

高效保温材料在日光温室后屋面中的应用研究

王云冰, 邹志荣, 杨建军, 张志新, 燕 飞

(西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】分析高效保温材料的热工性能,并测试其在日光温室后屋面中的应用效果,为日光温室后屋面保温节能材料的优选提供依据。【方法】以聚苯板、挤塑板、玻璃棉及常规材料干草帘作为后屋面保温层材料,分析其热工性能及热经济性能,并应用于日光温室后屋面,通过温室内外温度变化、热量传递及植物生长情况评价其保温性能。【结果】挤塑板的各项热工性能指标较优,其温室热惰性指标为 2.59,技术经济特征量为 29.26 (元·W)/(m⁴·K),以其作为后屋面保温层的 3 号日光温室内气温、土温均较高,后屋面外表面夜间放热总量 602.92 kJ/m²,低于其他温室,其内西葫芦定植后前期各项生长指标与常规后屋面材料温室间存在显著差异,其产量达 38 847 kg/hm²。聚苯板技术经济特征量也较低,保温性能次之;玻璃棉由于附加抗压层而导致应用成本提高,常规材料干草帘的保温性最差。【结论】挤塑板具有良好的热工及保温性能,较适用于日光温室后屋面保温层。

【关键词】 保温材料;日光温室;后屋面;环境性能

【中图分类号】 S625.1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)01-0173-08

Application research of highly effective thermal insulation materials on solar greenhouse back-roof

WANG Yun-bing, ZOU Zhi-rong, YANG Jian-jun, ZHANG Zhi-xin, YAN Fei

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

Abstract: 【Objective】 We analyzed the thermal performance of highly effective thermal insulation materials and tested the application effect of solar greenhouse when it was used to construct the back-roof, in order to provide evidence for the optimization of solar greenhouse energy saving and thermoinsulating materials. 【Method】 With polystyrene board, polystyrene compressed foam board, glass wool and hay curtain as back-roof thermoinsulating layer materials, we analyzed the thermal performance and thermal economic performance, and applied them to solar greenhouse back-roof, and evaluated the thermal insulation performance by internal and external temperature variation of greenhouse, heat transfer, plant growth situation. 【Result】 All of thermal performances of polystyrene compressed foam board were good, the greenhouse thermal inert index was 2.59, technical economic characteristic quantity was 29.26 (yuan·W)/(m⁴·K). The 3 # greenhouse whose back-roof thermoinsulating layer was composed by polystyrene compressed foam board presented higher air temperature and soil temperature inside, and the outer surface of back-roof released heat was 602.92 kJ/m², less than other greenhouse. The pumpkin growth indexes of 3 # greenhouse were significantly different compared with common greenhouse's at early growth stage after field planting, its yield reaching 38 847 kg/hm². The technical economic characteristic quantity of polystyrene board was slightly lower than polystyrene compressed foam board's, and so was the thermal insulation per-

* 【收稿日期】 2009-04-16

【基金项目】 陕西省 13115 创新工程计划项目(2007ZDGC-03)

【作者简介】 王云冰(1984—),男,重庆彭水人,在读硕士,主要从事设施园艺研究。E-mail: wangyunbing007@163.com

【通信作者】 邹志荣(1956—),男,陕西延安人,教授,博士生导师,主要从事设施农业环境工程研究。
E-mail: zouzhihong2005@163.com

formance. The application cost of glass wool increased because of the additional compression resistance layer, and the thermal insulation performance of common greenhouse was the worst. 【Conclusion】 The polystyrene compressed foam board is more suitable for application of solar greenhouse back-roof because of its excellent thermal insulation performance.

Key words: thermal insulation material; solar greenhouse; back-roof; environmental performance

日光温室维护结构材料的保温性能,一直是相关研究者关注的热点问题之一。目前,保温性能的衡量方法可分为热工性能分析和应用试验的环境评价两方面。在维护结构材料方面,白义奎等^[1]认为,缀铝箔聚苯板空心墙体的保温绝热性能较好;李小芳等^[2]对日光温室复合墙体中填充材料的保温性能进行了比较研究,认为填充生石灰提温效果最好;许刚毅等^[3]提出,在 370 mm 厚砖墙上直接外贴 10 cm 聚苯板具有较好的经济及热工性能;柴立龙等^[4]分析了北京地区几种墙体材料和保温覆盖材料的热工性能参数及保温性和经济性;乔正卫等^[5]对 4 种日光温室保温被进行了室内性能测试;戴丹丽等^[6]研究认为,将密度 100 g/m² 纺粘长丝无纺布整体复合塑料薄膜作为温室内保温材料较为理想。在维护结构保温材料中,将导热系数低于 0.05 W/(m·K)的材料称为高效保温材料^[7],这类材料在日光温室后屋面保温研究和应用较多的是聚苯板^[8-9]。目前,相关研究主要集中在墙体和前屋面材料的保温性能上,而对后屋面保温材料的研究较少。与墙体和前屋面材料不同,后屋面材料要求具备质轻、保温、抗压、防水等特点。后屋面材料中除聚苯板外,挤塑板(因其完整的闭孔结构而具有优异的保温隔热性、抗湿性及抗压能力)和玻璃棉(具有较高

热阻及造价低的优势)也是较为理想的后屋面材料。本研究分析了聚苯板、挤塑板、玻璃棉及常规材料干草帘的热工性能,并将其应用到日光温室后屋面中以评价其环境性能,从而充分研究了各种材料的保温性能,以期日光温室后屋面保温材料的优选和保温节能研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验温室概况

日光温室后屋面保温材料应用试验在陕西杨凌大寨乡绿成设施农业园内进行。试验选用温室类型为西北型日光温室,方位角 0°,温室长 60 m,跨度 7.5 m,脊高 3.5 m,水泥预制拱架间距 1 m;透明覆盖物为 EVA 薄膜,保温覆盖物为 1.1 m×9 m 草帘,厚度 3 cm,晚间再覆盖 1 层 EVA 薄膜;土质墙体平均厚度为 1 m,后墙高 2.7 m,前屋面角为 28°,后屋面角为 42°,后屋面支架上每隔 30 cm 拉有钢丝。用间距 5 cm 双层国盾 EVA 薄膜将温室隔为 4 个空间,分别编号 1#、2#、3# 和 4#(如图 1a),每间长度 14 m,分别将聚苯板(EPS)、挤塑板(XPS)、玻璃棉以及常规材料干草帘等 4 种材料安装并应用于温室,进行保温性能试验,后屋面材料接缝处采用腻子处理。

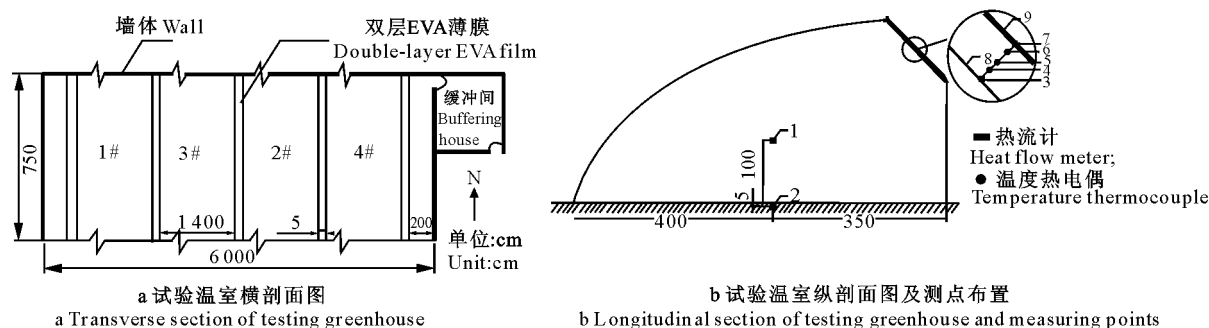


图 1 试验温室剖面图及测点

1. 室内高 1 m 处;2. 地下 5 cm 处;3. 内表面;4. 2.5 cm;5. 5 cm;6. 7.5 cm;7. 外表面;8. 内表面热流;9. 外表面热流

Fig. 1 Profile plan of testing greenhouse and measuring points

1. 1 m in greenhouse;2. 5 cm underground;3. Inner surface;4. 2.5 cm;5. 5 cm;6. 7.5 cm;7. Outer surface;

8. Heat flow at inner surface;9. Heat flow at outer surface

温室各间后屋面组成分别为:1#(薄膜 0.012 cm)、2#(薄膜 0.012 cm + 聚苯板 10 cm + 薄膜 0.012 cm)、3#(薄膜 0.012 cm + 挤塑板 10 cm + 薄

膜 0.012 cm)、4#(薄膜 0.012 cm+三合板 0.3 cm+玻璃棉 10 cm+薄膜 0.012 cm)。

1.2 仪器

TC1008 多路温度测试仪, HFM-215 热流计。

1.3 保温材料热工参数的测定与计算

保温材料密度的测定参考 GB/T 6343—1995《泡沫塑料和橡胶表观(体积)密度的测定方法》;尺寸稳定性测定参考 GB/T 8811—2008《硬质泡沫塑料尺寸稳定性试验方法》;比热、导热系数、吸水率、压缩强度值由厂家及资料^[7]提供;传热系数、蓄热系数、热阻、热惰性指标、技术经济特征量分别通过公式计算而得。

非稳态情况下,一般采用保温材料的传热系数、热阻、蓄热系数、热惰性指标反映其热工性能^[4],通过材料的技术经济特征量反映材料的热经济性,即单位面积(m^2)上的热阻价格^[10]。

(1)热阻值。按下式计算:

$$R=L/\lambda. \quad (1)$$

式中: R 为热阻($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$), L 为厚度(m), λ 为导热系数($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。

(2)传热系数。计算公式如下:

$$K=\frac{1}{R_i+R_w+R_e}. \quad (2)$$

式中: K 为传热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); R_i 为内表面换热阻($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$),一般取0.11; R_e 为外表面换热阻($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$),一般取0.04; R_w 为围护结构热阻($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$)。

(3)蓄热系数。计算公式为:

$$S=\sqrt{\frac{2\pi\lambda\rho c}{T}}. \quad (3)$$

式中: S 为材料的蓄热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); c 为材料的比热容($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); ρ 为材料的密度(kg/m^3); T 为热流波的作用周期(h),本试验为24 h。

(4)热惰性指标。计算公式如下:

$$D=\sum_{j=1}^n R_j S_j. \quad (4)$$

式中: D 为热惰性指标, R_j 为第 j 层材料的传热热阻($(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$), S_j 为第 j 层材料的蓄热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)。

(5)技术经济特征量。计算公式为:

$$A=\sum \varphi \cdot p \cdot \lambda. \quad (5)$$

式中: A 为技术经济特征量($(\text{元} \cdot \text{W})/(\text{m}^4 \cdot \text{K})$), φ 为该层材料的权重, p 为单位体积价格($\text{元}/\text{m}^3$)。

后屋面组成的其他材料热物性参数取值为:塑料薄膜导热系数为0.410 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,密度为955

kg/m^3 ,比热容为1.38 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,价格为18 $\text{元}/\text{kg}$;三合板导热系数为0.140 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,密度为1000 kg/m^3 ,比热容为2.51 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,价格为11 $\text{元}/\text{m}^2$;加草粘土导热系数为0.760 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,密度为1400 kg/m^3 ,比热容为1.01 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,价格为30 $\text{元}/\text{m}^3$ (含用工费)。

1.4 温室性能观测

在试验观测期2008-02-01—2008-03-15和2008-12-01—2009-01-15,分别采用多路温度测试仪逐时记录各点温度,采用热流计记录各点热流量密度,时间间隔为15 s。选取典型天气下各间温室的气温、土温、保温层的温度分布及热流量密度值进行分析,并通过热流量密度观测值计算夜间传热量,试验温室测点布置见图1b。每间温室种植西葫芦250株左右,在西葫芦三叶一心时于2008-03-11定植,6月中旬拉秧。在各间温室里选取长势一致的3垄,每垄选取3株西葫芦,从定植起每隔10 d测定其株高、茎粗、叶长、叶宽、叶片数等形态指标,结果后测定其累计产量。形态指标取其平均值,产量依照植株种植密度换算成每 hm^2 产量。

2 结果与分析

2.1 不同后屋面保温材料的热工性能及其经济性参数

根据表1中各保温材料及后屋面组成的其他材料的热物性参数值,用公式(1)~(5)分别计算其热阻、传热系数、蓄热系数、热惰性指标和技术经济特征量,结果见表2。由表2可知,挤塑板的传热系数最低,为0.27 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,尺寸稳定性好,吸水率低,压缩强度高,热阻值最高,较GB 19165—2003《日光温室和塑料大棚结构与性能要求》中规定的下限热阻1.4 $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 高2.17 $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。由表2可知,3类新型保温材料组成的后屋面的热惰性指标,以干草帘组成的后屋面最高,达4.07,这可能与加草粘土及草帘有较高的蓄热系数有关;挤塑板较高,聚苯板次之,玻璃棉最低。技术经济特征量可反映组成材料的热经济性能,即每 m^2 的热阻价格,值越低表明材料热经济性越好。表2表明,采用挤塑板的后屋面技术经济特征量为29.26 $(\text{元} \cdot \text{W})/(\text{m}^4 \cdot \text{K})$,较采用聚苯板的后屋面略低,可见较高的价格并不妨碍其正常应用;使用玻璃棉的后屋面由于附加抗压层提高了成本,使得其价格最高,为42.36 $(\text{元} \cdot \text{W})/(\text{m}^4 \cdot \text{K})$ 。

表 1 供试保温材料的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of experimental thermal insulation materials

材料类型 Type of material	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	尺寸稳定性/% Dimensional stability	吸水率/% Water absorption	压缩强度/kPa Compressive strength	单价/ (元 $\cdot\text{m}^{-3}$) Unit price
干草帘 Hay curtain	105.3	2.01	0.055	7.2	—	—	110
聚苯板 Polystyrene board	14.0	1.98	0.037	3.5	3.0	50	350
挤塑板 Polystyrene compressed foam board	36.3	1.98	0.028	1.5	0.3	200	450
玻璃棉 Glass wool	28.2	0.84	0.046	4.2	—	—	240

注:保温材料单价为 2007-11 价格。
Note:The unit prices of thermal insulation materials were collected at 2007-11.

表 2 后屋面组成材料的热工性能及热经济性参数

Table 2 Thermal performance and thermal economic performance parameters of back-roof component materials

保温层材料类型 Type of insulation material	$R/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	$K/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$S/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	D	$A/(\text{元} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{K}^{-1})$
干草帘 Hay curtain	1.09	0.81	1.75	4.07	33.79
聚苯板 Polystyrene board	2.70	0.35	0.52	1.40	29.61
挤塑板 Polystyrene compressed foam board	3.57	0.27	0.73	2.59	29.26
玻璃棉 Glass wool	2.17	0.43	0.53	1.13	42.36

注: R 和 S 为保温材料热物性参数计算值, D 和 A 分别为后屋面各组成材料热物性参数的综合计算值。
Note: R and S are calculated by thermal parameters of thermal insulation materials; D and A are calculated by thermal parameters of all back-roof composing materials respectively.

2.2 不同后屋面保温材料日光温室环境的比较

2.2.1 温室内气温及土温 典型天气下,各温室气温变化规律基本一致(图 2a、b),晴天时,1#、2#、3#、4# 温室内日均气温分别为 20.1、21.7、22.4 和 21.5℃,阴天时分别为 8.2、9.1、9.4 和 8.7℃,3# 温室的日均气温均高于其他温室;3# 温室内、外日均气温温差晴天达到 13.7℃,阴天为 9.2℃。2#、3# 温室气温月均值较高,分别为 20.8 和 20.6℃;1# 温室最低气温月均值低于其他温室,差值最高达 1.1℃(图 2c、d)。

由图 2e 和 f 可知,1#、2#、3#、4# 温室月土温均值分别为 19.7、19.9、20.4 和 19.8℃,最低土温月均值分别为 15.5、15.8、16.7 和 16.1℃;最低土温值与外界土温值变化关系不明显。各温室最低土温月均值仅较月土温均值低 3.5~4.5℃,表明土壤温度变化幅度不大,比气温稳定。3# 温室月土温均值及最低土温月均值均最高,1# 温室均最低。各温室间月土温均值差值为 0.7℃,较气温月均值差值(1.3℃)低。

2.2.2 温室后屋面温度及热流 图 3 表明,在晴天有光照时段,2# 温室后屋面内外表面温差最大,在晴天和阴天 12:00 前后,各温室后屋面内外表面温

差均趋于一致,3# 温室后屋面内外表面夜间温差较其他温室大,平均温差达 19.3℃,1# 温室最小。

图 4 表明,2#、3# 和 4# 温室后屋面内 7.5 cm 处至外表面层温度变化幅度均较大,以 3# 温室变幅最大,说明在室内温度相对稳定的情况下,室外温度扰动对其内层温度影响最小。1# 温室外部温度最高,温室内外表面温差最小,这可能是夜间自身放热以及导热较大所致。

在一天中的绝大多数时间,温室后屋面均处于从室内吸热、向室外放热的过程中。由图 5a 和 b 可以看出,2#、3#、4# 温室后屋面内表面在 17:00 前后有短暂的放热过程,1# 温室全天从室内吸热;1# 温室后屋面外表面在 09:00—16:00 吸热,18:00—次日 08:00 放热量较大,是 2# 温室的 2~3 倍,2# 温室全天放热较为平缓;2#、3#、4# 温室后屋面外表面通常在 09:00—11:00 有一个短暂的吸热过程。表 3 结果表明,从内表面一天的吸热总量来看,1# 温室最大,为 1 391.58 kJ/m²,其外表面放热量也最大,达到 1 216.64 kJ/m²,是 2# 温室的 2 倍多;3# 温室室内均温较高,其内表面吸热量为 476.87 kJ/m²,外表面放热量为 602.92 kJ/m²,较其他温室少,说明其绝热能力较佳。

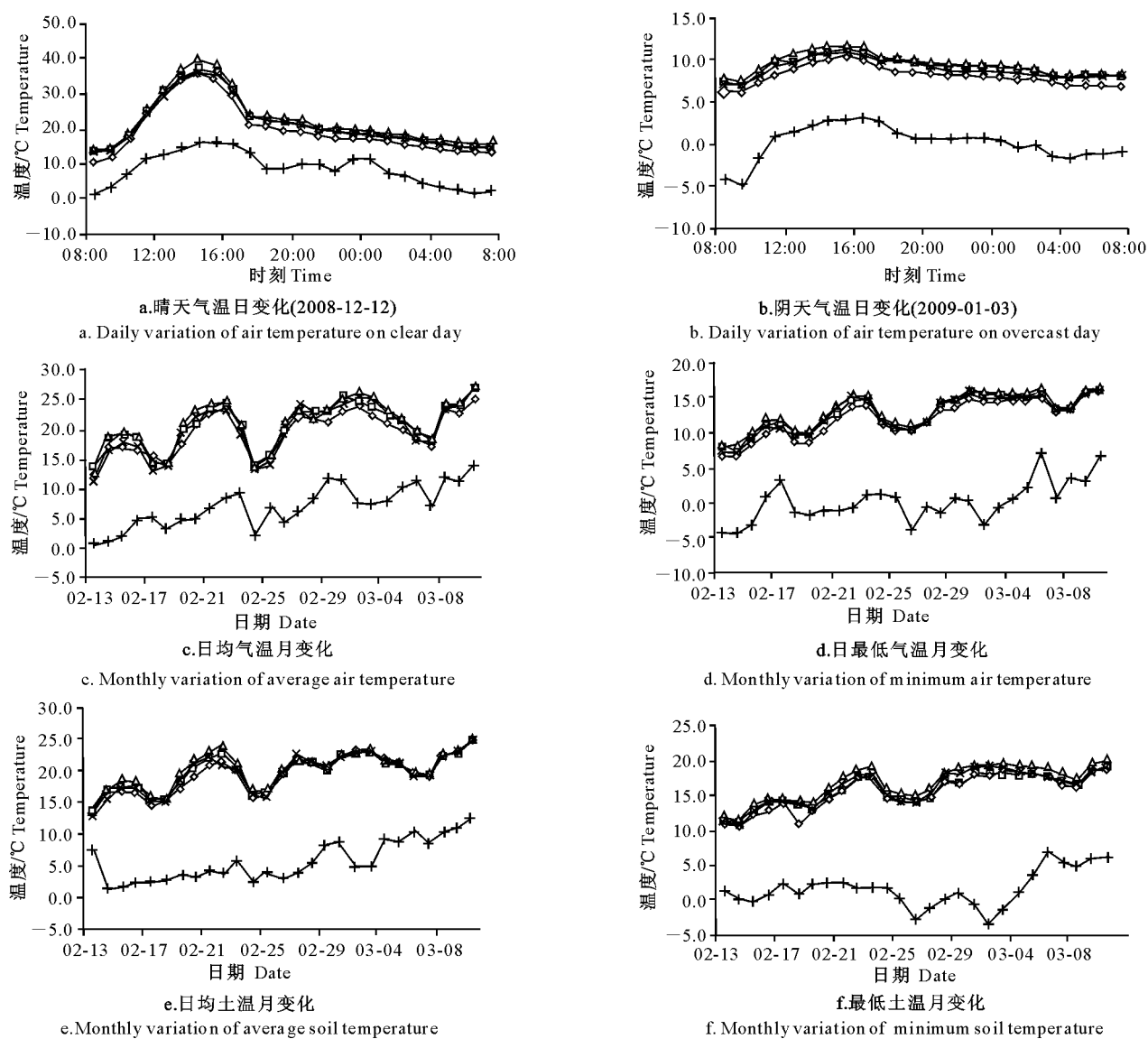


图 2 不同后屋面保温材料日光温室温度的变化

—◇—1#; —□—2#; —△—3#; —×—4#; —+—室外 Outside

Fig. 2 Variation curve of temperature in solar greenhouse with different back-roof thermal insulation materials

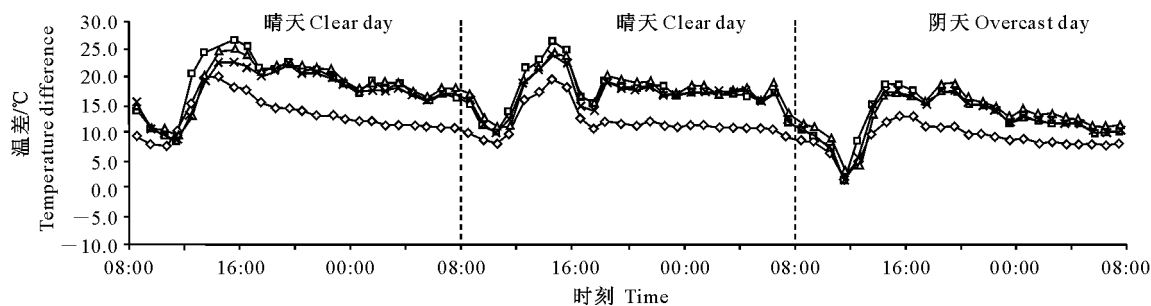


图 3 不同保温材料日光温室后屋面内外表面温差的变化(2008-02-14—2008-02-17)

—◇—1#; —□—2#; —△—3#; —×—4#

Fig. 3 Temperature variations of inner and outer back-roof surface with different thermal insulation materials of solar greenhouse

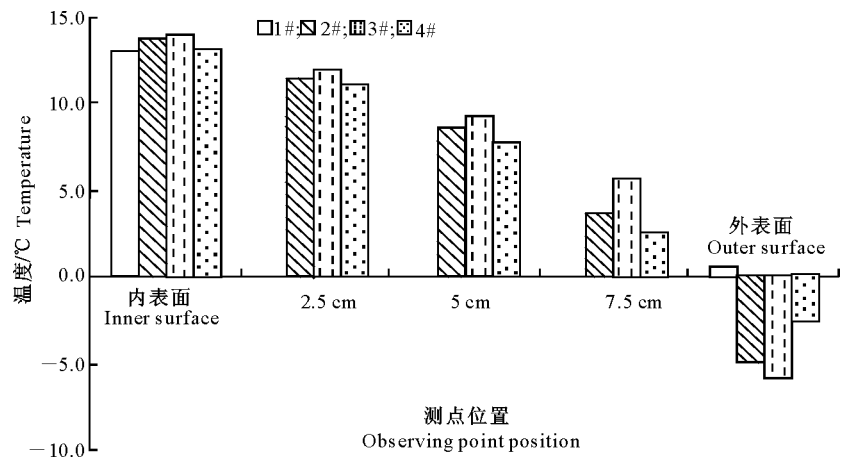


图 4 不同保温材料日光温室后屋面测点的夜间平均温度变化(2008-02-14T19:00—次日 06:00)

Fig. 4 Average temperature variations in back-roof observation points at night with different thermal insulation materials of solar greenhouse

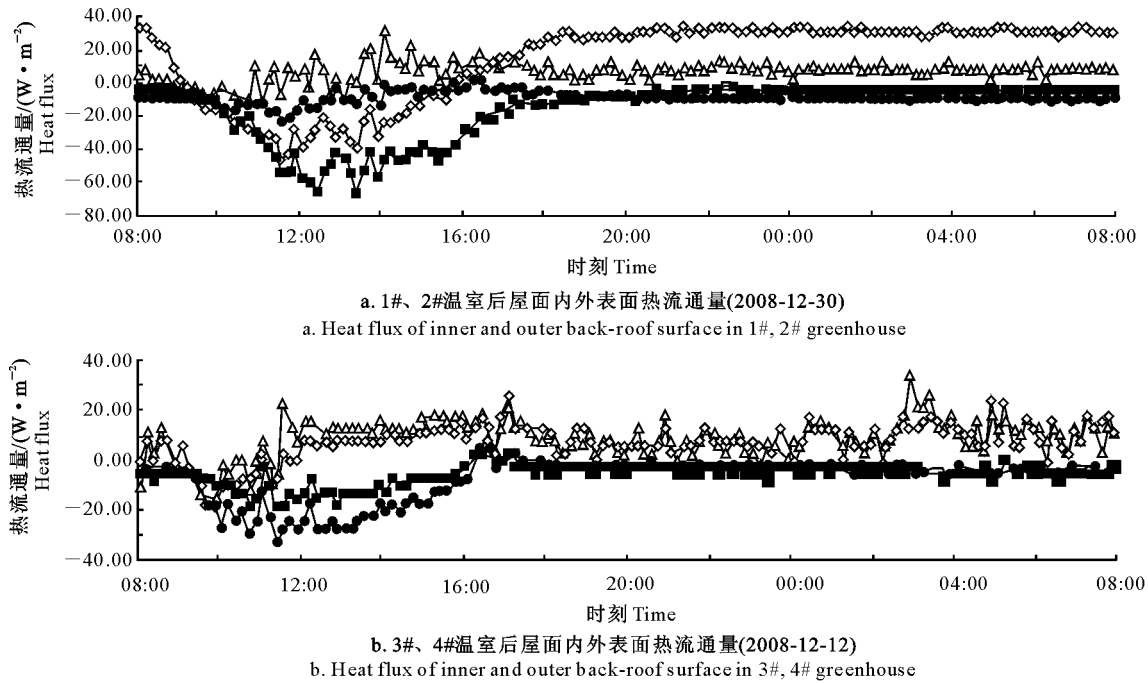


图 5 不同保温材料日光温室后屋面热流的变化

—■—1#、3# 内表面;—◇—1#、3# 外表面;—●—2#、4# 内表面;—△—2#、4# 外表面

Fig. 5 Variations of heat flow in different thermal insulation materials of solar greenhouse back-roof

—■—1#、3# inner surface;—◇—1#、3# outer surface;—●—2#、4# inner surface;—△—2#、4# outer surface

表 3 1#~4# 温室后屋面内外表面热流的变化

Table 3 Heat flow of back-roof outer and inner surface in 1#—4# greenhouse

温室编号 Number of greenhouse	均温/℃ Average air temperature		内表面 Inner surface		外表面 Outer surface	
	室内 Inside greenhouse	室外 Outside greenhouse	平均热流量/ (W·m ⁻²) Average heat flux	热流总量/ (kJ·m ⁻²) Total heat flow quantity	平均热流量/ (W·m ⁻²) Average heat flux	热流总量/ (kJ·m ⁻²) Total heat flow quantity
1#	11.2	-3.0	-16.11	-1 391.58	14.08	1 216.64
2#	12.4	-3.0	-7.70	-665.16	6.67	575.98
3#	22.4	8.7	-5.52	-476.87	6.98	602.92
4#	21.5	8.7	-7.43	-641.66	8.46	731.32

注:1#、2#观测日期为 2008-12-30;3#、4#观测日期为 2008-12-12。

Note:1#、2# were observed at 2008-12-30;3#、4# were observed at 2008-12-12.

2.2.3 温室内西葫芦的生长情况 由表 4 可知,生长前期 3#温室西葫芦各生长指标与 1#温室存在显著差异,2#、3#、4#温室西葫芦株高均极显著高于 1#温室,且 3#温室较高;3#温室西葫芦茎粗显著低于 1#温室,单叶叶面积相对较大,但与 4#温室之间无显著差异,这与毛丽萍等^[11]的低温使西葫芦幼苗的茎粗增加、株高降低和叶面积减小等研究

结果一致。3#温室西葫芦叶片数较多,定植后 10 d 时与其他温室差异显著。定植后 30 d 时,3#温室西葫芦单叶叶面积显著高于其他温室,其他 3 项指标各温室间差异均不显著。1#、2#、3#、4#温室西葫芦总产量分别为 29 500,35 653,38 847 和 29 602 kg/hm²,2#、3#温室产量较高。

表 4 1#—4#温室西葫芦不同时期的生长指标
Table 4 Pumpkin growth indexes at different periods in 1#—4# greenhouse

定植后时间/d Day after field planting	温室编号 Number of greenhouse	株高/cm Height	茎粗/cm Stem diameter	单叶叶面积/cm ² Leaf area	平均叶片数 Average leaf number
10	1#	3.7 Bb	0.68 Aa	115.4 Ab	6.7 Bb
	2#	4.8 Aa	0.61 Aab	121.0 Ab	6.3 Bb
	3#	5.0 Aa	0.60 Ab	149.1 Aa	7.0 Aa
	4#	4.9 Aa	0.62 Aab	129.6 Aab	6.6 Bb
20	1#	6.3 Ab	0.96 Aa	386.9 Bc	11.9 Bb
	2#	6.2 Ab	0.91 ABa	392.0 Ab	11.3 Ab
	3#	8.1 Aa	0.78 Bb	454.8 Aa	12.9 Aa
	4#	7.4 Aab	0.90 ABa	409.3 Aa	12.0 ABa
30	1#	19.2 Aa	1.21 Aa	736.8 Ac	18.2 Aa
	2#	21.3 Aa	1.10 Aa	865.4 Ab	17.3 Aa
	3#	21.4 Aa	1.11 Aa	909.3 Aa	17.8 Aa
	4#	20.1 Aa	1.11 Aa	808.2 Ab	17.3 Aa

注:观测日期分别为 2008-03-21,2008-03-30,2008-04-09;同一观测日同列数据后标不同大、小写字母分别表示差异达 1%,5%显著性水平。

Note:The observation periods were 2008-03-21,2008-03-30,2008-04-09 respectively;different capital and small letters within the same column at the same observational day indicate significant differences at 1% and 5% level respectively.

3 结论与讨论

1) 目前,应用较多的日光温室后屋面保温材料是聚苯板和常规材料干草帘。已有研究认为,挤塑板在 70%的相对湿度下持续 200 d 后,热阻保留率仍在 80%以上,而聚苯板的为 60%^[7],说明挤塑板有较好的使用寿命;常规后屋面材料干草帘虽然早期热惰性指标较高,但其后期容易吸湿变腐^[12],从而导致其热惰性值降到很低,保温性能下降较快。本研究结果表明,挤塑板尺寸稳定性好,传热系数低,吸水率低,压缩强度高,以其为保温层的 3#温室热惰性指标较高,为 2.59,技术经济特征量最低,仅为 29.26 (元·W)/(m⁴·K)。说明,与现有后屋面保温材料相比,挤塑板具有热经济成本低,使用寿命长,能够长久保持其热工性能等优势。

2) 3#温室典型天气下的日平均气温、最低土温月均值、月土温均值均高于其他温室,2#温室较低,1#温室最低;各温室土壤温度变幅不大,为 3.5~4.5℃;各温室间气温月均值差值为 1.3℃,比月土温均值差值大。

3) 一天中后屋面放热时间较长,3#温室后屋面内外表面温差较其他温室大,夜间平均温差达 19.3℃,外表面放热量 602.92 kJ/m²;1#温室温差最小,外表面放热量 1 216.64 kJ/m²。2#、3#和 4#温室后屋面 7.5 cm 处至外层温度变化幅度较大。

4) 3#温室西葫芦株高较高、茎粗小、单叶叶面积大、叶片数较多,产量达到 38 847 kg/hm²。试验期间,西葫芦定植后生长前期,各指标在 3#温室与 1#温室间有显著差异;到生长后期除单叶叶面积外,其他指标差异不显著,这可能是由于种植期靠后,而后期温度升高,植物自身补偿生长所致。

综上所述,挤塑板有较好的保温性和实用性,有替代聚苯板的潜力。本研究仅初步分析了保温材料的基本性能,后期研究可以考虑应用相变蓄热材料^[13-14]做复合结构保温层的蓄热层,以达到更好的保温效果。

[参考文献]

[1] 白义奎,王铁良,李天来,等. 缀铝箔聚苯板空心墙体保温性能理论研究 [J]. 农业工程学报,2003,19(3):190-195.
Bai Y K,Wang T L,Li T L,et al. Theoretical research on heat

- preservation effect of hollow wall with polyphony board covered with aluminum foil [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 190-195. (in Chinese)
- [2] 李小芳, 陈青云. 墙体材料及其组合对日光温室墙体保温性能的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 185-189.
Li X F, Chen Q Y. Effects of different wall materials on the performance of heat preservation of wall of sunlight greenhouse [J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2006, 14(4): 185-189. (in Chinese)
- [3] 许刚毅, 周长吉. 不同保温墙体日光温室性能测试与分析 [J]. 华中农业大学学报, 2004, 35(增刊): 62-66.
Xu G Y, Zhou C J. Performance testing and analysis on different insulation walls of sunlight greenhouse [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004, 35 (Sup.): 62-66. (in Chinese)
- [4] 柴立龙, 马承伟, 籍秀红, 等. 北京地区日光温室节能材料使用现状及性能分析 [J]. 农机化研究, 2007(8): 17-21.
Chai L L, Ma C W, Ji X H, et al. Present situation and the performance analysis of the energy-saving material in solar greenhouse of Beijing region [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(8): 17-21. (in Chinese)
- [5] 乔正卫, 邹志荣, 张立明, 等. 4 种日光温室保温被室内的试验性能测试 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 154-158.
Qiao Z W, Zou Z R, Zhang L M, et al. Laboratory test of four kinds of heat preservation quilts for solar greenhouse [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(6): 154-158. (in Chinese)
- [6] 戴丹丽, 陈杰, 周胜军, 等. 温室内新型保温材料的筛选与应用研究 [J]. 浙江农业学报, 2006, 18(6): 437-440.
Dai D L, Chen J, Zhou S J, et al. Screening and application research of new type thermal insulation materials in greenhouse [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2006, 18(6): 437-440. (in Chinese)
- [7] 张德信. 建筑保温隔热材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
Zhang D X. Materials of thermal insulation in greenhouse [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 沈丽萍, 于文越. 温室增温的好材料——苯板 [J]. 新农业, 2003(10): 16.
Shen L P, Yu W Y. Good material for greenhouse warming——polystyrene board [J]. New Agriculture, 2003(10): 16. (in Chinese)
- [9] 包天忠, 范红策, 光辉. 青海省日光节能温室新型保温材料引进研究和开发利用初探 [J]. 青海农技推广, 2007(1): 20-22.
Bao T Z, Fan H C, Guang H. Preliminary introduction study and development and utilization of new type thermal insulation materials in Qinghai province solar greenhouse [J]. Agricultural Technology Extension in Qinghai, 2007(1): 20-22. (in Chinese)
- [10] 许云伟, 贾珣, 陈滨. 墙体材料选择与最佳经济厚度的优化研究 [J]. 节能与环保, 2006(6): 20-23.
Xu Y W, Jia X, Chen B. Selection of wall material and optimization study of the best economic thickness [J]. Energy Saving and Environmental Protection, 2006(6): 20-23. (in Chinese)
- [11] 毛丽萍, 郭尚, 程伯瑛, 等. 低温弱光对西葫芦幼苗生理指标的影响 [J]. 山西农业科学, 2008, 36(9): 33-36.
Mao L P, Guo S, Cheng B Y, et al. Effect of low temperature and weak light stress to physiological characteristics in pumpkin (*Cucubita pepo* L.) seedlings [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2008, 36(9): 33-36. (in Chinese)
- [12] 郭文忠, 王静, 李晓静. 宁夏日光温室结构选型及区域布局 [J]. 宁夏农林科技, 2008(3): 51-52.
Guo W Z, Wang J, Li X J. Structural form selection and regional distribution [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2008(3): 51-52. (in Chinese)
- [13] 王宏丽, 李凯, 王剑, 等. 适于温室生产的无机盐复合相变材料热性能的测试 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3): 141-144.
Wang H L, Li K, Wang J, et al. Thermal properties testing of compound phase change material of inorganic salts suitable for greenhouse [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(3): 141-144. (in Chinese)
- [14] 廖晓敏, 张雄, 张青. 建筑围护结构用蓄热复合相变材料研究 [J]. 墙材革新与建筑节能, 2007(11): 36-38.
Liao X M, Zhang X, Zhang Q. Study on thermal storage composite phase change material for building envelope application [J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2007(11): 36-38. (in Chinese)