

文章编号: 1008-1542(2024)03-0318-10

# 相变材料在装配式复合墙体日光温室中的应用研究

康利改<sup>1,2,3</sup>, 王文静<sup>1,2,3</sup>, 李永<sup>4</sup>, 郟丽娟<sup>5</sup>, 王易军<sup>1,2,3</sup>

- 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018;
- 河北省岩土与结构体系防灾减灾技术创新中心(筹), 河北石家庄 050018;
- 智能低碳装配式建筑技术研究中心, 河北石家庄 050018;
- 河北省建筑科学研究院有限公司, 河北石家庄 050227;
- 河北省农林科学研究院经济作物研究所, 河北石家庄 050051)

**摘要:**为进一步提高日光温室墙体的蓄热能力,改善室内热环境,对石蜡-膨胀珍珠岩复合相变材料(paraffin-expanded perlite composite phase change material, PCM-PE)在温室中的应用进行研究。利用 TRNSYS(transient system simulation program)建立装配式复合墙体日光温室的模型,用晴天和阴天的实测数据验证模型准确性,利用该模型分析温室的北屋顶、侧墙、北墙等结构内表面分别添加 PCM-PE 后室内温度的变化和单位成本,及温室北屋顶、侧墙和北墙均添加 PCM-PE 时的最佳厚度。结果表明:温室不同结构内表面添加 PCM-PE 均对室内平均温度有明显提升作用,侧墙内表面添加 PCM-PE 使晴天时室内平均温度提高 1.32 °C,单位成本最低,为 2 094 元/°C;北屋顶、侧墙、北墙均添加 PCM-PE 时,其最佳厚度为 50 mm,晴天室内平均温度和北墙平均温度分别提升 3.9 和 3.7 °C,阴天分别提升 2.2 和 2.3 °C;添加 50 mm PCM-PE 后,温室墙体传热系数较试验温室降低了 15%,热阻提高了 9.9%,对维持室内温度、降低温室能耗具有积极作用。分析温室不同结构应用 PCM-PE 的效果,同时考虑单位成本,可为建造经济性好、蓄热性能强的温室提供参考。

**关键词:**复合建筑材料;日光温室;室内温度;北墙温度;单位成本

中图分类号: TU261 文献标识码: A DOI: 10.7535/hbkd.2024yx03011

## Application of phase change materials in fabricated heterogeneous composite wall solar greenhouse

KANG Ligai<sup>1,2,3</sup>, WANG Wenjing<sup>1,2,3</sup>, LI Yong<sup>4</sup>, QIE Lijuan<sup>5</sup>, WANG Yijun<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;

收稿日期: 2023-11-24; 修回日期: 2024-01-14; 责任编辑: 冯民

基金项目: 河北省省级科技计划资助项目(21327208D)

第一作者简介: 康利改(1983—), 女, 河北石家庄人, 副教授, 博士, 主要从事建筑节能、综合能源系统、双碳等方面的教学和研究。

通信作者: 李永, 正高级工程师。E-mail: 956094073@qq.com

康利改, 王文静, 李永, 等. 相变材料在装配式复合墙体日光温室中的应用研究[J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(3): 318-327.

KANG Ligai, WANG Wenjing, LI Yong, et al. Application of phase change materials in fabricated heterogeneous composite wall solar greenhouse[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(3): 318-327.

2. Innovation Center of Disaster Prevention and Mitigation Technology for Geotechnical and Structural Systems of Hebei Province (Preparation), Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
3. Engineering Technology Research Center for Intelligent & Low-carbon Assembled Building, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
4. Hebei Academy of Building Science Company Limited, Shijiazhuang, Hebei 050227, China;
5. Institute of Economic Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

**Abstract:** In order to further improve the heat storage capacity of solar greenhouse walls and improve the indoor thermal environment, the application of paraffin-expanded perlite composite phase change material (PCM-PE) in greenhouses was studied. The transient system simulation program (TRNSYS) was used to build a model of a fabricated composite wall solar greenhouse, and measured data from sunny and cloudy days were used to verify the accuracy of the model. The model was used to analyze the changes in indoor temperature and the unit cost of the greenhouse after PCM-PE was added to the inner surfaces of the structures, such as the north roof, the side walls, and the north wall, respectively, as well as the optimal thickness of the greenhouse when PCM-PE was added to the north roof, the side walls, and the north wall. The results show that the addition of PCM-PE to the inner surfaces of different greenhouse structures has a significant effect on increasing the average indoor temperature, and the addition of PCM-PE to the inner surfaces of the side walls makes the average indoor temperature increase by 1.32 °C on sunny days, with the lowest unit cost of 2.094 Yuan/°C; When PCM-PE is added to the north roof, side wall, and north wall with an optimal thickness of 50 mm, the average indoor temperature and the average temperature of the north wall increase by 3.9 °C and 3.7 °C on sunny days, and by 2.2 °C and 2.3 °C on cloudy days, respectively; After adding 50 mm PCM-PE, the heat transfer coefficient of the greenhouse wall is reduced by 15% and the thermal resistance increases by 9.9% compared with that of the test greenhouse, which has a positive effect on maintaining the indoor temperature and reducing the energy consumption of the greenhouse. The effect of applying PCM-PE to different structures of greenhouses is analyzed considering the unit cost, which provides some reference for constructing greenhouses with good economy and high heat storage performance.

**Keywords:** composite building material; solar greenhouse; indoor temperature; north wall temperature; unit cost

日光温室是中国特有的设施农业建筑,可以在没有外来辅助加热设备的情况下被动吸收太阳能储存在墙体、土壤中,夜间释放热量以维持室内热环境<sup>[1-3]</sup>。中国日光温室设计建造过程中存在重栽培、轻墙体蓄热的现象,导致设施农业产量仅为先进国家的1/3<sup>[4-6]</sup>。

温室墙体白天蓄集太阳能的能力越强,夜间提供给室内的热量越多<sup>[7-8]</sup>。随着温室墙体新型材料及蓄热技术的发展,将相变材料(phase change material, PCM)应用于墙体以改善室内热环境得到广泛关注<sup>[9-10]</sup>。周莹等<sup>[11]</sup>将石蜡-膨胀珍珠岩复合相变储能砂浆应用于温室墙体,并与砖墙温室进行对照试验,表明相变储能砂浆具有良好的蓄放热效果;李鹏等<sup>[12]</sup>将以石蜡为主的PCM喷涂于北墙内表面,墙体温度明显高于普通墙体温度;张勇等<sup>[13]</sup>将无机PCM固定在温室北墙,研究表明在不同天气条件下室内植物均处于环境适宜的生长环境中;LIU等<sup>[14]</sup>提出由乙烯共四氟乙烯薄膜和PCM构成新型温室外层材料,可有效提高冬季夜间温室作物的防冻效果;ZHANG等<sup>[15]</sup>提出的可与内部保温层切换位置的PCM墙体在冬季可以节省89%的能量。

研究人员采用数值模拟方式进一步优化相变储能系统,预测PCM在实际应用中的性能表现<sup>[16]</sup>。时盼盼等<sup>[17]</sup>通过EnergyPlus模拟确定温室复合相变墙体蓄热层与保温层的最佳厚度;NAJJAR等<sup>[18]</sup>建立的数值模型表明PCM可存储能量,降低温室内的最大温度;LING等<sup>[19]</sup>采用试验和数值方法证实PCM对改善温室内热环境起积极作用;邹平等<sup>[20]</sup>构建温室计算传热模型用于墙体相变材料热物性优化,并阐明了PCM的选择原则。

上述研究为PCM在温室中的应用提供了一定的基础,也取得了相应的效果,但对PCM应用的经济性鲜有报道。本文研究石蜡-膨胀珍珠岩复合相变材料(paraffin-expanded perlite composite phase change material, PCM-PE)在装配式复合墙体日光温室中的应用效果和经济学,本研究拟利用TRNSYS(transient system simulation program)建立日光温室模型,采用晴天和阴天的实测数据验证模型,利用该模型分析将PCM-PE应用于温室不同结构内表面对室内热环境的改善效果,并对应用PCM-PE的最佳厚度进行研究,以为温室应用PCM研究提供理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验温室

### 1.1.1 温室概况

装配式复合墙体日光温室位于河北省石家庄市鹿泉区大河镇河北省农林科学院农业综合试验园(东经114°29',北纬38°05'),建成于2021年9月。温室长80 m,跨度12 m,脊高5.3 m,北墙高3.7 m,北屋面仰角46°,屋面采光角27°。测试期为2021-12-01—2022-03-31,测试期间温室内种植越冬茬番茄。

试验温室由全拱形钢架构成,南屋顶骨架由椭圆钢(75 mm×30 mm×2.5 mm)和圆钢(DN20 mm×2.0 mm)栓接而成,北墙骨架采用间距2 m的方钢(100 mm×60 mm×2.5 mm)纵向连接。南屋顶骨架焊接在北墙骨架上,共同构成承重骨架。温室墙体厚度约29 cm,由内向外分别为塑料薄膜密封的6 cm 稻草板、7 cm 中空层、3 cm 聚氨酯内涂层、9 cm 轻质复合聚苯板(expanded polystyrene board, EPS)、3 cm 聚氨酯外涂层和1 cm 水泥砂浆。北屋顶由内向外为1 cm 竹胶板、3 cm 聚氨酯涂层和2 cm 水泥砂浆。南屋顶用保温被覆盖,于8:00收起,16:00铺放。

### 1.1.2 测点布置及测试设备

试验温室内布置6个室内温度测点,而北墙内表面布置9个温度测点,东西方向均为日光温室长度的1/4、1/2和3/4处,南北方向为中间位置,室温测点距地面的高度分别为1.0和1.5 m,北墙温度测点距地面高度分别为0.5、1.5和2.5 m。温室西墙正西方向20 m处的空旷场地布置1个温度测点、1个太阳辐射量测点,分别距地面1.18和0.5 m。

室内温度和北墙温度数据由建筑围护结构热工性能测试设备R90V采集,测量范围为0~50℃,精度为±0.1℃。室外温度和太阳辐射量数据由室外气象站采集,温度测量范围为-40~70℃,精度±0.1℃;太阳辐射量测量范围为0~2 000 W/m<sup>2</sup>,精度±5 W/m<sup>2</sup>。

## 1.2 试验材料

多孔介质的膨胀珍珠岩作为一种化学性质稳定的无机材料,来源广泛且价格低廉。膨胀珍珠岩与相变石蜡以质量比6:4进行真空吸附制备得石蜡-膨胀珍珠岩复合定形相变颗粒,再与石膏、乳胶粉、外加剂按质量配比1:3:0.1:0.05,通过干混搅拌、加水搅拌制备得到PCM-PE<sup>[11]</sup>。利用TG-DSC热分析仪测得PCM-PE的DSC曲线如图1所示,其相变温度为25.6℃,相变潜热为89.8 kJ/kg。

李启金等<sup>[21]</sup>研究表明膨胀珍珠岩对石蜡具有良好的吸附性,液态石蜡在珍珠岩的表面张力和毛细作用下难以从其微孔结构渗透,有效解决石蜡在储热应用时的液态流动问题,提高了其稳定性。本研究将PCM-PE应用于温室内表面,并采用模拟方法探究其应用效果。

## 1.3 TRNSYS 模型

利用TRNSYS建立的试验温室模型示意布局见图2。模型由气象数据模块、辐射模块、时间表、控制模块、建筑模块等构成。试验温室建模参数设置条件及假设如下:1)气象数据模块中以晴天(2022-01-05)和阴天(2022-01-25)的数据进行模拟;2)温室模型坐北朝南;3)地面与北墙等结构的太阳辐射量均匀分布;4)忽略温室内植物蒸腾作用的影响及对温室地面的遮荫效果。

1)气象数据模块 以一定的时间间隔从数据文

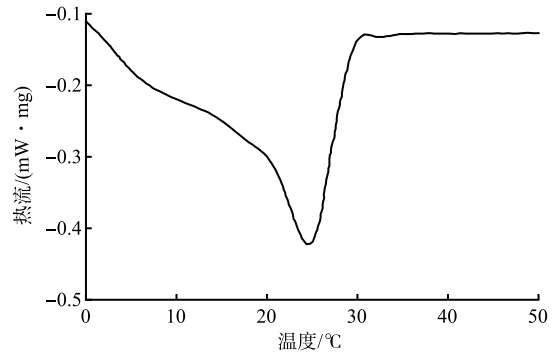


图1 PCM-PE的DSC曲线

Fig.1 DSC curve of PCM-PE

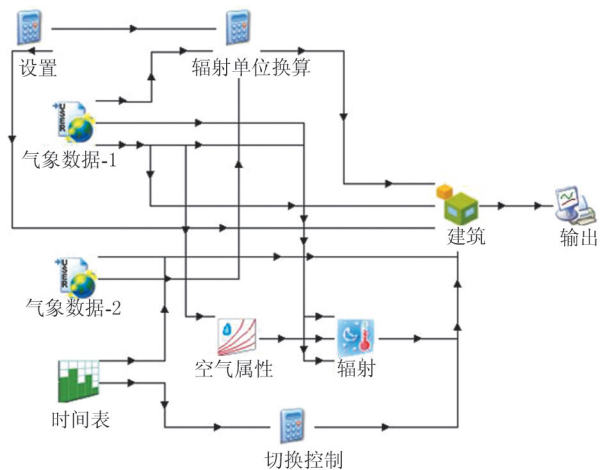


图2 试验温室TRNSYS模型

Fig.2 Experimental greenhouse TRNSYS model

件中读取天气数据,为具有任意方向和倾斜度的表面产生直接和漫射辐射输出。

$$E_{\text{sky}} = E_{0,\text{sky}} + (1.0 - E_{0,\text{sky}}) \times f_{\text{cloud}} \times \epsilon_{\text{cloud}}, \quad (1)$$

$$t_{\text{sky}} = E_{\text{sky}}^{1/4} (t_{\text{amb}} + 273.13) - 273.13, \quad (2)$$

式中: $E_{\text{sky}}$  为天空发射率; $E_{0,\text{sky}}$  为天空无云时的发射率; $f_{\text{cloud}}$  为被云覆盖的部分天空; $\epsilon_{\text{cloud}}$  为云的发射率; $t_{\text{sky}}$  为天空温度,℃; $t_{\text{amb}}$  为环境温度,℃。

2) 空气属性模块 将空气干球温度和湿球温度、相对湿度、露点温度、湿度比、焓其中之一作为输入,根据 2 个给定输入所定义的状态点,输出其他空气属性。

3) 辐射模块 该组件决定了一个等效“天空温度”,可计算从建筑物外表面到大气层的长波辐射交换。等效天空温度是一个与环境温度、天空云量系数等有关的函数,如果天气数据中不包括天空的云量因子,则云量因子和等效天空温度可根据式(4)、式(5)确定。

$$C_{\text{cover}} = (1.4286 \frac{E_{\text{dif}}}{E_{\text{glob,h}}} - 0.3)^{0.5}, \quad (3)$$

$$t_{\text{sky}} = t_{\text{amb}} [\epsilon_0 + 0.8(1 - \epsilon_0)C_{\text{cover}}]^{0.25}, \quad (4)$$

式中: $C_{\text{cover}}$  为云量因子; $E_{\text{dif}}$  为水平线上的漫射辐射,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $E_{\text{glob,h}}$  为水平线上的总辐射,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\epsilon_0$  为晴朗天空的发射率。

4) 时间表模块 对模块进行启停控制,从而实现一个循环周期内固定的运行模式。

5) 切换控制模块 通过输入参数关系式可实现数据的换算、数值计算等功能,通过此模块控制保温被的开启/关闭。

6) 建筑模块 设置温室不同结构的材料性能(见表 1)、墙体类别、朝向等参数。

7) 输出模块 在模拟进行期间,按指定的时间间隔显示选定的输出变量。

表 1 试验温室建筑材料的性能参数

Tab.1 Testing performance parameters of greenhouse construction materials

材料	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	比热容/( $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )	导热系数/( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )
水泥砂浆	600.0	1.05	0.180
聚氨酯	35.0	1.38	0.024
EPS	723.3	0.78	0.140
空气	1.3	1.01	0.024
稻草板	300.0	1.68	0.130
薄膜	300.0	1.89	0.093
PCM-PE	363.0	1.35	0.076

## 1.4 评价指标

### 1.4.1 室内空气温度

应用 PCM-PE 的目的是为了改善温室热环境,温室内空气温度是评价 PCM-PE 效果的有效指标。

### 1.4.2 北墙温度

温室北墙可在夜间将热量释放到室内,维持室内温度平衡,是评价温室热性能的关键参数。

### 1.4.3 墙体有效蓄热量

墙体有效蓄热量<sup>[7]</sup>计算公式为

$$Q_{\text{Eff}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{U_i} \rho_{i,j} A_{i,j} \Delta x_{i,j} \int_{t_0}^{t'} c_{i,j}(t) dt, \quad (5)$$

式中: $n$  为不同蓄热墙体材料层的总层数; $U_i$  为第  $i$  层墙体材料层的薄层总数; $A$  为计算薄层的面积,  $\text{m}^2$ ;  $t_0$  为墙体蓄热量的计算温度起始值,取  $t_0 = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

### 1.4.4 墙体日蓄热量

温室保温被开启时段,太阳光透过南屋顶照射到温室墙体内表面,墙体温度升高,蓄热量增加。墙体日蓄热量为

$$Q_{\text{chs}} = Q_{\text{Eff}}^{t_2} - Q_{\text{Eff}}^{t_1}, \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{ehs}}$  为墙体日蓄热量, $\text{J}/\text{m}^2$ ;  $Q_{\text{Eff}}^{t_2}$  为保温被关闭时墙体的有效蓄热量, $\text{J}/\text{m}^2$ ;  $t_2$  为保温被关闭时刻,为 16:00;  $Q_{\text{Eff}}^{t_1}$  为保温被开启时墙体的有效蓄热量, $\text{J}/\text{m}^2$ ;  $t_1$  为保温被开启时刻,为 8:00。

#### 1.4.5 墙体日放热量

温室保温被覆盖时段,室内温度下降,墙体释放白天储存的热量。墙体日放热量为

$$Q_{\text{ehr}} = Q_{\text{Eff}}^{t_2} - Q_{\text{Eff}}^{t_3}, \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{ehr}}$  为墙体日放热量, $\text{J}/\text{m}^2$ ;  $Q_{\text{Eff}}^{t_3}$  为保温被开启时墙体的有效蓄热量, $\text{J}/\text{m}^2$ ;  $t_3$  为保温被开启时刻,为次日 8:00。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

将试验温室内 6 个空气温度测点、9 个北墙温度测点所测温度的算术平均值作为各个时刻的室内温度和北墙温度,图 3 为晴天和阴天状况下温室的室内温度和北墙温度的测量值与模拟值。通过决定系数  $R^2$  评价试验温室模型的性能,见式(8)。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_m - y_e)^2}{\sum (y_m - \bar{y}_e)^2}, \quad (8)$$

式中: $y_m$  为试验数据; $y_e$  为模拟数据; $\bar{y}_e$  为模拟数据的平均值。

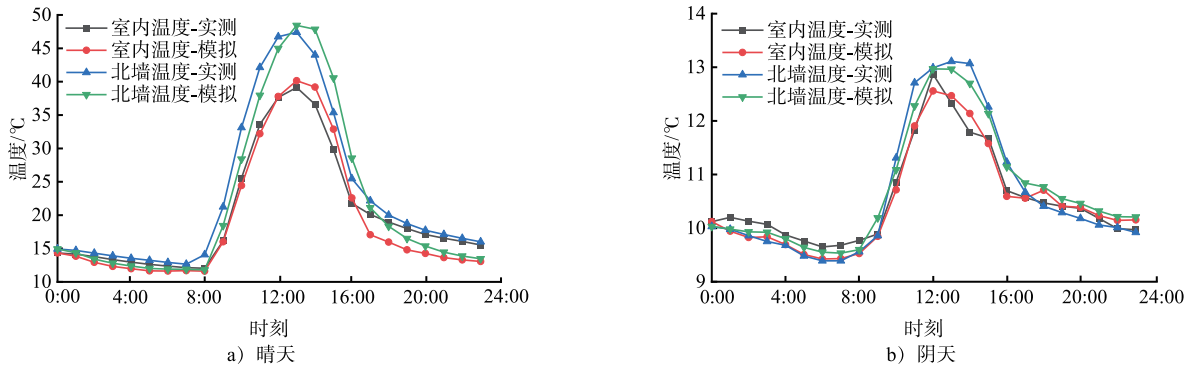


图 3 晴天和阴天室内温度和北墙温度的测量值与模拟值

Fig. 3 Measured and simulated indoor and north wall temperatures on sunny and cloudy days

决定系数表示拟合优度,取值范围为 $[0,1]$ 。 $R^2$  为 0 表示测量值与模拟值完全不匹配, $R^2$  为 1 表示测量值与模拟值完全吻合。本研究中,晴天测量和模拟的室内温度与北墙温度的  $R^2$  分别为 0.95 和 0.95;阴天测量和模拟的室内温度与北墙温度的  $R^2$  分别为 0.95 和 0.96,表明试验温室 TRNSYS 模型具有较高的准确性,可以用于日光温室空气温度和北墙温度输出的建模。

### 2.2 PCM-PE 覆盖方式研究

研究 PCM-PE 添加于试验温室的北屋顶、侧墙、北墙等不同结构内表面的应用效果,提出 4 种模拟方案,见表 2。

表 2 温室不同结构添加 PCM-PE 的试验方案

Tab. 2 Pilot program for the addition of PCM-PE to different structures in greenhouses

试验方案	北屋顶	侧墙	北墙
试验温室	试验屋顶	试验墙体	试验墙体
北屋顶保温	试验屋顶+50 mm PCM-PE	试验墙体	试验墙体
侧墙保温	试验屋顶	试验墙体+50 mm PCM-PE	试验墙体
北墙保温	试验屋顶	试验墙体	试验墙体+50 mm PCM-PE
全覆盖保温	试验屋顶+50 mm PCM-PE	试验墙体+50 mm PCM-PE	试验墙体+50 mm PCM-PE

注:“试验屋顶”、“试验墙体”指试验温室的北屋顶和墙体。



图 4 为 5 种方案的温室在晴天和阴天的室内温度变化情况。由图 4 a)可知,温室不同结构内表面添加 PCM-PE 后室内温度均高于试验温室的室内温度。PCM-PE 添加于北屋顶、侧墙、北墙内表面时,温度依次提升。添加 PCM-PE 后结构的蓄热效果越好,夜间释放到室内的热量越多,室内平均温度越高。不同方案的室内平均温度较试验温室平均温度分别提升了 0.4、1.3、2.4 和 3.9 °C。温室北屋顶的保温能力较低,添加 PCM-PE 后对室内温度影响最小,平均温度最低,为 19.6 °C。温室北屋顶、侧墙、北墙内表面均添加 PCM-PE 时,室内平均温度最高,为 23.1 °C。

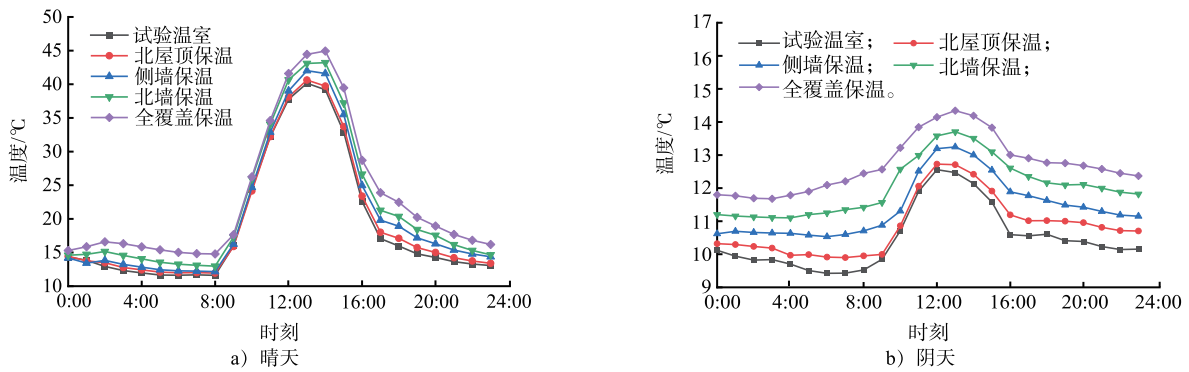


图 4 晴天和阴天不同试验方案温室的室内温度

Fig. 4 Indoor temperatures in greenhouses of different experimental protocols on sunny and cloudy days

由图 4 b)可知,受阴天室外空气温度和太阳辐射量影响,室内温度处于较低水平。北屋顶内表面添加 PCM-PE 的温室温度较低,平均温度为 10.9 °C。全覆盖方案温室的室内温度最高,平均温度为 12.7 °C。不同方案温室的室内平均温度较试验温室平均温度分别提升了 0.4、0.9、1.6 和 2.2 °C。

不同试验方案温室的室内平均温度与试验温室的室内平均温度差值不同,建造成本也不同。为分析不同方案的经济效益,将晴天时不同试验方案的单位成本作为评价指标,见式(9)。

$$W_i = \frac{C_i}{t_i - t_0}, \tag{9}$$

式中: $W_i$  为单位成本,元/°C; $C_i$  为不同方案铺设 PCM-PE 花费的成本,元; $t_i$  为不同方案的室内平均空气温度,°C; $t_0$  为试验温室的室内平均空气温度,°C; $(t_i - t_0)$  为室内平均温度的温升。

图 5 为不同方案温室的温升和单位成本。

1 m<sup>2</sup> 厚度为 50 mm 的 PCM-PE 单价为 40 元。由图 5 可知:北屋顶添加 PCM-PE 的单位成本最高,为 17 739 元/°C,但室内平均温度的温升最低,为 0.44 °C,是温室应用 PCM-PE 最不经济的一种方式;侧墙、北墙和全覆盖方案的 PCM-PE 的面积逐渐增加,增加了温室结构的蓄热能力,其温升依次增大,同时单位成本也依次增加;侧墙添加 PCM-PE 使室内平均温度提升 1.32 °C,单位成本最低,为 2 094 元/°C;北墙和全覆盖方案的温升分别为 2.4 和 3.9 °C,单位成本分别为 4 855 元/°C、5 973 元/°C。温室不同结构添加 PCM-PE 对室内温度的影响程度为北墙>侧墙>北屋顶。在经济成本有限情况下,可优先选用侧墙添加 PCM-PE 的方式改善室内温度。

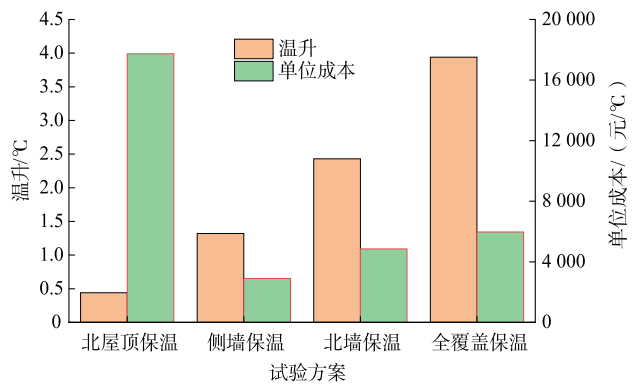


图 5 不同试验方案温室的温升和单位成本

Fig. 5 Temperature rise and unit cost of greenhouses for different pilot program

若不考虑经济成本,全覆盖方式可最大限度提升温室内空气温度。

### 2.3 PCM-PE 最佳厚度研究

为提高温室冬季抵抗低温的能力,确定温室的北屋顶、侧墙、北墙内表面均添加 PCM-PE 时 PCM-PE 的最佳厚度,本文以全覆盖方式模拟分析 PCM-PE 的厚度为 10~90 mm 时温室的室内温度和北墙温度。

图 6 为晴天温室结构内表面添加不同厚度 PCM-PE 的室内温度和北墙温度。由图 6 可知,添加不同厚度 PCM-PE 的温室全天室内温度和北墙温度变化趋势一致,呈正弦分布。PCM-PE 为 90 mm 时室内平均温度和北墙平均温度最高,分别为 26.0 和 28.6 °C。PCM-PE 为 10 mm 时温度最低,室内平均温度和北墙平均温度分别为 19.6 和 22.3 °C。随着 PCM-PE 厚度增加,温室不同结构的蓄热层厚度增加,有效蓄热量随之增加,室内温度和北墙温度随 PCM-PE 厚度增加而增大。PCM-PE 厚度每增加 10 mm,室内平均温度增大 0.53~1.18 °C,北墙平均温度增大 0.64~0.99 °C。

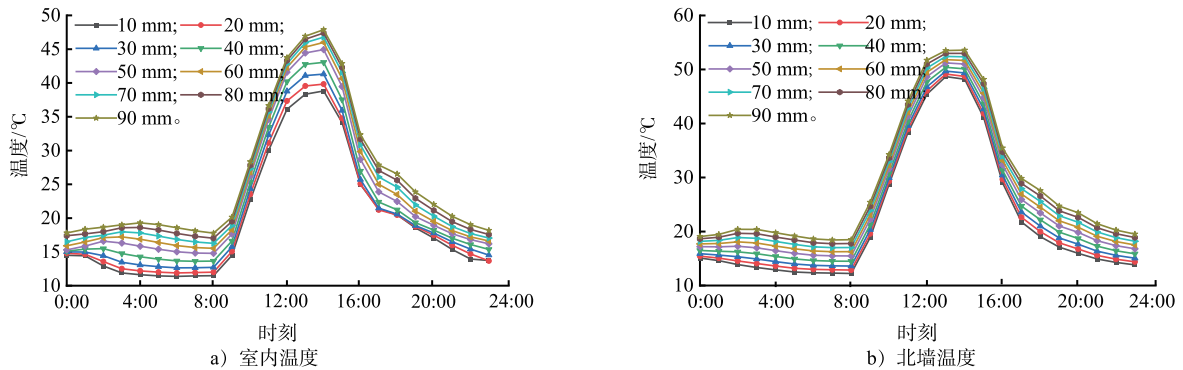


图 6 晴天不同 PCM-PE 厚度温室的室内温度和北墙温度

Fig. 6 Indoor and north wall temperatures of greenhouses with different PCM-PE thicknesses on a sunny day

图 7 为晴天时,PCM-PE 厚度每增加 10 mm,室内平均温度和北墙平均温度的增温图。由图 7 可知,温差先增大后减小,可见通过增加 PCM-PE 厚度来提升室内热环境的做法是有上限的,一味提高温室结构内表面 PCM-PE 的厚度,不仅使温度提升缓慢,同时会增加建造成本。当 PCM-PE 厚度大于 50 mm 时,室内平均温度和北墙平均温度的增幅明显降低,故温室北屋顶、侧墙、北墙添加 PCM-PE 的最佳厚度为 50 mm,其室内和北墙平均温度较试验温室分别提升了 3.9 和 3.7 °C。

图 8 为阴天温室结构内表面添加不同厚度 PCM-PE 的室内温度和北墙温度。由图 8 可知,室温与墙温在一天内均呈现先升高后降低的趋势,于 13:00 左右达到最大值。PCM-PE 为 90 mm 时室内和北墙平均温度最高,分别为 14.6 和 14.9 °C。PCM-PE 为 10 mm 时室内和北墙平均温度最低,分别为 10.6 和 10.9 °C。室内温度和北墙温度随温室内表面 PCM-PE 厚度增加而增大,PCM-PE 厚度每增加 10 mm,室内平均温度增大 0.34~0.66 °C,北墙平均温度增大 0.30~0.78 °C。

图 9 为阴天时,PCM-PE 厚度每增加 10 mm,室内平均温度和北墙平均温度的增温图。室内平均温度和北墙平均温度的增幅均先增大后减小,虽然应用 PCM-PE 可提高室内温度和北墙温度,但盲目增加 PCM-PE 厚度对室内热环境并无帮助。当 PCM-PE 厚度超过 50 mm 后,室内平均温度和北墙平均温度的变化幅度不超过 0.7 °C,故 50 mm 厚度 PCM-PE 全覆盖于温室结构内表面,节省建造成本的同时可对室内温度和北墙温度有较好的提升效果,此时温室的室内和北墙平均温度较试验温室分别提升了 2.2 和 2.3 °C。

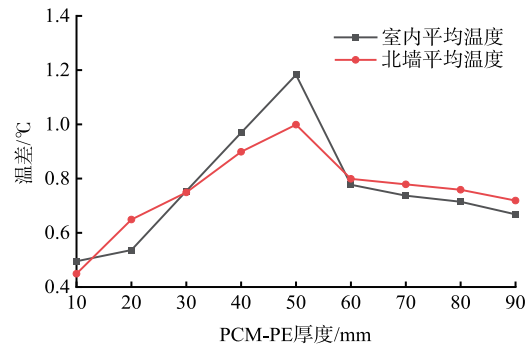


图 7 晴天不同 PCM-PE 厚度温室的室内平均温度和北墙平均温度增温图

Fig. 7 Incremental graphs of mean indoor temperature and mean north wall temperature for greenhouses with different PCM-PE thicknesses on a sunny day

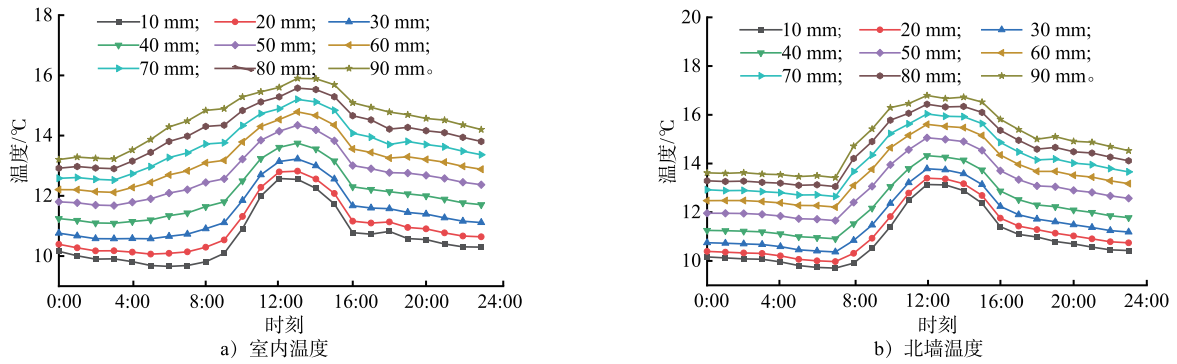


图 8 阴天不同 PCM-PE 厚度温室的室内温度和北墙温度

Fig. 8 Indoor and north wall temperatures of greenhouses with different PCM-PE thicknesses on a cloudy day

表 3 为试验温室和北屋顶、侧墙、北墙内表面均添加 50 mm PCM-PE 温室的北墙日蓄热量、日放热量、传热系数和热阻。PCM-PE 具有优异的储热性能。晴天, 50 mm PCM-PE 温室北墙日蓄热量为  $2.77 \times 10^9$  J, 较试验温室高 0.73%。试验温室和 50 mm PCM-PE 温室的日放热效率分别为 98%、97%, 添加 PCM-PE 后放热效率略低于试验温室, 可能与添加 PCM-PE 后墙体的传热系数减小、热阻增大有关。阴天, 50 mm PCM-PE 温室北墙日蓄热量是试验温室的 84%, 日放热量较试验温室高 31%, 说明阴天时温室北墙日蓄热量较少, 低于实验温室, 主要靠晴天时北墙积蓄的热量维持室内温度。

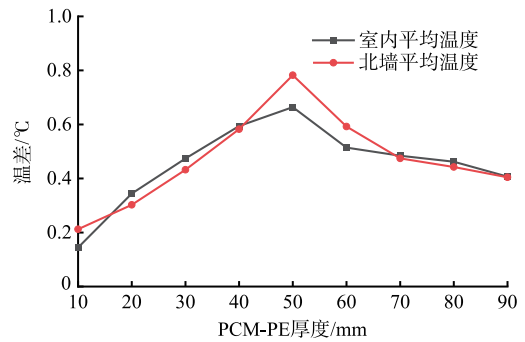


图 9 阴天不同 PCM-PE 厚度温室的室内平均温度和北墙平均温度增温图

Fig. 9 Incremental graphs of mean indoor temperature and mean north wall temperature for greenhouses with different PCM-PE thicknesses on a cloudy day

表 3 北墙日蓄热量、日放热量、传热系数和热阻

Tab. 3 Daily heat storage, daily heat release, heat transfer coefficient and thermal resistance of the north wall

天气	温室类型	日蓄热量 $\times 10^{-9}$ / J	日放热量 $\times 10^{-9}$ / J	传热系数 / (W / (m · K))	热阻 / (m <sup>2</sup> · K / W)
晴天	试验温室	2.75	2.71	0.149	6.55
	50 mm PCM-PE 温室	2.77	2.69	0.126	7.20
阴天	试验温室	2.53	2.46	—	—
	50 mm PCM-PE 温室	2.13	3.23	—	—

试验温室和 50 mm PCM-PE 温室的墙体传热系数分别为 0.149 和 0.126 W / (m · K), 墙体热阻分别为 6.55 和 7.20 m<sup>2</sup> · K / W。添加 PCM-PE 后, 温室墙体的传热系数较试验温室降低了 15%, 热阻较试验温室高 9.9%, 墙体保温性能优于试验温室, 可较好地阻止热量向室外传递, 对维持室内温度、降低温室能耗具有积极作用。

### 3 结 语

采用模拟方法研究了 PCM-PE 应用于装配式复合墙体日光温室的效果及最佳厚度, 主要结论如下。

1) 温室北屋顶、侧墙、北墙等内表面分别添加 PCM-PE 后, 室内温度均高于试验温室的室内温度。温室侧墙添加 PCM-PE 时单位成本最低, 为 2 094 元 / °C。温室北屋顶、侧墙和北墙均添加 PCM-PE 时, 晴天平均温度较试验温室提升 3.9 °C, 单位成本最高, 为 5 973 元 / °C。在经济成本有限情况下, 可优先选用侧墙添



加 PCM-PE 的方式改善室内温度。若不考虑经济成本,全覆盖方式可最大限度提升温室内温度。

2)当温室的北屋顶、侧墙、北墙内表面均添加 PCM-PE 时,晴天和阴天室内温度和北墙温度随 PCM-PE 厚度增加而增加,但当 PCM-PE 厚度大于 50 mm 时,室内平均温度和北墙平均温度的增幅明显降低。从升温效果及经济成本角度考虑,PCM-PE 全覆盖于温室结构内表面的最佳厚度为 50 mm,晴天时室内和北墙平均温度较试验温室分别提升了 3.9、3.7 °C,阴天时分别提升了 2.2、2.3 °C。

3)添加 PCM-PE 后温室墙体传热系数较试验温室降低了 15%,热阻较试验温室高 9.9%,墙体保温性能大大提高。

由于模型的复杂性和试验的局限性,本研究建立的试验温室 TRNSYS 模型未考虑农作物遮光、蒸腾等因素的影响,对 PCM-PE 相关参数的设置存在一定局限性,未来可对所简化处理的内容做更深入的研究。

### 参考文献/References:

- [1] 王超,方慧,张义,等.轻筒柔性墙体装配式日光温室能耗分析[J].农业工程学报,2023,39(3):190-197.  
WANG Chao,FANG Hui,ZHANG Yi,et al. Energy consumption analysis of simply soft insulated wall-assembled Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(3):190-197.
- [2] ZHANG Rui,LIU Yichuan,ZHU Delan,et al. Optimal design for solar greenhouses based on canopy height[J]. Journal of Building Engineering,2022. DOI:10.1016/JJOBE.2022.104473.
- [3] CAO Kai,XU Hongjun,ZHANG Rong,et al. Renewable and sustainable strategies for improving the thermal environment of Chinese solar greenhouses[J]. Energy and Buildings,2019. DOI:10.1016/j.enbuild.2019.109414.
- [4] 陈超.现代日光温室建筑热工设计理论与方法[M].北京:科学出版社,2017.
- [5] 管勇,陈超,李琢,等.相变蓄热墙体对日光温室热环境的改善[J].农业工程学报,2012,28(10):194-201.  
GUAN Yong,CHEN Chao,LI Zhuo,et al. Improving thermal environment in solar greenhouse with phase-change thermal storage wall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(10):194-201.
- [6] 张传坤,魏珉,刘福胜,等.日光温室夜间后墙不同高度放热量差异的理论分析[J].中国农业大学学报,2019,24(7):112-121.  
ZHANG Chuankun,WEI Min,LIU Fusheng,et al. Theoretical analysis on the heat-releasing volume differences of back walls at different heights in solar greenhouse at night[J]. Journal of China Agricultural University,2019,24(7):112-121.
- [7] XIA Tianyang,LI Yiming,WU Xiaoyang,et al. Performance of a new active solar heat storage-release system for Chinese assembled solar greenhouses used in high latitudes and cold regions[J]. Energy Reports,2022,8:784-797.
- [8] 严露露,荆海薇,鲍恩财,等.不同自然通风方式对日光温室性能的影响[J].中国农业大学学报,2020,25(3):71-78.  
YAN Lulu,JING Haiwei,BAO Encai,et al. Effects of different natural ventilation methods on the performance of solar greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University,2020,25(3):71-78.
- [9] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(6):231-237.
- [10] 王晓冬,马彩雯,吴乐天,等.日光温室墙体特性及性能优化研究[J].新疆农业科学,2009,46(5):1016-1021.  
WANG Xiaodong,MA Caiwen,WU Letian,et al. Characteristic research and performance optimization of the solar greenhouse wall[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2009,46(5):1016-1021.
- [11] 周莹,王双喜.复合相变储能保温砂浆在日光温室中的应用效果[J].农业工程学报,2017,33(20):190-196.  
ZHOU Ying,WANG Shuangxi. Application effect of composite phase change energy storage thermal insulation mortar in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(20):190-196.
- [12] 李鹏,张亚红,白青,等.基于日光温室相变材料的梯形墙体热特性分析[J].中国农业气象,2019,40(10):620-629.  
LI Peng,ZHANG Yahong,BAI Qing,et al. Analysis on thermal characteristics of trapezoidal wall based on phase change materials in solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2019,40(10):620-629.
- [13] 张勇,许英杰,陈瑜,等.新型相变材料蓄放热性能测试及在温室内的应用[J].农业工程学报,2021,37(7):218-226.  
ZHANG Yong,XU Yingjie,CHEN Yu,et al. Heat storage and release performance of new phase change material and its application in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(7):218-226.
- [14] LIU Xiao,GAO Hao,SUN Yanyi,et al. Thermal and optical analysis of a passive heat recovery and storage system for greenhouse skin[J]. Procedia Engineering,2016,155:472-478.

- [15] ZHANG Guixiao, XIAO Nan, WANG Bing, et al. Thermal performance of a novel building wall incorporating a dynamic phase change material layer for efficient utilization of passive solar energy[J]. *Construction and Building Materials*, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126017.
- [16] GUAN Yong, CHEN Chao, YAN Quanying, et al. Experimental and modelling analysis of a three-layer wall with phase-change thermal storage in a Chinese solar greenhouse[J]. *Journal of Building Physics*, 2015, 38(6): 548-559.
- [17] 时盼盼, 吕建, 孙于萍, 等. 日光温室相变蓄热墙体最佳组合厚度的模拟研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(2): 496-504.  
SHI Panpan, LYU Jian, SUN Yuping, et al. Simulation study on optimum composite thickness of phase change heat storage wall[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2019, 40(2): 496-504.
- [18] NAJJAR A, HASAN A. Modeling of greenhouse with PCM energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(11): 3338-3342.
- [19] LING Haoshu, CHEN Chao, WEI Shen, et al. Effect of phase change materials on indoor thermal environment under different weather conditions and over a long time[J]. *Applied Energy*, 2015, 140: 329-337.
- [20] 邹平, 姜鲁艳, 凌浩恕, 等. 应用于日光温室墙体的相变材料热物性优化研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(9): 139-147.  
ZOU Ping, JIANG Luyan, LING Haoshu, et al. Study on optimization of thermophysical properties of phase change materials used in solar greenhouse walls[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2022, 43(9): 139-147.
- [21] 李启金, 姜葱葱, 李国忠. 石蜡/膨胀珍珠岩复合相变储能材料的研究[J]. *砖瓦*, 2011(10): 15-17.  
LI Qijin, JIANG Congcong, LI Guozhong. Study on paraffin and expanded perlite composite phase change energy-storage materials[J]. *Brick-tile*, 2011(10): 15-17.