



佟国红,王森,吴红爽,王晓桐,孙周平.日光温室附阴棚及保温对室内温度的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(02):99-109.

TONG Guohong, WANG Miao, WU Hongshuang, WANG Xiaotong, SUN Zhouping. Effects of heat preservation measure on indoor temperature for Chinese solar greenhouse with an attached tunnel[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(02):99-109.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.02.10

日光温室附阴棚及保温对室内温度的影响

佟国红¹ 王森² 吴红爽¹ 王晓桐³ 孙周平^{3*}

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866;

2. 辽宁省锦州市气象局, 辽宁 锦州 121001;

3. 沈阳农业大学 园艺学院, 沈阳 110866)

摘要 为探明保温措施对冬季日光温室室内温度的影响,采用对比试验的方法,分别测试了设置阴棚、阴棚覆盖保温被、附阴棚的日光温室墙体及前屋面保温被加强保温这3种措施下的日光温室温度及参照温室温度,重点关注早间及夜间温度的变化。结果表明:附阴棚日光温室与参照温室在外部温度低的早间及夜间气温平均相差一般在0.5℃以内,在外部温度高时二者气温差通常为1.0~4.0℃。阴棚覆盖保温被对日光温室增温效果不明显,1月早间及夜间最大差值为1.0℃。温室墙体及前屋面保温被加强保温的温室与具有相同阴棚设置的参照温室气温相比,早间及夜间二者在外温低的1月平均最大差值为4.2℃,在外温高的2月平均最大差值为6.5℃。研究结果对组合温室的设计建造、温室保温措施的选择以及温室管理具有参考价值。

关键词 日光温室; 温度; 塑料棚; 墙体; 保温被; 传热

中图分类号 S625

文章编号 1007-4333(2024)02-0099-11

文献标志码 A

Effects of heat preservation measure on indoor temperature for Chinese solar greenhouse with an attached tunnel

TONG Guohong¹, WANG Miao², WU Hongshuang¹, WANG Xiaotong³, SUN Zhouping^{3*}

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Meteorological Bureau of Jinzhou, Liaoning Province, Jinzhou 121001, China;

3. College of horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract To investigate the effects of the heat preservation measures adopted on the indoor air temperature of Chinese solar greenhouse (CSG) in this study, three testing cases, attaching a tunnel to CSG, covering the attached tunnel with an insulation blanket and strengthening insulation on the CSG wall with its south roof covered with a thermal blanket, were conducted for one testing CSG and one reference CSG. This study focuses on the comparison of morning and night temperatures. The results showed that: Under low outside air temperature, the average air temperature difference between the CSG with an attached tunnel and the reference CSG in the morning and night is generally within 0.5℃; When the external temperature is high, it is usually 1.0~4.0℃. The results also indicate that the indoor air temperature increment is not obvious for a CSG with a layer of blanket covering the attached tunnel than that in the reference CSG, with the maximum temperature difference of 1.0℃ presented in the morning and night in January. Compared with a reference CSG with the same attached tunnel, a CSG with strengthening insulation on the wall and thermal blanket has an average maximum difference of 4.2℃ in

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(32272005);国家大宗蔬菜产业技术体系项目(CARS-23-D01)

第一作者: 佟国红(ORCID:0000-0003-1946-9581),教授,主要从事设施园艺环境与工程研究,E-mail:tongguohong@syau.edu.cn

通讯作者: 孙周平(ORCID:0000-0002-0085-0342),教授,主要从事设施环境调控与设施蔬菜土壤障碍防控研究,E-mail:sunzp@syau.edu.cn

the morning and at night in January with the low external temperature; The average maximum difference is 6.5 °C in February with high external temperature. The findings in this study provide references for the design, construction, selection of insulation measures and CSG ventilation management.

Keywords Chinese solar greenhouse (CSG); temperature; plastic tunnel; wall; thermal blanket; heat transfer

室内温度在日光温室冬季生产中一直受到重视,提高冬季生产日光温室温度、尤其是提高夜间温度是日光温室设计及改扩建中重点关注的因素,为此各地采取了各种保温措施。但是,所采取的措施要适应我国设施园艺产业目前所处的初级发展阶段以及因地制宜、合理利用资源的发展原则^[1-2]。实践证明日光温室采取保温及增强蓄放热的措施可有效提升温室的热性能^[3]。

研究表明在日光温室围护结构中加强北墙的保温对提高温室温度效果最明显^[4]。有专家学者采用当地的材料建造蓄热保温的北墙^[5-6]、改善墙体构造形成对流循环蓄热中空墙体^[7-8]、建造新型墙体结构(如聚苯乙烯型砖复合墙^[9]及麦壳砂浆砌块^[10])、采用多层墙体^[11-12]、强化墙体蓄热的内保温水蓄热^[13]及微热管阵列蓄热^[14]等措施以加强北墙的蓄热保温效果。以上设计及建造采用的措施不同程度改进和提升了日光温室热性能,但新材料及新设计还需克服诸如建造成本、热能利用稳定性、技术成熟度以及技术普及等问题^[15]。

在日光温室保温设计中存在依靠传统日光温室的北墙搭建1个单屋面温室的组合温室^[16],这种组合温室称为阴阳型日光温室^[17]或双屋面日光温室^[18]。鉴于本研究中北向温室只由骨架及棚膜组成,下文对此组合温室表达为“附阴棚日光温室”。研究认为这种组合温室节省了建筑材料^[19]、提高了土地利用率^[20]、对温室的后墙起到隔热作用^[21]、减小了温室后墙的传热温差^[22]、避免了温室后墙直接接触外界温度而使阴棚与温室互作增温^[23]和增加了热能的利用^[24]。但是,附阴棚日光温室缺乏相应的标准和规范^[25],缺乏设计建造的理论依据^[26],还需对其进行深入研究。

在附阴棚日光温室热性能研究中,有专家学者在冬季^[27-30]及早春^[20,27,30]开展了试验温室及参照温室的温度对比试验,均得出附阴棚日光温室温度高于传统日光温室温度的结论,但在以上测试中二者相差的幅度各不相同。另外,在12月下旬至1月下旬的测试结果中,也出现了二者平均气温差异不明

显的现象^[18],需要进一步明确阴棚的设置对日光温室保温效果的影响。

研究不同保温措施下的附阴棚日光温室温度变化,可以了解保温措施对温室热性能的影响,阐明阴棚与日光温室温度变化之间的关联,进而揭示附阴棚日光温室热性能变化特点,厘清附阴棚日光温室温度的影响因素。本研究拟从日光温室附阴棚、阴棚覆盖保温被以及附阴棚日光温室墙体和保温被加强保温这3个方面进行测试,分析日光温室及参照温室的温度变化,以揭示日光温室附阴棚及保温对温室热性能的影响。

1 材料与方法

1.1 试验方案

本研究采用3个试验方案,如表1所示。第一个方案为设置阴棚的日光温室(A)与不设置阴棚的参照温室(A*)试验,第二个方案为阴棚覆盖保温被的日光温室(B)与阴棚不盖保温被的参照温室(B*)试验,第三个方案为附阴棚日光温室墙体及前坡保温被加强保温(下文称加强保温温室)白天通风(C₁)或不通风(C₂)管理与具有相同阴棚设置但白天不通风的参照温室(C*)试验。

1.2 供试温室及测试内容

1.2.1 供试温室

试验在沈阳农业大学科研基地(41.8°N, 123.4°E)进行。日光温室跨度8 m,长度60 m,脊高4 m,北墙高2.7 m。前屋面采光材料为日本产聚烯烃薄膜,夜间前屋面覆盖保温被,早8:30卷被,下午16:30放被。第一及第二个方案的试验温室及参照温室后墙(从内到外)为0.36 m砖墙+0.12 m苯板;第三个方案的试验温室(加强保温温室)后墙(从内到外)为0.36 m粉煤灰空心砌块墙+0.12 m苯板,参照温室后墙(从内到外)为0.12 m砖柱+0.24 m砖墙+0.12 m苯板。加强保温温室的粉煤灰空心砖苯板复合墙的保温性能优于参照温室的砖苯复合墙热性能^[31]。加强保温温室夜间除了覆盖与参照温室相同的保温被外,增加了一层0.04 m厚草帘。

表 1 试验方案

Table 1 Experimental scheme

方案 Case	温室 Greenhouse	阴棚		日光温室			时间 Time
		Attached tunnel		Chinese solar greenhouse			
		设置 Setting	覆盖保温被 Covered with blanket	前坡 South roof	墙体 Wall	放风 Ventilation	
1	A	有	无	BL	BS	是	2018-12-21—2019-03-01
	A*	无	无	BL	BS	是	
2	B	有	有	BL	BS	是	2019-12-31—2020-01-20
	B*	有	无	BL	BS	是	
3	C ₁	有	无	BL+ST	FS	是	2020-12-02—2021-03-01
	C ₂	有	无	BL+ST	FS	否	
	C*	有	无	BL	BS	否	

注：*表示参照温室；BL 表示一层保温被；ST 表示一层草帘；BS 表示砖苯复合墙；FS 表示粉煤灰空心砖苯板复合墙。

Note: * means reference greenhouse; BL means one layer blanket; ST means one layer straw; BS means brick-styrofoam board composite wall; FS means fly ash hollow brick-styrofoam board composite wall.

第一个方案测试期间试验温室及参照温室室内种植草莓,草莓叶面积指数为 0.8~1.2;第二个方案试验温室及参照温室测试期间室内种植草莓,草莓叶面积指数为 1.0;第三个方案试验温室及参照温室室内无作物。各方案日光温室的阴棚附在温室北墙外侧,跨度为 6 m,阴棚内部在各方案测试期间无作物。

1.2.2 测试内容

第一个方案测试内容为日光温室中间的跨中距地面 1 m 高空气温度、距后墙内表面 0.03 m 空气气温以及墙表面温度,第二个方案测试日光温室中间的跨中距地面 1 m 高空气温度,第三个方案的日光温室及阴棚的空气温度和墙表面温度测点如图 1 所示。室外气象参数由科研基地室外气象站提供。

选用 testo174T 型温度自动记录仪(德图仪器国际贸易(上海)有限公司,中国)测试空气温度,精度为 ±0.2 ℃,测量范围为 -30~70 ℃;使用 testo176 T4 数据记录仪配套的 K 型热电偶测量墙表面温度,数据采集时间均为 10 min。

1.3 日光温室温度影响因素

日光温室设置阴棚、墙体及前坡保温、温室管理(中午放风及卷放保温被)等措施直接影响着温室内的空气温度。温室空气温度的变化,尤其是夜间空气温度的变化,可直观评价各种措施的保温效果。

日光温室墙体内表面温度与室内空气温度的差异导致墙体内表面与室内空气进行对流换热。单位

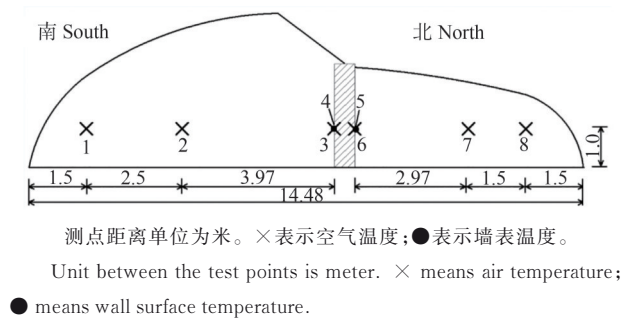


图 1 日光温室及阴棚温度测点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature test points in the greenhouse and the attached tunnel

时间、单位面积表面对流换热量计算公式^[32]如下:

$$q = \alpha_c (t_w - t_a) \tag{1}$$

$$\alpha_c = 1.98 \sqrt{t_w - t_a} \tag{2}$$

式中: q 为单位时间单位面积表面对流换热量, W/m^2 ; t_w 为壁面温度, $^{\circ}C$; t_a 为气温恒定区的空气温度, $^{\circ}C$, 本研究取近墙气温(距墙表 0.03 m 空气温度); α_c 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。

2 结果与分析

白天温室内部气温高时前坡扒缝放风,放风即刻影响室内气温的变化,使室内气温产生波动。下午盖帘后,室内空气温度逐渐趋近稳定。因此,了解温室附阴棚、阴棚盖保温被、附阴棚温室的墙体及保温被加强保温这 3 种措施下日光温室温度的变化,主要通过观察夜间(18:00~24:00)及次日早间

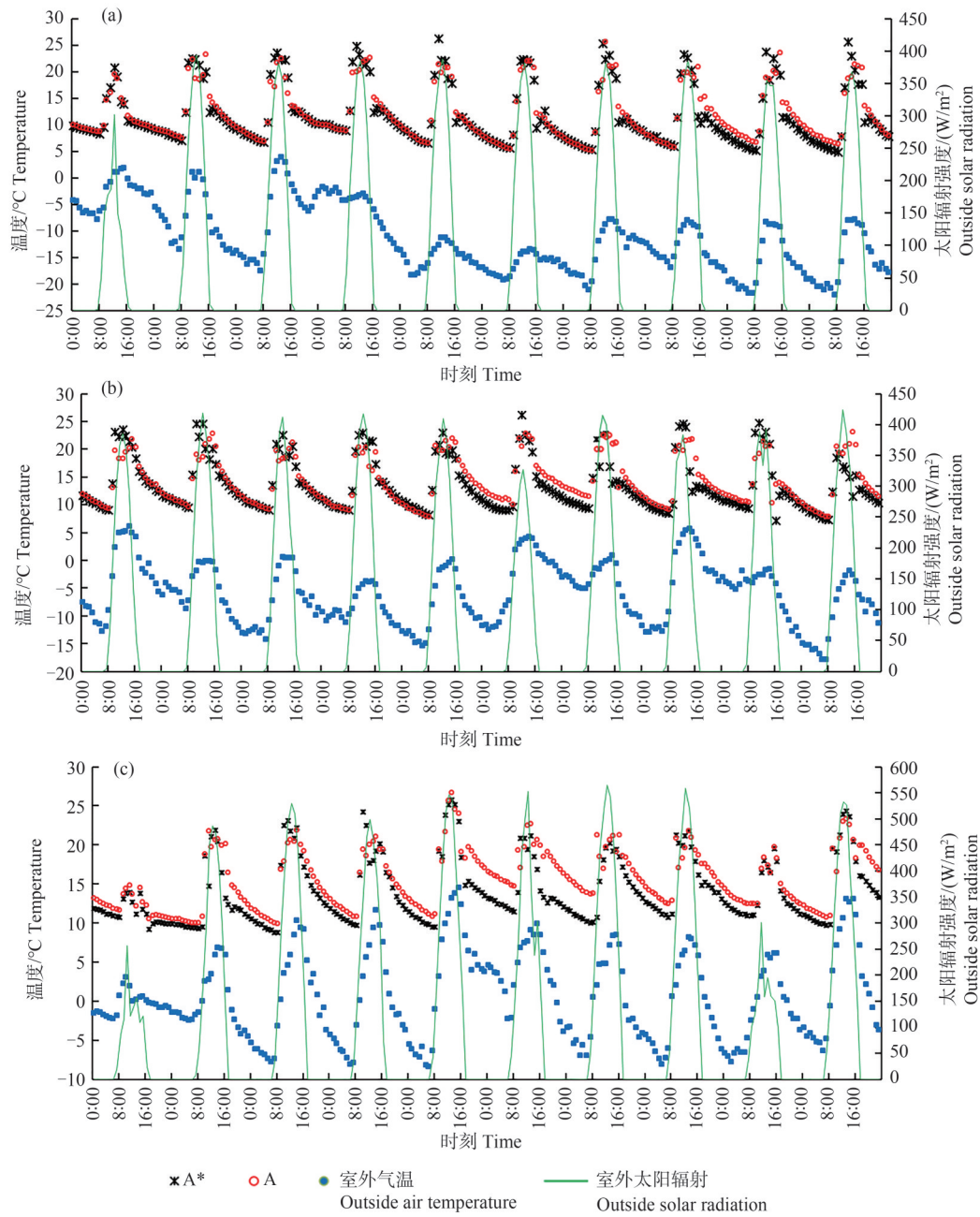
(0:00~8:00)的空气温度变化,从而分析保温措施对温室温度的影响。

2.1 附阴棚温室温度变化

2.1.1 温室空气温度

为了比较第一个测试方案中附阴棚日光温室

(A)与参照温室(A*)空气温度随外温的变化,选择测试期间2018年12月至2019年2月每月下旬10 d (2018-12-22—2018-12-31、2019-01-22—2019-01-31、2019-02-19—2019-02-28)的空气温度进行对比(图2)。



(a)2018-12-22—2018-12-31; (b) 2019-01-22—2019-01-31; (c) 2019-02-19—2019-02-28。

图2 有无阴棚日光温室空气温度的变化

Fig. 2 Air temperature variations inside greenhouses with and without attached tunnel

在每月下旬的温度测试结果中,12月下旬外部气温最低(图2(a)),2月下旬外部气温最高(图2(c)),

夜间及早间附阴棚温室与参照温室气温的差值在12月最小、2月最大。其中在12月测试的10 d中二

者气温平均差值主要波动范围为 $-0.1\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,只在12月29日夜存在一个最大差值为 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;而2月平均差值主要波动范围为 $1.0\sim 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,只在2月24日夜达到 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在12月测试的10 d中只有2 d的早间及夜间出现了附阴棚温室室温与参照温室室温差接近或高于 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况,而在2月这种情况则出现在全部的10 d。附阴棚的温室早间出现室温略低于参照温室室温的现象在12月有4 d(12月24日,12月26—28日),1月有1 d(1月25日),2月没有这种现象出现。测试结果反映出附阴棚对日光温室的保温效果与外部环境有关。

晴天白天中午扒缝放风导致室温下降,测试数据反映出刚盖帘后(17:00—18:00)附阴棚温室与参照温室的室温差与夜间及次日早间二者温差关联。比如12月24日、12月26—28日以及1月25日,在刚盖帘后,附阴棚温室的温度接近或低于参照温室的温度,则这种现象持续到次日早间。

2.1.2 温室墙内表温及对流热交换

日光温室的阴棚附建在温室北墙的外侧,阴棚对温室内的热影响通过后墙来实现。选择测试3个月中每月的1个晴天(2018-12-28、2019-01-28及2019-02-28)及多云天(2019-01-12—2019-01-13),观察附阴棚日光温室与参照温室墙内表温度及墙

内表对流变化(表2)。在室外气温低的晴天(2018-12-28)及多云天(2019-01-12—2019-01-13),附阴棚温室与参照温室墙内表温接近;而对于外温高的晴天(2019-02-28),附阴棚温室夜间及早间墙内表温均明显高于参照温室墙内表温,早间平均高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜间平均高 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明墙表温受到室外气温及天气的综合影响。

无论晴天或多云天,参照温室墙内表对流在早间及夜间都大于附阴棚日光温室墙内表对流(表2)。室外气温低的晴天或多云天的早间,参照温室墙表温略高,而附阴棚温室近墙气温略高,根据对流公式(1),参照温室墙内表比附阴棚日光温室墙内表向室内放出了更多的热量;此外,本研究的其他早间及夜间设置阴棚温室墙内表温及近墙气温都高于参照温室,且二者的近墙气温差高于墙内表温差。比如12月28日夜間二者的墙内表温差均值为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、近墙气温差均值为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,参照温室墙内表比设置阴棚的温室墙内表向室内多放出了 2.2 W/m^2 的热量。说明墙体内部对流值大小不能反映室内空气温度高低,也不能用墙内表对流值大小评判温室墙体对室内的热贡献从而决定阴棚设置的效果(图2和表2)。

2.2 阴棚保温温室温度变化

在第二个测试方案中,测试时间(2020-01-01—

表 2 附阴棚日光温室(A)与参照温室(A*)墙内表温及对流值

Table 2 Wall inside surface temperature and convective heat flux between wall inside surface and indoor air for greenhouses with (A) or without (A*) an attached tunnel

日期 Date	时刻 Time	室外气温均值/ $^{\circ}\text{C}$ Averaged outside air temperature	温室墙内表温均值/ $^{\circ}\text{C}$ Averaged wall inside surface temperature		温室墙内表对流均值/ (W/m^2) Averaged wall inside surface convective heat flux	
			A	A*	A	A*
2018-12-28	0:00~8:00	-18.8	10.9	11.0	8.9	9.8
	18:00~24:00	-11.9	16.2	16.0	12.6	14.8
2019-01-28	0:00~8:00	-4.2	13.9	13.5	5.4	6.3
	18:00~24:00	-9.1	19.9	17.7	11.4	11.8
2019-02-28	0:00~8:00	-4.3	14.2	12.7	4.2	4.3
	18:00~24:00	-0.2	20.8	18.5	6.9	7.4
2019-01-12	0:00~8:00	-4.4	12.7	12.8	4.7	5.6
	18:00~24:00	-3.3	13.2	13.1	4.7	5.7
2019-01-13	0:00~8:00	-3.3	11.2	11.2	3.1	3.9
	18:00~24:00	-8.8	12.9	12.5	5.2	6.1

注:2018-12-28、2019-01-28和2019-02-28为晴天,2019-01-12和2019-01-13为多云天。
Note: 2018-12-28, 2019-01-28 and 2019-02-28 are clear days, 2019-01-12 and 2019-01-13 are cloudy days.

2020-01-19)包含16个晴天和3个阴天,阴棚覆盖保温被温室(B)与参照温室(B*)气温变化如图3所示。当夜间及次日早间外温较低时,测试结果显示阴棚覆盖保温被的温室温度略低于参照温室温度,而其他日期夜间及次日早间阴棚覆盖保温被的温室气温接近或高于参照室内气温,最大相差1.0℃。可见,阴棚外覆盖保温被这种保温措施在外温低时并没有明显提高温室内温度。此外,测试结果还显示温室白天中午放风影响了二者夜间的温度。

2.3 日光温室保温温度变化

2.3.1 温室空气温度

第三个测试方案中加强保温温室采用了白天通风(C₁)或不通风(C₂)2种管理方式,与参照温室(C*)气温对比如图4所示。加强保温温室白天放风而参照温室白天不放风的温度对比如图4(a)所示。夜间存在参照温室室内气温稍高于加强保温温室气温的情况,二者之差为0.1~2.2℃。在12月22日与12月23日的0:00~4:00,参照温室气温比加强保温温室气温高0.1~0.4℃。加强保温温室尽管墙体和前坡保温性能优于参照温室,但因白天的放风使热量损失导致夜间温度低于参照温室。

在不同外部环境下,加强保温温室及参照温室白天均不放风的温度对比情况分别如图4(b)和4(c)所示。加强保温温室室内气温全天高于参照温

室,在1月外温低的夜间平均高2.6~3.7℃,早间平均高3.5~4.2℃(图4(b));在2月外温高时,夜间平均最大差值为6.5℃,早间平均最大差值为5.0℃(图4(c))。可见在相同管理条件下,后墙及保温被加强保温的温室增温明显。

2.3.2 阴棚气温与温室墙表温及对流换热

阴棚隔离了日光温室后墙外表面与外界的换热环境,阴棚同时与温室后墙及外部环境交换热量。阴棚空气温度与室外气温的相对变化及温室墙表温、墙表对流换热如表3所示。测试结果中出现了阴棚内的空气温度低于外部空气温度的情况,比如12月25日及2月25日2个晴天的早间及夜间,阴棚气温与外部气温平均最大相差2.4℃;多云天(2月13日)的早间二者差值也达到了1.0℃,表明温室后墙外表面所处的环境温度低于室外环境温度。此外,加强保温温室及参照温室的阴棚气温不等,说明阴棚气温不只受到外温的影响,也受到了日光温室后墙换热的影响(表3)。

处于相同的外界环境,加强保温温室所附阴棚气温接近或低于参照温室所附阴棚气温,说明参照温室的后墙散失了更多的热量。此外,加强保温温室内外墙表温差均大于参照温室的内外墙表温差,说明墙体能加强保温,有效降低了室内热量通过墙体的散失(表3)。

白天加强保温温室放风而参照温室不放风,比如12月25日,早间及夜间加强保温温室墙内表温

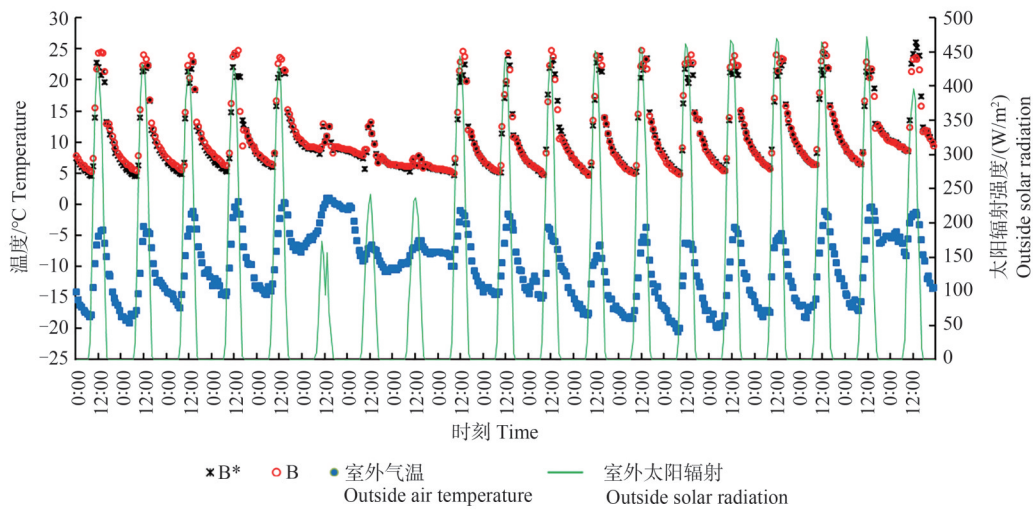
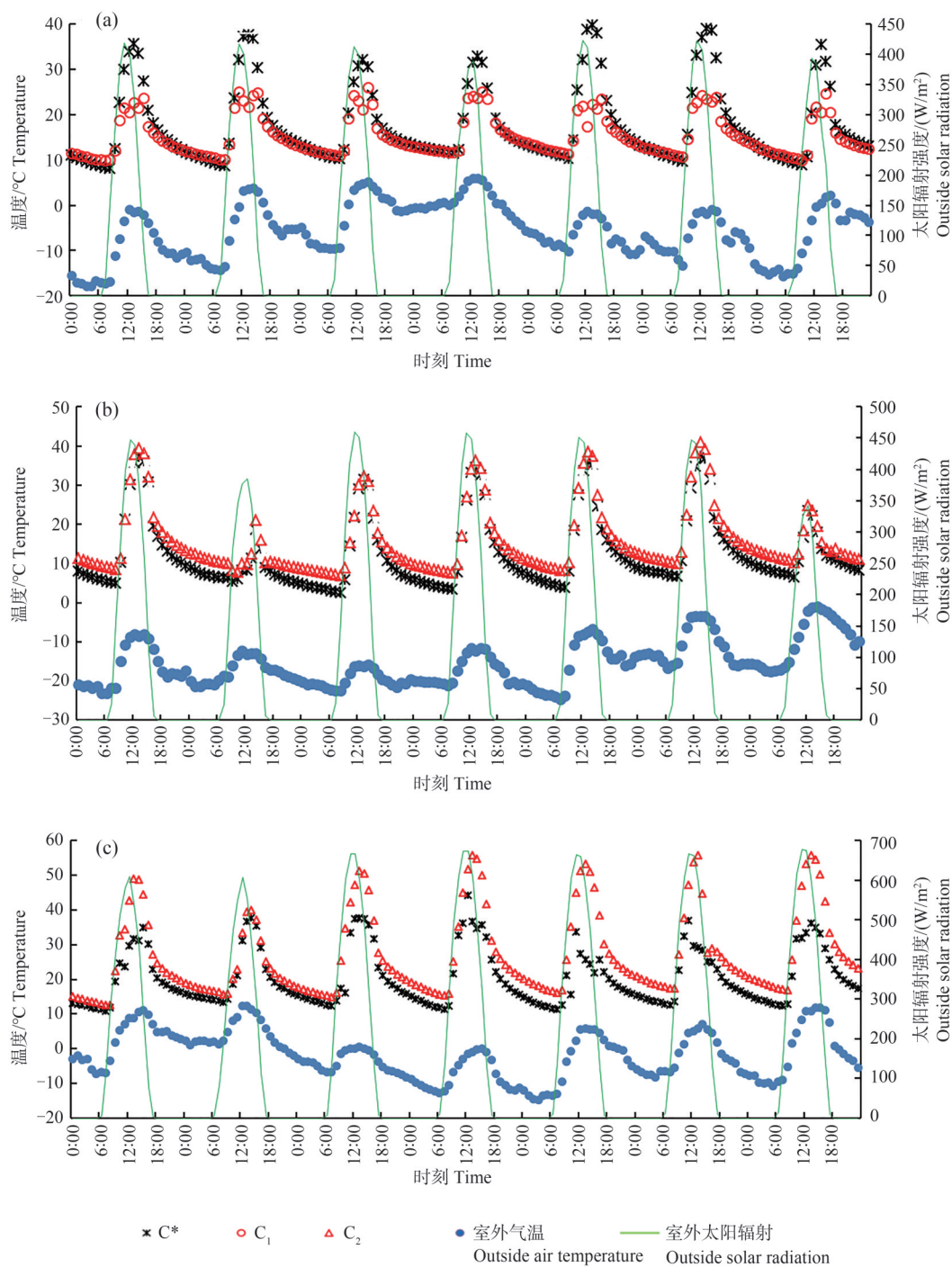


图3 阴棚覆盖保温被温室(B)与参照温室(B*)空气温度变化(2020-01-01—2020-01-19)

Fig. 3 Air temperature variations inside greenhouses with (B) and without (B*) thermal blanket covering the attached tunnel (2020-01-01—2020-01-19)



(a) C_1 与 C^* : 2020-12-20—2020-12-26; (b) C_2 与 C^* : 2021-01-05—2021-01-11; (c) C_2 与 C^* : 2021-02-20—2021-02-26。
 (a) C_1 and C^* : 2020-12-20—2020-12-26; (b) C_2 and C^* : 2021-01-05—2021-01-11; (c) C_2 and C^* : 2021-02-20—2021-02-26.

图4 加强保温日光温室温度变化

Fig. 4 Air temperature variations inside greenhouses by heat preservation

均值与参照温室墙内表温均值接近;而其他日期加强保温温室与参照温室白天均不放风,早间及夜间加强保温温室墙内表温均值都明显高于参照温室。这种现象说明温室白天中午放风,不仅降低室内空

气温度,同时也降低了温室墙内表温度。在12月25日的早间,加强保温温室墙内表对流值略小于参照温室,而其他早间及夜间加强保温温室墙内表对流值大于参照温室墙内表对流值(表3)。

表3 温室阴棚温度与墙表温及对流值

Table 3 Air temperature inside attached tunnel and wall inside surface temperature and convective heat flux from wall inside surface by greenhouse heat preservation

日期 Date	时刻 Time	室外气温 均值/℃ Averaged outside air temperature	阴棚气温均值/℃ Averaged attached tunnel air temperature		温室墙外表温均值/℃ Averaged wall outside surface temperature		温室墙内表 温均值/℃ Averaged wall inside surface temperature		温室墙内表对流 均值/(W/m²) Averaged wall inside surface convective heat flux	
			C ₁ /C ₂	C*	C ₁ /C ₂	C*	C ₁ /C ₂	C*	C ₁ /C ₂	C*
2020-12-25	0:00~8:00	-9.9	-10.8	-9.8	-8.0	-6.9	16.0	15.8	9.8	10.2
	18:00~24:00	-8.4	-10.1	-8.8	-7.3	-6.0	21.4	21.8	19.4	14.3
2021-01-08	0:00~8:00	-20.4	-19.0	-18.2	-15.9	-15.4	12.1	7.9	8.1	7.2
	18:00~24:00	-19.5	-17.9	-17.1	-14.9	-14.4	19.9	15.0	16.7	12.3
2021-02-25	0:00~8:00	-6.9	-7.8	-7.4	-4.3	-4.5	23.3	17.1	11.6	7.2
	18:00~24:00	-4.6	-7.0	-7.0	-3.3	-4.0	29.7	21.8	17.5	8.6
2021-02-13	0:00~8:00	0.1	-0.9	-0.5	1.5	1.7	20.0	18.1	9.0	6.8
	18:00~24:00	-0.1	0.3	0.4	2.1	2.1	16.8	15.3	5.2	4.1
2021-02-14	0:00~8:00	-3.1	-1.8	-1.9	0.1	-0.1	15.3	13.7	4.5	3.8
	18:00~24:00	-7.7	-4.6	-5.2	-2.7	-3.3	12.8	10.8	3.3	2.6

注:2020-12-25测试为方案C₁,其余日期的测试为方案C₂。2020-12-25、2021-01-08及2021-02-25为晴天,2021-02-13及2021-02-14为多云天。

Note: The test during Dec. 25, 2020 is for Case C₁ and the rest is for C₂. 2020-12-25, 2021-01-08 and 2021-02-25 are clear days with 2021-02-13 and 2021-02-14 being cloudy days.

3 讨论

本研究探讨了温室附阴棚、阴棚加盖保温被、附阴棚温室的墙体及保温被加强保温这3种措施下日光温室及参照温室温度的变化,对以下问题有了进一步的认识:

- 1)阴棚温度与日光温室温度。本研究的测试结果并没有反映出阴棚内温度高,则温室内温度高,或反之。在同样的外部气候条件下,加强保温温室气温远高于参照温室气温,但存在加强保温温室阴棚气温接近或低于参照温室阴棚气温的现象。
- 2)阴棚温度与室外空气温度。阴棚空气温度不一定高于室外空气温度。本研究的一些测试结果表明阴棚的气温存在低于外部气温的现象。阴棚建在日光温室的后墙北面,但和独立的普通塑料大棚一样也出现了“逆温”现象^[33]。尽管温室北墙对阴棚有不同程度的传热,但依然出现“逆温”的原因可能是由于棚膜外表面辐射失热过大及棚内地面与膜面比值小的原因^[34-35]。这种现象可以提示以

- 往研究认为的设置阴棚对温室的后墙起到隔热作用或阴棚的设置对温室增温的结论并不具有广泛性。
- 3)日光温室墙体对流值与室内空气温度。日光温室墙体内表面对流值大并不一定对应着高的室内空气温度。因此,不能用温室墙体内部夜间及早间对流换热的数值大小来评判墙体对温室的热贡献,从而决定阴棚设置的效果。
- 4)温室白天放风与温室夜间温度。温室白天放风损失热量,降低了温室空气温度,影响持续到夜间。白天揭盖帘及通风等的农事管理措施是日光温室小气候变化的关键影响因素^[27]。因此,贮存并利用白天多余的热量尤为重要。
- 本研究在外温较低的12月下旬和1月下旬出现的设置阴棚温室夜间温度略高于或接近参照温室温度的测试结果与牛贞福等^[18]的测试结果吻合;与张继波等^[27]得出的春季附阴棚温室温度高于对照温室温度的幅值大于冬季的幅值结论一致。本试验于沈阳市开展,基于试验得出的结论可为其他地区的组合温室建造和管理提供参考。

4 结 论

本研究基于系列试验,明确了附阴棚日光温室不同保温效果所基于的环境条件,厘清了阴棚温度与日光温室温度的关联、阴棚温度和室外温度的关系、附阴棚日光温室温度随外部环境的变化特点。具体结论如下:

1)日光温室在北墙外设置阴棚,阴棚对日光温室的保温效果与外部环境有关。夜间及早间附阴棚温室与参照温室气温的平均差值在室外温度低时主要波动范围为 $-0.1\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,在室外温度高时主要波动范围为 $1.0\sim 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。日光温室附阴棚并使阴棚覆盖保温被,1月测试结果显示增温效果不明显,夜间及次日早间二者气温最大差值为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2)日光温室采用热性能高的墙体及前坡夜间增加一层保温被可明显提高温室内的温度。本研究中加强保温温室与具有相同阴棚设置的参照温室室内空气温度对比,在外温低的1月夜间平均提高 $2.6\sim 3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,早间平均提高 $3.5\sim 4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;在外温高的2月,夜间平均最大差值为 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,早间平均最大差值为 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3)阴棚气温受到外部环境及温室后墙换热的综合影响。阴棚气温在夜间及早间存在低于室外气温的情况,平均最大相差 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4)墙内表对流值大小不能作为温室墙体对室内热贡献评判依据从而决定阴棚设置的效果。此外,温室白天放风散失热量降低室内夜间温度,这种影响在本研究中的3个试验方案结果中均有体现,影响机理有待进一步研究。

参考文献 References

- [1] 李天来, 许勇, 张金霞. 我国设施蔬菜、西甜瓜和食用菌产业发展的现状及趋势[J]. 中国蔬菜, 2019(11):6-9
Li T L, Xu Y, Zhang J X. Current situation and trend of the facility vegetable, watermelon and edible mushroom development in China[J]. *China Vegetables*, 2019(11): 6-9 (in Chinese)
- [2] 李天来. 我国设施蔬菜科技与产业发展现状及趋势[J]. 中国农村科技, 2016(5):75-77
Li T L. Current situation and trend of technology and industry development of protected vegetables in China[J]. *China Rural Science & Technology*, 2016(5):75-77 (in Chinese)
- [3] 周长吉. 中国日光温室结构的改良与创新(一):基于被动储放热理论的墙体改良与创新[J]. 中国蔬菜, 2018(2):1-5
Zhou C J. Improvement and innovation of solar greenhouse structure in China (The first part): Wall improvement and innovation based on

- passive heat storage and release theory[J]. *China Vegetables*, 2018(2): 1-5 (in Chinese)
- [4] 范子龙. 节能日光温室保温结构优化研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2022
Fan Z L. Optimization of thermal insulation structure of energy-saving solar greenhouse[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [5] 鲍恩财, 朱超, 曹晏飞, 孙亚琛, 何斌, 米欣, 张勇, 邹志荣. 固化沙蓄热后墙日光温室热工性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9):187-194
Bao E C, Zhu C, Cao Y F, Sun Y C, He B, Mi X, Zhang Y, Zou Z R. Thermal performance test of solidified sand heat storage wall in Chinese solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(9):187-194 (in Chinese)
- [6] Zhang X D, Lv J, Dawuda M M, Xie J M, Yu J H, Gan Y T, Zhang J, Tang Z Q, Li J. Innovative passive heat-storage walls improve thermal performance and energy efficiency in Chinese solar greenhouses for non-arable lands[J]. *Solar Energy*, 2019, 190:561-575
- [7] 任晓萌, 程杰宇, 夏楠, 赵淑梅, 崔文慧, 马承伟, 王庆荣. 日光温室自然对流蓄热中空墙体蓄放热效果研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 115-122
Ren X M, Cheng J Y, Xia N, Zhao S M, Cui W H, Ma C W, Wang Q R. Study on the effect of natural convective hollow wall on thermal storage/release in solar greenhouse [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(2):115-122 (in Chinese)
- [8] 赵淑梅, 庄云飞, 郑可欣, 马承伟, 程杰宇, 马冲, 陈小文, 张天柱. 日光温室空气对流蓄热中空墙体热性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 223-231
Zhao S M, Zhuang Y F, Zheng K X, Ma C W, Cheng J Y, Ma C, Chen X W, Zhang T Z. Thermal performance experiment on air convection heat storage wall with cavity in Chinese solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4): 223-231 (in Chinese)
- [9] 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 performances 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)
- [10] 马月虹, 李保明, 张家发, 张耀文. 北疆麦壳砂浆砌块填充蓄热材料复合墙体日光温室热性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13):233-238
Ma Y H, Li B M, Zhang J F, Zhang Y W. Thermal performance of solar greenhouse with composite wall using wheat shell-mortar block filling with heat storage material in North Xinjiang [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13): 233-238 (in Chinese)
- [11] 张潇丹, 颜建明, 郁继华, 吕剑. 温室墙体中覆铝箔封闭空气腔热工性能模拟分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2):227-233
Zhang X D, Xie J M, Yu J H, Lv J. Simulation analysis of thermal properties of air enclosure covered with aluminum foil in wall of solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2):227-233 (in Chinese)
- [12] 郝丽娟, 韩建会, 李永. 装配式异质复合墙体日光温室热性能分析与评价[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(4):159-169
Qie L J, Han J H, Li Y. Thermal performance analysis and evaluation on solar greenhouse with assembled heterogeneous composite wall [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(4): 159-169 (in Chinese)

- [13] 张娟, 崔世茂, 张丽红, 路艳, 潘璐, 王红飞, 宋阳. 北方高寒地区温室节能途径探讨[J]. 农业工程技术, 2022, 42(7): 15-19, 24
Zhang J, Cui S M, Zhang L H, Lu Y, Pan L, Wang H F, Song Y. Discussion on energy saving approaches for greenhouses in high cold regions of the North[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2022, 42(7): 15-19, 24 (in Chinese)
- [14] 管勇, 王天梅, 魏铭佟, 柳天明, 胡万玲, 段世检. 日光温室平板微热管阵列蓄热墙体热性能试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 205-212
Guan Y, Wang T M, Wei M T, Liu T M, Hu W L, Duan S J. Thermal performance experiment of heat storage wall with flat micro heat pipe array in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(3): 205-212 (in Chinese)
- [15] 李建明, 孙国涛, 李浩杰, 李睿, 胡艺馨. 新能源、新材料、新设计助力温室新革命[J]. 蔬菜, 2022(10): 1-8
Li J M, Sun G T, Li H J, Li R, Hu Y X. New energy, new materials and new design contributing the new revolution in greenhouse technology[J]. *Vegetables*, 2022(10): 1-8 (in Chinese)
- [16] 王伟伟, 王健, 孙锦, 郭世荣. 苏北日光温室构型及其结构参数[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 89-98
Wang J W, Wang J, Sun J, Guo S R. Structure configuration and parameters of solar greenhouse in northern Jiangsu Province[J]. *China Vegetables*, 2012(18): 89-98 (in Chinese)
- [17] 苏东屏, 王铁良, 李明, 孟少春. 阴阳结合型日光温室的规划与设计[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(2): 138-141
Su D P, Wang T L, Li M, Meng S C. Design of solar greenhouse of type combining light with shade[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33(2): 138-141 (in Chinese)
- [18] 牛贞福, 黄振轩, 国淑梅, 董仲国, 颜亚男, 张艳君. 双屋面日光温室建造设计及其环境动态变化分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(6): 74-78
Niu Z F, Huang Z X, Guo S M, Dong Z G, Yan Y N, Zhang Y J. Construction design and analysis of environment dynamic changes of double-roof solar greenhouse[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(6): 74-78 (in Chinese)
- [19] 陈乐涵. 双拱三膜半地下式阴阳棚日光温室设计[J]. 西藏科技, 2020(1): 15-17
Chen L H. Design of double arch, three film and half underground solar greenhouse with attached tunnel[J]. *Tibet Science and Technology*, 2020(1): 15-17 (in Chinese)
- [20] 周长吉, 刘晨霞, 王娟. 阴阳型日光温室环境条件初探[C]//设施园艺研究新进展-2009中国寿光国际设施园艺高层学术论坛论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009: 121-126
Zhou C J, Liu C X, Wang J. Preliminary study on the environmental conditions of Yin Yang type solar greenhouses[C]. In: *New Progress in Facility Horticulture Research: Proceedings of the 2009 China Shouguang International Facility Horticulture High Level Academic Forum*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009: 121-126 (in Chinese)
- [21] 于清伟, 安秀荣, 蔚承祥, 李秀梅. 阴阳棚温度环境分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(11): 37-40
Yu Q W, An X R, Yu C X, Li X M. Analysis of temperature condition of Yin-Yang type greenhouse[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2016, 44(11): 37-40 (in Chinese)
- [22] 周长吉, 刘晨霞. 提高日光温室土地利用率的方法评析[J]. 中国果菜, 2009, 29(5): 16-20
Zhou C J, Liu C X. Evaluation and analysis of methods for improving land use efficiency of solar greenhouses[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2009, 29(5): 16-20 (in Chinese)
- [23] 杨兵丽, 马红强, 杨伟, 李文平, 王建军. 阴阳型日光温室-阴棚早春茬西芹栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2017(5): 98-100
Yang B L, Ma H Q, Yang W, Li W P, Wang J J. Cultivation techniques of celery in early spring crops in a Yin-Yang type solar Greenhouse[J]. *China Vegetables*, 2017(5): 98-100 (in Chinese)
- [24] 杨文雅, 黄群, 张燕. 阴阳结合型日光温室环境特征测定分析[J]. 宁夏农林科技, 2017, 58(9): 1-6
Yang W Y, Huang Q, Zhang Y. Determination of and analysis on environmental characteristics of solar greenhouse of combining light with shade[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2017, 58(9): 1-6 (in Chinese)
- [25] 郑华美, 高中强. 山东新型双屋面日光温室发展现状与前景展望[J]. 中国蔬菜, 2014(7): 1-3
Zheng H M, Gao Z Q. Development status and prospects of new double roof solar greenhouses in Shandong Province[J]. *China Vegetables*, 2014(7): 1-3 (in Chinese)
- [26] 史民, 付娟娟, 王萍萍. 阴阳型日光温室的建造及特点浅析[J]. 中国果菜, 2015, 35(6): 69-71
Shi M, Fu J J, Wang P P. Analysis on the construction and characteristics of Yin-Yang type greenhouse[J]. *China Fruit Vegetable*, 2015, 35(6): 69-71 (in Chinese)
- [27] 张继波, 李楠, 薛晓萍, 李鸿怡, 徐桂华. 山东冬春季双屋面日光温室温湿度变化特征研究[J]. 山东农业科学, 2016, 48(10): 129-133
Zhang J B, Li N, Xue X P, Li H Y, Xu G H. Variation characteristics of air temperature and humidity in double-roof solar greenhouse in winter and spring in Shandong[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(10): 129-133 (in Chinese)
- [28] 郝丽娟, 赵付江, 韩晓倩, 韩建会, 尹庆珍. 双屋面日光温室的结构设计和温光性能分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(5): 145-148
Qie L J, Zhao F J, Han X Q, Han J H, Yin Q Z. Structural design and analysis of temperature and illumination performance of double-roof solar greenhouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(5): 145-148 (in Chinese)
- [29] 王世通, 赵龙. 新型阴阳连体温室建造及菌菜高效种植模式初步研究[J]. 天津农林科技, 2020(5): 22-23
Wang S T, Zhao L. Preliminary study on the construction of a new type of Yin-Yang conjoined greenhouse and the efficient planting mode of bacteria and vegetables[J]. *Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry*, 2020(5): 22-23 (in Chinese)
- [30] 贾莎. 南北双向温室的性能研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2013
Jia S. Study on the performance of north-south bidirectional greenhouse[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [31] Xu H, Zhao L J, Tong G H, Cui Y Q, Li T L. Microclimate variations with wall configurations for Chinese solar greenhouses[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 291-294: 931-937
- [32] 叶歆. 建筑热环境[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996
Ye X. *Building Thermal Environment* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996 (in Chinese)
- [33] 宋明军, 侯栋, 马彦霞, 张顺林, 杨盛平. 甘肃武山多层覆盖塑料大棚冬季保温效果研究[J]. 中国蔬菜, 2017(11): 57-61
Song M J, Hou D, Ma Y X, Zhang S L, Yang S P. Studies on heat preservation effect in winter by multi-layer plastic film in plastic tunnel in Wushan County of Gansu Province[J]. *China Vegetables*, 2017(11): 57-61 (in Chinese)
- [34] 李伟建, 张维江, 姜瑞洋, 冯娜. 防霜棚夜间温度变化规律及大棚逆温现象

分析[J]. 农业科学研究, 2022, 43(3): 6-10, 21

Li W J, Zhang W J, Jiang R Y, Feng N. Analysis of temperature change law at night and temperature inversion in frost-proof greenhouse [J].

Journal of Agricultural Sciences, 2022, 43(3): 6-10, 21 (in Chinese)

大学学报:自然科学版, 1992(1): 23-29

Li L C. The correlative relations between air temperatures inside and outside greenhouse without heating and plastic tent [J]. *Journal of Northwest A&F*

University: Natural Science Edition, 1992(1): 23-29 (in Chinese)

[35] 李良晨. 不加温温室和塑料大棚内外温度的相关关系[J]. 西北农林科技

责任编辑:董金波



第一作者简介: 佟国红, 博士, 教授。长期从事设施园艺环境与工程研究。在温室节能方面曾主持完成了国家高技术研究发展计划(863计划)子课题1项、教育部留学回国人员科研启动基金1项;作为主要参加人参与完成了联合国粮食及农业组织项目、国家自然科学基金等省部级课题10余项。作为第一作者在国内外期刊上发表学术论文30余篇。获得辽宁省政府科技进步一等奖1项(第5完成人)、辽宁省政府科技进步二等奖1项(第5完成人)、辽宁省政府科技进步三等奖2项(第5完成人)。现主持国家自然科学基金面上项目1项。主编教材1部,参编著作及教材6部。作为主持人获得第十二届全国多媒体课件大赛二等奖1项、辽宁省教育教学成果三等奖1项。



通讯作者简介: 孙周平, 博士, 教授, 博士生导师, 沈阳农业大学设施园艺学科带头人, 国家大宗蔬菜产业技术体系岗位科学家、机械与设施研究室主任。本科毕业于西北农业大学(现西北农林科技大学),在中科院沈阳应用生态所获得硕士学位,于沈阳农业大学获得博士学位。荷兰瓦哈宁根大学访问学者,美国加州大学戴维斯分校高级研究学者。主要开展现代节能日光温室及其环境调控、日光温室蔬菜轻简化机械化生产、设施蔬菜土壤障碍发生机理及其绿色防控等理论与技术研究。先后主持和参加国家省市科研课题50余项,获得科技奖励12项。获得国家发明专利15件。发表学术论文130余篇。主编或参编著作和教材15部,主持或主要参与制订辽宁省地方标准17部。