

直膨式太阳能热泵用于温室番茄根际-空气加温的试验研究

和永康 杨其长 张义* 方慧 柯行林 魏晓然

(中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/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)

摘要 针对直膨式太阳能热泵所集热能利用率低,温室加温不足的问题,采用直膨式太阳能热泵为集热系统,根际-空气加温为放热系统,对大跨度主动蓄能型温室在不同天气仅根际加温和根际与空气同时加温的加温效果,集、放热系统运行性能,集热效率,热能利用率,节能率和集热系统的优化运行模式进行研究。结果表明:1)连续阴天和连续晴天,放热系统的热能利用率分别高于97.2%和92.7%;2)不同天气试验区的根际温度在17.9℃以上,比对照区高1.5℃,空气温度在11.6℃以上,比对照区高3.6℃,相对湿度在90.8%以下,比对照区低3.2%;3)不同天气整套系统的节能率 R 在47.2%以上,性能系数在1.9以上;4)不同天气集热系统均能在设定时间内达到设定集热温度目标,且其集热性能系数 COP_c 在2.3以上,其集热效率在149.6%以上;5)9:30—11:30集热系统 COP_c 随太阳辐射强度的增大,从1.4增大至3.0,11:30—14:50集热系统的集热性能系数均高于3.8,15:10以后,蓄热水池水温高于47℃时,集热性能系数由3.2最终降至0.8。该研究表明根际与空气结合的加温方式不仅提高了温室加温效果,还提高了热能利用率和直膨式太阳能热泵的集热性能。此外,根据集热条件调节集热系统的运行模式,可提高集热性能,达到温室加温节能的目的。

关键词 大跨度温室;直膨式太阳能热泵;温室加温;性能系数;运行模式;根际加温

中图分类号 S214 **文章编号** 1007-4333(2019)04-0124-12 **文献标志码** A

Experimental study on the rhizosphere-air heating with direct-expansion solar-assisted heat pump of tomato in greenhouse

HE Yongkang, YANG Qichang, ZHANG Yi*, FANG Hui, KE Xinglin, WEI Xiaoran

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture/Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract In order to increase the heat energy utilization efficiency of direct-expansion solar-assisted heat pump (DX-SAHP), a mechanism was designed by using DX-SAHP as collection system and rhizosphere-air heating as releasing system. The heating effect, coefficient of performance (COP) and heat-collecting efficiency were tested. The operation mode under different weather conditions was optimized. The results showed that: Under the conditions of consecutive cloudy days and consecutive sunny days, the heat utilization efficiency of the heat releasing system was higher than 97.2% and 92.7% correspondingly; Under different weather conditions, the rhizosphere temperature and air temperature in the experimental area were above 17.9 and 11.6℃ respectively, which were 1.5 and 3.6℃ higher than those of the control area; The relative humidity in the experimental area was below 90.8%, which was 3.2% lower than that of the control area; The energy-saving rate R of the whole system under different weather conditions was higher than 47.2%, and the coefficient of performance (COP_{total}) was above 1.9; Under different weather conditions, the heat collecting system could reach the set temperature objective for heating within the set time while keep the coefficient of heat-collecting performance (COP_c) above 2.3 and the heat-collecting efficiency μ higher than 149.6%; Additionally, from

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 基本科研业务费(Y2018PT83);科技部国际科技合作专项项目(KY201702008)

第一作者: 和永康, 硕士研究生, E-mail: hyk985@163.com

通讯作者: 张义, 副研究员, 博士, 主要从事设施园艺环境工程研究, E-mail: xingfu_536@163.com

9:30 am to 11:30 am, with the increase in solar radiation intensity, the COP_c of the heat collecting system also increased from 1.4 to 3.0; from 11:30 am to 14:50, the COP_c of the heat-collecting system was above 3.8; After 15:10 when the temperature of water in the thermal storage tank was higher than $47\text{ }^\circ\text{C}$, the COP_c finally dropped from 3.2 to 0.8. In conclusion, this study clarified that the DX-SAHP heating rhizosphere-air could not only improve the heating effect of greenhouse, but also improve the heat energy utilization rate and the COP_c of the DX-SAHP. Additionally, it could realize the greenhouse energy conservation goal by using the operating mode of DX-SAHP, which could be adjusted in accordance with variations in solar radiation intensity and the water temperature in the tank.

Keywords large-span greenhouse; direct-expansion solar-assisted heat pump; greenhouse heating; coefficient of performance; energy conservation; operational mode; rhizosphere heating

温室是一种重要的设施栽培结构形式^[1],截至2016年底,我国温室总面积达208万 hm^2 ,其中塑料大棚132万 hm^2 ,占总面积的63.5%,日光温室69.7万 hm^2 ,占总面积的33.0%,连栋温室4.1万 hm^2 ,占总面积的2.0%^[2]。温室是一种高能耗的抗逆性生产设施,据联合国统计,全世界每年农业生产能耗量的35%用于温室加温,其费用约占温室能耗总费用的15%~40%^[3-4]。因此,在温室生产规模不断扩大的今天,降低温室加温能耗^[5]、提高能源利用效率^[6],是温室可持续发展的关键。

目前常见的温室加温方式有,通过化石能源燃烧加温^[7]、电加温^[8]、太阳能加温^[9-13]。其中,化石能源是一次能源,其燃烧放热的同时产生大量有毒有害物质,难以满足温室可持续发展的需求^[14];电能本身为二次能源,其加温成本高、转化率低,通常仅被用于临时加温或应用于育苗加温;太阳能是一种清洁的可再生能源^[15],但其受地理位置、时间和气象条件的限制,难以应对设施温室极端天气的加温需求^[16]。为此国内外对太阳能用于温室加温进行了大量研究^[17-21],其中,太阳能与热泵结合的技术因其不仅能提高太阳能集热器的集热效率,而且能提高热泵系统的性能,因此被视为是一种可靠的温室加温方式^[22]。

作物的生长发育同时受到地温和气温的双重作用^[23],为探明对作物加温的效果,已有研究对作物根际和地上部分进行了加温研究。研究表明:作物根际加温^[24-26]提高了根际温度,从而提高了作物的根系活性,增加了根系对水分和养分的吸收;作物地上部分加温^[27-29]提高了温室空气温度,增加了作物光合作用产物的积累和运输,提高了作物的产量和品质。

周升等^[30]在充分考虑大跨度主动蓄能型温室结构和栽培模式的基础上设计了一套直膨式太阳能热泵-根际增温系统用于温室加温。试验结果表明

夜间根际温度能维持在 $14.6\sim 15.8\text{ }^\circ\text{C}$,夜间空气温度能维持在 $7.7\sim 7.9\text{ }^\circ\text{C}$,热泵机组的平均集热性能系数(Coefficient of performance, COP)为2.0。但蓄热水池的放热终止温度即集热起始温度在 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,所集热量并未充分释放,且已有研究证明过高的集热起始温度会间接降低直膨式太阳能热泵系统的 COP ^[31-32]。为此,本研究在根际加温研究的基础上增设空气加温装置,同时优化热泵运行模式,以期提高所集热能的利用效率、直膨式太阳能热泵的COP和节能率,为直膨式太阳能热泵和根际及空气结合的加温方式在温室内的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验系统及工作原理

试验在大跨度主动蓄能型温室内进行,试验温室集-放热系统布置方式见图1。白天运行直膨式太阳能热泵集热,并将热量储存于蓄热水池内,夜间通过根际加温装置和空气加温装置加热试验温室。直膨式太阳能热泵以集热器为蒸发端,循环工质进行蒸发集热,冷凝端通过蓄热水池内循环水与循环主机内冷凝器换热,将热量储存到蓄热水池中。放热系统以PPR循环管路为末端散热方式,通过循环水泵2和循环水泵3将蓄热水池内热水泵出散热。

1.1.1 集热系统

集热系统由直膨式太阳能热泵、蓄热水池、循环水泵1和循环管路组成。直膨式太阳能热泵的集热/蒸发器为合金材质,表面涂有黑色涂层,规格为 $2\times 0.8\text{ m}^2$,板厚2.5 mm,板间距1.5 m,板面与水平面夹角 70° ,安装于试验温室外侧空地,试验共安装40组。循环主机为压缩机、冷凝器、节流阀的集成体,其单台功率为9.2 kW,蓄热水池有效容积 9.0 m^3 。循环水泵1的功率为1.5 kW,额定流量 $20\text{ m}^3/\text{h}$ 。

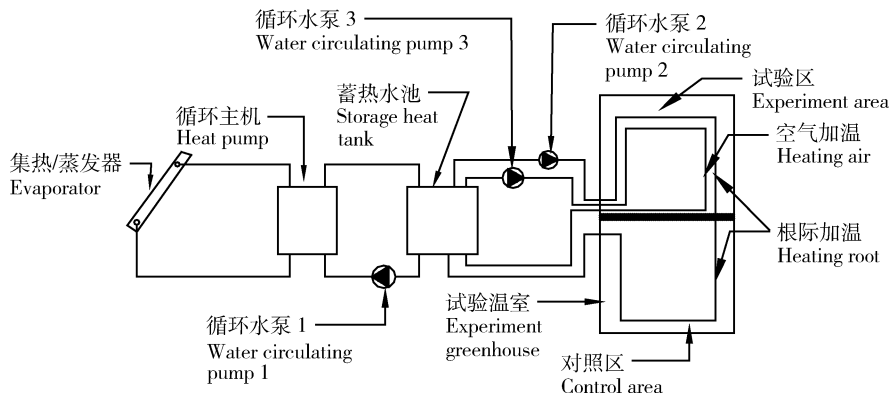


图1 试验温室集-放热系统布置图

Fig. 1 Schematic diagram of collection and releasing heat systems in experiment greenhouse

1.1.2 放热系统

放热系统由根际加温装置和空气加温装置组成,两装置以同一蓄热水池为热源,彼此独立运行。

根际加温装置,由功率 1.5 kW,额定流量为 20 m³/h 的循环水泵 2,直径 20 和 50 mm 的 PPR 管及管件组成。循环水泵 2 置于蓄热水池底部,根际加温管道回型布置于基质袋下方。

空气加温装置,由功率 0.75 kW,额定流量为 10 m³/h 的循环水泵 3,直径 20 和 50 mm 的 PPR 管及管件,304 不锈钢金属软管、S 勾、铁链、铁丝组成。循环水泵 3 置于蓄热水池底部,空气加温管距地面 0.5、1.0 m,悬挂于基质袋正上方,两加温管间由金属软管连接。

1.2 试验设计

1.2.1 试验温室及测点布置

试验温室为大跨度主动蓄能型温室,位于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(纬度 40°13'N,经度 116°65'E)。温室南北走向,长 60 m,跨度 20 m,脊高 4.5 m,下沉 0.5 m,采用拱形钢骨架结构,中间有单排立柱,覆盖材料为单层 PO 膜,配有铝膜内保温幕和外保温被,南墙为厚度 1 cm 的中空 PC 阳光板,北侧复合墙体由外向内依次为 24 cm 红砖、10 cm 聚苯板。

试验区与对照区设置:在温室南北向的中部用双层 PO 膜将温室隔开,温室北部为试验区,安装根际加温装置和空气加温装置;温室南部为对照区,仅安装根际加温装置。中间 PO 膜卷放时间与外保温被卷放时间一致。温室以起垄内嵌式基质栽培 (Soil ridge substrate-embedded cultivation, SRSC) 的方式^[33]

种植番茄,品种为瑞粉 882,于 2017 年 9 月 10 日定植。

测点布置:在试验区和对照区分别距北墙 15 和 45 m 的东西截面,距地面 1.5 m 处的中心点处及两侧 6 m 处,各布置 1 个空气温度测点和 1 个相对湿度测点;在试验区和对照区,对应空气温度测点下方基质袋内各布置 1 个根际温度测点;在蓄热水池的几何中心、集热系统回水口、根际加温装置回水口、空气加温装置回水口各布置 1 个水温测点;在温室外距温室 5 m,距地面 1.5 m 处布置 1 个温度测点、1 个相对湿度测点和 1 个太阳辐射测点。

1.2.2 试验仪器

相对湿度测试采用美国文森公司生产的 HOBO 智能温湿度记录仪,相对湿度测试精度为 2.5%。温度测试采用测量精度为 ±0.2 °C 的铜-康铜热电偶,空气温度测点加装自然通风防辐射罩,水温及根际温度测试探头做防锈处理。太阳辐射强度测试选用美国坎贝尔公司生产的 CMP3 型太阳辐射传感器。温度和太阳辐射数据采集,选用美国坎贝尔公司生产的 CR3000,数据采集间隔为 10 min。各用电设备的耗电量用德力西电气有限公司生产的电能表测试,精度等级为 2 级。集热系统的运行时间,采用 1718 工作室提供的 C1718-TS-USB 通讯版工业设备运行时长记录仪。

1.2.3 试验系统运行模式

试验时间为 2017-11-15—2018-01-31。设定 9:30—18:00 运行集热系统进行集热,当蓄热水池温度达到 50 °C 时停止运行,在此期间,集热系统的运行模式由时间和温度协同控制。根际加温装置运行时间为 20:00—次日 9:00。空气加温装置运行时间 18:00—次日 9:00。

1.3 分析方法

1.3.1 集放热系统性能分析

水平面太阳辐射强度由实验仪器测得,达到集热板面的太阳辐射强度可由水平面的太阳辐射强度逐时计算得出。计算公式^[34]如下:

$$\delta = 23.45 \sin[360(284 + n)/365] \quad (1)$$

$$R_b = \frac{I_{D,O}}{I_{D,H}} =$$

$$\frac{\cos(\theta-G)\cos\delta\cos\omega + \sin(\theta-G)\sin\delta}{\cos\theta\cos\delta\cos\omega + \sin\theta\sin\delta} \quad (2)$$

$$I_{D,O} = R_b \cdot I_{D,H} \quad (3)$$

式中: δ 为一年中第 n 天的赤纬角, $(^\circ)$; n 为公历一年中的第几天(从1月1日算起); R_b 为集热板面与水平面的辐射强度之比; $I_{D,H}$ 为水平面的太阳辐射强度, W/m^2 ; $I_{D,O}$ 为集热板面的太阳辐射强度, W/m^2 ; ω 为太阳的时角, $(^\circ)$; θ 为当地地理纬度,取值 43° ; G 为集热板面与水平面的夹角,取值 70° 。

由式(3)计算得出达到集热板面的太阳辐射强度 $I_{D,O}$,则其总太阳辐射量为:

$$Q_s = \sum_{t_{c, \text{strat}}}^{t_{c, \text{end}}} A_c \cdot I_{D,O} \cdot \tau \quad (4)$$

式中: Q_s 为到达集热板面的总太阳辐射量, MJ; A_c 为集热板面总面积, m^2 , 取值64; $t_{c, \text{strat}}$ 、 $t_{c, \text{end}}$ 分别为集热阶段起、止时刻; τ 为太阳辐射强度测试期间记录数据的时间间隔, min, 取值10。

集热系统蓄积的总热量和放热系统释放的总热量计算公式为^[35]:

$$Q_c = c_w \cdot \rho_w \cdot V \cdot \Delta T_c \quad (5)$$

$$Q_r = c_w \cdot \rho_w \cdot V \cdot \Delta T_r \quad (6)$$

式中: c_w 为水的比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$, 取值4.2; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 , 取值 1.0×10^3 ; V 为蓄热水池实际储水量, m^3 , 取值8.7; ΔT_c 、 ΔT_r 分别为蓄热水池在蓄热阶段和放热阶段的水温变化量, $^\circ C$; Q_c 、 Q_r 分别为集热系统蓄积的总热量和放热系统释放的总热量, MJ。

集热系统的性能系数,集放热系统的总性能系数,集热系统的集热效率和所集热能利用率计算公式为:

$$COP_c = \frac{Q_c}{E_c} \quad (7)$$

$$E_{\text{total}} = E_c + E_{r,R} + E_{r,A} \quad (8)$$

$$COP_{\text{total}} = \frac{Q_r}{E_{\text{total}}} \quad (9)$$

$$\mu = \frac{Q_c}{Q_s + E_c} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{Q_r}{Q_c} \quad (11)$$

式中: COP_c 、 COP_{total} 分别为集热系统和集放热系统总的性能系数; $E_{r,R}$ 、 $E_{r,A}$ 分别为根际加温装置和空气加温装置的耗电量, MJ; E_c 、 E_{total} 分别为集热系统和集放热系统的总耗电量, MJ; μ 为集热系统集热效率, %; η 为所集热能利用率, %。

集热系统在集热过程中第 i 个10 min内的平均集热性能系数可由下式计算:

$$COP_{i,10\text{min}} = \frac{c_w \cdot \rho_w \cdot V \cdot \Delta T_{i,10\text{min}}}{E_{i,10\text{min}}} \quad (12)$$

式中: $COP_{i,10\text{min}}$ 为集热系统在第 i 个10 min内的平均集热性能系数; i 为集热时间段内的第 i 个10 min, $i = 1, 2, \dots$; $\Delta T_{i,10\text{min}}$ 为集热系统在第 i 个10 min内温度变化量, $^\circ C$; $E_{i,10\text{min}}$ 为集热系统在第 i 个10 min的耗电量, MJ。

1.3.2 节能效果分析

由式(6)实际用于温室加温的热量为 Q_r ,若以电加热方式产生 Q_r 的热量为基准,即可知节能率:

$$R = \frac{Q_r - E_{\text{total}}}{Q_r} \quad (13)$$

式中: R 为直膨式太阳能热泵集热和根际及空气加温完成一次集放热的节能率。

2 结果与分析

2.1 加温效果分析

根据设定的集放热系统运行时间,为便于分析,定义9:00—次日9:00为1 d。选取连续阴天2018-01-13—01-15和连续晴天01-18—01-20的测试数据进行加温效果分析。

2.1.1 连续阴天温室试验区与对照区根际及空气温度比较

1) 根际温度对比。连续阴天2018-01-13—15温室试验区与对照区根际及空气温度变化见图2。可见,3 d中试验区与对照区的根际温度变化范围分别为 $14.2 \sim 19.0^\circ C$ 和 $12.6 \sim 17.3^\circ C$,试验区与对照区根际温度变化幅度基本一致,根际温度波动小,有利于作物根系生长和营养物质的吸收^[36-37],根际加温必不可少。试验区根际温度始终高于对照区根际温度,说明同时配备根际和空气加温装置减少了根际热量向空气散失,可将根际温度保持在较高

水平。此外,起垄内嵌式基质栽培的种植模式具有一定的保温蓄热能力^[38],因此晴天累积的热量可用于阴天的加温,可部分弥补阴天能源供给不足。

2)空气温度对比。由图2可见,3 d中非加温期间试验区与对照区空气温度变化趋势基本一致,而加温期间试验区空气温度始终高于对照区。18:00启动空气加温设备后试验区空气温度缓慢升高,到

22:30时达到最大值,然后缓慢下降,这是因为连续阴天条件下室内白天蓄积热量少,基础温度低,供热需求量大,放出同等热量升温能力有限,放出的热量在较短时间内即达到室内温度最高点,此后缓慢下降;而对照区则持续缓慢下降,直至次日8:40试验区与对照区空气温度降至最低,保温被收起,空气温度逐渐上升。

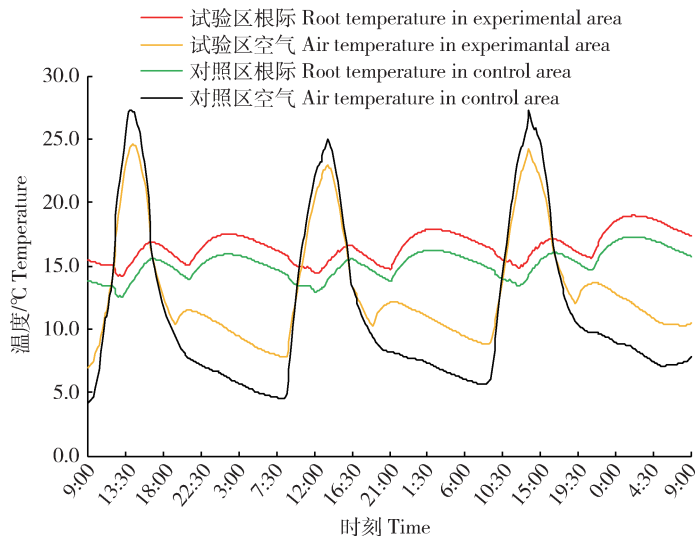


图2 连续阴天试验区与对照区根际及空气温度随时间的变化

Fig. 2 Rhizosphere and air temperature comparison between experimental and control area under continual overcast days

2.1.2 连续晴天温室试验区与对照区根际及空气温度比较

1)根际温度对比。连续晴天 2018-01-18—01-20 试验区与对照区根际及空气温度变化见图3。可见,3 d中试验区与对照区根际温度变化趋势基本一致,非加温期间均在12:30时达到最低16.0和14.6℃,在16:30时到达最高值18.3和17.3℃;加温期间在0:30达到最高值19.9和18.3℃,而后根际温度缓慢下降。相比于前述连续阴天的情况,连续晴天在非加温期间与加温期间,其最高和最低温度值出现的时间点均有不同程度的提前,这是因为晴天太阳辐射对根际的增温作用强于阴天,根际升温速度加快,缩短了根际达到温度峰值的时间。3 d中,试验区与对照区的温度变化范围分别为16.0~19.9℃和14.6~18.3℃,根际温度环境比连续阴天更稳定,这是因为晴天太阳辐射对根际环境的增温作用,提升了非加温期间根际温度,并有部分热量被储存在基质和包被基质

的土垄内,当夜间根际温度降低时这部分热量自然释放用于根际增温,保证了根际温度环境的稳定性。

2)空气温度对比。由图3可见,3 d中加温期间试验区的平均空气温度分别为12.0、12.6和12.8℃,对照区的为8.3、9.0和9.3℃,呈上升趋势,可知,温室内空气前期温度积累对后续空气温度的提升有一定的影响。3 d中,非加温期间试验区与对照区空气温度变化趋势与连续阴天基本一致,18日和20日12:10—13:30空气温度因通风换气出现波动现象。

2.1.3 连续阴天和连续晴天试验区与对照区相对湿度比较

连续阴天 2018-01-13—01-15 和连续晴天 2018-01-18—01-20,试验区与对照区相对湿度随时间变化见图4。可见,连续阴天和连续晴天试验区与对照区的相对湿度随时间的变化趋势基本一致,且无论试验区还是对照区,连续晴天的相对湿度始

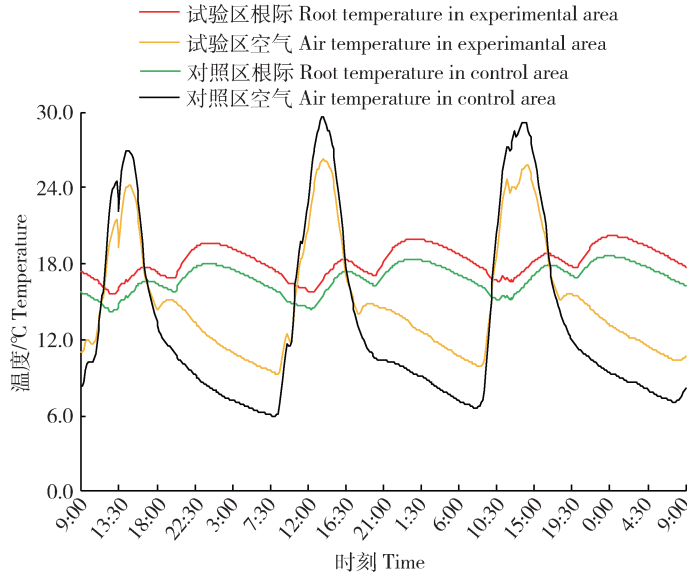


图 3 连续晴天试验区与对照区根际及空气温度随时间的变化

Fig. 3 Rhizosphere and air temperature comparison between experimental and control area under continual sunny days

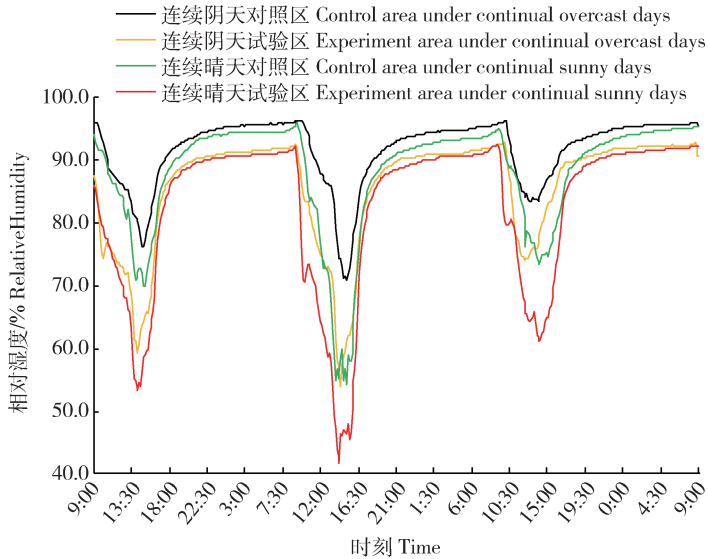


图 4 连续阴天和晴天试验区与对照区相对湿度随时间的变化

Fig. 4 Relative humidity comparison between experimental and control area under continual overcast and sunny days

终低于连续阴天,无论是连续阴天还是连续晴天,试验区的相对湿度始终低于对照区。连续阴天加温期间试验区的相对湿度均低于 92.7%,对照区的均低于 96.2%;连续晴天加温期间试验区的相对湿度均低于 92.2%,对照区的均低于 95.9%;试验结果表明:通过空气加温,可有效降低温室内相对湿度;相比于连续阴天,连续晴天条件下相对湿

度下降更多。

2.2 集放热系统性能分析

集放热系统运行参数见表 1。直膨式太阳能热泵能同时吸取太阳辐射能和空气能,在设定集热运行模式下,相比于阴天,晴天所需的集热时间更短,相应集热耗电量更少,这是因为直膨式太阳能热泵集热效率会受到太阳辐射能的影响,太阳辐射强度

表1 集放热系统运行参数

Table 1 Parameters about collection and releasing heat system of performance

日期 Date	天气 Weather	集热时间段 Collected heat period	集热起止温度/°C Collected heat temperature range	放热起止温度/°C Released heat temperature range	集热耗电量/MJ Collected heat power consumption	放热耗电量/MJ Released heat power consumption
2018-01-13	阴	9:30—17:26	21.3~49.8	49.2~20.8	436.8	101.7
2018-01-14	阴	9:30—17:46	20.4~50.5	50.2~20.9	453.2	101.6
2018-01-15	阴	9:30—17:37	20.5~49.9	49.4~21.3	447.7	101.7
2018-01-18	晴	9:30—16:41	21.1~50.1	48.6~21.5	393.8	101.6
2018-01-19	晴	9:30—16:10	21.3~50.3	48.2~21.4	368.2	101.7
2018-01-20	晴	9:30—16:50	20.9~50.3	48.4~21.2	402.6	101.8

越大其集热效率越高。2种天气下,放热系统在3d中的平均放热终止温度分别为21.0和21.4℃,差别不大,热能利用充分。

由式(1)~(4)得集热板的总太阳辐射量 Q_s ,由式(5)~(8)分别求得集热系统总集热量 Q_c 、放热系统总放热量 Q_r 、集热系统集热性能系数COP_c和整套系统耗电量 E_{total} ,由式(10)得集热系统的集热效率 μ 。由此,连续阴天和连续晴天集、放热系统的能量变化和性能系数经计算汇总于表2。连续阴天和连续晴天达到集热板的总太阳辐射平均值分别为197.5和324.6MJ,可见北京地区冬季晴天太阳辐射强度较弱。连续阴天和连续晴天平均集热总量分别为1060.9和1065.8MJ,可见不同天气下,同一

设定运行模式,集热系统集热总量基本一致。连续阴天和连续晴天平均放热总量分别为1036.5和987.8MJ,可见相比于连续晴天,连续阴天放热系统放出的热量大于连续晴天,这是因为连续阴天室外温度低温室加温热负荷大,散热量更大。连续阴天整套系统耗电量大于连续晴天,这是因为连续阴天太阳辐射强度和空气温度均低于连续晴天,导致集热时间变长耗电量增加。连续阴天和连续晴天平均集热效率分别为165.4%和149.6%,这是因为连续阴天达到集热板面的总太阳辐射量小于连续晴天,而集热系统所集热能总量基本一致,可见直膨式太阳能热泵在吸取太阳辐射能的同时能吸取了大量的空气能。连续阴天和连续晴天集热系统的平均

表2 集放热系统的能量变化和能效比

Table 2 Parameters about COP and energy change of collection and releasing heat of system

日期 Date	太阳总辐射/MJ Total solar radiation	总集热量/MJ Total collected heat	总放热量/MJ Total released heat	总耗电量/MJ Total power consumption	集热效率/% Collecting heat efficiency	集热性能系数 Collected heat system COP
2018-01-13	249.7	1041.4	1037.7	538.4	151.7	2.4
2018-01-14	169.9	1067.0	1045.0	554.7	171.3	2.4
2018-01-15	172.7	1074.3	1026.8	549.4	173.2	2.3
2018-01-18	334.7	1059.7	990.2	495.4	145.5	2.7
2018-01-19	330.8	1063.3	979.3	469.9	152.1	2.9
2018-01-20	308.1	1074.3	993.9	504.4	151.2	2.7

COP_c 分别为 2.4 和 2.8, 可见同一设定运行模式下, 系统在连续晴天的 COP_c 大于连续阴天, 但差别不明显。

由式(9)、(11)和(13)分别计算出整套系统的运行性能系数 COP_{total}、放热系统的热能利用率 η 和整套系统的节能率 R 。由此, 连续阴天和连续晴天整套系统的 COP_{total}、热能利用率 η 和节能率 R 见表 3。可见, 连续阴天整套系统的平均 COP_{total} 为 1.9, 连

表 3 系统性能系数和节能性分析

Table 3 Parameters about COP and saving ratio of system

日期 Date	整套系统性能 Total system COP	热能利用率/%	节能率/%
		Utilization ratio of collected heat	Saving ratio of energy
2018-01-13	1.9	99.6	48.1
2018-01-14	1.9	97.9	46.9
2018-01-15	1.9	95.6	46.5
2018-01-18	2.0	93.4	50.0
2018-01-19	2.1	92.1	52.0
2018-01-20	2.0	92.5	49.3

续晴天的为 2.0, 连续晴天的值略高于连续阴天, 可见晴天对整套系统而言更节能, 这是因为晴天太阳辐射强, 集热系统运行时间短, 耗电量少。连续阴天的平均热能利用率为 97.9%, 连续晴天 92.7%, 连续阴天的热能利用率高于连续晴天, 这是因为连续晴天蓄热水池热损失多, 以及连续阴天环境温度低, 放热系统散热更充分, 导致连续阴天热能利用效率更高。连续阴天的平均节能率为 47.2%, 连续晴天的为 50.4%, 节能效果明显。

2.3 集热系统运行过程分析

阴天 2018-01-14 和晴天 2018-01-19 蓄热水池水温、室外环境温度和室外太阳辐射强度随时间的变化情况见图 5。测试结果表明: 1) 集热起始温度基本一致时, 晴天达到设定集热温度目标比阴天耗时短, 这是因为晴天集热条件优于阴天; 2) 12:30 之前 2 种天气条件下蓄热水池水温变化趋势基本一致, 12:30 之后晴天的蓄热水池水温上升速率明显高于阴天, 这是因为随着集热时间的推移, 晴天的集热条件优越性更明显; 3) 集热时间段内室外太阳辐射强度先增大后减小, 室外环境温度持续缓慢升高, 而蓄热水池水温持续升至设定温度目标, 这是因为直膨式太阳能热泵集热器内循环工质沸点 (-43 °C) 低, 只要环境温度高于工质沸点温度即可集热。

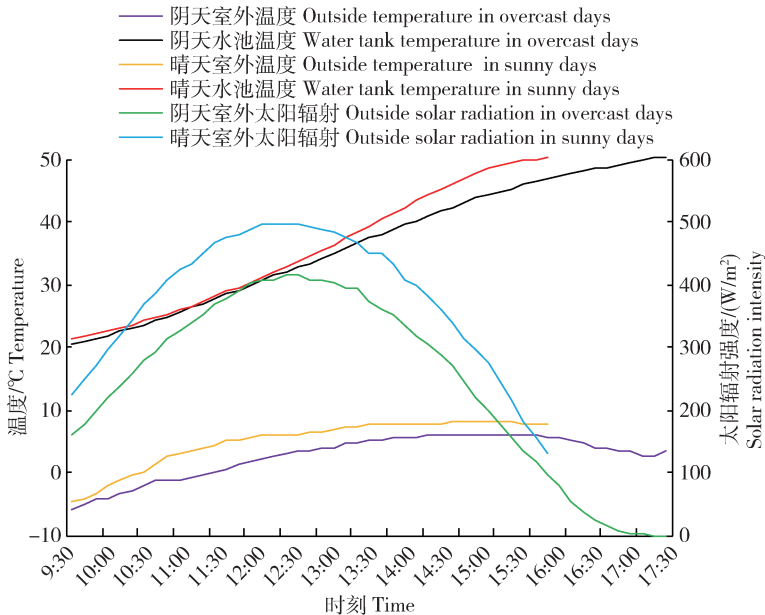


图 5 不同天气蓄热水池温度与室外温度和太阳辐射强度的变化

Fig. 5 Storage heat water tank temperature inside and outside temperature and solar radiation intensity under different weather condition

为进一步提高集热系统的集热性能,选取晴天2018-01-19集热系统的集热运行参数,分析系统的集热性能系数与环境因素的关系,以优化系统在不同环境条件下的运行模式。

太阳辐射强度、集热系统每10 min内的平均集热性能系数(式(12))和蓄热水池水温在集热运行时间内的变化见图6。根据集热性能系数随太阳辐射强度的变化特点将集热过程分成4个时间段进行分析:

1)缓慢上升期(9:30—11:30)。随着集热时间的推移,太阳辐射强度、集热性能系数和蓄热水池温度均缓慢上升。其间太阳辐射强度由 226.1 W/m^2 增大至 452.3 W/m^2 ,集热性能系数由1.4增大至3.0,蓄热水池水温由 $21.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $27.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这一时间段内太阳辐射强度逐渐增大,且此时蓄热水池水温较低,已有研究表明较低的冷凝温度有利于集热性能的提高^[39],使得集热性能系数随太阳辐射强度持续增大。

2)迅速上升期(11:30—13:50)。太阳辐射处于最大值 497.8 W/m^2 两侧,集热性能系数迅速增大至最大值4.1,蓄热水池温度迅速升高。期间太阳辐射强度从 452.3 W/m^2 增大至最大值 497.8 W/m^2 然后降低至 448.6 W/m^2 ,集热系统性能系数由3.0增大至最大值4.1,蓄热水池水温为 $27.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升至 $39.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此时间段内太阳辐射强度处于一天中的较高水平,且蓄热水池水温仍较低,使得集热性能系数迅速增大。

3)稳定期(13:50—14:50)。太阳辐射强度逐渐

降低,集热性能系数基本保持不变(3.8~4.1),蓄热水池温度逐渐升高。期间太阳辐射强度由 448.6 W/m^2 降低至 361.5 W/m^2 ,集热性能系数由4.1缓慢降低至3.8,蓄热水池水温由 $39.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $45.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在此时间段内,虽然太阳辐射略有降低,且蓄热水池水温已接近设定温度值,但是此时间内环境温度达到了一天中的较高水平,而集热系统不仅能吸取太阳辐射能同时能吸取空气能,因此能保持集热性能系数基本稳定。

4)下降期(14:50—16:10)。集热性能系数随太阳辐射强度的降低而持续降低,蓄热水池温度缓慢升高。期间太阳辐射强度由 361.5 W/m^2 降低至 154.6 W/m^2 ,集热性能系数由3.8在15:10降低至3.2,15:30降低至2.3,16:00降低至1.1,16:10降低至0.8,蓄热水池水温由 $45.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $50.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此时间段内太阳辐射强度持续下降,虽然室外空气温度仍处于一天中的较高值但是此时蓄热水池水温已达到设定值($50 \text{ }^\circ\text{C}$),使得集热性能系数持续下降。

通过以上分析,针对集热系统的运行模式得到以下结论:1)在太阳辐射强度和环境温度缓慢升高的上午,当蓄热水池水温低于 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 时运行集热,集热系统的 COP_c 可随太阳辐射强度的增大而增大至3.0;2)在空气温度和太阳辐射强度较高的中午,当蓄热水池水温低于 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 时运行集热,则集热系统的 $\text{COP}_c > 3.8$;3)在太阳辐射强度逐渐降低,蓄热水池水温高于 $47 \text{ }^\circ\text{C}$ 的下午运行集热时,集热性能系数由3.2最终降低至0.8。

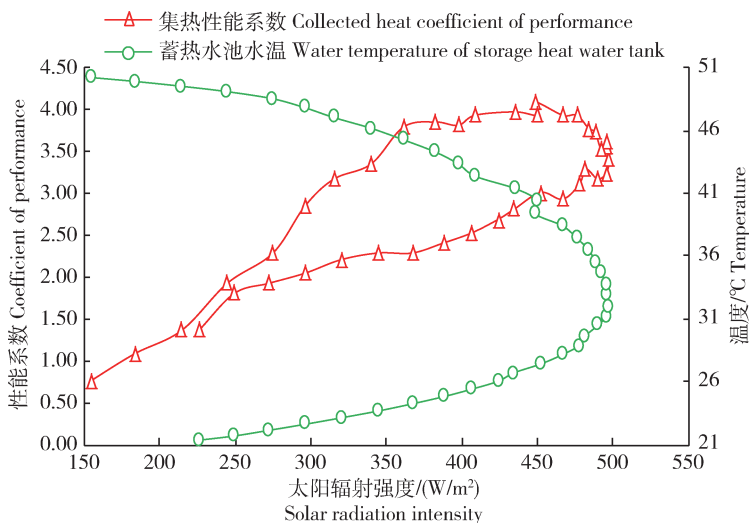


图6 集热性能系数和蓄热水池水温随太阳辐射强度的变化

Fig. 6 Relationship between collected heat COP and water temperature of storage heat watertank with solar radiation intensity

3 讨论与结论

本研究以直膨式太阳能热泵为集热系统,在大跨度主动蓄能型温室内对比分析了仅根际加温和根际及空气同时加温在连续阴天和连续晴天的加温效果,集、放热运行性能,并通过集热系统分析,提出了集热系统的优化运行模式。具体结论如下:

1)直膨式太阳能热泵根际及空气加温方式,热能利用率高,节能效果明显。连续阴天和连续晴天所集热能的利用率 η 分别达到了97.2%和92.7%,整套系统的节能率 R 分别达到了47.2%和50.4%,整套系统的性能系数 COP_{total} 分别达到了1.9和2.0。

2)根际与空气结合的加温方式,加温效果明显。不同天气条件下试验区的根际温度在17.9℃以上,比对照区高1.5℃,空气温度在11.6℃以上,比对照区高3.6℃,相对湿度在90.8%以下,比对照区低3.2%。

3)直膨式太阳能热泵集热效率得到了提高,集热性能稳定。不同天气条件下集热系统均能在设定时间内达到设定集热温度目标,且其集热性能系数 $COP_c > 2.3$,其集热效率 $\mu > 149.6\%$ 。

4)直膨式太阳能热泵集热性能系数与集热时间、太阳辐射强度、环境温度和蓄热水池水温均有关系。9:30—11:30,蓄热水池水温低于27℃时,集热系统的 COP_c 可随太阳辐射强度增大至3.0;11:30—14:50,蓄热水池水温低于45℃时,集热系统的集热性能系数高于3.8;15:10以后,蓄热水池水温高于47℃时,集热性能系数由3.2最终降低至0.8。

根际与空气结合的加温方式不仅提高了所集热能的利用效率和温室加温效果,同时提高了集热系统的集热性能。此外,根据集热环境条件优化集热运行模式,可进一步提高集热系统的集热性能,实现温室节能生产。为了丰富集热运行模式,下一步将研究集热系统在夜间的优化运行模式。本研究提出的试验系统主要用于温室加温,为此在接下来的研究中应涉及加温系统经济性以及对作物生长和产量的影响,从而更全面的为直膨式太阳能热泵和根际及空气结合的加温方式在温室中的推广和应用提供理论依据。

参考文献 References

- [1] 傅晓耕. 温室节能的设计与运行研究[J]. 建筑节能, 2017(9): 118-120
Fu X G. Theory for energy-saving design and operation of greenhouse[J]. *Building Energy Efficiency*, 2017(9): 118-120 (in Chinese)
- [2] 叶崇文, 段茂春, 徐娥. 设施农业发展现状及对策探讨[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(22): 4386-4390
Ye C W, Duan M C, Xu E. The current situation of facility agriculture development and counter measures [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(22): 4386-4390 (in Chinese)
- [3] 陈教科. 基于模型优化预测与流场分析的温室能耗控制方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2016
Chen J L. A control method of energy saving for the greenhouse based on model optimized prediction and computational fluid dynamics analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese)
- [4] 杨其长. 荷兰温室节能工程研究进展[J]. 农业工程技术: 温室园艺, 2007(1): 13-14
Yang Q C. Research progress of Dutch greenhouse energy conservation project [J]. *Agricultural Engineering Technology: Greenhouse Horticulture*, 2007(1): 13-14 (in Chinese)
- [5] 冯广和. 温室的节能问题[J]. 农村实用工程技术: 温室园艺, 2004(5): 23-25
Feng G H. Energy conservation of greenhouse [J]. *Applied Engineering Technology in Rural Areas: Greenhouse Horticulture*, 2004(5): 23-25 (in Chinese)
- [6] 赵丽平, 刘春旭, 张连萍, 赵忠良. 寒冷地区现代温室加温系统[J]. 农机化研究, 2011, 33(10): 245-248
Zhao L P, Liu C X, Zhang L P, Zhao Z L. Heating system of modern greenhouse in cold areas [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(10): 245-248 (in Chinese)
- [7] 徐刚毅, 刘明池, 李武, 许超, 武良. 电锅炉供暖日光温室土壤加温系统[J]. 中国农学通报, 2011, 27(14): 171-174
Xu G Y, Liu M C, Li W, Xu C, Wu L. Effect of electric boiler heating system for soil warming in solar greenhouse [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(14): 171-174 (in Chinese)
- [8] 赵云龙, 于贤昌, 李衍素, 贺超兴, 闫妍. 碳晶电地热系统在日光温室番茄生产中的应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 131-138
Zhao Y L, Yu X C, Li Y S, He C X, Yan Y. Application of electric carbon crystal soil-warming system for tomato production in greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(7): 131-138 (in Chinese)
- [9] Zabeltitz C. Greenhouse heating with solar energy [J]. *Energy in Agriculture*, 1986, 5(2): 111-120

- [10] 毛罕平, 王晓宁, 王多辉. 温室太阳能加热系统的设计与试验研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(3): 305-309
Mao H P, Wang X N, Wang D H. The design and test of greenhouse solar energy heating system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2004, 25(3): 305-309 (in Chinese)
- [11] Ntinou G K, Fragos V P, Nikita-Martzopoulou C. Optimizing the thermal energy contribution of a solar energy storage system in a greenhouse[J]. *Acta Horticulturae*, 2017(1170): 875-882
- [12] Zhou N, Yu Y, Yi J, Liu R. A study on thermal calculation method for a plastic greenhouse with solar energy storage and heating[J]. *Solar Energy*, 2017, 142: 39-48
- [13] 孙先鹏, 邹志荣, 赵康, 毕胜山, 郭康权. 太阳能蓄热联合空气源热泵的温室加热试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 215-221
Sun X P, Zou Z R, Zhao K, Bi S S, Guo K Q. Experiment on heating effect in greenhouse by solar combined with air-source heat pump [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(22): 215-221 (in Chinese)
- [14] 孙淑钧. 温室加温系统及存在问题[J]. 中国花卉园艺, 2012(4): 48-49
Sun S J. Greenhouse heating system and existing problem[J]. *China Flowers & Horticulture*, 2012(4): 48-49 (in Chinese)
- [15] 闫彦涛. 温室平板太阳能相变蓄热系统的设计及应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
Yan Y T. Research on the design and application of plate solar-phase change heat storage system in greenhouse [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016 (in Chinese)
- [16] 张日新, 张跃峰. 温室节能技术[J]. 中国花卉园艺, 2013(6): 48-49
Zhang R X, Zhang Y F. Greenhouse energy saving technology [J]. *China Flowers & horticulture*, 2013 (6): 48-49 (in Chinese)
- [17] Chai L L, Ma C W, Zhang Y, Wang M L, M Y L, Ji X H. Energy consumption and economic analysis of ground source heat pump used in greenhouse in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 249-254
- [18] Liu M, Xu Y, Xu G, Li W, Xu C, Sun J. Research on water source heat pump heating system in intelligence greenhouse [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(17): 192-199
- [19] Ozgener O, Hepbasli A. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system[J]. *Energy & Buildings*, 2005, 37(1): 101-110
- [20] Ozgener O, Hepbasli A. A parametrical study on the energetic and exergetic assessment of a solar-assisted vertical ground-source heat pump system used for heating a greenhouse[J]. *Building & Environment*, 2007, 42(1): 11-24
- [21] Tong Y, Kozai T, Nishioka N, Ohyama K. Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP)[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(4): 405-411
- [22] 李洁, 王振辉, 崔海亭. 新型太阳能与热泵复合供暖系统的研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(10): 199-201
Li J, Wang Z H, Cui H T. Study a new type compound heating system of solar energy and heat pump [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(10): 199-201 (in Chinese)
- [23] 江力. 日光温室冬季土壤加热和空气加热效果研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017
Jiang L. The effect research of winter soil heating and air heating in solar greenhouse[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017 (in Chinese)
- [24] 于威, 王铁良, 刘文合, 张莹. 太阳能土壤加温系统在日光温室土壤加温中的应用效果研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(2): 190-194
Yu W, Wang T L, Liu W H, Zhang Y. Application research on the heating effect of solar geothermal heating system on soil temperature in the solar greenhouse[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(2): 190-194 (in Chinese)
- [25] 李炳海, 须晖, 李天来, 卫向东, 王欣欣. 日光温室太阳能地热加温系统应用效果研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(2): 152-155
Li B H, Xu H, Li T L, Wei X D, Wang X X. Application of solar energy soil heating system in greenhouse[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2009, 40(2): 152-155 (in Chinese)
- [26] 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 H, Yang Q C, Zhang Y. Experimental study on shallow soil assisted heat release-storage system with water-water heat pump in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(20): 210-216 (in Chinese)
- [27] 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 (in Chinese)
- [28] 李文. 日光温室主动蓄放热系统设计及应用效果研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013
Li W. Design of active heat storage-release system and research on the application effect in the Chinese solar greenhouse[D]. Beijing: China Academy of Agriculture Science, 2013 (in Chinese)
- [29] 柯行林, 杨其长, 张义, 方慧, 和永康, 张晨. 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, Fang H, He Y K, Zhang C. 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 (in Chinese)
- [30] 周升. 大跨度主动蓄能型温室太阳能热泵增温试验研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2016
- Zhou S. Experimentresearch on large-scale greenhouse with active heat storage and solar-assisted heat pump heating system [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016 (in Chinese)
- [31] 李振兴. 直膨式太阳能热泵热水系统性能的优化分析[D]. 青岛:山东科技大学, 2010
- Li Z X. Optimizing analysis of the performance of direct expansion solar assisted heat pump water heating system[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010 (in Chinese)
- [32] 解苗苗, 党相兵, 关欣. 直膨式太阳能热泵系统性能分析及优化[J]. 能源研究与信息, 2014, 30(2): 73-78
- Xie M M, Dang X B, Guan X. Performance analysis and optimization of the direct-expansion solar-assisted heat pump system[J]. *Energy Research and Information*, 2014, 30(2): 73-78 (in Chinese)
- [33] 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(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(1): 47-55 (in Chinese)
- [34] 甘建红. 太阳能热泵采暖系统的研究[D]. 天津:天津大学, 2010
- Gan J H. Research on solar heat pump heating system for space [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010 (in Chinese)
- [35] 方慧, 张义, 杨其长, 卢威, 周波, 周升. 日光温室金属膜集放热装置增温效果的性能测试[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 177-182
- Fang H, Zhang Y, Yang Q C, Lu W, Zhou B, Zhou S. Performance testing on warming effect of heat storage-release metal film in Chinese solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(15): 177-182 (in Chinese)
- [36] Schonbeck M W, Evanylo G K. Effects of mulches on soil properties and tomato production I. Soil temperature, soil moisture and marketable yield [J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1998, 13(1): 55-81
- [37] 赵玉萍, 邹志荣, 白鹏威, 任雷, 李鹏飞. 不同温度对温室番茄生长发育及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(2): 133-137
- Zhao Y P, Zou Z R, Bai P W, Ren L, Li P F. Effect of different temperature on the growth and yield of tomato in greenhouse [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(2): 133-137 (in Chinese)
- [38] 傅国海, 刘文科. 日光温室4种起垄覆膜方式对甜椒幼苗生长的影响[J]. 农业工程, 2015, 5(4): 67-70
- Fu G H, Liu W K. Effects of four kinds of film covering cultivation ridges on growth of sweet pepper seedlings in chinese solar greenhouse[J]. *Agricultural Engineering*, 2015, 5(4): 67-70 (in Chinese)
- [39] 赵方亮. 带有涂层蒸发器的直膨式太阳能热泵系统的实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015
- Zhao F L. The experimental study of direct expansion solar assisted heat pump with evaporator covered by coating[D]. Hefei: University of Science and technology of China, 2015 (in Chinese)

责任编辑:刘迎春