

彩钢板保温装配式节能日光温室的温光性能

孙周平^{1,2,3}, 黄文永⁴, 李天来^{1,2,3*}, 佟雪娇^{1,2,3}, 白义奎^{1,3,5}, 马健^{1,2,3}

(1. 设施园艺省部共建教育部重点实验室, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866; 3. 辽宁省设施园艺重点实验室, 沈阳 110866; 4. 凌源市虹圆设施农业服务有限公司, 朝阳 122500; 5. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 针对传统日光温室防雨、防雪、防风、防火能力差, 以及室内光温环境分布不均匀等问题, 研制开发彩钢板保温装配式节能日光温室, 该温室骨架为半圆弧形钢结构, 采用岩棉彩钢板滑动保温覆盖形式和可移动保温山墙方法, 温室跨度 12 m、脊高 5.5 m、长度 65 m, 屋面采光角高达 41.5°。该日光温室采用水循环系统和空气-地中热交换系统代替土墙和砖墙等蓄热体, 解决了装配式日光温室的蓄放热问题, 实现了日光温室部件的工厂化生产和安装的标准化装配。与对照(辽沈Ⅲ型土墙日光温室)比较, 彩钢板保温装配式节能日光温室脊高前移、位于温室中部, 温室后部遮光减少, 土地利用率高 20%以上, 屋面采光角增加 16.3°, 采光率提高 5.3%, 晚间室外大气温度在 -25.8℃ 时, 室内气温在 13℃ 以上, 室内外温差达到 39.1℃, 比对照温室提高 2.3~3.5℃。彩钢板保温装配式节能日光温室栽培空间大, 采光好, 升温快, 室内横向和纵向光照和温度分布均匀, 植株生长整齐, 有效解决了传统日光温室抵御雨、雪、风、火自然灾害能力差的问题。该温室集成了大型连体温室温光分布均匀和传统日光温室蓄热保温好的优点, 提高了太阳能的利用效率, 温室总体温光性能超过对照温室, 且滑动覆盖易于实现日光温室保温覆盖件的精准控制, 为中国日光温室的自动化控制和现代化提供新途径。

关键词: 温室, 结构, 光, 温度, 保温, 彩钢板, 滑动覆盖装配式

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.020

中图分类号: S625.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0159-09

孙周平, 黄文永, 李天来, 等. 彩钢板保温装配式节能日光温室的温光性能[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 159-167.

Sun Zhouping, Huang Wenyong, Li Tianlai, et al. Light and temperature performance of energy-saving solar greenhouse assembled with color plate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 159-167. (in Chinese with English abstract)

0 引言

日光温室是中国独具知识产权的温室类型。自 20 世纪 80 年以来日光温室从辽宁省南部的海城和瓦房店兴起, 迅速推广至中国北方地区^[1-2]。到 2012 年中国日光温室已发展到 92.8 万 hm^2 , 北方地区约占整个温室大棚面积的 50% 左右, 可以实现在最低气温 -28℃ 地区不加温生产喜温果菜, 年产蔬菜总量 2.5 亿 t, 产生巨大的经济、社会和生态效益, 不仅成功解决了中国北方地区冬春季蔬菜供应问题, 保证了城乡居民的“菜篮子”安全, 促进了城乡劳动力就业和农民增收, 而且在中国能源供应不足的

情况下, 日光温室已成为中国设施园艺产业突破资源环境瓶颈制约、保持“菜篮子”产品长期有效供给的重要手段^[2-4]。目前, 日光温室已经成为中国北方地区解决“三农”问题的支柱产业。

然而, 中国日光温室仍然存在许多问题^[4-8]: 1) 在采光方面, 与大型连栋温室比较, 日光温室的光照和温度分布不均匀, 导致作物长势不整齐; 此外, 由于日光温室东西两侧山墙的挡光, 山墙两侧作物生长受到弱光的影响。2) 保温方面, 不仅草帘、防寒被等外置保温材料的防雨、防雪、防风和防火能力差, 而且多层保温覆盖, 密封不严、保温效果不稳定。3) 温室建筑方面, 土墙和砖墙等墙体结构温室的建造, 不仅造成大量土地和耕地的破坏, 而且施工周期较长。4) 温室自动控制方面, 一面坡的异形曲面结构不仅在防寒被的卷放过程中造成其与棚膜和骨架之间的摩擦, 常导致棚膜和防寒被易破损, 而且难于实现卷帘机的精准运行和自动化控制。为此, 国内许多学者分别从墙体结构^[7]、屋面采光角度^[9]、温室整体曲面结构^[10]、透光量的网格优化设计^[11]、温室光温环境模拟^[12]、温室整体

收稿日期: 2013-05-12 修订日期: 2013-08-26

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-25-C-01); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD12B03-02); 辽宁省“十二五”重大项目(20111215003)

作者简介: 孙周平(1967—), 男, 陕西扶风人, 副研究员, 博士, 从事设施蔬菜栽培与生理研究, 沈阳 沈阳农业大学园艺学院, 110866。Email: suner116@126.com, 农业工程学会会员(E040700013M)。

*通信作者: 李天来(1955—), 男, 辽宁绥中人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事设施蔬菜栽培与生理研究, 沈阳 沈阳农业大学园艺学院, 110866。Email: tianlaili@126.com, 农业工程学会会员(E041200183S)。

尺寸^[13]等方面,对日光温室的优型结构设计进行了大量研究,这些研究改善了日光温室的光温性能,使近 30 a 来中国日光温室蔬菜生产水平的大幅度提高。但仍然有许多问题没有得到有效解决。对此,本项目经过 3 a 研究,研制出一种彩钢板保温装配式节能日光温室,以期能很好地解决以上问题,为中国日光温室环境自动化控制和现代化提供有效途径。

1 材料与方法

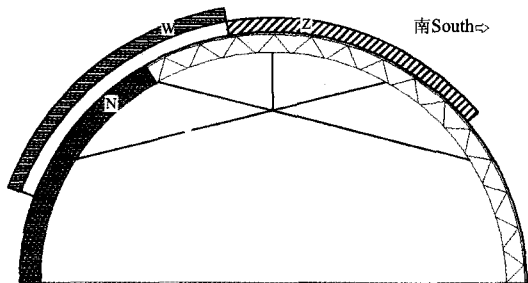
1.1 试验温室与对照温室的结构

试验日光温室建于辽宁省凌源市(119°31'E, 41°20'N),属中温带亚干旱季风型大陆性气候,年平均气温 8.0℃,一月平均气温-11.2℃,最低气温-37.6℃,七月平均气温 23.3℃,最高气温 35℃。

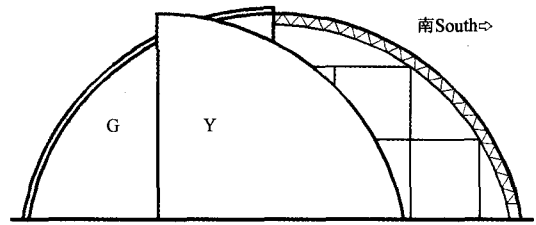
1.1.1 试验温室主要结构

彩钢板保温装配式节能日光温室为半圆弧形钢结构。温室净跨度 12 m(外跨度 12.5 m),脊高 5.5 m,净长度 65 m(外长度 66 m),屋面采光角 41.5°,后坡水平投影长 1.6 m,净面积 780 m²,以 0.1 mm 厚的聚烯烃膜(PO)为透明覆盖材料;设计风荷载 0.55 kN/m²,雪荷载 0.45 kN/m²;温室栽培空间大,适宜蔬菜和食用菌立体栽培,以及乔木果树栽培和养殖。

温室保温覆盖整体由岩棉彩钢板构成,分为 W、Z、N 3 段(图 1a),其中位于温室北侧的覆盖件 N 为固定保温件;覆盖件 W、Z 可沿骨架上的滑道滑动打开或关闭,冬季夜间可全部关闭保温;昼间可打开覆盖件 Z 和 W,随着气温转暖和太阳高度角提高,可逐渐全部打开覆盖件 W、Z,确保充足光照。岩棉彩钢板作为保温覆盖件可有效解决传统草帘、防寒被等保温材料所带来的防雨、防雪、防风、放火能力差的问题,也降低了围护成本。温室东西山墙也由岩棉彩钢板构成,其中北侧山墙 G 固定不动,南侧山墙 Y 可移动(图 1b)。早晨,当太阳升起时,东侧彩钢板山墙 Y 开启,可减少东山墙遮光。中午后,东侧彩钢板山墙 Y 关闭,西侧彩钢板山墙 Y 开启,可减少西山墙遮光。



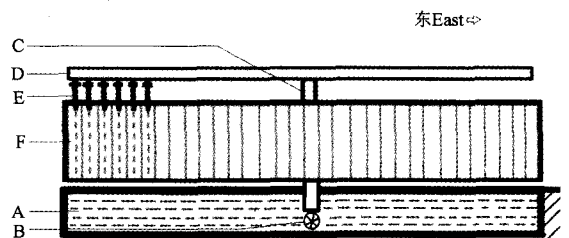
a. 滑动保温覆盖件 W、Z 半开启状态
a. Half-open state of slidable heat preservation covering plate W and Z



b. 移动保温山墙 Y 半开启状态
b. Half-open state of movable heat preservation gable Y
注: W 与 Z 为可滑动的保温彩钢板覆盖件; N 为固定的保温彩钢板覆盖件; Y 为可移动保温彩钢板山墙; G 为固定的保温彩钢板山墙。
Note: W and Z: Slidable heat preservation covering plate; N: Fixed heat preservation covering plate; Y: Movable heat preservation gable; G: Fixed heat preservation gable.

图 1 试验日光温室的截面与移动山墙示意图
Fig.1 Sketch of section and moving gable of experiment solar greenhouse

温室蓄热体主要采用水循环系统。水循环系统由水池、水泵、输水管道、采光板、回水管道和控制器等组成(图 2)。其中,采光板面积 360 m²、位于温室内后墙上;水池容积 32 m³(长 60 m、宽 0.6 m、高 0.9 m)、位于温室后墙内侧地下;水泵功率 750 W、流量 15 m³/h。昼间 09:30~15:00 启动水循环系统,水池中水输送到采光板的顶部,并顺着每个采光板的空隙流下,最后通过回水管道流回水池,这样将太阳能蓄积在水中。夜间 00:30~06:30 日光温室气温下降时,再次启动水循环系统,可通过采光板向温室中释放热量,从而避免日光温室降温。此外,试验温室还采取空气-地中热交换系统,将温室内顶部 4.5 m 处的热空气通过风机导入到温室地下 0.5 m 的热交换管中,以提高温室白天的热量蓄积和土壤温度。该系统只在昼间 10:00~15:00 启动,而在晚上没有运行,风机总功率为 1.2 kW。



注: A 为蓄热水池; B 为水泵; C 为主管道; D 为支管道; E 为毛管道; F 为采光板。
Note: A is heat storage tank; B is pump; C is main pipe; D is branch pipe; E is lateral; F is Day lighting panels.

图 2 水循环系统示意图
Fig.2 Sketch of water-cycling system

温室通风系统主要由温室顶通风系统和底通风系统组成,上下通风系统各 20 扇阳光板通风窗,每扇窗长 2.2 m、宽 1 m,2 套通风系统均为齿条式机械开启。

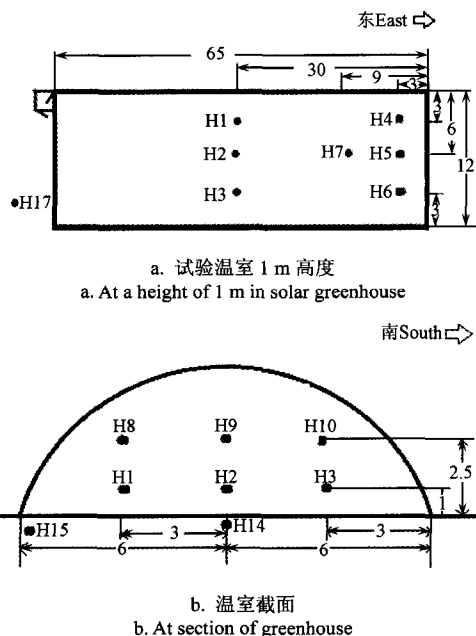
1.1.2 对照温室主要结构

对照日光温室为辽沈Ⅲ型土墙日光温室。温室净跨度 7 m，脊高 3.3 m，后墙高 2.5 m，后墙和山墙的底宽 3 m、顶宽 1 m，后坡水平投影长 1.5 m。以 0.08 mm 厚的聚氯乙烯膜 (PVC) 为透明覆盖材料，采用一层草帘和一层棉被为外保温覆盖材料。

1.2 测试方法

1.2.1 温度测定

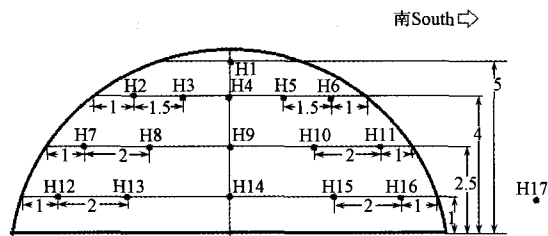
温度测定采用 HOBO U10-003 型 (美国 onset 公司生产, 精度±0.4℃)、HOBO U23-001 和 U23-003 型记录仪 (美国 onset 公司生产, 精度±0.18℃)。2013 年 1 月 5 日至 2 月 28 日, 同时测定了试验温室和对照温室的温度。试验日光温室测点布置见图 3, 其中试验温室在东西向距东侧 3、9 和 30 m 位置、南北向距前骨架 3、6 和 9 m 位置、垂直方向距地面 1 和 2.5 m 位置、水池中水深 0.45 m (H15)、10 cm 土壤温度 (H14)、室外大气 (H17) 和对照温室中部距地面 1 m 分别设置传感器和记录仪。测试期间每天的温度变化规律一致, 本文采用 2 月 25 日和 26 日数据进行分析。2013 年 3 月 24 日至 28 日在试验温室内距地面 1、2.5、4 和 5 m 共 4 个高度测定了温度垂直分布 (图 4)。



注：以 m 为单位；H1~H13 为测量温室大气温度；H14 为测量 10 cm 土壤温度；H15 为测量水循环水池水温；H16 为测量对照土墙温室气温；H17 为测量室外大气温度。

Note: Unit is meter, Air temperature in the experiment greenhouse were measured by H1~H13; Soil temperature in the 10 cm depth was measured by H14; Water temperature in the water-recycling tank was measured by H15; Air temperature in the control was measured by H16; Air temperature outside was measured by H17.

图 3 试验日光温室温度测点布置示意图 (2013 年 1 月-2 月)
Fig.3 Sketch of temperature measuring points in experiment solar greenhouse (Jan.-Feb.2013)



注：以 m 为单位；H1~H16 为测量温室大气温度；H17 为测量室外大气温度。
Note: Unit is meter; Air temperature in the experiment greenhouse was measured by H1~H16; Air temperature outside was measured by H17.

图 4 试验日光温室截面温度记录仪布置图 (2013 年 3 月)

Fig.4 Sketch of temperature recorder section installation (Mar. 2013)

1.2.2 光照测量

光照度采用 TES1339R 型照度计 (台湾泰仕电子工业公司生产, 分辨率 0.01 Lux, 精度±3%) 测定。在晴天中午, 温室中部高度 1 m 位置从南到北每隔 1 m 进行光照度测定; 同时测定室外光照度。平均采光率为温室从南到北每隔 1 m 测定的光照强度平均值与室外大气的比值。晴天早上 08:40 开始至下午 15:40, 采用 TES1339R 型照度计自动记录功能, 每隔 3 min 记录一次, 同时测定室外和室内光照变化。

1.3 数据处理

采用 Excel 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 试验日光温室采光、保温和蓄热性能分析

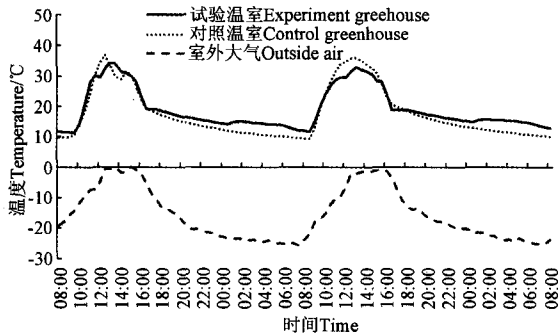
2.1.1 试验日光温室采光性能分析

试验日光温室的骨架结构为半圆弧形, 脊高位于温室的南北中间位置, 因此, 其屋面采光角度高达 41.5°, 比对照温室提高 57.5%; 而且试验温室采光率为 82.7%, 对照温室采光率为 72.4%, 扣除试验温室使用的 PO 膜和对照温室使用的 PVC2 种棚膜 5% 的透光率差别, 试验温室的采光率仍然比对照温室高出 5.3%, 而 2 个温室单位土地面积的采光面积是相同的, 说明温室采光屋面角增大, 可以增加温室的采光量。

2.1.2 试验日光温室的总体蓄热保温分析

从图 5 可以看出, 晴天, 试验温室启动水循环系统进行蓄热, 其气温比对照温室降低了 4.8~5.2℃, 其中试验温室从 2012 年 12 月到 2013 年 2 月中旬都不进行顶部放风, 而对照温室在 1 月 25 日中午由于温度过高、进行了顶部放风; 1 月 26 日没有进行顶部放风。这说明, 新型温室的蓄热系统可以有效的将进入到温室中的太阳能蓄积保存下来, 实现了太阳能的高效利用。晚间 (26 日凌晨室外最低气温-25.8℃), 在 00:30~06:30 水循环系统启动期间, 试验温室气温

在 13℃ 以上, 比对照温室提高 3.5℃, 试验温室内外温差最高达到 39.1℃; 在早晨 8:00 未开启温室保温覆盖物前, 试验温室气温比对照温室高出 2.3℃, 试验温室内外温差为 37.7℃。说明试验温室的总体蓄热保温性能超过当地辽沈 III 型土墙日光温室。



注: 2013 年 1 月 25 日-27 日。
Note: Jan.25-27, 2013.

图 5 晴天时试验日光温室昼夜温度变化

Fig.5 Change of day and night temperature of experiment solar greenhouse at sunny day

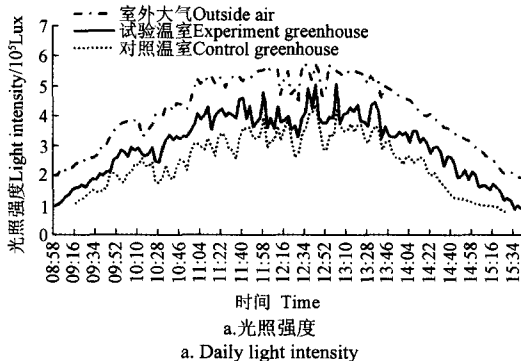
2.2 试验日光温室的温光环境变化规律分析

2.2.1 日光温室的光环境变化分析

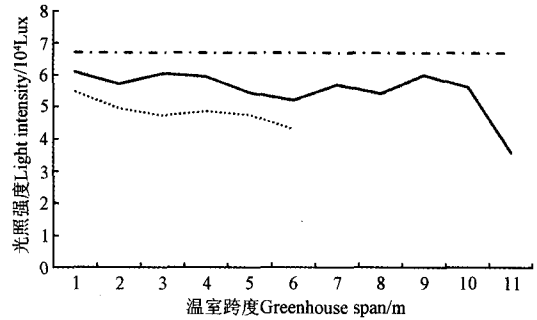
从图 6a 可以看出, 试验温室的全天日光照射始终大于对照温室, 而且在早晚光照较弱条件下, 这种差别更大。此外, 试验温室早晨和下午分别达到 2 万 lux 的时间比对照温室提早和延长各 30 min 左右。从图 6b 可以看出, 试验温室的光照在南北水平方向上的分布除了第 11 m 外变化幅度较小、分布比较均匀, 而 11 m 处光照降低是由于温室顶部的通风开窗系统的透明覆盖材料为阳光板所影响。说明试验温室不仅采光量大, 而且光照分布比较均匀, 可使温室作物较长时间保持在比较适宜的光照条件下。

2.2.2 日光温室的温度环境变化规律

从温室的南北方向上看(图 7), 白天 10:00~14:00, 不论是 1 m 高度, 还是 2.5 m 高度, 南侧和北侧温度稍高, 中点温度稍低, 温差一般在 2℃ 左右。除此之外时间, 试验温室在南、中、北 3 个位置之间的温差在 0.2℃ 左右, 说明试验温室晚上在南北方向上的温度分布非常均匀。



a. 光照强度
a. Daily light intensity

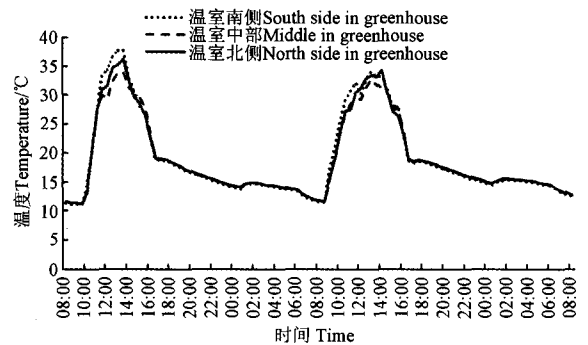


b. 光照分布
b. Light distribution

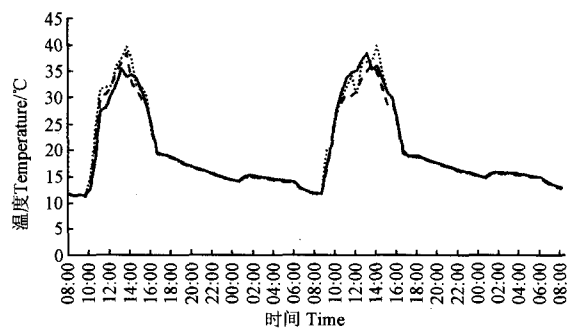
注: 2013 年 1 月 29 日。
Note: Jan.29, 2013.

图 6 试验日光温室日光照射强度变化和光照分布

Fig.6 Daily light intensity change and light distribution in experiment solar greenhouse



a. 1 m 高度
a. At a height of 1 m



b. 2.5 m 高度
b. At a height of 2.5 m

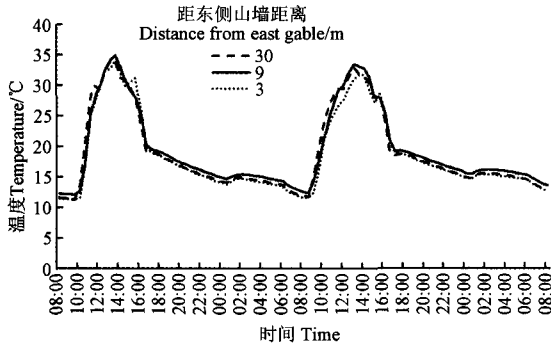
注: 2013 年 1 月 25 日-27 日。
Note: Jan.25-27, 2013.

图 7 试验日光温室南北方向的气温变化

Fig.7 Air temperature change at north-south direction in the experiment solar greenhouse

从温室的东西方向上看(图 8), 白天上午 10:00~12:30, 由于打开东侧山墙增加光照, 与温室中部温度(距离东侧山墙 30 m)比较, 距离东侧山墙 3 m 处的气温降低 3℃ 左右, 说明, 上午打开东山墙保温覆盖件时, 东山墙处的透明覆盖材料的保温仍需要加强。下午当整个试验温室的保温覆盖件全部关闭后, 距东山墙 3 m 处的温度仍然最低,

但温差减小, 较温室中部的温差在 0.2°C 左右, 较东山墙 9 m 处的温差在 0.7°C 左右, 但距离东山墙 9 m 处温度高反而于温室中部温度, 其原因有待进一步研究。总体而言, 试验温室在东西水平方向上的温度分布仍然比较均匀。



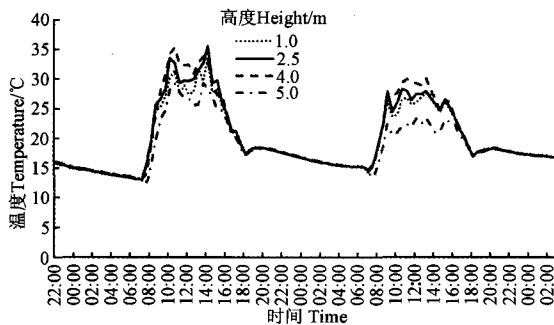
注: 2013 年 1 月 25 日-27 日。

Note: Jan.25-27, 2013.

图 8 试验日光温室东西方向 1 m 高度气温变化

Fig.8 Air temperature change at a height of 1 m at east-west direction in experiment solar greenhouse

从温室截面的垂直方向上看(图 9), 白天温度变化较大, 其中距地面 4 m 温度最高, 其次是 2.5 和 1 m, 距地面 5 m、距温室顶部 0.5 m 的最高点温度最低, 一般较 4 m 处低 4°C 左右, 这与 3 月份白天温室的顶部放风有关。而晚上, 温室的垂直温度变化很小, 1、2.5、4 和 5 m 各个高度之间温差在 0.2°C 左右。说明试验温室晚上在垂直方向上的温度分别仍然很均匀。



注: 2013 年 3 月 24 日-26 日。

Note: Mar.24-26, 2013.

图 9 试验日光温室中部的垂直气温变化

Fig.9 Air temperature change at vertical direction in the middle of experiment solar greenhouse

3 讨论

3.1 日光温室结构

中国日光温室发展已有 30 多年历史, 从最初的一坡一立式和一面坡式日光温室开始, 到现在的单栋或者多连栋日光温室, 无论用材上还是结构形

式上都发生了很大的变化。但日光温室“三面墙一面坡(透光)、防寒被+卷帘机”的基本结构没有改变。这种结构的不足带来了日光温室采光、保温、以及自动控制方面的许多难于克服的问题。新型彩钢板保温装配式节能日光温室采取半圆弧形钢骨架结构, 采用工业和民用建筑上常用的岩棉彩钢板作为半圆弧形坡面和东西两侧山墙的保温围护结构, 由于温室顶部的岩棉彩钢板保温覆盖件可以在温室骨架上的滑道中实现精准运行, 不仅便于实现日光温室的自动化控制, 而且, 晚上能够在温室四周形成一个整体的岩棉彩钢板覆盖的保温围护结构, 可显著增强温室的密封性能和保温性能, 有效解决传统日光温室保温被外置带来的防雨、防雪、防风和防火等能力差, 以及保温效果不佳问题。同时, 东西两侧岩棉彩钢板保温山墙还可以分别在上午、下午打开, 解决了墙体日光温室的东西山墙遮光问题, 并提高了温室的土地利用效率。此外, 试验温室的脊高位于温室的最中间, 冬至时后部遮阴只有 7.5 m, 缩小了前后温室的间距, 土地利用率达到 68%, 比对照土墙日光温室提高 20% 以上。另外, 试验温室的结构件可实现工厂化生产、温室建造可进行标准化装配, 解决了传统日光温室建造对土地和耕地的破坏, 对保护土地资源和农业生态环境具有重要意义。在温室的建造和运行方面, 其建造费用为 550 元左右/ m^2 、与同跨度的砖墙钢骨架结构日光温室接近或略高; 其冬季消耗的电量为 16.2 kW/d (其中保温覆盖件开闭 1.5 kW/d、水循环系统 8.625 kW/d、空气-地中热交换系统 6 kW/d), 按照农用电 0.46 元/kW 计算, 只需电费 7.4 元/d, 说明试验温室的总体运行费用较低。此外, 该温室延长了棚膜的使用年限、减少了人工、降低了劳动强度、省去了更换防寒被等维护费用, 将具有广阔的发展和应用前景。

3.2 日光温室采光

节能日光温室的热量主要来自太阳辐射, 因此, 温室前屋面的角度和形状是决定太阳光进入温室多少的关键。

试验温室为了保证温室的骨架为半圆弧形结构, 温室的脊高前移到温室的最中间, 因此温室的前屋面角有了很大的提高, 其最大值可以达到 45° 。本试验中, 试验温室的前屋面角为 41.5° , 远远大于对照土墙温室 25.2° , 主要考虑了两个因素: 1) 根据北纬 $41^{\circ}20'$ 夏至时的太阳高度角及其后屋面的投影, 2) 温室内部的栽培空间大小。关于日光温室的前屋面采光角, 近 30 a 来一直是人们优化日光温室结构的研究热点, 从合理屋面角到最佳屋面角, 前屋面角不断增大, 提高了 10° 左右。目前,

许多研究^[2,13-16]认为北纬 41°地区最佳屋面角应在 31°~37°。从日光温室生产实际来看,温室的屋面角也在不断加大,脊高不断增加,温室温光效果得到了明显的改善^[15-16]。进一步,丁秀华^[15]通过冬至日不同屋面角下太阳入射角的日变化研究发现:按合理屋面采光角度 24°设计温室时,在 10:40 左右温室达到较好的采光角度(入射角 45°),全天较好采光时段为 2.5 h;当屋面采光角增至 34°时,大约在 09:40 达到较好的采光时间,全天较好采光时段为 5h;当增至 40°时,09:00 左右就能达到最佳采光角度,较好采光时段可延长到 6 h。结果说明,提高温室屋面采光角,延长温室处于良好采光时段的时间,可以提高温室的光热性能。本文研究结果与此一致。实际上,近 10 a 来,由于日光温室结构的不断优化、采光保温性能的不提高,在北纬 41°地区冬至日前后温室的每日实际较好采光时段可以达到 5~6 h。在本试验中,试验温室的采光量大、蓄热量多,与其有长时间的较好采光时段有关。

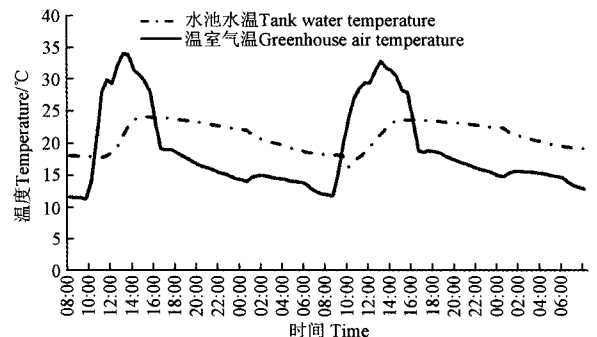
关于日光温室前屋面的形状,中国研究者采用圆、椭圆、抛物线等可描述的数学表达式进行了大量研究:李有等^[17]采用三效率计算模式,提出圆弧面的采光效率为最高,椭圆面次之,抛物面最低;陈端生等^[10]对北京地区四种屋面形状的温室研究认为,不同的屋面几何曲面对温室的采光有不同的影响,10~4 月室内直射光总量均以圆面-抛物面组合型温室最高,椭圆面最低。圆面和抛物面相比,冬季圆面优于椭圆,春季椭圆面优于圆面;王静等^[18]对不同结构日光温室光环境及补光进行了研究,得出圆-抛物面温室内的光环境明显优于单斜面和抛物面温室。刘俊杰等^[19]通过无柱式日光温室骨架的内力分析模型研究发现,圆型是较理想的受力曲面。这些研究说明近圆弧形的屋面比较优越,这与本试验温室屋面形状比较接近。但也有不同的研究结果,认为温室前屋面的形状对采光量的影响不大。高志奎等^[20]对日光温室采光性能的数学模拟分析认为,无论曲线类型如何,若将内跨、脊高和肩高固定后,经过模拟优化曲线参数后,最终的曲面形状会趋同;轩维艳^[12]通过日光温室采光屋面曲线数学模型的模拟分析,发现温室采光面的形状不同、弧度不同,对采光效果(太阳光入射率)影响最大相差不到 3%,但采光面形状对日光室内光照的均匀性分布较大的影响,其中以屋脊与前底脚形成的平面总进光量最大。而我们的研究发现,圆弧形结构日光温室的室内光照南北分布比较均匀,达到了大型连体温室的特点,有利于作物受光均匀、长势整齐。

3.3 日光温室蓄热

试验温室改变了日光温室的传统结构,以隔热

保温性能好的岩棉彩钢板代替后墙、山墙、后坡和防寒被等围护结构,因此,试验温室不具备传统日光温室墙体结构的蓄热功能。为此,我们在温室后墙研制安装了水循环系统、在温室地下 0.5 m 设计安装了空气-地中热交换系统进行蓄热。经过一个冬季的测试表明,水循环系统和空气-地中热交换系统可以代替土壤的蓄热能力,能够确保日光温室冬季的温湿环境。

从水循环系统的蓄热看,白天 09:30~15:00 启动水循环系统,水池中的水温逐渐升高,全天水温可提高 7~8℃(图 10),蓄积太阳能的热量 936 MJ,折合单位面积集热板蓄积的热量为 2 600 kJ/m²,折合单位面积温室蓄积的热量为 1 200 kJ/m²。这与王顺生等^[21]报道的日光温室内置式太阳能集热调温装置研究效果接近,他们采用 3.7 m²的集热面积和 0.12 m³的蓄热水池,最大蓄热量为 1.1 MJ,折合单位面积集热板蓄热量为 2 980 kJ/m²。从夜间 00:30~06:30 水循环系统的散热看,水池中水温可下降 7℃左右(图 10),同时,蓄积的热量随之释放出来,减缓温室降温。李建设等^[22]对宁夏跨度 8 m、脊高 4 m、种植番茄日光温室的土质墙体和地面的放热进行了测定,结果表明:单位面积温室的墙体晚上释放热量为 761 kJ/m²,仅为本研究水循环系统的 63%,也说明本试验采用的水循环系统可以代替土壤的蓄热功能和效果。水循环系统白天运行 5.5 h,消耗电能为 14.85 MJ,只占蓄热能量的 1.59%,可见,该系统具有良好的换热性能与蓄热能力。



注: 2013年1月25日-27日。

Note: Jan.25-27, 2013.

图 10 试验日光温室气温与水循环系统水温的变化
Fig.10 Change of air temperature of experiment solar greenhouse and water temperature of water-cycling system

温室的地下土层拥有很大的热容量。30 多年来,国内外对温室太阳能空气-地中热交换系统进行了大量的研究和成功应用^[23-27]。本试验的空气-地中热交换系统主要做了两个方面的改进,1) 地下热交换管的走向为南北方向,进风口在温室北侧,出风口在温室南侧,每 6 m 一组,设置一个小型风机,

共 10 台风机, 而不是传统的采用一个大型轴流风机、热交换管为东西走向的方法; 2) 进风口管道的上端位于温室内的顶部, 距离温室地面 4.5 m 左右 (这里的温度在晴天时可以达到 40℃ 左右), 而不是传统的主要是抽取近地面的空气。本文试验结果表明, 风机白天运行 5 h, 根据王永维等^[27]计算方法, 单位面积温室的蓄热量约为 221 kJ/m², 而运行该系统消耗的电能占蓄热能量的 9.81%, 说明该系统的热交换效率较高, 对提高土壤温度具有一定作用。

3.4 日光温室保温

研究表明^[28-29], 传统日光温室尽管晚上覆盖了一层或多层草帘、纸被和棉被等保温材料, 但晚上的散热仍然以前屋面的放热为主。为此, 在保温设计方面, 采用目前在建筑上常用的岩棉彩钢板作为试验温室四周的保温围护结构, 其热阻为 5.16 m²K/W, 明显大于草帘+防寒被的 3~4 m²K/W。因此, 试验温室的屋面和东西山墙等保温覆盖材料的传热损失比较少, 可见, 只要做好温室的保温围护结构, 采光屋面的扩大并不是意味着保温能力的下降。所以, 岩棉彩钢板结构良好的保温性能使得试验温室的热量和温度性能得到大幅度的提高, 由于试验温室晚上散热较少, 使得晚上温室中的东西方向、南北方向和垂直方向的温度分布非常均匀, 各个方向的温差不超过 0.3℃ 左右。从试验温室种植的芸豆生长来看, 每行南北的植株的长势均匀, 株高比较整齐, 没有出现传统日光温室植株南侧低、北侧高的现象, 说明, 试验温室有利于作物长势整齐。

4 结 论

保温彩钢板装配式节能日光温室集成了大型连栋温室和日光温室的优点, 打破了日光温室“三面墙一面坡、草帘+卷帘机”的传统结构, 总体性能超过当地辽沈Ⅲ型土墙日光温室, 具有以下性能和特点:

1) 温室骨架为半圆弧形钢结构, 整体采用保温彩钢板滑动覆盖形式, 不仅有效解决了传统日光温室草帘和保温被等外置带来的防雨、防雪、防风、防火、防盗等能力差问题, 而且温室屋面采光角度高达 41.5°, 比对照温室增加 16.3°, 采光量大, 升温快, 此外, 白天温室的纵向和横向光照分布比较均匀, 晚上温室的纵向、横向和垂直方向温度分布也比较均匀, 作物长势整齐。温室脊高 5.5 m、跨度 12 m, 栽培空间高, 宽敞明亮, 即适宜蔬菜和食用菌等立体栽培和高大果树栽培, 还适宜养殖业发展。

2) 温室的水循环系统代替了土质墙体的蓄放

热功能。试验温室采取水循环系统和空气-地中热交换系统进行蓄热, 以及岩棉彩钢板作为保温覆盖件, 温室的蓄热与保温能力增强。冬季夜晚当室外大气温度为 -25.8℃ 时, 试验温室气温比对照温室提高 2.3~3.5℃, 温室内外温差达到 39.1℃。

3) 东西两侧的移动保温山墙在上午与下午可以分别打开, 解决了传统温室两侧山墙挡光问题, 可提高日光温室有效利用面积 6% 左右。此外, 试验温室的脊高前移, 减少了温室的后部遮阴, 缩小了前后温室间距, 试验温室的土地利用率提高了 20% 以上。

新型温室实现了温室组装件的工厂化生产, 温室建造的标准化装配, 缩短温室建造周期, 并减少了传统土墙和砖墙温室建造对土地资源的破坏, 保护了农业生态环境。同时, 新型温室的保温彩钢板滑动覆盖件易于实现精准运行和自动化控制, 将为中国日光温室的智能化管理和现代化发展提供了新的途径。

[参 考 文 献]

- [1] 李天来. 我国日光温室产业发展现状与前景[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2): 131-138.
Li Tianlai. Current situation and prospects of greenhouse industry development in China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(2): 131-138. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李天来, 齐红岩, 齐明芳. 我国北方温室园艺产业的发展方向[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(3): 265-269.
Li Tianlai, Qi Hongyan, Qi Mingfang. Development direction of greenhouse horticulture industry in North China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2006, 37(3): 265-269. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张真和. 我国设施园艺产业发展对策研究[J]. 长江蔬菜, 2010(3): 1-5.
- [4] 魏晓明, 周长吉, 曹楠, 等. 中国日光温室结构及性能的演变[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(4): 855-860.
Wei Xiaoming, Zhou Changji, Cao Nan, et al. Evolution of structure and performance of Chinese solar greenhouse[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2012, 28(4): 855-860. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘克长, 任中兴, 张继祥, 等. 山东日光温室温光性能的实验研究[J]. 中国农业气象, 1999, 20(4): 34-36.
- [6] 彭致功, 段爱旺, 郜庆炉. 节能日光温室光照强度的分布及其变化[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 37-40.
Peng Zhigong, Duan Aiwang, Gao Qinglu. Distribution and variation radiant intensity in solar greenhouse[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2003, 21(2): 37-40. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘建, 周长吉. 日光温室结构优化的研究进展与发展方向[J]. 内蒙古大学学报, 2007, 28(3): 64-268.
Liu Jian, Zhou Changji. The present and development of sunlight greenhouse structure optimization[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2007, 28(3): 64-268. (in Chinese with English abstract)

- [8] 李春生. 藦春型高效节能日光温室的基本结构与性能[J]. 中国蔬菜, 2008(4): 49—50.
- [9] 亢树华, 陈端生. 日光温室优型结构的研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(增刊): 30—35.
- [10] 陈端生, 郑海山, 张建国, 等. 日光温室气象环境综合研究(III)[J]. 农业工程学报, 1992, 8(4): 78—82. Chen Duansheng, Zheng Haishan, Zhang Jianguo, et al. A comprehensive research on the meteorological environment in sun-light greenhouse(III)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1992, 8(4): 78—82. (in Chinese with English abstract)
- [11] 周长吉, 孙山, 吴德让. 日光温室前屋面采光性能的优化[J]. 农业工程学报, 1993, 9(4): 58—61. Zhou Changji, Sun Shan, Wu Derang. Optimal curve shape of energy-saving sunlight greenhouse with respect to light transmissivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1993, 9(4): 58—61. (in Chinese with English abstract)
- [12] 轩维艳. 日光温室采光屋面曲线数学模型的建立与分析[J]. 天津农业科学, 2006(4): 44—46. Xuan Weiyan. Mathematical model establishment and analysis for greenhouse surface curve[J]. Tianjing Agricultural Sciences, 2006(4): 44—46. (in Chinese with English abstract)
- [13] 魏晓明, 周长吉, 曹楠, 等. 基于光照的日光温室总体尺寸确定方法研究[J]. 北方园艺, 2010(15): 1—5. Wei Xiaoming, Zhou Changji, Cao Nan, et al. Design method for solar greenhouse outlines based on illumination conditions[J]. Northern Horticulture, 2010(15): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [14] 朱建国, 庞云, 何克克, 等. 科园 1 号高效节能日光温室的设计及性能测试研究[J]. 内蒙古农业科技, 2001(3): 14—18.
- [15] 丁秀华, 王凤珍, 陈维志, 等. 辽宁省节能型日光温室采光面倾斜角度优化选择[J]. 辽宁农业科学, 1998(2): 28—32.
- [16] 李军, 邹志荣, 杨旭, 等. 西北型节能日光温室采光设计中方位角和前屋面角的分析、探讨与应用[J]. 西北农业科学, 2003, 12(2): 105—108. Li Jun, Zou Zhirong, Yang Xu, et al. Analysis and discussion and application on solar greenhouse about azimuth angle and lighting surface angles[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2003, 12(2): 105—108. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李有, 张述景, 王谦, 等. 日光温室采光面三效率计算模式及其优化选择研究[J]. 生物数学学报, 2001, 16(2): 198—203. Li You, Zhang Shujing, Wang Qian, et al. Study on the calculating models of three efficiencies for the surfaces of the sun-light greenhouse and the selection of the best[J]. Journal of Biomathematics, 2001, 16(2): 198—203. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王静, 崔庆法, 林茂兹. 不同结构日光温室光环境及补光研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 86—89. Wang Jing, Cui Qingfa, Lin Maozi. Illumination environment of different structural solar greenhouses and their supplement illumination[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(4): 86—89. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘俊杰, 邹志荣. 无柱式日光温室的骨架结构优化研究[J]. 宁夏工学院学报, 1996(S1): 254—257.
- [20] 高志奎, 魏兰阁, 王梅, 等. 日光温室采光性能的实用型优化研究[J]. 河北农业大学学报, 2006(1): 1—5. Gao Zhikui, Wei Lange, Wang Mei, et al. Study on practical optimization of lighting performance in solar greenhouse[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2006(1): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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. Wang Shunsheng, Ma Chengwei, Chai Lilong, et al. Equipment in sunlight greenhouse for collecting heat and adjusting temperature[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(2): 130—133. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李建设, 白青, 张亚红. 日光温室墙体与地面吸放热量测定分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 231—236. Li Jianshe, Bai Qing, Zhang Yahong. Analysis on measurement of heat absorption and release of wall and ground in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 231—236. (in Chinese with English abstract)
- [23] Mihalakakou G, Santamouris M, Asimakopoulos D. Modeling the thermal performance of earth to air heat exchangers[J]. Solar Energy, 1994, 53: 301—305.
- [24] 马承伟, 黄之栋, 穆丽君. 连栋温室地中热交换系统贮热加温的试验[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 160—164. Ma Chengwei, Huang Zhidong, Mu Lijun. Experiment of heating and heat-storing of the underground heat exchange system in a multi-span greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(2): 160—164. (in Chinese with English abstract)
- [25] 蒋锦标, 赵冬梅, 才丰. 太阳能地下热交换在日光温室的应用[J]. 辽宁农业职业技术学院学报, 2001, 3(1): 7—8.
- [26] 江晴, 李戡洪, 梅建滨. 温室空气-土壤换热系统的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2002, 23(2): 227—232. Jiang Qing, Li Jianhong, Mei Jianbin. Transient simulation of the air-earth heat transfer in greenhouse[J]. ACTA Energiæ Solaris SINICA, 2002, 23(2): 227—232. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王永维, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 温室地下蓄热系统换热特性研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 248—251. Wang Yongwei, Miao Xiangwen, Cui Shaorong, et al. Heat exchanging characteristics of underground heat storage system in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 248—251. (in Chinese with English abstract)
- [28] 邹志荣, 李建设, 王乃彪, 等. 日光温室温度变化与热量状态分析[J]. 西北农业学报, 1997, 6(1): 58—60. Zou Zhirong, Li Jianshe, Wang Naibiao, et al. Analyse on variations of temperature and quantity of heat in solar greenhouse[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 1997, 6(1): 58—60. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈来生, 刘军. 海东部农业区半地下式日光温室的热平衡分析[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2011, 29(5): 13—16. Chen Laisheng, Liu Jun. Preliminary analysis to the heat balance of the semi-underground-style

sunshine greenhouse in agricultural areas of East Qinghai[J]. *Journal of Qinghai University: Nature*

Science, 2011, 29(5): 13–16. (in Chinese with English abstract)

Light and temperature performance of energy-saving solar greenhouse assembled with color plate

Sun Zhouping^{1,2,3}, Huang Wenyong⁴, Li Tianlai^{1,2,3*}, Tong Xuejiao^{1,2,3}, Bai Yikui^{1,3,5}, Ma Jian^{1,2,3}

(1. Key Lab of Protected Horticulture, Ministry of Education, Shenyang 110866, China; 2. College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3. Key Lab of Protected Horticulture of Liaoning Province, Shenyang 110866, China; 4. Lingyuan Hongyuan Protected Agricultural Service Co., Ltd., Chaoyang 122500, China; 5. College of Water Resource, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The Chinese energy-saving solar greenhouse (CESG) is a special type of greenhouse without heating system, originated in Anshan, Liaoning province. In China, during the mid-1980s, the CESG was composed of the front house roof (for lighting), north wall, east-west gable, back roof (for heat storage and heat preservation), and outside heat preservation covering materials. The applied area of CESG in China reached 928 thousand hm^2 by 2012, which has completely resolved the problem on the year-round vegetable supply, especially in winter in north China. However, the CESG also faces many problems such as uneven distribution of light and temperature in greenhouse, difficulties to achieve automatic control of outside heat preservation covering materials, poor ability of rainproof, snow-proof, wind-proof and fire-proof, and destruction of lots of arable land for greenhouse construction of earth wall and brick wall.

To resolve the above problems, a new type of energy-saving solar greenhouse assembled with heat preservation color plate (CPSG) was developed in Lingyuan (latitude $41^{\circ}20'N$, longitude $119^{\circ}31'E$), Liaoning province, China from 2010 to 2012. The light and temperature performances were studied from January to March, 2013. The CPSG was the large scale arched structure with a span of 12 m, a ridge height of 5.5m, a length of 65m, a front roof lighting angle of 41.5° , a front roof covering materials of polyolefin film. The skeleton structure was semi-circular arc, which slide to opening or closing the heat preservation covering materials of rock wool color plate outside, and to move the opening or closing of the rock wool color plate east gable (in the morning) and west gable (in the afternoon) respectively. As a result, the CPSG not only resolved the problem of rain-proof, snow-proof, wind-proof and fire-proof for Chinese traditional solar greenhouse, but also brought about the accurate operation of outside heat preservation color plate. Furthermore, this type of greenhouse adopted water-recycle heat storage-release system (WHSS) and air-underground heat exchange storage-release system (AHSS). WHSS is running 5.5h/d on sunny day and the solar energy storage capacity is $1200\text{kJ}/\text{m}^2$ (greenhouse area), which made the greenhouse temperature increase $7\text{--}8^{\circ}\text{C}$ in winter night. At the same time, solar energy accumulation for AHSS is $221\text{kJ}/\text{m}^2$, which shows that two heat storage-release systems may replace the heat storage-release function of earth wall and brick wall, and then to lay the foundation for assembled construction of the CESG. Compared with the traditional Liaoshen III type solar greenhouse, CPSG increases 5.3% of the lighting quantity by enhancing 16.3° in the front roof lighting angle. When the outside nighttime air temperature was -25.8°C , the nighttime air temperature in the CPSG reaches more than 13°C with an increase of $2.3\text{--}3.5^{\circ}\text{C}$, the temperature difference between inside and outside reaches 39.1°C . In addition, the CPSG has larger cultivation space, better lighting quantity, more rapid warming up, and more even distribution of light and temperature in the north-south direction or the east-west direction, resulting in a unanimous plant growth. In summary, the study shows that new type of CPSG integrates the advantages of the large multi-span greenhouse and Chinese traditional solar greenhouse, heightens the efficiency of light energy utilization, reduces the labor intensity, realizes the accurate control of heat preservation covering materials, will provide a new effective way for automation and modernization of solar greenhouse in China.

Key words: greenhouses, construction, light, temperature, heat preservation, color plate, sliding covering assembly type

(责任编辑: 张俊芳)