

网络出版时间:2019-07-10 10:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.01.009
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190710.1033.018.html

大跨度非对称酿热温室热环境及节地增产效果分析

肖金鑫, 李建明, 武莹

(西北农林科技大学 园艺学院 农业部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】设计一种大跨度非对称酿热温室(GH-F),探究其保温蓄热性能,为未来温室设计提供新思路 and 理论依据。【方法】GH-F 依据传统日光温室采光保温原理设计,东西走向,南北非对称,跨度 17.0 m,其南部 10.0 m,北部 7.0 m,北部底端内侧根据温室长度配置 30.0 m×1.0 m×1.0 m 的农业废弃物发酵酿热槽。以传统日光温室(GH-P)和大跨度双层内保温大棚(GH-D)为对照,采用理论分析的方法比较 3 种温室在最大采暖负荷(室内外温差 20℃)下的散热量,通过试验测定 3 种温室冬季晴天光照强度日变化及冬季典型晴天、典型阴天、典型雪天条件下的保温蓄热性能,并对 3 种温室建造的投资成本与节地增产效益进行计算。【结果】根据温室热负荷静态模拟理论,在夜间室内外温差 20℃条件下,GH-F、GH-D 和 GH-P 室内散热量分别为 51.21,45.99,41.86 W/m²。GH-F 的保温性能低于 GH-D 和 GH-P,故建造酿热槽来弥补其保温蓄热性能的不足。实测结果表明,在 2016-01-01—2016-01-31,酿热槽 1 月份平均温度高出室内气温 24.7℃,可有效向外界释放热量。在冬季典型晴天条件下,GH-F、GH-D 及 GH-P 夜间平均气温和地温分别为 7.9,5.0,8.0℃和 12.0,10.4,10.7℃;典型阴天条件下,室内夜间平均气温和地温分别为 8.7,5.8,7.3℃和 11.3,9.1,10.9℃;典型雪天条件下,室内夜间平均气温和地温分别为 8.9,6.5,7.1℃和 11.6,9.8,9.3℃。GH-F 的日平均气温分别比 GH-D 和 GH-P 高 2.1~3.0 和 0.7~2.1℃;GH-F 的日平均地温分别比 GH-D 和 GH-P 高 1.4~2.0 和 0.5~2.2℃;在室外最低气温为-14.3℃的极端天气下,GH-F 夜间最低气温为 5.3℃,比 GH-D 和 GH-P 分别高出 3.8 和 0.8℃。统计结果表明,GH-F 实际建造成本为 180.06 元/m²,比 GH-D 及 GH-P 分别低 59.97 和 170.02 元/m²;与 GH-P 相比,GH-F 土地利用率提高 29.93%,番茄产量提高 1.80 kg/m²。【结论】大跨度非对称酿热温室冬季温度、土地利用率 and 实际种植效益均优于传统日光温室,适合在黄河中下游及淮河流域类似气候条件的地区推广应用。

【关键词】 酿热温室;蓄热保温;热环境分析;温室设计

【中图分类号】 S625.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)01-0065-12

Effect of large span asymmetric fermentation heat storage greenhouse on thermal environment, land saving and production increase

XIAO Jinxin, LI Jianming, WU Ying

(The Agriculture Ministry Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest, College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the heat storage and preservation performance of a large span asymmetric fermentation heat storage greenhouse (GH-F) to provide new ideas and theoretical basis for future greenhouse design in China. 【Method】 GH-F was designed based on the principle of solar greenhouse. The azimuth was east-west, and it was asymmetrical in north-south direction with 10 m in south and 7 m in north. The north bottom inside was equipped with a 30.0 m×1.0 m×1.0 m agricultural waste fer-

【收稿日期】 2018-11-28

【基金项目】 国家大宗蔬菜产业技术体系项目(CARS-23-C05);陕西省重点研发项目(2017ZDXM-NY-003)

【作者简介】 肖金鑫(1994—),男,重庆开县人,在读博士,主要从事设施园艺工程研究。E-mail:jinxinxiao1994@163.com

【通信作者】 李建明(1966—),男,陕西洛川人,教授,博士生导师,主要从事设施园艺工程及生理研究。

E-mail:lijianming66@163.com

mentation pool according to the length of the greenhouse. The experiment was compared with Chinese solar greenhouse (GH-P) and a large span double layer internal heat preservation greenhouse (GH-D). The heat dissipation of the three greenhouses under the maximum heating load (temperature difference between indoor and outdoor was 20 °C) was compared by theoretical analysis method. The diurnal variation of illumination intensity of the three greenhouses on sunny days in winter were determined. The thermal storage, heat preservation performance, cost of investment, and benefit of land saving and production increase under typical sunny, cloudy and snowy days in winter were also compared by experimental measurement method.

【Result】 Under the condition of 20 °C difference between indoor and outdoor at night, heat dissipating capacities of GH-F, GH-D and GH-P were 51.21, 45.99 and 41.86 W/m², respectively. The thermal insulation performance of GH-F was less than that of GH-D and GH-P, thus heat was needed to be supplemented by fermentation pool. The average temperature of the fermentation pool was 24.7 °C, higher than the indoor temperature from January 01 to January 31, 2016, which effectively released heat to the inside. The average night air temperatures of GH-F, GH-D and GH-P on a typical sunny day were 7.9, 5.0 and 8.0 °C and ground temperatures were 12.0, 10.4 and 10.7 °C. The average night air temperatures of GH-F, GH-D and GH-P on a typical cloudy day were 8.7, 5.8 and 7.3 °C and ground temperatures were 11.3, 9.1 and 10.9 °C. The average night air temperatures of GH-F, GH-D and GH-P were 8.9, 6.5 and 7.1 °C and ground temperatures were 11.6, 9.8 and 9.3 °C on a typical snowy day. During the whole experimental period, the average daily air temperature of GH-F was 2.1–3.0 °C higher than that of GH-D and 0.7–2.1 °C higher than that of GH-P. The average daily ground temperature of GH-F was 1.4–2.0 °C higher than that of GH-D and 0.5–2.2 °C higher than that of GH-P. Under extreme outdoor temperature of -14.3 °C, the lowest night temperature of GH-F was 5.4 °C, which was 3.8 and 0.8 °C higher than that of GH-D and GH-P, respectively. The final benefit analysis showed that the construction cost of GH-F was 180.06 yuan/m², 59.97 and 170.02 yuan/m² lower than GH-D and GH-P. GH-F increased land utilization rate by 29.93% and increased tomato yield by 1.80 kg/m² in comparison with GH-P. **【Conclusion】** The design of GH-F was reasonable with better temperature performance, land utilization rate and actual planting effect than GH-P. It is suitable for the popularization and application in the middle and lower reaches of the Yellow River and the Huai River Basin.

Key words: fermentation heat storage greenhouses (GH-F); heat storage insulation; fermented heat; thermal environment analysis; greenhouse design

截至 2015 年底,中国设施园艺面积达到 410.9 万 hm²^[1],其中传统日光温室和塑料大棚结构不断创新,推广面积逐年增大。传统日光温室借助北墙体结构白天蓄热、夜间放热^[2-4],提高了室内空气温度,成为北方主要的设施结构,但其土地利用率低,一般仅为 40%左右^[5],造成土地的大量浪费;塑料大棚土地利用率高,但保温蓄热性能差,无法在北方地区实现越冬生产^[6-7]。因此,研究既能满足作物越冬生产,又具备土地利用率高、建造成本低的新型温室迫在眉睫。

传统日光温室通常采用调整室内布局、增加温室长度、加大温室跨度等措施来提高土地利用效率,但提升幅度不明显^[5]。阴阳型温室、大跨度双层内保温大棚以及下沉式大跨度大棚型温室和连栋型温室

等,都能显著提高土地利用效率^[7-10],但冬季室内温度较低,无法进行喜温型蔬菜越冬栽培。

为了既能保证提高土地利用效率、增加室内种植面积,同时使温室具有良好的保温蓄热性能,满足作物生长需求,本课题组在前人研究基础上综合考虑光照、蓄热量和结构等因素^[11],并结合生物酿热发酵技术,利用农业废弃物的生物能补热^[12-13],设计了一种大跨度非对称酿热温室。该温室北部底端内侧配置了与温室长度相同的 1 m×1 m 的农业废弃物发酵酿热槽,可持续向温室内提供热量,提高温室室内温度,以保证作物正常越冬生长。

本试验基于静态模拟分析和试验测试以及经济效益统计分析,探究了大跨度非对称酿热温室的保温蓄热性能以及节地增产效益,以期为中国温室设

计提供新思路 and 理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验温室结构 试验在陕西杨凌西北农林科技大学园艺场试验基地内进行(北纬 34°16′,东经 107°59′)。选取大跨度双层内保温大棚(GH-D)和传统日光温室(GH-P)作对照测量室内环境数据。测试期间夜间采用保温被覆盖,白天 08:30 开启,16:30 关闭,若为其他时间另作说明。晴天 11:30—14:00 开启通风口。

大跨度非对称酿热温室(GH-F),东西走向,长度 32.0 m,跨度为 17.0 m,南屋面投影 10.0 m,北屋面投影 7.0 m,脊高 5.1 m。屋面为单层膜覆盖,南北屋面均有保温被覆盖,低温季节南屋面保温被按常规揭盖管理,北屋面保温被不掀起;东、西两侧山墙用 37.0 cm 厚红砖砌成。温室北部底端建造酿

热槽,长 30.0 m,宽和高均为 1.0 m。发酵材料为番茄、黄瓜、小麦秸秆及猪粪、牛粪、菇渣等农业废弃物,加入发酵物总质量 3% 的 EM 菌剂,相对含水量调至 60% 左右,加水进行发酵,表面用薄膜封住。期间不断加水控制其含水率,以达到较好的发酵产热效果^[13]。对照温室 1 为大跨度双层内保温大棚(GH-D),东西走向,长度 32.0 m,跨度 17.0 m,脊高 5.6 m,南、北屋面投影均为 8.5 m,采用双层骨架,间距为 0.5 m;东、西两侧山墙为 37.0 cm 厚红砖砌成。对照温室 2 是传统日光温室(GH-P),长度 50.0 m,跨度 8.0 m,脊高 3.5 m,北墙为砖墙混合结构,高 2.3 m,厚度 1.0 m,外墙附有厚度为 10.0 cm 的聚苯板,东、西两侧山墙用红砖砌成,厚 80.0 cm,东侧附有 3.0 m×3.0 m 的暖房,后屋坡长 1.7 m,材料为 10.0 cm 厚聚苯板。测试温室结构示意图如图 1 所示。

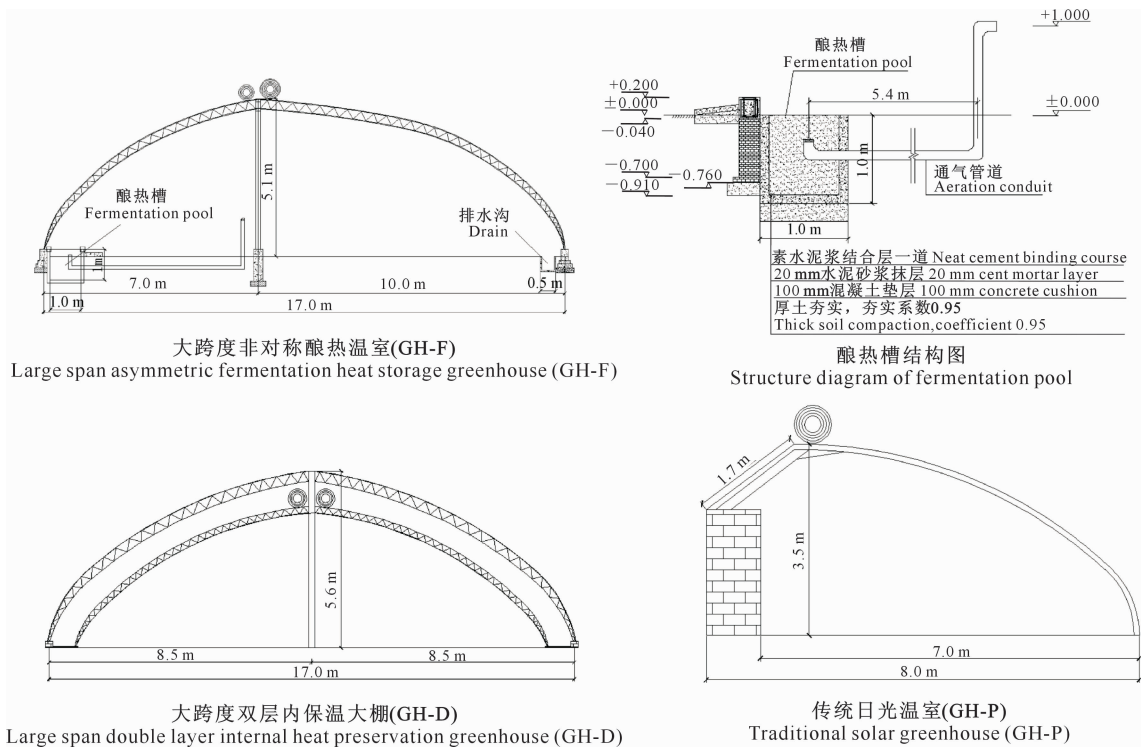


图 1 测试温室的结构图
Fig. 1 Structure of tested greenhouses

1.1.2 测试仪器 室内外空气环境数据、酿热槽内温度和各温室地温数据均采用哈尔滨物格电子公司的多路环境测试仪(PDE-KI)采集,温度测量范围:—30~70℃,准确度±0.5℃,分辨率0.1℃;湿度测量范围:0~99%,准确度±3%,分辨率1%;光照度测量范围0~200 000 lx,准确度为±3 lx。

1.2 温室热负荷静态模拟

3种温室的结构存在较大差异,保温性能需在温室最大采暖负荷^[14-15]条件下计算出夜间各自室内单位面积的散热量进行比较,为了更好地说明问题,模型做如下假设:

1) 根据当地室外和番茄夜间适宜种植温度设计

值,即最大采暖热负荷^[14],将室内外温差定为 20℃,3 种温室均在某一时刻达到该温差条件,模型取该温差条件进行散热量分析;

2)室内空气温度、墙体内表面温度、后屋面内表面温度、土壤相同深度处温度均匀一致;

3)由于模型仅比较温室本身的散热量,同时室

内作物的生理活动对温室环境影响较小,故不考虑作物的影响;

4)模型取夜间温差进行计算,忽略人为操作门、通风口等因素对温度的影响。本研究所涉及的各项符号及其意义见表 1。

表 1 温室热负荷模拟符号、意义及单位

Table 1 Signs, meanings and units for greenhouse heat load simulation

符号 Sign	意义 Meaning	单位 Unit
F_i	各区域(墙体、屋面、后屋坡、土地)面积 Area of backwall, roof, rear slope and land	m^2
K_i	各区域(墙体、屋面、后屋坡、土地)传热系数 Heat transfer coefficient of backwall, roof, rear slope and land	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
T_n	室内温度 Indoor temperature	$^\circ\text{C}$
T_w	室外温度 Outdoor temperature	$^\circ\text{C}$
V	温室内部体积 Internal volume of greenhouse	m^3
N	换气次数 Air changes	h^{-1}
C_p	空气的定压比热 Specific heat at constant pressure of air	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
ρ	空气密度 Air density	kg/m^3
Q	温室供暖热负荷 Heating load of greenhouse	W
Q_1	围护结构耗热量 Heat output of enclosure structure	W
Q_2	冷风渗透耗热量 Heat output of ventilation	W
Q_3	地中传热量 Heat output of soil	W

1.2.1 热负荷计算 温室建筑的最大热负荷出现在室外空气温度最低且没有太阳辐射的时段,温室的热量损失主要集中于围护结构耗热量、冷风渗透耗热量和地中传热量 3 部分,其基本计算公式^[14-15]为:

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3。$$
 (1)

1.2.2 围护结构耗热量 温室围护结构主要包括覆盖材料、后屋坡、后墙、东西山墙。通过围护结构材料的传热量为^[14-15]:

$$Q_1=\sum K_iF_i(T_n-T_w)。$$
 (2)

3 种温室围护结构实测面积如下:GH-P 前屋面 377.60 m²,后屋坡 85.00 m²,东西山墙 43.24 m²,后墙 115.00 m²;GH-F 屋面 618.00 m²,东西山墙 129.74 m²;GH-D 屋面 660.00 m²,东西山墙 140.52 m²。参考文献[14-19]计算得到各围护结构传热系数如下:单、双层塑料薄膜和保温被分别为 6.400, 4.000, 1.004 W/(m²·℃),GH-F 和 GH-D 东西山墙均为 1.62 W/(m²·℃),日光温室后屋坡、山墙、后墙分别为 0.047, 0.770, 0.243 W/(m²·℃)。

1.2.3 冷风渗透耗热量 在风力和热压造成的室内外压差作用下,室外冷空气通过覆盖材料、门窗等缝隙渗入室内,被加热后逸出。其主要受围护结构、门窗朝向、温度、风速等因素的影响,计算方法采取换气次数法^[14-15]:

$$Q_2=\rho C_pNV(T_n-T_w)。$$
 (3)

根据文献[14-15, 20],查阅计算得到夜间保温被覆盖后 GH-P、GH-F、GH-D 的换气次数分别为 0.35, 0.45, 0.25 h⁻¹,温室体积分别为 885.72, 1 946.20, 1 485.80 m³;根据文献[14, 18], ρ 取 1.342 kg/m³, $C_p=1.004 4 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

1.2.4 地中传热量 由于土壤温度场变化比较复杂,在工程上常采用简化计算方法,即假定系数法^[14-15]。具体是将温室地面分成不同地带,距离温室四周 2 m 距离的区域为第 1 地带,计算面积时墙角处重复计算,由第 1 地带继续向温室中间区域划出 2 m 宽的区域为第 2 地带,然后依次划出第 3、第 4 地带。GH-F 和 GH-D 跨度为 17.0 m,共划分 4 个地带,中间 5 m 区域视为第 4 地带;GH-P 只划分 2 个地带,中间 3 m 区域视为第 2 地带。根据文献[14-15]查得第 1, 2, 3, 4 地带的传热系数分别为 0.47, 0.23, 0.12 和 0.07 W/(m²·℃)。采用与温室围护结构相同的公式来计算 Q₃:

$$Q_3=\sum K_iF_i(T_n-T_w)。$$
 (4)

1.3 试验方法

温度、光照测点参考文献[21]观测室内小气候环境的方法进行布设。GH-F 和 GH-D 温度测点分别布置在距离温室北部底端 2 m 处由北向南每隔 6.5 m,距东墙 2 m 处由东到西每隔 12.5 m,及距地面 0.5, 1.0, 1.5 m 高度的 3 个水平面上,共 27 个测点(图 2-a, b)。GH-P 温度测点布置在北部后墙 1

m 处由北向南每隔 2.5 m,距东墙 4.5 m 处由东到西每隔 20.5 m,及距地面 0.5,1.0,1.5 m 高度的水平面上,共 27 个测点(图 2-c,d)。GH-F 和 GH-D 光照测点分别布置在距离温室北部底端 2 m 处由北向南每隔 6.5 m,距东墙 2 m 处由东到西每隔 12.5 m,距地面 1.5 m 高度的水平面上,共 9 个测点(图 2-a)。GH-P 布置在北部后墙 1 m 处由北向南每隔 2.5 m,距东墙 4.5 m 处由东到西每隔 20.5 m,距地

面 1.5 m 高度的水平面上,共 9 个测点(图 2-c)。3 种温室湿度测点位于温室中心 1.5 m 高度处,地温测点位于地下 10 cm。测点布置详见图 2。周年各温室内外温度数据采集时间为 2015-03-01—2016-04-01,酿热槽内温度采集时间为 2015-11-02—2016-02-29,室内环境试验数据采集时间为 2016-01-01—2016-01-31,记录数据的时间间隔为 30 min。

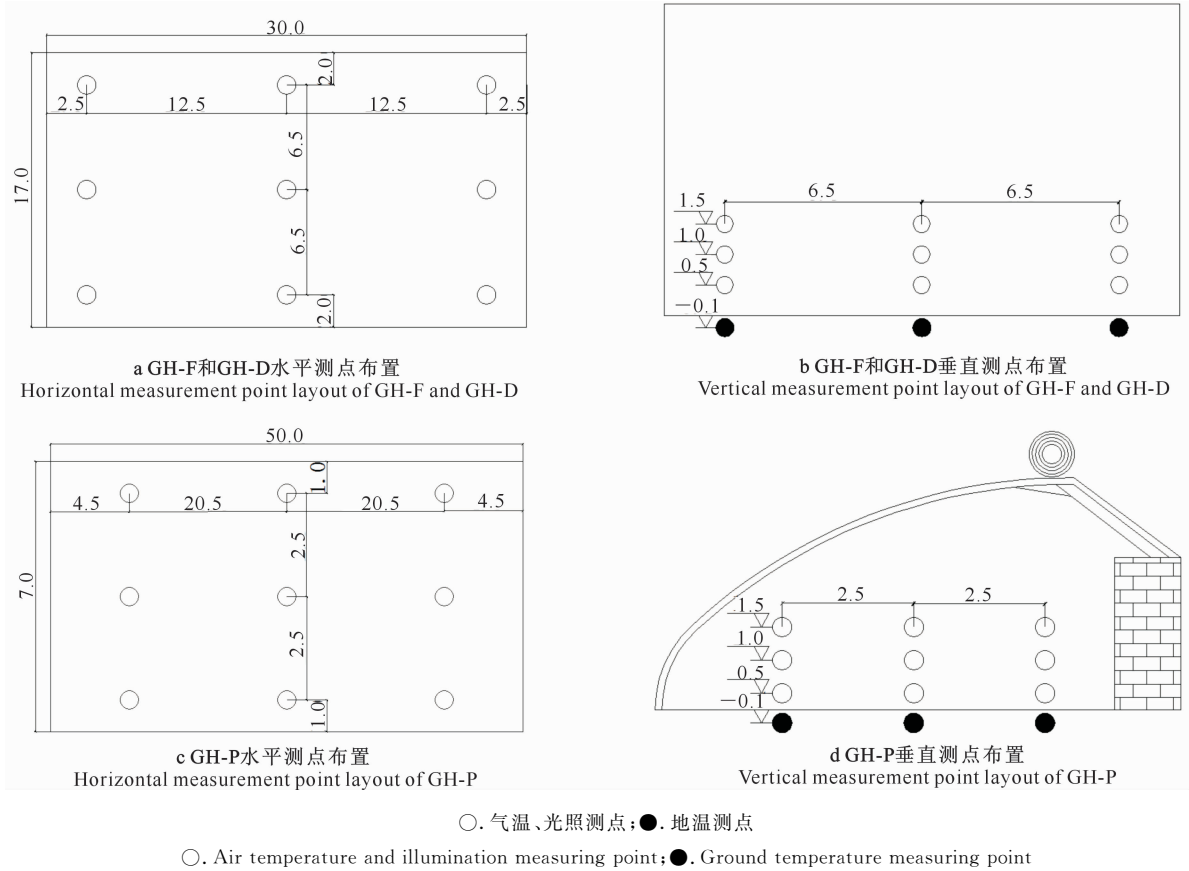


图 2 3 种温室气温、光照及地温测点分布图(单位:m)

Fig. 2 Distribution of air temperature,illumination and ground temperature in three tested greenhouses (unit;m)

1.4 研究内容

1.4.1 温室热环境的模拟 根据 1.2 节所述的理论分析方法,在最大采暖负荷即室内外温差 20 ℃ 条件下,对 3 种温室的散热量进行计算和比较,将温室的散热量量化到每平方米(m²)。

1.4.2 GH-F 内酿热槽温度的变化 分析 2015-11-02—2016-02-29 酿热槽温度的变化情况,并与 2016-01-01—2016-01-31 温室内外的气温进行比较。

1.4.3 温室内光照强度的日变化与最低气温的年变化 测定典型晴天(2016-01-24 09:00—17:00)条件下 3 种温室不同部位的光照强度,取平均值进行比较,并分析 2015-04—2016-03 各温室最低气温的年变化规律。

1.4.4 典型天气条件下温室气温的变化 分别选择典型晴天(2016-01-24 00:00—24:00)、典型阴天(2016-01-30 00:00—24:00)和典型雪天(2016-01-22 00:00—24:00),比较 3 种温室室内外气温的变化情况。选取的典型天气条件,均为连续保持两天的天气状况,即典型晴、阴、雪天条件的前一天也是晴、阴、雪天。

1.4.5 极端低温条件下温室气温的比较 试验期内 2016-01-24 和 2016-01-25 均在 08:00 出现 -14.3 ℃ 的极端低温,但 2016-01-25 从 03:00 到 08:00 室外气温一直低于 -13 ℃,2016-01-24 仅 07:00-08:00 室外气温低于 -13 ℃,并且 3 种温室的室内最低气温出现在 2016-01-25 08:00,故选取

此时对 3 种温室的气温进行比较。

1.4.6 典型天气条件下温室地温的变化 分别选择典型晴天(2016-01-24 00:00—24:00)、典型阴天(2016-01-30 00:00—24:00)和典型雪天(2016-01-22 00:00—24:00),比较 3 种温室室内地温的变化情况。

1.4.7 土地利用率、建造成本及经济效益 分析 3 种供试温室实际应用中的土地利用率、建造成本及经济效益,可直观地看出各个温室的实际应用效果。土地利用率假定为温室有效种植面积与占地面积的比值,占地面积包括因墙体遮挡无法从事生产活动的面积,建造成本为实际建造花费,经济效益按当年

番茄价格计算。

2 结果与分析

2.1 3 种温室热环境模拟分析

由表 2 可知,GH-F、GH-D、GH-P 的室内散热量分别为 51.21、45.99 和 41.86 W/m²,GH-F 的室内散热量分别比 GH-D、GH-P 高 5.22 和 9.35 W/m²,即室内单位面积散热量由小到大分别为 GH-P<GH-D<GH-F,说明温室失去北墙结构对其保温性能产生了较大影响,即使采取了双层覆盖方式的 GH-D,仍然与具有北墙结构的 GH-P 存在差异。

表 2 3 种供试温室散热量的模拟分析
Table 2 Simulation analysis of heat dissipating capacity of three greenhouses

温室 Greenhouse	围护结构耗热量/W Heat released from containment structure	冷风渗透耗热量/W Heat released from cold wind infiltration	地中传热/W Heat released from the earth	热量总损失/W Total heat loss	室内面积/m ² Indoor area	散热量/(W·m ⁻²) Heat dissipating capacity
GH-F	16 613.02	6 558.23	2 946.80	26 118.05	510.00	51.21
GH-D	17 726.45	2 781.55	2 946.80	23 454.80	510.00	45.99
GH-P	8 886.90	2 984.67	2 778.00	14 649.57	350.00	41.86

由表 2 还可以看出,GH-F 围护结构的保温性能相对较差,所以建造了酿热槽填补其保温蓄热性能的不足,并通过测试试验来探究酿热槽对 GH-F 温室内热环境的影响。

2.2 3 种温室热环境实测分析

2.2.1 GH-F 内酿热槽温度的变化 酿热槽是 GH-F 内的补热设施,通过发酵材料在发酵过程中产生的热量持续向温室内放热。由图 3 可以看出,酿热槽平均温度从 2015-11-02 开始发酵的 27℃ 上升至 2015-12-07 的最高温度 47.1℃,温度上升过

程持续了 39 d 后出现缓慢下降,至 2016-02-29 温度降至 28℃。其中 40℃ 以上有 34 d,35℃ 以上有 71 d,说明酿热槽具有持续向外界放热的能力,有利于作物在整个冬季栽培生长。从图 4 可以看出,酿热槽平均温度均高于 GH-F 室内 20℃ 以上,1 月份平均高出 24.7℃。说明酿热槽理论上具有良好的放热能力,根据发酵过程应将发酵温度最高的时段与温室内温度最低的时段同步,这样才能更好地发挥酿热槽补充热量的作用。

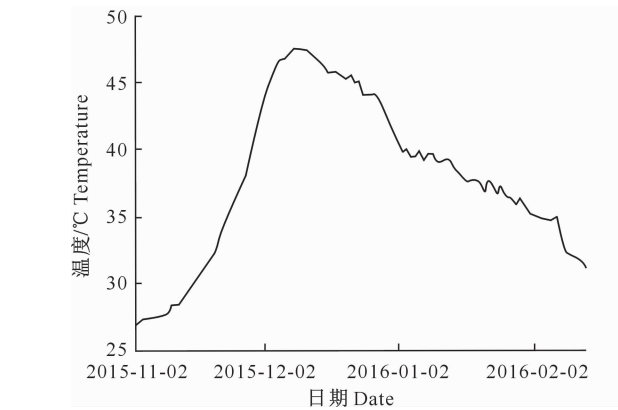


图 3 物料发酵过程中酿热槽平均温度的变化

Fig. 3 Change of average temperature of the fermentation pool during material fermentation

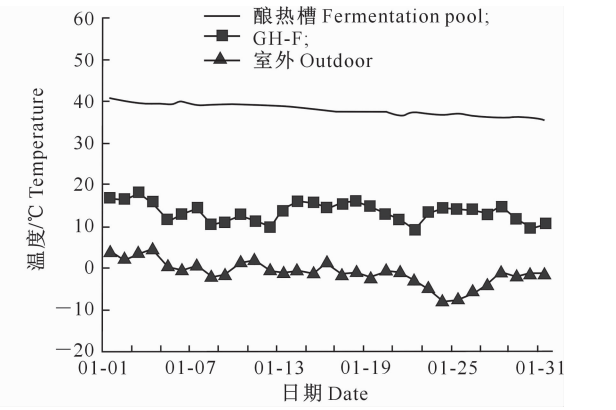


图 4 酿热槽温度与室内外平均气温的对比(2016-01-01—2016-01-31)

Fig. 4 Comparison of average temperature between indoor, outdoor and fermentation pool(2016-01-01—2016-01-31)

2.2.2 室内光照强度日变化 温室内的光照强度与太阳辐射照度密切相关,太阳辐射照度直接决定了室内白天的进热量,进而影响墙体和土壤的蓄热量,因此光照强度与室内温度有密切关系。图5选取了典型晴天(2016-01-24 09:00—17:00)条件下3种温室不同部位光照强度的平均值,显示了冬季典型晴天室内外光照强度的日变化,其大小依次为GH-P>GH-F>GH-D。由于GH-F脊高偏低,导致温室北部光照弱于GH-P,故室内各部位光照平均值低于GH-P;GH-D为了提高其保温性能,采取了双层覆盖方式,其内层为3段式通过2个卷膜器开闭,白天内层塑料薄膜只能部分卷起,导致光照强度明显弱于其他单层覆盖温室,因此其室内的太阳

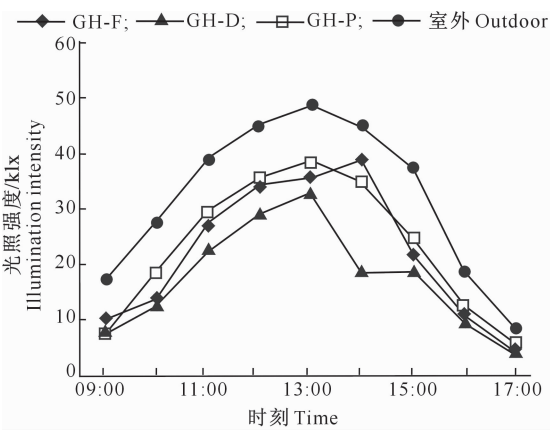


图5 不同温室室内外平均光照强度的日变化
Fig. 5 Variation of indoor and outdoor average illumination in different greenhouses

2.2.4 典型天气条件下室内气温的变化 气温是最直接反映温室性能的一个重要指标,尤其是夜间气温,反映了温室夜间的保温性能,对作物生长有着重要影响。

图7-a显示了典型晴天(2016-01-24 00:00—24:00)3种温室室内外气温的变化情况。由图7-a可以看出,3种供试温室室内气温变化趋势基本一致,夜间温室室内气温缓慢降低,于保温被揭开前达到最低,保温被揭开后(08:30)气温迅速上升,下午14:00左右室内气温达到最高,之后开始降低。在典型晴天条件下,GH-F、GH-D、GH-P的日平均气温分别为14.3、11.3和13.6℃,GH-F比GH-D、GH-P分别高3.0和0.7℃。3种温室夜间(18:00—次日08:00,下同)的平均气温分别为7.9、5.0和8.0℃,GH-F比GH-D高2.9℃,比GH-P低0.1℃,说明在典型晴天条件下,GH-P的北墙体可以进行良好的蓄热,为温室夜间提供了较充足的

辐射量也低于GH-F和GH-P。综上可知,在温室设计中考虑保温性的同时,也需要考虑采光及蓄热性能。

2.2.3 室内年最低气温变化 温室是一种在低温季节可进行蔬菜反季节栽培的设施,所以室内的最低气温决定了作物是否能够正常生长。因此,选取3种供试温室的年最低气温进行分析。从图6可以看出,全年各温室最低气温与室外最低气温的变化趋势一致,冬季(11月至次年1月)GH-F的室内最低气温和GH-P的基本一致,且均显著高于GH-D。1月份因为出现极端低温天气,所以3种温室室内温度与室外差异最明显,且GH-F、GH-D、GH-P气温与室外的温差分别为19.6、15.8和18.8℃。

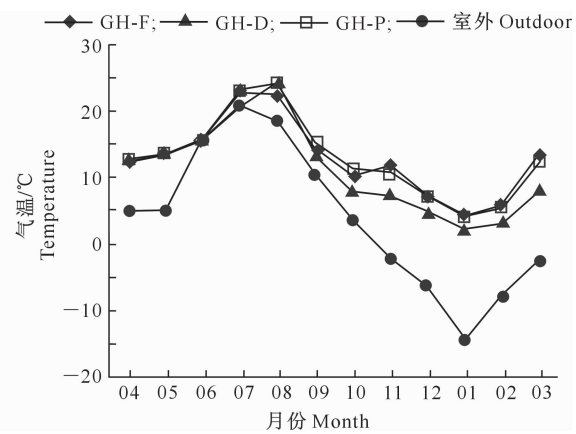


图6 不同温室最低气温的年变化规律(2015-04—2016-03)
Fig. 6 Annual minimum temperature variation in different greenhouses(2015-04—2016-03)

热量。

图7-b显示了典型阴天(2016-01-30 00:00—24:00)3种温室室内外气温的变化情况。由图7-b可以看出,3种供试温室室内气温变化趋势基本一致,夜间室内气温缓慢降低,于保温被揭开前达到最低,保温被揭开后气温开始上升,但由于阴天太阳辐射弱,气温上升速度较慢。在典型阴天条件下,GH-F、GH-D、GH-P的日平均气温分别为9.8、7.2和8.2℃,GH-F比GH-D、GH-P分别高2.6和1.6℃。3种温室夜间的平均气温分别为8.7、5.8和7.3℃,GH-F比GH-D、GH-P分别高2.9和1.4℃。

图7-c显示了典型雪天(2016-01-22 00:00—24:00)3种温室室内外气温的变化情况。由图7-c可以看出,3种供试温室室内气温变化趋势基本一致,雪天保温被不揭起,室内气温变化幅度较小。在典型雪天条件下,GH-F、GH-D、GH-P的日平均气

温分别为 9.4、7.3 和 7.3℃,GH-F 比 GH-D 和 GH-P 均高 2.1℃。3 种温室夜间的平均气温分别为 8.9、6.5 和 7.1℃,GH-F 比 GH-D、GH-P 分别高 2.4 和 1.8℃。

由图 7 可知,GH-F 和 GH-D 在典型晴天条件下夜间室内气温低于典型阴天和雪天条件下,这是由于典型晴天夜间室外气温显著低于其余 2 种天气条件下,导致 3 种温室夜间散热量增大,但是 GH-P

具有北墙结构,白天吸收了大量热量,夜间可为温室供热,所以 GH-P 典型晴天条件下夜间气温高于其余 2 种天气条件下。典型晴天条件下,GH-F 白天气温高于 GH-D 和 GH-P,而夜间气温低于 GH-P,说明 GH-F 在晴天条件下夜间保温蓄热性能低于 GH-P。典型阴天、雪天条件下,GH-F 的气温均高于其余 2 种温室,说明在不良天气条件下其保温性能最好,具有良好的抵御不利天气的能力。

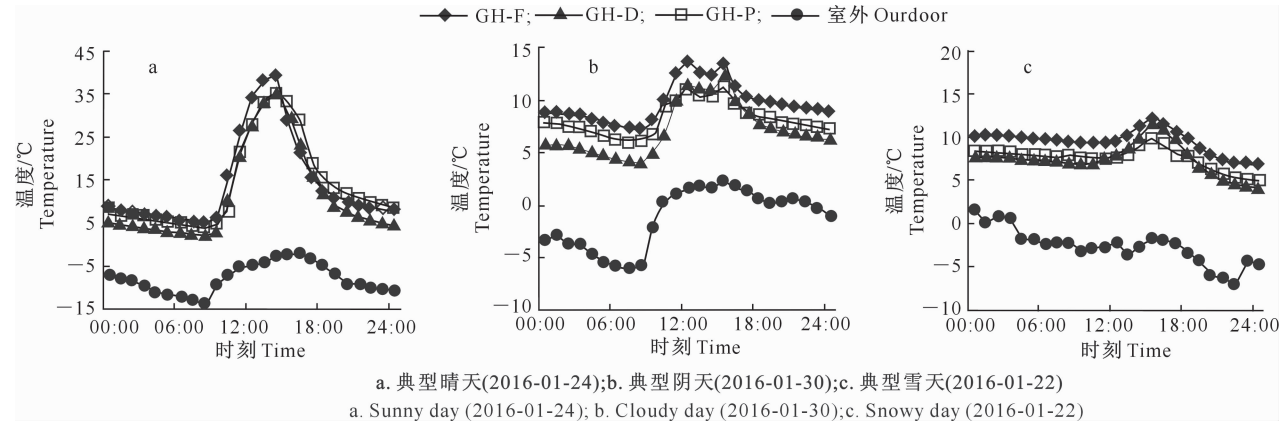


图 7 不同温室在典型天气条件下室内外平均气温的变化

Fig. 7 Variation of indoor and outdoor air average temperatures in different greenhouses under different typical weather conditions

2.2.5 极端低温条件下室内气温的变化 极端低温会使温室内作物发生冷害,甚至冻害,严重影响作物的生长发育,因此冬季作物栽培最怕遇到极端低温。

试验期间 2016-01-24 和 2016-01-25 均在 08:00 出现-14.3℃的极端低温,且 3 种温室的室内最低气温均出现在 2016-01-25 的 08:00,此时 GH-F、GH-D、GH-P 的最低气温分别为 5.3、1.5 和 4.5℃,GH-F 比 GH-D、GH-P 分别高 3.8 和 0.8℃。由上述分析可知,GH-F 室内最低气温仍满足作物

正常越冬的最低温度需求^[14],此时室内外温差达到 19.6℃,说明 GH-F 在极端天气条件下具有良好抵御低温的能力。

2.2.6 典型天气条件下室内地温的变化 图 8 分别选取了典型晴天(2016-01-24)、典型阴天(2016-01-30)、典型雪天(2016-01-22)的土壤温度数据进行分析。对比图 7 和图 8 可知,不同天气条件下 3 种温室地温变化趋势基本一致,且均与室内气温变化趋势相似。

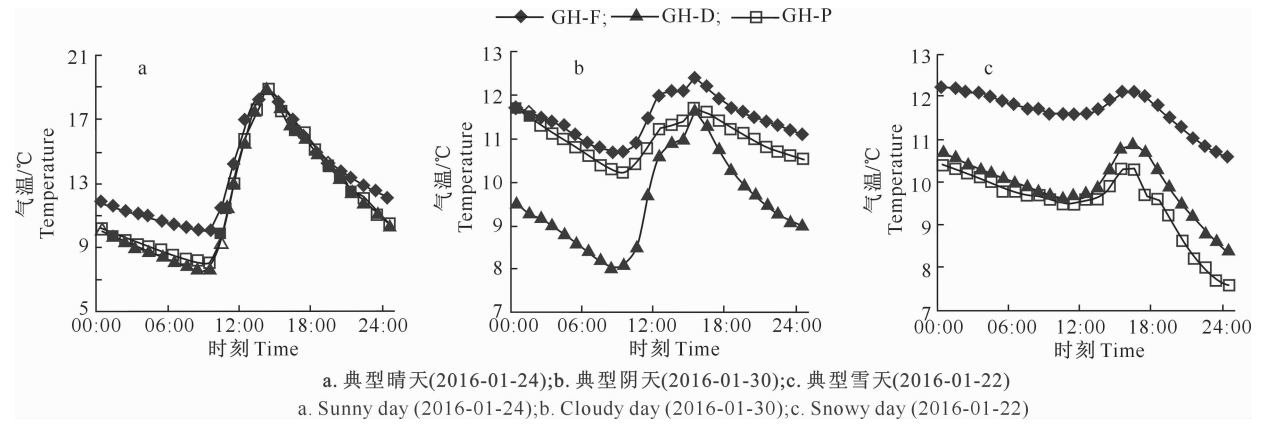


图 8 不同温室在典型天气条件下室内外平均地温的变化

Fig. 8 Variation of average soil temperature in different greenhouses under different typical weather conditions

图 8-a 显示了典型晴天(2016-01-24 00:00—24:00)条件下 3 种温室室内地温的变化情况。由图 8-a可知,GH-F、GH-D、GH-P 的日平均地温分别为 13.3、11.9 和 12.1℃,GH-F 比 GH-D、GH-P 分别高 1.4 和 1.2℃;3 种温室夜间的平均地温分别为 12.0、10.4 和 10.7℃,GH-F 比 GH-D、GH-P 分别高 1.6 和 1.3℃。

图 8-b 显示了典型阴天(2016-01-30 00:00—24:00)条件下 3 种温室室内地温的变化情况。由图 8-b可知,GH-F、GH-D、GH-P 的日平均地温分别为 11.5、9.5 和 11℃,GH-F 比 GH-D、GH-P 分别高 2.0 和 0.5℃;3 种温室夜间的平均地温分别为 11.3、9.1 和 10.9℃,GH-F 比 GH-D、GH-P 分别高 2.2 和 0.4℃。

图 8-c 显示了典型雪天(2016-01-22 00:00—24:00)条件下 3 种温室室内地温的变化情况。由图 8-c 可知,GH-F、GH-D、GH-P 的日平均地温分别为 11.7、9.9 和 9.5℃,GH-F 比 GH-D、GH-P 分别高 1.8 和 2.2℃;3 种温室夜间的平均地温分别为 11.6、9.8 和 9.3℃,GH-F 比 GH-D、GH-P 分别高 1.8 和 2.3℃。GH-D 的夜间平均地温比 GH-P 高

0.5℃,可能是由于连续雪天条件下,GH-P 的室内气温一直高于 GH-D,导致散热量增大。所以在连续雪天条件下,GH-P 出现夜间地温较低的现象。

由上述分析可知,3 种典型天气条件下 GH-F 的地温最高,接近番茄根系适宜的生长温度(15~18℃)^[14,22],对作物生长最为有利。

2.3 3 种温室土地利用率、建造成本及经济效益

温室土地利用率计算方法各异,受室内布局方式,种植模式和温室间距等多方面影响^[5]。在实际应用中,GH-F、GH-D、GH-P 温室间距分别为 3、3、6 m,再考虑墙体等因素计算得到 GH-F、GH-D、GH-P 的土地利用率分别为 70.82%,70.82%和 41.49%。若不考虑温室间车辆行驶的问题,GH-F 温室间距可进一步缩小,土地利用率可进一步提高。假设 GH-F 和 GH-P 均为 50 m 长,温室间距各为 3 和 6 m,则 GH-F 和 GH-P 的土地利用率分别为 71.42%和 41.49%,GH-F 的土地利用率比 GH-P 高 29.93%。

对目前陕西杨凌地区 2016—2017 年 3 种温室的建造成本、生产投资及经济效益进行统计分析,结果如表 3 所示。

表 3 3 种温室的平均建造成本、生产成本及经济效益

Table 3 Average construction costs,production costs and benefits of three greenhouses

温室 Greenhouse	建造成本/(元·m ⁻²) Construction cost			折旧费/ (元·m ⁻²) Depreciation	生产成本/(元·m ⁻²) Cost of production			产量/ (kg·m ⁻²) Yield	产值/元 Output value	净利润/ (元·m ⁻²) Net profit
	土建 Civil engineering	钢结构及其他 Steel structure and other	合计 Total		生产资料 Production materials	劳动力 Labor costs	合计 Total			
GH-F	70.91	109.15	180.06	11.99	10.49	14.34	24.83	24.29	60.73	23.90
GH-D	60.72	179.31	240.03	16.04	9.00	9.00	17.99	18.00	39.58	5.55
GH-P	206.00	144.08	350.08	23.39	7.50	16.49	23.99	22.49	56.22	8.85

注:GH-F 和 GH-P 种植模式为一年一茬(越冬茬),GH-D 为春提前或者秋延后种植。净利润=产值-生产成本-折旧费,温室折旧年限 15 年。
Note:Planting mode in GH-F and GH-P is once per year (overwintering cultivation),and planting mode in GH-D is in advance in spring or delayed in autumn. Net profit=Output value—Cost of production—Depreciation. The depreciation life of greenhouse is 15 years.

从表 3 可以看出,GH-F、GH-D、GH-P 的建造成本分别为 180.06、240.03 和 350.08 元/m²,GH-F 分别比 GH-D、GH-P 低 59.97 和 170.02 元/m²。其中 GH-F 和 GH-D 去除北墙结构后,土建成本比 GH-P 分别低 135.09 和 145.28 元/m²;同时 GH-F 和 GH-D 温室空间增大,可使用小型农机进行机械化操作,有效降低了劳动力成本;GH-F 采用单层覆盖,在骨架和覆盖材料方面比 GH-D 节省了部分成本。GH-F 酿热槽的建造成本包括建筑材料、机械使用费、人工成本等共计 7 800 元。发酵材料中秸秆、猪粪、牛粪、菇渣体积比为 1:1:1:1,总用量 12 m³;猪粪、牛粪、菇渣平均单价 100 元/m³,秸秆

均为上茬作物秸秆,不计费用,发酵材料共计费用 900 元,每年发酵材料的清理、二次利用和重新装入需要人工成本费 1 200 元,故每年发酵材料总成本 2 100 元。由于在杨凌地区 GH-D 中主要进行春提前或秋延后栽培,因此产量分析中 GH-F 和 GH-P 统计越冬茬产量,GH-D 统计春提前或秋延后栽培产量,GH-F、GH-D、GH-P 最终番茄产量分别为 24.29、18.00 和 22.49 kg/m²,GH-F 番茄产量比 GH-D 和 GH-P 增加 6.29 和 1.80 kg/m²,实际利润受市场影响,根据当地调查,GH-F 的生产效益最好。另外,发酵产热后的农业废弃物还可以二次浸提,浸提出的营养液可用于生产作物,有效减少生产

成本,提高作物产量与品质。

3 讨 论

传统日光温室空间小,内部截获的太阳辐射可使室内温度上升更快,同时因具有北墙结构,蓄热效果良好,所以该类温室一直是北方冬季寒冷地区的主要生产设施。但该类温室普遍存在土地利用率低、种植空间小、不利于机械化操作、建造成本高等问题,为克服此类问题,研究开发大型温室结构十分必要。本研究设计的大跨度非对称酿热温室,去除了北墙结构,增大了室内种植面积和空间,提高了土地利用效率。但由于室内空间的增大,没有北墙结构蓄热与保温,保温性能低于传统日光温室,针对这一点,大跨度双层内保温大棚采取了双层覆盖,然而仍与传统日光温室存在较大差距。所以大跨度非对称酿热温室,采取单层覆盖并增加了酿热设施,弥补了没有后墙结构带来的蓄热性和保温性不足的缺点,大幅度提高了温室的保温性能。该温室较崔世茂等^[23]和郅丽娟等^[24]设计的非对称温室,跨度增加了 10 m,可机械化操作程度提高,性能也得到了明显提升,在陕西杨凌地区其温度优于传统日光温室,可进行喜温性蔬菜越冬栽培。

相较于大跨度双层内保温大棚,大跨度非对称酿热温室采用单层覆盖和非对称结构,增加了南屋面长度,使温室呈现非对称结构,提升了采光性能^[25]。但该温室脊高偏低,导致温室北部部分时刻存在遮阴问题,随后这类温室脊高已提高到 6 m,很好地改善了北部采光不足的问题。

此外,设计的酿热发酵设施对农业废弃物进行了二次利用,这是温室利用生物质能的一种新型形式,可改善传统加热方式造成的污染和能耗问题^[26-27]。国内外主要以农业废弃物为原材料进行发酵处理,在温室中也应用了内、外置式秸秆反应堆和生物反应堆^[27-28],这些措施均可有效提高室内 CO_2 浓度、降低空气相对湿度、提高作物的光合性能^[29-30]。本课题组在此基础上设计的酿热设施不仅具备了上述优点,还可以在冬季向温室内持续放热,并将产热后的废弃物浸提出营养液用于作物施肥,实现了农业废弃物的循环利用。本次发酵采用了静态高温堆肥的方式,物料相对含水量为 60%,总时长 75 d。发酵产热受很多因素影响,下一步温室生物发酵产热研究将从农业废弃物的筛选、组合、发酵时间以及含水量等方面进行研究,以达到最优的组合方案,为温室提供更多的热量,改善室内微环境。

另外,本次试验重在探究酿热槽对于温室内热环境的改变,未能详细分析酿热槽内部的热量变化以及向周围土壤的热量传导问题,未来将详细研究该部分内容。

4 结 论

本研究提出了一种大跨度非对称酿热温室,与传统日光温室和大跨度双层内保温大棚进行理论分析和试验对比,得出以下结论:

1)理论分析中,在最大采暖热负荷条件下,大跨度非对称酿热温室(GH-F)、大跨度双层内保温大棚(GH-D)、传统日光温室(GH-P)室内散热量分别为 51.21、45.99 和 41.86 W/m^2 ,可以看出 2 种没有北墙结构的温室大棚保温性低于传统日光温室。大跨度非对称酿热温室(GH-F)内部的酿热槽 1 月份发酵温度可高出室内平均气温 24.7 $^{\circ}\text{C}$,说明该设施可以持续向外界释放热量,有效弥补了失去北墙结构带来的热损失。

2)在冬季典型晴天、典型阴天和典型雪天条件下,大跨度非对称酿热温室(GH-F)室内日平均气温和地温分别高于大跨度双层内保温大棚和传统日光温室 2.1~3.0、0.7~2.1 $^{\circ}\text{C}$ 和 1.4~2.0、0.5~2.2 $^{\circ}\text{C}$ 。在室外最低气温 -14.3 $^{\circ}\text{C}$ 的极端天气下,大跨度非对称酿热温室夜间最低气温为 5.3 $^{\circ}\text{C}$,满足番茄生长的最低气温需求。说明大跨度非对称酿热温室可有效提升室内气温和土壤温度,特别是连续阴天、雪天及极端低温天气条件下,均能够很好地抵御不利天气的影响,维持作物正常生长,实现茄果类蔬菜越冬栽培。

3)根据当地实际调研,大跨度非对称酿热温室的建造成本、番茄产量分别为 180.06 元/ m^2 和 24.29 kg/m^2 ,建造成本比大跨度双层内保温大棚和传统日光温室分别降低 59.97 和 170.02 元/ m^2 ,番茄产量高出 1.80 和 6.29 kg/m^2 ,生产效益良好。同时温室长度达到 50 m 时,土地利用效率比传统日光温室提高了 29.93%。

大跨度非对称酿热温室在显著提高土地利用率和降低建造成本的同时,保持了良好的蓄热保温性能,说明该温室设计合理,适合在黄河中下游及淮河流域气候条件下推广应用。下一步研究将主要围绕温室如何结合其他蓄热降温装置,达到冬季升温、夏季降温,实现全年生产的目的,并将温室的适用范围扩大。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国农业部,中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴:2015 [M]. 北京:中国农业出版社,2016.
The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, China Agricultural Yearbook Editorial Committee. China agricultural yearbook:2015 [M]. Beijing:China Agriculture Press, 2016.
- [2] 马承伟,陆海,李睿,等. 日光温室墙体传热的一维差分模型与数值模拟 [J]. 农业工程学报,2010,26(6):231-237.
Ma C W, Lu H, Li R, et al. One dimensional finite difference model and numerical simulation for heat transfer of wall in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 231-237.
- [3] 管勇,陈超,凌浩恕,等. 日光温室三重结构相变蓄热墙体传热特性分析 [J]. 农业工程学报,2013,29(21):166-173.
Guan Y, Chen C, Ling H S, et al. Analysis of heat transfer properties of three-layer wall with phase change heat storage in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(21): 166-173.
- [4] 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 J S, Bai Q, Zhang Y H. Analysis on measurement of heat absorption and release of wall and ground in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 231-236.
- [5] 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(5):16-20.
Zhou C J, Liu C X. Methods of improving land use efficiency in solar greenhouse [J]. China Fruit and Vegetable, 2009(5): 16-20.
- [6] 李萍萍,胡永光. 冬季塑料大棚多重覆盖及电加热增温效果研究 [J]. 农业工程学报,2002,18(2):76-79.
Li P P, Hu Y G. Thermal preservation effect of multi-film covering and heating wire in plastic greenhouses in winter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(2): 76-79.
- [7] 韩丽蓉,王宏丽,李凯,等. 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, et al. 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.
- [8] 王桂珍,刘凤堂,刘洪锁. 阴阳型日光温室设施建设及栽培模式 [J]. 中国蔬菜,2009(15):44-45.
Wang G Z, Liu F T, Liu H S. The north-south type greenhouse construction and cultivation mode [J]. Chinese Vegetables, 2009(15): 44-45.
- [9] 李建明. 大跨度双层内保温塑料大棚的特点与应用 [J]. 西北园艺:蔬菜,2012(2):6-7.
Li J M. Characteristics and application of large span double layer internal thermal insulation plastic greenhouse [J]. Northwest Horticulture:Vegetable, 2012(2): 6-7.
- [10] 郝丽娟,赵付江,韩晓倩,等. 三连栋日光温室的结构设计与建造 [J]. 河北农业科学,2014,18(2):100-103.
Qie L J, Zhao F J, Han X Q, et al. Structure design and construction of three-pan sunlight greenhouse [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2014, 18(2): 100-103.
- [11] Zhang Z K, Liu S Q, Liu S H, et al. Estimation of cucumber evapotranspiration in solar greenhouse in northeast China [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(4): 512-518.
- [12] 张百良,王吉庆,徐桂转,等. 中国生物能源利用的思考 [J]. 农业工程学报,2009,25(9):226-231.
Zhang B L, Wang J Q, Xu G Z, et al. Thinking about bioenergy utilization in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 226-231.
- [13] 雷大鹏,黄为一,王效华. 发酵基质含水率对牛粪好氧堆肥发酵产热的影响 [J]. 生态与农村环境学报,2011,27(5):54-57.
Lei D P, Huang W Y, Wang X H. Effect of moisture content of substance on fermentation and heat production of cattle manure in aerobic composting [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(5): 54-57.
- [14] 周长吉. 温室工程设计手册 [M]. 北京:中国农业出版社,2007.
Zhou C J. Greenhouse engineering design manual [M]. Beijing:China Agriculture Press, 2007.
- [15] 陈超. 现代日光温室建筑热工设计理论与方法 [M]. 北京:科学出版社,2017.
Chen C. Theory and method of thermal design for modern solar greenhouse building [M]. Beijing:Science Press, 2017.
- [16] 邹志荣. 设施农业环境工程学 [M]. 北京:中国农业出版社,2008.
Zou Z R. Facility agriculture environmental engineering [M]. Beijing:China Agriculture Press, 2008.
- [17] 赵淑梅,马承伟,刘晨霞,等. 温室多层覆盖传热系数与热节省率的工程算法 [J]. 农业工程学报,2011,27(7):264-269.
Zhao S M, Ma C W, Liu C X, et al. Computing method for thermal transmittance and saving ratio of heat loss in multi-layer covering of greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 264-269.
- [18] 杨世铭. 传热学 [M]. 北京:高等教育出版社,2006.
Yang S M. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [19] 刘晨霞,马承伟,王平智,等. 日光温室保温被传热的理论解析及验证 [J]. 农业工程学报,2015,31(2):170-176.
Liu C X, Ma C W, Wang P Z, et al. Theoretical analysis and experimental verification of heat transfer through thick covering materials of solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 170-176.
- [20] 佟国红,车忠仕,白义奎,等. 热量平衡法确定日光温室换气次数 [J]. 沈阳农业大学学报,2008(4):459-462.
Tong G H, Che Z S, Bai Y K, et al. Air exchange rate calculation for solar greenhouse using thermal balance method [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2008(4): 459-

462.

[21] 李式军. 设施园艺学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
Li S J. Facility horticulture [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.

[22] 赵云龙, 于贤昌, 李衍素, 等. 碳晶电地热系统在日光温室番茄生产中的应用 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 131-138.
Zhao Y L, Yu X C, Li Y S, et al. Application of electric carbon crystal soil-warming system for tomato production in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(7): 131-138.

[23] 崔世茂, 陈源闽, 霍秀文, 等. 大棚型日光温室设计及光效应初探 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 214-217.
Cui S M, Chen Y M, Huo X W, et al. Design of the solar lean-to greenhouse without wall and preliminary study on the photo effect [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(Supp.): 214-217.

[24] 郝丽娟, 赵付江, 韩晓倩, 等. 改良型塑料大棚的设计与建造 [J]. 河北农业科学, 2016, 20(6): 49-51.
Qie L J, Zhao F J, Han X Q, et al. Design and construction of the improved plastic shed [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2016, 20(6): 49-51.

[25] Sethi V P. On the selection of shape and orientation of a greenhouse: thermal modeling and experimental validation [J]. Solar Energy, 2009, 83(1): 21-38.

[26] 何凌云, 吴梦, 尹芳, 可再生能源投资总量和结构对碳排放的影响研究 [J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2017, 17(1): 76-88.

He L Y, Wu M, Yin F. Effect of total amount and structure of renewable energy investment on carbon emissions of China [J]. Journal of China University of Geosciences(Social Science Edition), 2017, 17(1): 76-88.

[27] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173-179.
Gao L W, Ma L, Zhang W F, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 173-179.

[28] Lal R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel [J]. Environment International, 2005, 31(4): 575-584.

[29] 卞中华, 王玉, 胡晓辉, 等. 外置式与内置式秸秆生物反应堆对番茄生长及光合性能的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 753-758.
Bian Z H, Wang Y, Hu X H, et al. Effects of outer type and built-in type straw bio-reactors on tomato growth and photosynthetic performance [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 753-758.

[30] 杨圆圆, 韩娟, 王阳峰, 等. 秸秆生物反应堆对日光温室微生态环境及草莓光合性能的影响 [J]. 西北农业学报, 2014, 23(8): 167-172.
Yang Y Y, Han J, Wang Y F, et al. Effects of straw biological reactor on the greenhouse micro-ecological environment and photosynthetic characteristics of strawberry [J]. Northwest Agricultural Journal, 2014, 23(8): 167-172.