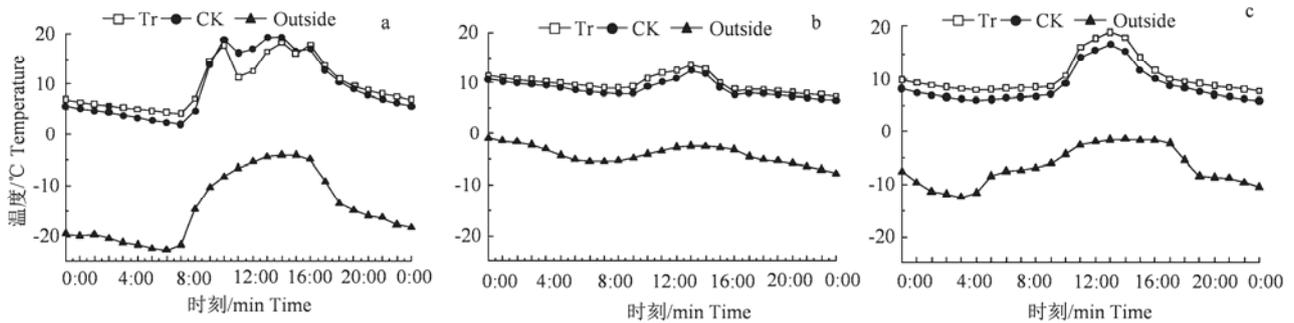
$$\text{糖酸比} = \left(\frac{\text{可溶性糖含量}}{\text{可滴定酸含量}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

1.3 数据分析与处理 采用 Excel 软件处理试验数据,采用 R 软件对数据进行 One-way ANOVA 方差分析,并用 LSD 法进行多重比较,采用 Origin 9.1 绘图。

2 结果与分析

2.1 典型天气温室环境变化

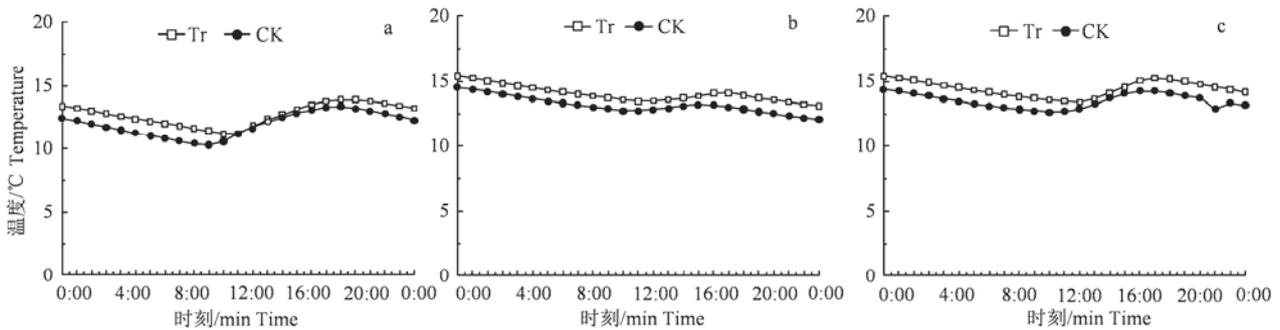
2.1.1 典型天气温室室内外气温变化 图 2 显示了测试期间典型晴天 (2018-02-03 0:00 至次日 0:00)、典型阴天 (2018-02-09 0:00 至次日 0:00)、典型多云天 (2018-02-20 0:00 至次日 0:00) 温室室内外气温变化。



a. 晴天 Sunny day (2018-02-03); b. 阴天 Overcast(2018-02-09); c. 多云天 Cloudy (2018-02-20)

图 2 典型天气温室室内外气温变化

Figure 2 Changes of greenhouse indoor and outdoor temperature in typical weather



a. 晴天 Sunny day (2018-02-03); b. 阴天 Overcast(2018-02-09); c. 多云天 Cloudy (2018-02-20)

图 3 典型天气温室室内土壤温度变化

Figure 3 Changes of greenhouse soil temperature in typical weather

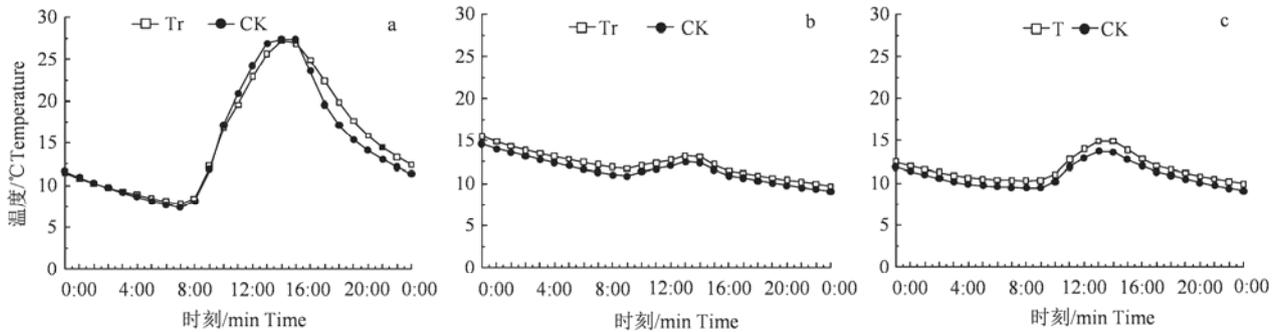
由图 2a 可知,典型晴天 (2018-02-03) 测定期间 Tr 的气温波动范围是 4.23~18.29℃,CK 的

气温波动范围是 2.09~19.38℃。典型晴天 Tr、CK 及室外的平均气温分别为 9.89、9.49 和 -14.32℃,

Tr 平均气温比 CK 高 0.40°C , Tr、CK 及室外的夜间平均气温 7.43 、 6.15 和 -18.10°C , Tr 夜间平均气温比 CK 高 1.28°C , Tr、CK 及室外的夜间平均最低气温分别为 4.23 、 2.09 和 -22.77°C , Tr 夜间最低平均气温比 CK 高 2.14°C 。

由图 2b 可知, 典型阴天 (2018-02-09) 测定期间 Tr 的气温波动范围是 $7.34\sim 13.48^{\circ}\text{C}$, CK 的

气温波动范围是 $6.58\sim 12.50^{\circ}\text{C}$ 。典型阴天 Tr、CK 及室外的平均气温分别为 9.85 、 8.90 和 -4.14°C , Tr 平均气温比 CK 高 0.95°C , Tr、CK 及室外的夜间平均气温为 9.13 、 8.33 和 -4.67°C , Tr 夜间平均气温比 CK 高 0.80°C , Tr、CK 及室外的夜间平均最低气温分别为 7.34 、 6.58 和 -7.82°C , Tr 夜间最低平均气温比 CK 高 0.76°C 。



a. 晴天 Sunny day (2018-02-03); b. 阴天 Overcast(2018-02-09); c. 多云天 Cloudy (2018-02-20)

图 4 典型天气温室室内墙体表面温度变化

Figure 4 Changes of greenhouse wall surface temperature in typical weather

由图 2c 可知, 典型多云天 (2018-02-20) 测定期间 Tr 的气温波动范围是 $7.83\sim 19.16^{\circ}\text{C}$, CK 的气温波动范围是 $5.98\sim 16.78^{\circ}\text{C}$ 。典型多云天 Tr、CK 及室外的平均气温分别为 10.65 、 8.79 和 -6.78°C , Tr 平均气温比 CK 高 1.86°C , Tr、CK 及室外的夜间平均气温 8.80 、 7.05 和 -8.71°C , Tr 夜间平均气温比 CK 高 1.75°C , Tr、CK 及室外的夜间平均最低气温分别为 7.83 、 5.98 和 -12.47°C , Tr 夜间最低平均气温比 CK 高 1.85°C 。

2.1.2 典型天气温室室内土壤温度变化

图 3 显示了测试期间典型晴天 (2018-02-03 0:00 至次日 0:00)、典型阴天 (2018-02-09 0:00 至次日 0:00)、典型多云天 (2018-02-20 0:00 至次日 0:00) 温室内土壤 10 cm 深处温度变化即典型天根际温度变化。

由图 3a 可知, 典型晴天 (2018-02-03) 测定期间 Tr 的根际温度始终高于 CK。典型晴天 Tr、CK 的日平均根际温度分别为 12.70 和 11.94°C , Tr 日平均根际温度比 CK 高 0.96°C , Tr、CK 的夜间平均根际温度 13.11 和 12.21°C , 相差 0.9°C , Tr、CK 根际最高温度分别为 13.90 和 13.34°C , Tr 根际最高温度比 CK 高 0.56°C 。Tr、CK 根际最低温度分别为 11.17 和 10.29°C , 相差 0.88°C 。

由图 3b 可知, 典型阴天 (2018-02-09) 测定期间 Tr 的根际温度始终高于 CK。典型晴天 Tr、CK 的日平均根际温度分别为 14.01 和 13.14°C ,

Tr 日平均根际温度比 CK 高 0.87°C , Tr、CK 的夜间平均根际温度 14.12 和 13.17°C , 相差 0.95°C , Tr、CK 根际最高温度分别为 15.37 和 14.52°C , Tr 根际最高温度比 CK 高 0.85°C 。Tr、CK 根际最低温度分别为 13.08 和 12.04°C , 相差 1.04°C 。

由图 3c 可知, 典型多云天 (2018-02-20) 测定期间 Tr 的根际温度始终高于 CK。典型晴天 Tr、CK 的日平均根际温度分别为 14.43 和 13.49°C , Tr 日平均根际温度比 CK 高 0.94°C , Tr、CK 的夜间平均根际温度 14.72 和 13.64°C , 相差 1.08°C , Tr、CK 根际最高温度分别为 15.37 和 14.37°C , Tr 根际最高温度比 CK 高 1.00°C 。Tr、CK 根际最低温度分别为 13.39 和 12.65°C , 相差 0.74°C 。

2.1.3 典型天气温室室内墙体表面温度变化 图 4 显示了测试期间典型晴天 (2018-02-03 0:00 至次日 0:00)、典型阴天 (2018-02-09 0:00 至次日 0:00)、典型多云天 (2018-02-20 0:00 至次日 0:00) 温室内墙体表面温度变化。

由图 4a 可知, 与 CK 温室墙体相比, Tr 温室的墙体表面上午升温较慢, 下午降温较慢, 夜间温度较高。典型晴天 Tr 和 CK 的墙体表面日平均温度分别为 15.39 和 14.94°C , Tr 的墙体表面日平均温度比 CK 高 0.45°C 。各墙体表面温度均在 15:00 左右达到最大值, Tr 和 CK 墙体表面温度分别为 27.29 和 27.40°C 。两温室墙体表面

表面温度最低值分别为 7.78 和 7.35℃, Tr 墙体内部表面温度比 CK 的高 0.43℃。Tr 和 CK 的夜间墙体内部表面平均温度为 12.96 和 11.97℃, Tr 夜间墙体内部表面平均温度比 CK 高 0.99℃。

由图 4b 可知, Tr 温室的墙体内部表面温度始终高于 CK 温室墙体。典型阴天 Tr 和 CK 的墙体内部表面日平均温度分别为 12.25 和 11.54℃, Tr 的墙体内部表面日平均温度比 CK 高 0.71℃。阴天白天各墙体内部表面温度均在 14:00 左右达到最大值, Tr 和 CK 墙体内部表面温度分别为 13.20 和 12.53℃, 相差 0.67℃。两温室墙体内部表面温度最低值分别为 9.69 和 9.07℃, Tr 墙体内部表面温度比 CK 的高 0.62℃。Tr 和 CK 的夜间墙体内部表面平均温度为 12.01 和 11.32℃, Tr 夜间墙体内部表面平均温度比 CK 高 0.69℃。

由图 4c 可知, 与 CK 温室墙体相比, Tr 温室的墙体内部表面上午升温较慢, 下午降温较慢, 夜间温度较高, Tr 温室的墙体内部表面温度始终高于 CK 温室墙体。典型晴天 Tr 和 CK 的墙体内部表面日平均温度

分别为 11.62 和 10.80℃, Tr 的墙体内部表面日平均温度比 CK 高 0.82℃。Tr 墙体内部表面温度在 15:00 左右达到最大值, Tr 墙体内部表面温度在 14:00 左右达到最大值, Tr 和 CK 墙体内部表面温度分别为 14.88 和 13.69℃, 相差 1.19℃。两温室墙体内部表面温度最低值分别为 9.88 和 9.06℃, Tr 墙体内部表面温度比 CK 的高 0.82℃。Tr 和 CK 的夜间墙体内部表面平均温度为 10.97 和 10.24℃, Tr 夜间墙体内部表面平均温度比 CK 高 0.73℃。

2.2 两个试验温室的草莓前期产量

由 Tr 和 CK 温室草莓的前期产量变化(表 1)可知, 与 CK 相比, Tr 温室的单果重、优质果率、亩产量均有所增加且差异性极显著 ($P<0.01$), 畸形果率有所减少且差异性极显著 ($P<0.05$); Tr 的单果重、优质果率、亩产量的增幅分别为 53.17%、60.65% 和 44.08%; Tr 的畸形果率的降幅为 55.98%。综上, Tr 处理在提高草莓前期产量方面效果最佳, 每亩产量达(1 396.60±38.99) kg。

表 1 两个试验温室的草莓前期产量

Table 1 Early-yield of strawberries in two trial greenhouses

组别 Group	单果重/g Single fruit weight	优质果率/% High quality fruit rate	畸形果率/% Malformed fruit rate	亩产量/kg Yield
Tr	17.14±0.65 ^{aA}	19.76±1.15 ^{aA}	3.35±0.81 ^{aA}	1 396.60±38.99 ^{aA}
CK	11.19±0.12 ^{bB}	12.30±0.46 ^{bB}	7.61±0.63 ^{bA}	969.32±23.78 ^{bB}

注: 同列不同小写字母表示 $P<0.05$, 同列不同大写字母 $P<0.01$, 结果为 $M\pm SE$ 。下同

Note: Different lowercase letters in the same column mean $P<0.05$, different capital letters in the same column mean $P<0.01$, and the results were calculated as $M\pm SE$. The same below

表 2 两个试验温室的草莓前期果实品质

Table 2 Fruit quality of strawberry grown in the two trial greenhouses at the early stage

组别 Group	可溶性固形物含量/% Soluble solid content	可溶性糖含量/% Soluble sugar content	可滴定酸含量/% Titrate acid content	糖酸比 Sugar-acid ratio	维生素 C 含量/ $mg\cdot 100\ g^{-1}$ Vitamin C content	硬度/kg Hardness
Tr	9.57±0.06 ^{aA}	20.89±0.99 ^{aA}	0.25±0.01 ^{bB}	82.79±1.67 ^{aA}	106.04±4.25 ^{aA}	0.73±0.01 ^{aA}
CK	8.60±0.04 ^{bB}	17.89±0.54 ^{bA}	0.38±0.01 ^{aA}	47.30±2.17 ^{bB}	81.38±3.46 ^{bB}	0.69±0.01 ^{bA}

表 3 两个试验温室的草莓前期果实糖组分含量

Table 3 The contents of sugar components in earlier-stage fruit of strawberry grown in the two trial greenhouses

组别 Group	糖含量/ $mg\cdot g^{-1}$ Sugar content (FW)				总糖 Total sugar	淀粉含量/% Starch content
	果糖 Fructose	葡萄糖 Glucose	蔗糖 Sucrose	总糖 Total sugar		
Tr	41.85±0.08 ^{aA}	16.25±0.69 ^{aA}	38.81±0.92 ^{aA}	96.91±1.57 ^{aA}	3.17±0.02 ^{aA}	
CK	32.57±0.50 ^{bB}	12.19±0.95 ^{bA}	24.61±0.50 ^{bB}	69.36±0.16 ^{bB}	2.70±0.10 ^{bB}	

2.3 两个试验温室的草莓前期果实品质

2.3.1 两个试验温室的草莓前期果实品质 表 2 显示了 Tr 和 CK 温室草莓前期果实可溶性固形物含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量、糖酸比维生

素 C 含量、硬度等品质指标的测试结果。

由表 2 可知, 与 CK 相比, Tr 温室的草莓果实处理的可溶性固形物含量、糖酸比、维生素 C 含量均差异性呈极显著, 分别增幅 11.28%、75.03%

和 30.30%; Tr 温室的草莓果实处理的可溶性糖含量、硬度均差异性呈显著, 分别增幅 16.77% 和 5.80%; Tr 温室的草莓果实处理的可滴定酸含量差异性呈极显著, 降幅 34.21%。

2.3.2 两个试验温室的草莓前期果实糖组分含量

表 3 显示了 Tr 和 CK 温室草莓前期果实果糖含量、葡萄糖含量、蔗糖含量、总糖含量、淀粉含量等草莓品质的糖组分指标的测试结果。

由表 3 可知, 与 CK 相比, Tr 温室的草莓果实中的果糖含量、蔗糖含量、总糖含量和淀粉含量均呈极显著差异, 增幅分别为 28.49%、57.70%、39.72% 和 17.41%; Tr 温室中的草莓果实中的葡萄糖含量差异显著, 增幅为 33.31%。

3 讨论与结论

大多数温室作物健康生长的热环境需求为: 日间 20~30℃ 和夜间 14~18℃。若温室内的温度较低时, 则需要借助加热系统为温室提高气温^[1]。草莓在物候期对温度的要求较为严格^[22], 其生物学零度为 5℃, 根系最适宜生长温度为 15~20℃, 光合作用最适宜温度为 15~25℃。若草莓种植在主-被动式相变蓄热系统的温室可以基本满足栽培要求。

相变材料能在白天不显著降低室温的条件下, 吸收储存大量太阳辐射能, 夜间通过放热明显提高温室气温, 这与周莹^[24]、吴薇^[25]等研究结果一致。夜间温度的提高可有效避免低温对作物的伤害。

本试验结果表明, 通过主-被动式蓄热系统适当提高作物根际温度可以促进草莓的营养生长。Kim 等^[26]研究表明, 温度对养分的吸收影响显著, 在一定范围内, 养分的吸收随温度升高而增加。在本试验中, 通过主-被动式蓄热系统加温提高了草莓根系对养分的吸收能力, 促进了植株的营养生长, 提高了早期产量和优质果率。

节能日光温室的蓄热是通过结构、材料、设备的单一或协同应用来最大化利用太阳能为室内提供热能^[27], 主-被动式相变蓄热温室是通过改善墙体的主动蓄热而做出的一种提升方案。

通过对两温室的环境、草莓前期产量和品质的测试对比分析, 可以得出以下结论。

(1) 与对照温室 (CK) 相比, 主-被动式蓄热温室 (Tr) 在典型晴天, 室内气温、土壤温度、墙体内表面温度的日平均温度分别高 0.40、0.76 和 0.45℃, 夜间平均温度分别高 1.28、0.91 和 0.99℃; 典型阴天, Tr 的室内气温、土壤温度、墙体内表面

温度的日平均温度分别高 0.96、0.87 和 0.71℃, 夜间平均温度分别高 0.80、0.95 和 0.70℃; 典型多云天, Tr 的室内气温、土壤温度、墙体内表面温度的日平均温度分别高 1.86、0.94 和 0.82℃, 夜间平均温度分别高 1.75、1.08 和 0.74℃。试验结果表明相变蓄热混合材料发挥削峰填谷的作用, 增加原始梯形墙体的蓄放热性能力, 提升温室内热环境。

(2) 试验期间, 与 CK 相比, Tr 温室中的草莓初期单果重、亩产量分别高 5.95 和 427.28 kg, 优质果率高 7.46%, 畸形果率低 4.26%。

(3) 与 CK 相比, Tr 温室的草莓果实中的可溶性固形物含量、糖酸比、维生素 C 含量、可溶性糖含量和硬度均呈极显著或显著差异, Tr 温室的草莓果实中的可滴定酸含量有所降低; Tr 温室的草莓果实中的葡萄糖含量、果糖含量、蔗糖含量、总糖含量及淀粉含量均呈极显著或显著差异。

参考文献:

- [1] SETHI V P, SHARMA S K. Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications[J]. *Sol Energy*, 2008, 82(9): 832-859.
- [2] MOCCALDI L A, RUNKLE E S. Modeling the effects of temperature and photosynthetic daily light integral on growth and flowering of *Salvia splendens* and *Tagetes patula*[J]. *J Am Soc Hortic Sci*, 2007, 132(3): 283-288.
- [3] 管勇, 陈超, 李琢, 等. 相变蓄热墙体对日光温室热环境的改善[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 194-201.
- [4] DABIRI S, KHODABANDEH E, POORFAR A K, et al. Parametric investigation of thermal characteristic in trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator[J]. *Energy*, 2018, 153: 17-26.
- [5] DABIRI S, HASHEMI M, RAHIMI M, et al. Design of an innovative distributor to improve flow uniformity using cylindrical obstacles in header of a fuel cell[J]. *Energy*, 2018, 152: 719-731.
- [6] MEHRPOOYA M, AKBARPOUR S, VATANI A, et al. Modeling and optimum design of hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine power plants[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2014, 39(36): 21196-21214.
- [7] 鲍恩财, 申婷婷, 张勇, 等. 装配式主动蓄热墙体日光温室热性能分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 178-186.
- [8] XIE J C, WANG W, SANG P F, et al. Experimental and numerical study of thermal performance of the PCM wall with solar radiation[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 177: 443-456.
- [9] 管勇, 陈超, 凌浩恕, 等. 日光温室三重结构相变蓄热墙体传热特性分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 166-173.
- [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.
- [11] LAZAAR M, BOUADILA S, KOOLI S, et al. Comparative study of conventional and solar heating systems under tunnel Tunisian greenhouses: Thermal performance and economic analysis[J]. Sol Energy, 2015, 120: 620-635.
- [12] JOUDI K A, FARHAN A A. Greenhouse heating by solar air heaters on the roof[J]. Renew Energy, 2014, 72: 406-414.
- [13] ATTAR I, NAILI N, KHALIFA N, et al. Parametric and numerical study of a solar system for heating a greenhouse equipped with a buried exchanger[J]. Energy Convers Manag, 2013, 70: 163-173.
- [14] 杨建军, 邹志荣, 张智, 等. 西北地区日光温室土墙厚度及其保温性的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 180-185.
- [15] 白青, 张亚红, 封美琦, 等. 日光温室土质梯形截面墙体温度与热流量的测定分析[J]. 北方园艺, 2017(7): 58-64.
- [16] 张亚红, 白青, 封美琦, 等. 日光温室土质梯形墙体与地表太阳辐射测定分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 164-172.
- [17] 李鹏, 张亚红, 白青, 等. 基于日光温室相变材料的梯形墙体热特性分析[J]. 中国农业气象, 2019, 40(10): 620-629.
- [18] SANTAMOURIS M, BALARAS C A, DASCALAKI E, et al. Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes[J]. Solar Energy, 1994, 53(5): 411-426.
- [19] GUAN Y, BAI J, GAO X T, et al. Thickness determination of a three-layer wall with phase change materials in a Chinese solar greenhouse[J]. Procedia Eng, 2017, 205: 130-136.
- [20] 时盼盼, 吕建, 杨洪兴, 等. 蓄热层构筑方式对日光温室复合相变墙体蓄热性能的影响[J]. 太阳能学报, 2018, 39(6): 1511-1518.
- [21] 齐红岩, 李天来, 张洁, 等. 亏缺灌溉对番茄蔗糖代谢和干物质分配及果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1045-1049.
- [22] 张红菊. 北方果树优质化栽培技术[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2011.
- [23] 王尚堃, 蔡明臻, 晏芳. 北方果树露地无公害生产技术大全[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.
- [24] 周莹, 王双喜. 复合相变储能保温砂浆在日光温室中的应用效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 190-196.
- [25] 吴薇, 陈黎, 王晓宇, 等. 蓄能型太阳能热泵用复合相变材料热性能分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 206-212.
- [26] KIM S E, KIM Y S, SIM S Y. Root-zone temperature control of tomato plant cultivated in perlite bag during summer season[J]. Korean J Hortic Sci Technol, 2011, 29(2): 102-109.
- [27] 鲍恩财, 曹晏飞, 邹志荣, 等. 节能日光温室蓄热技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 1-14.