

武国峰, 黄红英, 孙恩惠, 等. 不同墙体材料日光温室的保温性能[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(2): 441-448.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.02.034

不同墙体材料日光温室的保温性能

武国峰¹, 黄红英¹, 孙恩惠¹, 徐跃定¹, 陈福恒², 常志州¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心, 江苏 南京 210014; 2. 宿迁市宿城区嘉南蔬菜专业合作社, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 为明确秸秆块墙体日光温室和土墙体日光温室的保温性能, 本文以秸秆块墙体日光温室和土墙体日光温室为研究对象, 分析了两种墙体结构温室中墙体温度、土壤温度、室内空气温度分布以及晴天和阴天时空气温度变化。结果显示, 厚度 0.6 m 的秸秆块墙体日光温室与平均墙厚 4.0 m 土墙体日光温室相比, 晴天时温室内空气温度和土壤温度差异不显著, 清晨和阴天时秸秆块墙体温室内空气温度略低; 秸秆块墙体内侧变温层厚度为 15 cm, 土墙体内侧变温层厚度为 45 cm; 秸秆块墙体日光温室中 40 cm 以内土壤层温度 $[(15.4 \pm 1.0) ^\circ\text{C}]$ 与土墙体日光温室 $[(16.1 \pm 2.0) ^\circ\text{C}]$ 无显著差异 ($P > 0.05$); 夜间秸秆块墙体日光温室空气温度低于土墙体日光温室空气温度 ($P < 0.05$), 白天两者差异不显著 ($P > 0.05$); 试验期间, 两种墙体结构日光温室中空气温度最低为 8.2 $^\circ\text{C}$, 能满足常规蔬菜反季节栽培对设施保温性能的要求。

关键词: 日光温室; 秸秆块墙体; 土墙体; 温度分布; 保温性能

中图分类号: S625.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)02-0441-08

Thermal insulation performances of straw bale wall and soil wall in greenhouse

WU Guo-feng¹, HUANG Hong-ying¹, SUN En-hui¹, XU Yue-ding¹, CHEN Fu-heng², CHANG Zhi-zhou¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science/Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China; 2. Jianan Vegetables Professional Cooperatives of Sucheng District, Suqian 223800, China)

Abstract: Two kinds of solar greenhouses, one with straw-bale wall and another with soil wall, were studies to compare the thermal insulation of both greenhouses. The greenhouse with 0.6-m-thick straw-bale wall had close air and soil temperatures to those in the greenhouse with a 4.0-m-thick soil wall in sunny days, while the air temperature in straw-bale wall greenhouse was a little lower than that in soil wall greenhouse in cloudy days. The metalimnion inside north wall was only 15 cm for straw-bale wall, while it was 45 cm for soil wall. The soil temperatures 40 cm below ground were $(15.4 \pm$

$1.0) ^\circ\text{C}$ for straw-bale wall and $(16.1 \pm 2.0) ^\circ\text{C}$ for soil wall greenhouse; the difference was not significant ($P > 0.05$). The average air temperature in the two greenhouse also had no significant difference at day time, but was a slightly lower than that in soil wall greenhouse at night ($P < 0.05$). The lowest air temperature in the experiment was 8.2 $^\circ\text{C}$ for the two kinds of greenhouse, which can satisfy

收稿日期: 2014-07-08

基金项目: 江苏省农业自主创新基金项目 [CX(12)1002-3]; 江苏省农业三新工程项目 [SXGC(2013)378]

作者简介: 武国峰 (1983-), 男, 河北衡水人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。(E-mail) wu_guofeng@sina.cn

通讯作者: 常志州, (E-mail) czhizhou@hotmail.com

the growth of anti-season vegetables.

Key words: Solar greenhouse; straw-bale wall; soil wall; temperature distribution; heat conservation

在中国北方地区,土墙体日光温室因其具有良好的保温蓄热性能而被广泛应用,土墙体日光温室建造时一般采取下挖地面以获取构筑墙体的土质,造成了耕作层的极大破坏,同时还存在墙体占地面积大,土地利用率低等问题^[1]。空心砖、红砖及其复合墙体也有研究和应用,但存在建造成本高且保温效果不佳的问题。学者们采取各种方式如填充保温材料^[2]、采用相变蓄热材料^[3]、蓄水池^[4]、内置式集热调温装置^[5]、燃池-地中热交换系统^[6]、太阳能温室增温系统^[7]等结构,以达到增加日光温室抵御低温的目的,上述措施一定程度上提高了日光温室的保温蓄热性能,但因各种因素尚未大面积推广应用。

农作物秸秆质轻多孔,封闭型节间空腔存在大量不流动的空气,是一种天然绝热材料,具备良好的保温隔热性能^[8-10]。研究发现,聚苯乙烯泡沫板的导热系数为 $0.042 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[3],普通砖墙的导热系数为 $0.93 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,夯实土墙体导热系数为 $0.60 \sim 1.00 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[11],而秸秆块导热系数仅为 $0.051 \sim 0.117 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[8]。秸秆块是由秸秆经机械压实后捆扎而成的草块,材料比较密实,孔隙较小,发生对流换热的效应较小。因此,理论上秸秆块是一种潜在的日光温室的墙体保温材料。

本研究以秸秆块墙体日光温室和土墙体日光温室为研究对象,分析 2 种日光温室中墙体温度、土壤温度和室内空气温度分布,以及典型气候条件下温室内空气温度的变化,讨论了 2 种温室的保温效果,以为构建秸秆块墙体日光温室提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验对象

供试秸秆块墙体日光温室位于江苏省宿迁市宿城区农业园区,建造于 2013 年 9 月。该温室无下沉,长 96.0 m,跨度 11.0 m,北墙高 3.0 m,脊高 3.5 m,山墙和北墙均为 0.6 m 厚秸秆块墙体,山墙和北墙底部为水泥基础,前坡屋面覆盖薄膜为 0.12 mm 厚 EVA 无滴薄膜,保温被为双面防水保温被,每天 9:00 开启,16:00 关闭。后屋面由薄膜、草帘、保温被、无纺布构成。

供试土墙体日光温室位置同上,建造于 2009 年 6 月。土墙体日光温室下沉 0.3 m,长 96.0 m,跨度 11.0 m,北墙高 3.5 m,脊高 4.0 m,山墙和北墙基部宽 6.0 m,顶部宽 2.0 m,平均厚度为 4.0 m,其余结构同秸秆块墙体日光温室。

为了保证对比效果,两种温室内均种植了黄瓜,定植时间、放风、灌溉以及施肥等农艺措施一致,测试温度期间关闭放风口。两温室相邻,各有一套卷帘机,揭盖保温被时间基本保持一致。

1.2 试验方法

1.2.1 日光温室北墙墙体温度测试 在秸秆块墙体和土墙体日光温室北墙各布置 45 个测试点,东西方向为日光温室长度的 $1/4$ 、 $1/2$ 和 $3/4$ 处,垂直方向为距离地面 0.5 m、1.5 m、2.5 m 处,墙体厚度方向分别采取距离墙体内表面 0 cm、15 cm、30 cm、45 cm、60 cm 的位置,具体如图 1 所示。

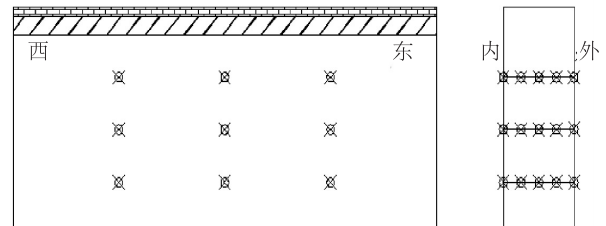


图 1 日光温室墙体温度测试点分布图

Fig. 1 Temperature point of north wall in solar greenhouse

1.2.2 日光温室土壤温度测试 在秸秆块墙体日光温室和土墙体日光温室土壤中各布置 52 个测试点,东西方向为日光温室长度的 $1/4$ 、 $1/2$ 和 $3/4$ 处,前屋面室外延伸布置 3 点,距离前屋面前沿 0.1 m、0.5 m 和 1.0 m,北墙室外延伸布置 3 点,距离北墙外面 0.1 m、0.5 m、1.0 m,日光温室内部于屋脊地面投影线至前屋面拱架地脚线间横向均匀分布 7 个测试点,土壤深度方向分别采取距离土壤表面 0 cm、10 cm、20 cm、40 cm 的位置,具体如图 2 所示。土壤温度分布三维图中以土壤深度为 x 轴,以日光温室跨度为 y 轴,温度为 z 轴,且以顶高处表面的土壤测点为 x 轴与 y 轴的原点。

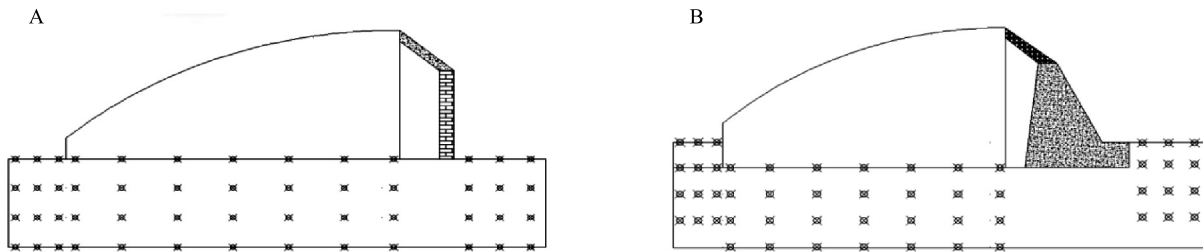


图2 秸秆块墙体(A)和土墙体(B)日光温室中土壤温度测试点分布

Fig.2 Soil temperature point in straw-bale (A) and soil wall (B) in solar greenhouse

1.2.3 日光温室内空气温度测试 在秸秆块墙体和土墙体日光温室土壤中各布置38个测试点,东西方向为日光温室长度的1/4,1/2和3/4处,跨度方向分别位于0 m,2 m,4 m,6 m,8 m和10 m的位置,相应的跨度位置在垂直方向均匀布置3个、4个、5

个、5个和6个测试点。北墙内表面均匀布置5个测试点,外表面均匀布置5个测试点,具体如图3所示。气温分布三维图中以日光温室高度为x轴,以日光温室跨度为y轴,温度为z轴,后墙外侧地表测试点为x轴与y轴原点。

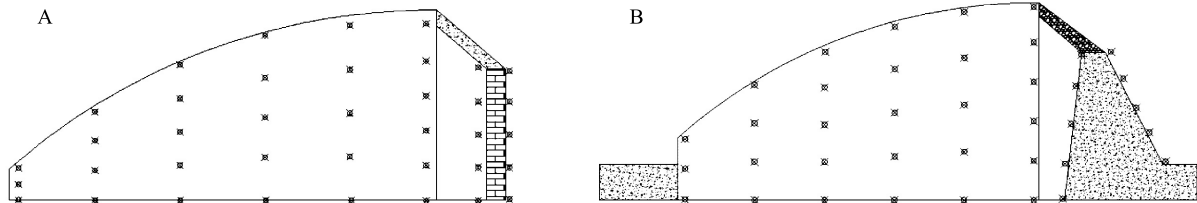


图3 秸秆块墙体(A)和土墙体(B)日光温室中空气温度测试点分布

Fig.3 Air temperature point of soil in straw-bale (A) and soil wall (B) in solar greenhouse

1.2.4 晴天和阴天时温室内空气温度测试 在秸秆块墙体日光温室和土墙体日光温室长度方向的1/4,1/2和3/4处,跨度方向的1/2处,高度方向为距离地面1.5 m处,各布置空气温度测试点1个,用于晴天和阴天时温室内空气温度的连续监测。

1.3 试验时间

苏北地区1月份和2月份一般为全年温度较低时期。墙体温度测定时间为2014年2月19日7:00至20日7:00,土壤温度测定时间为2014年2月19日上午7:00,空气温度测定时间为2014年2月19日7:00和14:00。晴天(2014年1月5日)和阴天(2014年1月9日)连续测定时间间隔为2 h。

1.4 测试仪器

墙体、土壤和空气温度测定采用水银式温度计,测试之前将水银温度计预埋到位,待温度显示稳定后迅速读取温度值。晴天和阴天时温度连续监测采

用温度自动记录仪(MRHO-WSZ,河北奥尔诺电子科技有限公司生产)。

2 结果与分析

2.1 日光温室墙体温度

墙体温度变化不仅反映了墙体的保温性能,还是墙体材料吸热和放热的表现反应。秸秆块墙体与土墙体的温度变化如图4所示。由图4A可以看出,秸秆块墙体因受太阳光辐射作用,墙体内表面在12:00时温度最高,达到42℃,温度最低点7℃出现在次日清晨6:00,昼夜温差达35℃。自墙体内表面向外15 cm、30 cm、45 cm及60 cm(即外表面)处,日间最高温分别为3℃、2℃、0℃和-3℃,次日清晨最低温度分别为2.5℃、1.5℃、-0.5℃和-6℃,昼夜温差为0.5℃、0.5℃、0.5℃和3℃,由秸秆块墙体温差变化小可知其具有很好的保温性能,

温室内部的热量不易通过墙体向室外释放。由图 4B 可以看出,土墙体日间内表面的最高温度出现在 13:00,达到 34℃,最低温度出现在次日清晨 6:00,温度为 12℃,昼夜温差为 22℃。自墙体内表面向外 15 cm、30 cm、45 cm 及 6.0 m(即外表面)处,日间最高温分别为 23℃、18℃、16℃和-5℃,次日早晨最低温度分别为 15℃、15℃、15℃和-6℃,昼夜温差为 8℃、3℃、1℃和 1℃,由土墙体昼夜温差较大可知,土墙体保温性差,热量很容易通过墙体向室外散失。

比较两种墙体温度梯度发现,秸秆块墙体内表面昼夜温度变化相对缓和,距离墙体内表面 15 cm 及以上基本为恒温层^[12],土墙内表面昼夜温度变化剧烈,距离墙体内表面 30 cm 处仍有温度变化,45 cm 以上出现稳定的恒温层。从图 4B 中可以看出在土墙体各层次上温度随着太阳辐射强弱而变化,白天墙体温度升高,夜间墙体温度降低,这说明白天热

量能够通过土墙体表面向土墙体内部传递,土墙体能够积蓄热量,夜间墙体的热量释放到空间,墙体温度降低。秸秆块墙体表面温度受太阳辐射变化较大,其余各层次温度受太阳辐射影响较小,说明秸秆块墙体在蓄热性能方面较差。

本研究因未监测变温层热通量变化,不能精确计算墙体昼夜蓄热与放热量,但有研究结果表明秸秆块材料比热容、热导系数和密度均低于夯实土^[8,11],可以推测秸秆块墙体的日间蓄热量与夜间放热量均显著小于土墙体。相应的,由于秸秆块的导热系数低,热量不易传递到秸秆块内部,减弱了日光温室内部热量向外的扩散和流失,具有很好的保温性能,可以通过在秸秆块墙体中或秸秆块墙体表面增加蓄热材料以弥补秸秆块墙体不能蓄热的弊端^[13],进而建造新型秸秆块墙体日光温室。

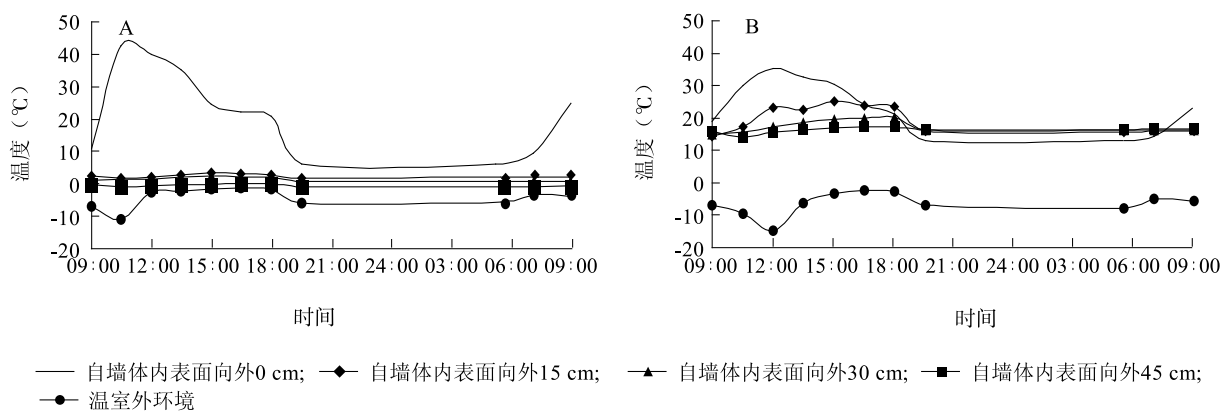


图 4 秸秆块墙体(A)和土墙体(B)日光温室中墙体温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of north wall in straw-bale wall (A) and soil wall (B) solar greenhouse

2.2 日光温室内土壤温度

日光温室内土壤不仅是作物生长基质,也是日光温室主要蓄热体与夜间的主要热源,图 5 显示了试验温室土壤温度空间分布情况。从图 5 可以看出,温室内外土壤温度在深度方向和温室跨度方向均呈现一定梯度分布特征,温度梯度在跨度方向分布十分明显。

分析不同土层温度分布情况发现,秸秆块墙体和土墙体日光温室土壤在 0 cm、10 cm、20 cm、40 cm 处各监测点平均温度分别为 15.5℃、15.5℃、15.4℃、15.4℃和 15.3℃、16.2℃、16.3℃、16.6℃,2

种日光温室 40 cm 以内土壤平均温度分别为 (15.4 ± 1.0) ℃和 (16.1 ± 2.0) ℃,2 种日光温室内土壤温度差异不显著,说明两种日光温室内土壤温度在深度方向相对稳定。本试验中秸秆块墙体日光温室内 40 cm 以内土壤温度比土墙体日光温室仅低 0.7℃,一方面是由于土墙体日光温室中耕作层下沉 0.3 m,另一方面是由于土壤温度随着深度的增加而升高^[14]。

分析跨度方向土壤温度分布情况发现,2 种温室内部自屋脊地面投影线至离前屋面落地点处 2 m 范围内,土壤温度较高且稳定,秸秆块墙体温室

和土墙体温室土壤温度分别为 14.7 ~ 16.3 °C 和 15.7 ~ 17.5 °C, 温度最高的位置位于日光温室纵向中轴线略偏南的位置, 沿南北两侧地温逐渐下降, 温室的前屋面落地处温度变化最大, 也是温室内土壤平均温度 (秸秆块墙体 13.8 °C、土墙体 12.0 °C) 最低的部位, 这与白义奎的研究结果一致^[14]。在距离秸秆块墙体日光温室北墙以外 1 m 和距离前屋面落地点 1 m 处土壤平均温度为 6.0

°C 和 2.2 °C, 土墙体温室中相应位置的土壤平均温度为 4.8 °C 和 2.2 °C, 可见, 两种温室在前屋面落地点南侧土壤散失的热量相当, 秸秆块墙体北侧散失的热量较多, 这主要是因为秸秆块墙体结构中混凝土基础的导热系数较高造成, 需要在北墙外围增加防寒沟进一步提高秸秆块温室中的土壤温度^[15]。

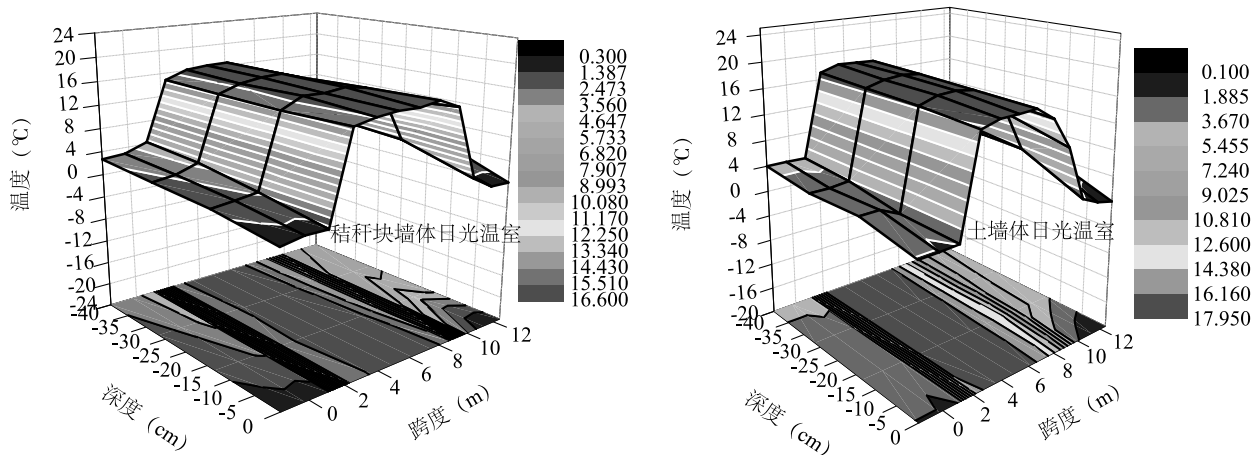


图5 日光温室的土壤温度分布梯度

Fig. 5 Temperature distribution of soil in solar greenhouse

2.3 日光温室内空气温度

在太阳辐射时, 日光温室内空气温度升高, 热量储存在日光温室墙体和土壤中, 夜间热量释放到日光温室空气中, 因此日光温室昼夜间气温呈现显著的周期性变化。图 6 显示了两种日光温室在清晨 7:00 无太阳照射时和 14:00 强光照射时测得的室内气温分布情况。

清晨 7:00 秸秆块墙体日光温室空气温度为 (9.8 ± 0.3) °C, 土墙体日光温室内空气温度为 (12.8 ± 0.7) °C, 土墙体日光温室平均空气温度较秸秆块墙体日光温室高 3.0 °C, 差异显著。主要原因可能是, 秸秆块的体积热容 $[1.40 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$ 和热传导率 $[0.069 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 低于土壤的体积热容 $[1.97 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$ 和热传导率 $[1.210 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$, 导致秸秆块墙体蓄热性能低于土墙体^[8,11], 白天秸秆块墙体蓄热量少, 夜间墙体向日光温室释放热量也少。14:00 时秸秆块墙体日光温室空气温度为 (28.8 ± 2.1) °C, 土墙体日光

温室空气温度为 (28.1 ± 1.1) °C, 两者气温差异不显著。

此外, 秸秆块墙体和土墙体日光温室中不同空间位点温度差异显著, 清晨 7:00, 自前屋面基脚处至后墙跨度方向, 间隔 2 m 断面上的秸秆块墙体日光温室平均气温为 (9.8 ± 0.6) °C、 (9.6 ± 0.3) °C、 (9.7 ± 0.1) °C、 (9.8 ± 0.2) °C、 (10.0 ± 0.3) °C 和 (9.9 ± 0.6) °C, 土墙温室平均气温为 (11.3 ± 0.8) °C、 (11.1 ± 0.6) °C、 (11.4 ± 0.5) °C、 (11.5 ± 0.5) °C、 (12.0 ± 0.8) °C 和 (12.3 ± 0.5) °C; 而自屋顶至地表附近竖向方向, 间隔 1 m 断面上的秸秆块墙体温室平均气温为 (10.0 ± 0) °C、 (9.7 ± 0.5) °C、 (9.8 ± 0.5) °C、 (9.9 ± 0.3) °C 和 (9.7 ± 0.2) °C, 土墙温室平均气温为 (12.2 ± 0) °C、 (11.9 ± 0.4) °C、 (12.1 ± 0.5) °C、 (11.7 ± 0.6) °C 和 (10.9 ± 0.5) °C。空间温差的存在, 既是温室与外界热交换的结果, 也是温室内空间不同部位存在温度传递的结果, 从而引起室内空气产生对流效应, 促进内部及与外界的热交换。

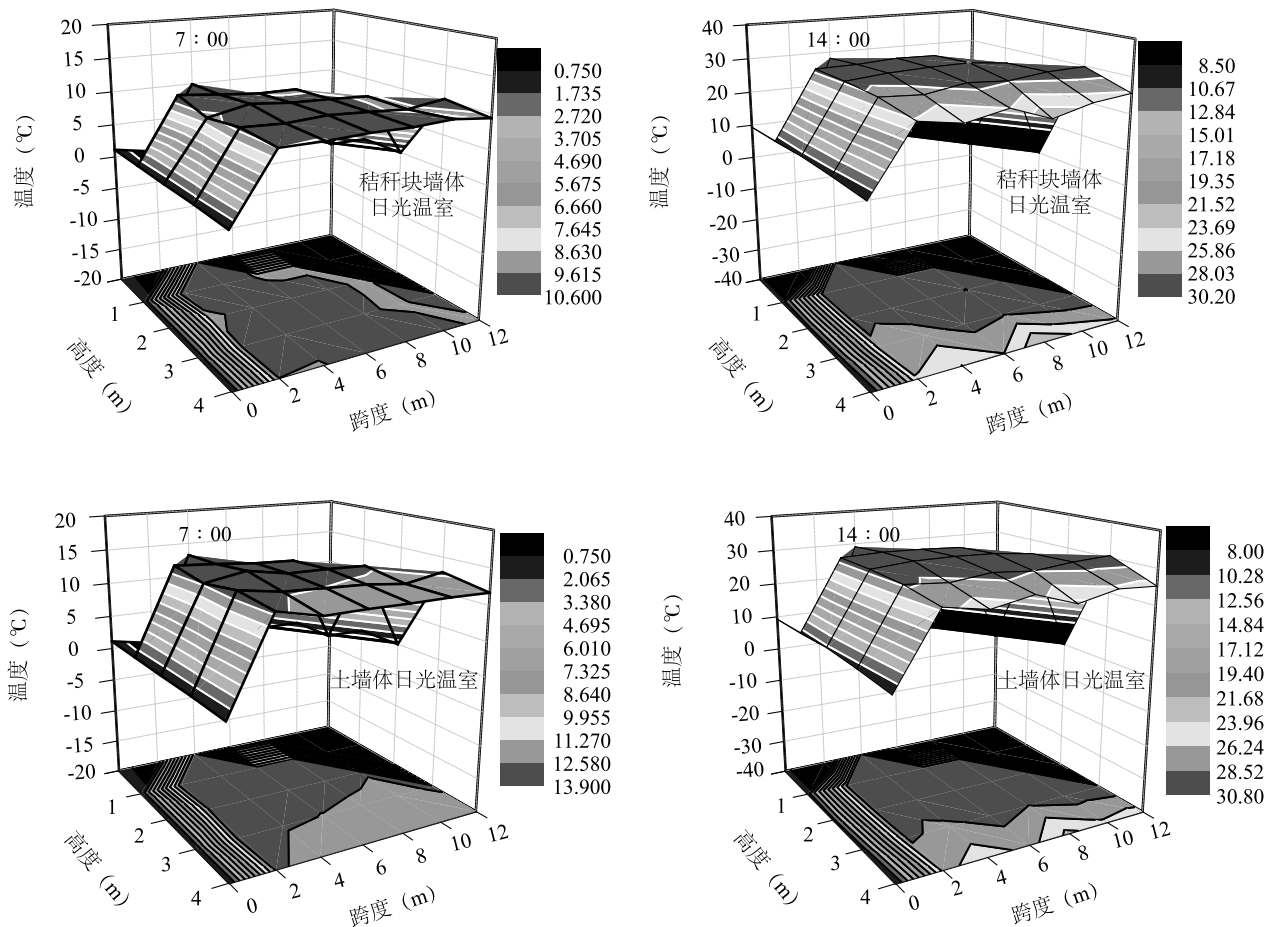


图 6 秸秆块墙体和土墙体日光温室中不同时间空气温度分布

Fig. 6 Air temperature distribution in straw-bale wall and soil wall at different time

2.4 典型气候条件下温度变化

秸秆块墙体日光温室和土墙体日光温室在晴天和阴天的温度变化情况如图 7 所示。从图 7 可以看出,无论晴天还是阴天,两个温室的空气温度变化趋势保持一致。晴天时,室外的日平均温度为 6.3 °C,秸秆块墙体日光温室的最高温度为 39.7 °C,最低温度为 10.0 °C,昼夜温差为 29.7 °C,日平均温度为 18.9 °C。土墙体日光温室的最高温度为 37.0 °C,最低温度为 12.2 °C,昼夜温差为 24.8 °C,日平均温度为 20.0 °C。阴天时,室外的日平均温度为 4.3 °C,秸秆块墙体日光温室的最高温度为 19.0 °C,最低温度为 8.2 °C,昼夜温差为 10.8 °C,日平均温度为 14.5 °C。土墙体日光温室的最高温度为 19.6 °C,最低温度为 10.2 °C,昼夜温差为 9.4 °C,日平均温度为 17.3 °C。试验过程中秸秆块墙体日光温室

中空气温度最低为 8.2 °C,温室内种植的黄瓜植株未出现冻害,说明秸秆块墙体日光温室能够满足黄瓜植株的生长。

晴天时,秸秆块墙体日光温室空气温度比土墙体日光温室空气温度低 1.1 °C,阴天时低 2.8 °C,这主要是由于秸秆块墙体的导热系数比土墙体的导热系数低,太阳辐射的热量很难传递到秸秆块墙体内部。阴天时秸秆块墙体日光温室空气温度低于土墙体日光温室空气温度,这是因为秸秆块墙体在有太阳辐射时积蓄的热量少,导致秸秆块墙体在夜间或阴天时向日光温室释放的热量少。研究表明,白天温度高,作物的光合作用处于较高状态,产生大量有机物,夜晚温度低,作物呼吸作用的强度处于较低状态,减少了有机物的消耗,昼夜温差大有利于作物干物质的积累^[16]。

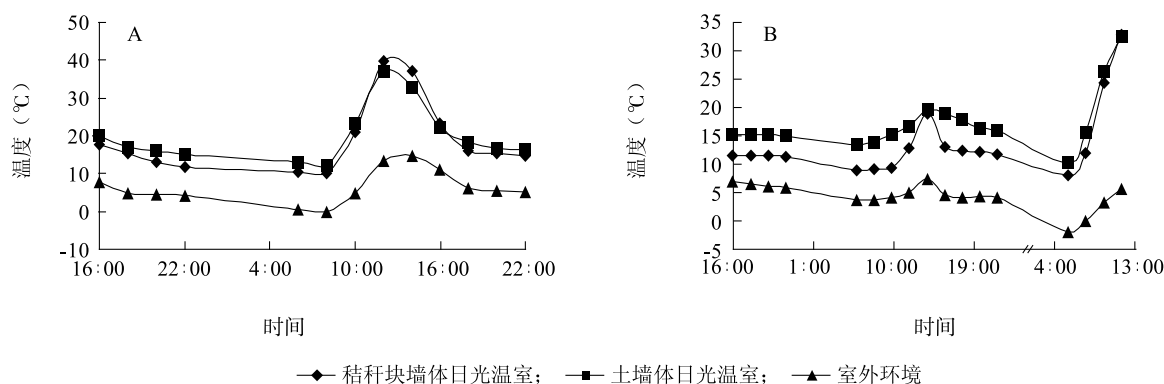


图7 日光温室在晴天(A)和阴天(B)条件下温度变化

Fig.7 Changes of air temperature in sunny and cloudy day

3 结论

本研究分析了不同墙体材料对日光温室温度的影响,结果表明:秸秆块墙体与土墙体温度分布有相同规律,在厚度方向由内向外存在“变温层-恒温层-变温层”3个层次,但明显可以看出2种墙体热性能上存在较大差异。秸秆块墙体变温层厚度远不及土墙体变温层厚度,秸秆块墙体内侧变温层厚度为15 cm,土墙为45 cm。内侧变温层对温室白天蓄热与夜间放热起重要作用,导致秸秆块墙体日光温室全室内气温稳定性不如土墙体日光温室。墙体温度分布也表明秸秆块墙体昼夜温差变化较小,具有很好的保温性,但蓄热性能不足,土墙体昼夜温差变化较大,保温性较差,但具有很好的蓄热性能。从土壤温度分布来看,秸秆块墙体日光温室和土墙体日光温室0~40 cm土壤温度分别为 $(15.4 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ 和 $(16.1 \pm 2.0)^\circ\text{C}$,二者无显著差异,表明秸秆块墙体日光温室对保存土壤热量方面可以起到与土墙体日光温室相同的效果。监测日光温室外南北方向1 m范围土层温度发现,土墙体日光温室外南侧土层温度高于秸秆块墙体日光温室外土层温度,北侧则相反,表明秸秆块墙体日光温室通过墙体北侧土壤断面流失的热量更多,在该断面采取如设置防寒沟等措施对保持温室内土壤温度更有效。从室内气温分布情况看,夜间和阴天时秸秆块墙体日光温室空气温度低于土墙体日光温室空气温度,晴天时秸秆块墙体日光温室空气温度比土墙体日光温室空气温度低 1.1°C ,这主要是由于秸秆块墙体蓄热性能比土墙体差,秸秆材料的体积热容与热导率均低于土质

材料,秸秆块墙体日光温室中白天太阳辐射的热量积聚在日光温室空气中,不能储存在秸秆块墙体中,夜间和阴天时向日光温室内空气中释放的热量少。

总之,厚度0.6 m的秸秆块墙体温室与平均墙厚4.0 m的土墙体日光温室在保温性能上整体差异不显著,试验期间日光温室内空气温度最低为 8.2°C ,2种温室结构均能够满足常规蔬菜反季节栽培对设施保温性能的要求。值得注意的是,昼夜温差大是秸秆块墙体日光温室的特点,昼夜温差大有利于作物养分的积累,有利于提高温室内作物的品质和产量。此外,若将秸秆块墙体日光温室应用于冬季温度更低的地区,应当采取强化秸秆块墙体蓄热能力、墙体外围开挖防寒沟等蓄热保温措施。

参考文献:

- [1] 李天来. 论我国日光温室生产发展的制约因素与战略性调整[J]. 农业工程学报, 2003, 19(Z1): 75-78.
- [2] 张武锁, 李连旺, 温祥珍, 等. 墙体填充材料对日光温室保温性的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2007, 28(3): 1-4.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 王顺生, 马承伟, 柴力龙, 等. 日光温室内置式太阳能集热调温装置试验研究[J]. 农机化研究, 2007(2): 130-133.
- [6] 白义奎, 迟道才, 王铁良, 等. 日光温室燃池: 地中热交换系统加热效果的初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 178-181.
- [7] 戴巧利, 左然, 李平, 等. 主动式太阳能集热/土壤蓄热塑料大棚增温系统及效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 164-

- 168.
- [8] 傅志前. 不同密度的麦秸砖墙导热系数试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 289-292.
- [9] JOLANTA V, ALBINAS G, SIGITAS V, et al. Evaluation of structure influence on thermal conductivity of thermal insulating materials from renewable resources [J]. Materials Science, 2011, 17(2): 208-212.
- [10] KATHARINE W, PETE W, CHRISTOPHER G, et al. Development and testing of a prototype straw bale house [J]. Construction Materials, 2012, 165(6): 377-384.
- [11] 佟国红, 白义奎, 赵荣飞, 等. 日光温室复合墙与土墙热性能对比分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(6): 718-722.
- [12] 王 谦, 陈景玲, 孙治强, 等. 冬季日光温室北墙内表面热流分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 225-229.
- [13] 管 勇, 陈 超, 凌浩恕, 等. 日光温室三重结构相变蓄热墙体传质特性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 166-173.
- [14] 贾 红, 徐为根, 彭明艳, 等. 日光温室土壤温度变化特征和预报模型研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11): 6471-6482.
- [15] 白义奎, 刘文合, 柴 宇, 等. 防寒沟对日光温室横向地温的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5-6): 595-597.
- [16] 毛丽萍, 李亚灵, 赵军良, 等. 昼夜温差对番茄幼苗光合特性和物质积累的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(1): 128-133.

(责任编辑: 陈海霞)