

日光温室水循环增温蓄热系统应用效果研究

郭建业¹ 秦 贵^{1,2} 张艳红¹ 刘晓明¹

(¹北京市农业机械试验鉴定推广站, 北京 100079; ²果类蔬菜产业技术体系北京市创新团队设施设备功能研究室, 北京 100079)

摘 要: 为了提高北方地区冬季日光温室内的温度, 满足作物生长需求, 同时减少温室加温能耗, 设计了一种水循环增温蓄热系统。该系统以日光温室墙体结构为依托, 以水为介质进行热量的蓄积与释放, 利用冬季晴天时北墙部位的太阳辐射热量使水增温, 并把水储存在蓄热水箱内; 夜间温室内温度降到一定程度时, 利用所贮蓄的热量给温室加温。结果表明, 应用该系统可使温室每天平均气温提高 3.65 ℃ 以上, 地温提高 2.00 ℃ 左右; 夜间气温至少提高 3.00 ℃, 地温提高 1.00 ℃ 以上; 既能有效地提高温室温度满足作物生长需求, 还能替代化石燃料的使用而减少 CO、CO₂、SO₂、NO_x 等有害气体的排放量; 冬季 3 个月产生环境效益 2.8 万元。

关键词: 水循环增温蓄热系统; 日光温室; 蓄能; 增温

设施农业的发展解决了长期困扰我国北方地区蔬菜冬淡季的供应问题。目前北京市日光温室面积占蔬菜生产总面积的 28.3%, 冬季日光温室蔬菜生产量达到了北京市冬季蔬菜生产总量的 75.0%, 极大地丰富了全市人民的菜篮子。北京市日光温室蔬菜生产既对蔬菜供应起到了重要的作用, 又呈现良好的发展态势, 是北京市设施生产的主要组成部分。

笔者通过调研发现, 北京市日光温室生产存在以下问题: 一是正常天气下墙体在夜间向室内释放的热量是有限的, 热量释放值在前半夜较大, 后半夜较小, 致使后半夜和凌晨时段经常出现低温现象, 作物冻害时有发生; 二是在连阴天等极端天气下, 温室太阳辐射量较小, 夜间温室内温度急剧下降, 使栽培作物的生长受到抑制, 甚至遭到冻害; 三是冬天冷水灌溉大大降低了土壤温度, 可导致作物发生冻根现象。为提高凌晨时段、极端天气时和冷水灌溉土壤的温度低等问题, 农户采用了各种加温和保温方式, 比如煤炉加温、增加墙体厚度等等, 导致温室冬季加温能耗费用提高, 且用于温室加温的能源主要来自于化石燃料, 例如煤炭, 燃烧时产

生大量的 CO₂、SO₂、NO_x 等, 导致环境污染问题日趋严重, 进而制约设施农业的发展和生产效益的提高。目前已有学者开始研究新型绿色加热模式, 如地中换热、太阳能板集热、相变蓄热、热泵加热等 (孙心心, 2010; 方慧, 2011; 方慧等, 2012; 刘伯聪等, 2012; 周长吉, 2012; 李凯等, 2013), 但由于蓄热效果有限或投资成本较高, 推广受到限制。

针对以上问题, 北京市农业机械试验鉴定推广站根据北方冬季气候特点以及日光温室特有环境, 研发了一种日光温室水循环增温蓄热系统。该系统利用太阳能集热技术, 以水为蓄放热载体, 通过后墙改造、蓄热罐设计、集热装置设计、循环水泵等部件, 构成水循环系统, 利用太阳能白天给系统蓄热, 夜间循环放热, 同时可用 16 ℃ 左右的循环水灌溉, 提高土壤温度。

1 材料与方法

1.1 试验温室概况

试验于 2014 年 12 月 22 日至 2015 年 1 月 14 日进行。试验温室为位于北京市种子站昌平基地内的 23 号温室, 对照温室为同排的 29 号温室。温室均为东西走向, 长 80 m, 宽 8 m, 高 2.5 m。温室后墙是复合夹心墙, 即红砖 + 聚苯板 + 红砖结构。

郭建业, 中级工程师, 专业方向: 农业工程, E-mail: guojianyeele@163.com

收稿日期: 2016-06-30; 接受日期: 2016-07-20

2014年12月1日分别在两栋温室内定植番茄幼苗,品种为仙客8号,株距35 cm,行距70 cm。

1.2 水循环增温蓄热系统原理与设计

水循环增温蓄热系统由北京市农业机械试验鉴定推广站设计,主要由蓄热装置、集热装置、循环水泵及连接管路等组成。在原构造砖墙的内表面覆盖1 cm厚度的土泥,土泥中加入吸热黑色材质,再在水泥墙上覆盖一层塑料膜,提高保温能力。蓄热装置是在温室的东侧或西侧墙处安置4个串联的带有水阀的储热罐,通过水泵、连接管路和后墙的集热管相连,形成一个循环管路,加热后的热水便不断地被收集到储热罐中。储热罐的容积为1 m³,采用常用的PE塑料材质。为了提高储热罐的储热能力,在储热罐外加设易拆卸的黑色保温棉。集热装置以水为蓄热介质,使用金属板传热和水蓄热的集热方式。在后墙内表面距地面1.5 m的高度处串

联安装一套太阳能采暖系统,即12个金属集热片,金属集热片连接在分集水器上。每个集热片是由6个暖气专用管并联而成,长度2 m,高度30 cm。12个集热片呈1排,间距2 m均匀布置在后墙表面。集热片内装满蓄热介质水。白天蓄热介质吸收太阳的辐射能,并通过水的循环将热量转移到储热装置中;夜间后墙的集热装置又充当散热器,与储热装置一同将热量传递到温室内,为温室加热。在冬季还可利用水泵,将16℃左右温水通过管道输送到室内栽培地面,可有效提高土壤温度。水泵的作用是白天将后墙集热管中的水与储热罐中的水循环换热,因此循环泵的选择需满足扬程的要求,功率为0.5 kW。为了更方便地操作水泵,对水泵加设时间控制设备,每天10:00~15:00的各整点时刻开启10 min,实现对水泵运行的灵活操作。系统示意如图1所示。

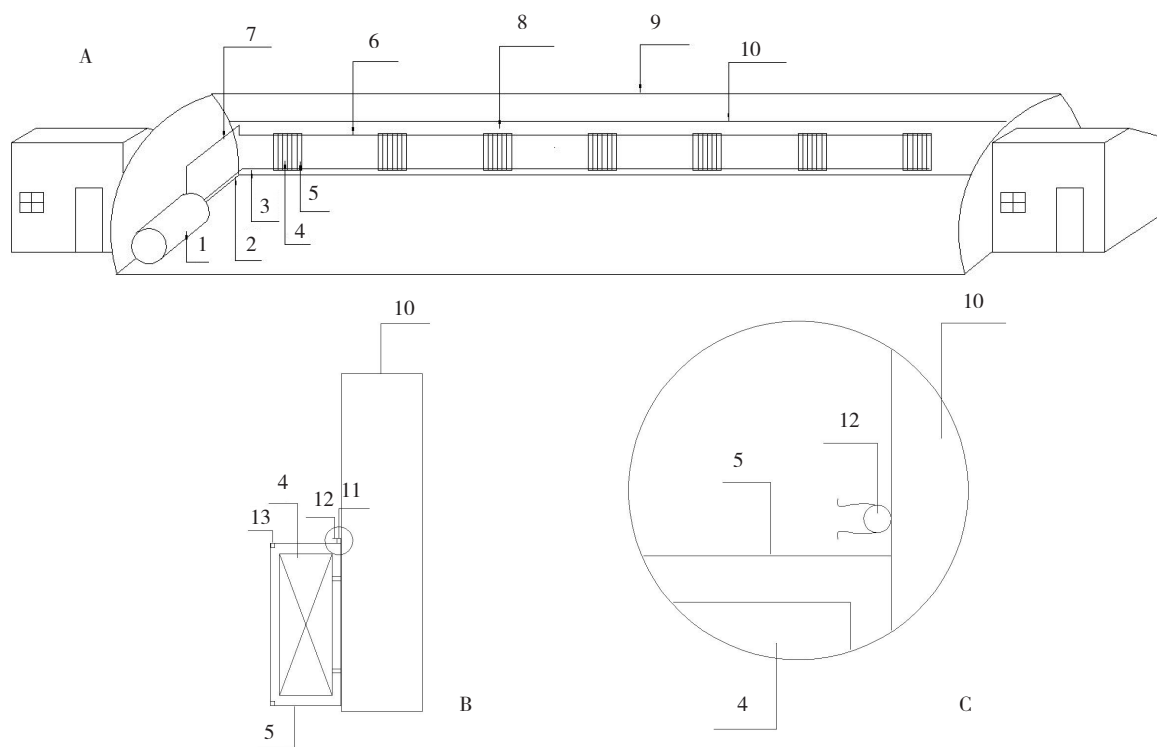


图1 日光温室内水循环增温蓄热系统

A, 系统剖视示意图; B, 整体示意图; C, 局部放大示意图; 1, 水罐; 2, 进水管; 3, 水泵; 4, 暖气片; 5, 透光膜; 6, 固定架; 7, 出水管; 8, 吸热材料; 9, 日光温室; 10, 温室后墙; 11, 卡槽; 12, 卡簧; 13, 支撑架。

1.3 试验方法

采用“农用通”监测系统,设定每30 min对试验温室与对照温室内的空气温度、土壤温度进行采集,并实时存储。该系统的监测点设在温室的纵

向中间、横向靠近后墙1/3的位置;气温传感器置于1/2高度处,地温传感器置于地下5 cm处。同时,对室外温度进行采集,数据采集时间间隔也为30 min。每天记录试验地点的天气状况。试验期间,

每天 8:30 开启外保温被, 16:30 覆盖外保温被, 通风口在 12:00~13:00 采用电动开膜器自动开启。

2 结果与分析

2.1 试验期间的天气状况

由表 1 可知, 试验期间北京市昌平天气未出现暴雪、连降雨类天气, 但在 2015 年 1 月 3~5 日、

12~14 日均出现连续中到重度雾霾天气, 并在 14 日降有小雪。此外, 在 2014 年 12 月 31 日夜北京迎来初雪, 昌平降雪以小雪为主, 雪量不足 1 mm, 初雪过后冷空气较重, 第二天昌平的最低气温达到 -8°C 。因此, 本试验中将 2015 年的 1 月 1 日、3~5 日以及 12~14 日作为极端天气处理, 其余按照正常天气处理。

表 1 试验期间北京市昌平地区天气情况

日期(年-月-日)	最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	天气	风向	风力
2014-12-22	6	-5	晴	西风转微风	3~4 级转<3 级
2014-12-23	10	-4	轻到中度霾	微风转北风	<3 级转 3~4 级
2014-12-24	7	-1	晴	北风	3~4 级
2014-12-25	7	-5	晴	微风	<3 级
2014-12-26	5	-5	晴转多云	微风	<3 级
2014-12-27	6	-5	轻到中度霾	微风	<3 级
2014-12-28	8	-5	轻度霾转晴	微风	<3 级
2014-12-29	11	-4	晴	微风	<3 级
2014-12-30	7	-3	晴转多云	微风	<3 级
2014-12-31	0	-5	多云转晴	北风	5~6 级
2015-01-01	2	-8	晴	北风转微风	3~4 级转<3 级
2015-01-02	8	-5	晴	微风	<3 级
2015-01-03	8	-4	中到重度霾	微风	<3 级
2015-01-04	6	-5	中到重度霾	微风	<3 级
2015-01-05	9	-1	霾转晴	微风转北风	<3 级转 4~5 级
2015-01-06	6	-5	晴	北风转微风	4~5 级转<3 级
2015-01-07	3	-6	晴	微风	<3 级
2015-01-08	5	-6	多云	微风	<3 级
2015-01-09	8	-3	晴	微风	<3 级
2015-01-10	9	-5	晴	微风	<3 级
2015-01-11	6	-4	晴	微风转北风	3~4 级转<3 级
2015-01-12	4	-6	中到重度霾	微风	<3 级
2015-01-13	3	-5	中到重度霾	微风	<3 级
2015-01-14	2	-6	中到重度霾转小雪	微风	<3 级

注: 表中数据来自天气网 (<http://lishi.tianqi.com/changping/201412.html>)。

2.2 日光温室内气温变化

如图 2 所示, 在正常天气条件下, 试验温室内每天的平均气温均高于对照温室, 最大温差 4.65°C , 最小温差 3.65°C , 平均温差 4.08°C , 说明水循环增温蓄热系统可使温室每天气温提高约 4.00°C ; 试验温室的夜间温度(当日 22:00 至次日凌晨 4:00 的测试温度)均高于对照温室, 最大温差 4.99°C , 最小温差 3.05°C , 平均温差 3.38°C , 说明水循环增温蓄热系统可至少提高温室的夜间气温 3.00°C 。

如图 2 所示, 在极端天气条件下, 试验温室的每天平均气温也均高于对照温室, 最大温差 5.90°C ,

最小温差 3.00°C , 平均温差 3.65°C , 水循环增温蓄热系统可使温室每天气温提高约 3.65°C ; 试验温室的夜间温度均高于对照温室, 最大温差 4.73°C , 最小温差 3.14°C , 平均温差 4.11°C , 水循环增温蓄热系统可使温室夜间气温至少提高 3.00°C 。

2.3 日光温室内地温变化

本试验中, 由于测试点距地表较近, 随太阳能辐射变化较明显, 土壤温度波动较大, 但试验温室的土壤温度基本维持在 14°C 以上, 较高的土壤温度有利于作物生长。如图 3 所示, 在正常天气下, 试验温室每天的地温要高于对照温室, 最高温差 3.28°C , 最小温差 1.35°C , 平均温差 2.17°C , 说

明水循环增温蓄热系统可使温室每天地温提高 2.00℃左右；试验温室的夜间地温高于对照温室，最大

温差 3.28℃，最小温差 1.86℃，平均温差 2.51℃，说明水循环增温蓄热系统可至少提高夜间温室地温

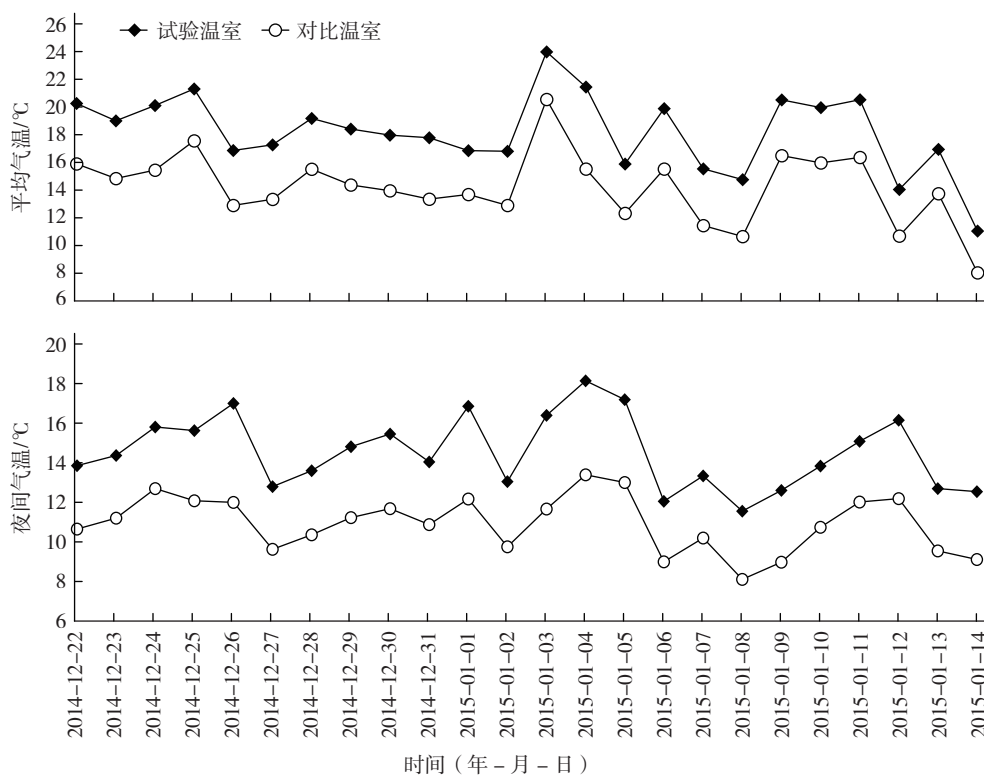


图2 日光温室内气温变化情况

2015年的1月1日、3~5日以及12~14日作为极端天气处理，下图同。

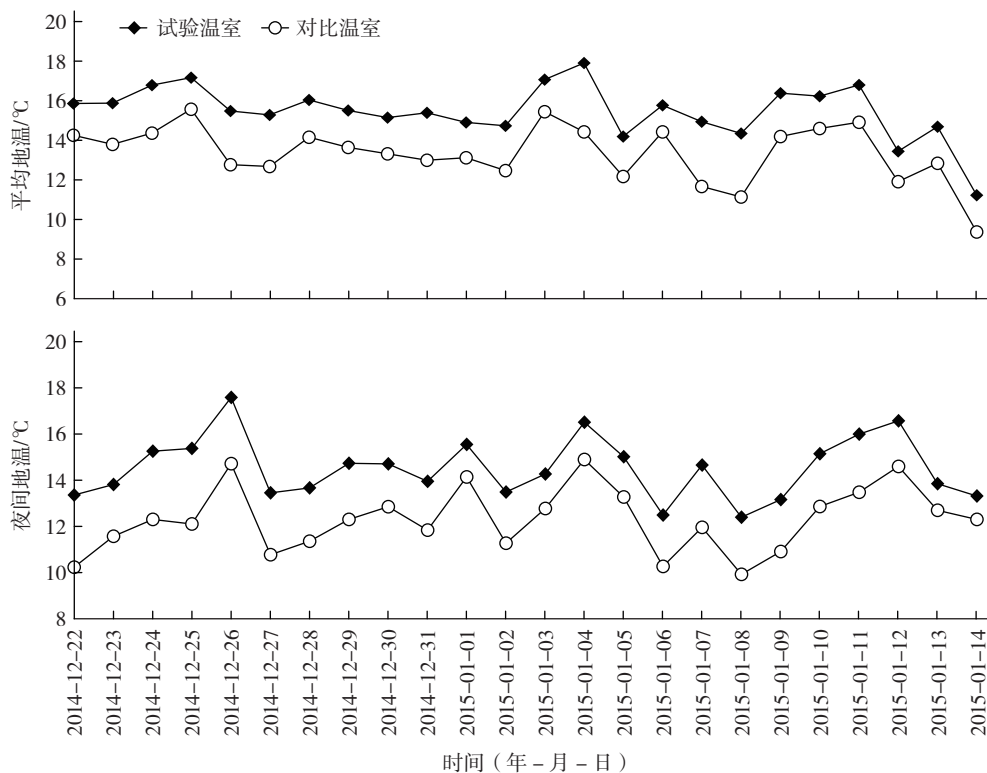


图3 日光温室内地温变化情况

1.86 ℃。

如图3所示,在极端天气条件下,试验温室的每天平均地温基本维持在11.50 ℃以上,高于对照温室,最大温差3.49 ℃,最小温差1.53 ℃,平均温差2.02 ℃,说明水循环增温蓄热系统在极端天气条件下可使温室每天平均地温提高约2.00 ℃左右;试验温室的夜间地温基本维持在13.00 ℃以上,高于对照温室,最大温差1.98 ℃,最小温差1.01 ℃,说明水循环增温蓄热系统在极端天气条件下可使夜间温室地温至少提高1.00 ℃。

2.4 水循环增温蓄热系统经济效益分析

锅炉烧煤系统供热成本主要包括设备(包括锅炉、暖气片等)造价成本和燃料成本。其中,设备成本费为12 000元·栋⁻¹,折旧年限10 a,每年折旧费1 200元·栋⁻¹;1栋温室1个月至少消耗4 t煤(以4 t计),冬季供暖以3个月计,则一个冬季需至少耗用煤12 t·栋⁻¹,煤炭价格为800~900元·t⁻¹,以均价850元·t⁻¹计,则1个月用煤成本为3 400元·栋⁻¹,冬季3个月用煤成本为10 200元·栋⁻¹。因此,采用锅炉烧煤供热的日光温室一年的成本达11 400元·栋⁻¹(表2)。

水循环增温蓄热系统供热成本主要包括设备(包括水罐、墙体材料、暖气片等)造价成本,为22 000元·栋⁻¹,极端天气需远红外热通风设备供暖,造价为1 500元·套⁻¹·栋⁻¹,每栋需两

套,折旧年限均为10 a,则每年的折旧费为2 500元。每天的运行成本包括水泵和远红外热通风的耗电,冬季3个月极端天气出现概率在10%以下,每月按30 d计,则冬季极端天气最多9 d;水泵功率为0.5 kW,每天总运行1 h(每天的10:00~15:00各整点分别开启10 min,循环1次水),昌平种子基地电价为2.5元·度⁻¹,则3个月的运行成本为112.5元·栋⁻¹;远红外热通风设备功率为8 kW,每天运行4 h(24:00至凌晨5:30点,每间歇0.5 h开启1 h),则9 d的运行成本为720元·栋⁻¹;冬季3个月水循环蓄热系统的用电成本总计为832.5元·栋⁻¹。采用水循环增温蓄热系统一年的费用为3 332.5元·栋⁻¹(表2)。综合设备与运行成本,水循环蓄热系统比锅炉烧煤系统能节约8 067.5元·年⁻¹·栋⁻¹。

2.5 水循环增温蓄热系统环境效益分析

从上述试验分析可知,水循环增温系统可使温室的日平均温度至少提高3 ℃,根据热量计算公式: $Q=C_{\text{空气}}m_{\text{空气}}\Delta t$,每天温室空气吸收的热量至少为

$$1.68 \times 10^6 \text{ J}。根据燃煤的热量公式: m_{\text{煤}} = \frac{Q}{q_{\text{煤}} \eta}$$

(η 为锅炉的效率取50%),可知若要释放同等热量($1.68 \times 10^6 \text{ J}$)需要用煤 $0.99 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{栋}^{-1}$,约为1 t煤。

由表3可知,燃烧1 t标准煤的污染物排

表2 水循环蓄热系统供热成本与传统锅炉烧煤系统供热成本比较

供热系统	设备成本/元·栋 ⁻¹	折旧费/元·栋 ⁻¹	运行成本/元·栋 ⁻¹ ·年 ⁻¹	总计/元·栋 ⁻¹ ·年 ⁻¹
锅炉烧煤系统	12 000	1 200	10 200	11 400
水循环蓄热系统	22 000	2 500	832.5	3 332.5

表3 单位污染物排放量和环境成本

污染物	排放量/kg·(tec) ⁻¹	环境成本/元·kg ⁻¹
CO ₂	2 662	0.023
SO ₂	22	6
NO _x	10	8
烟尘	17	2.2

注:表中数据参考王金南等(1998)、Wolfram(2000)、魏学好和周浩(2003)的方法估算。

放量为2 711 kg,其产生的环境成本为310.6元;则在冬季3个月采用温室水循环增温系统可减少污染物排放量244 t,产生环境效益2.8万元。

2.6 水循环增温蓄热系统的应用前景分析

根据热量公式 $\Delta t = \frac{Q}{C_{\text{水}}m}$,水循环增温蓄热系

统释放 $1.68 \times 10^6 \text{ J}$ 热量,仅需提高0.1 ℃,便可使温室的温度提高3 ℃;而锅炉供热则需每天耗用将近1 t的煤,才能使温室的温度提高3 ℃。该技术充分利用了太阳能资源,节约常规能源,减少环境污染,又大大降低温室蓄热增温设备的造价和作业运行成本,提高农民经营收入,有力地提升北京市农业现代化的整体水平,为北京市实现真正的低碳、绿色和循环农业提供了一条有效的解决途径,

发展前景广阔。

3 结论与讨论

本试验结果表明,应用水循环增温蓄热系统提高日光温室温度是可行的,并得出以下结论:

在正常天气下应用水循环增温蓄热系统,可使温室每天平均气温提高约 4.00 ℃,地温提高 2.00 ℃左右;夜间气温至少提高 3.00 ℃,地温至少提高 1.86 ℃。

在极端天气下应用水循环增温蓄热系统,可使温室每天平均气温提高约 3.65 ℃,地温提高约 2.0 ℃左右;可使温室夜间气温至少提高 3.00 ℃,地温至少提高 1.00 ℃。

综合设备与运行成本,水循环增温蓄热系统比锅炉烧煤能节约 8 067.5 元·年⁻¹·栋⁻¹。在冬季 3 个月采用温室水循环增温系统可减少污染物排放量 244 t,产生环境效益 2.8 万元。并且在日光温室中应用该系统后,由于蓄放热量的增加,温室内温度有保证,可实现喜温果菜类蔬菜(如番茄)安全过夜,保证农作物在整个冬季安全越冬。

水循环增温蓄热系统的开发应用,改善了日光温室保温性能,提高了日光温室温度性能,达到“高

效、低耗”的目标,符合低碳环保的要求,保证喜温果菜类蔬菜安全越冬生产,大大增加农民冬季生产收入,具有很好的经济效益和环境效益,在日光温室生产中具有广阔的应用前景。

参考文献

- 方慧. 2011. 日光温室浅层土壤水媒蓄热系统及其与热泵结合的试验研究〔硕士学位论文〕. 北京: 中国农业科学院.
- 方慧, 杨其长, 张义. 2012. 基于热泵的日光温室浅层土壤水媒蓄热装置试验. 农业工程学报, 28(20): 210-216.
- 李凯, 宋丹, 王宏丽, 裘莉娟. 2013. 日光温室瓶胆式相变墙体热性能研究. 北方园艺, (5): 40-42.
- 刘伯聪, 曲梅, 苗妍秀, 陈青云. 2012. 太阳能蓄热系统在日光温室中的应用效果. 北方园艺, (10): 48-53.
- 孙心心. 2010. 日光温室新型保温墙体材料的制备及应用效果的研究〔硕士学位论文〕. 杨凌: 西北农林科技大学.
- 王金南, 杨金田, 曹东, 高树婷, 葛察忠, 钱小平. 1998. 中国排污收费标准体系的改革设计. 环境科学研究, 5(11): 1-7.
- 魏学好, 周浩. 2003. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算. 环境科学研究, 5(11): 2-7.
- 周长吉. 2012. 日光温室中太阳能的二次利用技术. 农业工程技术: 温室园艺, (7): 48.
- Wolfram K. 2000. 德国和欧洲矿物燃料发电的环境损害代价. 国际电力, (3): 54-61.

Studies on Application Effects of Water Circulating, Warming and Heat Storing System in Solar Green-house

GUO Jian-ye¹, QIN Gui^{1, 2}, ZHANG Yan-hong¹, LIU Xiao-ming¹

(¹Beijing Agricultural Machinery Testing Extension Station, Beijing 100079, China; ²Equipment Function Laboratory of Fruit Vegetables Industry Technology System of Beijing Agriculture Innovation Consortium, Beijing 100079, China)

Abstract: In order to increase indoor temperature of solar greenhouse in winter in the Northern region, meet the need of crop growth, and reduce energy consumption for heating, this experiment designed a water circulation system, which relied on greenhouse wall structure, took water as media to store and release heat. In sunny day time during winter, water was stored in a tank after circuiting and passing by heating device, the solar radiation was absorbed in the system, and at night, when indoor temperature reduced to certain degree, water circuiting and passing by heating device, heat was released to greenhouse and the air temperature was increased in the solar greenhouse. The results indicated that application of this system could increase the everyday air temperature in greenhouse by over 3.65 ℃, and the ground temperature increased by about 2.00 ℃; the air temperature at night in greenhouse was at least increased by 3.00 ℃, and the ground temperature increased by over 1.00 ℃. So this water circulation system could not only effectively raise room temperature to satisfy the requirement for crop growth, but also substitute the utilization of fossil fuel, thus reduce the emission of CO, CO₂, SO₂, NO_x, etc. harmful gas, during 3 months winter season, when 280 000 yuan of environment effect were obtained.

Key words: Water circulating, Warming and storing heat system; Solar greenhouse; Energy storage; Increasing temperature