

Energy Saving Technologies and Methods in Solar Greenhouses in Xinjiang

Xiaoli Sun^{1,2}, Haocheng Ma¹, Xinwei Cao^{1,2}, Ping Zou¹, Caiwen Ma^{1,2*}

¹Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Research Institute of Facility Agriculture Engineering and Equipment Engineering, Urumqi Xinjiang

Email: sxl52526_shzu@sina.com, [*xjmcw2010@sina.com](mailto:xjmcw2010@sina.com)

Received: Aug. 30th, 2017; accepted: Sep. 10th, 2017; published: Sep. 14th, 2017

Abstract

In winter, the insulation technology accounts for the most energy consumption in the operation process of facility agriculture, and energy cost is the main cost of greenhouse operation. This paper starts from the present situation of greenhouse energy saving technologies in solar greenhouses in Xinjiang. At its root, the application research of greenhouse energy saving technology can be divided into two major aspects: one is optimizing the design of solar greenhouse structure to improve lighting and heat storage performance; and the other is transforming the maintenance structure and improving the thermal insulation facilities to reduce heat loss. Based on the technologies and equipment which are promoted, applied and researched in Xinjiang, this paper summarizes the development and research status quo of energy saving technology in solar greenhouses in Xinjiang, and looks at the future development of energy saving and environment protection technologies in solar greenhouses in Xinjiang.

Keywords

Solar Greenhouse, Energy Saving, Greenhouse Warming, Insulation

新疆地区日光温室节能技术与方法

孙小丽^{1,2}, 马皓诚¹, 曹新伟^{1,2}, 邹平¹, 马彩雯^{1,2*}

¹新疆农业科学院农业机械化研究所, 新疆 乌鲁木齐

²新疆设施农业工程与装备工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐

Email: sxl52526_shzu@sina.com, [*xjmcw2010@sina.com](mailto:xjmcw2010@sina.com)

收稿日期: 2017年8月30日; 录用日期: 2017年9月10日; 发布日期: 2017年9月14日

*通讯作者。

摘要

冬季保温技术是设施农业运行过程中能耗较高的环节, 能耗成为温室运行的最主要成本, 从新疆地区日光温室现阶段主要的温室节能技术发展现状出发, 温室节能技术的应用研究从根本上来说, 主要分为两个方面, 一是日光温室结构优化设计, 提高采光、蓄热性能, 二是改造围护结构和改善增温保温设施, 减少热量散失。从新疆近年来推广应用研究的技术和装备出发, 对新疆日光温室节能技术的发展和研究现状进行了概述, 对未来新疆日光温室节能环保等技术的发展进行了展望。

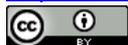
关键词

日光温室, 节能, 温室增温, 保温

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

设施农业是一项耗能产业, 设施农业年生产耗能的 35%要用于温室的加温, 能耗费占温室生产费用的 15%~40%, 能耗是温室运行成本的最主要部分[1]。随着能源供应日趋紧张, 设施农业的发展受到很大的冲击, 温室保温节能的研究受到普遍关注。“十二五”以来新疆设施农业发展重点逐步向低能耗产业转型, 科学发展设施农业节能减排对于国家提出的可持续发展战略有着重要意义。

全世界各国针对温室节能进行了大量研究工作, 提出的节能对策多种多样, 但主要可分为 2 个方面:

(1) 日光温室结构优化设计, 提高采光、蓄热性能; (2) 改造日光温室围护结构和改善增温保温设施, 减少热量散失[2]。新疆地处亚欧大陆, 冬季干燥寒冷, 有的地方还伴有大风大雪, 冬季需要采取相应措施进行温室提温保温, 温室加热保温能耗费成了温室生产成本中数目不小的开支。新疆地域分布和外界环境因素与中国其它地区不同, 因此节能方式有所不同。新疆目前在日光温室节能方面进行了大量研究和进行不同保温节能技术的生产试验性应用, 总体来说日光温室节能分布与技术研究应用体现在以下几个方面。

2. 日光温室建筑结构参数设计

日光温室的光照会直接影响温室内作物的采光时间和温室蓄热保温性能, 进而影响作物产量及总的经济效益, 日光温室的建筑结构参数是温室形成光照环境状况优劣的关键因素。在温室的规划和设计方面要充分考虑和利用地理位置、采光时长、避免风口和充分利用地热等自然条件, 降低温室的建造成本和运行费用。新疆地理纬度跨度大, 按照一个类型建筑温室显然不合理, 根据地理位置与冬季室外温度等气象条件, 分别对北疆、南疆和东疆地区进行合理设计。

(1) 日光温室方位角设计

维持日光温室必要热环境的热源主要来源于太阳辐射, 然而受太阳运动轨迹动态变化的影响, 太阳辐射强度是动态变化的, 这种变化规律直接影响日光温室前坡屋面接受太阳辐射强度的大小与有效照射时数[3][4]。因此, 要保证日光温室反季节生产蔬菜高产增效, 条件之一是确保日光温室前坡屋面可最大化地截获太阳能, 因此要科学地确定日光温室朝向, 即方位角 γ , 如图 1 所示。

依据建筑热过程、传热学、数学极值理论，以蔬菜生长期日光温室前坡屋面截获太阳辐射能力最大为约束条件，提出了一种关于戈壁日光温室最佳建造朝向的简化计算模型。

$$\gamma_{\max} = \sum_n \sum_{t_1}^{t_2} \arctan \frac{\sin \theta \cos \delta \sin w}{\sin \theta \sin \phi \cos \delta \cos w - \sin \theta \sin \delta \cos \phi} \quad (1)$$

其中： γ_{\max} ——最大方位角；

Θ ——温室前坡屋面仰角；

ϕ ——日光温室所处地理纬度；

(2) 温室建造结构参数设计

要保证日光温室反季节生产蔬菜高产增效，条件之一是确保进入日光温室内的太阳能被高效利用、热损失最小。温室跨度、脊高度、后墙高度、后坡屋面仰角与长度等日光温室建筑结构参数直接影响着温室的采光和保温性能，这些参数之间彼此存在相互制约作用。因此，为确保作物生长期温室获得的光照和热量最多、通过日光温室墙体与屋面散失的热量最小是温室结构设计的关键[3] [4]。

新疆地区具有风大、昼夜温差大、太阳辐射强等特殊气候条件，通过对南、北、东疆各地的实地调研与气象条件等资料的收集，设计出适合新疆地区的日光温室设计结构参数，如表 1 所示。

3. 温室围护结构保温蓄热

日光温室围护结构白天应可能多的吸收太阳热能，夜间尽量封闭，让白天吸收的热能在夜间缓慢释放，以提高日光温室的夜间温度，既要阻止室内热量向外传递的能力(即保温性能)，又要有一定的储存热量的能力(即蓄热性能)。

(1) 温室保温蓄热墙体

Table 1. Recommended values of solar greenhouse structural parameters in Xinjiang region

表 1. 新疆各地区日光温室结构参数推荐值

空间参数	北疆地区	南疆地区	东疆地区
温室方位角 Span (L/m)	正南偏西 8°~10°	正南偏西 8°~10°	正南偏西 8°~10°
跨度 Length (l/m)	7~8	8~10	8~10
脊高 High ridge (H/m)	4~4.5	4~4.5	4~4.5
后墙高 Height of wall (h/m)	2~2.5	2~2.5	2~2.5
后坡屋面长度 Height of Rear roof (M/m)	1.5~2.5	1.5~2.5	1.5~2.5
后坡屋面仰角 Back roof angle (θ°)	大于 42	大于 40	大于 42
前坡屋面仰角 Front roof angle (θ°)	不小于 32	不小于 30	不小于 32

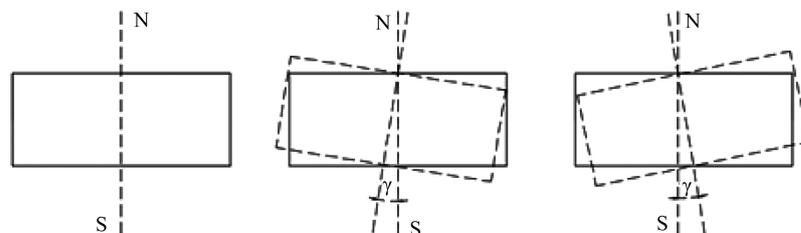


Figure 1. Schematic diagram of azimuth in solar greenhouse

图 1. 日光温室方位角示意图

墙体作为日光温室的围护结构之一，是日光温室重要的蓄热体，是温室夜间保持温度重要的供热热源。温室墙体设计一个重要考虑因素就是温室墙体必须有一定的热惰性，即白天为温室的蓄热体，夜间为放热体。墙体所选用的材料，要有阻止温室内热量向外传递的能力即保温性能，又要有一定的储存热量的能力即蓄热性能，而导热能力差的材料组成[5] [6] [7]。作为理想的日光温室墙体要具备两个特点：其外放热量要小和热稳定性好，砖墙的蓄热性能好，聚苯板的隔热性能好，因此，聚苯板 + 砖墙的复合异质墙体对温室外界温度的扰量衰减性要高于纯聚苯板和纯砖墙体。

在新疆日光温室墙体设计中我们引入和参考温室标准：JB/T10286-2001《日光温室结构》中墙体材料的热阻值(R 值)与极限气温下维护结构的低限热阻值(R_0 值)之间的比较，也就是我们设计的多层组合墙体热阻值(R 值)必须满足大于或等于低限热阻值(R_0 值)，新疆常用的复合异质墙体是红砖 + 聚苯板结构，如图 2 所示。

根据多层材料组成的围护结构的总热阻计算公式(2)，计算出新疆日光温室复合墙体的热阻见表 2。

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \quad (2)$$

其中， R ——材料热阻值；

δ_i ——第 i 层材料的厚度(m)；

λ_i ——第 i 层材料的导热系数。

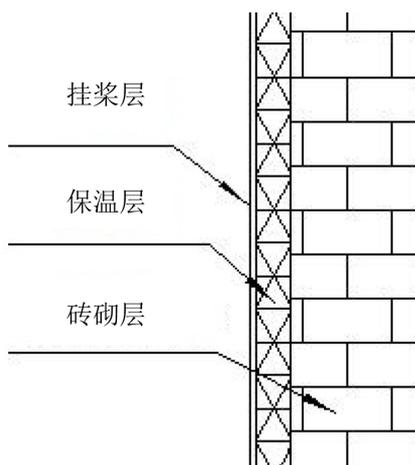


Figure 2. Design of the back wall in greenhouse
图 2. 温室后墙墙体设计

Table 2. Combined thermal resistance of brick masonry wall + external thermal insulation materials

表 2. 砖砌体墙体 + 外保温隔热材料组合热阻值($m^2 \cdot K/W$)

保温材料厚度 砖砌体厚度	0.24 m 炉渣砖	0.24 m 粘土砖	0.24 m 多孔砖	0.37 m 炉渣砖	0.37 m 粘土砖	0.37 m 多孔砖	0.5 m 炉渣砖	0.5 m 粘土砖	0.5 m 多孔砖
无	0.276	0.296	0.414	0.425	0.457	0.638	0.575	0.617	0.862
5 cm 聚苯乙烯板	1.363	1.383	1.501	1.512	1.544	1.725	1.662	1.704	1.949
6 cm 聚苯乙烯板	1.58	1.6	1.718	1.729	1.761	1.942	1.879	1.921	2.166
8 cm 聚苯乙烯板	2.015	2.035	2.153	2.164	2.196	2.377	2.314	2.356	2.601
10 cm 聚苯乙烯板	2.45	2.47	2.588	2.599	2.631	2.812	2.749	2.791	3.036
12 cm 聚苯乙烯板	2.885	2.905	3.023	3.034	3.066	3.247	3.184	3.226	3.471

温室围护结构所具有的热阻应大于所要求的低限热阻, 根据表 2 日光温室墙体不同厚度计算统计的热阻值可以看出, 单纯的砖砌体结构不能满足新疆最低热阻 $1.1 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 的要求; 0.5 m 粘土砖和 0.5 m 炉渣砖在储热性能上都比不上 0.37 m 的多孔砖, 虽然从计算出 0.24 m 砖砌体 + 0.12 m 保温隔热材料的热阻值计算均高于 0.37 m 砖砌体 + 0.1 m 的热阻值, 但是在日光温室组合墙体设计中砖砌体是我们唯一的蓄热材料, 不能单纯一味地追求隔热材料的高热阻值, 否则会降低温室内夜间温度, 造成夜间作物发生冻害。

(2) 温室后屋面

后屋面的最低热阻值计算参考墙体极限热阻, 根据后屋面的最低热阻值计算和新疆优选型后屋面材料的原则, 新疆各地采用的后屋面材质分别为: 北疆地区: 0.2 m 厚双面彩钢夹芯保温板($18 \text{ kg}/\text{m}^3$), 南疆地区: 0.12 m 厚双面彩钢夹芯保温板($18 \text{ kg}/\text{m}^3$), 东疆地区: 0.15 m 厚双面彩钢夹芯保温板($18 \text{ kg}/\text{m}^3$)。

(3) 前屋面保温覆盖材料

日光温室的前屋面是温室维护中的主要散热面, 占温室散失热量总量的 75%以上, 前屋面覆盖材料的选择对整个温室的保温性能的影响非常大[8]。保温被的保温性能是影响温室内温度能否在节约能源进行加热的基础上, 最大限度的将温度保持在适宜作物生长的范围的一个很重要因素, 保温性能的好坏直接影响冬季作物健康生长和能源节约。通过对不同材质的保温覆盖材料的导热性能、传热系数和热节能率等进行测试。连续使用第三年的保温被(黑色淋膜+二层针刺毡+黑色淋膜)进行测试, 保温被的保温由初始性能的 $1.295 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 到使用三年后的 $2.386 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 保温传热系数降低了 $1.091 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。保温被在反复使用过程中, 由于内外层受到自然环境及电动拉力的影响后, 抗老化性能、防融雪渗透性能均有所下降, 导致保温被的传热性能下降明显。

通过保温覆盖材料保温性能测试与综合分析, 结合新疆各地不同的气候特点, 适合新疆地区使用的保温覆盖材料, 综合性能最好的是防水胶涂层无纺布 + 1.0 cm 毛毡 + 涂层布保温被, 它的传热系数为 $0.928 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 热节省率达到 89.28%; 其次是防水性能和防风性较好的胶毡土工膜 + 0.5 cm 毛毡 + 胶毡土工膜保温被; 排第三的是无纺布 + 1.0 cm 毛毡 + 2 层防水发泡材料 + 无纺布的复合保温被[9]。北疆地区建议选用材质传热系数小、抗拉性能高、内外表面防水并且重量不低于 $2.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ 的材料, 南疆和东疆地区选择表面抗老化性能和抗风性能较好, 重量不低于 $0.9 \text{ kg}/\text{m}^2$ 的材料[10] [11]。

2016 年, 新疆学者研究了一种新型材料保温被, 在新疆农业科学院农业机械化研究所西山设施农业实验基地进行生产性实验测试, 这种新型材料的初始传热性能良好, 其表面材料可以有有效的防雨雪渗入芯层及减少冷风渗透, 抗冻融效果好, 卷铺平展、均匀, 抗老化性能等正在进一步实验。

4. 新型日光温室节能技术在新疆的应用

(1) 主动蓄放热加温系统

主动蓄放热系统是由中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所设计的一种水幕帘蓄放热系统, 如图 3 所示, 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, 白天利用水循环通过水幕帘吸收太阳能, 同时将能量储存在水池中, 夜晚利用水循环通过水幕帘释放热量, 以提高日光温室内温度, 应用该水幕帘蓄放热可以将温室内夜间温度提升 5.4°C , 可将作物根系温度提高 1.6°C , 该系统通过水幕帘的放热量可以得到 $4.9\sim 5.6 \text{ MJ}/\text{m}^2$, 增强了日光温室的蓄热能力[12]。

(2) 主-被动式太阳能相变蓄热“三重”结构墙体

新疆农业科学院农业机械化研究所与北京工业大学合作在西山设施农业实验基地开展了主-被动式太阳能相变蓄热“三重”结构墙体结构的日光温室节能技术实验研究, 如图 4 所示, 该系统可实现 3 种控制模式, 即温室墙体主-被动太阳能蓄热模式、温室送热风模式、温室排风模式。系统利用北京工业大学



Figure 3. Active storage-release heating system (Xishan test base)

图 3. 主动蓄放热加温系统(西山试验基地)



Figure 4. Application site of the "triple" structural wall system of the main-passive solar phase change heat storage

图 4. 主-被动式太阳能相变蓄热“三重”结构墙体体系的应用现场

研发的新型双集热管多曲面空气集热器，与温室后墙相结合，共同构成主-被动式蓄热墙体系统，将空气集热器集到的太阳能通过独特的温室墙体内部层竖向通道向墙体蓄集，实现了温室后墙的主动蓄热；采用相变系数高的复合相变蓄热材料粘贴于温室后墙内表面，以被动蓄热的方式提高温室后墙体内部表面层太阳能的潜热蓄热能力[13] [14]。

2015 年 12 月相变温室与普通温室比较试验结果表明，相变温室室内空气温度明显高于普通温室。白天最大温差为 5.6℃，夜晚，由于相变材料具有较高的蓄热能力，墙体的内表面温度减小速度小，始终高于墙体温度，最大高 4.5℃，平均高 3.1℃。主被动墙体可以有效增强墙体的蓄放热特性。整个蓄热周期，蓄放热速率平均提高 88.84%，放热速率平均提升 178.08%，主被动墙体的蓄放热效率提升了 47.26%，如图 5 所示。

2016 以番茄作物为温室主要栽培作物，对主被动式蓄热墙体和普通温室进行对比试验，试验结果表

明：主-被动式太阳能相变蓄热温室较普通温室的温度高 1.2℃，最大提高 6.0℃，作物株高、茎粗及叶绿素含量均高于普通温室，对比如图 6 所示。

主-被动式太阳能相变蓄热“三重”结构墙体体系蓄放热性能较好，温室内表面的相变蓄热材料，有效提高墙体的得热量及室内的散热量，有利于改善室内热环境[15]。

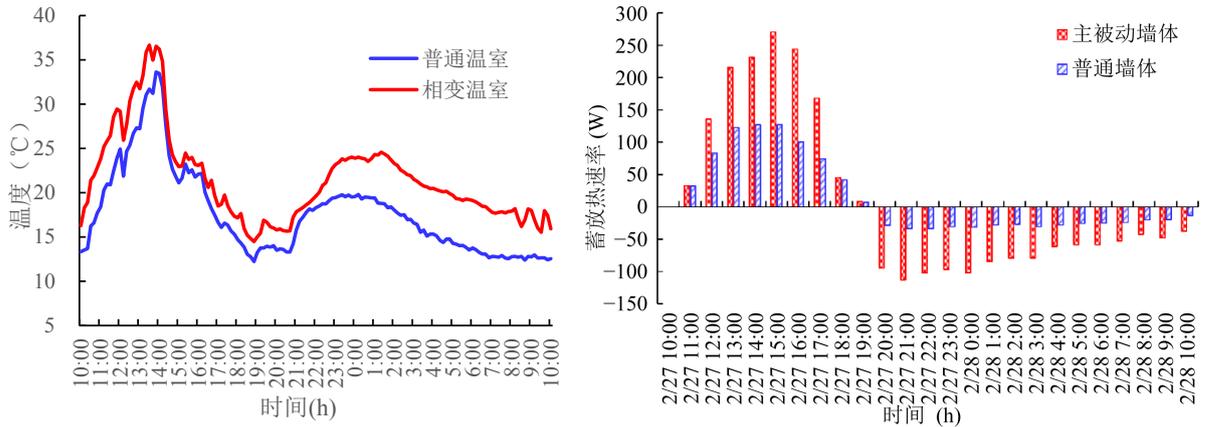


Figure 5. Comparison of temperature and heat storage-release between main-passive phase-change heat storage greenhouse and common greenhouse

图 5. 相变主-被动式相变蓄热温室与普通温室温度及蓄放热对比

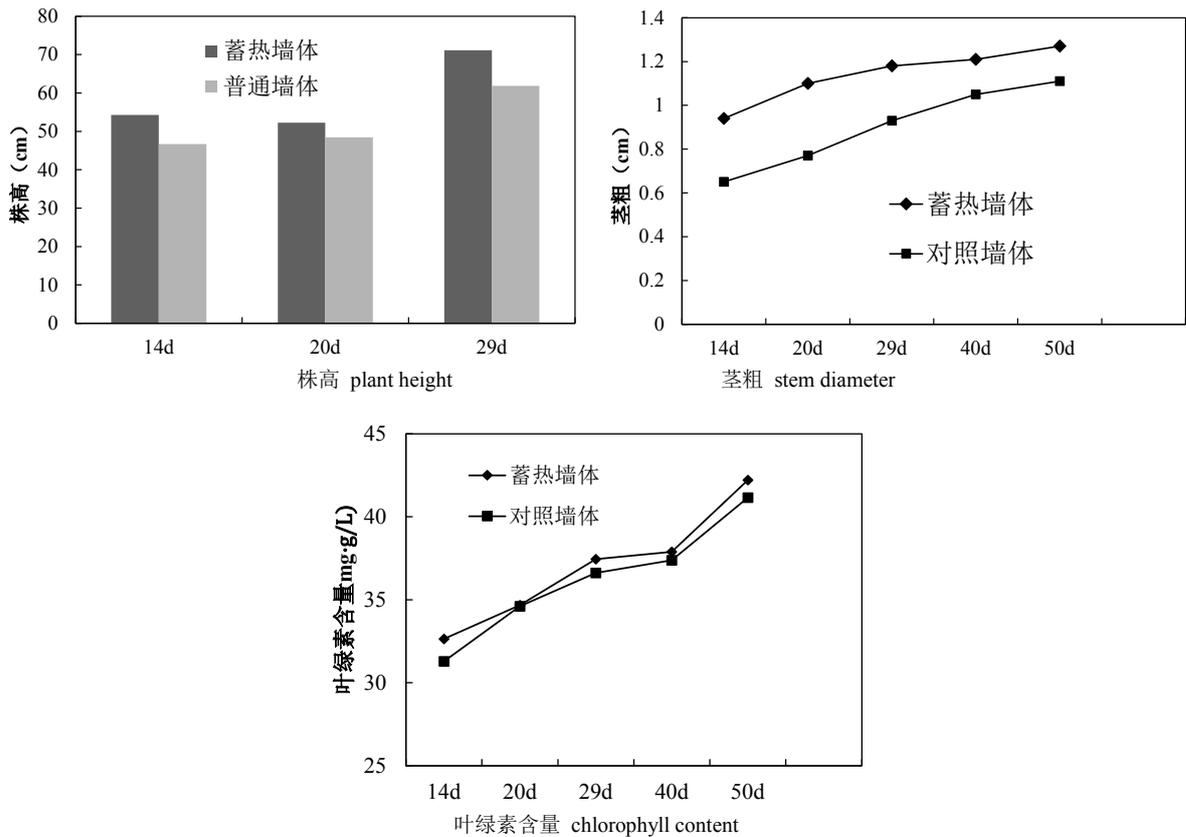


Figure 6. Comparison of growth status of tomato between main-passive phase change heat storage greenhouse and common greenhouse tomato

图 6. 主-被动式相变蓄热温室与普通温室番茄生长状况对比

5. 新疆日光温室节能技术未来展望

新疆尤其是北疆地区冬季日光温室生产采暖期从每年 11 月前后开始至次年 3 月底, 常规采暖方式是采用燃煤热风炉等设备, 煤炭消耗量巨大。随着国家对节能环保的要求, 2016 年第一节能度国家发改委、住建部、工信部、财政部、环保部等部委共发布环保相关政策 20 余条, 国务院印发了《“十三五”节能减排综合工作方案》(国发[2016]74 号), 温室节能技术已成为新疆乃至全国温室研究发展的重中之重。着眼未来, 从温室结构和新材料技术出发, 研究采用清洁能源的新型温室结构和建筑材料, 在现有节能保温综合技术基础上, 进一步深入研究, 降低蓄放热墙体等新型节能保温材料的生产运行成本并在全疆推广应用, 是提高新疆日光温室节能降耗技术水平的有效措施。

基金项目

国家自然科学基金项目(51368060)。

参考文献 (References)

- [1] 张书谦, 刘卫明. 论温室节能设计与运行[J]. 温室园艺, 2010(9): 33-36.
- [2] 崔庆法, 王静. 连栋温室可移动式双层内保温幕保温节能效果初探[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 111-114.
- [3] 李娜, 陈超, 马彩雯, 等. 基于建筑热工原理的日光温室最佳朝向仿真计算[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(11): 2112-2118.
- [4] 杨文雄, 马承伟. 温室方位角对日光温室光环境影响的模拟研究[J]. 北方园艺, 2016(19): 52-54.
- [5] 白义奎, 周东升, 曹刚, 等. 北方寒区节能日光温室建筑设计理论与方法研究[J]. 新疆农业科学, 2016, 51(6): 990-998.
- [6] 吴乐天, 马彩雯, 张彩虹, 等. 新疆标准化日光温室热环境实测与模拟分析[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(5): 924-930.
- [7] 温祥珍. 墙体高度对日光温室内夜间气温的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 980-983.
- [8] 罗旋, 蔡忠杰, 孙英玲, 等. 高效节能日光温室墙体结构及保温性能的研究现状[J]. 农业科技与装备, 2015(3): 25-26.
- [9] 姜鲁艳, 张彩虹, 吐尔逊娜依·热依木江, 等. 一种新疆常用保温被的性能测试与分析[J]. 农业工程技术, 2016(7): 18-21.
- [10] 吴乐天, 姜鲁艳, 吐尔逊娜依·热依木江, 等. 新疆日光温室常用外覆盖保温材料性能测试及对比分析[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(6): 1037-1043.
- [11] 姜鲁艳, 马艳, 吐尔逊娜依·热依木江, 等. 几种温室覆盖材料的保温性能测试与分析[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(1): 119-123.
- [12] 张义, 杨其长, 方慧. 日光温室水幕帘蓄放热系统增温效应试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 188-193.
- [13] 张明星, 陈超, 马彩雯, 等. 新型双集热管多曲面槽式空气集热器在乌鲁木齐日光温室的应用研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(5): 945-952.
- [14] 凌浩恕, 陈超, 陈紫光, 等. 日光温室带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体体系[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 336-342.
- [15] 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.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5507，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjas@hanspub.org