

基于毛细管网的日光温室主动式集放热系统研究

李明^{1,2} 李涵¹ 宋卫堂^{1,2} 王朝元^{1,2} 岳李炜¹

(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)

摘要: 为了对比日光温室传统保温蓄热后墙与基于毛细管网的主动式集放热系统(AHSCTM)的集放热性能,对AHSCTM的集放热性能进行了测试,构建了AHSCTM水温模型,利用一维差分法对相同环境条件下的外保温复合墙(370 mm黏土砖和100 mm聚苯乙烯板复合而成)日间储热量和夜间放热量进行了模拟。结果表明,AHSCTM的日间储热量和夜间放热量分别为相同条件下外保温复合墙的84.4%~111.3%和74.8%~100.7%,AHSCTM的COP(Coefficient of performance)为1.1~2.4。在夜间运行期间,AHSCTM放热量是相同时间段内外保温复合墙的98.2%~172.5%。因此,与外保温复合墙相比,AHSCTM有利于提高室内最低气温。改进AHSCTM的日间储热量和夜间放热量得到大幅提升,分别较外保温复合墙高67.6%~112.1%和69.0%~128.3%,COP可达2.8~7.0。改进AHSCTM的储放热性能优于外保温复合墙,说明利用改进AHSCTM配合保温墙体替代传统保温蓄热后墙是可行的。

关键词: 日光温室; 毛细管网; 主动式集放热系统; 外保温复合墙; 集放热性能

中图分类号: S625.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0341-09

Application of Active Heat System Developed with Capillary Tube Mates in Chinese Solar Greenhouse

LI Ming^{1,2} LI Han¹ SONG Weitang^{1,2} WANG Chaoyuan^{1,2} YUE Liwei¹

(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)

Abstract: Chinese solar greenhouse (hereafter referred to as solar greenhouse) has been widely applied for growing vegetable during winter with little or without additional heating. The traditional back wall could store heat in the daytime and release heat in the solar greenhouse in the night. It plays an important role in maintaining high indoor air temperature in the solar greenhouse. However, this kind of wall has the disadvantages of high cost and uncontrollable exothermic process. The solar greenhouse with the traditional back wall was easy to show low air temperature in the late night. To solve the problems, it was proposed to replace the traditional back wall by employing the heat insulation back wall and the active heat system, which could collect heat in the daytime and release heat actively in night. The active heat system developed with capillary tube mats (AHSCTM) was developed. The heat collecting and releasing performances of AHSCTM was investigated and compared with the composite wall, which was constructed with 370 mm clay brick and 100 mm polystyrene board, aiming to test the above proposal. AHSCTM was composed of capillary tube mats installed on the back wall or hanged on the south roof of the solar greenhouse, water tank, water pump and pipes. By circulating water, AHSCTM could collect the heat from the solar radiation intercepted by the capillary tube mats in the daytime and stored in the water tank. And in the night when the air temperature was low, those heat could be recovered to heat the solar greenhouse by circulating water again. According to the test, the heat collected in the daytime and released in the nighttime by AHSCTM were 84.4%~111.3% and 74.8%~100.7% of those collected and released by the composite wall, respectively. The coefficient of performance (COP) of AHSCTM was

收稿日期: 2019-08-23 修回日期: 2019-09-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019TC160)和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: 李明(1983—),男,讲师,博士,主要从事设施园艺工程技术研究,E-mail: lim_abe@cau.edu.cn

1.1 ~ 2.4。Nevertheless, during operation of AHSCTM in the nights of solar day, cloudy day and overcast day, the heat released by AHSCTM was 98.2% ~ 172.5% of the composite wall. in the other hands, a dynamical model was developed to simulate the water temperature of the water tank. The results showed that the simulated water temperature agreed well with the measured water temperature. This model can be used to improve the heat collecting and releasing performances of AHSCTM. Based on this model, AHSCTM can be improved by lengthening the capillary tube and increasing the number of capillary tubes in each mat. Then, the heat collected in the daytime and released in the nighttime by the improved AHSCTM were 67.6% ~ 112.1% and 69.0% ~ 128.3% of the composite wall respectively. COP of the improved AHSCTM was 2.8 ~ 7.0. During operation of AHSCTM in the nights of solar day, cloudy day and overcast day, the heat released by AHSCTM was 2.5 ~ 5.1 times of that of the composite wall. Thus, it was feasible to replace the composite wall in the solar greenhouse by employing the improved AHSCTM and the insulation back wall.

Key words: Chinese solar greenhouse; capillary tube mats; active heat system; external insulation composite wall; heat collection and release performance

0 引言

日光温室是我国特有的温室类型,具有良好的保温蓄热性能,在北方冬季夜间不加温或少量加温的条件下可维持较高的室内温度,满足蔬菜越冬需求^[1]。截至 2016 年底,我国日光温室面积已经达到 69.7 万 hm^2 ,为解决北方地区冬季蔬菜供应不足和推动农业产业结构调整发挥了巨大作用^[2-3]。

日光温室一般由后墙、后屋面、东西山墙和前屋面等构成。我国北方地区日光温室一般无加热设备,主要依靠白天蓄积太阳能来提高室内温度^[4]。传统后墙兼具保温和蓄热双重功能,可在日间吸收并储蓄来自太阳辐射的热量,在夜间向室内放热,提高夜间室内气温^[5-6]。马承伟等^[7]研究表明,后墙在晴天夜间的放热量可使北京地区日光温室的夜间温度提高 3 ~ 8℃。因此,后墙是日光温室在冬季夜间保持较高室温、满足作物生长需求的关键因素。

为获得良好的保温蓄热性能,理想的后墙应由蓄热层和保温层复合而成^[8-9]。其中,蓄热层用于储蓄热量,宜使用夯土或黏土砖等密度和比热容较高的材料;保温层主要用于防止蓄热层热量向室外散失,宜使用聚苯乙烯板等导热系数较小的保温材料。因此,由黏土砖和聚苯乙烯板复合建造而成的外保温复合墙具有较高的保温蓄热性能,是保温蓄热后墙的发展趋势之一^[10]。但此类墙体存在着建造成本高、放热不可控等问题,尤其在半夜室内气温较低的情况下,墙体放热强度较低,不利于维持室温^[11]。为解决上述问题,张义等^[11]提出,应用主动式集放热系统、配合保温后墙,替代上述传统后墙。后墙采用轻质保温材料建造,仅具有保温功能其集放热功能由主动式集放热系统承担。主动式集放热系统在日间收集后墙获得的太阳能并储存起来,在

夜间室内气温较低时集中放热,可有效避免因室内气温过低而对作物生长造成的低温胁迫。

近年来,日光温室主动式集放热系统相关的研究与应用取得了较大进展。张义等^[11]利用黑色薄膜开发了一种基于水幕帘的主动式集放热系统,其夜间放热量可达 4.9 ~ 5.6 MJ/m^2 。梁浩等^[12]利用双黑膜 PE 板代替原有的黑色薄膜,将系统日间集热效率提高到 57.7%。使用金属膜替代原有双黑膜能进一步提高系统的集放热效率^[13-14]。此外,佟雪姣等^[15]提出一种以水为媒介,利用 PC 板进行集热的主动蓄热装置,并比较了不同颜色及厚度的 PC 板的集热效果,结果表明,5 种颜色中褐色阳光板的蓄热量最多,达到 191.5 $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,3 种厚度中 8 mm 透明阳光板的蓄热量最多,为 198.2 $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在此基础上,徐微微等^[16]将 PC 板中水流方向改为由下向上,消除了集热板内空气对水流的影响,可使中空腔体中充满流动的水,系统总集热量达 350 MJ,最大集热效率可达 93%。马承伟等^[17]使用日光温室骨架作为集放热单元,也获得了较好的结果。

目前,缺少关于主动式集放热系统和日光温室保温蓄热后墙的对比研究,本文设计一种基于毛细管网的主动式集放热系统(Active heat system developed with capillary tube mates, AHSCTM),分析 AHSCTM 替代外保温复合墙集放热功能的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验日光温室概况

试验日光温室(图 1)位于北京市通州区潞城镇中农富通园艺有限公司通州基地(39.8°N, 116.7°E),温室东西走向,方位角偏东 25°,长 25 m,南北跨度 8 m,后墙高 2.6 m,脊高 3.8 m。后屋面仰角 45°,在水平地面投影宽度为 1.5 m,后坡仰角 45°。温室前屋面

覆盖材料为 0.1 mm PVC 塑料薄膜。温室后墙、后坡与东西侧山墙均采用双层 140 mm 聚苯乙烯板建造,板材内外涂抹 3 mm 抗裂砂浆,无其他加热设备。

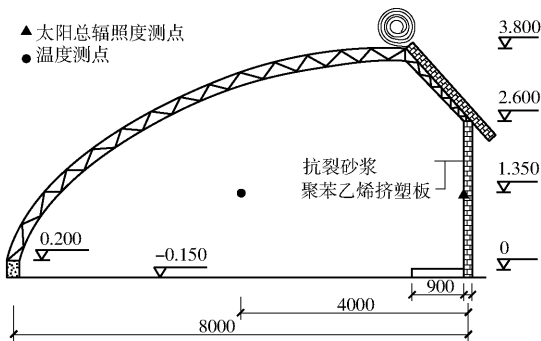


图 1 试验温室构造图

Fig. 1 Structure sketch of test solar greenhouse

测试时间为 2017 年 12 月 31 日—2018 年 2 月 19 日。测试期间,温室内基质栽培番茄。保温被揭开和闭合时间分别为 08:20 和 16:00。选取典型晴天(2018 年 2 月 7—8 日)、多云天(2018 年 2 月 8—9 日)和阴天(2018 年 2 月 9—10 日)采集的数据进行分析。

1.2 AHSCTM 结构与原理

AHSCTM 由毛细管网、蓄水池、循环管道、潜水泵和控制系统等构成(图 2)。其中,毛细管网由外径 4.3 mm、内径 3.5 mm 的毛细管构成,分为后墙吊挂毛细管网和空中悬吊毛细管网两部分。后墙吊挂毛细管网安装在后墙处,含 23 个由 96 根毛细管构成的毛细管单元,每个单元宽 1.0 m、长 1.8 m,下端距地面 1.0 m,毛细管并联在供水管和回水管之间,采取同程回水和下进上出的进水模式,保证水充满整个细管,供水管与回水管直径均为 32 mm。空中悬挂毛细管网安装在前屋面上,其水平投影距前屋面底角 3.2 m,同样包含 23 个毛细管单元,每个毛细管单元由 40 根毛细管构成,宽 1.0 m、长 0.8 m,采用 U 形单根毛细管,两端分别与供水管和回水管相连,采取上进上出的供水模式。

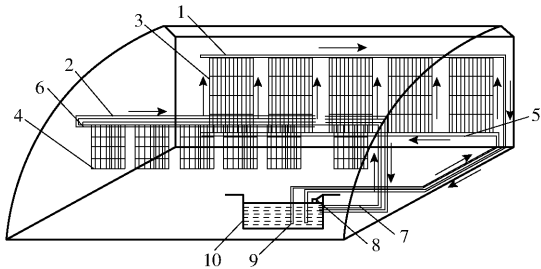


图 2 基于毛细管网的主动式集放热系统简图

Fig. 2 Schematic composition of active heat system developed with capillary tube mates

1、2. 回水管 3、4. 毛细管网 5、6. 供水管 7. 水表 8. 浮球阀
9. 潜水泵 10. 蓄热水池

蓄热水池位于温室东侧地下,水池长×宽×高为 4.2 m×2.2 m×1.4 m,有效容积 13.0 m³,蓄水池内水的体积为 5 m³。循环管道使用 PVC 管构建。潜水泵功率 800 W,扬程 10 m。控制系统主要由气温传感器、水温传感器和 PLC 控制柜组成,安装在温室的控制间内。

AHSCTM 的工作模式为:日间保温被揭开后,潜水泵启动,蓄水池中的水流经毛细管,吸收太阳辐射及室内空气热量后,再返回蓄水池中,反复循环,热量被储存在蓄水池中。夜间,当室内气温低于 11℃ 且小于水温 1℃ 时,自动控制系统启动潜水泵,蓄水池中的水流过毛细管,向室内放热。当室内温度高于设定值或者水气温差小于 1℃ 时,自动控制系统关闭潜水泵,AHSCTM 停止运行。

1.3 测试方案

在测试期间试验日光温室内有基质栽培的番茄,并使用滴灌方式进行灌溉。当室内气温较高时,使用卷膜器打开顶部通风口进行自然通风。

后墙太阳总辐照度和温度测点布置位置如图 1 所示。后墙太阳辐照度采用太阳总辐射传感器测量并且自动采集(测量范围:0~1 280 W/m²,精度:±10 W/m²)。太阳总辐射传感器垂直悬挂在后墙中间位置,距离过道地面高度为 1.35 m 处。室内温度测点布置在温室水平面几何中心、距地面高度 1.5 m 处,采用 T 型热电偶测量(测量范围:−100~350℃,精度:±0.5℃)。蓄水池水温测点布置在蓄热水池水体几何中心、距离水池底部 0.7 m 处,采用 Pt100 铂电阻测量(测量范围:−50~200℃,精度:±0.1℃)。室外气温通过 HOBO 室外气象站采集。通过安捷伦 34970A 型数据采集仪自动采集 T 型热电偶和 Pt100 铂电阻的测试数据。所有数据的采集间隔均为 10 min。

1.4 AHSCTM 水温模拟与集放热量计算

根据 AHSCTM 系统特点,提出以下计算假设:①忽略毛细管外表面温度与管内水温的差异。②忽略毛细管网进水温度与蓄水池水温的差异。③忽略毛细管背面的散射光。

根据能量守恒,单位时间流经毛细管的水的内能变化量等于该时间内毛细管吸收的太阳能和空气热能,可描述为

$$\rho_w c_w \frac{v}{3\,600n} (T_{op} - T_w) = \eta_c q_s + \alpha_c A_{po} \left(T_{in} - \frac{T_w + T_{op}}{2} \right) \tag{1}$$

式中 ρ_w ——水的密度,取 998 kg/m³
 c_w ——水的比热容,取 4 183 J/(kg·K)

v ——毛细管网内部水流速度, m^3/h
 n ——毛细管数量, 根
 T_{op} ——毛细管出水口水温, $^{\circ}\text{C}$
 T_w ——水池水温, $^{\circ}\text{C}$
 η_c ——毛细管对太阳辐射照度的吸收率
 q_s ——单根毛细管截获的太阳辐射能, W
 α_c ——单根毛细管的表面换热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
 A_{po} ——单根毛细管表面积, m^2
 T_{in} ——室内气温, $^{\circ}\text{C}$

根据太阳光照射下毛细管在与后墙平行平面所形成的阴影(图3), q_s 计算式为

$$q_s = I_n L d_s \tag{2}$$

其中
$$d_s = \begin{cases} d_o / \cos \varepsilon & (d_s < d_t) \\ d_t & (d_s \geq d_t) \end{cases} \tag{3}$$

$$\varepsilon = \beta - \gamma \tag{4}$$

式中 I_n ——后墙表面的太阳辐射强度, W/m^2
 L ——毛细管长度, m
 d_s ——毛细管在后墙平行面的阴影宽度, m
 d_o ——毛细管外径, m
 d_t ——两根相邻毛细管间距, m
 ε ——与后墙平行平面的太阳方位角, $(^{\circ})$
 β ——太阳方位角, $(^{\circ})$
 γ ——温室方位角, $(^{\circ})$

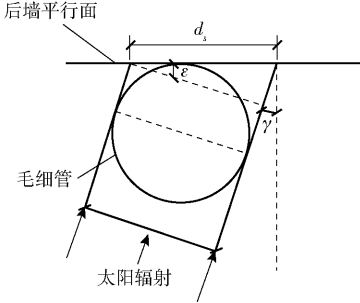


图3 毛细管在后墙平行面的阴影示意图
Fig.3 Schematic of capillary tube shadow on plane paralleled to north-wall

夜间 AHSCTM 运行时, 流经毛细管的水通过毛细管表面向室内放热, 水温降低。该关系描述为

$$\rho_w c_w \frac{v}{3\,600n} (T_{op} - T_w) = \alpha_c A_{po} \left(T_{in} - \frac{T_w + T_{op}}{2} \right) \tag{5}$$

AHSCTM 运行期间, 蓄水池内的水温受毛细管网换热和蓄水池自身热量流失影响而变化, 蓄水池水温计算式为

$$T_{w,m+1} = \frac{[V - \Delta t(v_1 + v_2)]T_{w,m} + (v_1 T_{op1,m} + v_2 T_{op2,m})\Delta t}{V} - T_l \Delta t \tag{6}$$

式中 $T_{w,m}$ ——第 $m\Delta t$ 时刻的蓄水池水温 ($m = 0, 1, 2, \dots$), $^{\circ}\text{C}$
 V ——蓄水池中水总体积, m^3
 v_1 ——后墙处毛细管网内部水流速, m^3/h
 T_{op1} ——后墙处毛细管网出水口水温, $^{\circ}\text{C}$
 v_2 ——悬挂毛细管网内部水流速, m^3/h
 T_{op2} ——悬挂毛细管网出水口水温, $^{\circ}\text{C}$
 Δt ——计算步长, 取 600 s
 T_l ——蓄水池水温降低速率, $^{\circ}\text{C}/\text{s}$
AHSCTM 停止运行期间, 蓄水池水温为

$$T_{w,m+1} = T_{w,m} - T_l \Delta t \tag{7}$$

日间由于 AHSCTM 采集后墙处太阳能和空气热能并将其储蓄在蓄水池内, AHSCTM 集热量为

$$E_c = \rho_w c_w V (T_{w,ec} - T_{w,ic}) / 10^6 \tag{8}$$

式中 $T_{w,ic}$ ——集热开始时蓄水池水温, $^{\circ}\text{C}$
 $T_{w,ec}$ ——集热结束时蓄水池水温, $^{\circ}\text{C}$

夜间 AHSCTM 向室内放热, 使得蓄水池内水温下降。根据能量守恒, 夜间 AHSCTM 向温室释放的热量为

$$E_r = \rho_w c_w V (T_{w,ir} - T_{w,er}) / 10^6 \tag{9}$$

式中 $T_{w,ir}$ ——放热开始时蓄水池水温, $^{\circ}\text{C}$
 $T_{w,er}$ ——放热结束时蓄水池水温, $^{\circ}\text{C}$

AHSCTM 的特性系数 (Coefficient of performance, COP) 定义为系统 1 d 向温室释放的热量与系统 1 d 耗电能的比值, 计算式为^[18]

$$C_{OP} = \frac{E_r}{q_p(t_c + t_r) \times 10^{-6}} \tag{10}$$

式中 q_p ——水泵额定功率, 取 800 W
 t_r ——AHSCTM 夜间运行时间, s
 t_c ——AHSCTM 日间运行时间, s

根据前期测试, 将毛细管网系统停止后, 蓄水池温度在 24 h 内未出现变化, T_l 可取 $0^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。根据《民用建筑设计规范》(GB 06—2016), α_c 取 $8.7\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[19]。另外, 毛细管为黑色, η_c 取 0.8 ^[19]。 β 和 γ 参照文献[20]所采用的方法进行计算。

1.5 外保温复合墙温度模拟

根据《日光温室设计规范》(NY/T 3223—2018), 北京地区适宜的外保温复合墙可选择 370 mm 黏土砖和 100 mm 聚苯乙烯板^[21]复合而成。同时, 为消除日光温室施工质量、栽培管理模式等问题对外保温复合墙蓄放热性能的影响, 本文采用一维差分法^[22-23]计算给定条件下外保温复合墙的墙体温度, 并据此计算其日间蓄热量和夜间放热量。外保温复合墙的节点划分如图 4 所示。

黏土砖内部控制节点 i ($i = 1, 2, 3, 4$) 的非稳态传热差分方程为

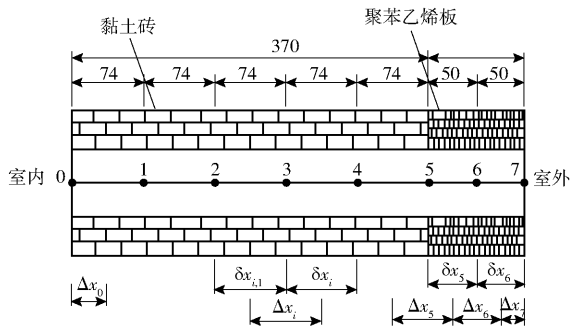


图 4 外保温复合墙体节点划分图

Fig. 4 Nodes in external insulation composite wall

$$\rho_1 c_1 \frac{T_{i,m} - T_{i,m-1}}{\Delta t} \Delta x_i = \frac{\lambda_1}{\delta x_{i-1}} (T_{i-1,m} - T_{i,m}) + \frac{\lambda_1}{\delta x_i} (T_{i+1,m} - T_{i,m}) \quad (11)$$

其中 $\Delta x_i = \delta x_{i-1}/2 + \delta x_i/2$ (12)

式中 ρ_1 ——黏土砖密度, kg/m^3
 c_1 ——黏土砖比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 λ_1 ——黏土砖导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 $T_{i,m}$ ——控制节点 i 在第 $m\Delta t$ 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$
 Δx_i ——控制节点 i 的控制区宽度, 取 0.074 m

聚苯乙烯板节点 6 的非稳态传热差分方程为

$$\rho_2 c_2 \frac{T_{6,m} - T_{6,m-1}}{\Delta t} \Delta x_6 = \frac{\lambda_2}{\delta x_5} (T_{5,m} - T_{6,m}) + \frac{\lambda_2}{\delta x_6} (T_{7,m} - T_{6,m}) \quad (13)$$

式中 ρ_2 ——聚苯乙烯板密度, kg/m^3
 c_2 ——聚苯乙烯板比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 λ_2 ——聚苯乙烯板导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 $T_{6,m}$ ——控制节点 6 在第 $m\Delta t$ 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$
 δx_5 ——控制节点 5、6 之间的距离, 取 0.05 m
 δx_6 ——控制节点 6、7 之间的距离, 取 0.05 m
 Δx_6 ——控制节点 6 的控制区宽度, 取 0.05 m

黏土砖和聚苯乙烯板交界处控制节点 5 的一维非稳态传热差分方程为

$$\left(\rho_1 c_1 \frac{\delta x_4}{2} + \rho_2 c_2 \frac{\delta x_5}{2} \right) \frac{T_{5,m} - T_{5,m-1}}{\Delta t} = \frac{\lambda_1}{\delta x_4} (T_{4,m} - T_{5,m}) + 5 (T_{5,m} - T_{6,m}) \quad (14)$$

外保温复合墙内表面节点 0 和外表面节点 7 的一维非稳态传热差分方程为

$$\rho_1 c_1 \frac{T_{0,m} - T_{0,m-1}}{\Delta t} \Delta x_0 = \frac{\lambda_1}{\delta x_0} (T_{1,m} - T_{0,m}) + \alpha_i (T_{\text{in},m} - T_{0,m}) + \eta_e I_n \quad (15)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{T_{7,m} - T_{7,m-1}}{\Delta t} \Delta x_7 = \frac{\lambda_2}{\delta x_6} (T_{6,m} - T_{7,m}) + \alpha_o (T_{\text{out},m} - T_{0,m}) \quad (16)$$

其中 $\Delta x_0 = \delta x_0/2$ (17)

$$\Delta x_7 = \delta x_6/2 \quad (18)$$

式中 Δx_0 ——控制节点 0 的控制区宽度
 η_e ——墙体内表面对太阳辐射照度的吸收率
 Δx_7 ——控制节点 7 的控制区宽度
 α_i ——墙体内表面换热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 α_o ——墙体外表面换热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 T_{out} ——室外气温, $^{\circ}\text{C}$
 δx_0 ——控制节点 0、1 之间的距离, 取 0.74 m

由于外保温复合墙是通过提高蓄热层温度来储蓄热量, 可根据深度 x 处墙体在日间初始时刻的温度 ($T_{x,\text{start}}$) 和结束时刻的蓄热层温度 ($T_{x,\text{end}}$) 来计算其日间蓄热量。蓄热层厚度利用温差法^[23] 计算。考虑到聚苯乙烯板蓄热能力较小, 可认为主要由黏土砖部分承担蓄热功能, 外保温复合墙日间储热量 (Q_c , MJ) 可根据深度 x 处蓄热层在日间初始时刻的温度 ($T_{x,\text{start}}$) 和结束时刻的蓄热层温度 ($T_{x,\text{end}}$) 来计算。即

$$Q_c = \rho_1 c_1 S \int_0^{d_w} (T_{x,\text{end}} - T_{x,\text{start}}) dx / 10^6 \quad (19)$$

式中 S ——蓄热墙体表面积, m^2
 d_w ——蓄热层的厚度, m
 $T_{x,\text{start}}$ 和 $T_{x,\text{end}}$ 随 x 变化的方程可在上述模拟结果的基础上通过回归分析获得。

夜间外保温复合墙通过对流换热和辐射换热的方式向室内散热, 其放热量为

$$Q_{r,m} = \sum_{k=1}^m q_{r,k} \Delta t / 10^6 \quad (20)$$

其中 $q_{r,k} = \alpha_i S (T_{0,k} - T_{\text{in},k})$ (21)

式中 $Q_{r,m}$ ——外保温复合墙在 $m\Delta t$ 时间内的放热量, MJ
 $q_{r,k}$ ——外保温复合墙在第 $k\Delta t$ 时刻的放热功率, J
 $T_{0,k}$ ——外保温复合墙内表面在 k 时刻温度, $^{\circ}\text{C}$
 $T_{\text{in},k}$ ——温室内 k 时刻空气温度, $^{\circ}\text{C}$

上述模型中所涉及的材料热工参数如表 1 所示^[19]。由于黏土砖表面为红褐色, 根据《民用建筑设计规范》(GB 06—2016), η_e 取 0.8 , α_i 取 $8.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, α_o 取 $23.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[19]。

2 结果与分析

2.1 后墙内表面太阳辐射及室内外气温

后墙内表面太阳辐射照度和室内外气温变化如图 5 所示。日间和夜间分别定义为保温被揭开 (08:20—16:00) 和闭合期间 (16:00—08:20)。

表 1 外保温复合墙材料热工参数

Tab.1 Thermal parameters of material involved in external insulation composite wall

参数	数值
聚苯乙烯板密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	8
聚苯乙烯板比热容/($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	1 340
聚苯乙烯板导热系数/($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	0.032 7
黏土砖密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 700
黏土砖比热容/($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	1 050
黏土砖导热系数/($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	0.76

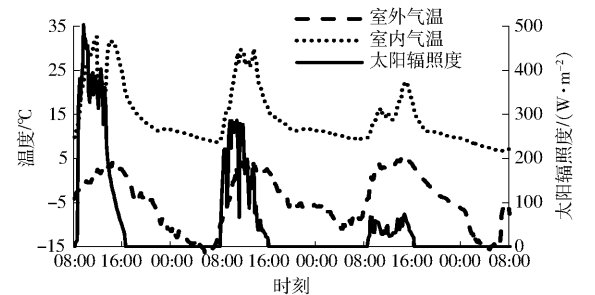


图 5 室内外空气温度与后墙内表面太阳辐射度变化曲线
(2018-02-07—2018-02-09)

Fig.5 Variations of indoor and outdoor air temperatures and solar radiation on inner surface of north wall

在晴天和多云日间,后墙内表面太阳辐射度总体呈先增后减的变化趋势,最高太阳辐射度分别为 503.1、286.9 W/m^2 。室外气温(T_{out})分别在 $-2.8\sim 3.9\text{℃}$ 和 $-9.6\sim 4.2\text{℃}$ 的范围内变化,也呈先升高后降低的趋势。室内气温(T_{in})在保温被揭开之后随时间快速提升,中午时由于通风而出现波动。在晴天和多云日间, T_{in} 分别在 $11.3\sim 32.6\text{℃}$ 和 $9.6\sim 29.6\text{℃}$ 范围内变化,室内外最大温差分别为 30.9、27.4 ℃ 。

在阴天太阳辐射较弱,最高太阳辐射度为 73.4 W/m^2 ,仅为晴天的 14.6%。 T_{out} 在 $-11\sim 5.4\text{℃}$ 范围内变化,室内外温差最高为 17.5 ℃ 。虽然阴天 T_{in} 不高,但温室管理人员依然在中午实施通风,导致阴天中午 T_{in} 出现了小幅下降。

在晴天、多云及阴天夜间, T_{out} 分别在 $-12.1\sim 2.1\text{℃}$ 、 $-15.8\sim 2.5\text{℃}$ 和 $-11.1\sim 3.9\text{℃}$ 范围内变化。保温被闭合后,室内气温以约 2.4 $\text{℃}/\text{h}$ 的速度下降。当室内气温低于 11 ℃ 时,AHSCTM 开始向室内放热,室内气温下降的速度减至 0.2 $\text{℃}/\text{h}$ 。

2.2 AHSCTM 集热与放热性能

试验期间蓄水池水温(T_w)变化曲线如图 6 所示,根据式(8)和式(9)计算集放热量,计算结果见表 2。日间 AHSCTM 运行期间, T_w 随时间持续上升,分别在晴天、多云和阴天日间上升了 8.2、6.0、1.7 ℃ ,日间集热量(E_c)分别为 171.2、125.2、35.5 MJ;

夜间放热量(E_r)分别为 123.2、116.9、60.5 MJ,根据式(10)计算 COP 分别为 2.4、1.9、1.1。

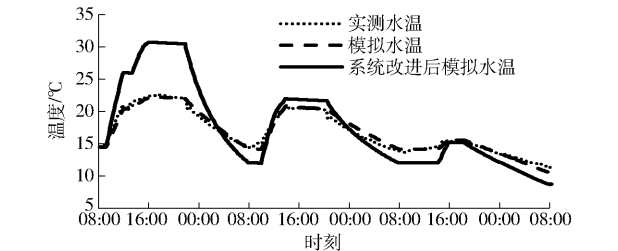


图 6 AHSCTM 蓄水池实测水温、模拟水温和改进 AHSCTM 的模拟蓄水池水温 (2018-02-07—2018-02-09)

Fig.6 Measured and simulated water temperature of AHSCTM and simulated water temperature of improved AHSCTM

表 2 AHSCTM 集放热性能
Tab.2 Heat collection and release performances of AHSCTM

日期	改进前			改进后		
	E_c/MJ	E_r/MJ	COP	E_c/MJ	E_r/MJ	COP
02-07	171.2	123.2	2.4	340.2	365.3	7.0
02-08	125.2	116.9	1.9	204.6	196.2	3.5
02-09	35.5	60.5	1.1	66.8	156.5	2.8

以单位墙体面积计算,AHSCTM 夜间放热量为 0.9~1.9 MJ/m^2 ,而基于水幕帘的主动式集放热系统的夜间放热量可高达 4.9~5.6 MJ/m^2 [9]。因此 AHSCTM 的夜间放热量较少。另外,AHSCTM 的 COP 同样低于基于水幕帘的主动式集放热系统,需进一步优化 [11,24]。

2.3 改进 AHSCTM 的储放热性能

2.3.1 模型验证

为提升 AHSCTM 的储放热性能,利用试验测得的参数对本文构建的 AHSCTM 蓄水池水温模型进行了验证(图 6)。结果表明模拟水温与实测水温一致性较高,两者之间平均偏差 0.4 ℃ ,最大偏差 1.3 ℃ 。因此,数学模型准确度较高,可以用来分析不同参数条件下的主动式集放热系统的集放热性能。

2.3.2 AHSCTM 改进

由于后墙吊挂的毛细管仅占后墙面积的 26.3%,通过加大毛细管的数量和延长毛细管长度进行改进。改进后毛细管数量和长度分别为 4 416 根和 2.6 m。又因为空中悬吊毛细管网会对地面植物产生阴影,去除不要,最终,改进后 AHSCTM 的毛细管外表面积较现有系统增加了 62.4%。

根据构建的水温模型,在 2018 年 2 月 7—9 日期间测定的室内气温和太阳辐射条件下,改进 AHSCTM 可在晴天、多云和阴天日间使 T_w 分别升高

16.3、9.8、3.2℃(图6), E_c 达到340.2、204.6、66.8 MJ,分别较现有系统增加98.7%、63.4%、88.2%(表2)。另外,改进 AHSCTM 在晴天、多云和阴天的 E_r 可达365.3、196.2、156.5 MJ,分别较现有系统增加196.5%、67.8%、158.7%。

以单位墙体面积计算,改进 AHSCTM 夜间放热量达到2.4~5.6 MJ/m²,COP 可达2.8~7.0,与基于水幕帘的主动式集放热系统在放热性能和 COP 的差距大幅缩减^[11,24]。

2.4 外保温复合墙储放热性能

外保温复合墙温度随时间变化如图7所示。图中0、0.074、0.148、0.222、0.296 m 表示到复合墙体内部表面的距离。在日间保温被揭开后,后墙内表面温度先升高后降低,其他深度的墙体温度变化趋势与内表面温度变化相同,但具有一定的滞后性,且变化幅度不断随深度增加而减小。这与李明等^[25]的研究结果一致。

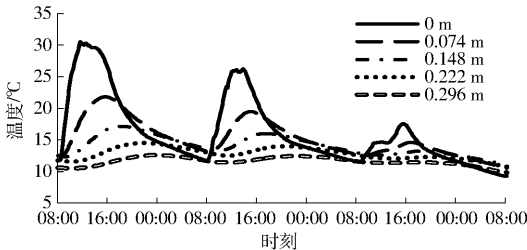


图7 外保温复合墙体各节点温度变化曲线
(2018-02-07—2018-02-09)

Fig.7 Variation curves of temperatures at each node of insulation composite wall

一般外保温复合墙通过提高自身温度来储蓄热量。根据模拟结果,后墙不同位置温度的日变化幅度随深度增加不断减小。在深度为0.296 m处,其日变化幅度不到10%。认为外保温复合墙在试验条件下的蓄热层厚度为0.296 m。通过回归分析可获得保温被揭开和闭合时刻后墙蓄热层温度随深度变化的回归方程(表3)。表中回归方程 x 的取值范围为0~0.296 m。根据式(19),外保温复合墙在晴天、多云和阴天的日间储热量(Q_c)分别为203.0、118.4、31.5 MJ(表4)。但由于墙体的热交换过程不可控,墙体内表面温度从15:00左右高于室内气温,导致墙体提前放热,该部分热量达到了88.6、52.5、19.3 MJ,是 Q_c 的43.6%、44.3%、61.3%。在夜间,外保温复合墙持续向室内放热,其夜间放热量($Q_{r,m}$)分别为160.0、116.1、80.9 MJ。阴天虽然 Q_c 较低,但因夜间室内温度较低,外保温复合墙依然向室内放热,以致阴天 $Q_{r,m}$ 大于 Q_c 。

2.5 AHSCTM 与外保温复合墙储放热性能对比

AHSCTM 在晴天、多云和阴天日间的储热量分

表3 墙体蓄热层温度随深度变化的回归方程

Tab.3 Fitting equations of wall temperature in heat storage layer varied with depth

日期	状态	拟合曲线	R^2
02-07	初始	$T_{x,start} = -1408.3x^4 + 924.7x^3 + 235.8x^2 + 22.5x + 11.8$	0.99
	结束	$T_{x,end} = -1975.9x^4 + 1477.3x^3 - 249.9x^2 - 55.5x + 26.6$	0.99
02-08	初始	$T_{x,start} = -2574x^4 + 1645.8x^3 - 396.2x^2 + 41.7x + 11.7$	0.99
	结束	$T_{x,end} = -1972.5x^4 + 1556.3x^3 - 355x^2 - 12x + 21.4$	0.99
02-09	初始	$T_{x,start} = -1860x^4 + 1180.7x^3 - 283.8x^2 + 30.3x + 11.6$	0.99
	结束	$T_{x,end} = -560.2x^4 + 116.4x^3 + 110.9x^2 - 48.1x + 17.4$	0.99

表4 外保温复合墙日间储热量和夜间放热量

Tab.4 Stored heat in daytime and released heat in night of external insulation composite wall MJ

日期	Q_c	$Q_{r,m}$	夜间 AHSCTM 系统运行期间放热量
02-07	203.0	160.0	71.4
02-08	118.4	116.1	63.6
02-09	31.5	80.9	61.6

别是相同条件下的外保温复合墙的84.4%、105.7%、111.3%。这可能是由于晴天日间太阳辐射较强,系统水温升高过快,AHSCTM 下午的集热能力下降所造成的。另一方面,AHSCTM 在晴天、多云和阴天夜间的放热量分别是外保温后墙的77.0%、100.7%、74.8%,但在 AHSCTM 夜间运行期间,AHSCTM 放热量是相同时间段内外保温复合墙的放热量的172.5%、183.8%、98.2%。因此,与外保温复合墙相比,AHSCTM 在储放热性能方面的优势并不明显,但由于放热过程可控,能在室内气温较低的时集中放热,对晴天和多云夜间最低气温的调节能力优于外保温复合墙。

改进 AHSCTM 的储放热较现有系统有了较大提升。改进 AHSCTM 在晴天、多云和阴天日间的储热量可较外保温复合墙分别高67.6%、72.8%、112.1%,夜间放热量则较外保温复合墙高128.3%、69.0%、93.5%;而在夜间 AHSCTM 运行期间,改进 AHSCTM 的放热量更是外保温复合墙的5.1、3.1、2.5倍。该结果表明,改进 AHSCTM 在日间储热量和夜间放热量上超过外保温墙体,能更有效地避免室内最低气温的发生。

当然,AHSCTM 的运行过程离不开水泵运行,即使经过改善,依然需要一定的电力投入。而外保温

后墙的运行不需要消耗电力,运行成本较低。另外二者在严格相同条件下对室内气温的影响也缺乏研究。因此,还需从建造成本、室内气温变化、作物产量和品质等角度对二者进一步对比,明确 AHSCTM 的替代传统保温蓄热后墙的可行性。

3 结论

(1)测试条件下,AHSCTM 日间储热量和夜间放热量分别为 35.5 ~ 171.2 MJ 和 60.5 ~ 123.2 MJ, COP 为 1.1 ~ 2.4。

(2)改进 AHSCTM 的日间储热量和夜间放热量分别较现有系统增加 63.4% ~ 98.7% 和 67.8% ~ 158.7%,COP 可达 2.8 ~ 7.0。

(3)在相同条件下,AHSCTM 的日间储热量为

外保温复合墙 84.4% ~ 111.3%,夜间放热量为外保温复合墙 74.8% ~ 100.7%;在夜间运行期间,AHSCTM 夜间放热量是相同时间段内外保温复合墙的放热量的 98.2% ~ 172.5%。因此,AHSCTM 的储放热性能未明显优于外保温复合墙,但由于 AHSCTM 放热过程可控,在提高室内最低气温方面优于外保温复合墙。

(4)改进 AHSCTM 的日间储热量和夜间放热量分别较外保温复合墙高 67.6% ~ 112.1% 和 69.0% ~ 128.3%。尤其在 AHSCTM 运行期间,改进 AHSCTM 的夜间放热量是外保温复合墙的 2.5 ~ 5.1 倍。因此,改进 AHSCTM 的储放热性能优于外保温复合墙,利用改进 AHSCTM 配合保温墙体替代传统保温蓄热后墙具有一定的可行性。

参 考 文 献

- [1] TONG G, CHRISTOPHER D M, LI T, et al. Passive solar energy utilization: a review of cross-section building parameter selection for Chinese solar greenhouses[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 26: 540 - 548.
- [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.
- [3] 周长吉.中国日光温室结构的改良与创新(一)——基于被动储放热理论的墙体改良与创新[J].中国蔬菜,2018(2):1 - 5.
- [4] 王宇欣,辛粉萍,李雪嫒,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.j-csam.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)
- [5] 陈青云.日光温室的实践与理论[J].上海交通大学学报(农业科学版),2008,26(5):343 - 347.
CHEN Qingyun. Progress of practice and theory in sunlight greenhouse[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Agriculture Sciences), 2008, 26(5): 343 - 347. (in Chinese)
- [6] 史宇亮,王秀峰,魏珉,等.日光温室不同厚度土墙体蓄放热特性研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(11):359 - 367.
SHI Yuliang, WANG Xiufeng, WEI Min, et al. Comparison of heat storage and release characteristics of different thicknesses soil wall solar greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):359 - 367. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171144&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.044. (in Chinese)
- [7] 马承伟,徐凡,赵淑梅,等.日光温室热环境分析及设计方法研究[C]//2011第二届中国寿光国际设施园艺高层学术论坛,寿光,2011:70 - 79.
- [8] 彭东玲,杨其长,魏灵玲,等.日光温室土质墙体内热流测试与分析[J].中国农业气象,2014,35(2):168 - 173.
PENG Dongling, YANG Qichang, WEI Lingling, et al. Measurement and heat flux analysis on north earthen wall in Chinese solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2): 168 - 173. (in Chinese)
- [9] 李明,周长吉,魏晓明.日光温室墙体蓄热层厚度确定方法[J].农业工程学报,2015,31(2):177 - 183.
LI Ming, ZHOU Changji, WEI Xiaoming. Thickness determination of heat storage layer of wall in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 177 - 183. (in Chinese)
- [10] 李明,魏晓明,齐飞,等.日光温室墙体研究进展[J].新疆农业科学,2014,51(6):1162 - 1170,1176.
LI Ming, WEI Xiaoming, QI Fei, et al. Research progress in wall of solar greenhouse[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2014, 51(6): 1162 - 1170, 1176. (in Chinese)
- [11] 张义,杨其长,方慧,等.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, et al. Research on warming effect of water curtain system in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 188 - 193. (in Chinese)
- [12] 梁浩,方慧,杨其长,等.日光温室后墙蓄放热帘增温效果的性能测试[J].农业工程学报,2013,29(12):187 - 193.
LIANG Hao, FANG Hui, YANG Qichang, et al. Performance testing on warming effect of heat storage-release curtain of back wall in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 187 - 193. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] FANG H, YANG Q, ZHANG Y, et al. Performance of a solar heat collection and release system for improving night temperature in a Chinese solar greenhouse[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(2): 283 – 289.
- [15] 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)
- [16] 徐微微, 马承伟, 宋卫堂, 等. 日光温室中空板水循环集放热系统设计与集热性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 326 – 334.
- XU Weiwei, MA Chengwei, SONG Weitang, et al. Test on heat-collecting performance of solar heat collection and release system with water cycling inside hollow plates in Chinese solar greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 326 – 334. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180739&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.039. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 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 Qizhang, FANG Hui, et al. Application of heating system with active heat storage release and heat pump in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 168 – 177. (in Chinese)
- [19] GB 50716—2016 民用建筑热工设计规范[S]. 2016.
- [20] 马承伟, 赵淑梅, 程杰宇, 等. 日光温室光辐射环境模型构建研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(5): 513 – 517.
- [21] NY/T 3223—2018 日光温室设计规范[S]. 2018.
- [22] 马承伟, 陆海, 李睿, 等. 日光温室墙体传热的一维差分模型与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 231 – 237.
- MA Chengwei, LU Hai, LI Rui, et al. One-dimensional finite difference model and numerical simulation for heat transfer of wall in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 231 – 237. (in Chinese)
- [23] 管勇, 陈超, 凌浩恕, 等. 日光温室三重结构相变蓄热墙体传热特性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 166 – 173.
- GUAN Yong, CHEN Chao, LING Haoshu, et al. Analysis of heat transfer properties of three-layer wall with phase-change heat storage in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 166 – 173. (in Chinese)
- [24] LU Wei, ZHANG Yi, FANG Hui, et al. Modelling and experimental verification of the thermal performance of an active solar heat storage-release system in a Chinese solar greenhouse[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160: 12 – 24.
- [25] 李明, 周长吉, 周涛, 等. 日光温室土墙传热特性及轻简化路径的理论分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 175 – 181.
- LI Ming, ZHOU Changji, ZHOU Tao, et al. Heat transfer process of soil wall in Chinese solar greenhouse and its theoretical simplification methods[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 175 – 181. (in Chinese)