

网络出版时间:2019-07-10 10:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.01.008
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190710.1033.016.html

日光温室主动蓄放热冠层增温系统性能研究

马前磊^{1,2}, 杨其长^{1,2}, 柯行林^{1,2}, 张 义^{1,2}, 和永康^{1,2}, 展正朋^{1,2}, 靳云飞³

(1 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2 农业农村部 设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081; 3 北京京鹏环球科技股份有限公司, 北京 100081)

[摘 要] 【目的】设计日光温室主动蓄放热冠层增温系统(Active heat storage-release system for canopy warming, AHSCW)并进行实地试验,分析该系统对番茄冠层的增温效果,为进一步探讨主动蓄放热热能的高效应用方式和作物局部增温系统的设计提供参考。【方法】在第六代主动蓄放热系统基础上设计 AHSCW,以太阳能为热源,白天通过水循环将太阳能以热能的形式收集于蓄热水池内,夜间通过冠层增温管道释放热量,对番茄冠层进行局部增温。以使用 AHSCW 的日光温室为试验温室,未加温的日光温室为对照温室,通过测定太阳辐射强度、番茄冠层空气温度、水温及水泵耗电量参数及不同时期番茄的株高、茎粗和产量,对系统的增温效果进行测试与分析。【结果】白天 AHSCW 的蓄热量为 166~194 MJ,夜间放热量为 129~142 MJ,能量利用效率为 67%~86%;该系统能够提高番茄冠层区域气温 1.4~3.0 °C;AHSCW 温室果实产量为 1.14 kg/m²,是对照温室(0.64 kg/m²)的 1.77 倍。【结论】AHSCW 可以明显提高番茄冠层气温,保证番茄的越冬生产,促进番茄生长,增加其产量并可使果实提前成熟上市。

[关键词] 日光温室;主动蓄放热系统;冠层增温;番茄栽培

[中图分类号] S214.3

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2020)01-0057-08

Performance of an active heat storage-release system for canopy warming in solar greenhouse

MA Qianlei^{1,2}, YANG Qichang^{1,2}, KE Xinglin^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2},
HE Yongkang^{1,2}, ZHAN Zhengpeng^{1,2}, JIN Yunfei³

(1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;

3 Beijing Kingpeng International Hi-Tech Corporation, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objective】An active heat storage-release system for canopy warming (AHSCW) was designed and tested in a Chinese solar greenhouse (CSG) to provide reference for further exploring efficient energy application way in active heat storage-release system (AHS) and designing crop heating system. 【Method】The AHSCW used solar energy as heat source and was based on the sixth generation of AHS. It was placed on the north wall to collect the heat energy by water recycling during the day and heat was released by the pipes through the canopy at night to heat tomato canopy partially. One CSG without this system was used as control, the heating effect of AHSCW was analyzed by testing parameters including solar radiation intensity, canopy air temperature, water temperature and pump power consumption as well as tomato plant height, stem diameter and yield in different periods. 【Result】The daytime heat storage of AH-

〔收稿日期〕 2018-12-21

〔基金项目〕 中央级科研院所基本科研业务费专项(Y2019XK21-03); 科技部国际科技合作专项(KY201702008)

〔作者简介〕 马前磊(1996-),男,山东济宁人,在读硕士,主要从事设施农业环境工程研究。E-mail:maqianlei1030@qq.com

〔通信作者〕 张 义(1981-),女,吉林永吉人,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事设施园艺环境工程研究。
E-mail:zhangyi03@caas.cn

SCW was 166—194 MJ, the nighttime heat energy released was 129—142 MJ, and the energy utilization efficiency was 67%—86%. The canopy temperature of tomato was increased by 1.4—3.0 °C. The yield of tomatoes in AHSCW greenhouse was 1.14 kg/m², which was 1.77 times than that of the control (0.64 kg/m²). 【Conclusion】 Application of AHSCW increased air temperature of canopy, avoided low temperature damage, enhanced the production and advanced the mature of tomatoes.

Key words: greenhouse; active heat storage-release system; canopy warming; tomato cultivation

日光温室是我国首创的温室结构形式,其特征是后墙可蓄热保温以及前坡设保温被保温,但因墙体材料传热特性和热容量的限制,后墙蓄积的热量有限,在冬季夜晚仍存在温度偏低的问题。以太阳能为能源对日光温室进行加温的方式一直受到研究者的关注。马承伟等^[1]设计了地中热交换系统,通过空气土壤间的热量交换,将太阳热能储存于土壤中,夜间释放热量进行温室增温,该系统用于连栋温室,白天可使气温降低 6~8 °C,夜间可使气温升高 4~5.5 °C。蒋绿林等^[2]设计了温室用太阳能热泵土壤蓄能系统,利用平板式太阳能集热板采集太阳能,通过热泵运行利用水循环将热量传递给土壤,最终实现土壤及空气温度的提升,该系统在不同天气工况下,可提升气温 3~8 °C。戴巧利等^[3]设计了主动式太阳能空气集热-土壤蓄热温室增温系统,集热系统由平板型空气集热器组成,土壤蓄热系统由埋深 80 cm 的 PVC 散热管组成,利用风机进行气流的转运,实现热量在空气与土壤之间的交换,该系统白天可提高气温 3.3 °C,提高地温 2.5 °C,夜间可提高气温 3.8 °C,提高地温 2.3 °C。此外,苏伟等^[4]、刘鹏^[5]在太阳能与地源热泵相结合方面,也进行了一系列的复合系统设计。马承伟等^[6]利用日光温室中圆管焊接而成的屋架,将圆管连通组合成通水管网,从而在白天收集太阳热能储存于水体中,夜间释放热量,提高日光温室气温。另外,相变材料由于具有储能密度高、相变温度选择范围较宽、温度易控制等优点,学者们也对其在温室方面的应用进行了不少的研究^[7-9]。

张义等^[10]研发了主动蓄放热系统,将日光温室墙体的被动蓄热改为热能主动蓄积,提高了温室的热能蓄积能力,实现了温室的温湿度环境可调控,该方法自 2008 年提出以来,所用系统已更新换代 6 次^[11-16]。最新一代主动蓄放热系统是 2017 年柯行林等^[16]设计研发的金属翅片式主动蓄放热系统,该系统采用铝合金一体拉制成型,集热板由 2 个水道和翅片组成;这次革新使得集热板更加轻薄化,组装方便,耐久性显著提高。前期研究主要是将主动蓄

放热系统的热量用于空气与根际加温,而相较于空气加温,提高作物根际温度更有利于增产。在日光温室空气整体加温过程中,热能利用效率偏低^[16],有研究表明,番茄冠层以及分生组织对于温度变化更为敏感,对番茄冠层进行局部增温,能有效改善作物品质,提高能量利用率^[17]。为了进一步提高主动蓄放热系统的热能利用效率,在第六代主动蓄放热系统基础上,本试验设计冠层增温系统,将主动蓄放热热能用于冠层区域增温,以使用该系统的日光温室为试验温室,未加温日光温室为对照温室,通过比较 2 种温室番茄冠层(顶部区域)的空气温度及番茄株高、茎粗、产量等指标来评价系统的增温效果,以期为系统性能的优化提供参考。

1 主动蓄放热冠层增温系统工作原理

主动蓄放热冠层增温系统(Active heat storage-release system for canopy warming, AHSCW)的原理是,白天水流流经集热板时吸收太阳辐射能,并将热量储存于地下蓄热水池中;夜间利用水循环通过悬挂于作物冠层顶部的增温管道释放热量实现局部增温。

1.1 系统组成

AHSCW 由 3 个部分组成:集热系统、蓄热水池及冠层增温系统,如图 1 所示。

1)集热系统。包括集放热板、潜水泵、供回水管路。集放热板为金属材质,每个集放热板都由 6 个铝合金片组合而成,有 2 个直径为 6 mm 的水流通道;该集热系统共由 26 个集放热板组成,每个集放热板宽 1.0 m,高 1.8 m,集放热板的总面积占后墙面积的 60%,集放热板安置方向垂直于地面,其底部距离地面 60 cm。潜水泵功率 1.1 kW,额定流量 15 m³/h。供水管路与回水管路外加聚氨酯泡沫保温套管。集放热板中的水流方向为自下而上,有效地避免了水流从集放热板上方流入而导致的水流下降速度过快、不易控制、易产生气泡等问题,集放热板每个水流通道内的水流上升速度均一旦较慢,水流均匀,吸热更加充分。

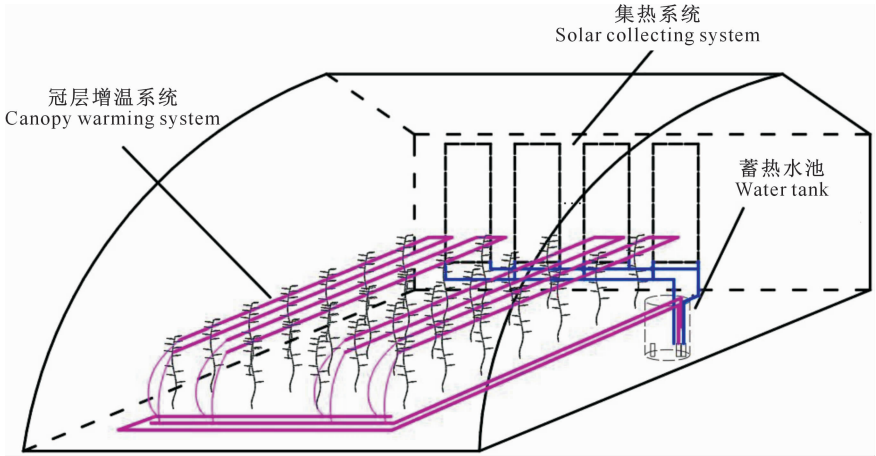


图 1 主动蓄放热冠层增温系统(AHSCW)示意图

Fig. 1 Schematic diagram of active heat storage-release system for canopy warming (AHSCW)

2)蓄热水池。蓄热水池的有效蓄水体积为 4.4 m³,为减少热量散失,在蓄热水池的底部及四周用 40 mm 厚的挤塑板进行保温处理。

3)冠层增温系统。冠层增温系统包括潜水泵、冠层增温管道、供回水管路。潜水泵功率为 1.1 kW,额定流量 15 m³/h。冠层增温管道采用外径 20 mm、壁厚 2.8 mm 的 PPR 给水管,利用铝合金挂链

以及弯钩,将冠层增温管道布置于番茄植株的冠层顶部下方约 20 cm 处,增温管道的位置可根据作物的生长情况通过调节弯钩进行适时调整。供回水管外加聚氨酯泡沫保温套管。冠层增温管道的布置采用同程式管道布置方式,如图 2 所示,各并联的增温管道水路流程相等,每垄增温管道中的流量分配更为均衡,加热均匀性可以得到保障。

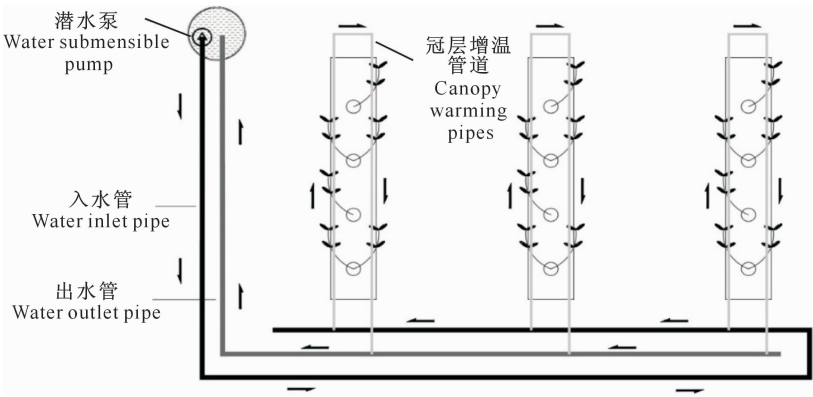


图 2 同程式冠层增温管道布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reverse return mode for canopy heating pipes

1.2 系统运行模式

AHSCW 的运行模式为:白天 09:00—15:00,集热系统运行,集放热板开始集热,并将热量储存于蓄热水池中;夜间 00:00—08:00,冠层增温系统运行,进行冠层局部放热增温。

2 试验方案

试验于 2017-11-22—2018-03-16 在北京市顺义区大孙各庄镇中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所试验基地(40°13'N,116°65'E)内进行。选用 2 栋日光温室进行试验,其中一栋安装 AHSCW,作为试验温室;另一栋无增温措施,作为对照温室。

2 栋日光温室均为轻简装配式主动蓄能型日光温室^[18],跨度 10 m,长度 30 m,脊高 4.5 m,后墙净高 3 m,前屋面角 27°,后坡仰角 40°,前坡底脚 70°。供试温室面积为 300 m²。

2.1 供试植物的栽培

试验期间,日光温室内种植的作物为番茄,品种为瑞克斯旺(中国)公司生产的瑞粉 882,定植时间为 2017-11-10,此时番茄幼苗处于“两心一叶”期。垄向为南北走向,垄距 1.55 m,采用起垄内嵌式基质栽培^[19]。每组处理 18 垄,每垄种植 2 行,共 36 行。每垄放置 7 个基质袋,在每个基质袋上方开四个口,按照单双间苗的方法进行番茄幼苗定植,保证

两侧番茄植株均匀分布,每垄定植 42 株苗。

2.2 指标的测定及系统性能分析

2.2.1 环境参数的测定 选取室外气象条件典型(连续晴天)的 2018-01-23—01-25 共 3 d,对 2 个温室的太阳辐射强度、冠层空气温度、水泵耗电量及水温数据进行测定。其中,太阳辐射强度采用美国坎贝尔公司的 CMP3 型太阳辐射传感器测定。温度采用铜-康铜 T 型热电偶(加装自然通风防辐射罩)测定,测量精度 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用美国坎贝尔公司生产的 CR1000 数据采集仪自动记录太阳辐射强度值

以及热电偶采集的温度值,每 10 min 采集 1 次数据。水泵耗电量采用德力西电气有限公司生产的电能表记测,测量精度为 $\pm 0.2\%$ 。

(1)冠层气温。自东向西,选择第 5 垄、第 9 垄及第 14 垄作为测量垄,其到北墙的距离分别为 2.7、4.7 及 6.7 m,于冠层区域各布置 1 个温度测点,置于两行番茄植株冠层中间部位;同时根据作物的生长状况适时调整温度测点的高度,以保证其始终处于作物冠层的顶端位置(图 3)。

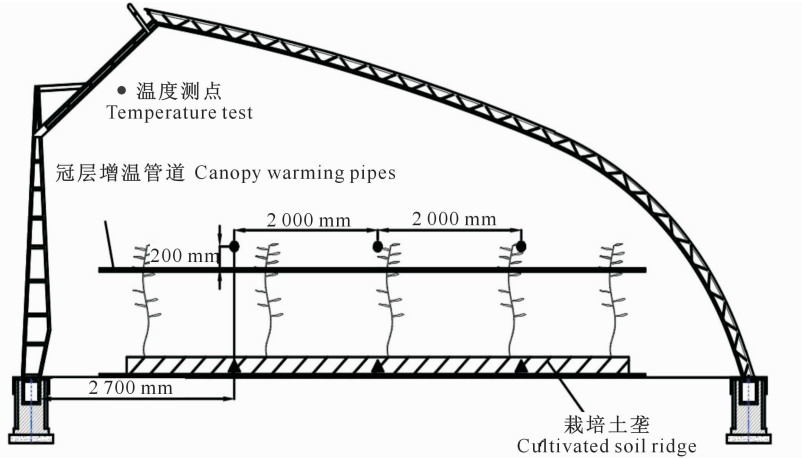


图 3 试验温室冠层气温测点布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of canopy temperature measurement points in the experimental greenhouse

(2)水温。在地下蓄热水池内的几何中心位置设 1 个温度测点,水温传感器探头做防锈处理,热电偶线做防倒吸处理。

2.2.2 番茄生长指标及产量的测定 于 2017-11-28,12-28 和 2018-01-28,测定 2 个温室内番茄的株高和茎粗,2018-03-05 和 03-26 分别采收果实,统计产量。

(1)株高。用精度为 1 mm 的卷尺测量从基质表面(即番茄植株底部露出基质的部位)到番茄最顶部叶片叶腋处的距离。

(2)茎粗。用精度为 0.01 mm 的数显卡尺测量第 1 果穗下方 20 mm 处番茄植株茎的直径。

(3)产量。在果实成熟时,每处理随机选取 6 行作为标定行,记录每行采收的果实数,并使用精度为 1 g 的磅秤称取果实质量。

2.2.3 AHSCW 系统的性能分析 水池热量可用公式(1)计算:

$$E=c_w \cdot \rho_w \cdot V_w \cdot \Delta T. \quad (1)$$

式中: E 为水池热量值(kJ); c_w 为水的比热容,取 $4.2\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ_w 为水的密度,取 $1.0 \times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$;

V_w 为地下蓄热水池内水的体积,取 4.4 m^3 ; ΔT 为地下蓄热水池的水温变化量($^{\circ}\text{C}$)。用公式(1)计算 AHSCW 系统的白天蓄热量(E_c , kJ)以及夜间释放热量(E_r , kJ),进而可计算该系统的能量利用效率(E_r/E_c)。

试验中,定义 1 d 为从当日的 08:00 至次日的 08:00, AHSCW 的性能系数(Coefficient of performance, COP)定义为 1 d 之内系统向冠层的有效放热量与耗电量的比值^[14]。

$$\text{COP}=\frac{E_r}{E_{\text{wp}}}. \quad (2)$$

式中: E_{wp} 为 AHSCW 循环水泵 1 d 的耗电量(kJ)。

AHSCW 系统的节能率可用公式(3)计算^[20]。

$$R=\frac{E_{r,\text{tot}}-E_{\text{wp,tot}}}{E_{r,\text{tot}}}. \quad (3)$$

式中: R 为系统的节能率, $E_{r,\text{tot}}$ 为系统运行期间总的放热量(kJ), $E_{\text{wp,tot}}$ 为系统运行期间总的耗电量(kJ)。

单位产量的耗能量可用公式(4)计算:

$$E_p=\frac{E_{\text{wp,tot}}}{M}. \quad (4)$$

式中: E_p 为单位产量的耗能量(kJ/kg), M 为各试验区域的采收总量(kg)。

集放热板的集热效率(η_c)为循环水流获得的能量与太阳辐射量的比值。运行一个蓄热周期后,可用公式(5)计算系统总的集热效率。

$$\eta_c = \frac{E_c}{E_s} = \frac{E_c}{\sum_{t_{c,start}}^{t_{c,end}} A_c \cdot I_{c,\tau} \cdot \tau} \quad (5)$$

式中: E_c 为循环水流获得的能量(kJ); E_s 为照射到集放热板上总的太阳辐射量(kJ),通过太阳辐射强

度和集热面积求得; $t_{c,start}$ 、 $t_{c,end}$ 分别为 AHSCW 系统运行的起、止时刻; τ 为试验期间仪器记录数据的时间间隔,取 10 min; A_c 为集热面积,取 46.8 m²; $I_{c,\tau}$ 为时间 τ 内后墙表面太阳辐射强度的平均值(kW/m²)。

3 结果与分析

3.1 冠层增温效果分析

试验温室(AHSCW 温室)与对照温室的冠层气温变化如图 4 所示。

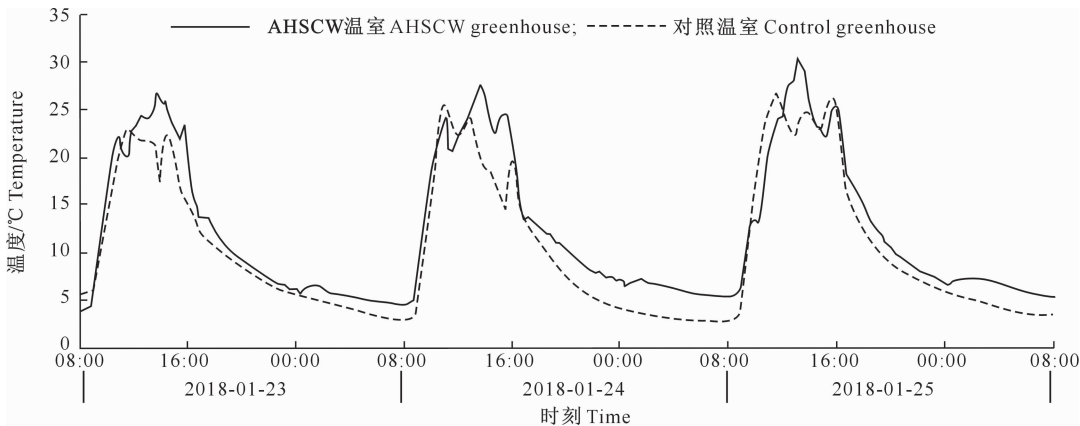


图 4 AHSCW 温室与对照温室冠层气温的比较

Fig. 4 Comparison of air temperature at the top of canopy between AHSCW and control greenhouses

图 4 显示,在每天的正午时分,由于此时温度过高,温室工作人员会打开通风口进行通风降温,因受到外界低温气流影响,作物的冠层温度变化幅度较大。夜间由于 AHSCW 系统运行,试验温室基础温度高,导致在白天放热系统未运行的情况下,试验温室冠层温度仍高于对照温室。

由图 4 可以看出,00:00 冠层增温系统开始运行后,试验温室番茄冠层气温迅速上升,至 02:00—02:30 达到峰值,且持续一段时间,期间冠层增温管道释放热量与冠层散失热量相当。00:00—08:00

试验温室番茄冠层气温平均值比对照温室高出 1.4~3.0℃,增温效果明显。

3.2 系统的集放热与节能效果

如图 5 所示,2018-01-23—01-25 3 d 内,白天 09:00—15:00,AHSCW 处于蓄热阶段,蓄水池温度分别为 16.0~26.5℃,17.9~28.0℃和 18.7~27.7℃;夜间 00:00—08:00,AHSCW 处于放热阶段,蓄水池温度分别为 25.6~18.6℃,26.9~19.6℃和 26.5~18.8℃。

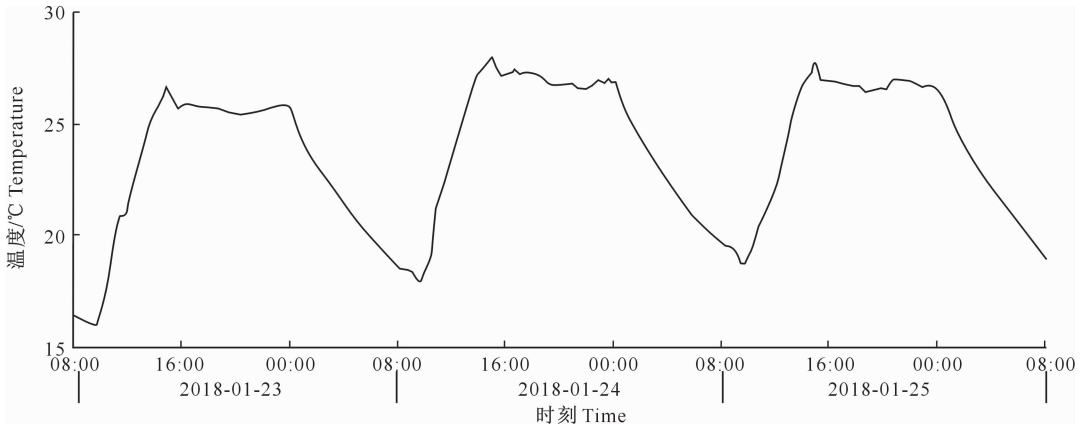


图 5 AHSCW 温室蓄水池温度变化

Fig. 5 Temperature of reservoir in AHSCW greenhouse

2018-01-23—01-25 AHSCW 的蓄放热量及能效比如表 1 所示。由表 1 可知,3 d AHSCW 系统的平均能量利用效率为 75%,平均集热效率为 45.67%,COP 为 2.3~2.6,节能率为 57%~61%,由此可见该系统节能效果十分明显。系统关闭时间

(15:00—00:00)内,根据 15:00 和 00:00 的水温,用公式(1)计算出各时间点的能量,分析发现 3 d 内地下蓄热水池的热量散失平均值为 18.8 MJ,散失总量占系统总蓄热量的 10%,由此可见蓄热水池的保温性仍需进一步提高。

表 1 AHSCW 系统的主要参数
Table 1 Parameters of AHSCW system

日期 Date	太阳辐射量/MJ Radiation	蓄热量/MJ Heat storage capacity	集热效率/% Heat collecting efficiency	放热量/MJ Released heat capacity	能量利用效率/% Heat utilization efficiency	节能率/% Energy saving rate	耗电量/MJ Power consumption	COP
2018-01-23	404	194	48	129	67	57	55	2.3
2018-01-24	400	187	47	135	72	59	55	2.5
2018-01-25	398	166	42	142	86	61	55	2.6
平均 Average	300.50	182.33	45.67	135.33	75.00	59.00	55.00	2.47

注:供试温室面积为 300 m²。
Note: The area of tested greenhouse is 300 m².

对表 1 数据进行进一步分析,可得白天和夜间 AHSCW 系统土地的放热功率和集热功率,结果如表 2 所示。由表 2 可知,3 d 中该系统白天土地集热

功率为 25.7~30.0 W/m²,夜间土地的放热功率为 15.0~16.3 W/m²。

表 2 AHSCW 系统的土地集热功率和放热功率
Table 2 Total heat storage and release of AHSCW system

日期 Date	土地蓄热量/(kJ·m ⁻²) Unit area heat storage capacity	土地集热功率/(W·m ⁻²) Unit area heat storage power	土地放热量/(kJ·m ⁻²) Unit area released heat capacity	土地放热功率/(W·m ⁻²) Unit area heat release power
2018-01-23	646.7	30.0	430.0	15.0
2018-01-24	623.3	29.0	450.0	15.7
2018-01-25	553.3	25.7	473.3	16.3

以 10 min 为单位时间,分析试验温室太阳辐射量与系统蓄热量的变化情况,结果如图 6 所示。由图 6 可知,AHSCW 系统开始运行后,09:00—09:30 系统的蓄热量一直为负值,这是由于该时间段内,水温大于作物冠层温度,系统仍处于放热阶段;10:00—11:30 系统单位时间(10 min)内的蓄热量

相对较大,且不断增大;15:00 蓄热系统关闭后,蓄热量一直处于波动状态,仍有一些能量散失,说明地下蓄热水池的保温性仍需进一步提高;00:00—01:00,由于作物冠层温度较低,该时间段内系统的放热速率最大,之后随着作物冠层温度的升高,放热速率逐渐降低。

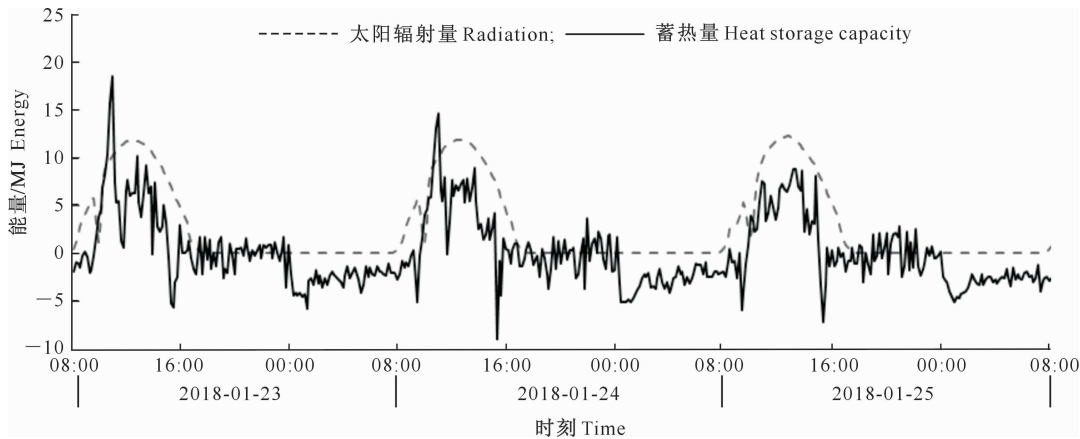


图 6 单位时间(10 min)内试验温室太阳辐射量与 AHSCW 系统蓄热量

Fig. 6 Solar radiation and system heat storage per unit time in the experimental greenhouse (10 min)

图 6 中,前 2 天系统的单位时间蓄热量波动规律基本一致,都是先增高后降低,最终趋于平稳,且

在 10:50 左右出现了明显的波峰,而在第 3 天系统的单位时间蓄热量未出现明显的波峰,这是由于相比于前两天,第 3 天该时间段的水池温度上升较为缓慢。

3.3 冠层增温系统对番茄生长、产量的影响

由表 3 可知,2017-11-28 试验温室(AHSCW 温室)与对照温室番茄植株的株高与茎粗无明显差异,这是由于试验开始时,植株刚刚定植完成,试验温室与对照温室的温度均能保证番茄植株的正常生长,因此株高与茎粗并无明显差异。2017-12-28,试验温室番茄的茎粗显著小于对照温室,而株高显著高于对照温室,说明 AHSCW 对于番茄生长有良好的

促进作用,减弱了低温对番茄生长的不良影响。2018-01-28,试验温室番茄的茎粗仍显著小于对照温室,株高虽高于对照温室,但无显著差异,这是由于到了试验后期,温室中的基础空气温度较高,AH-SCW 对作物生长的促进作用减弱。由此可以看出,AHSCW 在定植初期能够明显提高蕃茄的株高,促进其生长。

统计 2 次采收情况,发现应用 AHSCW 对番茄增温,能够使果实提早成熟;试验温室采收番茄果实数量为 14 个/m²,产量为 1.14 kg/m²,对照温室采收番茄果实数量为 6 个/m²,产量为 0.64 kg/m²,可知试验温室果实产量较对照提高了 77.2%。

表 3 AHSCW 温室与对照温室番茄株高和茎粗

Table 3 Plant height and stem diameter of tomato in AHSCW and control greenhouses

日期 Date	株高/cm Plant height		茎粗/mm Stem diameter	
	AHSCW 温室	对照温室	AHSCW 温室	对照温室
	AHSCW greenhouse	Control greenhouse	AHSCW greenhouse	Control greenhouse
2017-11-28	38.0±6.6 a	39.4±5.4 a	10.30±1.34 a	10.49±1.30 a
2017-12-28	86.9±13.0 a	81.2±7.8 b	13.67±1.81 b	14.97±1.72 a
2018-01-28	122.3±17.7 a	118.4±10.3 a	15.94±1.55 b	17.11±1.85 a

注:同一指标同行数据后标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。
Note:Different lowercase letters indicate significant difference (P<0.05).

4 讨论与结论

夜间 00:00—08:00,AHSCW 可提高作物冠层气温 1.4~3.0℃,增温效果明显。白天 09:00—15:00,集热系统运行,AHSCW 蓄热量为 166~194 MJ;夜间 00:00—08:00,冠层增温系统运行,放热量为 129~142 MJ,能量有效利用率平均为 75.66%。试验期间,AHSCW 节能率为 57%~61%,COP 为 2.3~2.6,系统节能效果明显。应用 AHSCW 进行日光温室冬春茬番茄种植,可以有效提高番茄的冠层温度,促进番茄株高生长,保护番茄安全越冬,使冬春茬番茄提早成熟上市。

AHSCW 在冠层增温方面的应用仍处于试验研究阶段,还存在冠层增温管道悬挂位置不稳定、热量释放不充分等问题。未来拟通过调整热管道材质及悬挂固定方式,优化运行控制系统等进行完善。根据本研究结果,建议推迟集热系统开启时间,且在 10:00—11:30 加大水流速度;同时推迟增温系统关闭时间,并在 00:00—01:00 加大水流速度,以提高系统的热能利用效率。

[参考文献]

[1] 马承伟,黄之栋,穆丽君.连栋温室地中热交换系统储热加温的试验[J].农业工程学报,1999,15(2):160-164.

[2] 蒋绿林,蔡佳霖,胡静,等.温室用太阳能热泵土壤蓄能系统的研究[J].江苏农业科学,2018,46(12):176-179.

[3] 戴巧利,左然,李平,等.主动式太阳能集热/土壤蓄热塑料大棚增温系统及效果[J].农业工程学报,2009,25(7):164-168.

[4] 苏伟,穆青,董继先,等.太阳能与地源热泵联合温室大棚系统的设计[J].浙江农业学报,2015,27(2):290-294.

[5] 刘鹏.太阳能-地源热泵复合系统在温室大棚的应用[J].建筑热能通风空调,2016,35(3):68-70.

[6] 马承伟,姜宜琛,程杰宇,等.日光温室钢管屋架管网水循环集放热系统的性能分析与试验[J].农业工程学报,2016,32

Ma C W,Huang Z D,Mu L J. Experiment of heating & heat-storing of the underground heat exchange system in a multi-span greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,1999,15(2):160-164.

Jiang L L,Cai J L,Hu J,et al. Study on solar energy heat pump soil energy storage system for greenhouse [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(12):176-179.

Dai Q L,Zuo R,Li P,et al. Active solar heating system with soil heat storage for plastic film greenhouse and its effects [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(7):164-168.

Su W,Mu Q,Dong J X,et al. System design of solar greenhouses combined with ground source heat pump [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2015,27(2):290-294.

Liu P. Application of solar-ground source heat pump in greenhouse [J]. Building Energy & Environment,2016,35(3):68-70.

- (21):209-216.
- Ma C W, Jiang Y C, Cheng J Y, et al. Analysis and experiment of performance on water circulation system of steel pipe network formed by roof truss for heat collection and release in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(21):209-216.
- [7] 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 H L, Zou Z R, Chen H W, et al. Research advances in technologies of phase-change heat storage and its application in greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6):304-307.
- [8] 闫严涛, 邹志荣, 李 凯. 太阳能相变蓄热系统在温室加温中的应用 [J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(5):139-146.
- Yan Y T, Zou Z R, Li K. Application of solar-phase change heat storage system in greenhouse. [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(5):139-146.
- [9] 李晓野. 温室太阳能空气集热-相变蓄热装置设计及性能研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- Li X Y. Design and study on the solar air heating system with phase change materials energy storage in greenhouse [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2012.
- [10] 张 义, 杨其长, 方 慧. 日光温室水幕帘蓄放热系统增温效应试验研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(4):188-193.
- Zhang Y, Yang Q C, Fang H. Research on warming effect of water curtain system in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4):188-193.
- [11] 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 H, Yang Q C, Liang H, et al. Experiment of temperature rising effect by heat release and storage with shallow water in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5):258-263.
- [12] 李 文, 杨其长, 张 义, 等. 日光温室主动蓄放热系统应用效果研究 [J]. 中国农业气象, 2013, 34(5):557-562.
- Li W, Yang Q C, Zhang Y, et al. Application effects of active heat storage and release system in a Chinese solar greenhouse [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(5):557-562.
- [13] 梁 浩, 方 慧, 杨其长, 等. 日光温室后墙蓄放热帘增温效果的性能测试 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(12):187-193.
- Liang H, Fang H, Yang Q C, et al. Performance testing on warming effect of heat storage-release curtain of back wall in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(12):187-193.
- [14] 孙维拓, 杨其长, 方 慧, 等. 主动蓄放热-热泵联合加温系统在日光温室的应用 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(19):168-177.
- Sun W T, Yang Q C, Fang H, et al. Application of heating system with active heat storage-release and heat pump in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(19):168-177.
- [15] 周 波, 张 义, 方 慧, 等. 装配加温除湿系统的轻简装配式日光温室设计及性能试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(11):226-232.
- Zhou B, Zhang Y, Fang H, et al. Performance experiment and design of simply assembled Chinese solar greenhouse equipped with heating and dehumidification system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(11):226-232.
- [16] 柯行林, 杨其长, 张 义, 等. 主动蓄放热加热基质与加热空气温室增温效果对比 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(22):224-232.
- Ke X L, Yang Q C, Zhang Y, et al. Warming effect comparison between substrate warming system and air warming system by active heat storage-release in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22):224-232.
- [17] Savvides A, Ieperen W V, Dieleman J A, et al. Meristem temperature substantially deviates from air temperature even in moderate environments: is the magnitude of this deviation species-specific? [J]. Plant Cell & Environment, 2013, 36(11):1950-1960.
- [18] 张 义, 方 慧, 周 波, 等. 轻简装配式主动蓄能型日光温室 [J]. 农业工程技术(温室园艺), 2015, 25(9):36-38.
- Zhang Y, Fang H, Zhou B, et al. Simply assembled Chinese solar greenhouse equipped with active heating release-storage system [J]. Agriculture Engineering Technology (Greenhouse & Horticulture), 2015, 25(9):36-38.
- [19] 傅国海, 刘文科. 日光温室甜椒起垄内嵌式基质栽培根区温度日变化特征 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1):47-55.
- Fu G H, Liu W K. Diurnal change in root zone temperature of soil ridge substrate-embedded cultivation method for sweet pepper in solar greenhouse [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(1):47-55.
- [20] 王吉庆, 张百良. 水源热泵在温室加温中的应用研究 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(6):415-419.
- Wang J Q, Zhang B L. Experiment of water source heat pump in greenhouse heating [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(6):415-419.