

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.042

外保温塑料大棚表冷器-风机集放热系统性能分析

李明^{1,2} 耿若¹ 宋卫堂^{1,2} 王平智^{1,2} 李涵¹ 王秀芝³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部设施农业工程重点实验室, 北京 100083;
3. 赤峰市农牧科学研究所, 赤峰 024000)

摘要: 为调节外保温塑料大棚的室内气温,设计了一套通过表冷器-风机与室内空气进行热交换的表冷器-风机集放热系统(TSFU系统)。根据测试,TSFU系统在晴天和多云天的放热量 Q_r 分别为 (433.0 ± 48.6) MJ和 (199.3 ± 0.1) MJ,系统性能系数(COP)分别达到2.9和3.1,可将室内气温分别提高 (2.5 ± 0.4) °C和 (1.1 ± 0.3) °C,且加温成本较燃气热风炉节约了40.2%。根据模拟分析,将系统表冷器-风机的全热交换效率和表冷器-风机数量分别提高至0.44和20时,可分别使晴天 Q_r 增加 $(67.4 \pm 14.9)\%$ 和 $(76.1 \pm 14.7)\%$,多云天 Q_r 增加 $(14.9 \pm 7.6)\%$ 和 $(17.0 \pm 4.5)\%$,COP达到 3.6 ± 0.6 以上。若将蓄水池中的水体积提高到 52 m^3 ,可使多云天 Q_r 和COP分别提高 $(31.7 \pm 20.3)\%$ 和 1.0 ± 0.7 ,但晴天 Q_r 和COP未得到改善;将水体积减小至 13 m^3 时,晴天 Q_r 未受影响,但使多云天 Q_r 和COP显著减小。因此,可使用TSFU系统调节外保温塑料大棚的室内温度。

关键词: 塑料大棚; 表冷器-风机; 外保温; 空气余热; 集放热性能

中图分类号: S625.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)10-0371-08

OSID:



Performances of Thermal Collecting and Releasing System Developed with Fan-coil Units in Plastic Tunnel Covered with Thermal Blanket

LI Ming^{1,2} GENG Ruo¹ SONG Weitang^{1,2} WANG Pingzhi^{1,2} LI Han¹ WANG Xiuzhi³

(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 and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. Chifeng Academic of Agriculture and Animal Husbandry Science, Chifeng 024000, China)

Abstract: A plastic tunnel covered with thermal blanket (hereafter referred to as "PTET") is type of plastic tunnel with large span. This facility has the advantages of low construction cost, high land utilization efficiency and large space, compared with Chinese solar greenhouse, which was widely applied in Northern China for vegetable production over winter. Hence, PTET has been employed as a substitute for Chinese solar greenhouse in recent years. However, there are no passive heat storage walls in PTET. It is necessary to supply auxiliary heating in PTET to maintain high indoor air temperature (T_{in}) and meeting the requirements of the indoor vegetables. To solve the problem, a thermal collecting and releasing system developed with fan-coil units (TSFU) was employed to avoid high cost and air pollution caused by the application of conventional heating methods. The objective was to analyze the thermal performances of TSFU in PTET. In this experiment, TSFU was composed of 15 fan-coil units hanging beneath the ridge, a water tank, a water pump and several pipes. By circulating water within the system, TSFU collected the surplus air thermal energy in daytime and released them in nighttime to heat the PTET. According to the test, the thermal energy released at nighttime (Q_r) in solar days and cloudy days were (433.0 ± 48.6) MJ and (199.3 ± 0.1) MJ, respectively. Q_r in the cloudy day was just 46.0% of that in the solar days, due to low T_{in} in the daytime. As a result, T_{in} in the nighttime of solar days and cloudy days were elevated by (2.5 ± 0.4) °C and (1.1 ± 0.3) °C, respectively. The coefficient of

收稿日期: 2020-06-26 修回日期: 2020-08-09

基金项目: 农业农村部农业设施结构工程重点实验室开放课题项目(201702)、浙江省科技计划项目(2019C02009)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS23C02)

作者简介: 李明(1983—),男,讲师,博士,主要从事设施园艺工程研究,E-mail: lim_abe@cau.edu.cn

通信作者: 王平智(1964—),男,工程师,主要从事设施农业工程研究,E-mail: wpz@cau.edu.cn

performance (COP) of TSFU in solar days and cloudy days were 2.9 and 3.1, respectively. Compared with the air heater using natural gas as the fuel, the heating cost of PTET can be decreased by 40.2% by employing the TSFU. Besides, a dynamical model for simulating the temperature of water in the water tank was developed and used to analyze the factors affecting the thermal performances of TSFU. With the simulation results, it was found that, by increasing the overall heat exchange efficiency (η) and numbers (n) of fan-coil units to 0.44 and 25, respectively, Q_r in the solar days can be increased by $(67.4 \pm 14.9)\%$ and $(76.1 \pm 14.7)\%$, respectively, due to enhanced heat exchange rate of TSFU. Under the above conditions, Q_r in the cloudy days was increased by $(14.9 \pm 7.6)\%$ and $(17.0 \pm 4.5)\%$, respectively, as well. COP was raised over 3.6 ± 0.6 . On the other hands, by increasing the water volume in the tank (V) to 52 m^3 , Q_r in the cloudy days was increased by $(31.7 \pm 20.3)\%$, while COP was increased by 1.0 ± 0.7 . However, Q_r and COP in the solar days was not improved. Conversely, by decreasing V to 13 m^3 , Q_r and COP were not impacted in the solar days but decreased in the cloudy days. In conclusion, it was feasible to employ TSFU to improve T_{in} of PTET during winter.

Key words: plastic tunnel; fan-coil units; external thermal blanket; surplus air thermal energy; performances of thermal collecting and releasing system

0 引言

我国北方冬季气候寒冷,设施蔬菜生产易受低温冷害的影响^[1]。在冬季夜间进行适当加温是确保设施蔬菜正常生长的重要手段。目前,传统的加温手段,如热风加热、热水加热等,依靠煤炭、石油等化石能源提供热量,均存在加温成本高、环境污染严重等问题,不适于园艺设施的夜间加温^[2-4]。因此,利用太阳能、地热能、生物质能、空气热能等可再生能源进行夜间加温的节能技术获得了快速发展。

空气热能是指高温空气所蕴含的能量。受温室效应的影响,温室在晴天日间的室内空气温度较高,蕴含丰富的空气热能,可用于夜间加温^[5-6]。根据储热介质的不同,现有空气热能利用技术可归纳为地中热交换系统、卵石床热交换系统和基于水蓄热的空气余热集放热系统。地中热交换系统由风机和埋设在地下的换热管构成,可在日间将室内热空气引入地下土壤,并将部分空气余热储存在土壤中,用于夜间放热,提高室内气温^[7]。一些学者研究了地中热交换系统,进行了参数设计、效果应用、模型仿真等方面的研究^[8-13]。卵石床热交换系统结构和运行模式与地中热交换系统相似。文献[14]针对一栋 15 m^2 的塑料大棚设计了四周隔热的卵石床换热系统,该系统可将室内气温保持在 10°C 以上。文献[15]利用埋置于地下的卵石床储蓄空气热能,在夜间通过对流换热提取热量,并在冠层水平放热,通过测试发现,该系统可将日间气温降低 1.9°C ,将夜间温度提高 3.0°C 。文献[16]使用卵石床换热系统和蓄热水袋可将温室晴天、阴天夜间温度分别提高 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ 和 $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 。基于水蓄热的空气余热集放热系统是近年发展起来的一种主动式集放热技术。该系统利用热泵系统或表冷器-风机收集空气余热,将

其转移到水中储存,用于夜间放热,具有较高的热交换效率。国内外学者基于此原理,设计了不同类型的空气余热利用系统,并进行了热力学模型、性能及应用效果等方面的研究^[17-20]。

外保温大棚是在大跨度塑料大棚的基础上覆盖保温被,其优点是内部空间大、土地利用率高、成本低、适于机械作业。近年来,种植户多选择外保温塑料大棚来替代日光温室^[21]。但外保温大棚室内气温较低,容易出现夜间室内气温过低现象,对作物造成低温胁迫^[22-24]。根据前期测试结果,东西向外保温大棚日间具有较高的室内气温,蕴含丰富的空气热能,可用于调节夜间室内气温。但大量热能可在日间通过通风流失到室外,未得到有效利用。

针对上述问题,本文设计一种包含表冷器-风机、蓄水池、水泵等部件的空气余热集放热系统(以下称为表冷器-风机集放热系统, Thermal collecting and releasing system developed with fan-coil units,简称 TSFU 系统)。该系统通过表冷器-风机收集大棚日间热空气的能量,并储存在蓄水池内,用于改善夜间室内气温。本文旨在研究该系统应用于外保温大棚的集放热性能,构建 TSFU 系统蓄水池温度模型,并分析表冷器、蓄水池体积等因素对 TSFU 系统集放热性能的影响,为进一步优化 TSFU 系统集放热性能提供参考。

1 材料与方法

1.1 外保温试验大棚

试验用外保温大棚位于内蒙古自治区宁城县大城子镇 (118.9°E , 41.7°N),东西走向,东西长 140 m 、脊高 4.5 m 。试验大棚山墙采用黏土砖建造,南侧和北侧屋面均为曲面,在水平地面的投影宽度分别为 8 m 和 6 m 。屋面覆盖塑料薄膜和保温被

(草苫+太空棉)。大棚屋脊下方设有两排间距为 2 m 的立柱,每排立柱的间距为 2.6 m。利用塑料薄膜将试验大棚从中间隔开,西侧作为试验区,东侧作为对照区,试验区和对照区的栽培管理模式完全一致。试验期间,大棚南面种植番茄,北面未种植作物,采用滴灌灌溉。北侧屋面保温被始终保持闭合状态,以减少大棚屋面散热。南侧屋面保温被揭开和闭合时段分别为 08:30—09:30 和 16:00—16:30。当室内气温较高时,打开南侧屋面顶部的通风口进行自然通风。

1.2 TSFU 系统结构与运行模式

TSFU 系统由表冷器-风机、蓄热水池、潜水泵和循环管路组成。该系统包含 15 台表冷器-风机,按 4.0 m 的间隔吊挂在屋脊下方。每台表冷器-风机换热面积为 42 m²,包含两台扇叶直径 0.4 m、输入功率 120 W 的风机。蓄热水池位于大棚西北侧,有效容积为 31 m³,蓄水池内水的体积为 26 m³。WQ15-20-2.2 型潜水泵功率为 2.2 kW,扬程为 20 m,安装在蓄热水池内。上述各构件通过直径为 50 mm 的 PVC 管、以同程进水和出水的方式连接在一起。

在日间,当室内气温(T_{in})达到 20~22℃,且比水温(T_w)高 4℃时,TSFU 系统启动,潜水泵和风机同时运行,驱动蓄水池中的水流经表冷器-风机,并吸收大棚内空气中热量,然后再返回蓄水池中,将收集的空气热能储存在蓄水池中;当 T_{in} 低于 20℃,或 $T_{in}-T_w$ 小于 4℃时,系统关闭,停止集热。在夜间,当 T_{in} 低于 10℃,且 T_w-T_{in} 低于 4℃时,TSFU 系统启动,潜水泵和风机同时运行,通过循环蓄水池中的水,利用表冷器-风机将蓄水池中的热量释放到棚内,加热大棚。若 T_{in} 高于 13℃ 或 T_w-T_{in} 小于 2℃时,系统关闭,停止放热。

1.3 测试方案

大棚内 T_{in} 和 T_w 传感器的布置方式如图 1 所示。室外气温和太阳辐射度传感器布置在外保温大棚操作间屋顶。其中, T_{in} 和 T_w 使用 Pt100 型铂电阻测量(测量范围: -50~200℃,测量精度为 ±0.1℃)。室外气温采用 SHT20 型芯片温湿度传感器测量(测量范围: -40~125℃,精度为 ±0.3℃),室内外太阳辐射度采用 YGC-TBQ 型太阳总辐射传感器测量(武汉辰云科技有限公司,测量范围 0~2 000 W/m²,测量精度为 ±3 W/m²)。

试验中所有仪器记录的间隔时间为 10 min。选择 2020 年 1 月 16 日 08:30—18 日 08:30 为典型晴天,选择 2020 年 1 月 18 日 08:30—20 日 08:30 为典型多云天。

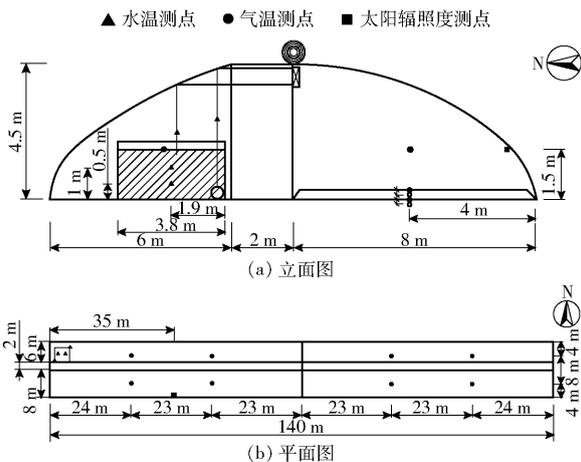


图 1 外保温塑料大棚结构及测点布置图

Fig. 1 Sketch maps and measurement points in plastic tunnel covered with thermal blanket

1.4 TSFU 系统性能评估

TSFU 系统的热交换速率计算公式为

$$q_{i+1} = \rho_w c_w V (T_{w,i+1} - T_{w,i}) / 1000 \quad (1)$$

式中 q_{i+1} ——第 $(i+1)$ Δt (Δt 是计算步长,取 600 s) 时刻 TSFU 系统的热交换速率, kW

ρ_w ——水的密度,取 1.0×10^3 kg/m³

c_w ——水的比热容,取 4.2 kJ/(kg·K)

V ——蓄热水池中水的体积,取 26 m³

$T_{w,i}$ ——第 $i\Delta t$ 时刻的水温,℃

为避免受系统运行过程中系统回水在蓄水池内分布不均匀对热交换速率计算造成的影响,使用模拟的水温进行热交换速率计算,TSFU 系统集热量和放热量计算公式为

$$Q_c = \rho_w c_w V (T_{w,ce} - T_{w,cs}) / 10^6 \quad (2)$$

$$Q_r = \rho_w c_w V (T_{w,re} - T_{w,rs}) / 10^6 \quad (3)$$

式中 Q_c ——系统集热量, MJ

Q_r ——系统放热量, MJ

$T_{w,cs}$ ——TSFU 系统集热阶段开始时刻蓄热水池的 T_w ,℃

$T_{w,ce}$ ——TSFU 系统集热阶段结束时刻蓄热水池的 T_w ,℃

$T_{w,rs}$ ——TSFU 系统放热阶段开始时刻蓄热水池的 T_w ,℃

$T_{w,re}$ ——TSFU 系统放热阶段结束时刻蓄热水池的 T_w ,℃

TSFU 系统性能系数(COP)计算公式为

$$C_{op} = \frac{1000Q_r}{3600(E_p + E_f)} \quad (4)$$

其中 $E_p = P_p(t_c + t_r)$ (5)

$$E_f = nP_f(t_c + t_r) \quad (6)$$

式中 C_{op} ——TSFU 系统性能系数

- E_p ——循环水泵的耗电量, kW·h
 E_f ——表冷器-风机的耗电量, kW·h
 P_p ——循环水泵功率, kW
 P_f ——表冷器-风机的功率, kW
 t_c ——TSFU 系统日间集热过程运行时间, h
 t_r ——TSFU 系统夜间放热过程运行时间, h
 n ——TSFU 系统表冷器-风机的数量

1.5 TSFU 系统蓄水池水温模拟

为简化 T_w 模拟, 提出以下假设: 表冷器-风机的进风温度与 T_{in} 相同; 表冷器-风机的进水温度与 T_w 相同。

表冷器-风机的全热交换效率 η 是表冷器-风机的重要技术参数, 该值在水流速度和风速一定的条件下为定值^[25], 计算公式为

$$\eta = \frac{T_{in} - T_{ine}}{T_{in} - T_w} \quad (7)$$

式中 T_{ine} ——表冷器-风机的出口空气温度, °C

表冷器-风机处空气和水之间的热交换满足公式

$$nGc_p(T_{in} - T_{ine}) = -\rho_w c_w v(T_w - T_{we}) \quad (8)$$

式中 G ——表冷器-风机的空气流速, 取 $1.11 \text{ m}^3/\text{s}$

c_p ——空气的定压比热容, 取 $1240 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

v ——系统中的水循环速率, m^3/h

T_{we} ——表冷器-风机的出口水温, °C

根据蓄水池能量和质量平衡, TSFU 系统 T_w 计算公式为

$$T_{w,i+1} = T_{w,i} - \frac{v\Delta t}{V}(T_{w,i} - T_{we,i}) \quad (9)$$

式中 $T_{we,i}$ ——第 $i\Delta t$ 时刻的 T_{we} , °C

将式(7)和式(8)代入式(9), 消去 T_{we} 和 v , 可得到

$$T_{w,i+1} = T_{w,i} + \frac{nGc_p\eta(T_{in,i} - T_{w,i})}{\rho_w c_w V} \Delta t \quad (10)$$

式中 $T_{in,i}$ ——第 $i\Delta t$ 时刻的 T_{in} , °C

当系统不运行时, T_w 保持不变。

2 结果与分析

2.1 室外太阳辐射与室内外气温分析

测试期间室外太阳辐射度 R 与空气温度 T_{out} 如图 2 所示。根据外保温大棚保温被管理模式, 将日间和夜间分别定义为保温被揭开和闭合期间。晴天日间 R 最大值为 $(402.0 \pm 3.0) \text{ W}/\text{m}^2$, 出现在 12:00—13:00 期间。该期间累积太阳辐射能达到了 $(7.3 \pm 0.1) \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在多云天日间, R 最大值分别达到了 $375 \text{ W}/\text{m}^2$ 和 $508 \text{ W}/\text{m}^2$, 但该期间累积太阳辐射能仅 $(5.5 \pm 0.07) \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 是晴天

的 $(75.0 \pm 0.3) \%$ 。

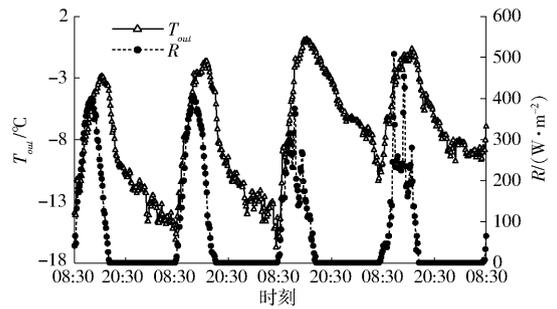


图 2 室外太阳辐射度 R 与空气温度 T_{out} 变化(2020 年 1 月 16—20 日)

Fig. 2 Outdoor solar irradiance (R) and air temperature (T_{out}) (Jan. 16—20, 2020)

试验期间 T_{out} 呈二次函数开口向下的形式变化。日间 T_{out} 在 $-14.4 \sim 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内先升高后降低。保温被闭合之后, T_{out} 持续下降。晴天夜间 T_{out} 平均值为 $(-11.8 \pm 0.2) \text{ }^\circ\text{C}$, 最低值为 $-16.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 出现在 1 月 18 日 07:30。多云天夜间 T_{out} 平均值和最低值分别为 $(-6.5 \pm 0.9) \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-11.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 分别较晴天夜间高 $(5.2 \pm 1.1) \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $5.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

室内气温 T_{in} 变化趋势如图 3 所示。在晴天日间保温被揭开后, 试验区和对照区 T_{in} 随时间快速提升, 在午间受通风的影响出现波动, 该期间试验区和对照区 T_{in} 最高可达 $28.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $33.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。午后 T_{in} 开始下降。由于午间试验区风口较大, 加之 TSFU 系统运行集热的影响, 导致午间试验区 T_{in} 低于对照区。 T_{in} 在多云天日间的变化规律与晴天相同。由于午间没有通风, 且 TSFU 系统运行时间较短甚至不运行, 对照区和试验区 T_{in} 没有显著区别, 但受太阳辐射度变化而出现较大波动。

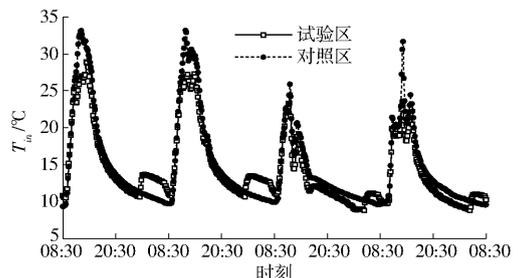


图 3 外保温大棚试验区和对照区空气温度变化(2020 年 1 月 16—20 日)

Fig. 3 Indoor air temperature of test and control areas of plastic tunnel covered with thermal blanket (Jan. 16—20, 2020)

夜间保温被闭合后, 对照区和试验区 T_{in} 随时间不断下降。在晴天夜间, 对照区 T_{in} 保持在 $(12.6 \pm 2.4) \text{ }^\circ\text{C}$, 最低值为 $(9.9 \pm 0.1) \text{ }^\circ\text{C}$, 较室外气温高 $(24.3 \pm 0.7) \text{ }^\circ\text{C}$ 。另一方面, 由于对照区密封程度优于试验区, 导致对照区 T_{in} 在 TSFU 系统未运行期

间较试验区高 (0.7 ± 0.1) $^{\circ}\text{C}$ 。在后半夜, 由于 TSFU 系统启动放热, 试验区 T_{in} 升高并超过对照区 (2.5 ± 0.4) $^{\circ}\text{C}$ 。

在多云天夜间, 对照区 T_{in} 平均值为 (11.6 ± 1.7) $^{\circ}\text{C}$, 最低值为 (9.6 ± 0.1) $^{\circ}\text{C}$, 较室外气温高 (18.0 ± 1.6) $^{\circ}\text{C}$ 。受大棚密封性能的影响, 对照区 T_{in} 在 TSFU 系统未运行期间较试验区高 (1.2 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ 。随后受 TSFU 系统启动放热的影响, 试验区 T_{in} 升高并比对照区高 (1.1 ± 0.3) $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 蓄水池水温与系统集放热性能分析

试验期间蓄水池水温 T_w 变化如图 4 所示, 在晴天日间, 受 TSFU 系统运行集热的影响, T_w 迅速升高。当系统停止后, T_w 保持平稳。在夜间, 当 T_{in} 低于 10°C 时, TSFU 系统运行放热, 并导致 T_w 快速下降。根据测试, TSFU 系统在晴天日间和夜间分别运行 (3.0 ± 0.6) h 和 5.7 h。 T_w 在日间升高了 (4.8 ± 1.1) $^{\circ}\text{C}$, 而在夜间降低了 (4.1 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ 。在多云天日间, 由于 T_{in} 较低, TSFU 系统仅在 19 日日间运行了 1.2 h, T_w 上升了 1.1°C 。尽管如此, TSFU 系统依然在 19 日和 20 日夜间运行了 3.3 h 和 2.8 h, 向室内放热。该期间 T_w 分别下降了 2.0°C 和 1.7°C 。

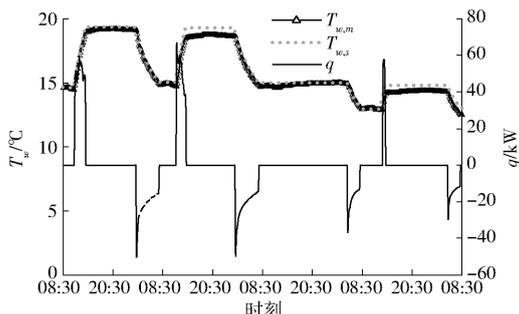


图 4 TSFU 系统实测水温 $T_{w,m}$ 、模拟水温 $T_{w,s}$ 和热交换速率 q 的变化

Fig. 4 Measured ($T_{w,m}$) and simulated water temperature ($T_{w,s}$) and heat exchange rate (q) of TSFU system

为避免 T_w 测试值波动对 q 计算引起的误差, 利用 T_w 的模拟值 $T_{w,s}$ 来计算系统 q 的变化。根据测试与计算结果, T_w 实测值 $T_{w,m}$ 与 $T_{w,s}$ 之间的偏差为 (0.2 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$, 最大偏差为 0.9°C 。二者之间的线性方程为 $T_{w,m} = 0.99T_{w,s}$ ($R^2 = 0.99$), $T_{w,m}$ 与 $T_{w,s}$ 具有较好的一致性。根据上述关系, 日间 q 以二次函数开口向下的形式变化, 最高可达 59.8 kW (图 4)。夜间 $|q|$ 在 TSFU 系统运行的初始时刻最大, 而后随时间快速减小, 导致试验区 $T_{w,s}$ 在 TSFU 系统运行期间不断下降。晴天和多云天夜间的 $|q|$ 分别为 (21.9 ± 7.4) kW 和 (17.3 ± 5.6) kW, 在放热结束时的最低值分别为 14.2 kW 和 -11.7 kW。

晴天 TSFU 系统集热量 (Q_c) 和放热量 (Q_r) 分

别为 (454.6 ± 55.9) MJ 和 (433.0 ± 48.6) MJ, COP 达到了 2.9 (表 1)。 Q_r 是 Q_c 的 (95.3 ± 1.0) %。而在多云天, TSFU 系统的 Q_r 为 (199.3 ± 0.1) MJ, 为晴天的 46.0% 。该期间, TSFU 系统在 19 日的 Q_c 为 142.0 MJ, 仅为晴天的 31.1% 。另外, 虽然多云天的 Q_c 较低, 但该期间 TSFU 系统的电耗主要用于夜间供热, 所以该期间 COP 达到 3.1 , 表明 TSFU 系统具有显著的节能效果。

表 1 TSFU 系统集放热阶段性能参数

Tab. 1 Heat collection and release performances of TSFU system

日期	Q_c /MJ	Q_r /MJ	E_c /(kW·h)	E_r /(kW·h)	COP
16 日	483.2	453.2	12.9	29.6	3.0
17 日	412.3	417.7	10.8	28.7	2.9
18 日		199.3		16.8	3.3
19 日	142.0	199.3	3.4	15.9	2.9

注: E_c 和 E_r 是 TSFU 系统集热和放热期间耗电量。

2.3 η 和 n 对 TSFU 系统集放热性能影响

为评估表冷器-风机全热交换效率 η 和表冷器-风机数量 n 对 TSFU 系统集放热性能的影响, 利用上述数学模型对不同条件的 T_w 进行了模拟, 并据此计算 TSFU 系统 Q_c 、 Q_r 和 COP (表 2)。

表 2 表冷器-风机全热交换效率 η 、表冷器-风机数量 n 以及蓄水池体积 V 对 TSFU 系统集放热性能的影响

Tab. 2 Effects of overall heat exchange efficiency (η) and number (n) of fan-coil units and water volume in tank (V) on its heat collection and release performances of TSFU system

参数	天气	$\eta = 0.44$	$n = 20$	$V = 13 \text{ m}^3$	$V = 52 \text{ m}^3$
Q_c /MJ	晴天	629.9 ± 98.1	682.2 ± 64.3	331.0 ± 56.5	464.2 ± 77.3
	多云	210.1	272.8	136.4	109.1
Q_r /MJ	晴天	669.7 ± 22.2	827.6 ± 108.4	443.0 ± 5.1	412.8 ± 66.9
	多云	228.9 ± 15.2	248.6 ± 17.1	124.0 ± 8.8	262.4 ± 40.5
COP	晴天	4.9 ± 0.4	5.6 ± 1.0	3.0 ± 0.2	2.8 ± 0.6
	多云	3.6 ± 0.6	3.8 ± 0.1	1.9 ± 0.1	4.1 ± 1.0

根据前期测试结果, 同等条件下表冷器-风机的 η 可达 0.44 , 高于试验中所采用的 0.28 。若试验中 TSFU 系统的 η 为 0.44 , T_w 的变化速率和变化幅度显著增加, 最高和最低 T_w 可分别较现有系统高 2.0°C 和低 0.4°C (图 5)。另一方面, q 的变化趋势与现有系统相同 (图 6)。但受 η 和 T_w 变化的综合影响, $|q|$ 在晴天日间和夜间分别较现有系统高 (38.0 ± 25.2) % 和 (57.7 ± 26.1) %, 而在多云天日间和夜间则分别较现有系统高 (67.1 ± 4.0) % 和

(19.6 ± 16.5)%。此外,由于晴天放热结束后 T_w 较低,不利于 TSFU 系统在多云天夜间放热,导致 $|q|$ 在 18 日夜间系统放热后期低于现有系统。根据模拟的 T_w 计算得出,该条件下 TSFU 系统在晴天的 Q_c 与 Q_r 可分别较现有系统增大 (40.3 ± 6.2)% 和 (67.4 ± 14.9)%, COP 较现有系统升高 2.0 ± 0.4 , 达到 4.9 ± 0.4 ; 而多云天的 Q_c 与 Q_r 分别较现有系统增大 48.0% 和 (14.9 ± 7.6)%, COP 升高 0.5 ± 0.2 , 达到 3.6 ± 0.6 (表 2)。

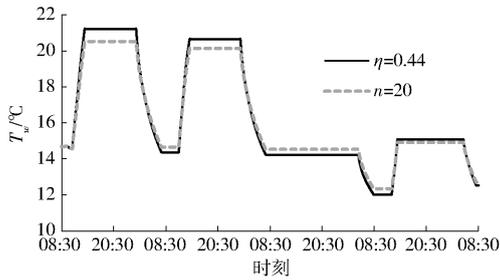


图 5 表冷器-风机全热交换效率 η 和表冷器-风机数量 n 对 TSFU 系统水温 T_w 的影响

Fig. 5 Effects of overall heat exchange efficiency (η) and number (n) of fan-coil units on water temperature (T_w) of TSFU system

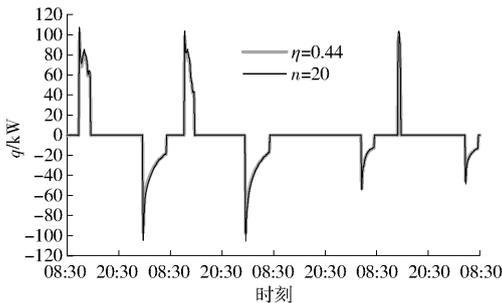


图 6 表冷器-风机全热交换效率 η 和表冷器-风机数量 n 对 TSFU 系统热交换速率 q 的影响

Fig. 6 Effects of overall heat exchange efficiency (η) and number (n) of fan-coil units on heat exchange rate (q) of TSFU system

n 对 TSFU 集放热的影响与 η 相似。 n 越多, T_w 在日间和夜间的变化幅度越大, Q_c 和 Q_r 越高。当 n 提高到 20 时,最高和最低 T_w 分别较现有系统高 2.2°C 和低 0.5°C (图 5)。晴天日间和夜间的 $|q|$ 分别较现有系统增加 (43.6 ± 27.8)% 和 (64.8 ± 31.6)% (图 6)。多云天日间和夜间的 $|q|$ 则分别提高了 (78.3 ± 5.0)% 和 (21.4 ± 20.3)%。同样受晴天 TSFU 系统放热结束后 T_w 较低的影响,18 日夜间出现 TSFU 系统放热后半段 $|q|$ 低于现有系统的现象。根据模拟的 T_w 计算得出,该条件下 TSFU 系统晴天 Q_c 与 Q_r 分别较现有系统增大 (46.1 ± 6.3)% 和 (76.1 ± 14.7)%, COP 较现有系统升高 2.2 ± 0.4 , 达到了 5.6 ± 1.0 ; 而多云天的 Q_c 与 Q_r 分别较现有系

统增大 58.0% 和 (17.0 ± 4.5)%, COP 升高 0.7 ± 0.3 , 达到了 3.8 ± 0.1 。

根据上述分析,提高 TSFU 系统表冷器-风机的 η 和 n 可促进 TSFU 系统与室内空气的热交换,进而提高 TSFU 系统的集放热性能。但另一方面,该条件下 TSFU 系统放热结束之后的 T_w 较低,不利于在多云天放热,易出现放热后半段 $|q|$ 较低的情况,不利于保持较高的 T_{in} 。

2.4 V 对 TSFU 系统集放热性能的影响

蓄水池水体积 (V) 主要通过 T_w 来影响 Q_c 和 Q_r 。为分析上述影响,利用上述数学模型计算不同 V 下 T_w 变化,并据此计算 TSFU 系统 q 、 Q_c 、 Q_r 和 COP。

当 V 增大到 52 m^3 时, T_w 变化幅度减小,其最高值和最低值分别较现有系统低 1.2°C 和高 1.5°C (图 7)。受此影响,晴天日间和夜间的 $|q|$ 是现有系统的 (111.0 ± 12.7)% 和 (97.5 ± 17.8)% (图 8)。另外,夜间 $|q|$ 变化较为平稳,尤其是在放热后期高于现有系统,有助于改善 TSFU 系统对 T_{in} 的提高效果。另一方面,由于晴天 TSFU 系统放热结束之后 T_w 较高,不利于 19 日日集热,该期间 $|q|$ 较现有系统低了 (13.1 ± 1.8)%。而在多云天夜间,较高的 T_w 有利于 TSFU 系统放热,使得 $|q|$ 较现有系统增加了 (44.6 ± 14.2)%。根据模拟的 T_w 计算得出,在该条件下,晴天 Q_c 较现有系统增大 (11.8 ± 4.8)%, 而 Q_r 和 COP 为现有系统的 (95.4 ± 20.9)%, 未显著改善。与此相反,多云天 Q_c 较现有系统减小了 23.2% , 而 Q_r 增大 (31.7 ± 20.3)%, COP 提高了 1.0 ± 0.7 , 达到 4.1 ± 1.0 。

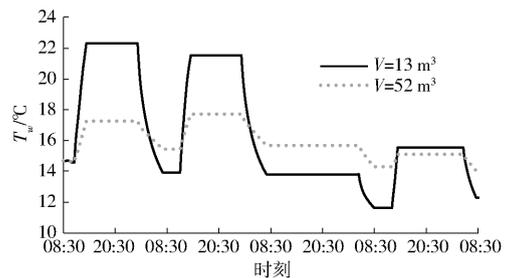


图 7 蓄水池体积 V 对 TSFU 系统水温 T_w 的影响

Fig. 7 Effects of water volume (V) in tank on water temperature (T_w) of TSFU system

当 V 减小到 13 m^3 时, T_w 变化幅度增大,其最高值和最低值分别较现有系统高 2.9°C 和低 0.8°C (图 7)。受此影响,晴天日间和夜间的 $|q|$ 分别是现有系统的 (80.4 ± 19.1)% 和 (92.9 ± 26.4)% (图 8)。在 19 日日,受 TSFU 系统在晴天放热之后 T_w 较低的影响, $|q|$ 较现有系统高 (8.3 ± 4.8)%。但在 19 日和 20 日夜, $|q|$ 依然较现有系统低 (36.2 ± 17.5)%。另外,试验期间, $|q|$ 变化幅度较

大,在晴天夜间放热后半段和整个多云天放热期间低于现有系统,不利于保持较高的 T_{in} 。根据模拟的 T_w 计算得出,该条件下晴天 Q_c 较现有系统减小了 $(11.9 \pm 3.6)\%$,而 Q_r 为现有系统的 $(101.9 \pm 7.0)\%$,COP 为 3.0 ± 0.2 ,未显著改善。多云天 Q_c 和 Q_r 分别较现有系统减小了 3.9% 和 $(37.8 \pm 4.4)\%$,COP 减小了 1.2 ± 0.3 ,达到 1.9 ± 0.1 。

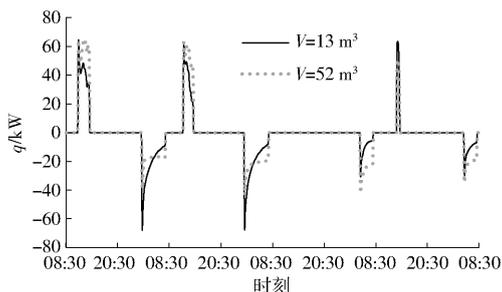


图 8 蓄水池体积 V 对 TSFU 系统热交换速率 q 的影响

Fig. 8 Effects of water volume (V) in tank on heat exchange rate of (q) TSFU system

根据上述分析,在现有系统的基础上将 V 提高到 52 m^3 可减小 TSFU 系统 T_w 和 $|q|$ 的变化幅度,并增加多云天夜间的 Q_r ,避免 TSFU 系统 $|q|$ 在放热期间急速下降而对 T_{in} 产生的影响,但没有显著改善晴天 Q_c 和 Q_r 。而当 V 减小至 13 m^3 时, T_w 和 $|q|$ 变化剧烈,晴天 E_r 未受影响,但多云天 Q_r 较小,且 TSFU 系统 $|q|$ 在放热期间急速下降,不利于提高外保温大棚在冬季夜间的最低 T_{in} 。因此,在生产中应根据实际条件合理选择 V ,以充分发挥 TSFU 系统的集放热性能。

2.5 经济性分析

在本试验条件下,TSFU 系统包含表冷器-风机、供回水管路、潜水泵、蓄热水池等构件,其中表冷器-风机的成本为 $1.5 \sim 1.7$ 万元,蓄热水池的建造成本为 $2.0 \sim 2.7$ 万元,供回水管道的成本约为 0.2 万元,潜水泵与电气控制设备等的成本约为 0.2 万元,合计 $3.9 \sim 4.3$ 万元,折合单位面积的建造成本为 $35.3 \sim 37.9 \text{ 元/m}^2$,为试验大棚造价的 $9.8\% \sim 10.5\%$ 。

试验条件下 TSFU 夜间累计供热 $1\,269.5 \text{ MJ}$,总耗电量为 $118.1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。根据《内蒙古自治区发展和改革委员会关于合理调整电价结构有关事项的通知》(内发改价字[2017]954号),农业用电价格为 $0.421 \text{ 元/(kW}\cdot\text{h)}$,TSFU 在试验期间的加温成本为 49.7 元 。在试验条件下,使用燃气热风炉

(天然气供暖)提供同样的热量需消耗天然气 42.2 m^3 (设天然气能源转化效率为 80% ,天然气热值为 37.59 MJ/m^3)^[26]。根据《内蒙古自治区发展和改革委员会关于调整居民和非居民用管道天然气销售价格的通知》(内发改价字[2019]251号),内蒙古自治区非居民用户天然气售价最低为 1.97 元/m^3 ,则试验条件下燃气热风炉的加温成本为 83.1 元 ,TSFU 系统较燃气热风炉节约了 40.2% 的成本。若将表冷器-风机的 η 提高为 0.44 时,TSFU 系统夜间累计供热 $1\,912 \text{ MJ}$,该条件下使天然气供暖提供同样的热量需消耗天然气 63.6 m^3 ,运行成本为 142.8 元 ,使用 TSFU 系统供热可节约成本 65.2% 。

在试验大棚中使用 TSFU 系统需要投入一定的建造成本和运行成本,但另一方面,该系统的使用有助于改善作物生长环境,提高产量。

3 结论

(1) 试验期间,TSFU 系统可使晴天、多云天夜间外保温大棚的室内气温分别提高 $(2.5 \pm 0.4)^\circ\text{C}$ 和 $(1.1 \pm 0.3)^\circ\text{C}$,有助于改善外保温大棚夜间的室内温度。

(2) 试验期间 TSFU 系统在晴天和多云天的放热量 Q_r 分别为 $(433.0 \pm 48.6) \text{ MJ}$ 和 $(199.3 \pm 0.1) \text{ MJ}$,系统性能系数(COP)达到 2.9 和 3.1 ,节能效果显著。

(3) 根据模拟分析,将表冷器-风机的 η 和 n 分别提高至 0.44 和 20 时,可分别使晴天 Q_r 增加 $(67.4 \pm 14.9)\%$ 和 $(76.1 \pm 14.7)\%$,多云天 Q_r 增加 $(14.9 \pm 7.6)\%$ 和 $(17.0 \pm 4.5)\%$,COP 达到 3.6 ± 0.6 以上。可通过选用较高的 η 或 n 来提升 TSFU 系统的集放热性能。

(4) 根据模拟分析,将 V 提高到 52 m^3 ,可使 TSFU 系统多云天 Q_r 提高 $(31.7 \pm 20.3)\%$,COP 提高 1.0 ± 0.7 ,但没有改善晴天 Q_r 和 COP;将 V 减小至 13 m^3 ,未影响晴天 Q_r ,但使多云天 Q_r 和 COP 显著减小。可根据实际条件合理选择 V ,进而优化 TSFU 系统集放热性能。

(5) 在试验条件下,使用 TSFU 系统替代以天然气为燃料的热风炉,可节约加温成本 40.2% ,若将表冷器-风机的 η 提高至 0.44 ,加温成本可进一步降低。

参 考 文 献

- [1] 王宇欣,辛粉萍,李雪媛,等.日光温室空气-土壤源双效热泵系统设计与性能测试[J/OL].农业机械学报,2017,48(11): 350-358.
WANG Yuxin, XIN Fenping, LI Xueyuan, et al. Design and performance test of air-soil dual-source heat pump system for solar

- greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):350-358. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171143&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.043. (in Chinese)
- [2] SETHI V P, SHARMA S K. Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications[J]. Solar Energy, 2008, 82(9):832-859.
- [3] 刘娜, 王国强, 张丽, 等. 热风炉热效率测试系统的设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(4):217-219.
LIU Na, WANG Guoqiang, ZHANG Li, et al. Design on the thermal efficiency test system for hot-blast stove[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(4):217-219. (in Chinese)
- [4] 唐遵峰, 高峰. 燃油热风炉的改进设计[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3):122-123.
- [5] 赵淑梅, 庄云飞, 郑可欣, 等. 日光温室空气对流蓄热中空墙体热性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4):223-231.
ZHAO Shumei, ZHUANG Yunfei, ZHENG Kexin, et al. Thermal performance experiment on air convection heat storage wall with cavity in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4):223-231. (in Chinese)
- [6] LI H, YU Y, NIU F, et al. Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney[J]. Renew Energy, 2014, 62:468-477.
- [7] OZGENER L. A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger(EAHE) systems in Turkey[J]. Renew Sustain Energy Rev., 2011, 15(9):4483-4490.
- [8] GHOSAL M K, TIWARI G N. Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy[J]. Solar Energy, 2003, 76(5):603-613.
- [9] OZGENER L, OZGENER O. Energetic performance test of an underground air tunnel system for greenhouse heating[J]. Energy, 2010, 35(10):4079-4085.
- [10] 马承伟. 塑料大棚地下热交换系统的研究[J]. 农业工程学报, 1985, 1(1):54-65.
MA Chengwei. Studies on the vinyl-house house heating by the underground heat exchange system[J]. Transactions of the CSAE, 1985, 1(1):54-65. (in Chinese)
- [11] 孙忠富. 地-气热交换塑料大棚中热量平衡的研究[J]. 农业工程学报, 1989, 5(2):35-46.
SUN Zhongfu. Studies on the heat balance of polyvinyl chloride(PVC) greenhouse with an earth-air heat exchanger[J]. Transactions of the CSAE, 1989, 5(2):35-46. (in Chinese)
- [12] 王永维, 梁喜凤, 程绍明, 等. 空气流速对温室地下蓄热系统加温时热湿传递的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(11):180-185, 219.
WANG Yongwei, LIANG Xifeng, CHENG Shaoming, et al. Effects of air velocity in heat exchanging pipes to heat exchanging and water vapor transformation of underground heat storage system in greenhouse during heating[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11):180-185, 219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121134&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.034. (in Chinese)
- [13] 王新, 张圆圆, 陈度, 等. 主动式温室地暖系统温控效果仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊):308-314.
WANG Xin, ZHANG Yuanyuan, CHEN Du, et al. Simulation analysis and field testing of active greenhouse heating system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):308-314. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s047&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.047. (in Chinese)
- [14] KÜRKLÜ A, BILGIN S, ÖZKAN B. A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse[J]. Renew Energy, 2003, 28(5):683-697.
- [15] GOURDO L, FATNASSI H, BOUHARROUD R, et al. Heating canarian greenhouse with a passive solar water-sleeve system; effect on microclimate and tomato crop yield[J]. Solar Energy, 2019, 188:1349-1359.
- [16] BAZGAOU A, FATNASSI H, BOUHARROUD R, et al. Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating canarian greenhouse[J]. Solar Energy, 2020, 198:8-24.
- [17] 孙维拓, 郭文忠, 徐凡, 等. 日光温室空气余热热泵加温系统应用效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17):235-243.
SUN Weituo, GUO Wenzhong, XU Fan, et al. Application effect of surplus air heat pump heating system in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17):235-243. (in Chinese)
- [18] YANG S, LEE C, LEE W, et al. Heating and cooling system for utilization of surplus air thermal energy in greenhouse and its control logic[J]. J. Biosyst. Eng., 2012, 37(1):19-27.
- [19] YANG S, LEE S, KIM Y J, et al. Greenhouse heating and cooling with a heat pump system using surplus air and underground water thermal energy[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2013, 6(3):86-91.
- [20] YANG S, SON J, LEE S, et al. Surplus thermal energy model of greenhouses and coefficient analysis for effective utilization[J]. Span. J. Agric. Res., 2016, 14(1):202.
- [21] 张芳, 方慧, 杨其长, 等. 基于 CFD 模型的大跨度温室自然通风热环境模拟[J]. 中国农业气象, 2017, 38(4):221-229.
ZHANG Fang, FANG Hui, YANG Qichang, et al. Ventilation simulation in a large-scale greenhouse based on CFD[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(4):221-229. (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] ZHOU S, ZHANG Y, YANG Q, et al. Performance of active heat storage-release unit assisted with a heat pump in a new type of Chinese solar greenhouse[J]. Appl. Eng. Agric., 2016, 32(5):641-650.
- [24] 方慧, 张义, 伍纲, 等. 大跨度保温型温室的热环境模拟[J]. 中国农业气象, 2019, 40(3):149-158.
FANG Hui, ZHANG Yi, WU Gang, et al. Modelling of thermal climate in a large-scale insulation solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(3):149-158. (in Chinese)
- [25] 赵荣义. 空气调节[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008:81-83.
- [26] 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 CSAE, 2010, 26(3):249-254. (in Chinese)