

主动蓄放热-热泵联合加温系统在日光温室的应用

孙维拓^{1,2}, 杨其长^{1,2*}, 方 慧^{1,2}, 张 义^{1,2}, 管道平³, 卢 威^{1,2}

(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. 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081; 3. 北京昌平国家农业科技园区, 北京 102211)

摘 要: 为提高主动蓄放热系统集热效率, 增强日光温室抵御低温能力, 设计了一套主动蓄放热-热泵联合加温系统。白天运行主动蓄放热系统, 将北墙获得的太阳辐射能储存到蓄水池中; 根据天气情况及蓄水池水温变化适时开启热泵机组, 降低主动蓄放热系统循环水温, 进而提升其集热效率; 夜间室内气温较低时, 通过主动蓄放热系统放热。试验结果表明: 与对照温室相比, 试验温室夜间气温高出 5.26~6.64℃; 热泵机组制热性能系数 COP_{Hp} 为 4.38~5.17, 主动蓄放热系统可为热泵机组热源提供充足的热量, 保证理想的热源温度; 在日光温室特定的光热环境下, 主动蓄放热-热泵联合加温系统的集热效率达到了 72.32%~83.62%, 总体 COP_{Sys} 值达 5.59, 节能效果显著。该研究为提高日光温室夜间温度提供了新思路。

关键词: 温室, 热泵, 蓄热, 日光温室, 放热

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.021

中图分类号: S625.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0168-10

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 Weituo, Yang Qichang, Fang Hui, 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 (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 168—177. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

日光温室是中国特有的一种以日光为主要能量来源的温室结构型式, 具有高效、节能和低成本等显著特征, 已经成为中国“三北地区”蔬菜反季节生产和农民致富的重要手段。日光温室白天利用北墙蓄积热量、夜晚释放增温, 由于墙体材料的传热特性和热容量的限制, 热能蓄积与释放过程缓慢, 蓄、放热量有限, 冬季低温及冷害时有发生, 影响作物产量和品质^[1-6]。因此, 提升日光温室蓄放热能力、减少低温冷害已经成为当前日光温室最紧迫的任务^[7-13]。

近年来, 如何提升日光温室蓄放热能力的研究得到极大关注, 张义等提出了主动式蓄放热思想, 即白天利用流体介质的循环不断将到达墙体

表面的太阳辐射能吸收并蓄积起来, 夜间再通过流体的循环释放热量, 变日光温室被动蓄放热方式为主动蓄放热方式, 实现热量在空间、时间上的转移, 从而提高太阳能利用效率, 提升温室夜间温度^[14-15]。但主动蓄放热系统在高寒地区以及太阳辐射较弱的天气等条件下, 室内温度仍难以保证。热泵作为一种高效的能量提升手段, 被越来越多的应用于温室加温^[16-29], 主动蓄放热系统与热泵结合可有效降低循环水温, 进而提升集热效率。因此, 为提升主动蓄放热系统加温性能和稳定性、提高日光温室夜间温度, 在主动蓄放热思想的基础上, 本研究设计了一套用于日光温室夜间加温的主动蓄放热-热泵联合加温系统, 并对其加温效果和性能进行了试验测试, 以期对日光温室蓄热保温技术升级提供新途径。

1 试验系统设计

1.1 试验温室

2012 年 12 月 5 日—2013 年 2 月 5 日对主动蓄放热-热泵联合加温系统进行了试验测试。试验日光温室位于北京市昌平区小汤山现代农业科技示范园西区, 温室东西走向, 长 49 m, 跨度 8 m, 后墙高 2.5 m, 脊高 3.7 m, 后坡长 1.5 m, 后坡仰角 45°, 采用钢骨架结构, 前坡覆盖材料

收稿日期: 2013-04-03 修订日期: 2013-08-25

基金项目: 863 计划资助课题 (2013AA102407); 国家自然科学基金资助项目 (31071833); 国家科技支撑计划 (2011BAE01B00); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203002)

作者简介: 孙维拓 (1989—), 男, 山东邹城人, 主要从事设施农业环境工程方面的研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: swt0226@163.com

*通信作者: 杨其长 (1963—), 男, 安徽无为为人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事设施园艺环境工程研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: yangq@ieda.org.cn

为单层 0.08 mm PVC 塑料薄膜, 北墙内侧为 12 cm 厚红砖, 外侧为 24 cm 厚红砖, 中间为 10 cm 厚聚苯板, 后坡内侧为 10 cm 厚预制板, 外侧为 10 cm 厚聚苯板。对照温室结构、材料和建造时间均与试验温室相同, 两温室南北方向间距 8 m。试验温室使用主动蓄放热-热泵联合加温系统; 对照温室不使用任何加温设施, 只靠后墙蓄热增温。试验期间保温被 08:30 揭开, 16:00 覆盖。

系统测试前于 2012 年 12 月 2 日—12 月 3 日进行了室内基础气温的测定, 结果显示白天 (08:30~16:00) 试验温室和对照温室平均气温分别为 11.80 和 11.40℃, 试验温室气温略高, 主要原因是其北墙装有主动蓄放热装置, 黑膜太阳辐射吸收系数高、升温快; 夜间 (16:00~08:30) 试验温室和对照温室平均气温分别为 7.36 和 7.56℃, 单因素方差分析显示两者无显著差异 ($P>0.05$), 因此试验温室和对照温室的选择是合理的。

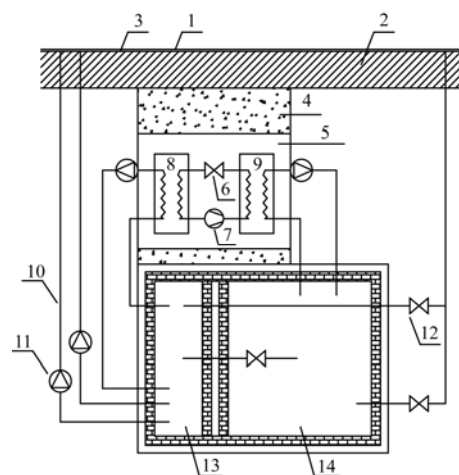
1.2 系统组成

主动蓄放热-热泵联合加温系统由主动蓄放热系统、热泵机组和蓄热水池等部分组成。主动蓄放热装置、循环水泵和循环管道构成了温室的主动蓄放热系统, 白天用于集热, 晚上放热。主动蓄放热装置安装于北墙内侧距地面 0.4 m 高处, 集热材料为双层黑色 PE 膜, 双层膜紧密贴合, 循环水在双层膜间流动, 装置采用单元式结构, 单元高 2 m, 宽 1.35 m, 共 29 个单元, 单元间距 0.15 m; 循环水泵 2 台, 额定流量分别为 10 和 7 m³/h, 扬程 10 m; 循环管道由不同口径的 PVC 管连接而成, 管外覆盖保温套。热泵机组型号为 DISMY DDR-192GSPA1-PA, 额定制热量 21 kW, 额定制热输入功率 5.12 kW, 机组水泵为格兰富 CH4-20, 蒸发器侧水流量 3.3 m³/h, 冷凝器侧水流量 1.8~3.9 m³/h。蓄热水池由蓄水池 I 和 II 组成, 两者中间由 $\Phi 80$ 的截止阀控制连通, 蓄水池 I 为热泵机组热源, 实际蓄水量 1.725 m³, 蓄水池 II 为热泵机组热汇, 实际蓄水量 5.625 m³, 蓄热水池主体材料为 12 cm 厚普通黏土砖墙, 外表面紧贴 10 cm 厚聚苯板, 内表面涂抹 0.3 cm 厚防渗水泥砂浆。热泵机组和蓄水池位于温室中部, 图 1 为系统平面布局图。

1.3 系统工作原理

日光温室主动蓄放热系统吸收太阳辐射能并将热量储存在蓄水池 I 中, 源源不断的为热泵机组热源提供热量, 使热泵机组蒸发器侧热

源温度稳定较高, 可有效提高热泵机组 COP 值。同时, 热泵机组不断将蓄水池 I 中的热量泵取至蓄水池 II, 降低主动蓄放热系统集热阶段的循环水温, 有助于提高主动蓄放热系统的集热效率并延长集热时间, 最终提升系统加温性能和稳定性。



1. 北墙 2. 过道 3. 主动蓄放热装置 4. 水泥台 5. 热泵机组
6. 膨胀阀 7. 压缩机 8. 蒸发器 9. 冷凝器 10. 循环管道 11. 循环水泵 12. 阀门 13. 蓄水池 I 14. 蓄水池 II
1. North wall 2. Passageway 3. Active heat storage-release device
4. Cement and sand screed 5. Heat pump unit 6. Expansion valve
7. Compressor 8. Evaporator 9. Condenser 10. Circulating pipe
11. Water circulating pump 12. Valve 13. Reservoir I 14. Reservoir II

图 1 主动蓄放热-热泵联合加温系统平面布局图

Fig.1 Plane layout diagram of active heat storage-release associated with heat pump heating system

1.4 系统运行方式

如图 2 所示系统运行分为 4 个阶段: 1) 早上 08:30 揭开保温被, 同时开启循环水泵, 关闭阀门 1, 打开阀门 2 和 3, 主动蓄放热系统开始集热。此阶段蓄水池 I 和 II 连通, 水温不断升高, 如图 2a。2) 下午, 根据天气情况及蓄水池水温变化适时开启热泵, 同时打开阀门 1, 关闭阀门 2 和 3, 一般热泵开启时间在 12:00~13:30 之间, 多云天气和阴天早开, 晴天晚开, 运行 1.5~3 h。此阶段蓄水池 I 和 II 断开连通, 蓄水池 I 由主动蓄放热系统持续供热, 并作为热泵机组的热源, 水温逐渐下降, 蓄水池 II 作为热汇, 水温逐渐升高, 如图 2b。3) 保温被覆盖之前适时关闭热泵, 一般预留 0.5 h 单独运行主动蓄放热系统为蓄水池 I 回温, 然后关闭循环水泵, 系统白天集热阶段结束。此阶段蓄水池 I 水温升高, 蓄水池 II 水温不变, 如图 2c。4) 夜间室内气温降低, 00:00~08:30 运行主动蓄放热系统为温室供热。此阶段蓄水池 I 和 II 连通, 水温逐渐降低, 如图 2d。

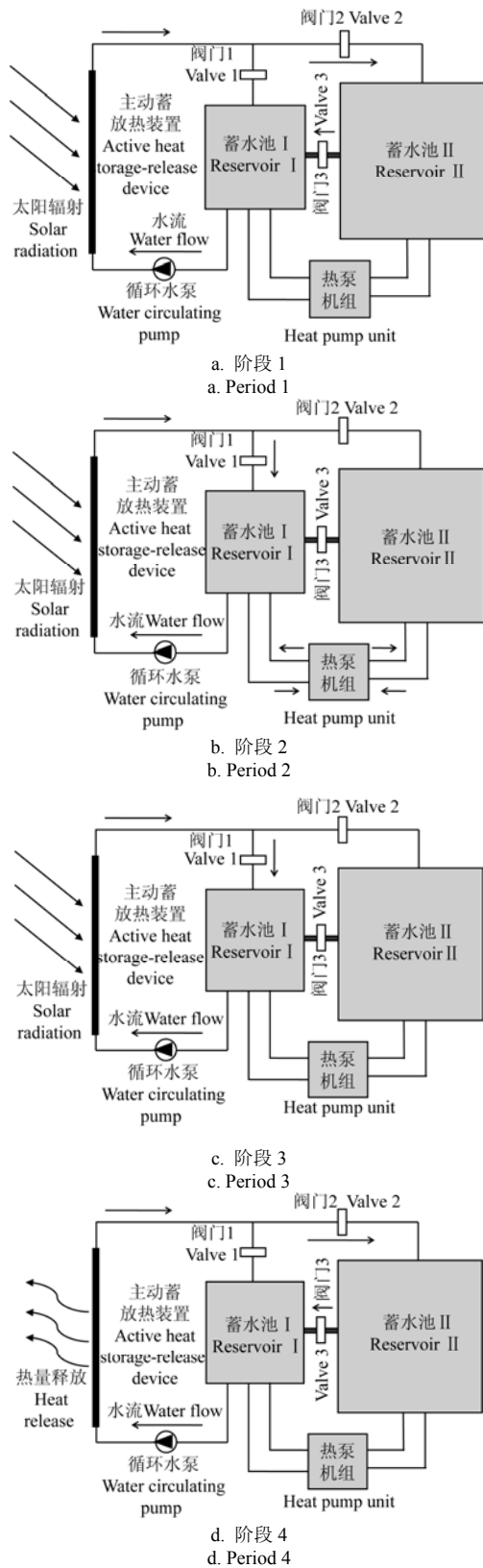


Fig.2 Schematic diagram of system operation mode

2 试验方法

2.1 测试仪器与测点布置

选用T型热电偶作为温度传感器分别对试验温室气温、蓄水池I和II水温、主动蓄放热系统供回

水温度、热泵蒸发器侧进出水温度、热泵冷凝器侧进出水温度进行测量,精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,气温传感器做防辐射处理,水温传感器做防锈处理。选用美国坎贝尔公司生产的CR1000数据采集仪进行数据记录。其中,试验温室气温测点5个,分别布置于日光温室跨中距东墙12、24和36m处,距东墙24m,距北墙2和6m处,测点距地面1.5m;蓄水池I和II水温测点置于蓄水池中部。

选用美国坎贝尔公司生产的太阳辐射传感器测量北墙太阳辐射量,准确度为0.5%,测量范围为 $0\sim 2\,000\text{ W/m}^2$,探头置于北墙内表面距东墙24m、距地面1.5m高处。

选用德国图公司生产的testo174T型温度自动记录仪测量对照温室气温、室外气温,精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,测量范围为 $-30\sim 70^{\circ}\text{C}$,对照温室气温测点布置同试验温室,室外气温测点置于东侧山墙外1.5m高处。

选用普通电参数表记录热泵机组和循环水泵用电量、瞬时功率。

选用大连索尼卡仪表公司生产的FV系列手持式超声波流量计测量主动蓄放热系统循环水泵流量,热泵机组冷凝器侧、蒸发器侧水流量。

所有设备仪器自动采集数据时间步长为10min。

2.2 系统集成放热过程计算

试验中蓄水池I、II水温变化与系统的集成放热过程紧密相关,系统实际供热量 Q_{Sup} 、系统总制热量 Q_{Sys} 、热泵机组制热量 Q_{Hp} 可由下式计算得出^[15]

$$Q_{\text{Sup}} = \rho_w C_w (\Delta T_{1,\text{Sup}} V_1 + \Delta T_{2,\text{Sup}} V_2) \quad (1)$$

$$Q_{\text{Sys}} = \rho_w C_w (\Delta T_{1,\text{Sys}} V_1 + \Delta T_{2,\text{Sys}} V_2) \quad (2)$$

$$Q_{\text{Hp}} = \rho_w C_w \Delta T_{2,\text{Hp}} V_2 \quad (3)$$

式中, ρ_w 为水的密度,取 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; C_w 为水的比热容,取 $4.2 \text{ kJ/(kg} \cdot ^{\circ}\text{C)}$; $\Delta T_{1,\text{Sup}}$ 、 $\Delta T_{2,\text{Sup}}$ 、 $\Delta T_{1,\text{Sys}}$ 、 $\Delta T_{2,\text{Sys}}$,分别为系统供热阶段、系统集热阶段蓄水池I、II水温变化, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{2,\text{Hp}}$ 为热泵机组运行阶段蓄水池II水温变化, $^{\circ}\text{C}$; V_1 、 V_2 分别为蓄水池I、II实际蓄水量, m^3 。

热泵机组制热性能系数 COP_{Hp} 计算式为^[26]

$$\text{COP}_{\text{Hp}} = \frac{Q_{\text{Hp}}}{E_{\text{Hp}}} \quad (4)$$

式中, Q_{Hp} 为热泵机组运行阶段制热量,kJ; E_{Hp} 为热泵机组运行阶段的耗电量,kJ。

热泵机组瞬时 $\text{COP}_{\text{Hp,ins}}$ 值计算式为^[26]

$$\text{COP}_{\text{Hp,ins}} = \frac{dQ_{\text{Co}}/dt}{P_{\text{Hp}}} = \frac{\rho_w q_{\text{Co}} C_w \Delta T_{\text{Co}}}{3600 P_{\text{Hp}}} \quad (5)$$

式中, dQ_{Co} 为单位时间内热泵机组冷凝器侧输出热量,kJ; P_{Hp} 为热泵机组瞬时输入功率,kW; q_{Co}

为热泵机组冷凝器侧循环水流量, 实测 $1.84 \text{ m}^3/\text{h}$;
 ΔT_{Co} 为冷凝器侧瞬时供回水温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

主动蓄放热系统的集热效率计算式为^[14]

$$\eta_{Act} = \frac{Q_{Act}}{A_{Act} I_T t_{Act}} \times 1000 \quad (6)$$

$$Q_{Act} = Q_{Sys} - E_{Hp} \quad (7)$$

式中, η_{Act} 为主动蓄放热系统集热效率; Q_{Sys} 为系统集热阶段总制热量, kJ ; Q_{Act} 为主动蓄放热系统集热量, 即系统太阳辐射吸收总量, kJ , 计算时忽略热泵循环的不可逆损失; A_{Act} 为主动蓄放热装置有效集热面积, m^2 ; I_T 为平均太阳辐射量, W/m^2 ; t_{Act} 为主动蓄放热系统的集热时间, s 。

主动蓄放热系统的集热功率计算式为

$$P_{Act} = I_T \times \eta_{Act} \quad (8)$$

式中, P_{Act} 为主动蓄放热系统集热功率, W/m^2 。

整个系统的 COP_{Sys} 值计算式为^[27]

$$COP_{Sys} = \frac{Q_{Sys}}{E_{Hp} + E_{Pumps}} \quad (9)$$

式中, E_{Pumps} 为主动蓄放热系统白天集热阶段循环水泵的耗电量, kJ 。

3 试验结果与分析

选取 2012 年 12 月 22 日—12 月 27 日此冬天最

冷的连续 5 d 的试验数据进行分析, 天气状况为晴天或多云。热泵机组在 12 月 22 日—12 月 23 日运行 1.5 h, 12 月 23 日—12 月 24 日运行 2.75 h, 其后 3 d 运行 2 h; 主动蓄放热系统在 12 月 23 日—12 月 24 日白天集热时间为 08:30~16:00, 其余 4 d 白天集热时间皆为 08:30~15:30。由于系统白天集热、夜间放热, 为便于分析系统加温规律, 本文将 08:30~次日 08:30 视为一个加温周期。

3.1 系统加温效果

3.1.1 总体加温效果

表 1 所示为 2012 年 12 月 22 日—12 月 27 日连续 5 个夜间试验温室和对照温室室内、外气温及系统供热量变化具体数值。连续 5 个夜间系统实际供热量为 $3.11 \times 10^5 \sim 3.97 \times 10^5 \text{ kJ}$, 试验温室平均气温为 $9.02 \sim 10.33^{\circ}\text{C}$, 比对照温室提高 $5.26 \sim 6.64^{\circ}\text{C}$, 最低气温提高 $5.19 \sim 6.38^{\circ}\text{C}$, 室内外温差为 $21.62 \sim 27.55^{\circ}\text{C}$ 。白天运行主动蓄放热系统吸收太阳辐射能, 开启热泵进行能量提升, 因此, 夜间供热量主要来源于太阳辐射能及少部分的电能, 这样通过试验温室和对照温室夜间室温的对比, 可以看出系统加温效果非常明显, 但整体室内气温偏低, 其原因: 1) 外界环境温度过低, 最低达 -18.80°C ; 2) 试验日光温室已使用多年, 保温性能降低。

表 1 夜间温室室内、外热环境参数

Table 1 Thermal environmental parameters inside and outside of greenhouses at night

日期 Date	试验温室气温 Experimental greenhouse indoor air temperature/ $^{\circ}\text{C}$		对照温室气温 Comparative greenhouse indoor air temperature/ $^{\circ}\text{C}$		室外气温 Outdoor air temperature/ $^{\circ}\text{C}$		供热量 Q_{Sup} Heating load /kJ
	平均值 Average	最低值 Minimum	平均值 Average	最低值 Minimum	平均值 Average	最低值 Minimum	
2012-12-22 至 2012-12-23	9.12	7.82	3.86	2.63	-13.45	-15.10	3.14×10^5
2012-12-23 至 2012-12-24	10.05	8.55	3.41	2.17	-17.50	-18.80	3.97×10^5
2012-12-24 至 2012-12-25	9.67	8.68	3.98	3.13	-11.95	-13.50	3.39×10^5
2012-12-25 至 2012-12-26	10.33	8.94	3.79	2.63	-15.38	-16.50	3.78×10^5
2012-12-26 至 2012-12-27	9.02	7.94	3.46	2.47	-14.98	-15.70	3.11×10^5

注: 温度及供热量为系统供热阶段 (00:00~08:30, 不包括 00:00) 数据。

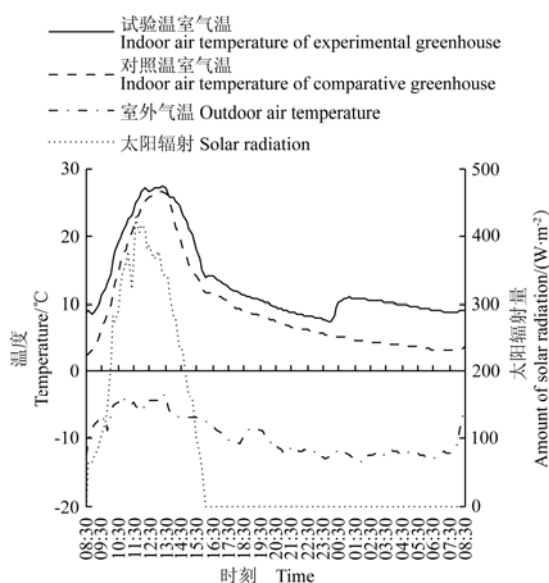
Note: Temperatures and heating load were the data during system heating period (00:00~8:30, exclusive of 00:00).

3.1.2 温室昼夜气温变化特征

选取 2012 年 12 月 24 日—12 月 25 日典型晴天分析试验温室和对照温室室内气温日变化特征。图 3 所示为 12 月 24 日—12 月 25 日室内、外气温及太阳辐射量变化曲线, 可以看出白天和夜间试验温室气温均高于对照温室, 白天 (08:30~16:00)、前半夜 (16:00~24:00) 和后半夜 (00:00~08:30) 温差分别为 3.29、2.06 和 5.69°C , 系统加温效果显著。24 日早上 08:30 揭开保温被, 试验温室气温 8.78°C , 对照温室气温 2.37°C , 温差为 6.41°C , 这是系统夜间供热的结

果。随着太阳辐射量的增加, 试验温室和对照温室气温逐渐升高且前者气温一直高于后者, 前者在 13:20 达到最高值 27.39°C , 后者在 13:10 达到最高值 26.60°C , 主要原因: 1) 试验温室初始气温高于对照温室; 2) 在试验温室中 11:00 之前循环水温度一直高于室内气温且最大温差为 8.82°C , 主动蓄放热系统在吸收太阳辐射的同时也在向室内空气释放热量。由于室外温度很低, 温室向外散失热量迅速, 13:20 以后随着太阳辐射量降低, 室内气温开始下降, 即使此阶段运行热泵, 主动蓄放热系统循环水温仍高于试验温室

气温,温差从 0.41°C 逐渐增大到 6.66°C , 循环水不断向室内空气释放热量,直至 15:30 系统运行结束,16:00 覆盖保温被时试验温室气温 13.63°C ,对照温室气温 11.67°C ,温差为 1.96°C 。前半夜室内气温下降相对平缓,到 24:00 主动蓄放热系统供热之前,试验温室和对照温室气温分别降至 7.24 和 5.23°C ,温差为 2.01°C ,主要原因:1)16:00 覆盖保温被时试验温室基础气温比对照温室高;2)在试验温室中,虽然蓄水池保温性能良好,但水温与室内气温、土温具有较大温差,此阶段蓄水池也会向室内空气和土壤散失热量,对室内气温产生一定影响,经计算 16:00~24:00 蓄水池散失热量 $7.04 \times 10^4 \text{ kJ}$ 。后半夜系统供热,试验温室气温先升高再缓慢下降,对照温室气温逐渐下降。



注: 2012 年 12 月 24 日至 12 月 25 日。

Note: From Dec.24 to Dec.25, 2012.

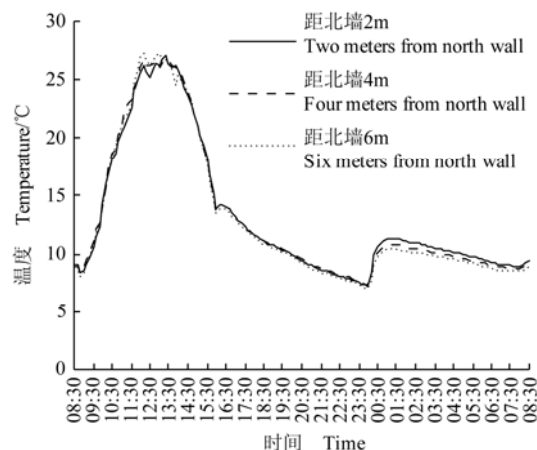
图 3 试验温室与对照温室室内气温对比

Fig.3 Indoor air temperature comparison between experimental and comparative greenhouse

3.1.3 试验温室南北方向气温分布

图 4 所示为 2012 年 12 月 24 日-12 月 25 日沿试验温室东西中心线南北方向气温分布情况,可以看出白天距北墙 2、4 和 6 m 处温度变化基本相同,其中距墙 2 m 处平均气温为 19.93°C ,比距北墙 4 和 6 m 处分别低 0.17 和 0.10°C 。覆盖保温被以后,前半夜距北墙 2、4 和 6 m 处平均气温分别为 10.24 、 10.21 和 10.01°C ,距北墙 6 m 处气温略低,这是由于北墙蓄积的热量在前半夜缓慢向温室释放,离北墙越近温度越高,同时与北墙及后坡相比,前坡的保温覆盖材料传热系数更大,再加上保温被并不能完全覆盖前坡,特别是在前坡与基墩结合处的部分区域塑料薄膜直接与外界

环境接触,使得距离北墙越远的区域气温越低。后半夜系统供热,距北墙 2 m 处气温为 10.14°C ,比距墙 4 和 6 m 处分别高出 0.47 和 0.68°C ,温差比白天明显,但最大不超过 0.93°C 。由此可见,系统运行对温室南北方向温度梯度影响较小,室内气温分布比较均匀。



注: 2012 年 12 月 24 日至 12 月 25 日。

Note: From Dec.24 to Dec.25, 2012.

图 4 试验温室南北方向气温变化曲线

Fig.4 Indoor air temperature curves of the experimental greenhouse in south-north direction

3.2 系统及组件性能分析

3.2.1 热泵机组性能

表 2 为连续 5 d 热泵机组运行时间及制热工况性能参数,可以看出热泵机组 COP_{Hp} 值为 $4.38 \sim 5.17$,冷凝器侧出水温度为 $41.11 \sim 46.92^{\circ}\text{C}$,随着冷凝器侧出水温度的提高,热泵 COP_{Hp} 值逐渐降低。传统水、地源热泵在制热工况下,当蒸发器的进水温度升高时蒸发温度升高,蒸发压力增大,制热量增加,但因此引起的压缩机输入功率的增加缓慢, COP_{Hp} 值增大;当蒸发器侧进水温度增大到一定数值后,进水温度对 COP_{Hp} 值的影响减小^[30-31]。12 月 24 日-12 月 27 日连续 3 d 热泵开启时间皆为 2 h,蒸发器侧进水温度为 $23.94 \sim 27.74^{\circ}\text{C}$,热泵机组制热量 $1.933 \times 10^5 \sim 1.944 \times 10^5 \text{ kJ}$,相差较少,且随着蒸发器侧进水温度的升高,热泵制热量逐渐增加,但小于能耗增加幅度, COP_{Hp} 值逐渐降低,这说明相对于蒸发器侧进水温度,冷凝器侧出水温度成为制约热泵 COP_{Hp} 值的主要因素。因此,在冬季晴天及多云天气,主动蓄放热系统可以为热泵热源提供充足的热量,保证理想的热源温度。

12 月 25 日-12 月 26 日白天平均太阳辐射量为 305.65 W/m^2 ,12 月 26 日-12 月 27 日白天平均太阳辐射量为 196.11 W/m^2 ,在 13:00 开启热泵时

蓄水池 II 水温分别为 29.73 和 24.98℃，前者大于后者，冷凝器侧水温和冷凝温度升高，热泵机组 COP_{Hp} 值前者低于后者。图 5a 所示为 12 月 25 日热泵机组运行阶段瞬时 $COP_{Hp,ins}$ 值及蓄水池 I、II 水温随时间变化曲线。从 13:00 起蓄水池 I、II 断开连通，蓄水池 II 作为热泵热汇水温逐渐升高。蓄水池 I 水温变化受多种因素影响，热泵启动时初始水温 29.83℃，13:10 到达最大值 30.28℃，此阶段主动蓄放热系统提供的热量大于热泵蒸发器侧吸收的热量，水温不断升高；13:10~14:00 热泵稳定运行，随着太阳辐射量由 294.3 W/m² 逐渐下降到

77.01 W/m²（如图 5b），主动蓄放热系统提供的热量小于热泵蒸发器侧吸收的热量，水温下降至 26.02℃；14:10 太阳辐射量突然增加至 388.5 W/m²，之后蓄水池 I 热量出入基本持平，水温变化不大。热泵机组启动电流大，能耗高，2 台压缩机启动具有时间间隔，因此在热泵开启后的 10 min 内瞬时 $COP_{Hp,ins}$ 值较小，13:10 以后热泵运转正常，瞬时 $COP_{Hp,ins}$ 值随蓄水池 II 水温的升高逐渐降低，受蓄水池 I 水温变化影响较小。由此可见，在太阳辐射相对较弱的天气，热泵开启时蓄水池 II 基础水温低，热泵 COP_{Hp} 值大，系统节能效果更显著。

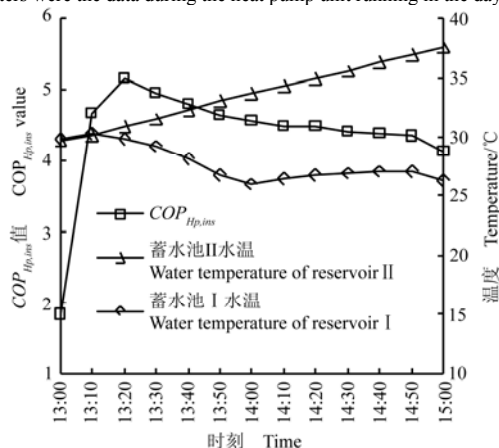
表 2 热泵机组制热工况性能参数

Table 2 Performance parameters of heat pump unit under heating working conditions

日期 Date	热泵机组 启停时间 Heat pump unit start-stop time	蒸发器侧 进水口温度 Evaporator inlet temperature /℃	冷凝器侧 出水口温度 Condenser outlet temperature /℃	蓄水池 II 水温 Temperature of reservoir II			热泵机组 制热量 Q_{Hp} Heat pump unit heating capacity /kJ	热泵机组 耗电量 E_{Hp} Heat pump unit electricity consumption /(kW·h)	COP_{Hp} 值 COP_{Hp} value
				始温 Initial /℃	终温 Final /℃	温升 Increase /℃			
2012-12-22 至 2012-12-23	13:30~15:00	25.99	41.63	26.35	32.22	5.87	1.387×10^5	8.05	4.79
2012-12-23 至 2012-12-24	13:00~15:45	29.97	46.92	28.68	39.66	10.98	2.594×10^5	16.45	4.38
2012-12-24 至 2012-12-25	13:00~15:00	26.66	43.88	27.15	35.36	8.21	1.940×10^5	11.40	4.73
2012-12-25 至 2012-12-26	13:00~15:00	27.74	46.49	29.73	37.96	8.23	1.944×10^5	11.85	4.56
2012-12-26 至 2012-12-27	13:00~15:00	23.94	41.11	24.98	33.16	8.18	1.933×10^5	10.39	5.17

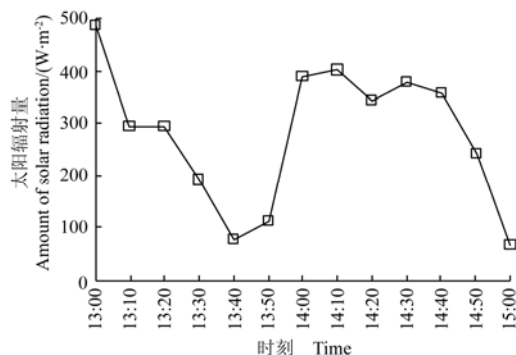
注：各参数为系统白天集热热泵运行阶段数据。

Note: Parameters were the data during the heat pump unit running in the daytime.



a. 热泵机组瞬时 $COP_{Hp,ins}$ 值与蓄水池水温变化

a. Curves of instantaneous $COP_{Hp,ins}$ value of heat pump unit and water temperature of the reservoirs



b. 太阳辐射量变化

b. Amount of solar radiation curves

注：2012 年 12 月 25 日。

Note: Dec.25, 2012.

图 5 热泵机组瞬时 $COP_{Hp,ins}$ 值与蓄水池水温及太阳辐射量变化

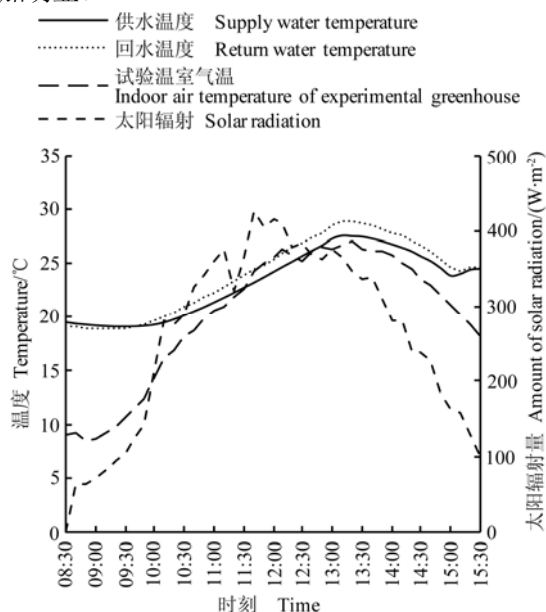
Fig.5 Curves of instantaneous $COP_{Hp,ins}$ value of the heat pump unit, water temperature of the reservoirs and amount of the solar radiation

3.2.2 主动蓄放热系统供回水温度变化

图 6 所示为 2012 年 12 月 24 日主动蓄放热系统白天集热阶段供回水温度变化曲线，可以看出 09:30 之前室内气温较低，循环水吸收的太阳辐射能小于向室内空气释放的热量，回水温度小于供水温度；09:30 以后主动蓄放热系统开始有效蓄热，随着太阳辐射量和室内气温的升高，供回水温差逐渐增加，12:00 供回水温差达到最大值 1.28℃，此时太阳辐射量

414.3 W/m²，室内气温 26.45℃，供水温度 24.17℃；由于水温的升高及太阳辐射量的降低，12:00~13:00 供回水温差逐渐下降至 1.16℃；13:00~15:00 热泵开启，供水温度逐渐下降，但随着太阳辐射量和室内气温的降低，供回水温差先略微上升然后逐渐下降至 0.80℃；15:00~15:30 蓄水池 I 供水温度回升，供回水温差继续降低。在整个集热阶段，供回水温差即主动蓄放热系统的集热功率主要取决于太阳辐射量，受

室内气温与供水温度的制约, 开启热泵可有效降低供水温度, 在系统设计、施工时, 将主动蓄放热系统循环水泵放于靠近热泵蒸发器侧出水口位置, 降温效果更加明显。



注: 2012 年 12 月 24 日。

Note: Dec. 24, 2012.

图 6 主动蓄放热系统白天集热阶段供回水温度变化曲线

Fig.6 Supply and return water temperature curves of active storage-release system during heat collecting period

3.2.3 系统整体性能

表 3 所示为 2012 年 12 月 22 日—12 月 27 日白天集热阶段系统及其组件集热参数。12 月 22 日—12 月 23 日白天系统集热阶段室内平均气温为 21.54℃, 仅比 12 月 24 日—12 月 25 日高 1.02℃, 太阳辐射也最为接近, 但前者主动蓄放热系统的集热效率为 5 d 中最高, 后者为 5 d 中最低, 这是由于 12 月 22 日—12 月 23 日蓄水池初始水温为 14.17℃, 12 月 24 日—12 月 25 日为 19.33℃, 分别为 5 d 中循环水初始进水温度的最低和最高值, 可见循环水温对主动蓄放热系统的集热效率影响很大, 水温越低, 集热效率越高。连续 5 d 中, 适时开启热泵将蓄水池 I 中的热量泵至蓄水池 II, 主动蓄放热系统集热阶段的循环水最高进水温度被控制在 25.02~31.25℃, 可将主动蓄放热系统的集热效率 η_{Act} 提升至 72.32%~83.62%, 集热功率 P_{Act} 为 156.26~258.05 W/m²。

系统耗能组件包括热泵机组和主动蓄放热系统循环泵, 热泵机组在不同工况下输入功率不同, 实测 2 台循环水泵运行总功率为 1 700 W。测得连续 5 d 系统白天集热总耗电量为 118.49 kW·h, 蓄热总量 2.39×10^6 kJ, 整个系统的 COP_{Sys} 值为 5.59, 节能效果显著。

表 3 系统及其组件集热参数

Table 3 Heat collecting parameters of the system and its components

日期 Date	太阳辐射量 I_T Solar radiation (W·m ⁻²)	系统总 制热量 Q_{Sys} Heating capacity of the whole system /kJ	主动蓄放热 系统集热量 Q_{Act} Heat collecting capacity of the AHSRS /kJ	主动蓄放热 系统集热效率 η_{Act} Heat collecting efficiency of the AHSRS /%	主动蓄放热 系统集热功率 P_{Act} Heat collecting power of AHSRS (W·m ⁻²)
2012-12-22 至 2012-12-23	287.77	5.04×10^5	4.75×10^5	83.62	240.63
2012-12-23 至 2012-12-24	343.31	6.05×10^5	5.46×10^5	75.17	258.05
2012-12-24 至 2012-12-25	258.19	4.09×10^5	3.68×10^5	72.32	186.72
2012-12-25 至 2012-12-26	321.42	5.23×10^5	4.80×10^5	75.71	243.36
2012-12-26 至 2012-12-27	208.81	3.46×10^5	3.08×10^5	74.84	156.26

注: 太阳辐射量为白天系统集热阶段试验温室北墙太阳辐射量均值; AHSRS 表示主动蓄放热系统。

Note: Solar radiation was the average value reaching the north wall surface during system heating period in the daytime; AHSRS is the active heat storage-release system.

4 结论与讨论

应用主动蓄放热-热泵联合加温系统提高日光温室夜间温度是可行的, 应用热泵提升主动蓄放热系统集热效率, 增加总体蓄热量是有效的, 通过本试验研究, 得出以下结论:

1) 冬季晴天或多云天气运行主动蓄放热-热泵联合加温系统, 试验温室白天和夜间气温均大于对照温室, 可提升夜间气温 5.26~6.64℃。

2) 本试验条件下, 连续 5 d 热泵机组 COP_{Hp} 值为 4.38~5.17, 主动蓄放热系统可为热泵热源提供充足的热量, 保证理想的热源温度, 冷凝器侧出

水温度成为影响热泵 COP_{Hp} 值的主要因素, 水温提升越高, COP_{Hp} 值越低。

3) 在日光温室特定的光热环境下, 适时运行热泵机组 1.5~3 h, 可将主动蓄放热系统的集热效率提升至 72.32%~83.62%, 集热功率为 156.26~258.05 W/m², 整个系统 COP_{Sys} 值为 5.59, 节能效果显著。

此外, 主动蓄放热装置采用廉价材料, 与传统水、地源热泵机组相比, 本系统以太阳辐射能作为热源, 无需打井或埋管, 夜间通过主动蓄放热系统进行放热, 也无需安装风机盘管等散热设备, 因此这种做法大大降低了初投资费用及运行费用。为进

一步节约能耗,在太阳辐射强烈的晴天也可单独采用主动蓄放热系统为温室加温;在连阴天和雪天,可连续运行热泵机组提升蓄水池水温,用作应急加热。该系统的应用研究刚刚开始,还处于试验的初级阶段,系统各组件参数配置、施工工艺还有待优化和完善,不同天气条件下的运行控制模式、加温效果、能耗以及经济性都会在后续的试验中加以分析和验证。

[参 考 文 献]

- [1] 李建设,白青,张亚红. 日光温室墙体与地面吸收放热量测定分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 231—236.
Li Jianshe, Bai Qing, Zhang Yahong. Analysis on measurement of heat absorption and release of wall and ground in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 231—236. (in Chinese with English abstract)
- [2] 马承伟,卜云龙,籍秀红,等. 日光温室墙体夜间放热量计算与保温蓄热性评价方法的研究[J]. 上海交通大学学报, 2008, 26(5): 411—415.
Ma Chengwei, Bu Yunlong, Ji Xiuhong, et al. Method for calculation of heat release at night and evaluation for performance of heat preservation of wall in solar greenhouse[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 26(5): 411—415. (in Chinese with English abstract)
- [3] 佟国红,王铁良,白义奎,等. 日光温室墙体传热特性的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 186—189.
Tong Guohong, Wang Tieliang, Bai Yikui, et al. Heat transfer property of wall in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(3): 186—189. (in Chinese with English abstract)
- [4] 佟国红, David M Christopher. 墙体材料对日光温室温度环境影响的 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 153—157.
Tong Guohong, David M Christopher. Simulation of temperature variations for various wall materials in Chinese solar greenhouses using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 153—157. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李小芳,陈青云. 日光温室山墙对室内太阳直接辐射得热量的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 241—245.
Li Xiaofang, Chen Qingyun. Effects of different wall materials on the performance of heat preservation of wall of sunlight greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 14(4): 185—189. (in Chinese with English abstract)
- [6] 白义奎,刘文合,王铁良,等. 辽沈 I 型日光温室环境及保温性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 191—196.
Bai Yikui, Liu Wenhe, Wang Tieliang, et al. Experimental research on environment and heat preservation effect of solar greenhouse: type Liaoshen I[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(5): 191—196. (in Chinese with English abstract)
- [7] AL-Hussaini H, Suen K O. Using shallow solar ponds as a heating source for greenhouse in cold climates[J]. Energy Convers, 1998, 9(13): 369—376.
- [8] Dilip Jain, Tiwari G N. Modeling and optimal design of ground air collector for heating in controlled environment greenhouse[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(8): 1357—1372.
- [9] 王顺生,马承伟,柴立龙,等. 日光温室内置式太阳能集热调温装置试验研究[J]. 农机化研究, 2007(3): 130—133.
Wang Shunsheng, Ma Chengwei, Chai Lilong, et al. Equipment in sunlight greenhouse for collecting heat and adjusting temperature[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(3): 130—133. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘圣勇,张杰,张百良,等. 太阳能蓄热系统提高温室地温的试验研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24(4): 461—465.
Liu Shengyong, Zhang Jie, Zhang Bailiang, et al. Experimental study of solar thermal storage for increasing the earth temperature of greenhouse[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(4): 461—465. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李德坚,唐轩,殷志强,等. 温室太阳能供暖[J]. 太阳能学报, 2002, 23(5): 557—563.
Li Dejian, Tang Xuan, Yin Zhiqiang, et al. Solar heating for greenhouse[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 23(5): 557—563. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李炳海,须晖,李天来. 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 Binghai, Xu Hui, Li Tianlai. Application of solar energy soil heating system in greenhouse[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(2): 152—155. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
Dai Qiaoli, Zuo Ran, Li Ping, 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 (Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 164—168. (in Chinese with English abstract)

- [14] 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, 2010, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 258—263. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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 Yi, Yang Qichang, Fang Hui. Research on warming effect of water curtain system in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(4): 188—193. (in Chinese with English abstract)
- [16] Karlsson F, Fahlén P. Capacity-controlled ground source heat pumps in hydronic heating systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(2): 221—229.
- [17] Michopoulos A. Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(4): 328—334.
- [18] Zheng D. Modeling of Standing Column Well in Ground Source Heat Pump System[D]. Stillwater: Oklahoma State University, 2004.
- [19] Tong Y, Kozai T, Nishioka N, et al. Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP)[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 405—411.
- [20] George C Bakos, Dimitrios Fidanidis, Nikolaos F Tsagas, Greenhouse heating using geothermal energy[J]. Geothermics, 1999, 28(6): 759—765.
- [21] 柴立龙, 马承伟, 张义, 等. 北京地区温室地源热泵供暖能耗及经济性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 249—254.
Chai Lilong, Ma Chengwei, Zhang Yi, et al. Energy consumption and economic analysis of ground source heat pump used in greenhouse in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 249—254. (in Chinese with English abstract)
- [22] 柴立龙, 马承伟. 玻璃温室地源热泵供暖性能与碳排放分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 185—191.
Chai Lilong, Ma Chengwei. Performance and carbon emission analysis on glass-covering greenhouse heating with ground source heat pump technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 185—191. (in Chinese with English abstract)
- [23] 方慧, 杨其长, 孙骥. 地源热泵—地板散热系统在温室冬季供暖中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 145—149.
Fang Hui, Yang Qichang, Sun Ji. Application of ground source heat pump and floor heating system to greenhouse heating in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 145—149. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘明池, 许勇, 徐刚毅, 等. 连栋温室水源热泵热水供暖系统[J]. 中国农学通报, 2011, 27(17): 192—199.
Liu Mingchi, Xu Yong, Xu Gangyi, et al. Research on water source heat pump heating system in intelligence greenhouse[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(17): 192—199. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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 and Environment, 2007, 42(1): 11—24.
- [26] Onder Ozgener, Arif Hepbasli. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(1): 101—110.
- [27] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 210—216. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈冰, 罗小林, 毕方琳, 等. 温室太阳能与空气源热泵联合加温系统的试验[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(1): 55—59.
Chen Bing, Luo Xiaolin, Bi Fanglin et al. Experiment on greenhouse solar associated with air-source heat pump heating system[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(1): 55—59. (in Chinese with English abstract)
- [29] 郭仁宁, 朱德滨, 赵龙广. 太阳能-水源热泵联合加热温室系统研究[J]. 黑龙江农业科学, 2012(5): 139—141.
Guo Renning, Zhu Debin, Zhao Longguang. Study on solar energy-water source heat pump heating greenhouse system[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2012(5): 139—141. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张昌. 热泵技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [31] 马最良, 姚杨, 姜益强, 等. 热泵技术应用理论基础与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Application of heating system with active heat storage-release and heat pump in solar greenhouse

Sun Weituo^{1,2}, Yang Qichang^{1,2*}, Fang Hui^{1,2}, Zhang Yi^{1,2}, Guan Daoping³, Lu Wei^{1,2}

(1. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *Key Lab of Energy Conservation and Waster Treatment of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China*; 3. *Beijing Changping National Agricultural Science Park, Beijing 102211, China*)

Abstract: The Chinese solar greenhouse has a unique greenhouse structure that regards solar energy as the main energy source, and has characteristics such as high efficiency, energy saving, and low cost. During a cold winter night, air temperature inside a solar greenhouse is low for crop growth, which would affect crop yield and quality, due to the heat-transfer characteristics and heat capacity limit of the north wall. In recent years, in trying to promote the heat storage capacity of the solar greenhouse, the thought of active heat storage-release came forward. Solar energy is a kind of clean renewable energy, but has intermittent and unstable performance when used for greenhouse heating. Meanwhile, the heat collecting efficiency of the solar thermal collector decreases with an increase in operating temperature. Thus, an active heat storage-release system (AHSRS) is difficult to use to ensure an appropriate temperature for a solar greenhouse in a frigid region or when it encounters weather conditions with weak solar radiation. As an efficient means of raising low-grade energy, the heat pump has been more and more applied to greenhouse heating which can reduce the operating temperature of the AHSRS when used in combination. In order to promote heating performance and stability of the AHSRS and improve air temperature inside a solar greenhouse at night, based on the concept of active heat storage-release, an active heat storage-release associated with heat pump heating system (AHSRHPS) applicable to solar greenhouse heating was designed in the present study. During the day, the solar energy reaching the north wall surface was absorbed by the circulating water and stored in reservoirs when the AHSRS was running. Running the heat pump unit was intended to promote low-grade heat energy and reduce the circulating water temperature which contributes to increasing the heat collecting efficiency of the AHSRS and maximum water temperature of the reservoir. When air temperature inside the solar greenhouse was low at night, the heat energy was released through the AHSRS. Tests for the AHSRHPS were carried on from 5 Dec. 2012 to 5 Feb. 2013. The results showed that when there was a sunny and cloudy day in winter, the air temperature inside the experimental greenhouse with the AHSRHPS was higher than that in comparative greenhouse both in the day and at night and the air temperature difference ranged from 5.26 to 6.64°C. In addition, the heating effect was more obvious when solar radiation was stronger during the day and the outdoor air temperature was lower at night. The coefficient of performance of the heat pump unit reached 4.38~5.17. The heat source temperature of the heat pump unit was ideal because of the sufficient heat supplied by the AHSRS and the outlet water temperature of the evaporator became the dominant factor influencing the COP_{Hp} of the heat pump unit, meanwhile, the COP_{Hp} value decreased with an increase in outlet water temperature of the evaporator. Under the specific thermal environment of the solar greenhouse, with running the heat pump unit for 1.5~3 hours per day, the heat collecting efficiency of the AHSRS increased to 72.32%~83.62%, and the heat collecting power was 156.26~258.05 W/m². The COP_{Sys} of the overall system reached 5.59, and the energy-saving effect was obvious. Made from cheap materials, the active heat storage-release devices were much cheaper than traditional solar energy collectors. Compared with ground and water source heat pump units, the AHSRHPS doesn't need fan coil units or other heat dissipation facilities. Meanwhile, deep wells or buried pipes used as heat sources were never needed either. The high performance and low cost make AHSRHPS present a good application prospect.

Key words: greenhouses, heat pump systems, heat storage, solar greenhouse, heat release

(责任编辑: 张俊芳)