

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.039

# 日光温室中空板水循环集放热系统设计与集热性能试验

徐微微<sup>1</sup> 马承伟<sup>1,2</sup> 宋卫堂<sup>1,2</sup> 程杰宇<sup>1,2</sup> 王平智<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业部设施农业工程重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 针对现有日光温室内置式水循环集放热装置存在的集热能力不足的问题, 设计了中空板水循环太阳能集放热系统, 通过理论分析, 结合日光温室热环境模拟预测软件, 验证系统可行性。理论计算表明, 在室内地面面积 400 m<sup>2</sup> 聚苯板墙体日光温室内, 系统集热总量可达 350 MJ, 可供日光温室 2~3 d 的夜间放热加温。通过现场试验测试系统的集热性能, 试验结果表明: 系统集热效率最大可达 0.93; 晴天条件下的系统日蓄热温升约比阴天条件下高 1 倍; 在太阳辐射较弱时, 中空板与室内空气的对流换热对集热效率影响显著; 在 3.3~5.9 m<sup>3</sup>/h 的流量范围内, 系统集热量随着水流量增大而增加。中空板系统作为装配式集热系统, 建造成本低、简单实用, 不占用室内栽培面积, 适用于旧温室改造。

**关键词:** 日光温室; 太阳能; 蓄热; 中空板; 集热器; 性能分析

中图分类号: S625.4; TK512.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)07-0326-09

## Test on Heat-collecting Performance of Solar Heat Collection and Release System with Water Cycling inside Hollow Plates in Chinese Solar Greenhouse

XU Weiwei<sup>1</sup> MA Chengwei<sup>1,2</sup> SONG Weitang<sup>1,2</sup> CHENG Jieyu<sup>1,2</sup> WANG Pingzhi<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A solar heat collection and release system with water cycling inside hollow plates was developed to address the problems currently existed in these built-in water cycling installations for solar heat collection and release in a Chinese solar greenhouse (CSG). The feasibility of the system was theoretically analyzed and verified by using a simulation software to predict the thermal environment in a CSG. According to the theoretical calculation, the amount of heat collected by the developed system, which was installed in the CSG with polystyrene wall and the indoor floor area of 400 m<sup>2</sup>, can approach to approximately 350 MJ, thereby being sufficient to enhance the indoor temperature for 2~3 nights in a CSG. The heat-collecting performance of the system was then preliminarily analyzed through a field test. The results showed that the collecting efficiency can maximally reach 0.93. During heat accumulation period, water temperature rise in a sunny day was approximately double than that in a cloudy day. The convective heat transfer between hollow plates and indoor air had a significant effect on the heat collecting efficiency when solar radiation was weakened. The collected heat from the system was increased with the increase of water flow in a range of 3.3~5.9 m<sup>3</sup>/h. The hollow plate system investigated had lower construction cost and a simple practical design compared with conventional systems. Besides, this system did not occupy indoor cultivation area, which, as fabricated solar collector, was suitable for the transformation of traditional CSG.

**Key words:** solar greenhouse; solar energy; heat storage; hollow plates; solar collector; performance analysis

## 0 引言

温室太阳能加温技术包括被动式太阳能蓄热技

术和主动式太阳能蓄热技术<sup>[1]</sup>。传统日光温室的蓄热技术属于前者, 其以自身作为太阳能集热器, 依靠温室效应蓄积热量, 蓄热结构主要为墙体和地面,

收稿日期: 2018-03-20 修回日期: 2018-05-20

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-23-C02)

作者简介: 徐微微(1987—), 女, 博士生, 主要从事设施园艺装备研究, E-mail: xuweiweilaugh@126.com

通信作者: 宋卫堂(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事设施园艺栽培技术与设备研究, E-mail: songchali@cau.edu.cn

但因墙体和地面传热缓慢、传热能力有限,难以有效收集并蓄积足够的热量,满足夜间作物生长需求。因此,有必要进行日光温室主动蓄热技术研究。太阳能主动蓄热系统主要由独立于温室系统的太阳能集热系统和独立的储热系统构成<sup>[1]</sup>。水的比热容大,廉价易得,且易于流动和传热,适合作为传热介质或储热介质。有较多研究者利用水作为主动蓄热系统的传热、储热介质进行太阳能的收集、存储,用于提高温室夜间的气温或地温。

水循环集热系统根据集热装置布置的不同,分为室外水循环集热系统和室内水循环集热系统。室外水循环集热系统,主要是利用太阳能热水器,包括真空管式太阳能热水器<sup>[2-6]</sup>和平板式太阳能热水器<sup>[7-10]</sup>,收集温室外部的太阳辐射,用于夜间加温,当用于土壤加温时,可提高土壤温度 4.4℃<sup>[3]</sup>。但这种方式初期投资大和维护费用高,占用室外土地面积,系统经济性较差,其应用受到较大限制<sup>[11]</sup>,另外,由于系统应用于冬季集热,室外温度低,热水传输过程中将损失部分集热能量,还需要对输送管道进行保温处理。

日光温室在日间室内光照充足、晴好天气下,可维持足够高的室内温度,同时,还能富余可观的热量,利用日光温室太阳辐射及热环境模拟预测软件<sup>[12-13]</sup>计算,以 500 m<sup>2</sup>传统砖墙日光温室为例,预计可富余 270~340 MJ 热量,可利用室内水循环集热系统将这部分热量收集、贮蓄,用于夜间加温。

现有的室内水循环集热装置,或置于温室后墙<sup>[14-22]</sup>,或利用温室骨架<sup>[23]</sup>,均有明显的夜间增温效果,与室外水循环集热系统相比,具有诸多优点:不占用室外土地面积,同时也不占用或少量占用室内栽培面积;热量传输过程中损失较小;系统结构简单,管理维护容易,可兼做放热系统,降低成本。但也存在一些问题:现有的后墙集热系统中,集放热装置内水流方式均采用由上而下,形成水幕,造成水流分布不均。其中,水幕帘集放热系统<sup>[16]</sup>和双黑膜集放热系统<sup>[17]</sup>因使用的吸热材料为软质材料,在温室生产作业中容易破损;金属膜集放热系统<sup>[19]</sup>使用的金属膜价格较高。而钢管屋架管网系统<sup>[23]</sup>存在集热面积较小的问题,利用屋架构件作为集放热部件,仅能应用于新温室,无法用于旧温室改造。

为此,设计一种日光温室中空板水循环太阳能集放热系统,选用价格低廉的中空 PC 板作为集放热装置,集热面积大,集热量高;装置内水流采用上溢方式,有利于排除板中孔道内的空气,实现水流的均匀分布,集热效率高。通过理论分析,了解系统的集热能力和夜间加温能力,验证其可行性,并经过现

场试验测试,分析系统的集热性能。

## 1 材料与方 法

### 1.1 系统原理

中空板水循环太阳能集放热系统以水作为传输和蓄热介质,以中空板作为集热与放热部件,实现对太阳能的收集、输送、储存与夜间的加温。系统包括:中空板集放热器、供水管道、回水管道、潜水泵、蓄热水池、气温及水温传感器、自动控制系统等,如图 1 所示。中空板集放热器为中空 PC 板,板内具有并列的、可通过水流的多个孔道,板上端出水口连接集水器后再与回水管道连接,下端进水口连接分水器后再与供水管道连接。其中,中空板外表面涂抹黑色涂料,增加集放热器对太阳辐射的吸收率;板内水流采用由下向上的流动方式,便于排除板中孔道内的空气,实现水流的均匀分布。

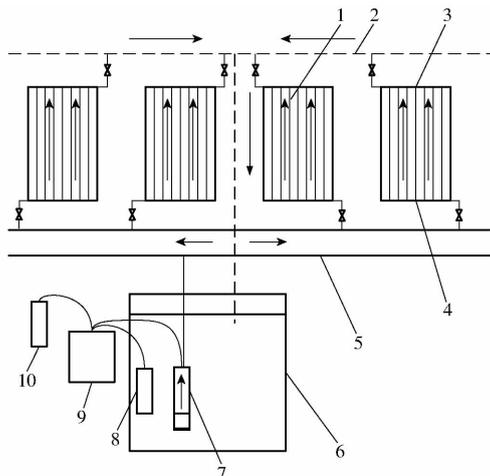


图 1 中空板水循环太阳能集放热系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of solar heat collection and release system with water cycling inside hollow plates

1. 中空板集放热器 2. 回水管道 3. 集水器 4. 分水器 5. 供水管道 6. 蓄热水池 7. 潜水泵 8. 水温传感器 9. 自动控制系统 10. 室内气温传感器

系统的工作过程为:白天,日光温室揭被后,太阳辐射增强,室内气温升高。当自动控制系统通过室内气温传感器监测到室内气温达到设置的集热气温(设置为 20~22℃),并且要求气温高于水温(设置为 2~4℃)时,启动运行潜水泵,使蓄热水池中的水不断流过中空板内的空腔,吸收太阳辐射热量及部分对流传热量,再返回水池中。通过水的不断循环,水池水温逐渐升高,从而将日光温室富余热量收集并储存在水池内。当室内气温低于设定值,或者室内气温比水温不高于设置的气温水温差时,系统关停潜水泵。

夜间,室内气温不断降低,当控制系统通过室内

气温传感器监测到室内气温降低至设置的放热气温(设置为 $10\sim 12^{\circ}\text{C}$ ),并且要求气温低于水温(设置为 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ )时,启动运行潜水泵,使水池中的水不断流过中空板内的空腔,将日间蓄积的热量通过与空气的对流等换热作用传递给室内空气,实现系统在夜间的放热加温作用。当室内气温高于设定值,或者室内气温比水温不低于设置的气温水温差时,系统关停潜水泵。

## 1.2 系统集热能力理论分析

### 1.2.1 系统日间的集热能力

根据中空板表面接收的太阳辐射照度与总集热面积,可推算出中空板系统运行时间段内的集热量

$$Q_c = \int_{\tau_0}^{\tau_n} \eta \tau_f E_b A d\tau \quad (1)$$

式中  $Q_c$ ——系统运行时间段内的集热量, J

$\eta$ ——系统集热效率

$\tau_f$ ——温室覆盖材料的太阳辐射透过率,一般取 $0.6\sim 0.8$

$E_b$ ——室外平行于集热板表面的平面内太阳辐射照度,  $\text{W}/\text{m}^2$

$A$ ——集热面积,  $\text{m}^2$

$\tau_0$ ——系统运行起始时刻, s

$\tau_n$ ——系统运行结束时刻, s

中空板吸收的热量包括板表面对太阳辐射的吸收量,以及板表面与室内空气的对流换热量(由于中空板有双面,对流换热计算中考虑双面对流情况,另外,由于PC板壁面较薄,表面厚度约为 $0.5\text{ mm}$ ,板表面温度与板内水温接近,可用板内水温代替板表面温度估算板表面与空气的对流换热量),由此,可推算出中空板系统的集热效率

$$\eta = \frac{\varepsilon \tau_f E_b A + 2kA(t_a - t_{pc})}{\tau_f E_b A} = \varepsilon + \frac{2k(t_a - t_{pc})}{\tau_f E_b} \quad (2)$$

式中  $\varepsilon$ ——板表面太阳辐射吸收率

$k$ ——板表面与室内空气的平均表面传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$t_a$ ——室内气温, K

$t_{pc}$ ——板表面温度, K

由上述理论公式分析可知:影响系统集热能力的因素,包括太阳辐射照度、太阳辐射吸收率、表面传热系数及室内空气温度与板表面温度的差值。

取 $k$ 为 $8.7\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , $\varepsilon$ 为 $0.92$ , $t_a$ 为 $20\sim 35^{\circ}\text{C}$ , $t_{pc}$ 为 $18\sim 28^{\circ}\text{C}$ ,计算表明一般情况下 $\eta$ 为 $0.8\sim 1.6$ ,集热效率出现高于1,说明板内水流吸收的热量有时高于板表面接收的太阳辐射热量,这是因为集热板除直接吸收太阳辐射热量外,由于有时室内气温高于板内水温,还从空气中吸收一部分对

流传热量。

对式(1)采用离散化数值积分的方法,针对北京地区冬季(1月,晴天与多云天气)的日照情况,按 $400\text{ m}^2$ 聚苯乙烯泡沫板日光温室参数及系统一般运行状态计算,中空板系统冬季日集热量在晴天(云量 $1\sim 2$ )可达到 $280\sim 350\text{ MJ}$ ,多云天气(云量 $3\sim 5$ )可达到 $160\sim 240\text{ MJ}$ ;系统3月日集热量在晴天(云量 $1\sim 2$ )可达到 $350\sim 450\text{ MJ}$ ,多云天气(云量 $3\sim 5$ )可达到 $250\sim 350\text{ MJ}$ 。

### 1.2.2 系统夜间加温效果估计

采用日光温室热环境模拟预测软件<sup>[13]</sup>分析表明,对于聚苯乙烯泡沫板日光温室,采用传热系数为 $2\sim 3\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的保温被时,室内气温每提升 $1^{\circ}\text{C}$ ,所需加温热流密度为 $2\sim 3.8\text{ W}/\text{m}^2$ ,平均每夜间 $10\text{ h}$ 所需加温热量为 $60\sim 100\text{ kJ}/\text{m}^2$ 。以面积 $400\text{ m}^2$ 日光温室为例,室内气温每提升 $1^{\circ}\text{C}$ ,所需的加温热量为 $24\sim 40\text{ MJ}$ 。按冬季晴天稳定运行保证的日集热量为 $280\sim 350\text{ MJ}$ ,系统可供日光温室连续 $2\sim 3\text{ d}$ 提升夜间气温 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ ,具备显著的加温能力。

## 1.3 试验设计

### 1.3.1 试验温室与试验系统概况

试验日光温室位于北京市通州区潞城镇的北京国际都市农业科技园区内( $39.9^{\circ}\text{N}$ , $116.8^{\circ}\text{E}$ )。温室东西长 $50\text{ m}$ ,南北跨度 $8\text{ m}$ ,脊高 $3.8\text{ m}$ ,后墙高 $2.6\text{ m}$ 。温室北墙、后坡、东西两侧山墙均采用 $140\text{ mm}$ 聚苯乙烯泡沫板装配而成,泡沫板内外涂抹 $3\text{ mm}$ 抗裂砂浆。前屋面覆盖厚 $0.1\text{ mm}$ 聚乙烯薄膜。为考察中空板系统的夜间放热效果,利用中空板在温室东西方向中线位置将温室分隔为东、西两部分。集热试验在西侧温室进行,东侧温室则作为放热研究对照温室,试验前的测试表明,东西温室在集热系统未运行时,室内平均气温基本相同。试验期间,温室内土壤栽培番茄,品种为意佰芬(9月中旬定植,1月中旬打顶)。

试验温室后墙内表面共安装 $10$ 块集热板(兼做放热板),如图2所示,每块集热板高 $2.11\text{ m}$ ,宽



图2 中空板装置实物图

Fig.2 Picture of hollow plate setup

2 m,总有效集放热面积为 42.2 m<sup>2</sup>,后墙覆盖率为 65%。其中,集放热器选用 10 mm 厚双层中空 PC 板,集水器、分水器及供水管道、回水管道均选用直径为 50 mm 的 PVC 给水管。

蓄热水池用黏土砖砌于温室内部地下,水池长 4.26 m,宽 2.25 m,深 1.60 m,内壁涂刷防渗涂料,外侧粘贴 100 mm 厚发泡聚苯板保温。水泵选用额定流量 10 m<sup>3</sup>/h,额定功率 750 W 潜水泵(WQ10-10-0.75,上海人民泵业(远东)有限公司)。

自动控制系统安装于温室操作间控制柜内。系统气温采用 1 根 T 型热电偶(上海南浦仪表厂,精度 ±0.5℃)测定,布置在试验温室中部,距离地面 1 m 处;水温同样采用 1 根 T 型热电偶测定,布置在水池井口附近的垂直方向上,从水面到池底的中部位置。

### 1.3.2 试验设置与测试方法

试验时间为 2017 年 2 月 27 日—3 月 19 日,期间系统正常运行 9 块集热板(工艺原因造成 1 块集热板无法运行),共计运行 15 d。中空板系统的集热性能测试运行控制模式为手动模式。试验期间蓄热水池实测蓄水量为 12.46 m<sup>3</sup>。

试验测定项目及采用的仪器与布置情况如下:

①集热装置接收的太阳辐射照度,采用 3 个 CMP3 太阳总辐射表(荷兰 Kipp&Zonen 公司,精度 ±15 W/m<sup>2</sup>)测定,布置在距离西墙 25 m 的中空集热板表面不同高度处,中空板沿高度方向 4 等分,总辐射表放置于中间 3 个等分点处,其辐射感受面平行于集热板表面。②系统回水温度和进水温度采用 T 型热电偶测定。在回水总管中布置 2 根热电偶,测定回水温度;在水泵四周布置 3 根热电偶,测定进水温度。③系统水流量通过供水总管处 LXS-25C 水表(益都智能技术(北京)股份有限公司,精度 ±2%)记录水量,结合通水时间进行计算。④蓄热水池的水温采用 3 根 T 型热电偶测定,在水池井口附近的垂直方向上,从水面到池底沿深度方向 4 等分,选取中间 3 个等分点分别布置 3 根热电偶。⑤试验温室空气温度采用 5 根 T 型热电偶测定。对照温室空气温度采用相同的布置方式。具体布置为:将西半侧温室沿东西长度方向 3 等分,第 1 个测点置于距西侧山墙 8 m,高度距地面 0.8 m 的跨中部位。剩下 4 个测点均置于距西墙 16 m 处:将南北跨度 4 等分,从南到北依次在 1 等分点处距地面 0.8 m、2 等分点处距地面 0.8 m 和 1.5 m、3 等分点处距地面 0.8 m 布置 1 根、2 根和 1 根热电偶。⑥系统的运行时间段,采用数据采集仪的一个数据通道,用导线连接到控制接触器的一对与系统启、停联动的触点,通过记录该触点的开、闭,记录系统的集热

时间段。⑦总辐射表、热电偶等均连接到 34972A 数据采集仪(美国安捷伦公司),以 120 s 时间间隔采集和存储数据。⑧热电偶试验前已利用 RH-CAL 便携式温湿度校验仪(Edgetech 公司,精度 ±0.1℃)进行标定,对于测定室内空气的热电偶,采用 DPC1 型自然通风温湿防护罩(中环天仪(天津)气象仪器有限公司)防止辐射影响。

### 1.4 集热性能评价指标

中空板系统的日间集热量计算式为

$$Q_c = \int_{\tau_0}^{\tau_n} \Phi d\tau \approx \sum_{i=0}^n \left[ \frac{1}{2} \Delta\tau_i (\Phi_{i+1} + \Phi_i) \right] \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \Phi_i = c_w \rho_w q_v (\bar{t}_{o,i} - \bar{t}_{i,i}) \quad (4)$$

式中  $\Phi_i$ ——第  $i$  时刻系统集热流量, W

$\bar{t}_{o,i}$ ——第  $i$  时刻集热装置的回水温度平均值, K

$\bar{t}_{i,i}$ ——第  $i$  时刻集热装置的进水温度平均值, K

$q_v$ ——系统循环水的体积流量, m<sup>3</sup>/s

$c_w$ ——水比热容,取 4 187 J/(kg·K)

$\rho_w$ ——水密度,取 1 000 kg/m<sup>3</sup>

$\Delta\tau_i$ ——测试期间数据采集仪采集数据的时间间隔,为 120 s

集热装置接收的日间辐射量计算式为

$$Q_s = \int_{\tau_0}^{\tau_n} \bar{E} A d\tau \approx \sum_{i=0}^n \left[ \frac{1}{2} A \Delta\tau_i (\bar{E}_{i+1} + \bar{E}_i) \right] \quad (5)$$

式中  $\bar{E}_i$ ——第  $i$  时刻集热装置接收的太阳辐射照度平均值, W/m<sup>2</sup>

系统平均集热效率  $\eta$  可通过对瞬时集热效率求平均值获得,瞬时集热效率可通过第  $i$  时刻通过介质水的热流量与装置接收的辐射通量的比值获得,即

$$\eta_i = \frac{\Phi_i}{E_i A} = \frac{c_w \rho_w q_v (\bar{t}_{o,i} - \bar{t}_{i,i})}{E_i A} \quad (6)$$

集热系统的能效比可通过集热量与水泵的运行功耗进行计算,即

$$C_c = \frac{Q_c}{E_{wp}} = \frac{\sum_{i=0}^n \left[ \frac{1}{2} \Delta\tau_i (\Phi_{i+1} + \Phi_i) \right]}{W_{wp} (\tau_n - \tau_0)} \quad (7)$$

式中  $C_c$ —— $\tau_0 \sim \tau_n$  时间段内集热系统的能效比

$E_{wp}$ ——水泵消耗的能量, J

$W_{wp}$ ——水泵的功率, W

## 2 结果与分析

### 2.1 中空板系统集热性能统计及分析

对中空板系统运行期间的集热量、接收的辐射总量、集热效率等进行统计,结果如表 1 所示。其

中,集热量、接收的辐射总量、瞬时集热效率及能效比分别由式(3)~(7)计算获得。试验期间,系统的日集热量在72~258 MJ之间。根据理论估算,试验温室(室内地面面积为200 m<sup>2</sup>)内,中空板系统的日集热量在125~225 MJ之间,由此说明系统可以达到理论集热量,具有很好的集热能力。

系统日平均集热效率在0.51~0.93之间,总平均集热效率为0.64,对比0.8~1.6的理论值,实际达到的集热效率不高,说明系统尚未达到理想状态。分析原因,主要有:系统接收的辐射照度较低,如表1中3月16日;由于蓄热水池的初始水温较高,系统运行过程中,集热装置向室内空气散失一部分对流传热量,如表1中3月1日;系统实际接收辐射照度的集热面积无法达到集热板的总面积,因为系统置于日光温室后墙内表面,必然存在各种遮阴情况,包括:番茄植株的遮阴、温室中间死被子的遮阴、

以及保温被对集热板上部的遮挡。最大瞬时集热效率为1.51,说明理论值是可以达到的。

系统最高平均集热效率及最大集热量均出现在3月9日,分别为0.93、258 MJ,是因为该日集热过程中,系统接收的辐射照度较高,室内气温与板内水温的差值也较大,集热时间长,中空板充分接收较强的辐射照度,同时还从室内空气中吸收对流传热量。

中空板集热系统具有较高的能效比,试验期间,系统的平均能效比为8.2,最大可达12.3。需要说明的是,因试验的需要,选择的水泵流量与功率比实际应用需要偏大一些,以便在更宽的运行条件范围内考察系统的性能。因此,计算出的能效比并不是理想的、代表实际应用时的数据。后期,系统应用于实际生产中,可选择合理的水泵流量与功率,则系统能效比更高。

表1 中空板水循环太阳能集放热系统逐日集热性能数据

Tab.1 Daily data of heat collecting performance of solar heat collection and release system with water cycling inside hollow plates

日期	集热时间段	集热时长 $\Delta\tau/\text{min}$	集热量 $Q_c/\text{MJ}$	辐射总量 $Q_r/\text{MJ}$	能效比 $C_c$	平均集热效率 $\bar{\eta}$	最大瞬时集热效率 $\eta_{\max}$	后墙辐射照度 $E/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	室内气温 $t_a/^\circ\text{C}$	水池水温 $t_w/^\circ\text{C}$
2017-02-27	10:48—14:38	230	127	143	12.3	0.91	1.40	109~423	26.7~30.7	24.3~25.9
2017-02-28	10:46—15:14	268	92	137	7.6	0.64	1.05	79~504	24.0~30.5	25.9~27.6
2017-03-01	10:10—14:24	254	122	190	10.7	0.64	1.07	139~523	18.5~34.5	26.3~28.4
2017-03-02	08:34—14:20	346	161	243	10.3	0.66	0.86	140~426	23.6~32.1	24.6~27.8
2017-03-03	08:24—15:14	410	148	245	8.0	0.57	0.85	76~419	20.7~32.1	24.1~27.5
2017-03-04	08:24—15:52	448	134	221	6.6	0.58	0.90	53~381	20.0~36.3	23.8~27.1
2017-03-09	07:54—16:14	500	258	298	11.5	0.93	1.35	40~499	20.0~33.5	15.5~21.4
2017-03-10	08:04—15:50	466	179	303	8.5	0.58	0.91	59~487	22.6~33.8	20.6~25.5
2017-03-12	08:48—15:48	420	179	270	9.5	0.64	1.13	48~523	19.8~30.4	22.5~26.1
2017-03-13	07:40—15:46	486	194	292	8.9	0.64	1.15	57~484	19.5~31.6	23.2~27.2
2017-03-14	07:40—14:48	428	175	283	9.1	0.60	1.04	96~501	19.8~33.5	24.0~27.9
2017-03-15	07:58—14:44	406	92	172	5.0	0.53	1.51	91~306	21.3~32.6	24.7~26.8
2017-03-16	08:16—13:50	334	85	156	5.7	0.51	0.99	78~326	21.5~29.5	24.0~25.9
2017-03-18	08:28—15:12	404	103	166	5.7	0.60	0.90	75~268	21.7~33.2	23.2~25.6
2017-03-19	08:34—14:48	374	72	122	4.3	0.57	0.86	56~204	21.5~28.6	23.2~25.0

根据理论计算公式(2)可知,系统集热效率由板表面太阳辐射吸收率和对流换热量与太阳辐射量的比值组成。对2月27日—3月1日期间相关试验数据进行拟合,如图3所示( $t_{pc}$ 根据板内水温估算,板内水温根据系统回水温度和进水温度之和取平均值计算;75组有效数据,通过对2 min时间间隔的原始数据求取10 min平均值,并剔除部分异常数据后获取)。

拟合得到的中空板系统理论集热效率公式为

$$\eta = 0.7 + 7.0 \frac{2(t_a - t_{pc})}{E} \quad (8)$$

决定系数  $R^2$  为0.8,说明回归直线的拟合度高。方

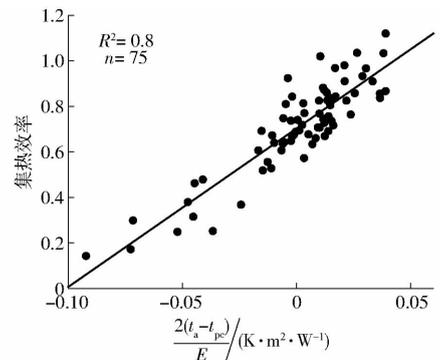


图3 中空板装置集热效率与  $2(t_a - t_{pc})/E$  的关系

Fig.3 Relationship between heat collecting efficiency of hollow plates and  $2(t_a - t_{pc})/E$

程斜率即中空板表面与室内空气的平均表面传热系数  $k$ , 为  $7.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。方程在  $y$  轴上的截距即板表面太阳辐射吸收率  $\varepsilon$  为  $0.7$ 。

## 2.2 太阳辐射对中空板系统蓄热水温的影响

太阳辐射对中空板水循环集放热系统的蓄热温升影响显著,如图4所示(选取的2 d蓄热温升主要由太阳辐射引起,计算时间段内水流量相近,不同时间内气温与板内水温的差值较小)。晴天(3月12日)蓄热温升明显高于阴天(3月19日)蓄热温升,约高出1倍,其中,晴天的日蓄热温升为  $3.3^\circ\text{C}$ , 阴天的日蓄热温升为  $1.6^\circ\text{C}$ 。集热装置接收的辐射照度越高,蓄热温升越显著。10:00—12:00期间,晴天平均温升速率达到  $0.9^\circ\text{C}/\text{h}$ ,此时辐射照度达到  $415 \text{ W}/\text{m}^2$ ;阴天平均温升速率为  $0.4^\circ\text{C}/\text{h}$ ,辐射照度为  $181 \text{ W}/\text{m}^2$ 。虽然阴天条件下装置接收的辐射照度较低,但仍有可观的蓄热量,根据式(3)、(4)计算得出09:00—15:00期间运行9块集热板的集热量约为71 MJ,由理论分析可知,阴天条件下,中空板系统仍能够发挥一定的集热作用。

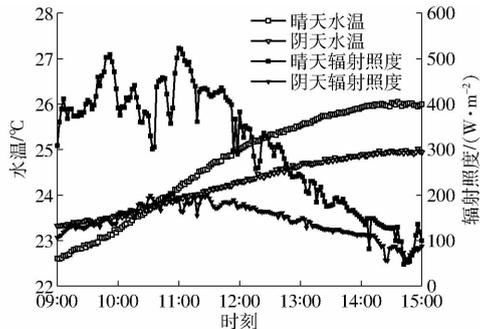


图4 典型天气水池蓄热水温变化曲线

Fig. 4 Water temperature variation curves during heat collection period of hollow plate system on typical days

## 2.3 室内气温与中空板内水温的差值对中空板集热效率的影响

根据系统集热效率的理论公式(2)可知,室内气温与板内水温的差值是引起同一系统集热效率波动的因素,最高可占集热效率的68%。如图5所示(选取的2 d在14:12—15:50时间段(14:46—15:10内仪器断电,造成数据缺失)内,系统水流量相近,接收的辐射照度相近),气温比水温越高,集热效率越高,3月9日的系统集热效率明显高于3月10日的集热效率,温差  $4.9^\circ\text{C}$  (辐射照度为  $72 \text{ W}/\text{m}^2$ ) 的系统集热效率高达1.35。在系统接收的辐射照度较低时,不同气温水温差下的集热效率显著不同,如在15:22(辐射照度为  $77 \text{ W}/\text{m}^2$ ) 时,温差  $4.9^\circ\text{C}$  的系统集热效率(1.21)比温差  $1.3^\circ\text{C}$  ( $0.33$ ) 高出近4倍,说明一般晴天15:00后,太阳辐射开始减弱时,中空板与室内空气的对流换热对集热效率影响显著。室

内气温与板内水温(与板壁温度近似相等)的差值反映的是对流传热量对系统集热性能的影响,在制定系统集热控制策略时,需要考虑该因素的作用。另外,气温水温差与蓄热水池有效容积有关,蓄热水池容积越大,温差越大。可见,蓄热水池的配置直接影响集热系统的对流换热量。

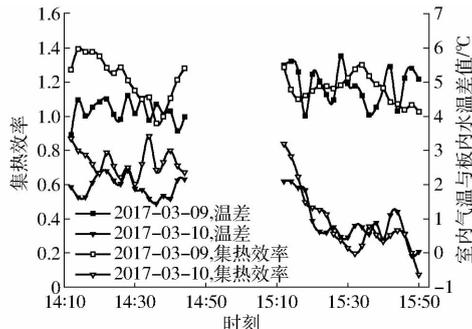


图5 不同室内气温与板内水温差值下的中空板集热效率变化曲线

Fig. 5 Variation curves of heat collecting efficiency of hollow plates under different temperature differences between indoor air and water inside plates

## 2.4 水流量对中空板集热效果的影响

水流量对系统集热效果的影响,主要体现在影响室内气温与板内水温(板壁温度与板内水温接近)的差值,进而影响中空板外壁与室内空气的对流换热作用。随着中空板中水流量的增加,水经过中空板的集热温升下降,将影响板壁与周围空气的对流换热,若板内水温高于室内气温,则随着流量增加,水的对流吸热量增加。当流量变得非常大时,进出口温升减少到零,由流量引起的对流换热量也将趋向一定值。不同水流量对中空板集热量的影响如图6所示(单位面积集热量根据4 d内12:00—13:00时间段内数据计算而得,该时间段内,集热装置在不同日期接收的辐射总量接近,气温与板内水温的差值接近)。在流量为  $3.3 \sim 5.9 \text{ m}^3/\text{h}$  范围内,随着水流量增大,中空板单位面积集热量整体呈上升趋势,在水流量为  $5.9 \text{ m}^3/\text{h}$  时,达到最大,为

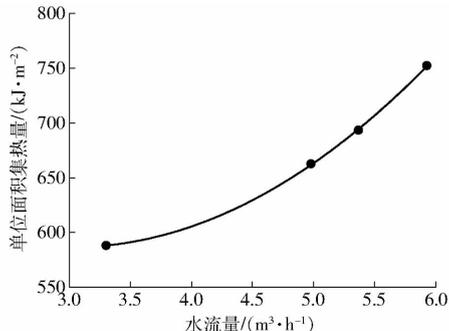


图6 不同水流量下中空板单位面积集热量比较

Fig. 6 Comparison of heat amount per unit area collected by hollow plate system at different water flow rates

752 kJ/m<sup>2</sup>。但是,水流量对集热量并非完全正相关,因为增大水流量,需要提高水泵规格,管道压力与功耗也将增大。所以,水流量并非越大越好,有必要确定系统的最佳流量。流量因素实际上反映了流速对集热系统的影响,通过找出当前系统流量与集热量的关系,估算系统流速,可为不同面积的中空板系统选配不同的水泵流量。同时,系统最佳流量应兼顾考虑对系统集热量和系统能效比的影响。

## 2.5 中空板系统的放热性能分析

中空板系统放热加热效果显著,如图7所示,系统放热期间(20:36—07:00),试验温室气温一直高于对照温室,对照温室气温持续下降。据分析,系统放热温降为3.1℃,试验温室的气温比对照温室平均高出3.0℃,最大高出3.6℃(07:00)。23:00开始,系统放热开始稳定,温降速率约0.3℃/h,此时,试验温室的气温比对照温室平均高出3.2℃。系统放热温降速率实际上反映的是系统放热强度的大小,和室内气温与水池水温的差值有关。温差过大(如11.3℃(20:38))时,系统放热过快,很快达到加热所需的热量,系统将停止放热。19:00—07:00期间,系统共计运行3次放热过程,一直到室内气温与水池水温差值合适(如10.2℃(23:00))时,系统才稳定持续运行。而随着水温降低,温差开始降低,室内气温也随之缓慢降低。可见,为较稳定地维持住设定的室内气温,水池内的水温至关重要。过高的水温将造成系统的频繁启停,放热过程不稳定,造成室内气温的起伏;过低的水温则无法维持需要的室内气温。水温与水池容积有关,因此,在配置水池容积时,也需要适当考虑系统夜间放热的水温需求,避免系统频繁启停。

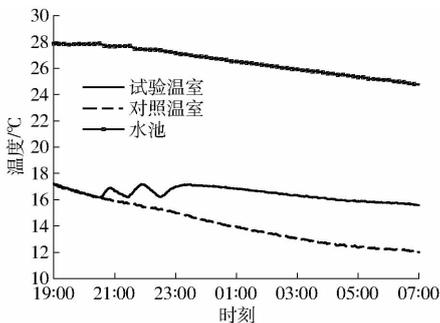


图7 中空板系统放热期间水温及室内气温变化曲线

Fig. 7 Variation curves of water temperature and indoor air temperature during heat release period of hollow plate system

## 3 讨论

### 3.1 中空板集热装置存在的问题及改进建议

中空板系统的集热性能试验取得初步结果,在系统运行过程中,发现试验所获得的集热量及集热

效率与理论分析存在差距,经分析,可能与系统的不合理设计及温室管理有关。

#### (1) 集热装置的设计问题对集热效果的影响

本次试验中,有1块集热板无法正常运行,导致系统的集热面积减少4.22 m<sup>2</sup>。具体原因:中空板与分水器即PVC管的连接方式不合理(做法为:在PVC管上开通长槽孔后灌胶粘接),由于系统采用水流上溢方式,导致系统刚开始通水时,PVC管承压过大,在胶水粘接部位出现漏水现象。采用各种补救措施后,仍有1块中空板无法正常运行。新改进的集热装置已改进管件与中空板的连接方式,可解决该设计缺陷。

另外,本次系统性能测试采用手动控制系统,是因为集热系统目前的控制策略存在不合理之处,具体为:集热系统的控制系统采用气温及气温水温差作为集热的启动和关闭条件,目前共有2套温度传感器(即T型热电偶),分别测试气温和水温。考虑到集热系统兼做放热系统,现有系统的热电偶置于温室中部,用于系统放热的启动和关闭。但在日间集热阶段时,后墙温度高于室内气温,所以,以气温水温差作为启动条件,会减少集热时间,降低集热量。但若将热电偶置于后墙附近,则夜间放热温度不合理,因为后墙附近气温较室内气温更高,且在日间系统启动前后,中空板附近气温变化剧烈,不利于系统稳定运行。

#### (2) 温室通风管理对系统集热效果的影响

目前的温室通风管理造成蓄热水池的水温最大值无法突破30℃,本次试验最高温度为28.4℃(见表1)。具体分析为:日常温室生产管理中,以番茄为例,日间气温需维持在20~30℃之间,而日光温室日间升温速度非常快,为避免室内气温过高,在晴天上午,室内气温达到25℃左右时,便开启温室上风口,让室内气温尽可能保持在30℃以下。所以,当蓄热水温达到30℃左右,或者高于室内气温时,便开始向空气中散失对流传热量。这种温室管理方式是提升中空板系统集热量的一个瓶颈。

另外,本次试验中,由于水流量尚未达到最佳,在一定程度上也影响系统获取更高的集热量。

### 3.2 中空板集放热系统的经济性分析

中空板水循环太阳能集放热日光温室,建造费用低廉,与普通日光温室相比,增加了中空PC板、连接管道、蓄热水池和水泵等部分。以500 m<sup>2</sup>日光温室为例,建造中空板水循环集放热日光温室增加的费用为:PC板约8000元,10 m<sup>3</sup>左右的蓄热水池7000~9000元,连接管道与管件5000~6000元,

水泵与电气控制设备等约 2 000 元,安装调试约 2 000 元。因此比同样的普通日光温室共计增加建造费用 24 000 ~ 27 000 元。相比其他太阳能利用系统,中空板水循环集放热系统的成本较低。

此外,系统还具有其他经济优势:中空板集热装置可替代传统墙体的蓄热功能,配合具有结构承载能力和保温性能的发泡聚苯材料轻型墙板使用,降低后墙厚度,节约土地面积,同时降低劳动力成本;不占用室外土地面积,仅占用室内少量栽培面积;操作简单,易维护。

## 4 结论

(1)根据理论计算,中空板集放热系统在冬季运行时,在室内地面面积 400 m<sup>2</sup>日光温室内,预计晴天集热量可达 280 ~ 350 MJ,可供日光温室连续 2 ~

3 d 提升夜间气温 3 ~ 5℃。

(2)试验期间,系统集热效率最大可达 0.93,瞬时集热效率最大可达 1.51,尚未达到理想状态;板表面太阳辐射吸收率为 0.7,平均表面传热系数为 7.0 W/(m<sup>2</sup>·K)。

(3)太阳辐射、气温水温差及水流量对系统集热性能均有显著影响:晴天条件下的系统日蓄热温升约比阴天条件下高 1 倍;气温水温差是引起集热效率波动的重要因素,在太阳辐射较弱时,中空板与室内空气的对流换热对集热效率影响显著;在流量为 3.3 ~ 5.9 m<sup>3</sup>/h 范围内,系统集热量随着水流量增大而增加,最佳流量尚需进一步试验确定。

(4)中空板水循环太阳能集放热系统建造成本低廉、简单实用;作为装配式集热系统,可在各类日光温室中推广应用,尤其适用于旧温室改造。

## 参 考 文 献

- SANTAMOURIS M, BALARAS C, 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.
- 张海莲,熊培桂,赵利敏,等. 温室地下蓄集太阳热能的效果研究[J]. *西北农业学报*, 1997, 6(1): 54 - 57.  
ZHANG Hailian, XIONG Peigui, ZHAO Limin, et al. Study on the effect of storing the solar heat energy under the ground of greenhouse[J]. *Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica*, 1997, 6(1): 54 - 57. (in Chinese)
- 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 Energetica Solaris Sinica*, 2003, 24(4): 461 - 465. (in Chinese)
- 李炳海,须晖,李天来,等. 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, et al. Application of solar energy soil heating system in greenhouse[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2009, 40(2): 152 - 155. (in Chinese)
- 于威,王铁良,刘文合,等. 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 Wei, WANG Tieliang, LIU Wenhe, et al. 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)
- 刘伯聪,曲梅,苗妍秀,等. 太阳能蓄热系统在日光温室中的应用效果[J]. *北方园艺*, 2012(10): 48 - 53.  
LIU Bocong, QU Mei, MIAO Yanxiu, et al. The effect of a solar heat storage system applied in the solar greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2012(10): 48 - 53. (in Chinese)
- 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 Conversion and Management*, 2013, 70(6): 163 - 173.
- ATTAR I, NAILI N, KHALIFA N, et al. Experimental study of an air conditioning system to control a greenhouse microclimate [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 79(3): 543 - 553.
- ATTAR I, FARHAT A. Efficiency evaluation of a solar water heating system applied to the greenhouse climate[J]. *Solar Energy*, 2015, 119: 212 - 224.
- 孙先鹏,郭康权,邹志荣,等. 太阳能联合空气源热泵系统温室供热实验研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(3): 658 - 665.  
SUN Xianpeng, GUO Kangquan, ZOU Zhirong, et al. System investigation of a solar combined with air-source heat pump system for greenhouse heating[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(3): 658 - 665. (in Chinese)
- SANTAMOURIS M. Active solar agricultural greenhouses. The state of the art[J]. *International Journal of Solar Energy*, 1993, 14(1): 19 - 32.
- 姜宜琛,马承伟,王楠,等. 日光温室外太阳辐射模拟计算方法优化及软件研发[J]. *沈阳农业大学学报*, 2013, 44(5): 548 - 552.  
JIANG Yichen, MA Chengwei, WANG Nan, et al. Research on simulation calculation method of outside solar radiation and software development in greenhouse[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2013, 44(5): 548 - 552. (in Chinese)
- 马承伟,赵淑梅,程杰宇,等. 日光温室设计方案热环境评价系统 V1.0: 2014SRBJ0929[CP]. 2014-07-28.
- 王顺生,马承伟,柴力龙,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, 29(2): 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, 29(2): 130 - 133. (in Chinese)
- 15 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 Hui, YANG Qichang, LIANG Hao, et al. Rising temperature experiment on heat release and storage with water in solar greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5): 258 - 263. (in Chinese)
- 16 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 CSAE*, 2012, 28(4): 188 - 193. (in Chinese)
- 17 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 Wen, YANG Qichang, ZHANG Yi, 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. (in Chinese)
- 18 FANG Hui, YANG Qichang, ZHANG Yi, et al. Performance of a solar heat collection and release system for improving night temperature in a Chinese solar greenhouse[J]. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 2015, 31(2): 283 - 289.
- 19 方慧, 张义, 杨其长, 等. 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 Hui, ZHANG Yi, YANG Qichang, et al. Performance testing on warming effect of heat storage-release metal film in Chinese solar greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(15): 177 - 182. (in Chinese)
- 20 佟雪姣, 孙周平, 李天来, 等. 日光温室太阳能水循环系统冬季与夏季试验效果[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(9): 2306 - 2313.  
TONG Xuejiao, SUN Zhouping, LI Tianlai, et al. Experimental effects of solar energy water-cycling system for solar greenhouse in winter and summer[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(9): 2306 - 2313. (in Chinese)
- 21 佟雪姣, 孙周平, 李天来, 等. 温室太阳能水循环集热装置的蓄热性能研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2016, 47(1): 92 - 96.  
TONG Xuejiao, SUN Zhouping, LI Tianlai, et al. Heating performance of heating device of the solar energy water-cycling system in greenhouse[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2016, 47(1): 92 - 96. (in Chinese)
- 22 周升, 张义, 程瑞锋, 等. 大跨度主动蓄能型温室温湿环境监测及节能保温性能评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 218 - 225.  
ZHOU Sheng, ZHANG Yi, CHENG Ruifeng, et al. Evaluation on heat preservation effects in micro-environment of large-scale greenhouse with active heat storage system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(6): 218 - 225. (in Chinese)
- 23 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(21): 209 - 216.  
MA Chengwei, JIANG Yichen, CHENG Jieyu, 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 CSAE*, 2016, 32(21): 209 - 216. (in Chinese)