

青海型主动蓄热日光温室应用性能分析

王昭 陈振东 邹志荣* 张勇

(西北农林科技大学 园艺学院,陕西 杨凌 712100)

摘要 针对日光温室后墙蓄热效率较低的问题,研究一种后墙主动蓄热的青海型日光温室。对青海型日光温室与普通日光温室室内温度、光照、地温及不同深度墙体温度进行测定,比较2种类型温室室内温度、湿度、作物生长指标及产量的差异。结果表明:青海型日光温室较普通日光温室,晴天夜间温度平均高2.1℃,阴天平均高0.9℃;湿度方面,青海型日光温室晴天白天平均低4.7%,夜间平均低2.6%,阴天白天平均低2.7%,夜间平均低2.2%;地温晴天平均高1.69℃,阴天平均高0.59℃;青海型日光温室墙体的蓄热层深度为320~520mm;青海型日光温室中番茄株高、茎粗等生长指标略优于普通日光温室,番茄采收期产量提高17.8%。

关键词 主动蓄热;地温;湿度;株高;茎粗;产量

中图分类号 S625.1

文章编号 1007-4333(2017)08-0116-08

文献标志码 A

Application performance analysis on active heating storage greenhouse of Qinghai style

WANG Zhao, CHEN Zhendong, ZHOU Zhirong*, ZHANG Yong

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract In order to solve the problem of low efficiency of solar greenhouses back wall, a new heating storage type solar greenhouse was built in alpine areas. The experimental greenhouse and an ordinary solar greenhouse were measured in The indoor temperature, soil temperature and different parts temperature of the back wall. The result showed that: Compared with ordinary greenhouse, the experimental greenhouse air temperature was 2.1℃ higher on average at night in clear day and 0.9℃ higher in overcast day; From the aspect of humidity, it was reduced by 4.7% on average in day and 2.6% at night in clear day. While in overcast day, it was reduced by 2.7% on average in day and 2.2% at night; Soil temperature of the experimental greenhouse was 1.69℃ higher on average in clear day and 0.59℃ higher in overcast; Heat storage layer was 320 – 520 mm depth of the wall. During tomato growth period, the advantages in tomatoes height and stem diameter were obvious. The yield of tomato in the heating storage type solar greenhouse was 17.8% higher than the ordinary greenhouses.

Keywords active heating storage; soil temperature; humidity; plant height; stem diameter; yield

日光温室是我国北方冬季作物生产必不可少的农业设施,热环境调控能力是评价温室性能的重要指标,日光温室后墙具有保温蓄热功能,后墙性能的优劣直接影响着温室内部的热环境。已有研究^[1-4]将硬脂酸正丁酯/聚苯乙烯、磷酸氢二钠等相变蓄热材料及聚苯乙烯^[5]、秸秆^[6]等应用到后墙提高了墙体的保温蓄热性能。马承伟等^[7]建立了评价温室墙

体保温蓄热性能的指标与墙体放热量计算方法。还有研究^[8]采用 MATLAB 模拟日光温室土质墙体各点的温度及热流的方法,发现墙体内侧存在对室内热环境有积极作用的有效蓄热层。从结构方面对后墙进行改良^[9-12]也是近些年来热门研究,孙维拓等^[13]设计了一套主动蓄放热-热泵联合加温系统,该系统可以将白天后墙获得辐射能储存到蓄水

收稿日期:2016-05-26

基金项目:陕西省科学技术研究发展计划项目(2015NY055);杨凌示范区农业科技示范推广能力提升项目(2014-TS-06)

第一作者:王昭,硕士研究生,E-mail:wangzhao9199@126.com

通讯作者:邹志荣,教授,博士生导师,主要从事设施农业研究,E-mail;zouzhirong2005@163.com

池,在夜间气温较低时放热。

经过查阅多方资料及实地调研发现,日光温室本身的蓄热性能未能充分发挥,有效蓄热层仅为 0.5 m ^[14-15],针对这一现状,本研究设计拟一种基于太阳能光伏板提供电能的青海型主动蓄热后墙日光温室,并对该温室的热环境及后墙蓄热性能与普通日光温室进行比较,以期探明青海型主动蓄热后墙日光温室的应用效果。

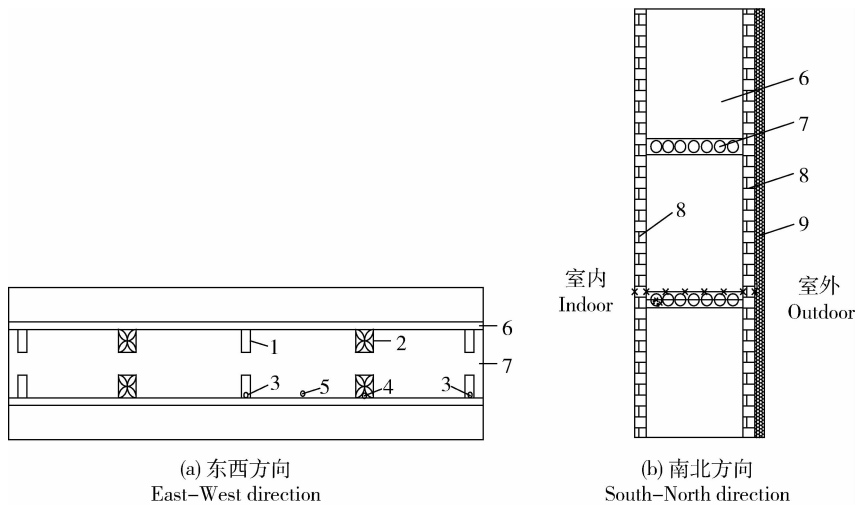
1 材料与方法

1.1 试验温室

对照日光温室即普通日光温室,坐北朝南跨度 9.0 m ,长 60.0 m ,脊高 4.2 m ,后墙高 3.7 m ,后墙结构由靠近温室内部到室外依次为 120 mm 砖墙、 $1\ 000\text{ mm}$ 厚固化土层、 120 mm 砖墙、外侧 50 mm 的聚苯乙烯保温板。

试验温室即青海型主动蓄热后墙日光温室,除后墙以外的其他结构与对照温室相同,后墙各部分结构见图1:在保温蓄热层距地面 1.2 、 2.7 m 处分别按东西走向平铺一层孔径 80 mm 的混凝土预制板为风道,厚度 120 mm ,宽度 600 mm ,两行相连置于黏土层,高 1.21 m 的位置,根据前期研究,将每段风道长度设置为 $<20\text{ m}$ ^[16],距东西山墙 1.5 m 处及后墙中间位置各设置1个 $300\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 的进风口,风机的设计参数为额定功率 0.37 kW ,全压 230 Pa ,静压 160 Pa ,额定转速 $2\ 800\text{ r/min}$,风量为 $3\ 000\text{ m}^3/\text{h}$ 。风机在两处进风口的中间。风机的电能由安置于温室顶层的光伏板提供,根据传热学原理将热空气与后墙内部进行热交换^[17]。

试验温室及对照温室均位于青海省海东市乐都区(北纬 $36^{\circ}28'$,东经 $102^{\circ}24'$)的乐都农业试验示范站。



1. 进风口;2. 风机(出风口);3. 进风口测点;4. 出风口测点;5. 后墙测点;6. 黏土层;7. 混凝土预制楼板;8. 砖墙;9. 聚苯乙烯保温板

1. Air inlet; 2. Fan (air outlet); 3. Air inlet measuring point; 4. Air outlet measuring point; 5. Wall measuring point; 6. Precast concrete floor slab; 7. Clay layer; 8. Brick wall; 9. EPS layer

图1 试验温室后墙剖面图

Fig. 1 Profile of back wall in experimental greenhouse

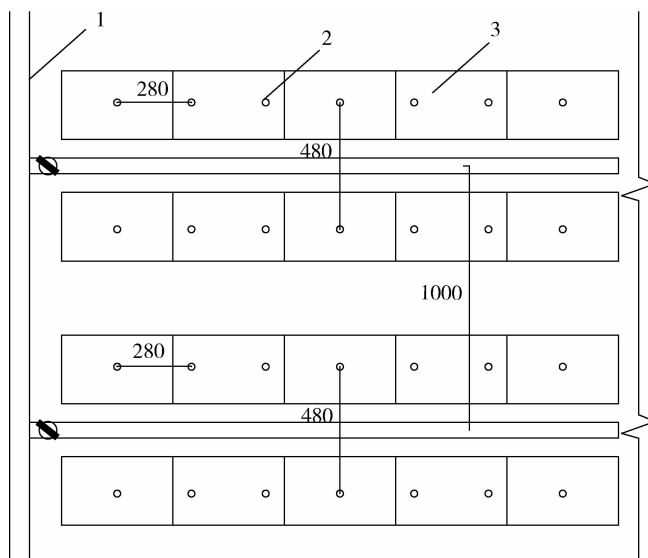
1.2 试验设计

在温室东西的对称面,距后墙 3 m 和 6 m ,高度 1.5 m 处各布置1套温光湿探头;室外距前屋面底脚 2.5 m ,高度 1.5 m 处布置1套温光湿探头;温室中心距地表 15 cm 处布置温度探头;在后墙下部的预制板的上下表面每隔 20 cm ,布置1个温度测试探头于距后墙温室内侧面 50 cm 的黏土层内;同时从内侧后墙表面开始沿着进入后墙方向,深度 0 、

120 (砖层与黏土层交界处)、 320 、 520 、 720 、 920 、 $1\ 120$ (砖层与苯板层交界处)、 $1\ 240\text{ mm}$ 处下部紧贴预制板上方的黏土层内布置1个温度探头。温湿测试仪选用哈尔滨物格电子技术有限公司的PDE-KI数字记录仪,测量范围 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度测试仪为哈尔滨物格电子技术有限公司的PDE-R4数据记录仪,测量范围 $-30\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,记录仪的测试间隔均设为 10 min/次 。

株高测定为基质袋上表面至番茄苗顶端生长点之间的高度,茎粗测定第一序花往下约3 cm位置的茎的粗度。第一次测量为定植后的25 d,之后每20 d测量1次,直至2016-01-30摘顶前进行最后一次测量,共测量5次。株高测量选用帕斯特钢卷尺,测量范围0~500 cm,精度0.1 cm;茎粗测量选用上海九量五金工具有限公司的沪工游标卡尺,测量范围0~150 mm,精度0.01 mm;测量番茄单果质量、单株产量,并预估总产量。2座日光温室室内栽培的番茄均留3穗果,并统一进行摘顶,每行选择6株长势一致、果实大小均匀的植株进行单果重测定,并根据单位面积果数计算产量。

风机由光伏板自动供电,晴天开启时间8:40—9:30,关闭时间17:30—18:00;阴天开启时间9:00—12:00,关闭时间15:00—17:00,测试日期为2015-11-22—2016-02-28,9:00揭开保温被,18:00盖上保温被,选取2016-01-14(典型晴天),2016-01-12(典型阴天)作为分析对象。2016-01-14风机工作时间为9:15—17:55,2016-01-12为9:30—16:20,2座温室均种植作物品种为金棚M6088番茄。番茄栽培方式采用280基质袋培,栽培密度6.75株/m²。选择滴灌水肥综合管理方式灌溉,株距280 mm,窄行距480 mm,宽行距1000 mm。具体定植方式见图2。



1. 滴灌带 Drip irrigation belt; 2. 植株 Plant; 3. 基质袋 Substrate bag

图2 试验温室及对照温室番茄定植分布图

Fig. 2 Distribution map of tomato colonizations experimental greenhouse and ordinary greenhouse

2 结果与分析

2.1 室内外热环境变化趋势

表1示出测试期间室内外气温变化趋势。可以看出:晴天,9:00(揭开保温被)—12:00,试验温室平均温度低于对照温室0.7℃,12:00—15:00,2座温室温度升高基本一致接近27℃,15:00—18:00,试验温室高于对照温室0.8℃;夜间试验温室高于对照温室2.1℃,反映试验温室的保温蓄热性能优于对照温室。阴天温度变化趋势与晴天相似,9:00—12:00,试验温室比对照温室低0.9℃,由于阴天室外光照强度较低试验温室通风效果较弱,12:00—15:00,试验温室低于对照组0.5℃,15:00—18:00,

试验温室高于对照0.6℃,夜间试验温室高出对照组0.9℃。

温室内的湿度对作物的花药、花粉的正常发育有影响,高湿环境会造成花药开裂,花粉萌发受抑制等情况^[18],并且还还为白粉病、霜霉病和灰霉病的产生提供条件。总体上看,阴天时2座温室湿度高于晴天,同一时间对照温室高于试验温室。12:00—18:00,试验温室湿度低于对照温室7%~2%,2座温室湿度均低于75%,18:00(盖保温被)至次日12:00湿度均高于75%,盖保温被期间湿度达到全天最大,试验温室低于对照温室1.1%~2.6%,湿度在89%~95%。根系与土壤直接接触,因此地温影响根系的正常生长发育^[19-20],地温全天波动小,试

验温室地温晴天平均提高 1.69 °C，阴天平均提高 0.59 °C。晴天夜间地温，试验温室高于对照温室

1.3 °C，阴天试验温室高于对照温室 0.8 °C，地温最高值出现在 15:00—18:00。

表 1 测试期间室内外环境变化趋势

Table 1 Change trend of indoor and outdoor thermal environment during the test period

天气条件 Weather condition	时间 Time	试验温室 Test greenhouse			对照温室 Control greenhouse			室外 Outdoor		
		室温/°C	湿度/%	地温/°C	室温/°C	湿度/%	地温/°C	室温/°C	湿度/%	地温/°C
		Indoor	Humidity	Soil	Indoor	Humidity	Soil	Indoor	Humidity	Soil
晴天 Clear day	9:00—12:00	22.7	75.1	14.7	23.4	78.2	13.1	-3.2	49.7	-4.4
	12:00—15:00	27.0	52.8	15.3	27.3	59.1	14.2	1.6	35.6	-4.0
	15:00—18:00	17.9	61.1	16.6	17.1	65.0	15.3	-0.5	53.1	-3.8
	18:00—次日 9:00	14.3	89.2	15.2	12.2	91.8	13.3	-9.8	67.3	-4.9
阴天 Overcast	9:00—12:00	20.3	79.3	13.8	21.2	81.1	13.6	-4.6	53.6	-5.0
	12:00—15:00	24.8	59.3	14.1	25.3	63.6	14.0	-1.1	42.3	-4.7
	15:00—18:00	15.7	72.1	14.8	15.1	74.2	14.4	0.4	57.0	-4.4
	18:00—次日 9:00	12.8	92.1	14.0	11.9	94.3	13.2	-10.2	72.2	-5.2

2.2 典型天气室内外气温及地温

由室内外不同天气条件下室温测试结果(图 3)可以看出,晴天,在保温被关闭期间,试验温室较对照温室平均高 2.19 °C,9:00 后两者温差逐渐减小,13:30 温度达到峰值时,试验温室温度低于对照温室 1.29 °C(图 3(a));阴天,保温被关闭期间,试验温室室温平均比对照温室高 0.87 °C,10:00—13:00,试验温室温度低于对照温室(图 3(b))。从 2 座温室的变化趋势可以发现,试验温室在夜间可以释放更多的热量,保温性能更好,在白天,主动蓄热系统工作时试验温室温度较低,说明后墙储存了更

多的热量。综上可以看出,试验温室在蓄热性能上优于对照温室。

晴天,室内地温波动明显高于室外,室内外变化趋势相似,试验温室地温平均比对照温室高 2.20 °C,温差最小出现在 17:00 左右,且从主动蓄热系统运行开始试验温室地温增长的趋势要略低于对照温室(图 4(a)),表明该系统的能量储存效果开始显现;阴天,试验温室地温高出对照温室 1.72 °C(图 4(b)),温差较晴天时少,主要原因是:阴天天光辐射较弱,温室内收到的短波辐射较弱,造成温室内温度较低,而光辐射也造成温室主动蓄热系统的工作效率降低。

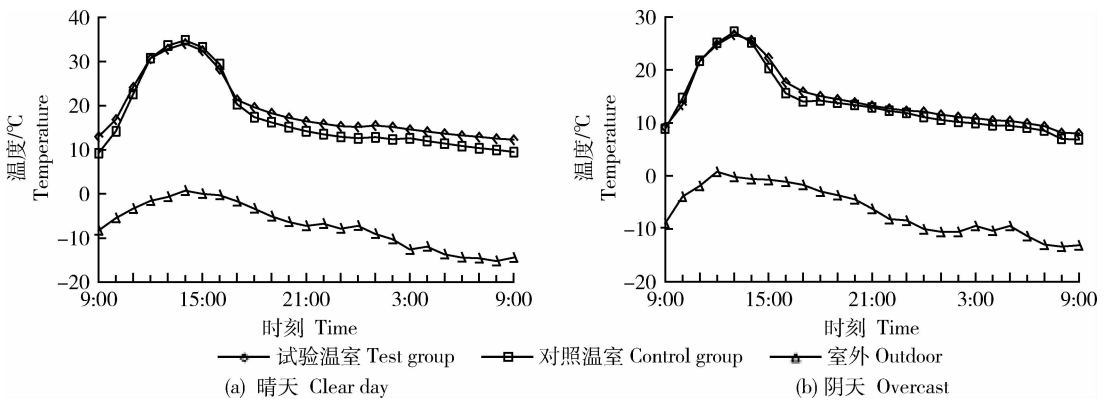


图 3 试验温室和对照温室内温度及室外温度

Fig. 3 Experimental and control greenhouses indoor temperature and outdoor temperature

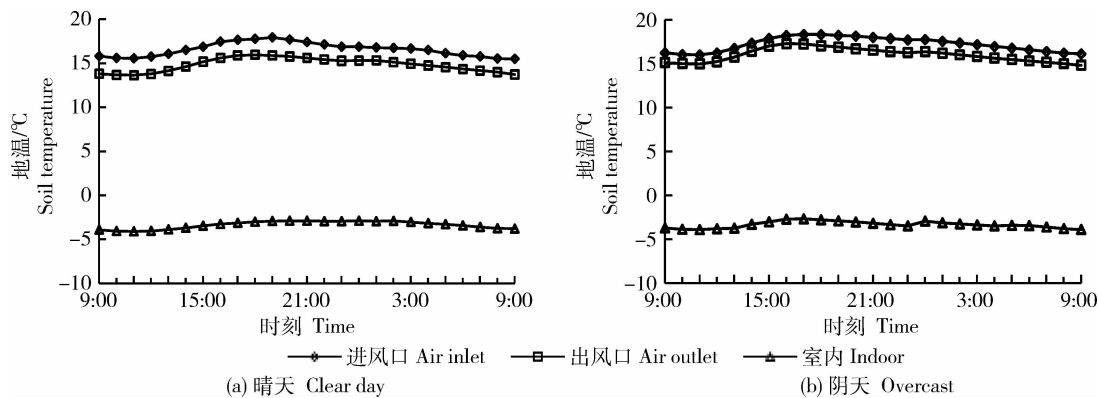


图4 试验温室和对照温室室内地温及室外地温

Fig. 4 Experimental and control greenhouses indoor temperature and outdoor soil temperature

2.3 典型天气室内外空气湿度变化趋势

晴天, 9:00—12:00, 试验温室及对照温室室内湿度快速降低, 试验温室以每小时 11.6% 的速度下降, 对照温室速度为每小时 8.1%, 原因是此时室外光照开始变强, 风机的运行加快了空气的流通, 将温室中间的水分均匀分布, 说明风机的运行增强空气流动的效果明显; 12:00—16:00, 试验温室空气相对湿度稳定在 42%~47%, 对照温室在 52%~54%, 在这个阶段试验温室相对湿度低于对照温室, 最大差值为 8.92%。这是由于温室内气温较高, 为调节温度, 顶通风开启室内外空气的流动加快, 故此时也

为室内外的相对湿度差最小的阶段, 最小差值为 1.4%。16:00—18:00, 试验温室相对湿度以 13.6% 的速度升高。夜间相对湿度保持稳定, 试验温室低于对照温室约 5.2%, 保温被关闭期间, 试验及对照温室空气相对湿度变化较小, 波动幅度在 11% 以内 (图 5(a))。阴天与晴天相比, 2 座温室内空气相对湿度差值较小, 试验温室平均比对照温室低 2.79%, 对照温室与室外相对湿度差较大, 夜间 21.6% 左右; 9:00—12:00, 试验及对照温室相对湿度差并未出现明显增大 (图 5(b))。可以看出主动蓄热系统的运行, 起到了加快空气流动降低温室相对湿度的作用。

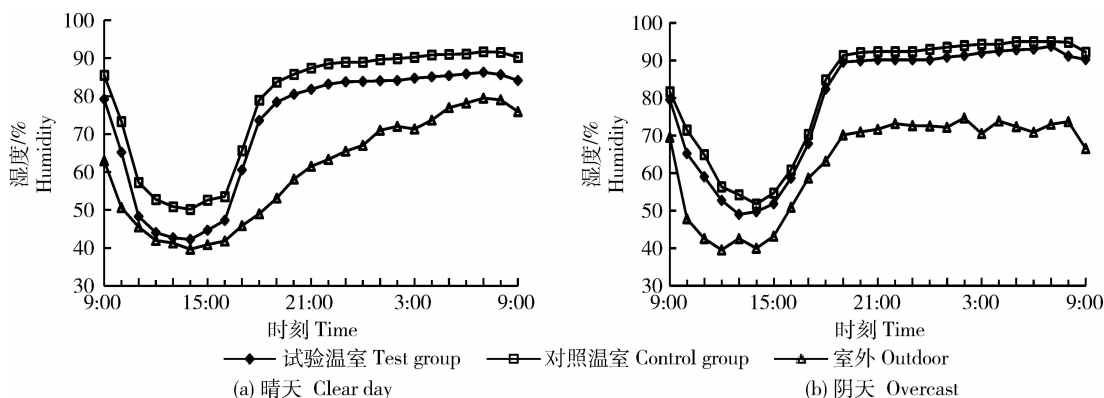


图5 试验温室、对照室内湿度及室外湿度

Fig. 5 Experimental and control greenhouses indoor humidity and outdoor humidity

2.4 典型天气墙体内部温度变化趋势

晴天 9:00—18:00, 外界光强逐渐提高, 风机开始运行, 入口温度低于室内 0.2~1.6 °C; 出口温度变化趋势与入口及室温相似, 但波动更加平缓, 主动蓄热系统对室温的调节效果随室温升高而增强,

14:00, 主动蓄热系统对室温的调节效果达到最佳, 最大值 3.6 °C (图 6(a))。阴天, 室外光强较弱, 风机运行速度降低及运行时间变短, 11:00—15:00, 主动蓄热系统效果发挥作用, 11:00, 系统的室温调节效果达到最佳, 最大值 3.1 °C (图 6(b))。后墙主动

蓄热系统停止工作时，出入口温度处于相对稳定的状态，出入口温差在±1.5℃范围内，表明出入口的

位置对其温度影响并不明显。不同天气条件下，室温最高时系统运行最高效。

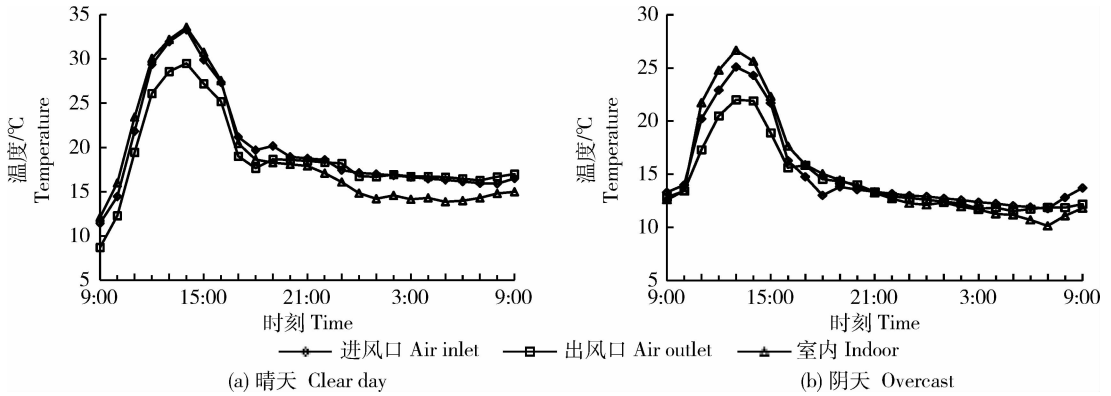
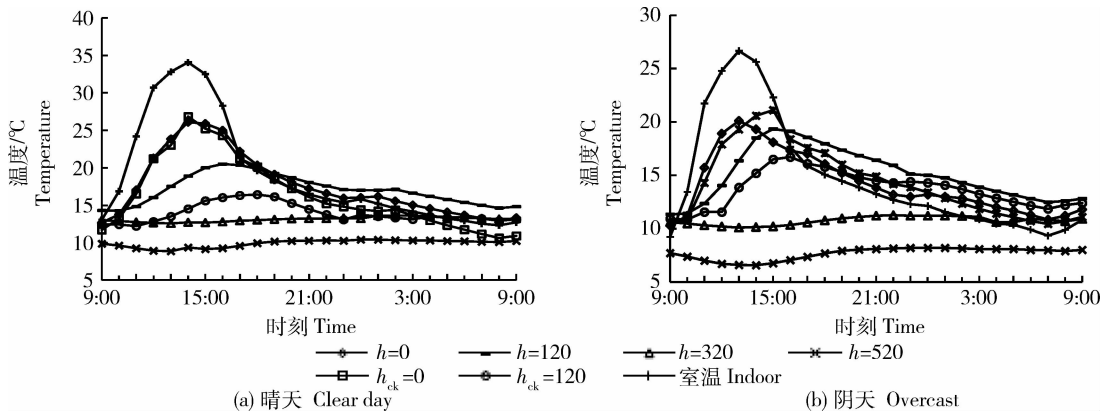


图 6 试验温室进、出风口温度及室内温度

Fig. 6 Indoor, air inlet and air outlet temperature in experimental greenhouse

图 7 示出试验温室及对照温室后墙不同深度温度与室温的变化，不同天气条件下 2 座温室后墙表面及 120 mm 深处温度波动明显。晴天，5:00—9:00，试验温室后墙 320 mm 层温度平均高出室温 0.6℃，9:00，后墙表面及 120 mm 深处分别平均高出室温 0.7、1.3℃；9:00—18:00，试验温室后墙温度始终低于室温，后墙 120 mm 深处试验温室波动大于对照温室，此阶段 2 座温室后墙均处于蓄热阶段(图 7(a))。阴天，5:00—9:00，试验温室后墙

320 mm 深处平均高出室温 1.2℃，9:00，后墙表面及 120 mm 深处分别高出室温 1.1 和 2.2℃；9:00—18:00，后墙 120 mm 深处试验温室温度波动大于对照温室，两者差异小于晴天，16:00 开始，后墙表面及 120 mm 深处开始高于室温；(图 7(b))。试验温室 120 mm 深处后墙起到保温蓄热效果优于对照温室，试验温室阴天后墙保温效果优于晴天，放热时间长于晴天，320~520 mm 深处为保温蓄热层。



h 、 h_{ck} 分别为试验温室和对照温室后墙深度，mm。

h and h_{ck} are respectively wall depth of experimental greenhouse and wall depth of control greenhouse, mm.

图 7 试验温室和对照温室不同深度后墙温度及试验温室室温

Fig. 7 Temperature at different depth of wall in two types of greenhouses and their indoor temperatures

2.5 番茄生长状况对比

2.5.1 番茄生长指标对比

2015-11-20—2016-01-30 每 20 d 测 1 次数据，可以看出：随着时间变化，试验温室内番茄的株高和

茎粗长势均强于对照温室内的番茄。在测量初期试验温室番茄的株高优势明显，2015-11-20 试验温室较对照温室番茄高出 17%，2015-12-10 较对照温室番茄高出 10.2%。在测试后期试验温室内番茄茎

粗优势逐渐加大,2016-01-30 试验温室较对照温室番茄茎粗提高 11%。试验温室内番茄开花时间为 2015-11-19,较对照温室提前 3 d。番茄作为一种喜

温、喜光的茄果类蔬菜,开花期提前一定程度上说明在青海地区冬季试验温室温光效果略优于该地区的对照温室。

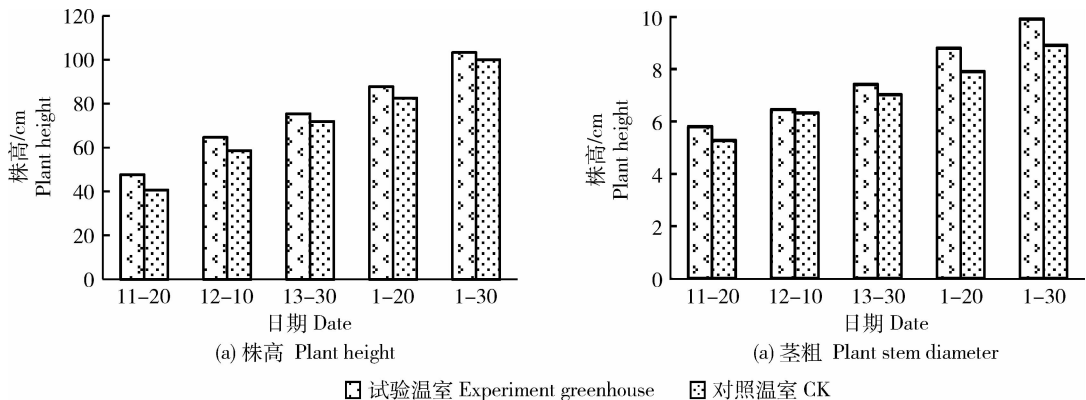


图 8 试验温室及对照温室作物株高及茎粗

Fig. 8 Plant height and stem diameter in two greenhouses at different stages

2.5.2 番茄产量对比

在番茄的栽培条件及管理方式相同条件下,试验温室的番茄平均单果重为 0.113 kg,产量为 8.71 kg/m² 较对照温室均提高 17.8%。

3 结论

本课题组研发了一种后墙内主动蓄热的新型日光温室,将新型日光温室的环境指标以及温室内作物的生长指标与典型日光温室进行对比,可以得出以下结论:

1)晴天夜间新型日光温室较普通日光温室温度平均提高 2.1℃,阴天夜间提高 0.9℃,保温性能优良,且蓄热性能较好。白天新型日光温室的主动蓄热系统的运行对室内温度的调节效果不明显。

2)蓄热系统的运行加快了温室内的空气流动,起到了除湿的效果,12:00—15:00 除湿效果达到最佳,晴天相比于普通日光温室平均湿度降低 6.3%,夜间平均湿度降低 2.6%,阴天平均降低 4.3%,夜间平均降低 2.2%,对作物的霜霉病、灰霉病等有防治效果。

3)新型日光温室地温晴天平均高于普通日光温室 1.69℃,阴天平均高于普通日光温室 0.59℃。

4)新型日光温室后墙的蓄热层深度在 320~520 mm,且阴天蓄放热效果明显优于晴天。

5)新型日光温室番茄的株高和茎粗较普通日光温室均有优势。番茄产量提升 17.8%。

参考文献 References

- [1] 王宏丽,王朋,邹志荣. 硬脂酸正丁酯/聚苯乙烯定形相变材料实验[J]. 太阳能学报,2010,31(11):1471-1474
Wang H L, Wang P, Zou Z R. Experimental investigation of butyl stearate/polystyrene composite as form-stable PCM[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2010, 31(11): 1471-1474 (in Chinese)
- [2] 杨小龙,王宏丽,许红军,韩丽蓉. 磷酸氢二钠相变墙板在温室中的应用效果[J]. 上海交通大学学报:农业科学版,2014,32(4):88-94
Yang X L, Wang H L, Xu H J, Han L R. Performance of phase change thermal storage wallboard of disodium hydrogen phosphate dodecahydrate in solar greenhouse[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2014, 32(4): 88-94 (in Chinese)
- [3] 李凯,宋丹,王宏丽,裘莉娟. 日光温室瓶胆式相变墙体热性能研究[J]. 北方园艺,2013(5):40-42
Li K, Song D, Wang H L, Qiu L J. Thermal performance analysis of the cavity wall with PCM of solar greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2013(5): 40-42 (in Chinese)
- [4] 张勇,邹志荣,李建明,胡晓辉. 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 Y, Zou Z R, Li J M, Hu X H. Preparation of the small concrete hollow block with PCM and its efficacy in greenhouses [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 263-267 (in Chinese)
- [5] 李明,周长吉,丁小明,魏晓明,黄尚勇,何衍萍. 日光温室聚苯乙烯砖复合墙保温蓄热性能[J]. 农业工程学报,2016,32(1):200-205
Li M, Zhou C J, Ding X M, Wei X M, Huang S Y, He Y P. Heat insulation and storage performance of polystyrene-brick

- composite wall in Chinese solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1):200-205 (in Chinese)
- [6] 武国峰,徐跃定,常志州,孙恩惠,黄红英. 秸秆块墙体日光温室保温蓄热性能分析[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(12):2402-2409
Wu G F, Xu Y D, Chang Z Z, Sun E H, Huang H Y. Heat-insulating performance of straw-bale wall solar greenhouse[J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2015, 34(12):2402-2409 (in Chinese)
- [7] 马承伟,卜云龙,籍秀红,陆海,邹岚,王影,李睿. 日光温室墙体夜间放热量计算与保温蓄热性评价方法的研究[J]. *上海交通大学学报:农业科学版*, 2008, 26(5):411-415
Ma C W, Piao Y L, Ji X H, Lu H, Zou L, Wang Y, Li R. Method for calculation of heat release at night and evaluation for performance of heat preservation of wall in solar greenhouse[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2008, 26(5):411-415 (in Chinese)
- [8] 彭东玲,杨其长,魏灵玲,张义,方慧. 日光温室土质墙体热流测试与分析[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(2):168-173
Peng D L, Yang Q C, Wei L L, Zhang Y, Fang H. Measurement and heat flux analysis on northern wall in Chinese solar greenhouse[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(2):168-173 (in Chinese)
- [9] 刘艳华,刘文合,于威,张玉清. 一种新型琴弦式日光温室的设计[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(10):483-486
Liu Y H, Liu W H, Yu W, Zhang Y Q. Design of Qinxian solar greenhouse[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(10):483-486 (in Chinese)
- [10] 韩丽蓉,王宏丽,李凯,杨小龙. 下沉式大跨度大棚型温室的设计及应用研究[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(4):161-165
Han L R, Wang H L, Li K, Yang X L. Design and application study on the sinking and great-span greenhouse without back wall[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(4):161-165 (in Chinese)
- [11] 陈紫光,陈超,凌浩恕,郑宏飞,管勇,张纪涛,李娜,孙保东,宫伦祥. 日光温室专用多曲面槽式太阳能空气集热器热工性能试验研究[J]. *建筑科学*, 2014, 30(8):58-63, 105
Chen Z G, Chen C, Ling H S, Zheng H F, Guan Y, Zhang J T, Li Na, Sun B D, Gong L X. Experimental study on thermal performance for the specialized multiple curved surfaces trough solar air collector dedicated to solar greenhouse[J]. *Building Science*, 2014, 30(8):58-63, 105 (in Chinese)
- [12] 殷学云,张国森,赵文怀,崔海成,杨茂元,蒋宏. 西北非耕地石砌墙下挖型日光温室建造施工技术[J]. *中国蔬菜*, 2013(11):50-52
Yin X Y, Zhao G S, Zhao W H, Cui H C, Yang M Y, Jiang H. Construction technology of stone sinking solar greenhouse Northern non-cultivated land [J]. *Chinese Vegetables*, 2013(11):50-52 (in Chinese)
- [13] 孙维拓,杨其长,方慧,张义,管道平,卢威. 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 W T, Yang Q C, Fang H, Zhang Y, Guan D P, Lu W. Application of heating system with active heat storage-release and heat pump in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19):168-177 (in Chinese)
- [14] 侯加林,王涛,蒋韬,王秀峰. 基于有限元分析日光温室土质墙体温度场模拟与验证[J]. *山东农业科学*, 2014, 46(4):1-4
Hou J L, Wang T, Jiang T, Wang X F. Simulation and verification of greenhouse soil wall temperature field by FEM analysis[J]. *Shandong Agricultural Science*, 2014, 46(4):1-4 (in Chinese)
- [15] 张勇. 西北日光温室传热学简化模型构建及温光高效新结构初探[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012
Zhang Y. Development and optimization of a new a new reduced simplified model of equilibrium thermodynamics& applied technology of high states of light and temperature in heliogreenhouse [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012 (in Chinese)
- [16] 张勇,高文波,邹志荣. 日光温室主动蓄热后墙传热 CFD 模拟及性能试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5):203-211
Zhang Y, Gao W B, Zou Z R. Performance experiment and CFD simulation of heat exchange in solar greenhouse with active thermal storage back-wall [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5):203-211 (in Chinese)
- [17] 苏亚欣. 传热学[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2009
Su Y X. *Heat Transfer* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009 (in Chinese)
- [18] 徐凡,马承伟,刘洋,宋道林. 天津一种典型砖墙日光温室热环境现状的测试与分析[J]. *中国农业大学学报*, 2013, 18(4):188-195
Xu F, Ma C W, Liu Y, Song D L. Thermal environmental status testing and analysis of a typical brick-wall solar greenhouse in Tianjin [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(4):188-195 (in Chinese)
- [19] Lamont W J. Plastics: Modifying the microclimate for the production of vegetable crops[J]. *Hort Technology*, 2005(15):477-481
- [20] 龚雪文,刘浩,孙景生,张昊,李勇,吴晓磊,崔嘉欣. 不同水分下限对温室膜下滴灌甜瓜开花坐果期地温的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10):2935-2943
Gong X W, Liu H, Sun J S, Zhang H, Li Y, Wu X L, Cui J X. Effects of irrigation threshold on soil temperature in blossom and fruit-set periods of muskmelon under mulching-drip irrigation in greenhouse [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10):2935-2943 (in Chinese)