

周伟, 谢嫦, 董远德, 等. 乌鲁木齐地区冬季日光温室小气候对比测试与分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(4): 483-489.

ZHOU Wei, XIE Chang, DONG Yuande, et al. Comparative testing and analysis of winter microclimate in solar greenhouses in Urumqi[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(4): 483-489.

乌鲁木齐地区冬季日光温室小气候对比测试与分析

周伟^{1,2}, 谢嫦¹, 董远德^{1,2}, 高益¹, 唐亚杰¹

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 在乌鲁木齐地区要实现日光温室越冬生产, 保证温室作物的产量和品质, 需增加能源供应以维持温室内小气候环境达到作物生长适宜的条件。研究该地区冬季日光温室作物越冬栽培中加温对温室内小气候环境因子的影响, 为乌鲁木齐生产型日光温室优化调控策略提供参考依据。选取了位于乌鲁木齐地区西山农牧场的两栋结构相同的日光温室作为研究对象, 采用对比试验的方法, 测试和分析了加温与不加温条件下日光温室内温度、湿度和光照等小气候因子的变化特征。研究结果表明: 在室外温度维持在 $-14.5\sim 3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围时, 加温可使温室内夜间空气温度提高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 白天提高 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 后墙温度提高 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相比之下, 不加温的温室在测试期间白天室内温度可保持在 $4.0\sim 33.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 夜间保持在 $3.9\sim 9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 后墙温度维持在 $12.3\sim 19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。针对该地区冬季的实际情况, 当室外每日平均气温保持在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上且日照较为充足时, 可选择不进行加温的越冬种植方式。而当室外平均温度在 $-12.0\sim 1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内时, 根据白天的日照条件和作物对温度的要求, 可以考虑在夜间进行加温, 以提高温室内的温度。乌鲁木齐地区日光温室进行安全越冬生产时需补充大量的热能, 导致生产能耗和成本的增加, 在了解温室内小气候变化规律的基础上, 应采用有效的能耗控制策略, 满足作物生长的前提下最大程度地减小能耗, 从而降低生产成本。

关键词: 乌鲁木齐; 日光温室; 小气候; 热风加温

中图分类号: S625

文章编号: 1000-1700(2024)04-0483-07

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparative Testing and Analysis of Winter Microclimate in Solar Greenhouses in Urumqi

ZHOU Wei^{1,2}, XIE Chang¹, DONG Yuande^{1,2}, GAO Yi¹, TANG Yajie¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China)

Abstract: To achieve winter production in greenhouses with natural light in the Urumqi region, ensuring the yield and quality of greenhouse crops, an increase in energy supply is needed to maintain the microclimate inside the greenhouse under suitable conditions for crop growth. This study focused on the impact of heating on the microclimate factors inside the greenhouse for wintering of crops in Urumqi, providing a reference basis for optimizing control strategies for production-oriented solar greenhouses in the region. Two identical greenhouses located at the Xishan Farm in Urumqi, were selected as

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上资助项目(2021D01A85); 科技创新团队(天山创新团队)项目(2022TSYCTD0011); 新疆智能农业装备重点实验室开放课题资助项目(ND2N202202)

第一作者: 周伟(1976-), 女, 博士, 副教授, 从事设施农业与农业物联网研究, E-mail: 310420148@qq.com

通信作者: 董远德(1979-), 男, 硕士, 副教授, 从事设施农业与农产品收获及初加工研究, E-mail: 516159182@qq.com

the research subjects. Using a comparative experimental approach, the study tested and analyzed the changes in microclimate factors such as temperature, humidity, and light intensity inside the solar greenhouse under heated and non-heated conditions. The research findings indicated that when outdoor temperatures were maintained within the range of -14.5 to 3.7 $^{\circ}\text{C}$, heating could increase the nighttime air temperature inside the greenhouse by 10 $^{\circ}\text{C}$, the daytime temperature by 7 $^{\circ}\text{C}$, and the temperature of the back wall by 8 $^{\circ}\text{C}$. In comparison, the non-heated greenhouse during the testing period maintained daytime temperatures within the range of 4.0 to 33.1 $^{\circ}\text{C}$, nighttime temperatures within the range of 3.9 to 9.5 $^{\circ}\text{C}$, and back wall temperatures between 12.3 and 19.0 $^{\circ}\text{C}$. In the actual conditions of the region during winter, when the daily average outdoor temperature remains above -2 $^{\circ}\text{C}$ and there is sufficient sunlight, the option of not heating for overwintering cultivation can be chosen. When the outdoor average temperature falls within the range of -12.0 to 1.9 $^{\circ}\text{C}$, depending on the daytime sunlight conditions and the temperature requirements of the crops, it may be considered to heat the greenhouse at night to elevate the temperature inside. To ensure safe overwinter production in the Urumqi region using solar greenhouses, a significant amount of heat energy needs to be supplemented, leading to increased production energy consumption and costs. Based on an understanding of the dynamics of microclimatic changes within the greenhouse, effective energy consumption control strategies should be implemented to minimize energy consumption to the greatest extent possible while meeting the growth requirements of the crops, thereby reducing production costs.

Key words: Urumqi; solar greenhouse; microclimate; heating with hot air

温室是一种高能耗的抗逆性生产设施,温室运行能耗构成温室运行的主要成本,一些高纬度地区连栋温室的能耗占到温室生产成本的 $50\% \sim 60\%$ ^[1]。新疆有着丰富的太阳能资源优势,冬季仍可保证累计日照总数 $1\ 050 \sim 1\ 550$ h,充足的光热资源为设施农业的发展提供了有利的条件^[2]。至2020年底,新疆设施农业种植面积占 $53\ 400.27$ hm^2 ,其中日光温室总占地面积 $22\ 333.33$ hm^2 ,拱棚占 $31\ 013.33$ hm^2 ^[3]。新疆天山北坡地区,冬季寒冷多雪,无霜期短,为了克服寒冷冬季对农业生产的限制,需通过加温使温室内小气候环境条件适合作物的生长。冬季加温能耗较大成为限制温室生产的重要因素,因此通过研究加温对温室小气候的影响探索降低能耗的设施生产技术有着重要的意义。

温室小气候的形成受到多种因素的影响,不仅受室外气候条件如太阳辐射、温度、湿度等的影响,还和温室内控制设备的状态有关^[4-13]。国内外做了大量关于加温影响温室小气候环境的研究。TADJ等^[14]对采取不同加温措施的塑料温室内的气温和绝对湿度的空间分布进行了研究。TONG等^[15]利用数值模拟方法对冬季晴天和多云天气下日光温室内的气温和土壤温度的时间和空间分布变化进行了研究。还有很多类似的研究^[16-20],国外大多是针对现代温室进行的研究,日光温室结构是中国特有的^[21],高立婷等^[22]针对温室生产中加温目标设定不合理造成的作物产量低、能耗高等问题,通过分析外界环境、温度与作物的关系建立作物与温度模型,实现对冬季日光温室加温的优化,并基于试验法进行验证。刘联胜等^[23]采用CFD构建了不同保温供暖工况下的日光温室环境模型,模拟分析了散热末端布置位置、室内顶部保温薄膜、供水温度等对室内空气温湿度分布特性和空气流动特性的影响规律,为日光温室冬季非耐寒作物的正常生长提供支持。宫志宏等^[24]设计一种性价比较高的温室智能加温系统,通过电加温的方式实现节能型日光温室温度环境实时监测与智能调节控制,以创造农作物良好适宜的温度环境,从而达到提高经济效益的目的。李胜等^[25]以提高日光温室内加温技术及设备的加温效率为目的,研制了热风水暖一体炉加温系统,该系统有效的利用炉内燃烧热量,扩大了供暖面积,在一定程度上降低了温室的能耗。马丹等^[26]对日光温室在夜间加温期间的气温变化及分布情况等进行研究,通过分析温室整体升温速度、室内外温差以及不同垂直高度、不同水平位置温度的变化规律,探明日光温室热风炉加热系统的加温效果,为更好地利用热风炉及保证日光温室冬季的正常生产提供了参考指标,更为实现冬季加温的自动化控制提供了理论基础。武艳娟^[27]分析了呼和浩特地区冬季连续阴天条件下日光温室的小气候变化特征,结果表明连续阴天温室内气温、地温逐渐降低,室内外气温和地温差逐渐减小,因此在生产管理上要采取保温增温等相应措施。程丽^[28]选取了黑龙江省具有代表性的3种不同结构的日光温室,对它们的结构参数进行了理论分析,并通过实际测定比较了它们的温光特性,结果表明双层膜复合墙体温室的保温性能最优,该研究为高寒地区日光温室

的设计建造提供了理论依据和技术指导。但目前的日光温室小气候的研究与应用大多针对某一地区特定气候条件和特定温室结构,不具备普遍适用性。

本研究从能耗角度出发,以乌鲁木齐西山农场两栋结构相同的日光温室为试验对象,研究冬季不同天气下加温和不加温日光温室的小气候环境特性,为新疆天山北坡生产型日光温室冬季在不同天气下温室加温优化调控策略提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验温室 测试地点为乌鲁木齐第12师104团辖区西山烽火台小镇,经纬度为 43.45°N , 87.36°E 。以乌鲁木齐地区典型的钢架式日光温室为研究对象,供试日光温室坐北朝南,东西方向长为80 m,跨度8 m,脊高3.4 m,后墙高2 m,后坡1.4 m,后屋面仰角 38° 。温室前屋面覆盖PO膜和保温被,后屋面为12 cm厚彩钢夹心板,温室结构如图1。测试的日光温室一栋为加温温室,室内种植作物为黄瓜且处于苗期,植株高度为15 cm,行距30 cm,株距20 cm;另一栋温室为不加温温室,种植的作物为处于结果期的番茄,植株的高度180 cm,行距30 cm,株距37 cm,两栋日光温室构造与方位一致。

1.1.2 测试仪器 室外测试仪器选用武汉新普惠科技有限公司生产的PH自动气象站进行监测,供用仪器包括温湿度传感器以及光照强度传感器。温度测量范围: $-50 \sim +100^{\circ}\text{C}$,精确度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,分辨率 0.1°C ;湿度测量范围: $0 \sim 100\% \text{RH}$,准确度 $\pm 5\%$,分辨率 0.1% 。光照强度测量范围: $0 \sim 200\,000 \text{lx}$,精确度 $\pm 7\%$ 。

室内空气温湿度测试仪器选用江苏精创公司生产的精创空气温湿度测量仪,温度测量范围: $-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$,精确度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$,分辨率 0.1°C ;湿度测量范围: $10\% \sim 99\%$,精确度 $\pm 3\% \text{RH}$,分辨率 0.1% 。光照强度采用特安斯分体式数字照度计,测量范围: $0.1 \sim 200\,000 \text{lx}$,精确度 $\pm 3\%$ 。后墙温度采用宇问热电偶温度测量仪测量,测量范围: $-200 \sim +1\,370^{\circ}\text{C}$,精确度 $\pm(3\% \text{tl} + 0.40)^{\circ}\text{C}$,分辨率 0.01°C 。

1.2 方法

室外PH自动气象站位于不加温温室外的中心位置,用于长期采集室外空气温度、湿度和光照强度。用记录仪测试不加温温室和加温温室内温室长度与跨度中心位置2 m高度处的光照强度、空气温度、相对湿度,在后墙的中心位置采用热电偶温度记录仪测量后墙温度的变化。试验日光温室如图2。

试验时间为2023年2月10-16日,2月10日为阴雪天气,2月12日与2月14日为多云天气,其余均为晴天,试验期间多以晴天为主,雨天和雪天较少。每隔5 min记录1次数据。测试期间,加温温室通过5LMS-20型号的燃煤式热风炉进行加温处理,其中热风炉的热功率为20 MJ,电机功率为1.5 kW。两栋温室揭帘时间在10:00-10:30,盖帘时间在18:00-18:30,晴天中午室内温度较高时打开屋顶通风口放风排湿,通风时间在13:00-15:00。由于试验温室所处地区白天日照条件较好,充足的太阳辐射可使温室内温度保持在作物生长适宜的范围内,因此白天不加温,加温温室选择在夜间运行热风炉为温室提供热量以提高夜间室内温度,晴天24:00启动热风炉,阴雪天19:00启动热风炉,早晨5:00停

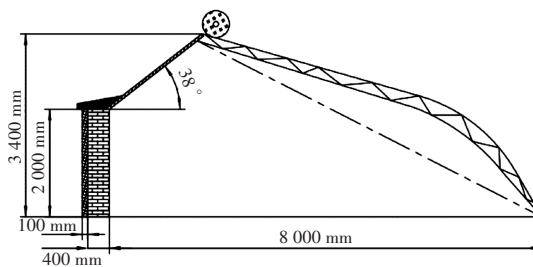


图1 乌鲁木齐地区钢架式日光温室

Figure 1 Steel frame solar greenhouse in Urumqi

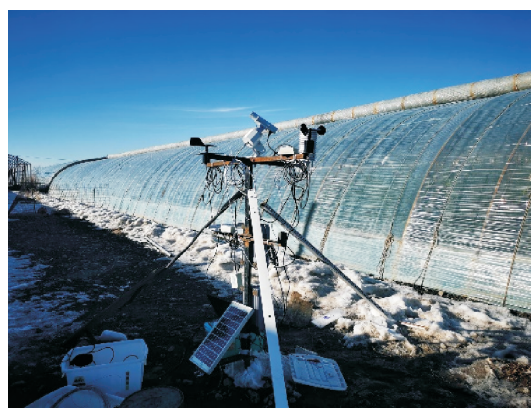


图2 日光温室外设备部署

Figure 2 Deployment of external equipment in solar greenhouse

止运行热风炉,热风炉运行每小时消耗煤0.7 kg。

1.3 数据分析

试验所得数据结果采用OriginPro 2021 进行处理与图表的制作。

2 结果与分析

2.1 温室外气候条件

由图3可知,测试期间室外最低气温出现在2月14日8:00,最低为-14.5℃;室外最高空气温度以及最高光照强度均出现在2月15日14:30,最高气温为3.7℃,最高光照强度为84 460 lx。室外空气湿度白天集中在30%~70%,夜晚空气湿度集中在70%~99.9%。室外有效光照时间一般在10:00~19:00。晴天每日室外光照强度最高均在70 000 lx以上,均集中在13:00~15:00;阴天条件下,光照强度低,光照强度范围在3 610~49 120 lx。该地区室外光照条件较好,并且出现中午温度较高,夜间温度较低的情况。

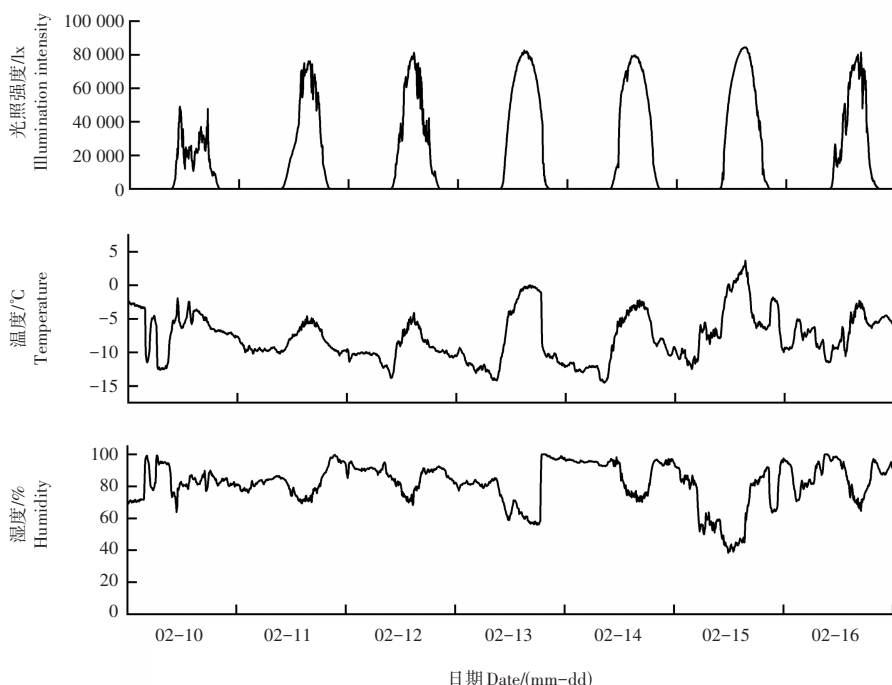


图3 室外光温环境

Figure 3 Outdoor light and temperature environment

2.2 温室内光温分析

2.2.1 周变化对比分析 由图4可知,两栋温室内白天室内空气温度的变化与光照强度呈现出较强的相关性,湿度变化与温度呈现负相关。晴天条件下两栋温室最高光照时间均集中在13:00~15:00,白天可接受平均光照时间不少于8 h。阴天条件下,温室内可接受光照强度低,平均光照时间5~6 h。2月15日光照强度最大,两栋温室内温度最高,2月10日光照强度最小(两栋平均光照仅7 000 lx),温室内温度最低。且白天两栋温室都不进行加温操作,由此可见,光照为影响不加温温室内温度的主要因素。

不同作物在不同生长阶段对温度的要求不同,测试期间黄瓜处于苗期,番茄处于结果期,两者适宜的生长温度如表1。由图4可知,不加温温室白天气温度范围为8.3~32.5℃,夜间空气温度范围为4.1~9.5℃;后墙白天温度范围为4.6~53.4℃,夜间温度范围为4.8~12.5℃,基本满足番茄生长的要求,不需要增加加温的能耗。对于黄瓜来说,不加温温室内温度不能满足黄瓜生长的要求,因此需要夜间通过辅热加温来满足黄瓜生长的需求。相同的外界气温下,加温温室白天空气温度范围为14.2~

32.6 °C,夜间空气温度范围为10.3~23.5 °C;后墙白天温度范围为12.0~36.5 °C,夜间温度范围为12.3~19.0 °C,可满足黄瓜生长的要求,但增加了温室的能耗,提高了生产成本。夜间不加温与加温温室室内空气温差较白天大,室外夜间空气温度在-14.5~-2.0 °C范围时,不加温温室室内温度的维持依靠保温被与后墙释放白天吸收的热量,加温温室依靠保温被和后墙吸收的热量不足以维持作物生长,因此在夜间需要加温。

表1 温室蔬菜适宜温度

Table 1 The suitable temperature for greenhouse vegetables

蔬菜作物 Vegetable crops	白天气温/°C Daytime temperature		夜间气温/°C Night temperature	
	最高 Max	适宜 Suitable	适宜 Suitable	最低 Min
番茄 Tomato	35	20~25	8~13	5
黄瓜 Cucumber	35	23~28	10~15	8

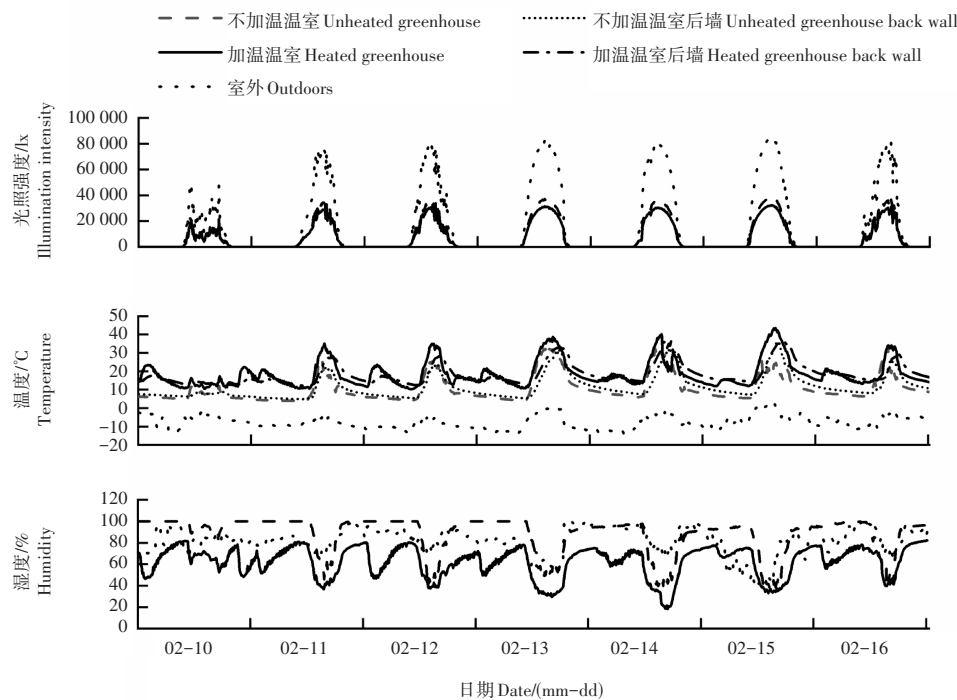


图4 加温与不加温温室以及室外的光温周变化

Figure 4 The variation of light, temperature and ambient temperature in a heated greenhouse and an unheated greenhouse as well as outdoors

2.2.2 日变化对比分析 选择具有代表性的晴天、室外光照强度最低的阴雪天气以及室外空气温度最低的多云天气进行室内小气候的日变化分析,且光照强度从大到小依次为晴天、多云、阴雪天。由图5可知,两栋温室内空气温湿度晴天和多云天气时变化幅度较大,阴雪天相对平稳。

阴雪天条件下,不加温温室变化较为平缓,温室内白天空气温度范围为5.1~11.6 °C,夜间空气温度范围为5.0~6.3 °C,湿度集中在87.4%~100%,与室外保持最大温差为13 °C。加温温室在夜间21:00~3:00进行加温的时间段温湿度变化剧烈,加温温室白天空气温度范围为10.6~15.4 °C,夜间空气温度范围为11.0~23.4 °C,湿度集中在47.2%~81.8%,与室外保持最大温差为26 °C。

晴天条件下,不加温温室内白天与室外保持最大温差35.8 °C,夜间与室外保持最大温差19.7 °C;加温温室内白天与室外保持最大温差36.6 °C,夜间与室外保持最大温差32.7 °C。多云条件下,不加温温室白天与室外保持最大温差29.6 °C,夜间与室外保持最大温差20 °C;加温温室白天与室外保持最大温差39 °C,夜间与室外保持最大温差36.7 °C。多云与晴天均受室外太阳辐射影响明显,两栋温

室均随着太阳光照的增加,温度开始上升,直到13:00两栋温室进行通风,此时两栋温度湿度变化最为剧烈,16:00两栋温室均关闭通风口后,温度开始下降,不加温温室在温度达到低谷后较为平缓并处于较低水平直至次日揭帘前,而加温温室在夜间1:00开始进行加温,加温过程中温度大幅度升高,当停止加温后,空气温度开始下降湿度逐渐回升,在次日揭帘前10:00温度最低。

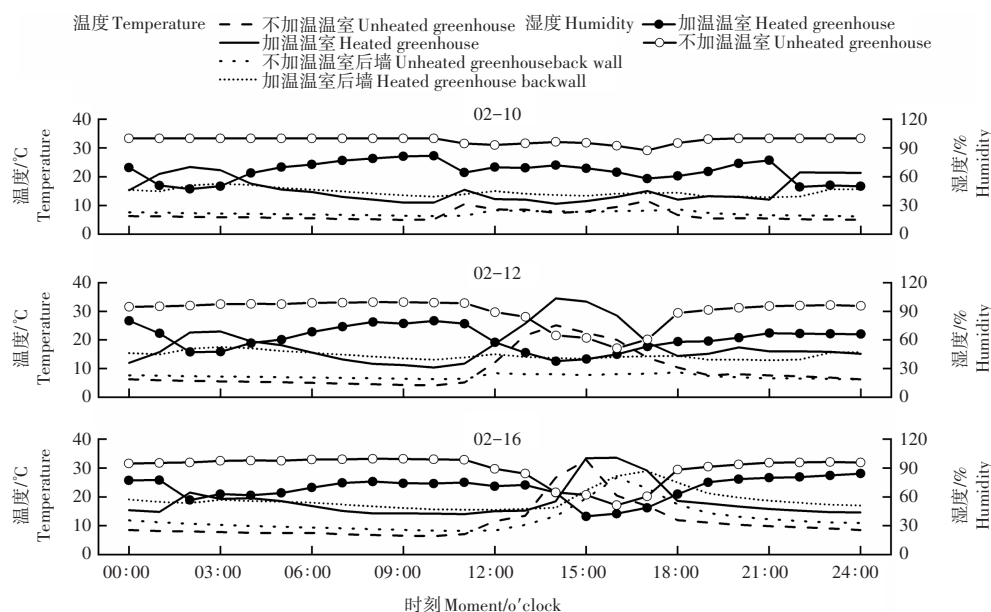


图5 加温温室与不加温温室的温湿度日变化

Figure 5 The daily variation of temperature and humidity in a heated greenhouse and an unheated greenhouse

3 讨论与结论

通过对两栋日光温室的小气候的对比试验分析,得出3种天气条件下,光照为影响不加温温室内温度的主要因素,而加温温室可根据夜间加温来减小室外天气条件对温室内气温的影响。当室外空气温度在 $-14.5\sim 3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内,室外每日平均光照强度达8 000 lx以上且未出现连续的低温寡照天气,加温温室在夜间进行热风加温能使温室与室外保持最大温差为 $39\text{ }^{\circ}\text{C}$,而不加温温室最大温差变化受室外条件影响较加温温室大,因此加温温室适用范围广,更适合于作物的越冬生产。而不加温温室的种植范围和生长期受限于室外气候条件,适合进行秋延后以及春提前生产。

乌鲁木齐地区冬季严寒干燥,要实现日光温室越冬生产,必须对温室投入加温能耗,从而导致生产成本的增加。因此,为了降低能耗和成本,需要综合考虑温室结构、设备和作物种植等因素,并采取相应的调控措施进行优化。该地区越冬生产适合茄果类蔬菜的生产,可选择半地下式日光温室进行越冬,该温室较传统的日光温室具有良好的保温性能。且测试期间加温温室的加温方式较为传统,需要人工根据室内外条件进行热量补充,在此加温的基础上,提出一种优化的加温调控策略。利用传感器和控制器,实时监测温室内外温度、湿度、光照等参数,根据预设的控制策略自动控制加热设备的开关和功率,该方式能实现精确的温度控制,在一定程度上降低了能耗与成本。

参考文献:

- [1] 李宏益,吴素萍,张亚红.基于冬季能耗的连栋温室经济效益预测系统[J].农机化研究,2010,32(11):232-236.
- [2] 马彩雯,王晓冬,邹平,等.新疆新型高效节能日光温室标准化设计探讨[J].中国农机化,2010,31(2):47-51.
- [3] 许红军,李彦荣,崔拥民,等.新疆和田沙漠腹地日光温室环境测试与分析[J].农业工程学报,2018,34(增刊1):60-65.
- [4] 董远德,周伟,高益.新疆天山北坡地区冬季低温寡照气候下日光温室小气候环境测试与分析[J].北方园艺,2022(16):63-68.
- [5] 张赛行.不同平茬时间对日光温室‘藤稔’葡萄生长发育的影响[D].南京:南京农业大学,2020.

- [6] 李唐.日光温室太阳能辅助加温散热系统研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
- [7] 赵晓彤,须晖,李天来,等.东北地区日光温室冬季能量分配模型的建立[J].沈阳农业大学学报,2019,50(1):43-50.
- [8] 王迎旭,孙晖,李玉花,等.基于叶绿素荧光成像的温室黄瓜植株病害分类与病情监测[J].南京农业大学学报,2020,43(4):770-780.
- [9] 于锡宏,朱桐,佟雪姣,等.土壤含水量对日光温室秋冬番茄生长及产量的影响[J].东北农业大学学报,2022,53(8):36-43.
- [10] 邱威,邬伊浩,周慧能,等.温室风幕式施药装置设计与试验[J].南京农业大学学报,2023,46(2):405-415.
- [11] 苏春杰,蒋静静,张大龙,等.环境因子耦合对温室番茄生长及光合作用的调控效应[J].沈阳农业大学学报,2020,51(1):78-86.
- [12] 赵晓彤,须晖,李天来,等.东北地区日光温室冬季能量分配模型的建立[J].沈阳农业大学学报,2019,50(1):43-50.
- [13] 卜俊怡,孙国祥,王迎旭,等.基于诱虫板图像的温室番茄作物害虫识别与监测方法[J].南京农业大学学报,2021,44(2):373-383.
- [14] TADJ N,BARTZANAS T,FIDAROS D,et al.Influence of heating system on greenhouse microclimate distribution[J].Transactions of the ASABE,2010,53(1):225-238.
- [15] TONG G,CHRISTOPHER D M,LI B.Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse[J].Computers and Electronics in Agriculture,2009,68(1):129-139.
- [16] EL ALAOU M,CHAHIDI L O,ROUGUI M,et al.Evaluation of CFD and machine learning methods on predicting greenhouse microclimate parameters with the assessment of seasonality impact on machine learning performance[J].Scientific African,2023,19:e01578.
- [17] SABERIAN A,SAJADIYE S M.The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation[J].Renewable Energy,2019,138:722-737.
- [18] MASHONJOWA E,RONSE F,MILFORD J R,et al.Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model[J].Solar Energy,2013,91:381-393.
- [19] VAN BEVEREN P J M,BONTSEMA J,VAN STRATEN G,et al.Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse[J].Applied Energy,2015,137:97-109.
- [20] BOULARD T,WANG S.Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions[J].Agricultural and Forest Meteorology,2000,100(1):25-34.
- [21] 王聪,姜迎春,徐占洋,等.雪荷载作用下几字型日光温室极限承载力分析[J].农业工程学报,2022,38(19):172-179.
- [22] 高立婷,戴思慧,李明,等.基于作物与能耗的温室加温调控方法[J].中国农机化学报,2021,42(5):49-54.
- [23] 刘联胜,孟阔,王冬计,等.基于CFD的不同保温供暖工况下日光温室环境模拟研究[J].沈阳农业大学学报,2022,53(6):709-716.
- [24] 宫志宏,董朝阳,于红,等.节能型日光温室智能加温控制系统设计[J].中国农业气象,2017,38(6):361-368.
- [25] 李胜,王国强,刘娜,等.基于日光温室加温技术的热风水暖一体加温系统研制[J].农业工程,2020,10(10):16-18.
- [26] 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),2007,27(5):13-14.
- [27] 武艳娟.日光温室冬季连阴天小气候特征分析及调控对策[J].内蒙古农业科技,2015,43(3):77-78,82.
- [28] 程丽.高寒地区不同结构日光温室冬季温光条件变化规律比较研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2023.

[责任编辑 马迎杰]