

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.11.021

王发香, 冯文昱, 柏雨润, 等. 我国日光温室温控技术研究应用与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(11): 161-170

Wang Faxiang, Feng Wenyu, Bai Yurun, et al. Research application and development trend of solar greenhouse temperature control technology in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(11): 161-170

## 我国日光温室温控技术研究应用与发展趋势\*

王发香<sup>1, 2</sup>, 冯文昱<sup>3</sup>, 柏雨润<sup>4</sup>, 田晓东<sup>5</sup>, 海云瑞<sup>2</sup>, 郭文忠<sup>6</sup>

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 银川市, 750021; 2. 宁夏农林科学院农业经济与信息技术研究所, 银川市, 750021; 3. 宁夏大学农学院, 银川市, 750021; 4. 山西农业大学园艺学院, 山西晋中, 030899; 5. 银川市兴庆区农业农村和水务局农业中心, 银川市, 750021; 6. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京市, 100097)

**摘要:**日光温室在我国北方农业生产中占据重要地位,其温控技术对作物生长和产量至关重要。基于国内日光温室保温技术、加热技术、降温技术及环境监测与控制系统的研究现状,分析不同覆盖材料和墙体保温效果的差异以及水循环、热泵等技术在温室加热中的应用,探讨湿帘风机降温 and 基质控温的效果以及智能化环境监测和物联网智能控制系统的特征。指出当前温控技术存在成本高、能耗高、自动化与智能化水平不足、维修管理困难以及温控能力不足等问题。提出日光温室新型保温材料选用、能源高效利用与集成系统开发、智能化与自动控制系统,以及传热机理等方面的展望,为日光温室温控技术与装备研发提供参考。

**关键词:**日光温室;环境调控;温控技术;温控装备

**中图分类号:**S237; S625 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2025) 11-0161-10

### Research application and development trend of solar greenhouse temperature control technology in China

Wang Faxiang<sup>1, 2</sup>, Feng Wenyu<sup>3</sup>, Bai Yurun<sup>4</sup>, Tian Xiaodong<sup>5</sup>, Hai Yunrui<sup>2</sup>, Guo Wenzhong<sup>6</sup>

(1. College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan, 750021, China; 2. Institute of Agricultural Economics and Information Technology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, 750021, China; 3. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, 750021, China; 4. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, 030899, China; 5. Agricultural Center of Rural Affairs and Water Resources Bureau, Xingqing District, Yinchuan, 750021, China; 6. Intelligent Equipment Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing, 100097, China)

**Abstract:** Solar greenhouse occupies an important position in agricultural production in northern China, and its temperature control technology is very important for crop growth and yield. Based on the current research status of domestic solar greenhouse thermal insulation technology, heating technology, cooling technology and environmental monitoring and control system, this paper focuses on analyzing the difference of insulation effect of different covering materials and walls, as well as the application of water circulation, heat pump and other technologies in greenhouse heating, especially discusses the effect of wet curtain fan cooling and matrix temperature control, as well as the characteristics of intelligent environmental monitoring and intelligent control system of Internet of Things. It is analyzed that the current temperature control technology has some problems, such as high cost, high energy consumption, insufficient automation and intelligence level, difficult maintenance management and insufficient temperature control

收稿日期:2024年5月23日 修回日期:2024年8月21日

\* 基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划(2023BCF01047);宁夏农林科学院对外科技合作专项(DW-X-2023001)

第一作者:王发香,女,2000年生,山东临沂人,硕士研究生;研究方向为设施环境调控与智能装备。E-mail: 2741079244@qq.com

通讯作者:郭文忠,男,1970年生,宁夏中卫人,博士,研究员,博导;研究方向为设施蔬菜栽培与智能装备。E-mail: guowz@nrcita.org.cn

ability. Finally, the research on the selection of new thermal insulation materials, energy efficient utilization and integrated system development, intelligent and automatic control system, and heat transfer mechanism of solar greenhouse is described, and the future development trend is put forward to provide reference for the research and development of solar greenhouse temperature control technology and equipment.

**Keywords:** solar greenhouse; environmental control; temperature control technology; temperature control equipment

## 0 引言

日光温室作为中国北方特有的园艺设施,一直以其高效、节能、成本低的特点而著称,2022年日光温室总面积为810 km<sup>2</sup>,全国占比从2015年的25.2%提高到29%,其面积占据了设施蔬菜总面积的1/3<sup>[1]</sup>。中国2/3的日光温室集中在北方寒冷地区,成为北方乃至全国“菜篮子工程”供应的重要手段。在我国北方地区,日光温室解决了人们冬季吃不到新鲜蔬菜的难题,提供了比大多数农业生产系统更为优越的生长环境,能够有效应对气候变化,延长作物生长季节,提高农民收入,对促进农业产业结构调整、加强农业现代化和新农村建设等均作出了重大贡献。与此同时,卷帘机、棉被、热风炉、节水灌溉装备、通风换气设备等日光温室环境调控装备也得到了越来越广泛的应用<sup>[2]</sup>。

植物的生长发育受到多种环境因素的影响,包括温度、太阳辐射、二氧化碳浓度和相对湿度等,日光温室的生产能力和作物品质与温室内环境条件密切相关。其中温度调控扮演着至关重要的角色。不同作物在不同生长阶段对温度的需求各不相同。通过温度调控,可以促进作物的光合作用,抑制呼吸作用,确保植物在整个生命周期获得最佳的生长条件,从而实现反季节蔬菜的生产,满足市场供应需求。因此,在生产实际中一般通过加热、通风、保温等温度调控技术来使温室环境达到适宜作物生长的条件,实现作物的优质增产。

目前,日光温室温度调控技术的研究取得了一定的成果,包括湿帘风机、相变材料、热泵和太阳能集热板等温控设备的应用。然而,这些技术在实际应用中仍存在效率不高、成本较高和操作复杂等问题。本文重点从日光温室保温技术、加温技术、降温技术和环境监测与控制系统等方面对国内外研究现状进行系统梳理,总结日光温室温控技术装备未来发展趋势并予以展望,旨在为农业科技创新提供参考,推动我国农业生产的现代化与可持续发展。

## 1 日光温室温控技术研究现状

### 1.1 日光温室保温技术研究与应用

日光温室白天和夜间的热量转换方式如图1所示,可以实现白天蓄热、夜晚放热。太阳辐射是日光温

室能量的主要来源,日光温室的保温是通过温室的结构、材料、设备的单一或协同应用来最大限度利用太阳辐射为室内提供热量。

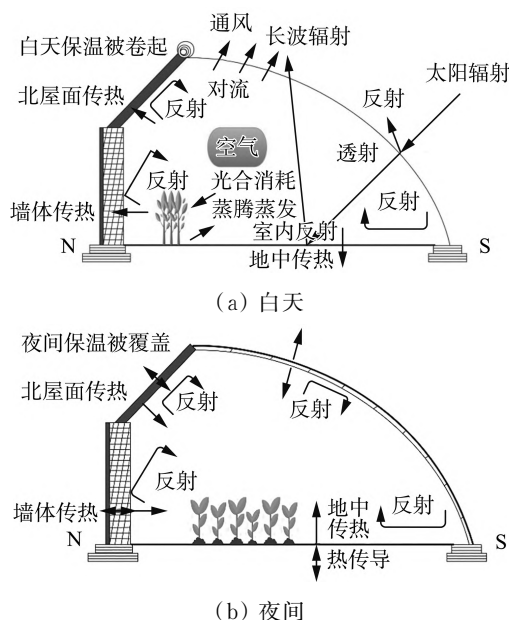


图1 日光温室热量转换方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat conversion in solar greenhouse

#### 1.1.1 前屋面采光性能

日光温室通过采光屋面获得太阳辐射,采光屋面的特性决定着进入日光温室的太阳辐射量和室内太阳辐射的空间分布<sup>[3]</sup>。优化温室采光屋面可以截获较多的太阳辐射以及较高的太阳辐射透过率。为使日光温室获得更多能量,李家宁等<sup>[4]</sup>对双圆组合、直线与圆弧组合3种屋面形状以及不同倾角条件下的室内光照情况进行模拟和分析。结果显示,不同屋面形状对光透过率影响不大,总平均透过率相差最大为1.4%。然而,屋面倾角在24°~32°的倾角范围内,每增加2°可使单位温室长度各表面累计太阳辐射能量平均增加4.6%,墙面上的增加更高达10.9%。因此在日光温室采光屋面倾角优化设计过程中,使温室采光时段光线入射角在40°~45°,该屋面倾角为合理采光屋面角度,满足采光性能要求<sup>[5]</sup>。孙潜等<sup>[6]</sup>对内保温日光温室光温环境进行测试,研究表明,增大采光屋面角可提高透光率约10%~20%。杨文雄等<sup>[7]</sup>还模拟研究了方位角对日光温室光环境的影响,认为偏西或偏东5°与偏西或偏东10°对温室总平均透光率影响不大。这些研究成果为日光温室光照环

境的研究以及屋面设计提供了有价值的参考,但未能实现热量在室内更多存储,还需要与其他保温设备或材料联合使用才能更好地发挥效果。

### 1.1.2 保温覆盖材料

夜间通过覆盖保温帘或保温被的方式,能显著降低热量散失。研究表明,缀铝箔保温幕的应用在日光温室中能有效提升室内温度  $3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但由于保温幕闭合不严而漏风,节能效果不够理想<sup>[8]</sup>。同样,采用由聚乙烯薄膜和铝涂层组成的双层内保温幕,在供暖期间使得凌晨温度上升  $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了提升保温帘的效率,周新群等<sup>[9]</sup>通过蜂窝塑膜与铝箔复合材料的保温被,降低了热辐射,但长期使用可能导致保温材料老化、损坏,需要定期更换。徐刚毅等<sup>[10]</sup>强调了选择合适保温材料的重要性,推荐使用具有优秀综合性能的 PE 发泡自防水保温被。刘晨霞<sup>[11]</sup>认为重量一定时,保温性随保温被厚度的增加而增加,但是在湿度较高的环境中,保温被可能吸湿导致保温效率下降。

近年来,关于内保温覆盖温室的结构和内保温覆盖相关配套技术的不断更新。蓟春型日光温室<sup>[12]</sup>,双层拱架结构,草帘作为保温覆盖材料内置于内层拱架,保温效果好于普通日光温室,但是室内湿度过高而草帘易吸湿变重,加重骨架载荷。内保温日光温室优化了内层拱架,使用防水保温性较好、质量较轻的保温被替代草帘,同时改进了墙体结构,整体保温性能得到提升,使温室可以适应更加寒冷的气候环境。

### 1.1.3 墙体蓄热

墙体作为日光温室的重要热源,在冬季生产中发挥着至关重要的作用。墙体的保温性能使结构、材料、厚度 3 个方面相互结合从而体现蓄热、隔热性能,如表 1 所示。在墙体材料的优选方面,王宏丽等<sup>[13]</sup>通过比较纯砖墙、加气混凝土墙、砖墙+珍珠岩以及砖墙+苯板 4 种墙体热性能,综合考虑热阻和热惰性指标,研究发现加气混凝土墙体的热性能表现最优。张义等<sup>[14]</sup>对后墙以水泥板(8 mm)+聚苯板(150 mm)+水泥板(8 mm)复合结构的温室进行研究,使用水介质主动蓄放热系统进行热量蓄积与释放,结果显示,与传统的砖墙温室相比,冬季夜间最低气温提高  $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,采取有效的换热材料将室内富余的热量蓄积于墙体内部被证明是一种有效的方法。在墙体厚度的选择方面,李小芳<sup>[15]</sup>从墙体传热量与热稳定性角度进行分析,砖墙厚度至少为 36 cm,聚苯板适宜厚度为 10 m;当墙体为外保温结构时,墙体越薄,在外贴聚苯板后增温效果越明显;当墙体为夹芯结构时,墙体越厚,外侧砖墙越厚,保温效果则越好,12 cm 砖+10 cm 聚苯板+24 cm 砖结构的墙体均温要高于 24 cm 砖+10 cm 聚苯板+12 cm 砖结

构;然而,当砖墙厚度超过 60 cm 时,不同墙体材料组合对保温性影响不大。研究表明,影响墙体厚度优化的因素多种多样,需要因地制宜地研究特定地区的独特情况。墙体结构选择方面,鲍恩财等<sup>[2]</sup>分析固化沙土作为夹芯蓄热材料的墙体结构,该结构包括 12 cm 砖+76 cm 固化沙+12 cm 砖,总墙体蓄热厚度约为 50 cm,固化沙蓄热体厚度约为 38 cm。马蔷薇等<sup>[16]</sup>选用装配式柔性墙体日光温室联合储热系统,能够使室内夜间最低空气温度保持在  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,温差达  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,系统综合性能系数 COP 为 8.85,然而,该系统蓄放热系数的准确性和其在系统横向评估中的意义有待进一步验证。

表 1 日光温室墙体保温的研究情况

Tab. 1 Research progress of solar greenhouse wall insulation

研究方向	种类	简述
墙体材料	支撑材料	土壤、黏土砖、石料、混凝土及其制品、钢材
	性能保障材料	聚苯板等保温材料,农业秸秆、砾石、沙、石灰、珍珠岩、炉渣、水等非普遍材料
墙体厚度	优化单一材质墙体的厚度	应用最多最普遍,造价低廉易施工,但合理厚度缺少统一的标准
	优化复合墙体厚度	热阻大,蓄热、隔热、保温性能好,厚度小,节省材料
墙体结构	同质墙	土质墙体、纯砖墙体、石墙体、保温板墙体、秸秆材料墙体
	异质墙	实心较为致密结构的异质复合墙和具有一定体积密闭或流动空气腔的异质复合墙
	柔性墙体	塑料薄膜、聚乙烯(PE)、EVA 薄膜、PVC 薄膜、橡胶材料、充气膜结构

### 1.1.4 相变蓄热材料

相变材料(PCM)因其在能源储存和应用领域表现出的高储能密度和稳定的工作温度,引起广泛的关注。相变材料具有白天“削峰”、夜间“填谷”的作用,对我国日光温室乃至整个农业的进步都具有重大意义<sup>[2]</sup>。相变材料多用于日光温室的有  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  以及石蜡类、脂肪酸、酯类、多元醇、高分子聚合物、芳香烃类等,在温室的屋顶或墙壁上涂覆相变材料,或将相变材料放置到温室中,周莹<sup>[17]</sup>采用膨胀珍珠岩吸附石蜡制备定形复合相变材料,与脱硫石膏及外加剂混合制备成石膏基复合相变蓄

热砂浆,并涂抹在后墙表面厚度为 50 mm 处,在冬季能够使室内日最低温度平均提高 1.5 °C。蒋自鹏等<sup>[18]</sup>将芒硝相变储能材料封装在 PVC 塑料袋中,并置于墙体内侧架台上,随着相变材料添加量的增加,温室保温效果较好,使用 45 kg 相变材料时效果最佳。孙心心<sup>[19]</sup>利用稻壳吸附相变材料制成石蜡/硬脂酸正丁酯/稻壳定形相变材料,与水泥、砂子、陶粒等建筑材料混合制成相变砌块,这些砌块不仅具备良好的力学和热学特性,还能有效改善温室的蓄热效果。相变材料种类繁多,但真正被应用到日光温室中的种类较少,未来还需要研究者大量研发并

用于日光温室中。相变材料在使用过程中体积变化率较大,密封性要求较高,如有泄漏会造成环境污染,不利于可持续发展,需要在封装技术上加强研究。

## 1.2 日光温室加温技术研究与应用

日光温室加温技术对保障冬季及低温季节作物顺利生长至关重要。使用燃煤、燃气等传统燃料进行加温会产生烟尘、二氧化碳等污染物,对环境造成影响。近年来,水循环、热泵、太阳能集热器等技术被广泛应用于温室加温,显著提高了集热效率。日光温室不同加温方式的对比见表 2。

表 2 日光温室不同加温方式的对比

Tab. 2 Comparison of different heating methods in solar greenhouse

划分依据	加温方式	成本	优缺点
电热源	化石能源加温	较高	加温效率高,升温速度快,但在燃烧过程中排放大量有害物质污染环境,不符合设施农业绿色可持续发展的要求
	电加温 <sup>[20]</sup>	较高	清洁二次能源,加温效率高,控制方便,但能源转换效率不高,一般应用在应急加热或育苗加温床
	生物质加温	较低	可再生能源,对环境友好,但生产过程复杂且周期长,生产使用受地域限制,产热阶段具有不稳定性,不能满足温室加温的长期需求
	太阳能加温 <sup>[21]</sup>	较高	可再生清洁能源,无污染,但受天气和地理位置影响较大,在我国北方地区光源丰富,技术相对成熟,应用形式多样,具有很好的潜在优势
传热工质	空气 <sup>[22]</sup>	较低	加热速度快,且不易被冻结,但比热容小,在相同体积下所蓄积的热量较低、不易储存
	土壤 <sup>[23]</sup>	低	无需额外能源消耗,环境友好,但受环境条件限制
	水 <sup>[24]</sup>	低	比热容大,无污染,在太阳能热的利用中应用较多
供能方式	热风炉加温 <sup>[25]</sup>	较高	采用常规能源燃烧进行加热,热效率高,保温容易升温难,能源消耗大,污染环境
	集中供暖	较低	以锅炉加热水给温室供暖为主,能为温室提供足够的热源,热损失相对较小,但灵活性较低,不易适应小规模需求
	太阳能和热泵加温 <sup>[26]</sup>	高	结合太阳能和热泵的优点,高效节能,环境友好,减少温室气体排放
加温对象	日光温室空中加温	较低	直接利用空气中的热量,无需额外能源,但加温效率低,受环境温度限制,适用范围有限
	作物根区加温 <sup>[27]</sup>	高	使用电热线、碳晶面板、毛细管网等散热末端直接加热作物根部土壤基质或加热育苗盘、种植盆底部,能够精准调控根区温度,直接影响作物根系的生长和对水分及营养物质的吸收、运转和贮存

### 1.2.1 水循环加温

国内的学者在日光温室水循环加温方面进行了大量的研究。郭建业等<sup>[24]</sup>设计了一种水循环增温蓄热系统。冬季晴天时,把太阳辐射热量储存在蓄热水箱中,夜晚释放热量增温,可以使温室内的平均气温提高 3.65 °C 以上,地温提高 2 °C 左右。马承伟等<sup>[28]</sup>测试了钢管屋架管网水循环集放热系统的集热与蓄放热状况,白天日平均蓄热温升为 4.7 °C,平均蓄热量约为 149 MJ,夜晚日平均放热温降为 2.5 °C,平均放热量为 78.9 MJ,集热、蓄热与放热效果显著。佟雪姣<sup>[29]</sup>将太阳能水循环系统应用到滑盖式节能日光温室中,试验结果显示,使用 PE 管和褐色 PC 板作为集热材料的集热单元,其日蓄热量明显高于透明 PC 板,具体而言,PE 管集热单元的日蓄热量提高了 80.4%,而褐色 PC 板提高了 70.6%。此外,蓄水量为 14 m<sup>3</sup> 和 12 m<sup>3</sup> 的处

理组比蓄水量为 6 m<sup>3</sup> 组表现出更高的日集热效率。温室的平均单位面积蓄热量达到 646.5 kJ/m<sup>2</sup>,空气温度提高了 2.5 °C~3 °C,平均集热效率达到 28%。

针对日光温室水循环集放热装置存在的集热能力不足的问题,徐微微等<sup>[30]</sup>设计了一套中空板水循环太阳能集放热系统,在 3.3~5.9 m<sup>3</sup>/h 的流量范围内,系统集热量随着水流量增大而提高,且该系统具有低廉的建造成本,操作简便实用,不占用室内种植空间,非常适合旧温室的改造使用。王志伟<sup>[31]</sup>设计了一套日光温室水幕集热地暖加温系统,该系统白天为温室空气增温 5.6 °C,夜间为温室空气增温 2.1 °C,系统 COP 为 6.19,增温效果显著。水循环加温的效果较好,因为水的热容量大,传热效率更高。水的流动也可以提供相对稳定的温度分布,有利于保持温度均衡。但水循环系统涉及管道、泵和阀门等复杂部件,需要定期维护

和保养。如果管道或连接部分出现问题,可能会导致水泄漏,造成损失和环境影响。

### 1.2.2 热泵加温

随着科技的发展和人们环保意识的提高,越来越多的人开始转向更加高效、清洁、安全的加温方式,比如热泵作为一种高效的加热解决方案,可以从外界环境(如空气、水或地下)中提取热量来加热温室。一般来说,热泵分为 3 种类型:地源热泵、水源热泵和空气源热泵。空气源热泵从作为热源的外部空气中提取热能,并将热量传递给水或空间。地源热泵从地下土壤中提取能量,其性能变化较小。水体作为水源热泵的吸热体,可以获得比空气源热泵更高的能源性能;然而,它的应用受到地理位置的极大限制。总的来说,空气源热泵由于其易于实现,在实际应用中占主导地位,以其高效、节能、环保的特点而被广泛应用于日光温室中。例如,孙维拓等<sup>[26]</sup>设计了一套主动蓄放热—热泵联合加温系统,由主动蓄放热系统、热泵和蓄水池等组成,白天集热,夜晚放热,集热效率达到 72.32%~83.62%,总体 COP 值达 5.59,节能效果显著。孙维拓等<sup>[32]</sup>还设计了一套日光温室空气余热热泵加温系统,白天将日光温室内富余空气热能泵取并储存于蓄热水池中,夜晚开启风机和水泵进行对流换热,当蓄热水池水温降至一定程度时,逆向运行热泵系统强制放热。在极端低温天气条件下,可以启用风机和电加热进行应急加温。试验结果表明,该系统夜间平均气温提高 2.8℃~4.4℃,相对湿度降低 8.0%~11.5%,白天平均气温降低 3.7℃~5.2℃,相对湿度降低

12.3%~16.5%,整体性能系数达到 2.7,表现出显著的节能效果。王强等<sup>[33]</sup>分析了有空气源热泵的日光温室的增温效果,结果表明,白天温度提高 6.95℃,夜间提高 3.99℃,增温效果显著,但由于空气能是分散能源,故加热速度慢,热效率不是很高,容易出现结霜问题,受地域限制。此外,宋卫堂等<sup>[34]</sup>还设计了一种表冷器—热泵联合集热系统计算方法,在夜间平均气温为-10℃的条件下,为保持室内气温不低于 15℃,需要配置 10 台 FNH 型表冷器—风机,热泵的额定输入功率为 15 kW,集热池潜水泵和储热池潜水泵的流量分别为 15 m<sup>3</sup>/h、14 m<sup>3</sup>/h,而储热池的体积为 19.8 m<sup>3</sup>。

热泵系统能够提供比较稳定的温度控制,比传统的电阻加热或燃烧加热更节能,但是热泵系统的安装和初期投资相对较高,需要定期维护和保养,包括清洁过滤器、检查制冷剂,维护成本较高,耗电量较大,且热泵的性能受到环境温度和湿度的影响,可能在极端气候条件下效率降低。因此,未来需要对热泵的系统参数配置和加工工艺进行优化。

### 1.3 日光温室降温技术研究与应用

降温技术在高温季节对于温室十分关键,目的是避免温室内温度过高,影响植物生长。昼夜温差若过小,可能会导致蔬菜产量降低。研究表明,在适宜的温度范围内,适当降低夜间气温并增大昼夜温差能显著提升果实产量和品质<sup>[35]</sup>。特别是对于具有蓄热墙体的日光温室,降温显得尤为重要。目前,国内外的研究报道了多种温室降温措施,如表 3 所示。

表 3 日光温室降温技术研究现状

Tab. 3 Research status of solar greenhouse cooling technology

降温形式	分类	优点	缺点	参考文献
通风降温	自然通风	有效调节温室温度和湿度水平,节能易操作	通风效果十分依赖室外的天气条件	严露露等 <sup>[36]</sup>
	机械通风	温湿度分布更加均匀	带来过多的能源消耗	程雪等 <sup>[37]</sup>
遮阳降温	遮阳网覆盖降温	覆盖的遮阳网层数越多,遮阳效果越好,缓解了温室内的局部高温状况	降低了温室内的太阳辐射,诱发植物叶片的黄化、生长速度缓慢、果实成熟期着色不均匀	张伟建等 <sup>[38]</sup>
	光谱选择降温	降低了温室的冷负荷,满足了植物光合作用所需的可见光,降低了温室的能源消耗	这种新型的集成系统在老旧温室中的应用可能存在一定困难	Shi 等 <sup>[39]</sup>
蒸发降温	湿帘—风机降温系统	改善空气质量,降低因空气不循环流动而发生植物病害的风险	温室温度分布不均匀、温室需要密闭条件,需要较高的能源成本以及较高的用水量	孙维拓等 <sup>[40]</sup>
	雾化系统	为植物提供一个更凉爽、更舒适的环境,提供了良好的冷却性能,有助于提高植物产量	工作成本较高,增加植物染病的风险,对水质的要求也较高,极易发生喷头阻塞的情况	马永杰等 <sup>[41]</sup>
制冷降温	屋顶喷淋降温系统	易于操作,也能减少较为强烈的太阳辐射对幼苗的烧伤	会加速覆盖材料的老化,浪费大量水资源	于海利等 <sup>[42]</sup>
		在降温过程中不受室外天气条件的限制,能够实现温度的精准调控	能效比较低,成本和运行费用均较高	朱文倩 <sup>[43]</sup>
热交换降温		不但可以用于温室的夏季降温,也可以用于温室的冬季加温中,可以常年使用	一次性的投入较大,管路的日常维护和修理存在一定困难	刘德志 <sup>[44]</sup>

### 1.3.1 湿帘风机降温

为提高湿帘风机系统的应用范围,孙维拓等<sup>[40]</sup>设计了一种日光温室正压湿帘冷风降温系统,如图2所示,该系统的湿帘风机抽取室外空气经过湿帘进入温室,在湿帘处空气显热转化为潜热,从而达到为温室输送冷风降温的目的,热空气从温室顶部开窗排到室外。在夏季高温的白天,该系统配合遮阳网可以使日光温室内平均气温控制在 $30.7\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 33.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均降温效率为91%,降温效果较好,空气平均相对湿度为49.8%~62.3%,可有效缓解低湿胁迫,另外,冷负荷模型适用于各种日光温室降温方法的研究。由于试验期间温室内未种植作物,无法完全反映真实种植环境下系统的降温效果。冷负荷计算模型未考虑辐射传热过程,导致冷负荷计算略微偏大,未来应考虑室内空气与天空的辐射传热对降低冷负荷的影响。

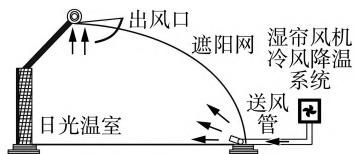


图2 正压湿帘冷风降温系统

Fig. 2 Positive pressure wet curtain cooling system

刘云骥等<sup>[45]</sup>借鉴国外半封闭温室降温方式,对正压式湿帘风机降温系统结构参数进行优化,降温系统最佳的湿帘厚度为150 mm,最佳的水流速为 $4\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ ;最优的降温系统风筒结构直径为50 cm、均匀打孔的反光膜风筒,该系统在夏季日光温室内可降温 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,本系统在降温试验中能够保证温度和湿度的均匀性,但仍有提升空间。焦宁等<sup>[46]</sup>运用计算流体力学方法(CFD)构建温室三维模型,夏季当温室内的温度达到 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,通过CFD技术优化选取出湿帘—风机降温系统的配置参数:湿帘面积为 $0.5\text{ m}^2$ ,风机风速为 $4\text{ m/s}$ ,湿帘入口温度为 $23.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,经过300 s的作用,使温度从 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,同时保证温室内温度偏差系数仅为0.077,可以满足作物生长的需求,而且成本较低。沈菲<sup>[47]</sup>对日光温室湿帘降温系统进行深入研究,研究表明,CFD仿真结果与试验数据相符,边界条件有效;在湿帘降温系统下,温度稳定后,向风机端逐步升高,靠近地面和棚顶处温度最高,中间部位温度最低;不同湿帘降温系统参数对室内温度和流场分布有影响。在对湿帘和风机参数优化的研究中可以对改变湿帘和风机的数量和位置进行研究和讨论,在日光温室的瞬态模拟中,应考虑在不同的区域设定不同的初始温度,便于结果更加精确。

### 1.3.2 基质控温

针对无土栽培的形式,可采用基质降温的方式影

响作物根区温度,研究发现,根区温度直接影响作物生长发育。傅国海等<sup>[48]</sup>针对日光温室生产过程中存在的高温和低产等问题,提出了土垄内嵌基质栽培方式(SRSC),并研究其对日光温室春茬甜椒根区温度、生长和产量的影响。研究表明,土垄内嵌基质栽培方式能有效缓冲根区温度升高,对根区高温起到良好的调节作用。与传统无土栽培相比,更好地缓解根区温度过高的问题,并且产量更高、效益更好。同时,还提出一种桶式无土栽培装置,虽然能缓冲根区温度变化,但设计较为复杂,不利于生产推广。相比之下,土垄内嵌基质栽培方式操作简单,利用基质外侧土壤对根区高温的缓冲作用,为植物根系提供更稳定的生长环境。张勇等<sup>[49]</sup>为更好地实现温室作物的周年生产,提出了一种以光伏作为能量来源,以无机相变材料作为储能工质,结合生态智能的环境控制策略,解决温室番茄的抗高温安全生产问题。结果表明,系统所消耗的能量远低于传统制冷方式,且成功实现了制冷效果,在高温条件下每天仅需运行1 h即可保持基质平均温度降低 $9.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而,还需要进一步研究系统在不同环境条件下的适用性,并继续完善多因子耦合的根区温度处理方法。为此,刘鑫<sup>[50]</sup>提出了一种水循环基质降温系统(WCSCS),该系统可使番茄基质温度降低 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,系统的冷源由冷水机提供,该设备价格低、体积小、可移动、制冷温度可设定,与蓄水箱相结合,在使用过程中节约水资源、不受使用地区水资源和天气条件的限制。但在高温天气下存在灼伤和过度遮光问题,建议未来研究中综合考虑多种调控技术,以提供更适宜的生长环境。应采用更方便快捷的种植方式、优化管道布局设计以提高换热效率,并扩大研究范围验证系统在不同地区的适用性。

综上,日光温室降温技术的选择需考虑多种因素,包括地理位置、气候条件、温室结构和预算等。不同技术的结合使用可以在不同条件下达到最优的降温效果,而且还能改善作物的生长环境,从而提高产量和品质。持续的技术创新和实践探索将有助于发现更经济、高效的降温方案,以应对全球气候变化带来的挑战。

## 1.4 日光温室环境监测与控制系统研究与应用

日光温室环境监测与控制系统是现代高效、智能化农业生产的核心技术之一。它通过实时监测温室内外环境参数并基于这些数据智能调节,优化作物生长条件,提高能源效率,并减少人力依赖。

### 1.4.1 环境监测系统

我国对温室环境监测平台开展自主研发起步较晚。随着温室传感器部署数量的增多,在温室建设中极易造成布线复杂、维护困难的问题,近些年来无线通

信技术方案以其无需布线、部署灵活的特点逐渐兴起<sup>[51]</sup>。张猛等<sup>[52]</sup>应用 ZigBee 技术研发了能对温室群进行远程管理的设备,实现了各温室向监控终端的数据汇集,并由监控终端向监控节点下达控制命令。利用温湿度、二氧化碳浓度、光照强度等传感器,实时追踪日光温室的关键环境变量。通过无线传感网络技术,实现数据的高效收集和传输,大幅降低了布线的成本和复杂度。系统能自动调节通风、遮阳、灌溉、加热、冷却和光照等控制元件,确保日光温室内维持最佳生长环境。通过使用传感器和控制软件自动调节温室内的温度,提高了加热效率和作物生产的可预测性,例如,戴剑锋等<sup>[53]</sup>建立的温室加温控制目标计算机优化系统,系统结构与功能示意图如图 3 所示,将日光温室内白天和夜间的温度分别提高为 20℃、15℃,能够使黄瓜干物质生产的能耗量利用效率达到最大。现阶段我国日光温室环境参数的采集大多数还停留在温度计、单参数采集设备等阶段,或者部分通过控制器集中采集,但仍然使用复杂的接线方式,这就造成了部署复杂、位置安装受限、成本不可控等问题。

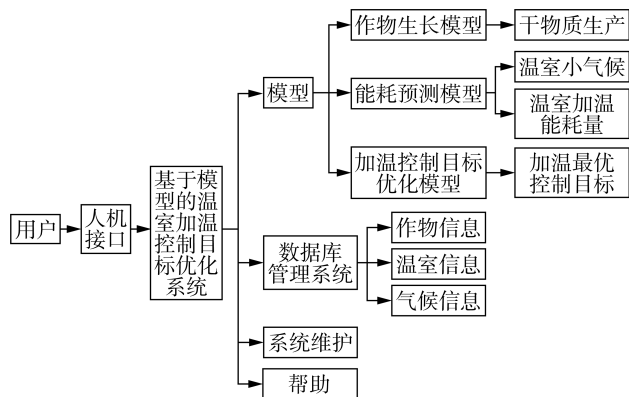


图 3 温室加温控制系统结构与功能示意图

Fig. 3 Schematic diagram of greenhouse heating control system structure and function

#### 1.4.2 物联网智能控制系统

目前,我国温室智能控制系统在技术上取得了显著进步,进入了全新的研发阶段。然而,与国外发达国家相比,仍存在明显的技术落后。因此,当前阶段应结合我国农业领域的独特特点和实际需求,开发针对性的采集设备、控制设备以及智能决策系统,这对于推动农业现代化具有重要的现实意义。通过人工智能算法分析处理数据,预测环境趋势,优化控制策略,实现日光温室环境的精准调控。通过物联网技术将传感器、控制设备及决策支持系统相连,实现远程监控和管理。借助大数据平台,能够集中处理和多个日光温室的监测数据,提供高级的数据分析、可视化和报告功能。开发日光温室环境动态模型可仿真不同控制策

略的影响,为实际环境控制提供指导。研究能源消耗与环境控制的关系,通过能效优化算法减少能源使用,降低生产成本。景向阳<sup>[54]</sup>利用物联网技术开发的智能控制系统,实时监测关键环境变量,并根据数据通过智能算法自动调整温室环境,减少人工干预,结合了 LoRa 通信、无线传感网和多种智能算法,如支持向量机和 LSTM 神经网络,提高了系统的技术集成度和操作效率,尽管系统旨在减少运行成本,但初期的设备和开发成本可能较高,系统的复杂性也可能需要特定技能进行维护和操作,且实际运行中可能会面临硬件故障或软件错误导致的中断。翟宇<sup>[55]</sup>采用 STM32 作为主控芯片,并采用 MODBUS—RTU 通信方式,设计了支持主从通信的采集节点,实现了对温室内部温度、湿度、二氧化碳和土壤湿度的实时采集。

然而,当前大多数日光温室的智能化技术仍处于开发阶段,并未广泛应用。在一些经济不发达的地区,由于物联网温室控制系统部署成本高昂,大多数温室仍依赖于人工管理。各种决策仍主要基于用户经验,导致产品的品质和质量难以得到有效保障。

智能控制系统能显著提升生长效率和产量,确保温室环境始终适宜植物生长,但也面临诸多挑战,如数据集成处理的复杂性、智能控制算法的精确性与可靠性,以及系统成本效益比的提升。要克服这些挑战,需整合植物科学、微气象学、机器学习等领域的最新研究,提高系统的整体性能,开发更直观易用的管理软件和移动应用,简化操作流程。

## 2 存在问题

1) 温室温度控制方式自动化与智能化技术水平不足。目前,日光温室在温度自动控制技术方面还不够成熟,缺乏高效的自动化系统和智能化管理平台,使得温度调控主要依赖人工操作,不仅劳动强度大,而且难以实时响应环境变化,影响调控的精确度和效率。用户通过设定阈值实现自动控制,对于环境内对作物生长起着关键作用的环境因子,调控方式简单,但效率不高并且调控精度有限,缺乏针对不同因子之间互相作用的先进控制策略。

2) 能源消耗与成本过高。尽管日光温室利用可再生的太阳能,但需要在极端环境条件下额外加温或降温。虽然新技术可以提高生产效率和作物质量,但狭小的日光温室空间和高昂的初期投资和运营成本不匹配。先进的加热设备和控制系统,如热泵、智能控制系统价格昂贵,对于小型农户来说,成本较高。

3) 装备维修与管理困难。现代化温控设备如湿帘风机、热泵等需要定期维护保养,以保持最佳工作状态,

农户缺乏相关知识和技能。水循环在蓄放热的过程中需要流动,而相变材料在蓄放热的过程中会发生相变,因此,水循环材料和封装管道应做到密封、抗腐蚀性。

4) 日光温室温度调控能力不足。部分传统日光温室因前屋面采光性能差、墙体蓄热能力不足、保温覆盖材料效果差等原因处于闲置状态,造成土地资源的浪费,需要从结构上对这部分温室升级改造。

### 3 展望

1) 研发新型保温材料,优化日光温室的结构设计。研发具有优异保温性能和环境友好特性的新型保温材料,如蓄热良好的相变材料、生物基材料、多孔材料等。优化采光屋面倾角,选择保温性能好的保温覆盖材料,因地制宜地选择适宜墙体。

2) 开发能源高效利用与集成系统。探索高效、环保的新型加温技术,如微波加温、纳米材料加温等,提高能源利用效率和日光温室加热的稳定性。将高效的能源集成系统与日光温室相结合,以实现能源的自给自足和最大化利用。进一步研究太阳能集热板、热泵等设备的集成应用,以提高日光温室的能源效率和稳定性。

3) 完善智能化与自动控制系统。开发高度集成的智能化控制系统,运用物联网、大数据和人工智能技术,结合先进的算法,实现日光温室内部环境参数的实时监测和智能分析,自动调节通风、加湿、加温、降温等设备,提高温度调控的精准度和稳定性,以达到最适宜作物生长的环境条件。

4) 进行经济性与可行性分析。进行深入的经济性和可行性分析,以确保新技术和装备的推广应用符合日光温室经济环保的特点。为操作和维护人员应提供充分的培训,并建立技术支持系统,以减轻技术复杂性带来的负担。

5) 进一步明确加温技术、降温技术在日光温室应用的传热机理。运用跨学科、多方法结合的手段深入研究温度调控技术,计算流体力学拥有各种数值算法,有助于研究流体流动传热等,未来可以进一步加强CFD模拟与试验结合的方式开展温度调控技术的传热机理研究。

### 4 结语

通过以上分析,掌握我国日光温室温控技术的研究应用与发展趋势,为今后温控技术装备的研发指明方向,向全面、全程、高效、高质量发展开拓新思路。当前日光温室在温度自动控制技术方面仍有不足,缺乏成熟的自动化系统和智能化管理平台,而先进的温控技术价格昂贵,传统日光温室难以适应当前的发展需

求。因此,应当进一步研发新型保温材料,开发高效能源利用系统,并完善智能化控制系统,在满足预期效果的前提下尽可能降低应用成本,推动传统日光温室的更新换代,促进日光温室温控技术的可持续发展,为我国农业现代化和乡村振兴贡献力量。未来,日光温室农业生产的发展方向是智能化、网络化和精准化,应推进我国日光温室温控技术全面全程、高质量高效发展。

### 参 考 文 献

- [1] 李天来,齐明芳,孟思达. 中国设施园艺发展60年成就与展望[J]. 园艺学报, 2022, 49(10): 2119-2130.
- [2] 鲍恩财,曹晏飞,邹志荣,等. 节能日光温室蓄热技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 1-14. Bao Encai, Cao Yanfei, Zou Zhirong, et al. Research progress of thermal storage technology in energy-saving solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 1-14.
- [3] 孙潜. 内保温日光温室温光性能的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022. Sun Qian. Study on the thermal and lighting performance of blanket-inside solar greenhouse [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [4] 李家宁,马承伟,赵淑梅,等. 几种常用屋面形状和倾角的日光温室光照环境比较[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(6): 1008-1014.
- [5] 张勇,邹志荣. 高效可变采光倾角日光温室的结构及其性能研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(11): 113-118, 124.
- [6] 孙潜,崔世茂,宋阳,等. 内保温日光温室光温性能及增施二氧化碳对黄瓜生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2016(9): 50-55.
- [7] 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.
- [8] 周长吉,程勤阳,周新群,等. 缀铝箔保温幕保温性能测试分析[J]. 农业工程学报, 1999(3): 191-195.
- [9] 周新群,董仁杰,张淑敏,等. 日光温室外保温蜂窝结构覆盖材料的研究[J]. 农业工程学报, 1998(4): 165-169.
- [10] 徐刚毅,周长吉. 日光温室PE发泡自防水保温被的研制与性能测试[J]. 农业工程学报, 2005(1): 128-131.
- [11] 刘晨霞. 日光温室保温被传热模型的建立及保温性影响因素分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [12] 李春生. 藓春型保温被双置式日光温室结构与性能(上)[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2011(5): 28, 30.
- [13] 王宏丽,任雷,党永华,等. 关中地区日光温室北面复合保温墙体的传热研究[J]. 北方园艺, 2008(7): 113-115.
- [14] 张义,方慧,周波,等. 轻简装配式主动蓄能型日光温

- 室[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2015(25): 36—38.
- [15] 李小芳. 日光温室的热环境数学模拟及其结构优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [16] 马蔷薇, 李明, 王利春, 等. 装配式柔性墙体日光温室联合储热系统蓄放热特性[J]. 农业工程学报, 2024, 40(15): 183—193.
- Ma Qiangwei, Li Ming, Wang Lichun, et al. Heat storage and release characteristics of the combined heat storage system for prefabricated solar greenhouses with flexible material wall [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(15): 183—193.
- [17] 周莹. 日光温室复合相变保温材料的研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019.
- [18] 蒋自鹏, 铁生年. 芒硝基相变材料性能及其在简易温室中升温效果试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 209—216.
- Jiang Zipeng, Tie Shengnian. Property and heat storage performances of glauber's salt-based phase change materials for solar greenhouse in qinghai-tibet plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(20): 209—216.
- [19] 孙心. 日光温室新型保温墙体材料的制备及应用效果的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [20] 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, 296.
- Zhao Yunlong, Yu Xianchang, Li Yansu, 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, 296.
- [21] 伍纲, 杨其长, 张义, 等. 太阳能热利用技术在我国温室中的应用现状[J]. 太阳能, 2018(12): 5—8.
- [22] 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.
- Zhang Mingxing, Chen Chao, Ma Caiwen, et al. Application study of new multiple clamber trough solar air collector with dual collector tubes in Urumqi solar greenhouse [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(5): 945—952.
- [23] 于威, 王铁良, 刘文合, 等. 太阳能土壤加温系统在日光温室土壤加温中的应用效果研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(2): 190—194.
- Yu Wei, Wang Tieliang, Liu Wenhe, et al. Application research on the heating effect of solar geothermal heating system on soil temperature in the solar greenhouse [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(2): 190—194.
- [24] 郭建业, 秦贵, 张艳红, 等. 日光温室水循环增温蓄热系统应用效果研究[J]. 中国蔬菜, 2016(9): 65—70.
- Guo Jianye, Qin Gui, Zhang Yanhong, et al. Studies on application effects of water circulating, warming and heat storing system in solar green-house [J]. Chinese Vegetables, 2016(9): 65—70.
- [25] 马丹, 须晖, 韩亚东, 等. 日光温室专用燃煤热风炉加温效果分析[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2007(5): 13—14.
- [26] 孙维拓, 杨其长, 方慧, 等. 主动蓄放热—热泵联合加温系统在日光温室的应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 168—177.
- Sun Weituo, Yang Qichang, Fang Hui, et al. Application of heating system with active heat storage-release and heat pump in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(19): 168—177.
- [27] 张守仕, 谢克英, 石明生, 等. 根系加温技术对温室观赏桃生长的影响[J]. 北方园艺, 2015(23): 61—64.
- Zhang Shoushi, Xie Keying, Shi Mingsheng, et al. Analysis of meteorological factors in double elevated substrate culture of strawberry [J]. Northern Horticulture, 2015(23): 61—64.
- [28] 马承伟, 姜宜琛, 程杰宇, 等. 日光温室钢管屋架管网水循环集放热系统的性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 209—216.
- Ma Chengwei, Jiang Yichen, Cheng Jieyu, et al. Analysis and experiment of performance on water circulation system of steel pipe network formed by roof truss for heat collection and release in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(21): 209—216.
- [29] 佟雪姣. 滑盖式节能日光温室太阳能水循环系统蓄放热效应解析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [30] 徐微微, 马承伟, 宋卫堂, 等. 日光温室中空板水循环集放热系统设计与集热性能试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 326—334.
- Xu Weiwei, Ma Chengwei, Song Weitang, et al. Test on heat-collecting performance of solar heat collection and release system with water cycling inside hollow plates in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 326—334.
- [31] 王志伟. 日光温室水幕集热—地暖加温系统设计与应用效果[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020.
- [32] 孙维拓, 郭文忠, 徐凡, 等. 日光温室空气余热热泵加温系统应用效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 235—243.
- [33] 王强, 杨禹尧, 夏礼如, 等. 基于空气源热泵的温室冬季

- 加温效果分析[J]. 中国蔬菜, 2019(10): 44—50.
- [34] 宋卫堂, 耿若, 王建玉, 等. 表冷器—热泵联合集热系统的设计方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 315—320.  
Song Weitang, Geng Ruo, Wang Jianyu, et al. Design method for fan-coil units-heat pump combined heat collection system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(21): 315—320.
- [35] 李亮, 马永杰, 江力, 等. 日光温室雾化降温系统对越夏番茄生长与品质的影响[J]. 北方园艺, 2022(12): 48—54.
- [36] 严露露, 荆海薇, 鲍恩财, 等. 不同自然通风方式对日光温室性能的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 71—78.  
Yan Lulu, Jing Haiwei, Bao Encai, et al. Effect of different natural ventilation methods on the performance of solar greenhouse [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(3): 71—78.
- [37] 程雪, 黄伊锐, 任昊宇, 等. 基于CFD的花卉温室夏季机械通风模拟[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(5): 113—118.  
Cheng Xue, Huang Yirui, Ren Haoyu, et al. Simulation of summer mechanical ventilation in flower greenhouses based on CFD [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2021, 44(5): 113—118.
- [38] 张伟建, 王新忠, 李亮亮, 等. 夏季屋顶全开型温室遮阳网降温调控的CFD分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(19): 253—256.
- [39] Shi H, Xia R, Zhang G, et al. Spectral engineering of semitransparent polymer solar cells for greenhouse applications [J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(5): 1803438.
- [40] 孙维拓, 周波, 徐凡, 等. 日光温室正压湿帘冷风降温性能及冷负荷计算模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 214—224.  
Sun Weituo, Zhou Bo, Xu Fan, et al. Performance of positive pressure fan-pad cooling system and cooling load model for Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 214—224.
- [41] 马永杰, 王星怡, 韩聪颖, 等. 日光温室后墙自走式雾化降温机夏季降温效果评价[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(4): 1016—1024.  
Ma Yongjie, Wang Xingyi, Han Congying, et al. Evaluation of the effect of self-propelled atomizing cooling machine for the back wall in sunlight greenhouse [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(4): 1016—1024.
- [42] 于海利, 苏俊平, 张仲保, 等. 日光温室外屋面喷淋系统降温效果探究[J]. 农业工程技术, 2020, 40(7): 52—54.
- [43] 朱文倩. 降温制冷屋顶的设计与研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [44] 刘德志. 地中热交换系统对温室大棚夏季降温效果的探究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [45] 刘云骥, 徐继彤, 庞松若, 等. 日光温室正压式湿帘风机系统设计及其降温效果[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5): 130—139.  
Liu Yunji, Xu Jitong, Pang Songruo, et al. Design of positive-pressure wet curtain fan system for solar greenhouse and its cooling effects [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(5): 130—139.
- [46] 焦宁, 朱德兰, 荆宇鹏, 等. 基于数值模拟的温室湿帘—风机运行参数确定方法研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(5): 79—84.  
Jiao Ning, Zhu Delan, Jing Yupeng, et al. Research on determination method of greenhouse wet pad-fan operating parameters based on numerical simulation [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(5): 79—84.
- [47] 沈菲. 日光温室湿帘降温系统研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [48] 傅国海, 刘文科. 土垄内嵌基质栽培方式对日光温室春甜椒的降温增产效应[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 199—205.  
Fu Guohai, Liu Wenke. Effects on cooling down and increasing yield of sweet pepper of a novel cultivation method: Soil ridge substrate-embedded in Chinese solar greenhouse [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(2): 199—205.
- [49] 张勇, 倪欣宇, 张柯新, 等. 光伏驱动基质控温系统对温室番茄根区的降温效果[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 212—219.  
Zhang Yong, Ni Xinyu, Zhang Kexin, et al. Cooling performance for tomato root zone with intelligent ecological planting matrix temperature control system driven by photovoltaic in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 212—219.
- [50] 刘鑫. 水循环基质降温系统在日光温室番茄根区的降温效果研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2024.
- [51] 孟珩. 基于无线传感网络的温室监控系统研究与设计[D]. 青岛: 山东科技大学, 2021.
- [52] 张猛, 房俊龙, 韩雨. 基于ZigBee和Internet的温室群环境远程监控系统设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(S1): 171—176.
- [53] 戴剑锋, 罗卫红, 乔晓军, 等. 基于模型的温室加温控制目标优化系统研究[J]. 农业工程学报, 2006(11): 187—191.
- [54] 景向阳. 基于物联网的日光温室智能控制系统开发[D]. 天津: 天津农学院, 2024.
- [55] 翟宇. 智能农业大棚测控系统的研究和设计[D]. 济南: 山东大学, 2019.