

相变蓄热墙体对日光温室热环境的改善

管勇^{1,2}, 陈超^{1*}, 李琢¹, 韩云全¹, 凌浩恕¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要: 该文以北京市郊区某蔬菜种植基地日光温室为研究对象, 将所研制的新型相变蓄热墙体材料应用于日光温室北墙内表面, 通过提高温室墙体太阳能集热与蓄热能力, 达到提高太阳能热利用效率和改善日光温室热环境的目的。采用 40 mm 厚相变蓄热墙体材料板的试验温室与同尺寸的普通砖墙的对照温室比较, 2010 年 12 月 21 日至 2011 年 1 月 18 日的比较试验结果表明: 草帘开启时段(白天), 前者后墙表面温度平均提高 1~2.7℃, 耕作层(0~20 cm)土壤平均温度提升 0.5℃, 室内环境平均温度提升 0.2~2.1℃; 草帘关闭时段(夜间), 试验温室后墙表面温度平均提高 2.1~4.3℃, 耕作层土壤平均温度提升 0.5~1.4℃, 室内环境平均温度提升 1.6~2.1℃。所研制的相变蓄热墙体材料较好地改善了温室作物生长热环境, 提高了日光温室的太阳能热利用率。

关键词: 温室, 相变材料, 热效果, 蓄热, 墙体, 日光温室

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.10.031

中图分类号: S625.1; TU111.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-10-0194-08

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 (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 194-201. (in Chinese with English abstract)

0 引言

日光温室热环境受室外太阳辐射、室内围护结构热工性能(包括墙体、前坡屋面的覆盖物)、土壤热湿特性等的影响。而其中集蓄热、保温于一体的日光温室墙体, 对日光温室热环境影响尤为重要, 它是日光温室夜间重要的加温热源, 其白天蓄集太阳能的能力越强, 夜间提供给温室内的热量也越多^[1-4]。

反映日光温室墙体热工性能的主要参数有墙体的热阻性与蓄热性。目前日光温室墙体的基本构筑方法有 3 种: 砖墙、土质墙体和复合异质墙体。无论是砖墙、还是土质墙体, 这类建筑材料的热工性能主要体现为热阻性(但其热阻性又远不及聚苯乙烯泡沫板), 而其蓄热性相对都比较弱。通常, 通过增加墙体厚度的方法, 达到提高墙体热阻性和蓄热性的目的, 但其结果往往致使温室墙体过厚(1.5 m 以上, 有的甚至高达 9 m^[5]), 造成土地利用率低、建材用量增加过多^[6]。随着相变蓄热技术不断进步, 可利用相变材料具有较高的蓄热性能, 白天充分吸收并蓄积照射在北墙表面的太阳热能, 夜间再将

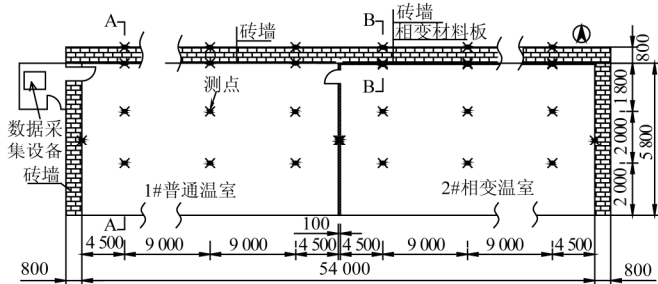
蓄积的热量释放出来, 以改善温室的热环境, 提高温室北墙太阳能利用率、减薄温室墙体厚度、提高土地利用^[7-16]。

本研究在课题组研制的相变蓄热墙体材料的基础上^[14,17], 将所研制的相变蓄热墙体材料板应用于日光温室北墙内侧, 以提高温室北墙的太阳能集热、蓄热能力; 并与原有的普通红砖墙日光温室进行比较试验, 以评估相变蓄热墙体材料板应用于日光温室的可行性。

1 材料与试验方法

1.1 试验对象

供试日光温室位于北京市昌平区小汤山特菜基地。如图 1 所示, 该温室长 54.0 m, 跨度 5.8 m, 北墙高 2.3 m, 脊高 2.9 m; 东、西、北墙均为 0.80 m 厚砖墙; 前坡屋面覆盖薄膜为 0.12 mm 厚的 EVA 长寿无滴薄膜, 夜间保温覆盖物为 35 mm 厚草帘。每天上午 09:00 开启, 下午 17:00 关闭。



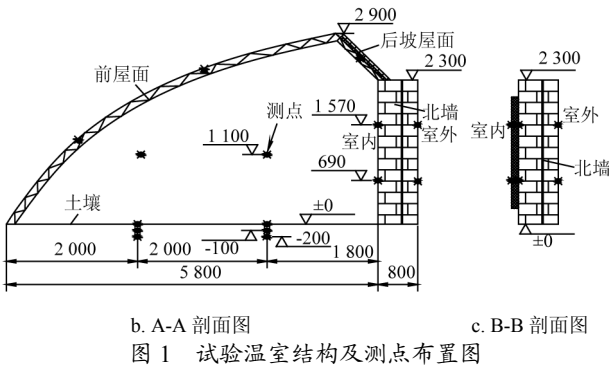
a. 试验温室平面布置图

收稿日期: 2011-10-24 修订日期: 2012-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978002); 北京市自然科学基金资助项目(3102006); 北京工业大学研究生科技基金资助项目(ykj-2011-6061, ykj-2011-6428)

作者简介: 管勇(1976-), 男, 河南淮滨人, 讲师, 博士生, 主要从事相变蓄热技术在设施农业中的应用研究。兰州 兰州交通大学环境与市政工程学院, 730070。Email: guany2004@mail.lzjtu.cn

※通信作者: 陈超(1958-), 女, 湖南长沙人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事相变蓄热技术与可再生能源技术在建筑节能技术中的应用研究。北京 北京工业大学建筑工程学院, 100124。Email: chenchao50@126.com



b. A-A 剖面图 c. B-B 剖面图
图 1 试验温室结构及测点布置图

Fig.1 Sketch of experiment greenhouse structure and test point

为了进行比较研究，将温室沿长度方向等分成 2 个温室区域，分别为 1#普通温室和 2#相变温室，2 个温室区域用 100 mm 厚聚苯乙烯泡沫板分隔（图 1a）。本研究与文献[17]对比表明，相变温室布置位置不同对试验结果影响很小，说明上述 2 试验温室的等热性条件相似。课题组研制的相变蓄热墙体材料板粘贴在 2#相变温室北墙内表面上（图 2），相变蓄热墙体材料板由石蜡、高密度聚乙烯和水泥砂浆材料构成，其主要热工性能参数如表 1。



图 2 2#相变温室施工现场图

Fig.2 Job location of solar greenhouse with phase change materials

表 1 普通砖墙与相变蓄热墙体材料板热工特性比较
Table 1 Thermal performance comparison between conventional brick wall and PCMs(phase change materials) wallboard

墙体类型	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(W·(m·°C) ⁻¹)	比热/(kJ·(kg·°C) ⁻¹)
普通砖墙	0.04	1 800	0.93	1.05
聚苯乙烯泡沫板	0.04	30	0.042	1.38
土质墙体	0.04	2 000	1.16	1.01
相变墙体材料板	0.04	900	0.40	16.24*

注：*该值为新型相变墙体板相变区间平均比热。

1.2 评价方法

根据建筑热过程理论，评价日光温室热环境的热工参数主要有温室围护结构壁表面温度及其蓄热量、耕作层（0~20 cm）土壤温度、以及温室内环境温度等。

1.2.1 围护结构壁面温度

温室围护结构壁面包括北墙、东、西山墙，后坡屋面，前坡屋面以及土壤表面。壁表面温度的变化直接影响温室内环境温度的变化，是温室环境控制的重要参数之一。

1.2.2 墙体蓄热能力

建筑墙体材料的蓄热能力受其比热容、密度等参数

的影响。对于普通建筑墙体材料（例如，红砖、土质墙体）的蓄热量可按式（1）计算^[18]；本课题组研制的新型相变蓄热墙体材料板的蓄热量计算式如式（2）所示。

$$q_{\text{Brick}} = \int_{t_1}^{t_2} C_{\text{Brick}} dt \quad (1)$$

$$q_{\text{PCM}} = \frac{m_{\text{Cer}} \int_{t_1}^{t_2} C_{\text{Cer}} dt + m_{\text{PCM}} \int_{t_1}^{t_2} C_{\text{PCM}} dt}{m_{\text{Cer}} + m_{\text{PCM}}} \quad (2)$$

式中， q_{Brick} 为普通建筑墙体材料单位质量蓄热量，kJ/kg； C_{Brick} 为普通建筑墙体材料比热，kJ/(kg·°C)； q_{PCM} 为相变蓄热墙体材料板单位质量蓄热量，kJ/kg； m_{Cer} 为相变蓄热墙体材料板中普通建筑基体材料的质量，kg； C_{Cer} 为相变蓄热墙体材料板中普通建筑基体材料的比热，kJ/(kg·°C)； m_{PCM} 为相变蓄热墙体材料板中相变材料的质量，kg； C_{PCM} 为相变蓄热墙体材料板中相变材料对应温度下的比热，kJ/(kg·°C)，可根据相变材料的 DSC (differential scanning calorimeter) 曲线得到； t_1, t_2 为材料温度，°C。

1.2.3 耕作层土壤温度

耕作层是指温室内土壤表面至 20 cm 深度之间的土壤层^[19]。耕作层土壤温度对作物的生长发育起决定性作用，直接影响根系的伸长、衰老和对水分、养分的吸收。它不仅是温室栽培作物生育中的一个重要环境条件，也是室温升高的直接热量来源之一。因此，耕作层土壤温度也是温室热环境评价中重要的指标之一。

1.2.4 温室环境温度

温室内作物同时受空气温度和室内各壁面温度的作用，为了综合评价二者对作物的影响，采用温室环境温度作为评价指标，它是指温室内植物周围环境的温度，是温室内各围护结构壁面温度与室内空气温度共同作用的结果，也简称为实感温度。它是温室热环境调控的基本指标，用 T_e 表示（单位：°C），可按式(3)计算^[20]

$$T_e = \frac{2}{3} T_{\text{MRT}} + \frac{1}{3} T_a \quad (3)$$

在工程实际中，围护结构壁面平均辐射温度 T_{MRT} （单位：°C）可近似地用围护结构各壁面温度与相应壁面积的加权平均计算^[21]，如下

$$T_{\text{MRT}} = \frac{A_1 T_1 + A_2 T_2 + \dots + A_n T_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i T_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4)$$

式中， T_a 为温室内实测空气温度，°C； A_i 为温室内围护结构第 i 个壁面面积，m²； T_i 为对应第 i 个壁面的实测温度，°C。

1.3 测点布置与数据采集

试验过程中重点观测 2 个温室北墙壁面温度、空气温度以及土壤温度；测点布置如图 1 所示，共布置温度传感器 90 个（铜-康铜 T 型热电偶），各温度传感器均设置了防太阳辐射处理，所有数据采用 HP34970A 型数据采集仪实时监测，10 min 采集 1 次；同时，还采用便携式移动气象站实时监测太阳辐照度、室外空气温度

和风速等。测试期间为 2010 年 12 月 21 日至 2011 年 1 月 18 日。

2 结果与分析

2.1 室外气象条件

图 3 为测试期间室外空气温度与太阳总辐射照度变化曲线

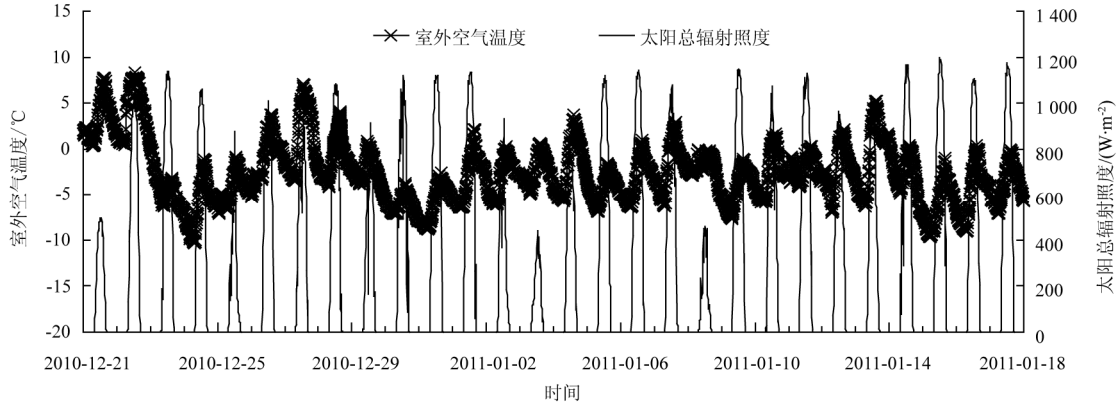


图 3 测试期间室外空气温度与太阳总辐射照度变化曲线

Fig. 3 Changing curves of outdoor air temperature and total solar radiation intensity during test period

2.2 温室北墙热特性

为了比较相变蓄热墙体板对日光温室环境温度的影响，本研究选取冬至日（2010 年 12 月 22 日晴天，见图 4a）、多云天气（2010 年 12 月 25 日，见图 4b）、阴天（2011 年 1 月 8 日，见图 4c）和晴好天气（2011 年 1 月 16 日，见图 4d）4 种典型天气日进行分析。

2.2.1 北墙内壁面温度比较

图 4 分别为 1#普通温室和 2#相变温室北墙内壁面温

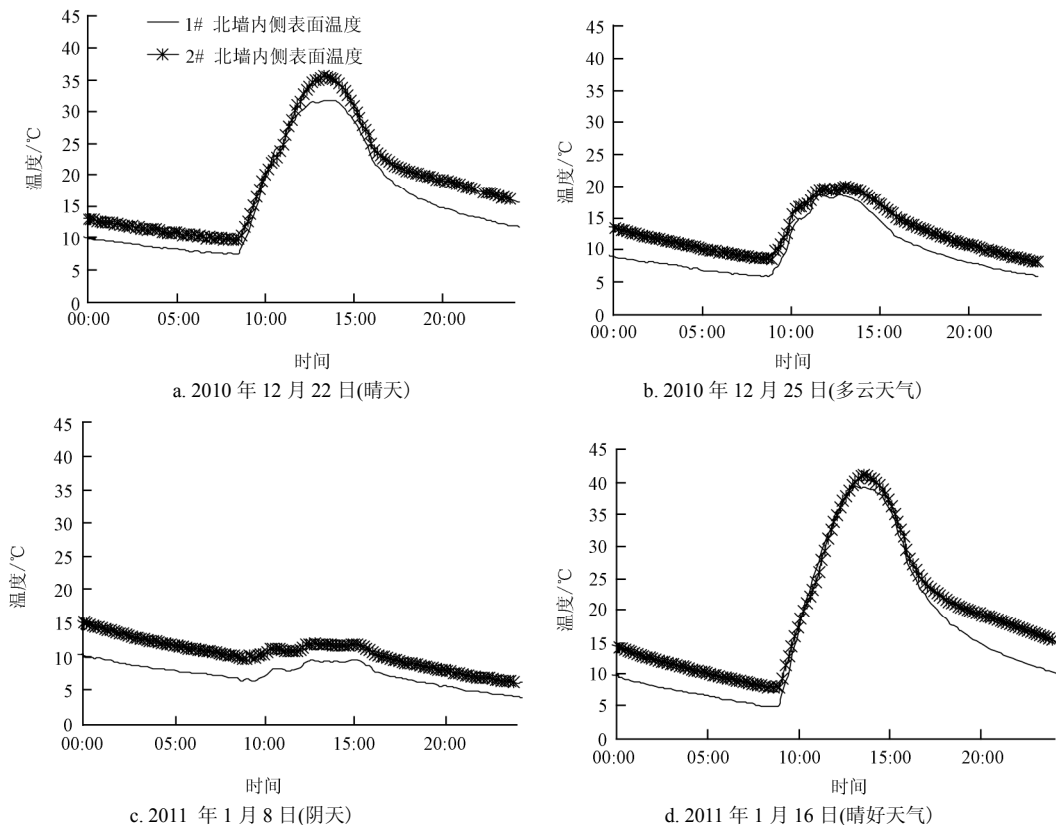


图 4 2 温室北墙内壁面温度变化曲线

Fig.4 Inner surface temperature-time curve of north wall of two solar greenhouses

度变化曲线。由图可知，测试期间以晴天为主，大约占 82%，室外空气在-10.4℃至 8.4℃之间变化，平均气温约为-2.3℃；晴好天气正午太阳总辐射最大达到 1 197 W/m²；阴天太阳辐射峰值不超过 480 W/m²，其它天气的太阳总辐照度都高于 600 W/m²。晴天日光照时间从上午 9:00 至 15:30，光照时间达到 6.5 h，光照时间长，有利于日光温室冬季越冬种植。

度变化曲线。由图可知，白天，受太阳辐射影响，2 温室北墙内壁面温度均呈现同样的变化规律，即随太阳辐射照度的增大，壁面温度快速上升直到达到最高；然后随太阳辐射照度减小，墙壁面温度逐渐降低；所不同的是，2#相变温室北墙受相变蓄热墙体板蓄热的影响，中午以后随着太阳辐射照度的减小，墙壁面温度的下降速率明显低于 1#普通温室；夜间，2#相变温室北墙内壁面温度则始终高于 1#普通温室。

冬至日（2010 年 12 月 22 日，如图 4a），上午 09:00 保温草帘开启，受太阳辐射的影响北墙内壁面温度快速上升，1#普通温室和 2#相变温室均在 14:00 左右达到最高值，分别为 31.8 和 35.0℃；随后壁面温度逐渐下降，此阶段 2 个温室北墙内壁面温度出现差异，并不断加大，到 17:00 保温草帘关闭时，1#普通温室和 2#相变温室北墙内壁面温度分别为 18.9 和 21.8℃，白天 2#相变温室壁面平均温度较 1#普通温室约高 2.0℃。保温草帘关闭期间（17:00 至次日 09:00），受墙体蓄热的影响，2#相变温室的温降速率明显慢于 1#普通温室，2#相变温室北墙内壁面温度始终高于 1#普通温室，夜间 2#相变温室壁面平均温度较后者高 3.6℃。17:00 至 19:00 时段，2#相变温室比 1#普通温室约高 3.4℃；19:00 至次日 7:30 时段，后者始终比前者约高 3.8℃；次日 07:30 至 09:00 时段，两者温度差略有减小，约为 2.8℃；并在 8:30 时，2 个温室壁面温度都处于全天温度最低点，分别为 10.3 和 7.3℃。晴好、阴天和多云天气也呈类似变化规律，白天草帘开启时段，2#相变温室壁面平均温度分别比 1#普通温室高 2.1、2.7 和 1℃；夜间草帘关闭时段，前者比后者分别高 2.2、2.1 和 4.3℃。

2.2.2 墙体蓄放热性能比较

图 5 为本课题组研制相变蓄热墙体材料与普通建筑材料的蓄热性能比较示意图。普通建筑材料为显热蓄热特征，其蓄热量随着温度不断升高呈线性增加；而相变蓄热墙体材料则主要为潜热蓄热特征，相变材料处于相变温度区间时，可在恒温或近似恒温条件下蓄存和释放大量相变潜热量（对于同质量的材料，该值约是普通建筑材料的 15.5 倍），约占总蓄热量的 80%以上；非相变区间，相变材料的蓄热特基本同与普通建筑材料。

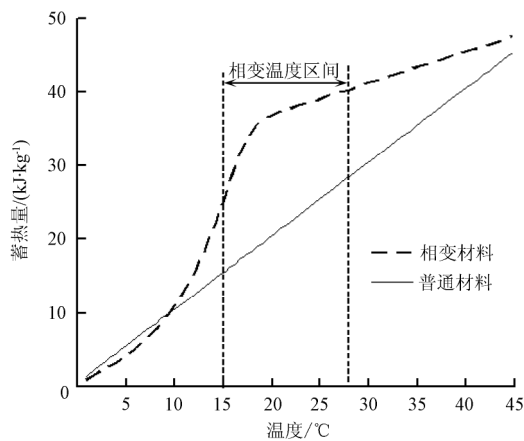
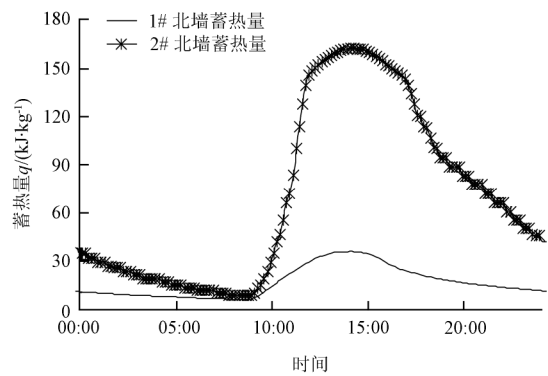


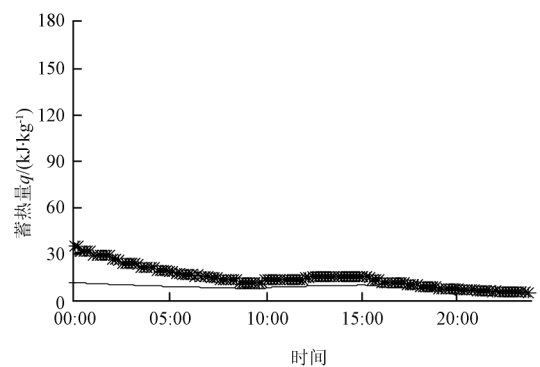
图 5 相变蓄热墙体材料与普通建筑材料的蓄热性能比较
Fig.5 Comparison of thermal storage performance between PCM and conventional building material

图 6 是依据式（1）和式（2）分析得到的 2 个温室北墙蓄热量随时间变化曲线。以晴好天气日（2011 年 1 月 16 日）为例，如图 6a 所示，草帘开启时（09:00），由于前一夜的放热，1#普通温室和 2#相变温室墙体蓄热量都处于较低值，但 2#相变温室墙体蓄热量大于 1#普通温室，分别为 9.8 和 6.7 kJ/kg。随着太阳辐照度不断增大，

2 个温室北墙的蓄热量虽然都在 13:30 前后达到最大值，但以显热蓄热为特征的 1#普通温室北墙的蓄热量（13:45 时 35.6 kJ/kg）明显低于以潜热蓄热为主要特征的 2#相变温室北墙的（14:15 时 162.6 kJ/kg），相变蓄热墙体材料板的太阳能蓄热能力约是普通砖墙的 4.6 倍。随着下午太阳辐射照度不断减小，2 个温室墙体的蓄热量因向温室内、外释放热量而持续下降趋势，直到次日上午 09:00 达到最低。草帘关闭期间（17:00 到次日 09:00），1#普通温室和 2#相变温室北墙累计向温室内释放的太阳热能分别为 16.4 和 129.5 kJ/kg，后者约为前者的 8 倍。即使是阴天（2011 年 1 月 8 日），如图 6b，2#相变温室北墙集蓄太阳散射辐射热的能力也优于 1#普通温室，上午 09:00 保温草帘开启时，1#普通温室和 2#相变温室北墙蓄热量分别为 7.3 和 11.4 kJ/kg；13:30 的蓄热量分别为 9.4 和 14.9 kJ/kg；在保温草帘关闭期间（17:00 至次日 09:00），1#普通温室与 2#相变温室墙体累计向温室内释放的热量分别为 5.1 和 8.1 kJ/kg。



a. 2011 年 1 月 16 日(晴好天气)



b. 2011 年 1 月 8 日(阴天)

图 6 两温室北墙蓄热量随时间变化曲线

Fig.6 Different materials heat storage-time curve of north wall of two solar greenhouses

上述试验结果表明，所研制的相变蓄热墙体材料对提高日光温室太阳能利用率以及日光温室热环境的改善都起到积极有效作用。

另外，材料的蓄放热能力大小是材料的固有属性，在外界条件和材料热物性不变时，材料的蓄放热能力不变，但材料的热物性不同会使蓄放热速率产生差异，达到最大蓄热量时的时间会有差异。

2.2.3 植株遮挡的影响

1#、2#温室均种植了同品种的番茄，采用起埂双行种植方式。埂高 0.15 m，大行距 0.7 m，小行距 0.6 m，株距 0.3 m，植物距北墙内壁面 0.7 m，实测期间番茄株高平均达到 1.5 m 左右。受株高的影响，北墙内壁面温度沿高度方向的温度分布明显不均匀、出现上高下低的现象。这种遮挡作用明显影响北墙的蓄热能力。

图 7 为 2#相变温室北墙相变蓄热墙体板壁面上、下部测点（图 1c）温度随时间变化曲线。由图 7 可知，2011 年 1 月 16 日之前，受植株遮挡的影响，上部测点的温度明显高于下部测点的，如晴天（图 7a）中午前后最大温差达到 11℃，夜间上部温度高于下部 1~2℃；多云和阴天天气（图

7b、c）也有相似规律，只是因白天室外太阳辐射照度减弱，上部与下部材料的蓄热量差异减小，使其温差减小。从 1 月 16 日开始，因改种小油菜，植株遮挡影响消除，北墙内壁面上、下位置测点温度几乎无差异（图 7d）。

2.3 耕作层土壤温度

图 8 为 2 温室耕作层不同深度（表面、10 和 20 cm）土壤温度随时间的变化曲线。由图 8 可知，受太阳辐射影响，2 温室内耕作层不同深度土壤温度波动幅度均随土壤深度的增加而逐渐减弱。考虑土壤温度受其热湿传递过程的影响，重点以相变蓄热墙体材料对土壤热影响趋于稳定后的晴天（2011 年 1 月 7 日）和阴天（2011 年 1 月 8 日）作为典型日进行分析。

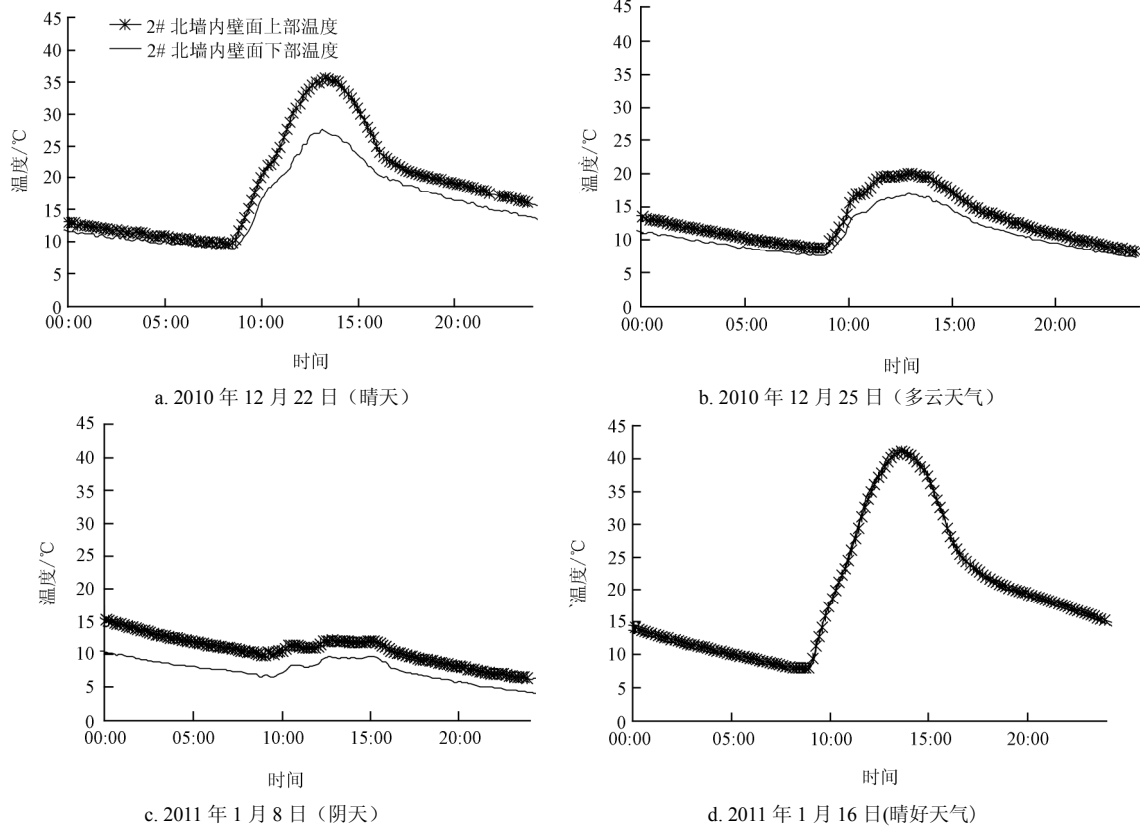


图 7 2#相变温室北墙内壁面上、下测点温度变化曲线

Fig.7 Inner surface temperature-time curve of PCMs wallboard under different position in PCM greenhouse

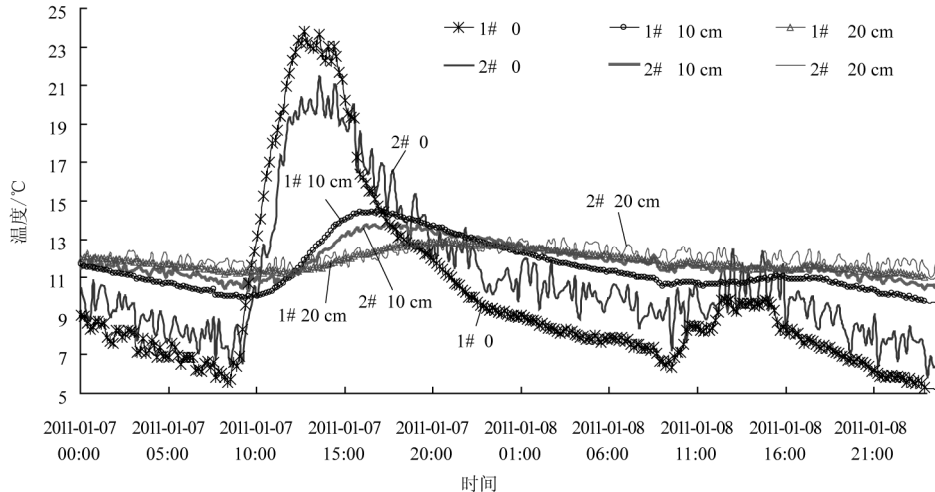


图 8 2 温室耕作层不同深度土壤温度变化曲线

Fig.8 Soil temperature-time curve of plow layer under different depth in two solar greenhouses

晴天(2011年1月7日)在9:00前后,2个温室土壤表面温度都达到最低,1#温室与2#温室分别为5.7和6.1℃,而在13:30左右都达到最大值,分别为23.6和21.2℃。白天,1#普通温室耕作层表面平均温度较2#相变温室高2.1℃,达到18.4℃;保温草帘关闭期间(17:00至次日09:00),由于相变蓄热墙体材料良好的蓄放热能力,2#相变温室土壤表面平均温度较1#普通温室高1.6℃,达到11.1℃;同样,耕作层10和20cm深度处,2#相变温室的耕作层日平均温度较1#普通温室约高0.5℃。阴天(2011年1月8日),2#相变温室耕作层土壤表面、10和20cm深度处日平均温度依次较1#普通温室约高1.4、0.6和0.5℃,2#相变温室耕作层土壤温度的提高,为作物的正常生长提供了重要的温度条件。

2.4 温室环境温度

图9是根据式(3)得到的2个温室环境温度变化曲线。由于环境温度受温室周围壁面和土壤表面辐射温度及空气温度共同作用,同样选取晴天(2011年1月7日)和阴天(2011年1月8日)作为典型日进行分析。

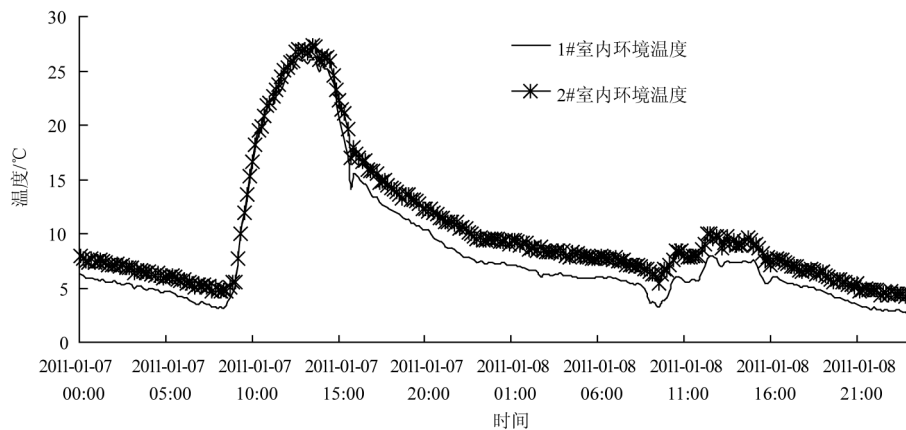


图9 2温室室内环境温度变化曲线

Fig.9 Indoor ambient temperature-time curve in two solar greenhouses

从分析可以看出,相变墙体材料板加入到温室后墙后,能提高环境温度的整体水平,并能减小室内环境温度的变化幅度,特别是草帘关闭时环境温度平均可提高1.6~2.1℃。这充分表明,相变蓄热墙体材料板能够改善温室内环境温度。

3 结论与讨论

通过对北京地区日光温现场试验测试对比分析,可以得出以下结论:

1) 北京地区冬季太阳辐射照度大,光照时间长,为相变技术在日光温室的应用提供了先决条件。

2) 在日光温室北墙内表面采用40mm厚的相变蓄热墙体材料板后,在不同天气条件下,草帘开启时段,可使后墙表面温度平均提高1~2.7℃,耕作层内10~20cm土壤温度平均提升0.5℃,室内环境平均温度提升0.2~2.1℃;草帘关闭时段,使后墙表面温度平均提高2.1~4.3℃,耕作层(0~20cm)土壤温度平均提升0.5~1.4℃,室内环境温度平均提高1.6~2.1℃。

3) 相变蓄热墙材料的蓄、放热性能显著优于普通砖

晴天(2011年1月7日)在08:00前后,2个温室环境温度都达到最低,1#温室与2#温室分别为3.2和4.8℃;上午09:00保温草帘开启,受太阳辐照和围护结构壁面辐射换热的影响温室环境快速上升,1#普通温室与2#相变温室在14:00时前后均达到最高值,分别为26.4和25.6℃;随后环境温度逐渐下降,并且2个温室环境温度出现差异并不断加大,到17:00保温草帘关闭时,1#普通温室和2#相变温室环境温度分别为13.4和15.8℃。白天,2#相变温室环境平均温度较1#普通温室高0.2℃。保温草帘关闭期间(17:00至次日09:00),受温室内壁面辐射温度和空气温度的影响,2#相变温室的环境降温速率明显慢于1#普通温室,2#相变温室环境温度始终高于1#普通温室,夜间,2#相变温室环境平均温度较后者约高2.1℃。即使是阴天(2011年1月8日),2#相变温室环境温度也始终高于1#普通温室,白天(草帘开启时段),2#相变温室环境平均温度比1#普通温室约高2.1℃;夜间(草帘关闭时段)前者也较后者约高1.6℃。

墙材料,在晴天时,前者的蓄放热量是后者的4.6~8倍。相变蓄热材料依靠良好的蓄放热特性,以减缓室内环境温度的变化,特别是提高室内夜间温度,改善温室种植条件。

相变蓄热技术引入日光温室后,改善了日光温室墙体的蓄热保温性能,相变材料良好的蓄放热特性,能减缓温室内环境温度的变化幅度,提高了太阳能利用效率,适宜于在日光温室中应用。相变蓄热技术有其自身优势,但对相变技术在日光温室推广应用方面,仍有很多工作有待完善,如不同地区相变材料最佳相变温度区间的确定、不同类型温室相变蓄热材料层最佳厚度与最佳铺设面积的确定以及如何减小植株遮光以达到最佳投入产出比等工作仍待于进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 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 (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 231—237. (in Chinese with English abstract)
- [2] 佟国红, Christopher D M. 墙体材料对日光温室温度环境影响的 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 153—157.
Tong Guohong, Christopher D M. Simulation of temperature variations for various wall materials in Chinese solar greenhouses using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 153—157. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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. (in Chinese with English abstract)
- [4] Bai Yikui, Liu Wenhe, Wang Tieliang, et al. Experimental research on environment and heat preservation effect of solar greenhouse: Type Liaoshen I [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(5): 191—196.
- [5] 蒋程瑶, 程燕飞, 徐文勇, 等. 山东省日光温室建设使用情况调查[J]. 农机化研究, 2011, (7): 28—33.
Jiang Chengyao, Cheng Yanfei, Xu Wenyong, et al. Investigation of the construction and operation of solar greenhouse in Shandong province[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, (7): 28—33. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周长吉, 刘晨霞. 提高日光温室土地利用的方法评析[J]. 中国果菜, 2009, (5): 16—20
Zhou Changji, Liu Chenxia. Analysis on the methods of improving land utilization in solar greenhouse[J]. China Fruit and Vegetable, 2009, (5): 16—20. (in Chinese with English abstract)
- [7] Berroug F, Lakhel E K, Elomaria M, et al. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(11): —3035.
- [8] 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.
- [9] Kumari N, Tiwarin G N, Sodha M S. Effect of phase change material on passive thermal heating of a greenhouse[J]. International Journal of Energy Research, 2006, 30(4): 221—236.
- [10] Santamouris M, Balaras C A, 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.
- [11] Santamouris M, Argiriou A, Vallindras M. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse[J]. Solar Energy, 1994, 52(5): 371—378.
- [12] 王宏丽, 李晓野, 邹志荣. 相变蓄热砌块墙体在日光温室中的应用效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 253—257.
Wang Hongli, Li Xiaoye, Zou Zhirong. Application of brick wall with phase change rice husk in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 253—257. (in Chinese with English abstract).
- [13] 张勇, 邹志荣, 李建明, 等. 日光温室相变空心砌块的制备及功效[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 263—267.
Zhang Yong, Zou Zhirong, Li Jianming, et al. Preparation of the small concrete hollow block with PCM and its efficacy in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 263—267. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈超, 果海凤, 周玮. 相变墙体材料在温室大棚中的实验研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(3): 287—293.
Chen Chao, Guo Haifeng, Zhou Wei. Experimental research of the composite phase change material in greenhouse[J]. ACTA Energiae Slaris Sinica, 2009, 30(3): 287—293. (in Chinese with English abstract)
- [15] Tong G, Christopher DM, Li B. Numerical modeling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 129—139.
- [16] 杨建军, 邹志荣, 张智, 等. 西北地区日光温室土墙厚度及其保温性的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 180—185.
Yang Jianjun, Zou Zhirong, Zhang Zhi, et al. Optimization of earth wall thickness and thermal insulation property of solar greenhouse in Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 180—185. (in Chinese with English abstract)
- [17] 薛亚宁, 陈超, 李清清, 等. 复合相变蓄热墙体材料应用于日光温室的效果研究[J]. 北方园艺, 2010, (15): 6—11.
Xue Yaning, Chen Chao, Li Qingqing, et al. Experimental results of the PCM wallboard material applied in the solar greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2010, (15): 6—11. (in Chinese with English abstract)
- [18] 黄金, 张仁元. 无机盐/陶瓷基复合相变蓄热材料的研究[J]. 材料导报, 2005, 19(8): 106—108.
Huang Jin, Zhang Renyuan. Research progress of salt/ceramic composite energy storage materials[J]. Materials Review, 2005, 19(8): 106—108. (in Chinese with English abstract)
- [19] 凌云昕, 王丕生. 塑料日光温室蔬菜栽培技术[M]. 河北: 河北科学技术出版社, 1988: 47—50.
- [20] 钟阳和, 施生锦, 黄彬香. 农业小气候学[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 155—167.

[21] Fanger P O. Thermal comfort [M].Copenhagen: Danish

Technical Press, 1970.

Improving thermal environment in solar greenhouse with phase-change thermal storage wall

Guan Yong^{1,2}, Chen Chao^{1*}, Li Zhuo¹, Han Yunquan¹, Ling Haoshu¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, 730070, China)

Abstract: In this paper, the two solar greenhouses with the same sizes of a vegetable planting base located in Beijing were researched, and one was taken as test greenhouse, the other reference greenhouse. The phase change materials (PCMs) was applied on the inner surface of the test greenhouse's north wall in order to enhance the wall's ability to collect and store solar energy and increase the utilization rate of solar energy, and then improve the indoor thermal environment of the greenhouse. According to the measured data from Dec. 21, 2010 to Jan. 18, 2011, the results showed that the thermal performance of the test greenhouse with 40 mm thickness PCMs was better than that of the reference greenhouse with conventional brick materials. During the opening of the heat preservation quilt in the daytime, the inner surface average temperature of the north wall of the test greenhouse was about 1-2.7°C higher than that of the reference greenhouse, the soil average temperature of the plow layer and the average indoor ambient temperature of the test greenhouse were about 0.5°C and 0.2-2.1°C higher than that of the reference greenhouse, respectively. During the closing of the heat preservation quilt at night, the inner surface average temperature of the north wall, the soil average temperature of the plow layer and the average indoor ambient temperature of the test greenhouse were about 2.1-4.3°C, 0.5-1.4°C and 1.6-2.1°C higher than that of the reference greenhouse, respectively. So the PCMs can improve the thermal environment for crop growth and increase the utilization rate of solar energy in solar greenhouse.

Key words: greenhouses, phase change materials, thermal effects, heat storage, walls, solar greenhouses