

秸秆块墙体日光温室保温蓄热性能分析

武国峰, 徐跃定, 常志州, 孙恩惠, 黄红英*

(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, 南京 210014)

摘要:为研究以农作物秸秆为墙体材料的日光温室(以下称秸秆块墙体日光温室)的保温蓄热性能,以秸秆块墙体日光温室为研究对象,以空心砖墙体日光温室为对照,监测了两种墙体材料温室中空气、墙体、土壤和温室各界面温度变化,分析了两种墙体材料日光温室的保温蓄热性能。结果表明:秸秆块墙体在晴天和阴天时均具有很好的保温性能,空心砖墙体晴天夜间时散失的热量是秸秆块墙体的 1.5 倍,阴天夜间时散失的热量是秸秆块墙体的 1.3 倍;秸秆块和空心砖墙体日光温室阴天时室内最低气温分别为 5.4 ℃和 5.8 ℃,晴天时室内最低气温为 6.0 ℃和 7.4 ℃;秸秆块墙体温室中 40 cm 以上土壤平均温度(14.00±2.61)℃高于空心砖墙体温室(13.55±1.73)℃。温室结构中各界面表面温度主要受太阳辐射强度的影响,秸秆块墙体温室中 10 cm 以上土壤层和空气的蓄热量比空心砖墙体温室中的大,秸秆块墙体的蓄热量比空心砖墙体的蓄热量小。

关键词:日光温室;秸秆块;空心砖;温度;保温;蓄热

中图分类号:S626.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)12-2402-08 **doi:**10.11654/jaes.2015.12.021

Heat-Insulating Performance of Straw-bale Wall Solar Greenhouse

WU Guo-feng, XU Yue-ding, CHANG Zhi-zhou, SUN En-hui, HUANG Hong-ying*

(Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China)

Abstract: The purpose of this paper was to analysis the heat-insulating performance of solar greenhouse with straw-bale. A hollow brick wall was also evaluated as a control. The air temperature, the temperature at indoor and outdoor wall surface, at 5 cm depth of wall, soil temperature at different depth, and interface temperature were monitored and discussed. The results showed that the straw-bale wall has better thermal insulation properties than the hollow brick wall on both sunny and cloudy days. The dispersing heat in the hollow brick wall was 1.5 times greater than that in the straw-bale wall at night on sunny day, and 1.3 times greater than that in straw-bale wall at night on cloudy day. The lowest air temperature in straw-bale wall and hollow brick wall solar greenhouse were 5.4 ℃ and 5.8 ℃ on cloudy day, and 6.0 ℃ and 7.4 ℃ on sunny day, respectively. The air temperature in the hollow brick wall was higher than that in the straw-bale wall because of lower heat-storage performance of the hollow brick. The average soil temperature in straw-bale wall solar greenhouse (14.00±2.61)℃ was higher than that in the hollow brick wall (13.55±1.73)℃. All the interface temperatures were influenced by the solar radiation intensity. The heat was stored in the soil and air in straw-bale wall solar greenhouse. The thermal storage ability of soil (above 10 cm) and air in straw-bale wall greenhouse was larger than that in hollow brick wall, while the thermal storage ability of straw-bale wall greenhouse was smaller than that of the hollow brick wall. The present paper provides the advantages and disadvantages of these two wall types of solar greenhouse, which would help improve the technique of straw-bale wall solar greenhouse.

Keywords: solar greenhouse; straw-bale; hollow brick; temperature; heat preservation; thermal storage

日光温室是用于蔬菜和果树反季节种植的农业设施,具有高效、节能、低成本的特点^[1-3]。日光温室的原

理在于墙体或土壤可在夜间将日间所储存的热量释放到室内,利于维持室内作物的生长^[4-6]。研究结果表明,温室墙体夜间释放的热量仅为日间吸收热量的 10.5%~25.7%,其余大部分热量通过墙体或其他结构介质散失。因此,为提高日光温室中空气温度,不仅要增强温室墙体的蓄热性及温室墙体的保温性^[7-8],还要利用温室土壤的蓄热功能。

收稿日期:2015-06-24

基金项目:江苏省农业自主创新资金(CX(12)1002-3)

作者简介:武国峰(1983—),男,河北衡水人,博士,助理研究员,主要研究方向为农业废弃物资源化利用。

E-mail:wu_guofeng@sina.cn

* 通信作者:黄红英 E-mail:sfmicrolab@163.com

目前日光温室墙体材料主要是夯实土墙和粘土砖墙,前者存在土地利用率低、破坏耕作层等问题,后者在制造过程中造成环境污染,而且墙体保温性差^[9-10]。近年来混凝土砌块、聚苯乙烯泡沫板、炉渣、相变蓄热材料等作为温室的墙体材料均有研究^[11-13],但因其成本或环境问题并未推广应用,因此开发新型节能环保的日光温室墙体结构模式具有重要意义。

农作物秸秆是农业生产中的重要资源之一,秸秆建筑(Straw-bale building)起源于美国北部,距今有 100 多年历史^[14-16],秸秆在日光温室墙体方面应用刚刚起步,相关研究并未深入^[17-20]。将农作物秸秆利用在农业设施结构中,不仅有利于生态、循环和绿色农业的发展,还拓展了秸秆利用途径,具有重要的经济和社会效益。秸秆块墙体日光温室是以压缩成型的农作物秸秆块为日光温室墙体维护材料的农业设施,是作者所在团队近年来的研究成果。前期研究发现秸秆块墙体具有平衡温室内水分和补充室内二氧化碳的作用,昼夜温差较大等特点^[20-21],能够满足作物越冬生长。

本文在前期研究的基础上,监测了秸秆块墙体和空心砖墙体温室中温度变化,讨论了秸秆块墙体的保温蓄热性能,旨在为秸秆块墙体日光温室构建技术的完善和推广应用提供理论依据。

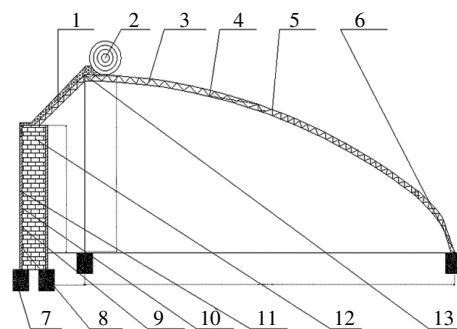
1 材料与方法

1.1 试验对象

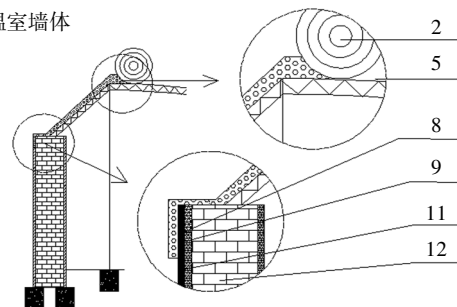
供试秸秆块墙体日光温室位于江苏省农业科学院六合动物科学基地(118°49'48"E, 32°21'36"N),长度 50 m,跨度 11 m,北墙高 3 m,脊高 4.2 m,后屋面角 45°,山墙和北墙均为 0.6 m 厚秸秆块,基础为塑料薄膜包裹的秸秆块(深 0.4 m,宽 0.6 m),后墙由秸秆块码砌而成,秸秆块之间缝隙用散草填实,墙体外侧依次覆盖无纺布、塑料薄膜和彩钢瓦^[22]。前屋面薄膜为 0.12 mm 厚 EVA 无滴薄膜,保温被为双面防水型保温被,后屋面由内向外依次为塑料薄膜、两层草帘、保温被、无纺布和塑料薄膜。秸秆块墙体日光温室结构如图 1 所示。

供试空心砖墙体日光温室位置同上,结构规格与秸秆块墙体日光温室一致,山墙和后墙为 0.6 m 厚空心砖码砌,基础为实心砖码砌(深 0.4 m,宽 0.6 m),空心砖墙体中空部分填充稻壳压实,墙体内外两侧粉刷水泥灰。两栋温室保温被卷起方式采用侧端式,试验期间,试验温室和对照温室均用来栽培辣椒(湘辣六

(a) 温室横截面



(b) 温室墙体



- 1.后屋面;2.保温被;3.上放风口;4.塑料薄膜;5.前屋面拱架;
6.下放风口;7.点桩;8.墙体立柱;9.无纺布;10.塑料薄膜;
11.彩钢瓦;12.秸秆块;13.顶梁立柱

- 1.North roof; 2.Heat preservation quilt; 3, 6.Vents; 4, 10.Plastic film;
5.Arch; 7.Supporting point; 8.Steel frame; 9.Non-woven fabrics;
11.Color steel tile; 12.Straw-bale; 13.Supporting columns

图 1 秸秆块墙体日光温室结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of straw-bale wall solar greenhouse

号), 保温被揭开和闭合时间分别为 08:30 和 16:30, 每天中午, 打开温室前屋面顶部放风口进行通风降温。

1.2 测点布置及测试仪器

试验过程中室外空气温度和太阳辐射强度测点位于北墙外侧 3 m, 距离地表 1.5 m 处, 土壤温度测量点分别为地表和距离地表以下 10、20、30、40 cm 深处。温室内测点选择在室内中间剖面位置, 空气温度和太阳辐射强度测点位于跨中位置, 土壤温度测量点分别为地表和距离地表以下 10、20、30、40 cm 深处; 后墙, 后屋面, 前屋面表面温度测量点位于相应结构中间位置, 植株表面温度测量点位于跨中位置的作物叶片背阴面, 距离墙体内表面 5 cm 深处墙体温度(以下简称 5 cm 处温度)位于墙体内表面测量点同一位置。太阳辐射强度采用太阳辐射记录仪测量, 温室各结构单元表面温度、不同层次土壤温度以及墙体表面温度采用便携式自动气象站测量(PC-3 型便携式

自动气象站,锦州阳光气象科技有限公司)。

1.3 测试时间

试验监测时间为2014年12月15日—2015年2月15日。取2015年1月1日(晴天)和2014年12月18日(阴天)分析墙体的保温性能;取2015年1月17日(晴天)和2015年1月8日(阴天)分析墙体的保温性能和蓄放热性能;取2015年2月5日(晴天)分析土壤温度变化和温室各组成结构表面温度变化。

2 结果与讨论

2.1 晴天墙体保温特性

晴天时,秸秆块和空心砖墙体外表面及室外空气温度变化如图2所示。全天室外空气、秸秆块墙体外表面和空心砖墙体外表面平均温度分别为 (-0.58 ± 3.67) 、 (1.99 ± 1.51) ℃和 (4.51 ± 1.68) ℃,秸秆块墙外表面与室外气温之差 (2.57 ± 2.51) ℃小于空心砖墙体外表面与室外气温之差 (5.09 ± 2.21) ℃,表明晴天时墙体外表面与室外空气存在热交换现象。保温被揭开期间(08:30至16:30)秸秆块和空心砖墙外表面温度与室外气温之差分别为 (-0.31 ± 1.36) ℃和 (2.83 ± 1.63) ℃,秸秆块墙体外表面和室外空气温差小,可知秸秆块墙体与室外热交换量少,保温性好,因此日间秸秆块墙体室温较高。在夜间(保温被覆盖时间16:30至次日08:30),秸秆块和空心砖墙外表面温度与室外气温之差分别为 (4.26 ± 0.97) ℃和 (6.44 ± 1.11) ℃,说明两种结构墙体与室外空气发生热交换现象,相对空心砖墙体而言,秸秆块墙体具有相对较好的保温性,与秸秆块的导热系数低于空心砖的导热系数是一致的^[20]。据民用建筑热工设计规范(GB/T 50176—2002),一般墙体外表面的表面传热系数为 $23.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{℃}^{-1}$ ^[23],通过计算可知,晴天时夜间秸秆块墙体和空心砖墙体通过墙

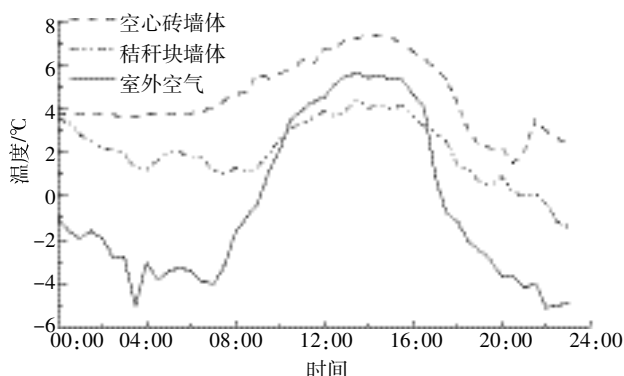


图2 晴天时室外空气、秸秆块和空心砖墙体外表面温度

Figure 2 Temperature in outdoor air and at outdoor surface of straw-bale wall and hollow brick wall on sunny day

体外表面向室外流失的热强度分别为 $(98 \pm 22) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $(148 \pm 26) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,空心砖墙所散失的热量是秸秆块墙体的1.5倍。该结果表明秸秆块墙体可有效减少热量通过墙体散失,尤其在夜间室内外温差较大的时候,保温效果更加明显。

2.2 阴天墙体保温特性

阴天时秸秆块墙体、空心砖墙体外表面以及室外空气的温度变化如图3所示。在无太阳辐照时,室内外气温较低,两种墙体结构的温室墙体外表面与室外气温之差较小,墙体与室外空气的热交换相应较少。在保温被覆盖期间(16:30至次日08:30),室外空气温度较室内空气温度低,空心砖墙体外表面温度高于室外气温,两者之差为 (5.6 ± 1.4) ℃,散热强度为 $(129 \pm 32) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,秸秆块墙体外表面温度(16:30至次日08:30)高于室外气温,两者之差为 (4.2 ± 1.6) ℃,散热强度为 $(97 \pm 37) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由此可以看出,阴天夜间空心砖墙体散失的热量是秸秆块墙体散失的1.3倍。保温被揭开期间(08:30至16:30),在太阳辐照的影响下,温室内空气温度先升高后降低,与晴天相比气温变化幅度较小。秸秆块和空心砖温室外表面温度与室外空气温度的温度差分别为 (-0.01 ± 1.30) ℃和 (1.16 ± 1.31) ℃,散热强度分别为 $(-0.23 \pm 29.9) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $(26.7 \pm 30.1) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

可见,无论日间还是夜间,空心砖墙体外表面与室外空气的温度差均高于秸秆块墙体外表面与室外空气的温度差,说明秸秆块墙体散失的热量小于空心砖墙体散失的热量,因此可以说秸秆块墙体的保温隔热性能要好。这与秸秆块的导热系数低于空心砖的导热系数是一致的^[20]。

2.3 晴天墙体蓄放热特性

在晴天日间(08:30至16:30),秸秆块墙体和空

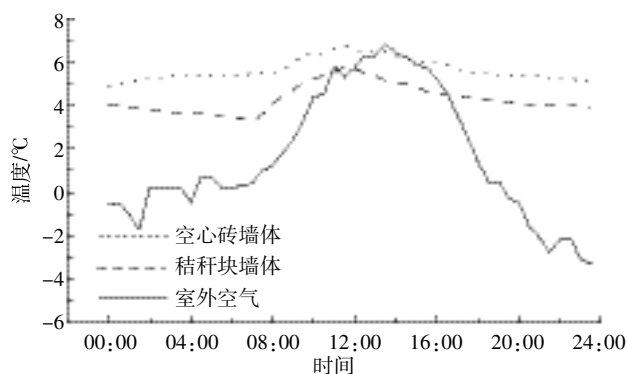


图3 阴天时室外空气、秸秆块和空心砖墙体外表面温度

Figure 3 Temperature in outdoor air and at outdoor surface of straw-bale wall and hollow brick wall on cloudy day

心砖墙体日光温室太阳光照强度分别为 $33 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $31 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 两者间差别仅为 6.1%, 在本文中认为两种墙体在晴天日间所受到的太阳光照强度没有差异。

晴天秸秆块墙体日光温室和空心砖墙体日光温室内空气温度、墙体内表面和 5 cm 深处温度变化如图 4 所示。晴天时, 日出之前, 秸秆块温室中空气温度最低为 6.0°C , 砖墙体温室为 7.4°C 。保温被揭开后 (08:30 至 16:30), 由于太阳的辐照作用, 秸秆块温室室内气温和墙体内表面温度不断升高, 至 14:00 室内气温 (49.8°C) 和墙体内表面温度 (41.3°C) 达到最大值。空心砖墙体内表面和空气温度最高分别为 37.6°C 和 37.8°C , 结合图 1 可知, 空心砖墙体在太阳辐射时能够储存热量, 同时也向室外散失热量, 因此空心砖墙温室中气温较低。此外, 太阳辐射开始时 (晴天), 秸秆块温室中空气温度迅速升高, 直至下午保温被覆盖时, 秸秆块墙温室中空气温度均高于空心砖墙体温室中空气温度。这也说明了秸秆块墙体保温性较高。

在日间 (08:30 至 16:30), 空心砖墙体 5 cm 深处温度高于秸秆块墙体 5 cm 深处温度, 说明在太阳辐

射时通过空心砖墙体散失的热量高于秸秆块墙体散失的热量, 秸秆块墙体的保温性优于空心砖墙体, 空心砖墙体温室中的热量容易向室外扩散, 造成热量的散失, 与图 1 结果一致。在夜间 (16:30 至 08:30), 空心砖墙和秸秆块墙体室内气温和墙体内表面之差分别为 $(0.69 \pm 0.13)^\circ\text{C}$ 和 $(-0.72 \pm 0.26)^\circ\text{C}$, 表明夜间时空心砖墙体向室内释放热量, 秸秆块墙体内表面温度和室内气温温差小, 热量交换少, 说明秸秆块墙体蓄热性差。同时还发现, 空心砖墙体 5 cm 深处温度比内表面温度高 $(0.2 \pm 0.2)^\circ\text{C}$, 秸秆块墙体 5 cm 深处温度比内表面高 $(0.6 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 。虽然秸秆块墙体 5 cm 深处温度比表面温度高, 但是由于秸秆块的导热系数较低^[9], 其墙体内层的热量不易传递到温室中, 前期研究结果也表明秸秆块墙体存在恒温层^[20]。这证明了秸秆块蓄热性不足, 解释了秸秆块墙体日光温室夜间气温较低的原因。

2.4 阴天墙体蓄放热特性

阴天时秸秆块墙体日光温室和空心砖墙体日光温室内空气温度、墙体内表面和 5 cm 深处温度如图 5 所示。阴天时, 温室内空气变化趋势与晴天时一致,

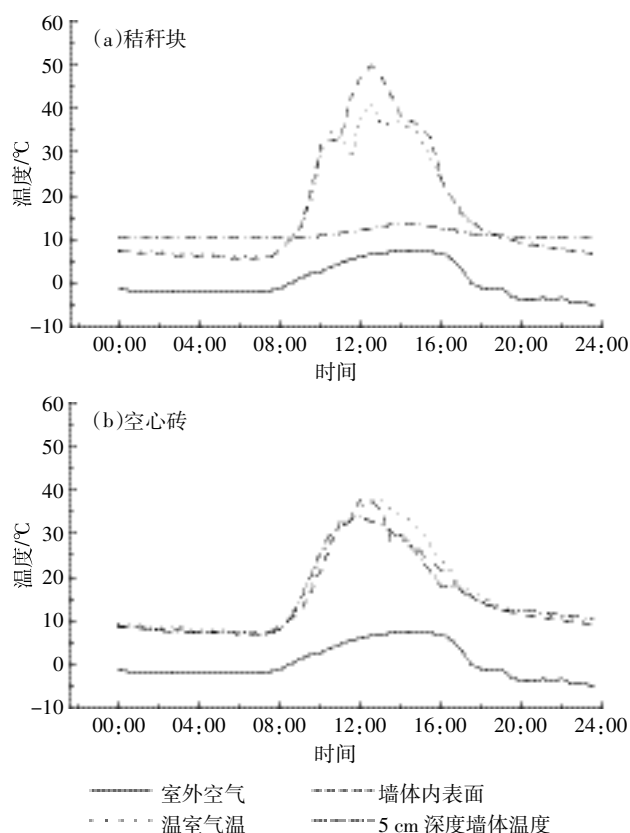


图 4 晴天时温室空气、墙体内表面及 5 cm 处墙体温度

Figure 4 Temperature in indoor air and at indoor surface and 5 cm depth of wall of solar greenhouse on sunny day

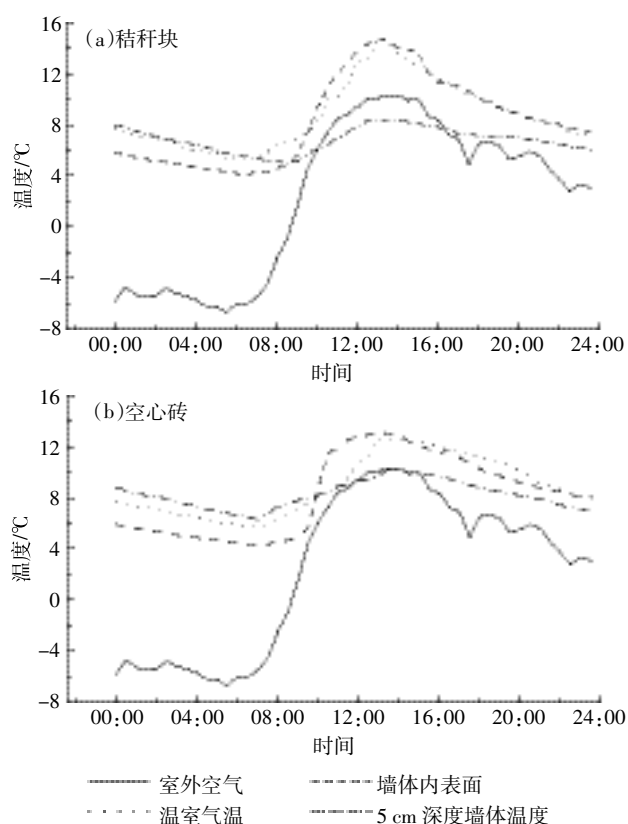


图 5 阴天时温室空气、墙体内表面及 5 cm 处墙体温度

Figure 5 Temperature in indoor air and at indoor surface and 5 cm depth of wall of solar greenhouse on cloudy day

但温度变化幅度不明显。在上午 6:30 左右温室内空气温度达到最低值(秸秆块 5.4 ℃, 砖墙体 5.8 ℃), 中午 13:00 空心砖墙体温室中空气温度为 12.6 ℃, 秸秆块温室空气温度为 14.7 ℃。日间空心砖墙体日光温室中空气温度低于秸秆块温室中空气温度, 夜间时空心砖墙体温室中气温较高。这是由于空心砖墙体在夜间向温室内释放了日间储存的热量。

在阴天全天, 太阳辐射强度较小, 墙体内部表面和 5 cm 深处墙体温度变化幅度较小, 墙体日间蓄热量不足, 导致温室内夜间气温较低。空心砖内表面温度低于空气温度的时间段为 0:00 至 11:00 和 15:00 至 24:00, 秸秆块墙体为 0:00 至 10:00, 在 11:00 以后,

秸秆块墙体内部表面温度高于气温或与气温接近。根据界面温差变化可以发现, 阴天时空心砖墙体向室外传递的热量比秸秆块墙体传递的热量多。秸秆块墙体和空心砖墙体温室在阴天时气温基本一致, 也说明秸秆块墙体虽然蓄热性不足, 但由于保温性能好, 从室内气温来看, 两种结构温室在阴天时室内气温差异不明显。

2.5 土壤温度变化

日光温室中墙体是主要的蓄热体, 土壤也具有一定的蓄热功能^[24]。两种结构温室中不同深度的土壤温度变化如图 6 所示。秸秆块和空心砖墙体日光温室中 40 cm 以上土壤温度分别为 $(14.00 \pm 2.61)^\circ\text{C}$ 和 $(13.55 \pm$

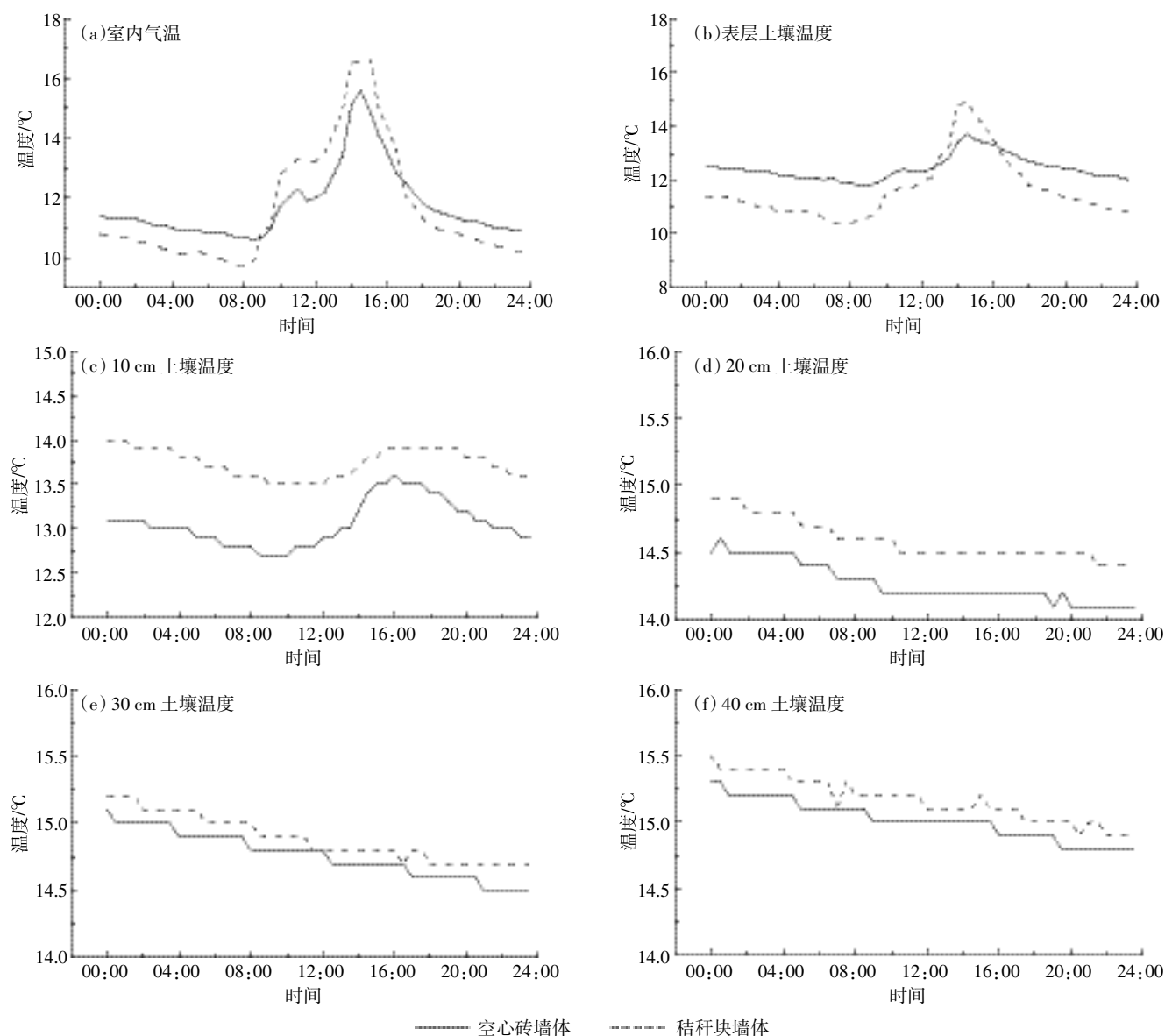


图 6 秸秆块和空心砖墙体日光温室中土壤温度分布

Figure 6 Temperature of soil at different depths in straw-bale and hollow brick wall solar greenhouse

1.73)℃,室内气温、土壤表层和 10 cm 深处土壤温度变化受太阳辐射强度的影响较大,而在 20、30、40 cm 深处土壤温度变化受太阳辐射影响较小,呈现出温度随时间逐渐降低的趋势。这是因为温室中较深层次土壤中积蓄的热量不断向温室内转移以补充温室内散失的热量,日光温室中深层土壤储存的热量在整个冬季都在向浅层土壤和室内转移以补充温室内的热量,也是温室满足作物越冬生长的重要因素。

图 6a 显示秸秆块温室中平均气温为(11.6±2.0)℃,空心砖温室中平均气温为(11.7±1.2)℃,在 9:00—16:30 之间秸秆块温室中平均气温(13.7±2.0)℃略高于空心砖温室中平均气温(12.7±1.5)℃,保温被覆盖期间秸秆块平均气温(10.5±0.5)℃低于空心砖温室中平均气温(11.2±0.4)℃。此外,秸秆块温室中平均气温(16.7℃)高于空心砖墙体温室平均气温(15.6℃),秸秆块温室最低气温(9.8℃)明显低于空心砖最低气温(10.6℃)。这可能是由于空心砖温室中热量储存在墙体中,同时部分热量通过空心砖墙体向室内外散失,与图 2 和图 3 结果一致。

秸秆块墙体的保温性能较好,温室中的热量通过墙体散失较少,热量可能储存于温室土壤中,如图 6b 所示,秸秆块温室中表层土壤温度(13.9℃)在 13:00 至 16:00 之间高于空心砖墙体表层土壤温度(13.6℃),也证实秸秆块温室中的热量储存在了土壤表层中。此外,秸秆块温室土壤表层平均温度比空心砖温室高 0.6℃,温室表层土壤和 10 cm 深处土壤温度变化明显,表明 10 cm 以上土壤层存在明显的吸放热过程,秸秆块墙体温室中 10 cm 土壤层吸放热过程比空心砖墙体吸放热明显(图 6c)。秸秆块墙体基础为塑料薄膜包裹的秸秆块,这种墙体基础能够阻止温室内土壤中热量通过墙体基础向室外散失,而空心砖墙体基础中为实心砖,实心砖的导热系数高于秸秆块的导热系数,因此土壤中的热量很容易通过墙体基础向室外散失。

图 6d~图 6f 说明秸秆块和空心砖墙体温室中 20、30、40 cm 处的日平均温度分别为 14.6、14.9、15.2℃和 14.3℃、14.8、15.0℃,秸秆块温室各深度的土壤温度均高于空心砖温室中土壤温度。秸秆块墙体中秸秆块基础的良好保温隔热性能,减少了深层土壤中热量向温室内的扩散,因而日间秸秆块墙体储存和散失的热量少,使温室内的热量积蓄在温室土壤层中。两种墙体结构温室中 10 cm 以下土壤温度呈逐渐降低的趋势,说明温室土壤中的热量不断向温室中扩散,

以补充温室中热量的散失。

2.6 温室界面温度变化

两种墙体结构温室中后墙、后屋面、前屋面、土壤表面和植株表面的温度变化如图 7 所示。各界面温度变化均随室内气温呈现周期性的变化,后墙作为温室中主要的围护结构,具有保温和蓄热的双重功能。图 7a 显示秸秆块墙体日平均温度(11.6±1.5)℃高于空心砖墙体日平均温度(11.3±0.7)℃。秸秆块墙内表面日间平均温度(12.9±2.0)℃明显高于空心砖表面温度(11.7±1.0)℃,夜间两种结构墙体内表面温度基本一致,结合图 4 和图 5 分析结果,空心砖墙体日间蓄积的热量在夜间释放出来导致其夜间内表面温度较高。图 7b 显示秸秆块墙体温室后屋面平均温度在日间比空心砖墙体温室高 0.3℃,主要是由于秸秆块温室中日间气温较高导致的。夜间两种温室后屋面温度均为 10.5℃,说明温室中通过后屋面散失的热量基本一致。图 7c 显示前屋面温度变化,可知秸秆块和空心砖墙温室中前屋面平均温度分别为 10.9℃和 10.5℃,日间秸秆块前屋面温度比空心砖高 0.8℃,夜间比空心砖高 0.2℃,这是因为日间的太阳辐射热量积聚在温室空气中,以及温室保温被覆盖后,秸秆块墙体表面的热量散失到温室中,导致秸秆块墙体温室中空气温度较高,因此秸秆块温室前屋面温度在保温被刚覆盖时温度较高。图 7e 显示温室中作物表面的温度同样随着温室气温的变化而变化,两种墙体结构温室中作物叶片表面平均温度均为 11.5℃,但是秸秆块温室中作物叶片表面最高温和最低温分别为 15.2℃和 10.2℃,空心砖墙温室中作物叶片最高温和最低温分别为 14.4℃和 10.5℃,作物叶片表面温度变化主要是受温室中空气温度变化的影响,这有利于作物品质的提高,并为周玲玲等的研究结果所证明^[29]。

3 结论

(1)秸秆块墙体具有很好的保温性,有效地阻止了温室内的热量通过墙体向室外传递,晴天夜间空心砖墙散失的热量是秸秆块墙的 1.5 倍,阴天夜间空心砖墙散失的热量是秸秆块墙的 1.3 倍。

(2)秸秆块墙体蓄热性能较差,晴天夜间空心砖墙室内气温高于秸秆块温室,阴天夜间两种结构墙体储存的热量对温室气温的影响不明显。

(3)秸秆块墙体温室中 40 cm 以上土壤平均温度(14.00±2.61)℃高于空心砖墙温室(13.55±1.73)℃,秸秆块温室中 10 cm 以上土壤层蓄积的热量是维持其

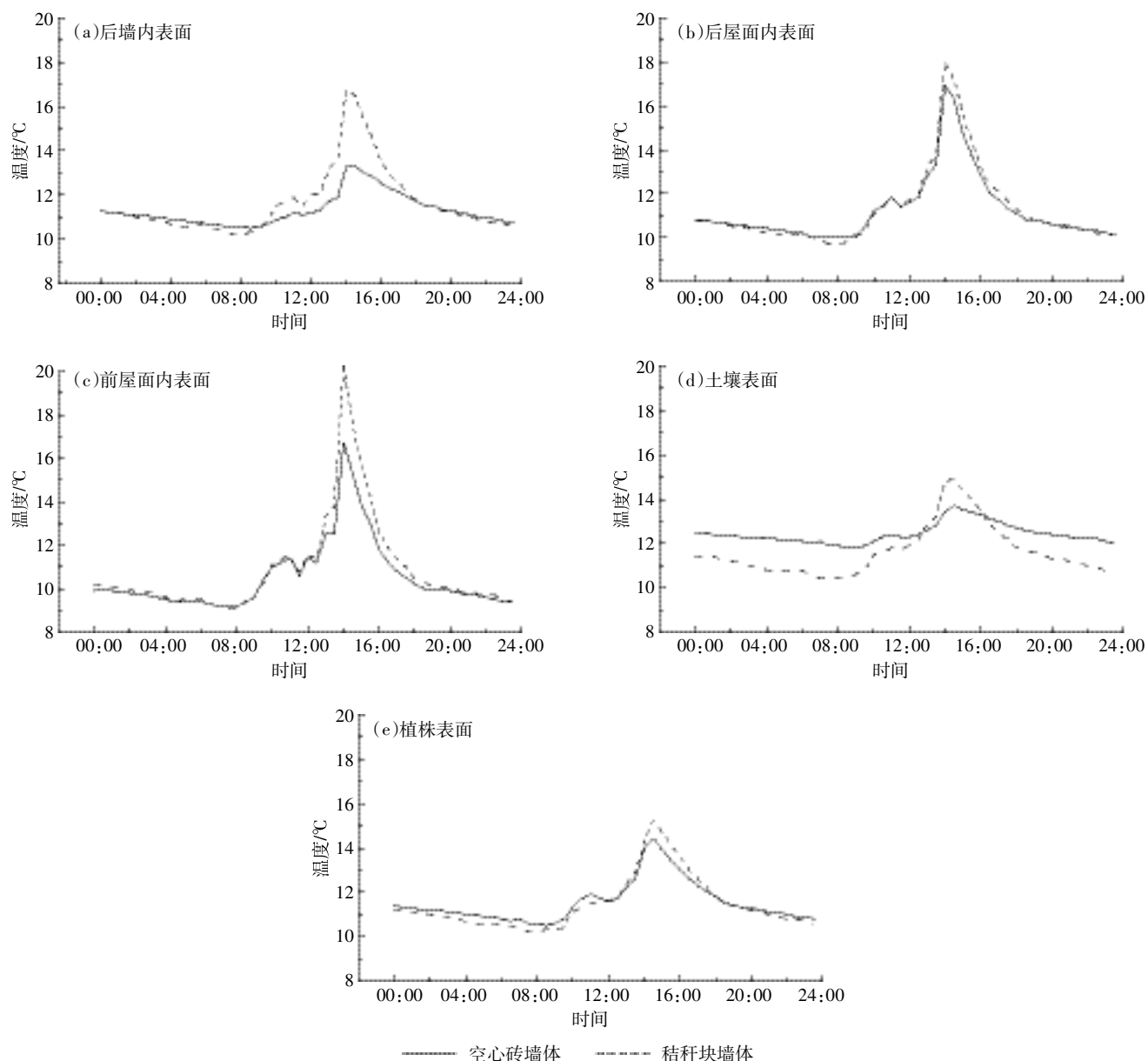


图7 秸秆块和空心砖墙体日光温室中各界面温度分布

Figure 7 Interface temperature in straw-bale and hollow brick wall solar greenhouse

夜间气温的主要热源。

(4) 温室各界面温度受室内气温的影响, 秸秆块温室中的热量主要储存在温室空气和土壤中, 空心砖温室中热量储存在墙体中。日间秸秆块温室各界面温度均高, 夜间前后屋面内表面温度基本一致, 秸秆块温室中土壤和植株表面温度略低。

参考文献:

- [1] Fuchs M, Dayan E, Presnov E. Evaporative cooling of a ventilated greenhouse rose crop[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138(1-4):203-215.
- [2] 马承伟, 韩静静, 李睿. 日光温室热环境模拟预测软件研究开发[J]. 北方园艺, 2010, 34(15):69-75.
- [3] MA Cheng-wei, HAN Jing-jing, LI Rui. Research and development of software for thermal environment simulation and prediction in solar greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2010, 34(15):69-75.
- [4] Baille J C, Lopez S, Bonachela J I, et al. Night energy balance in a heated low-cost plastic greenhouse[J]. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(1-2):107-118.
- [5] Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation[J]. *Solar Energy*, 1960, 4(3):1-9.
- [6] Abdel-Ghany A, Kozai T. On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat transfer[J]. *Ener-*

- gy Conversion and Management, 2006, 47(15/16):2612-2628.
- [6] Papadakis G, Frangoudakis A, Kyritsis S. Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover[J]. *Agricultural Engineering Research*, 1992, 51:191-205.
- [7] Berroug F, Lakhal E K, El Omari M, et al. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(11):3027-3035.
- [8] 李明, 魏晓明, 周长吉, 等. 发泡水泥对日光温室黏土砖墙保温蓄热性能的改善效果[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(24):187-192.
- LI Ming, WEI Xiao-ming, ZHOU Chang-ji, et al. Improving effect of heat insulation performance of brick wall thickened with foam cement in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24):187-192.
- [9] 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):343-447.
- CHEN Qing-yun. Progress of practice and theory in sunlight greenhouse[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agriculture Science)*, 2008, 26(5):343-447.
- [10] 张泽平, 李 珠, 董彦莉. 建筑保温节能墙体的发展现状与展望[J]. *工程力学*, 2007, 24(增2):121-128.
- ZHANG Ze-ping, LI Zhu, DONG Yan-li. Development and prospects of heat preserving and energy conservation wall system in buildings[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(Suppl 2):121-128.
- [11] 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.
- LI Ming, WEI Xiao-ming, QI Fei, et al. Research progress in wall of solar greenhouse[J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2014, 51(6):1162-1170.
- [12] 杨仁全, 马承伟, 刘水丽, 等. 日光温室墙体保温蓄热性能模拟分析[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2008, 26(5):449-453.
- YANG Ren-quan, MA Cheng-wei, LIU Shui-li, et al. The imitation analysis of heat preservation and capability of the wall of solar greenhouse[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agriculture Science)*, 2008, 26(5):449-453.
- [13] 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 Hong-li, LI Xiao-ye, ZOU Zhi-rong. Application of brick wall with phase change rice husk in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(5):253-257.
- [14] Bhattarai P, Dhakal D R, Neupane K. Straw bale in construction of building and its future in India[J]. *Internal Journal of Modern Engineering Research*, 2012, 2(2):422-426.
- [15] Palermo M, Gil-Martin L M, Hernandez-Montes E. Refined compression field theory for plastered straw bale walls[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 58:101-110.
- [16] 傅志前. 不同密度的麦秸秆块墙导热系数试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(2):289-292.
- FU Zhi-qian. Experimental research on thermal conductivity of wheat straw-bale wall of different densities[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(2):289-292.
- [17] 周 成. 秸秆日光温室:中国, 201020108419. 6[P]. 2010-11-17.
- ZHOU Cheng. Straw-bale wall solar greenhouse:China, 201020108419. 6[P]. 2010-11-17.
- [18] 周长吉. 周博士考察拾零(五)草墙结构日光温室[J]. *农业工程技术(温室园艺)*, 2011(7):32-34.
- ZHOU Chang-ji. Straw-bale wall solar greenhouse[J]. *Agriculture Engineering Technology*, 2011(7):32-34.
- [19] 山东省农业科学院. 一种秸秆墙体日光温室:中国, 201220218206. 8[P]. 2012-12-19.
- Shandong Academy of Agricultural Science. A straw-bale wall solar greenhouse:China, 201220218206. 8[P]. 2012-12-19.
- [20] 黄红英, 武国峰, 孙恩惠, 等. 秸秆块墙体日光温室在苏北地区应用效果试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14):170-178.
- HUANG Hong-ying, WU Guo-feng, SUN En-hui, et al. Experimental research of straw bale for building solar greenhouse thermal insulation wall[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14):170-178.
- [21] 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.
- WU Guo-feng, HUANG Hong-ying, SUN En-hui, et al. Thermal property investigations for straw-bale wall and soil wall in solar greenhouse[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2015, 31(2):441-448.
- [22] 江苏省农业科学院. 日光温室的墙体:中国, 201520098563. 9[P]. 2015-06-12.
- Jiangsu Academy of Agricultural Science. Wall of solar greenhouse:China, 201520098563. 9[P]. 2015-06-12.
- [23] 中华人民共和国建设部. GB/T 50176—2002 民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- Ministry of Construction of PRC. GB/T 50176—2002 Thermal design code for civil building[S]. Beijing:China Standards Press, 2002.
- [24] 方 慧. 日光温室浅层土壤水媒蓄放热系统及其与热泵结合的试验研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2011.
- FANG Hui. Experimental investigation of superficial soil thermal release-storage(by water) combined with heat pump in solar greenhouse[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [25] 周玲玲, 张黎杰, 姜若勇, 等. 不同墙体材料的日光温室环境变化及其对辣椒产量与品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(2):339-340.
- ZHOU Ling-ling, ZHANG Li-jie, JIANG Ruo-yong, et al. Environmental change in different wall materials solar greenhouse and its affect on the yield and quality of pepper[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2014, 42(2):339-340.