

多因子约束的卷帘机揭盖被决策方法与控制系统研究

张军华^{1,2} 陈丹艳^{1,2} 张仲雄^{1,2} 孙章彤^{1,3} 张明科⁴ 胡瑾^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 日光温室冬季反季节生产中光照时长与温度普遍无法满足作物的生长需求, 本文基于作物生长对温度与光照的需求, 以维持温室温度平稳的光平衡点、夜间最低温预测模型、经验揭盖被时间为约束条件, 提出了以作物低温限制点、光补偿点、光平衡点与经验揭盖被时间为约束的揭被决策方法, 以及以夜间最低温预测模型、作物低温限制点、光补偿点与经验揭盖被时间为约束的盖被决策方法, 在此基础上, 基于无线传感器网络构建了卷帘机决策控制系统。试验结果表明, 本文卷帘机揭盖被决策方法及控制系统能有效减少 43% 的低温发生率, 与经验揭盖被相比, 试验温室日光照射时长平均延长 1.25 h, 试验期间累计增加光照时间 75.16 h, 辐热积增加 61.41 MJ/m², 有效积温增加 22.28℃, 有效提升了温室热量积累; 试验温室番茄植株矮、茎粗大, 表现更为健壮, 叶长与叶宽的生长速率显著高于对照温室, 对试验期间影响较大的第 1 穗果产量进行统计分析, 试验温室产量提升 30.74%, 且第 1 次收获时间提前, 证明了本文卷帘机揭盖被决策方法与控制系统能促进作物生长, 有效增加番茄的物质积累, 为日光温室卷帘机揭盖被决策提供了思路。

关键词: 日光温室; 卷帘机揭盖被; 决策方法; 多因子约束

中图分类号: S24; S625.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0354-11

OSID:



Decision-making Method and Control System for Uncovering/Covering Curtain Based on Multifactor Constraints

ZHANG Junhua^{1,2} CHEN Danyan^{1,2} ZHANG Zhongxiong^{1,2} SUN Zhangtong^{1,3} ZHANG Mingke⁴ HU Jin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory for Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100, China
4. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The duration of light and the temperature in winter counter-seasonal production in solar greenhouses are generally unable to meet the growth demands of crops. Based on the temperature and light requirements for crop growth, the light equilibrium point to maintain a stable greenhouse temperature, the nighttime minimum temperature prediction model, and the empirical uncovering/covering time were used as constraints. The method of uncovering decision with the constraints of crop low temperature limitation point, light compensation point (LCP), light balance point and empirical uncovering time, and the method of covering decision with the constraints of nighttime minimum temperature prediction model, crop low temperature limitation point, light compensation point and empirical covering time were proposed. A decision control system for the roller shutter was also constructed based on a wireless sensor network. The results showed that the decision-making method and control system of uncovering/covering curtain can effectively reduce the incidence of low temperature by 43%. Compared with the empirical uncovering/covering curtain of the control greenhouse, the daily light duration of the experimental greenhouse was extended by 1.25 h on average, and the accumulated light

收稿日期: 2022-06-16 修回日期: 2022-07-09
基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1100602)、陕西省重点研发计划项目(2021ZDLNY03-02)和中央高校基础研究基金项目(2452020292)
作者简介: 张军华(1991—),男,博士生,主要从事智慧农业与作物生理生境监测与调控研究,E-mail: zhangjunhua@nwsuaf.edu.cn
通信作者: 胡瑾(1980—),女,教授,博士生导师,主要从事设施环境调控与智能信息处理研究,E-mail: hujin007@nwsuaf.edu.cn

duration was increased by 75.16 h, the product of thermal effectiveness and PAR was increased by 61.41 MJ/m², and the effective accumulated temperature was increased by 22.28℃, which effectively improved the heat and light duration of the greenhouse. The tomato plants in the test greenhouse were lower in height, which had thicker stems and performed more robustly, with significantly higher growth rates of leaf length and width than that in the control greenhouse. Statistical analysis of the first fruit yield, which was more influential during the trial, showed that the yield of the trial greenhouse was increased by 30.74%, and the first harvest was earlier. It was proved that the proposed method and control system for decision-making of curtain uncovering/covering can promote crop growth and effectively increase the material accumulation of tomato, which provided an idea for decision making of rolling shutter uncovering in heliostat.

Key words: solar greenhouse; curtain uncovering/covering; decision-making method; multifactor constraints

0 引言

北方冬季反季节生产过程中,日光温室通过后墙对太阳能的蓄放热及保温覆盖物的保温,能有效实现夜间温室内温度的维持^[1-2]。但传统日光温室电气化水平较低,基本无加热装置及补光灯等设备支持^[3-4],光照时长及日间的太阳辐射量是影响温室内温度和作物物质积累的主要因素^[5],温室在揭被后,太阳辐射对温室整体增温,内墙及土壤进行蓄热,为作物的正常生长提供适宜环境,但阴雨天、雪天太阳辐射较弱时,太阳辐射强度无法提供足够的热量来源,使温室温度下降;盖被后温室内温度急剧下降,温室通过后墙、土壤的放热及保温被的隔热来维持温室内温度,防止温度过低造成作物受冷害^[6-9]。温室温度目前很大程度上取决于基地温室管理人员揭盖被操作的时间^[10-11]。实际生产中,由于信息化水平低,管理员仅用水银温度计来测量温室温度,揭、盖卷帘被时间也依靠人工经验,管理员通常采取晚揭被、早盖被的方式来保证室内温度^[12],这种方式使温室不能最大化接收太阳光辐射,导致温室无法获取充足热量,温室内蓄热量降低,保暖性能逐渐下降,同时会减少作物光合作用时长,影响作物的正常生长发育和物质积累^[10]。目前已有研究主要考虑不同揭盖被方式、揭盖被程度对日光温室内温度的影响,结合作物生长需求模型进行卷帘机揭盖被决策的研究较少^[13-17]。因此,结合作物需求及揭盖被后温室温度变化规律,实现合理的揭盖被决策对日光温室的生产至关重要。

本文基于作物生理生长对温度和光照的需求,结合揭被过程中不同内外温差条件下太阳辐射使温室内温度达到平衡所需的光照强度(光平衡点),研究基于经验控制、作物温度限制、光补偿点与光平衡点多约束条件融合的卷帘机揭被决策模型;同时,构建温室夜间最低温预测模型,建立融合光补偿点、温度限制点、经验控制的卷帘机盖被决策方法,并依托

卷帘机决策控制系统实现卷帘机揭盖被的智能决策控制,为提高日光温室冬季反季节生产中光周期,减少夜间低温冷害的发生提供有效保障。

1 揭盖被约束条件获取

揭盖被操作主要在典型西北下沉式日光温室进行,本研究中约束条件包括冬季番茄生理生长需求、揭盖被后温室温度变化规律与经验揭盖被时间 3 方面。试验作物为普罗旺斯番茄 (*Solanum Lycopersicum* Mill.), 其生理生长需求约束条件主要为作物低温限制点与光补偿点(光限制点);试验日光温室东西长 50 m,南北跨度 7 m,脊高 5 m,下沉 0.5 m,后墙、东侧墙体、西侧墙体为黏土制成,拱架为钢架结构,后坡覆以 PC 板和纺织材料制成的保温棉被,透光材料为聚氯乙烯薄膜,采用上下通风方式建造。约束条件获取试验于陕西省泾阳县西北农林科技大学泾阳蔬菜示范基地东 6 号日光温室进行,其约束条件为温室内温度平稳时的光平衡点及温室夜间最低温预测模型获取的最低温值。

1.1 作物生理生长约束条件

1.1.1 番茄低温光合速率试验

植物的生长主要依靠叶片的光合作用,其中光合速率是反映植物对环境响应的重要指标,而低温对植物生长的影响从细胞层面开始,它主要影响叶片中光合器官光合过程和相关酶活性,限制了叶片的光合速率,从而限制叶片向花和果实的养分供应,因此本文以叶片低温光合速率试验来获取冬季低温条件下作物温度约束条件及光约束条件。西北越冬番茄种植过程中,低温冷害主要发生在对低温敏感的生殖生长期,初花期中现蕾期与花芽分化初期受低温影响后会严重限制花粉的形成、活力以及花的数量^[18],且花芽分化、开花及果期在生殖生长过程中并存,而花期是果期产量和品质的基础,因此本文以初花期番茄为试验对象,采用 LI-6400XT 型光合速率仪进行低温光合速率嵌套试验,其中光子通量

密度、空气温度、CO₂ 浓度范围根据日光温室实测范围适当调整设定, 试验方案如表 1 所示。由于需预测番茄植株光补偿, 同时考虑到弱光条件下作物光响应曲线斜率较大, 光子通量密度共设置 11 个梯度, 分别为 0、15、30、60、120、250、400、600、800、1 000、1 200 μmol/(m²·s)。整个试验采用人工气候箱进行, 环境相对湿度为 50%。

表 1 光合速率测试试验梯度设置
Tab. 1 Gradient setting of photosynthetic rate test

参数	数值	步长
光照强度/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	0~1 200	
空气温度/℃	6~16(LT)+20(CK)	2
CO ₂ 浓度/(μmol·mol ⁻¹)	400~1 000	200

1.1.2 低温限制点分析

低温限制点指对番茄生理生长造成严重抑制的环境临界温度点。以 CO₂ 浓度为 600 μmol/mol 时的不同温度、光照强度梯度下光合速率变化趋势为例, 其温度响应结果如图 1 所示。

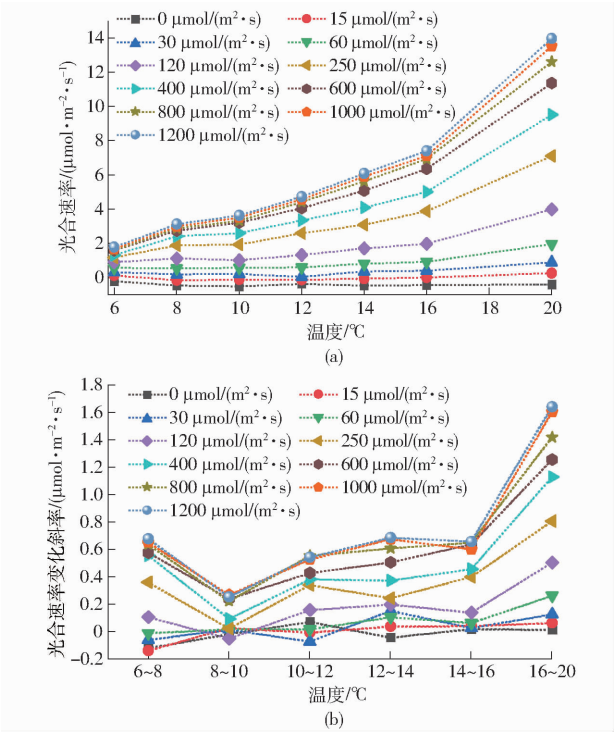


图 1 不同光照强度下番茄(初花期)光合速率温度响应
Fig. 1 Temperature response of photosynthetic rate of tomatounder different photon flux densities (flowering stage)

由图 1a 可知, 随着温度的增加, 整个光照强度区间光合速率差异越来越大。6℃ 时, 不同光照强度下光合速率收缩, 说明叶片光合作用能力差异减小受到了抑制; 在 6℃ 升至 8℃ 时光合速率差异变大, 说明植物生理状态得到恢复或缓解, 外界的光照强度变化已能明显改变其光合能力, 作物生理应激反

应趋于正常, 光合作用强度主要受限于低温下酶活性的影响。由图 1b 各温度区间光合速率变化斜率可看出, 光照强度大于 120 μmol/(m²·s) 时, 在 6~8℃ 及 10℃ 以上温度区间的光合速率变化斜率均较大, 在 8~10℃ 区间斜率达到最小值, 说明在该区间附近时达到了平台期, 即作物能忍受的低温限制区, 低于限制温度作物生理机能会迅速降低; 由 0 μmol/(m²·s) 的变化趋势可知植株呼吸作用在低于 8℃ 时明显减小, 说明此时呼吸作用也受到了抑制, 这与 IKKONEN 等^[19] 研究结果一致, 当光照强度低于 120 μmol/(m²·s) 时, 8~10℃ 区间斜率相对集中且接近于 0, 同样处于平台期, 光合速率随着温度降低略有上升, 是因为低温使呼吸作用受到了抑制。因此本研究以 8℃ 作为作物低温约束条件。

1.1.3 光限制点分析

为保证番茄的正常生长发育, 以低温条件下光补偿点(光限制点)作为卷帘机揭盖被中作物的光约束条件。光补偿点通过叶子飘等^[20] 提出的直角双曲线修正模型及光合计算软件对原始光响应试验数据拟合计算获取。以环境温度、CO₂ 浓度为输入, 计算获取的光补偿点为输出, 采用支持向量机回归(Support vector regression, SVR)^[21-22] 算法建立光补偿点预测模型, 其中模型参数 C、g 通过 Tent 映射改进的差分进化算法(Differential evolution algorithm, DE)进行寻优^[23-25], 最终以获取的最优参数组合对光补偿点数据进行拟合, 在日光温室温度 6~16℃、CO₂ 浓度 400~1 000 μmol/mol 范围内光补偿预测模型曲面如图 2 所示。

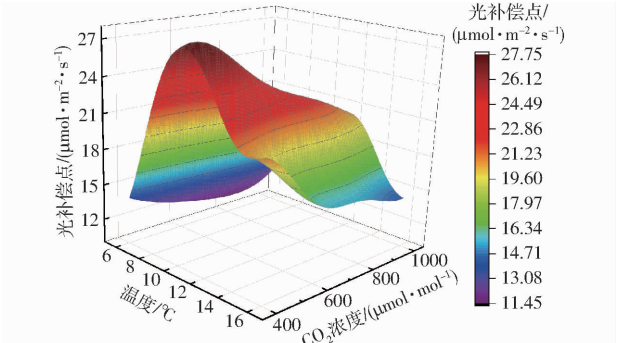


图 2 不同温度、CO₂ 浓度下光补偿点预测模型
Fig. 2 Prediction model of LCP under different temperatures and CO₂

采用留一法对模型性能进行验证, 通过线性拟合对预测值与光补偿点实际值进行相关分析, 结果如图 3 所示, 结果表明, 该模型的决定系数 R² 为 0.935 3, 均方根误差(Root mean square error, RMSE)为 1.11 μmol/(m²·s), 归一化均方根误差(Normalized root mean square error, NRMSE)为 0.064 2, 小于 0.2, 说明模型具有较高的拟合精度

和良好的适用性,与实际光补偿点数据接近,能够满足卷帘机实际控制过程中光限制点的获取精度要求。

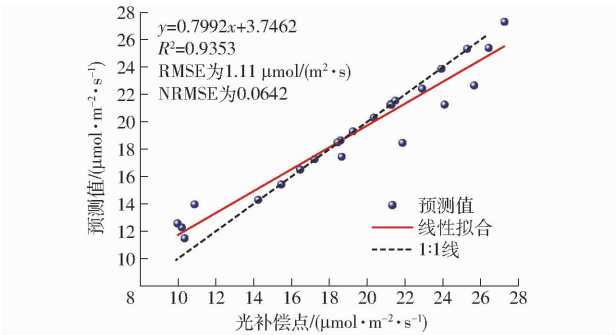


图 3 改进 DE-SVR 建模性能

Fig. 3 Improved DE-SVR modeling performance

1.2 温室约束条件

为减少温室低温冷害的发生,环境监测预警与卷帘机调控过程中应监测温室中最低温位置环境,经前期研究分析,本文室内最低温环境监测点位置部署于温室东侧靠近薄膜附近,距东墙 4 m,后墙 5.48 m 左右,高度随作物冠层高度进行调整^[26];室外环境监测节点部署于日光温室棚顶位置。

1.2.1 温室揭盖被试验

为分析揭被后不同外界光辐射强度、内外温差对温室温度变化的影响,获取温室内外温度平衡的光约束条件,进行了不同温光条件下揭被测试。试验数据采集从揭被动作开始至揭被后 10 min 结束,揭被过程各个环境参数数据分布范围如表 2 所示,试验时间 2019 年 12 月 28 日—2020 年 2 月 18 日,去除其中 2020 年 1 月 15 日由于降雪全天未揭被的数据,试验共采集可用于分析的温光数据 53 组。

表 2 日光温室揭被试验环境参数分布范围
Tab. 2 Distribution range of environmental parameters of uncovering-quilt test in solar greenhouse

参数	数值
室内初始温度/℃	6.1 ~ 14.4
室外温度/℃	-4.8 ~ 8.2
太阳光辐射强度/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	6 ~ 916
温室内外温度差/℃	3.8 ~ 15.8

日光温室盖被后,夜间室内最低温不仅受盖被后初始温度、后墙与土壤蓄热的影响,同时也受外界温度的影响^[27],参考已有研究,夜间最低温建模输入参数主要包括室内最低温监测点温度、室外温度、气象数据^[11,28-29],由于夜间后墙距离最低温监测点较远,土壤的散热对空气温度影响更大,因此本文增加监测点土壤温度数据作为输入,增加模型预测准确性^[30]。

盖被试验于 2019 年 12 月 28 日—2020 年 2 月 18 日、2020 年 12 月 8 日—2021 年 1 月 19 日进行,去除特殊原因如极端雪天等天气未盖被情况,试验共获取试验数据 73 组。数据采集从盖被动作开始记录至第 2 日 08:00 结束,其中气象数据由泾阳气象预报获取,记录盖被时刻温室内外温度及盖被后至第 2 天 08:00 间每小时气象预报温度数据,每小时温度预报数据将用于积温计算,其余夜间实测环境数据由环境监测节点自动采集,各参数数据分布范围如表 3 所示。

表 3 日光温室盖被试验环境参数分布范围
Tab. 3 Distribution range of environmental parameters of covering-quilt test in solar greenhouse

参数	数值
室内初始温度	7.3 ~ 22.7
室外初始温度	1.6 ~ 16.7
土壤初始温度	11.5 ~ 17.0
气象预报最低温度	-7.0 ~ 3.0
夜间最低温度	3.8 ~ 13.9

1.2.2 光平衡点预测模型

基于获取的试验数据,在不同温度差与光辐射强度条件下,截取了揭被后 10 min 时的室内外环境监测数据,对 10 min 内温室内外温度差均值、太阳辐射强度均值及温度变化率进行计算,以室内温度变化率反映不同温光耦合条件下最低温监测点温度变化趋势,当温差变化率小于 0 时,说明外界光辐射强度在当前温度差下不能保证温度平稳,即温度下降,反之则说明温度升高。不同太阳辐射强度、温度差下温度变化率的变化规律如图 4 所示,图中白色虚线为最低温监测点在不同内外温度差、光辐射强度条件下,揭被后 10 min 内温度变化为 0℃/min 趋势线。从 0℃/min 趋势线可以看出,本文试验条件

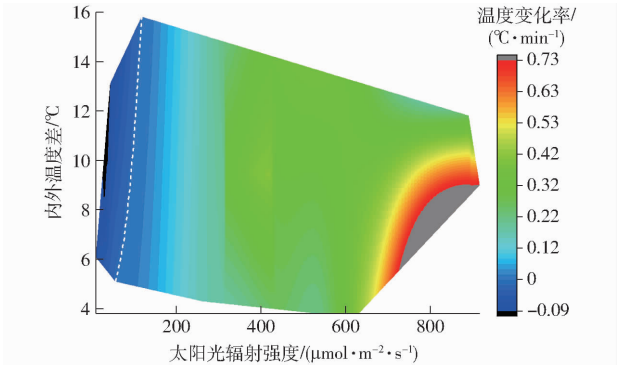


图 4 不同温差、太阳光辐射强度下室内温度变化率分布
Fig. 4 Temperature transition rate distribution of indoor temperature at different internal-external temperatures and light radiation intensities

下不同温度差时,最低温监测点温度不变时光平衡点较小,在 53 ~ 120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围内变化。

对 0℃/min 趋势线进行提取,获取了 19 组光平衡点原始数据,通过二次非线性拟合获取了不同温差条件下维持温室内温度不下降的光平衡点,拟合结果如图 5 所示,由图 5 可知,模型拟合的 R^2 为 0.991 9, RMSE 为 1.816 9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, NRMSE 为 0.029 3,说明光平衡点拟合结果精度高,适用性良好。当温差为 0℃ 时,理论上温室内外无热量交换,光平衡点辐射强度应为 0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,此时模型计算该点辐射强度为 4.028 2 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,接近于实际情况,为日光温室卷帘机揭被过程中决策限制条件提供了理论依据。

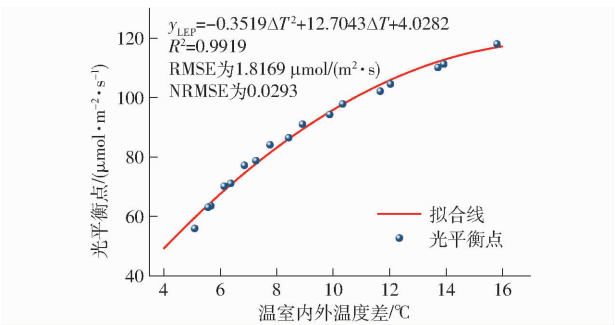


图 5 光平衡点拟合模型

Fig. 5 Light equilibrium point fitting model

1.2.3 夜间最低温预测模型

夜间最低温预测模型采用精英策略遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 优化的 SVR 进行构建^[31-33]。GA 寻优过程中参数设置:种群大小设置为 50,迭代次数 100,交叉概率 0.85,变异概率 0.1。本研究根据经验设置寻优参数 C 、 g 取值范围分别为 $[0, 15]$ 、 $[0, 5]$ 。通过精英策略 GA 对 SVR 参数进行优化,在迭代 17 次时达到模型收敛,最终惩罚因子 C 最优值为 3.222 8,核参数 g 最优值为 0.002 9,模型预测性能验证分析结果如图 6 所示。

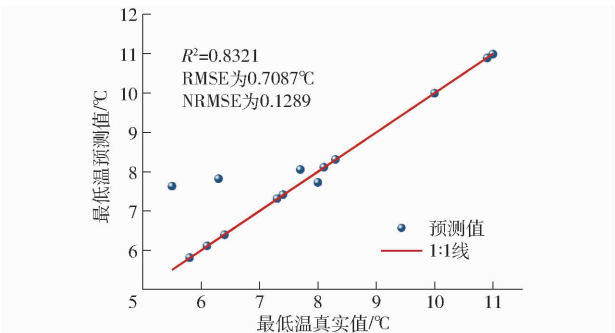


图 6 模型预测性能分析

Fig. 6 Model predictive performance analysis

通过最优参数 SVR 模型对数据集进行训练与测试,训练集与测试集 R^2 分别为 0.824 0、0.832 1, RMSE 分别为 0.718 5、0.708 7℃,其中测试集

NRMSE 为 0.128 9,说明最低温预测模型在不同环境条件下具有良好的预测性能,泛化能力良好,能为卷帘机盖被决策提供可靠的数据支撑。

1.3 经验揭盖被约束条件

在日光温室冬季实际生产过程中,除大雪等恶劣天气情况下不进行揭盖被外,其余天气均会在合适时间进行揭盖被操作。经验揭盖被约束条件是在外界环境无法达到温室、作物需求的约束条件而无法揭盖被时,根据农艺师揭盖被经验时间来实现卷帘机的控制,本文经验揭盖被时间由对照日光温室日常操作时间记录获取,试验期间去除雪天无盖被情况共计 76 组人工揭盖被时间,人工揭被最晚时间为 10:03,最早盖被时间为 16:05,后续揭盖被决策方法中经验时间以此为依据。

2 多因子约束的卷帘机揭盖被决策方法

基于番茄初花期、温室环境约束条件及决策控制系统,本文融合揭被经验、光平衡点、低温约束、光补偿点构建了卷帘机揭被决策方法,在考虑不同外界环境因素条件下,以作物低温条件下温-光限制点约束为主导,光平衡点与揭盖被经验相辅助的方式,实现卷帘机揭被的科学合理决策;针对盖被操作,融合揭盖被经验、低温预测、低温约束、光补偿点构建了卷帘机盖被决策方法,该方法基于作物低温限制条件,以夜间最低温预测为主导,光补偿点与盖被经验相辅助的方式,实现卷帘机的盖被决策与控制,控制方法实现流程如图 7 所示。

2.1 卷帘机揭被决策过程

卷帘机揭被决策过程基于卷帘机揭被决策方法与环境实时监测数据实现,决策开始后,系统通过天气系统判别是否为雪天,若为雪天则不进行卷被操作,由管理员现场确认实际情况酌情揭盖被;若为其他天气,系统实时分析上传的环境参数,通过光限制点预测模型实时获取光补偿点,若室内温度高于最低温限制点,系统则以光补偿点作为揭盖被决策条件,这是因为光补偿点通常低于光平衡点,揭被后会出现短时间温度下降,因此当室内温度高于低温限制点时采用光补偿点进行调控,当满足植物光合需求时执行揭被;当室内温度低于最低温限制点时,说明作物已受到低温影响,揭被主要考虑揭被后室内温度是否上升,因此此时根据光平衡点进行决策,当外界太阳光辐射强度高于光平衡点时执行揭被操作,使揭被后温度不会进一步降低;若光补偿点与光平衡点二者均无法满足要求,则通过经验揭被最晚时间来进行决策,保证作物的光照需求;当得到执行揭被决策结果后,系统生成卷帘机揭被控制指令通

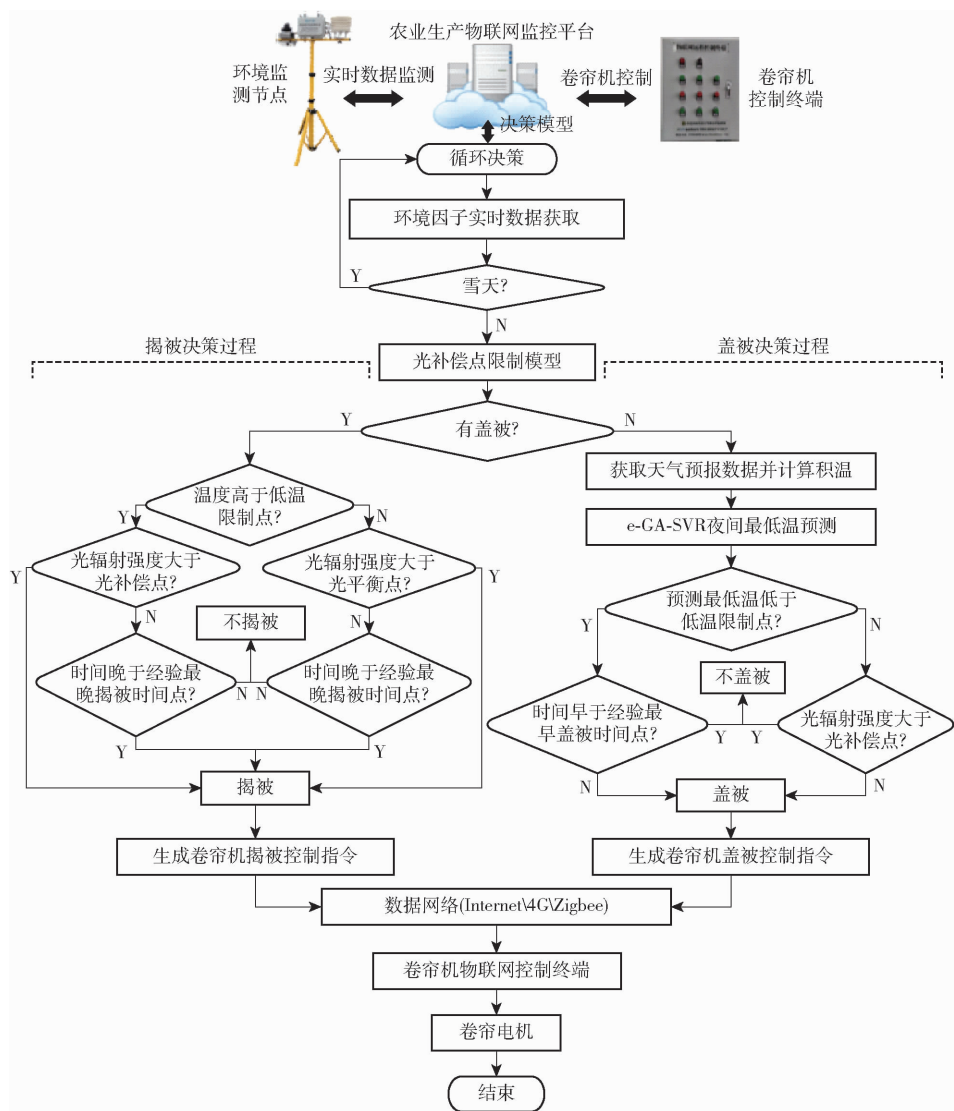


图 7 卷帘机揭盖被决策控制流程图

Fig. 7 Decision control method for uncovering/covering of rolling shutter machine

过网络下发到卷帘机物联网控制终端,控制卷帘机完成揭被操作。

2.2 卷帘机盖被决策过程

卷帘机盖被决策方法中为尽量防止夜间低温对作物造成伤害,同样基于番茄低温限制点进行,系统先获取当前环境条件下光补偿点作为盖被光限制点,同时获取实时天气预报小时气温并计算此时至第 2 天日出之间的小时预报温度积温,以室外温度、室内温度、土壤温度、预报积温为输入进行夜间最低温预测,若预测最低温高于低温限制点 + 标准误差,即 8.7℃,则系统以光补偿点作为盖被决策条件,当外界光照强度小于光补偿点时执行盖被操作,反之不盖被,等待下一次环境数据上传后重新决策,尽量增加温室光照时间;若预测最低温低于低温限制点,则判断时间是否晚于经验最早盖被时间点,满足条件时才进行盖被,以此来保证温室的光照时长。当系统得到盖被决策结果后自动生成盖被决策指令,

通过网络下发至卷帘机物联网控制终端,完成对卷帘机的盖被决策。

3 卷帘机决策控制系统

卷帘机决策控制系统基于 ZigBee 无线传感器网络实现了日光温室内外实时环境参数感知,通过 4G 通信网络完成监测数据的上传,最终由农业物联网监测控制平台内嵌的卷帘机智能决策模型对揭盖被做出决策,向卷帘机物联网控制终端发送控制指令,完成卷帘机的可靠自动控制。系统主要包括可自主组网和功能裁剪的环境监测节点、卷帘机物联网控制终端、用于网络协调及数据汇集上传的网关节点、DTU 数据上传模块以及物联网监测平台,卷帘机决策控制系统结构示意图如图 8 所示。

3.1 温室环境监测节点

监测硬件整体设计如图 9 所示,主要包括 CC2530 核心处理模块、传感器接口、数据传输接口、

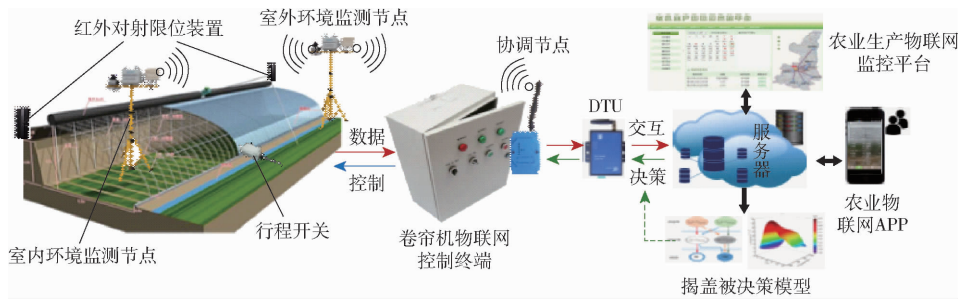


图 8 卷帘机决策控制系统结构示意图

Fig. 8 Schematic of decision control system for rolling curtain

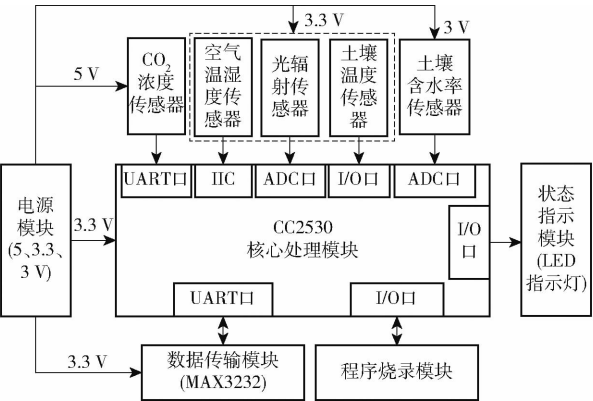


图 9 环境监测节点硬件框图

Fig. 9 Hardware block diagram of environmental monitoring node

电源模块、程序烧录模块、状态指示模块。

温室环境监测节点主要完成日光温室卷帘机智能控制过程中决策模型环境参数的获取,基于本研究中模型所需的环境监测需求,设备还可同时兼容

扩展多种类传感器的接入,主要包括太阳辐射强度、空气温湿度、CO₂浓度、土壤温度、土壤含水率 6 类环境因子。

3.2 卷帘机物联网控制终端

卷帘机物联网控制终端用于实现日光温室卷帘机的远程揭盖被控制,它具备手动控制和自动控制两种模式,其中手动控制用于基地管理者根据实际需求对卷帘机进行实地揭盖被操作,自动控制模式用于用户通过物联网系统平台进行远程揭盖被控制和智能模型调控。为了保证卷帘机控制系统的安全可靠运行,终端引入了行程开关与红外对射相结合的卷帘机限位控制方法,以及各类保护控制继电器,使终端在接收到远程控制指令时,能保证在无人值守条件下完成卷帘机的安全操作。卷帘机物联网控制终端包括 ZigBee 物联网控制器(弱电控制部分)与卷帘机自限位控制电路(强电控制部分)两部分,其整体框图如图 10 所示。

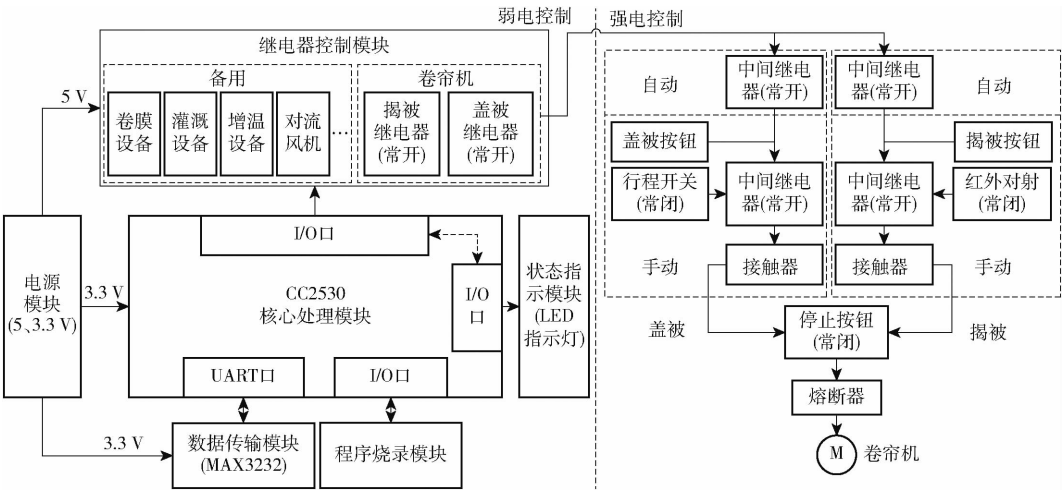


图 10 卷帘机物联网控制终端整体框图

Fig. 10 Overall block diagram of IoT control terminal of rolling curtain machine

3.3 ZigBee 协调节点

ZigBee 协调节点用于日光温室卷帘机智能控制系统中环境监测节点、卷帘机物联网控制终端间无线传感器网络的组织和管理,通过定义网关节点来区分监测控制系统各个节点的归属,同时它与输出传输模

块 DTU 进行通信,将网络节点传递的信息进行上传,也对平台下发的指令进行转发。ZigBee 协调节点硬件框图如图 11 所示,包含 CC2530 核心处理模块、数据通信模块、电源模块及状态指示模块,其中数据通信模块完成与 DTU 数据透传模块的数据交互。

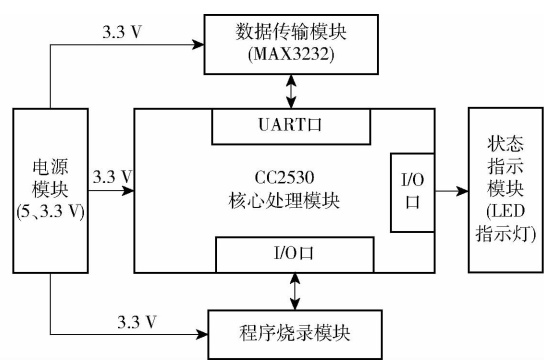
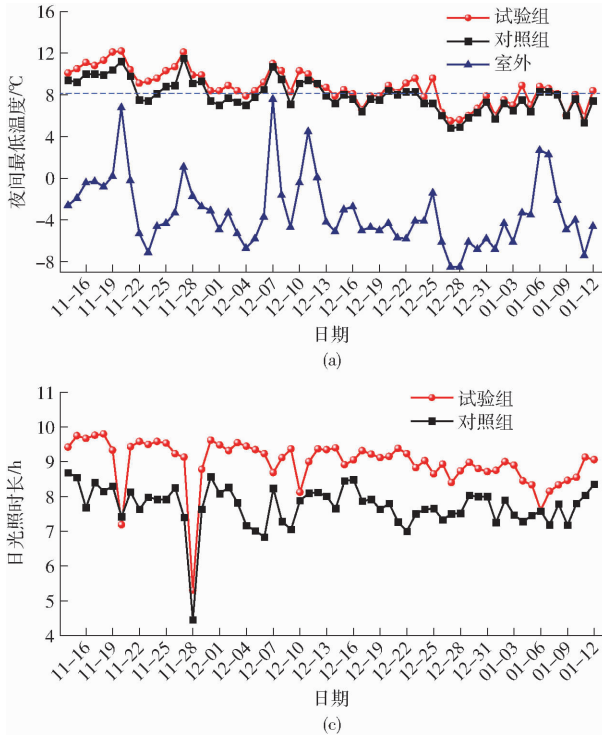


图 11 ZigBee 协调节点硬件框图

Fig. 11 ZigBee coordination node hardware block diagram

4 系统试验与结果分析

为验证本文智能控制系统的优越性和效果,试验于 2021 年 11 月 14 日—2022 年 1 月 12 日于西北农林科技大学泾阳蔬菜试验示范站进行,选取东 6 号日光温室采用多因子约束的卷帘机揭盖被决策方



法进行控制,东 4 号日光温室由园区农艺师按经验进行控制,两个温室种植作物均为“普罗旺斯”番茄,于 2021 年 10 月 20 日同期定植,每个温室共定植 23 垄,试验时株高 55 cm 左右,整个过程两个温室肥水管理、农事操作一致。温室内环境监测数据采集间隔为 5 min,通过 ZigBee 网络与 4G 网络直接上传至农业生产物联网监控平台,试验期间共采集了揭盖被数据 60 组,通过平台统计计算,获取和计算了试验期间温室的有效积温、辐热积、光照时长等指标;试验期间同时测量记录番茄植株生理指标及第 1 穗果成熟时产量数据,用于分析两个日光温室在试验期间的两种卷帘机控制方式的调控效果。

4.1 温室温光评价指标结果分析

为验证卷帘机调控性能,统计分析了两个温室试验期间盖被后夜间最低温、日平均气温、日光照时长、日辐热积等温室温光评价指标,其变化趋势与结果如图 12 所示。

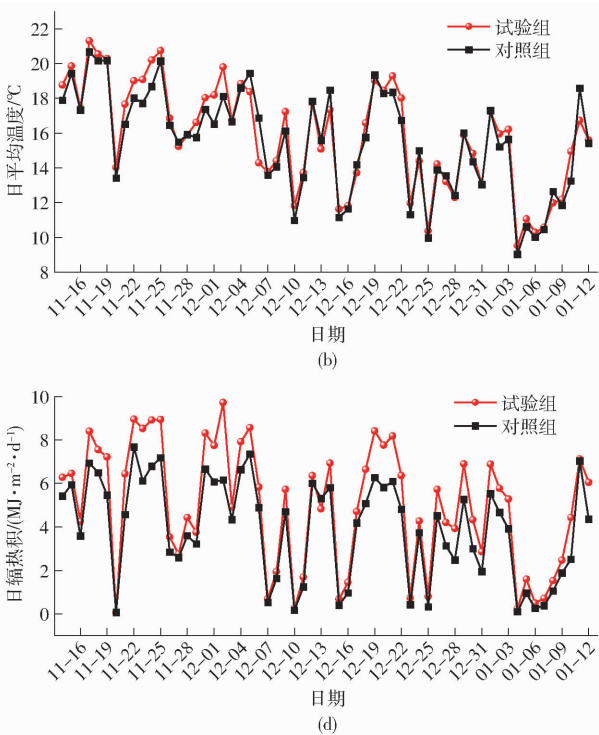


图 12 温室温光评价指标结果

Fig. 12 Temperature and light evaluation index results of greenhouse

由图 12a 可以看出,试验温室夜间最低温几乎全部高于对照温室,经计算试验温室夜间最低温平均值为 8.75℃,对照温室夜间最低温平均值为 7.95℃,说明本系统的应用有效提升了温室夜间最低温,通过与室外温度变化的对比分析,夜间最低温低于 8℃的情况主要发生在外界出现较极端低温或持续低温的天气。对最低温低于 8℃的天数及温度进行统计分析,试验温室在试验期间低于 8℃共 18 d,而对照组温室这一情况达到 32 d,试验温室卷

帘机调控系统的部署减少了 43% 的低温发生率,由图 12 结果也可看出低温天数中有 6 d 最低温接近于 8℃,证明本系统在防止夜间温度低于温度限制点的性能良好,能有效减少夜间低温的出现。

通过对试验期间日平均温度的计算,试验温室和对照温室试验期间日平均温度分别为 15.83、15.53℃,试验日光温室日平均气温普遍高于对照温室(图 12b);日光温室冬季光照时长的增加是提升产量的关键,经分析计算,除 2021 年 11 月 20 日为

保证夜间温度,系统提前决策盖被导致光照时长减少外,试验温室平均日光照时长基本都高于对照温室(图 12c),试验温室与对照温室日平均光照时长分别为 8.97、7.72 h,平均日光照时长增加了 1.25 h;试验期间日辐热积计算结果如图 12d 所示,由结果可以看出,试验日光温室的日辐热积基本均高于对照温室,试验温室平均日辐热积为 4.98 MJ/(m²·d),对照温室为 3.95 MJ/(m²·d),试验温室平均提升 1.03 MJ/(m²·d),提升效率为 26.08%。在运用多因子约束卷帘机揭盖被决策模型进行合理早揭被、晚盖被的情况下,本文揭盖被决策方法优于人工经验揭盖被。

本文提出的卷帘机揭盖被决策控制方法与对照温室的评价指标总体结果如表 4 所示。由表 4 可看出,在整个验证试验期间(60 d),相对于对照温室,试验温室总光照时长增加了 75.16 h,相对增长了 16.22%,总辐热积提高了 61.41 MJ/m²,相对增加了 25.89%,总有效积温提升了 22.28℃,增长了 4.91%。结果证明,在温室整体平均温度与传统经验调控相差不大的情况下,作物接受的太阳辐射总量有效增加,这有利于作物的光合作用;对温室而言,日照时间的增长,温室内部蓄热墙体、土壤接受的太阳有效辐射增加,使温室整体辐热积增加,有助于温室热量的积累,提高温室夜间保温性能。在冬季整体温度、光辐射不能满足番茄正常快速生长需求的情况下,辐热积和有效积温的增加,对作物生理生长和物质积累具有积极的促进作用。

表 4 评价指标总体结果			
Tab.4 Overall results of evaluation indicators			
指标	对照(东 4 号)	试验(东 6 号)	增长率/%
总光照时长/h	463.43	538.59	16.22
总辐热积/(MJ·m ⁻²)	237.11	298.52	25.89
总有效积温/℃	454.15	476.43	4.91

4.2 番茄生长指标结果分析

由于植株存在个体差异以及初始阶段植物的生长指标不同,因此选用指标的增長量作为依据进行试验组和对照组的对比分析。图 13 为温室均匀采样获取的植株生理指标增长量图,由结果可看出试验组的株高增长量整体低于对照组。而试验组番茄茎粗整体高于对照组,植株矮、茎秆粗说明植株健壮,即试验组的番茄植株生长状态比对照组更健壮,这有利于番茄后期生长过程中对茎叶及果实物质能量的输送。

叶片生长速率变化趋势如图 14 所示,由于叶片形态受生长时间的影响,本研究选择统一的新生叶

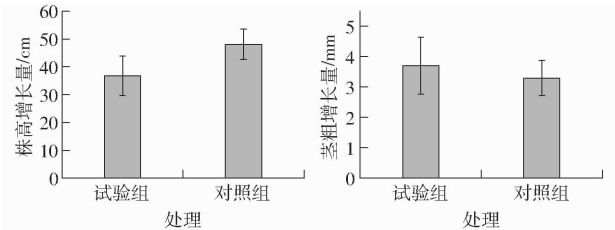


图 13 生理指标结果

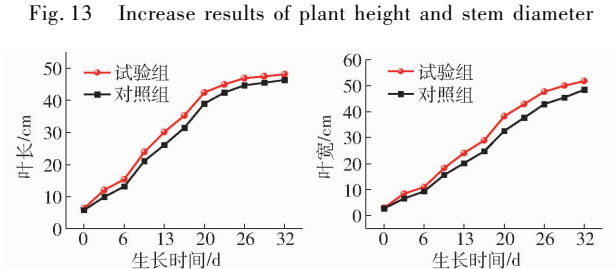


图 14 叶片生长速率变化曲线

作为叶片生长速率的测定依据。由图中趋势可看出,叶长随生长时间先快速上升后趋于平稳。叶宽也表现出了相同的趋势,但趋于平稳的速度小于叶长。在叶片生长到 20 d 之前叶长和叶宽都处于快速生长期,而在 20~26 d 之间叶长已趋于平稳,而叶宽还在快速增加,29~30 d 时均趋于稳定,当叶长叶宽都趋平稳时说明叶片的生长形态已经达到最大。结果说明试验组叶面积大于对照组,更有利于光合产物的积累。

4.3 产量分析

由于温室环境的积温增加,光照时间增长,光合叶面积增加,试验组的番茄产量高于对照组,产量结果对比如图 15 所示。通过对 3 次采摘结果的计算可知试验组产量提高 30.74%,说明了本研究方法能够对番茄产量产生促进作用。但从 3 次采收结果可以看出,试验组在前两次采收具有较高的产量,明显高于对照组,但第 3 次采收结果低于对照组,说明本研究方法对于番茄前期收获具有更明显的优势。

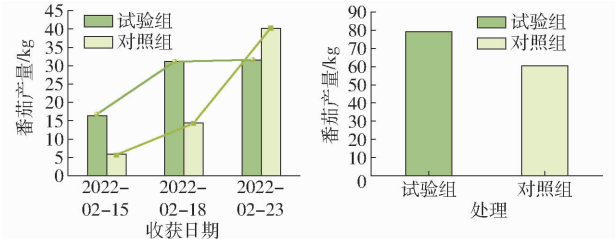


图 15 产量结果对比

Fig.15 Yield result comparison

5 结论

(1)经验证,与传统经验卷帘机控制相比,本文方法能有效减少冬季日光温室夜间温度低于番茄低

温限制点发生率。

(2) 试验期间, 试验温室日光照时长平均延长 1.25 h, 相对于经验调控增加了 16.22%, 试验期内共计增加光照时间 75.16 h, 辐热积增加 61.41 MJ/m², 提升了 25.89%, 有效积温增加了 22.28℃, 对温室总体蓄热提升效能明显, 为作物生长提供了更好的生长环境。

(3) 基于作物实际生长指标, 试验温室植株更加健壮, 相对时间内平均生长速率也更高, 由产量分析结果可以看出, 试验温室前 3 次收获结果较对照温室产量提高 30.74%, 说明本研究控制系统及方法能有效增加番茄物质的积累, 对于番茄提前收获具有明显的优势。

参 考 文 献

[1] 鲍恩财, 曹晏飞, 邹志荣, 等. 不同结构主动蓄热墙体日光温室传热特性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 189 – 197. BAO Encai, CAO Yanfei, ZOU Zhirong, et al. Characteristic of heat transfer for active heat storage wall with different structures in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 189 – 197. (in Chinese)

[2] 张勇, 高文波, 邹志荣. 日光温室主动蓄热后墙传热 CFD 模拟及性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 203 – 211. ZHANG Yong, GAO Wenbo, ZOU Zhirong. Performance experiment and CFD simulation of heat exchange in solar greenhouse with active thermal storage back-wall[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 203 – 211. (in Chinese)

[3] 齐飞, 魏晓明, 张跃峰. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 1 – 9. QI Fei, WEI Xiaoming, ZHANG Yuefeng. Development status and future research emphase on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 1 – 9. (in Chinese)

[4] 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. GONG Zhihong, DONG Chaoyang, YU Hong, et al. Design of intelligent heating control system of energy-saving solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(6): 361 – 368. (in Chinese)

[5] 郜庆炉, 段爱旺, 梁云娟. 日光温室室内温光条件对作物种植制度的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 106 – 110, 137. GAO Qinglu, DUAN Aiwang, LIANG Yunjuan. Effects of temperature and light condition on crop planting system within solar greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(1): 106 – 110, 137. (in Chinese)

[6] WANG L, ZHANG H. An adaptive fuzzy hierarchical control for maintaining solar greenhouse temperature[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 251 – 256.

[7] SATTARI VAYGHAN H, TAVALAIE S, GRILLON A, et al. Growth temperature influence on lipids and photosynthesis in lepidium sativum[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 745.

[8] MARTIN B, ORT D R, BOYER J S. Impairment of photosynthesis by chilling-temperatures in tomato[J]. Plant Physiol., 1981, 68: 329 – 334.

[9] CHEN S N, LI Z F, LIU F, et al. Risk evaluation of solar greenhouse cucumbers low temperature disaster based on GIS spatial analysis in Tianjin, China[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 576 – 598.

[10] 惠爱斌, 蒋欣梅, 王琛, 等. 棉被不同揭盖方式对装配式日光温室环境及番茄生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(9): 246 – 252. HUI Aibin, JIANG Xinmei, WANG Chen, et al. Effects of different uncovering and covering methods of cotton quilt on environment and tomato growth in assembled solar greenhouse[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(9): 246 – 252. (in Chinese)

[11] 裴雪. 日光温室温度预测模型与卷帘智能控制方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. PEI Xue. The research of temperature prediction model of greenhouse and intelligent control method of rolling quilt[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[12] 张国祥, 傅泽田, 张领先, 等. 中国日光温室机械卷帘技术发展现状与趋势[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊): 1 – 10. ZHANG Guoxiang, FU Zetian, ZHANG Lingxian, et al. Development status and prospect of mechanical rolling shutter technology in solar greenhouse in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.): 1 – 10. (in Chinese)

[13] 于巨, 张琦, 林莎莎, 等. 不同管理措施对日光温室环境因子的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(2): 80 – 86. YU Ju, ZHANG Qi, LIN Shasha, et al. Effects of different management measures on environmental factors in solar greenhouse[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(2): 80 – 86. (in Chinese)

[14] 张国祥, 刘星星, 张领先, 等. 基于 CFD 的日光温室温度与卷帘开度关系研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 279 – 286. ZHANG Guoxiang, LIU Xingxing, ZHANG Lingxian, et al. Relationship between indoor temperature and rolling shutter opening of solar greenhouse based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 279 – 286. (in Chinese)

[15] 佟国红, CHRISTOPHER D M, 李天来, 等. 日光温室保温被卷放位置对温度环境的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 253 – 258, 388. TONG Guohong, CHRISTOPHER D M, LI Tianlai, et al. Influence of thermal blanket position on solar greenhouse temperature distributions[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 253 – 258, 388. (in Chinese)

- [16] 刘焕宇. 基于 ZigBee 技术的温室卷帘控制系统设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
LIU Huanyu. The design of greenhouse shutter control system based on ZigBee technology[D]. Yangling; Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [17] 崔玉祥, 赵慧芳, 赵亮, 等. 日光温室卷帘机控制器设计与试验[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(17): 161–165.
CUI Yuxiang, ZHAO Huifang, ZHAO Liang, et al. Design and experiment of the controller of shutter machine in solar greenhouse[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(17): 161–165. (in Chinese)
- [18] 王富. 番茄(*Lycopersicon esculentum*)耐低温研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2000.
WANG Fu. Studies on cold tolerance in tomato (*Lycopersicon esculentum*)[D]. Harbin; Northeast Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- [19] IKKONEN E N, SHIBAEVA T G, TITOV A F. Influence of daily short-term temperature drops on respiration to photosynthesis ratio in chilling-sensitive plants[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2018, 65(1): 78–83.
- [20] 叶子飘, 李进省. 光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 38–44.
YE Zipiao, LI Jinsheng. Comparative investigation light response of photosynthesis on non-rectangular hyperbola model and modified model of rectangular hyperbola[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science), 2010, 31(3): 38–44. (in Chinese)
- [21] WANG J, LI L, NIU D, et al. An annual load forecasting model based on support vector regression with differential evolution algorithm[J]. Applied Energy, 2012, 94: 65–70.
- [22] ZHANG F, DEB C, LEE S E, et al. Time series forecasting for building energy consumption using weighted support vector regression with differential evolution optimization technique[J]. Energy and Buildings, 2016, 126: 94–103.
- [23] 章萌, 章卫国, 孙勇. 多目标强度 Pareto 混沌差分进化算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(1): 41–46, 52.
ZHANG Meng, ZHANG Weiguo, SUN Yong. Multi-objective strength Pareto chaotic differential evolution algorithm[J]. Control and Decision, 2012, 27(1): 41–46, 52. (in Chinese)
- [24] BEDRI OZER A. CIDE: chaotically initialized differential evolution[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(6): 4632–4641.
- [25] GAO S, YU Y, WANG Y, et al. Chaotic local search-based differential evolution algorithms for optimization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(6): 3954–3967.
- [26] 张军华, 沈楷程, 陈丹艳, 等. 基于物联网的日光温室冠层特征温度时空变化规律分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 335–342.
ZHANG Junhua, SHEN Kaicheng, CHEN Danyan, et al. Spatio-temporal variation of canopy characteristic temperature in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 335–342. (in Chinese)
- [27] 李瑞英, 任崇勇. 菏泽冬季日光温室内最低气温预测方法的对比研究[J]. 气象科学, 2016, 36(5): 697–702.
LI Ruiying, REN Chongyong. Comparative study on forecasting methods of minimum temperature in solar greenhouse of Heze in winter[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(5): 697–702. (in Chinese)
- [28] LIU Y, LI D, WAN S, et al. A long short-term memory-based model for greenhouse climate prediction[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2021, 37(1): 135–151.
- [29] 田芳明, 李欢, 朱培培. 基于气象数据的北方试验棚室温度预测模型研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2020, 32(4): 73–80, 113.
TIAN Fangming, LI Huan, ZHU Peipei. Research on north experimental greenhouse temperature prediction model based on meteorological data[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020, 32(4): 73–80, 113. (in Chinese)
- [30] MOHAMMADI B, RANJBAR S F, AJABSHIRCHI Y. Application of dynamic model to predict some inside environment variables in a semi-solar greenhouse[J]. Information Processing in Agriculture, 2018, 5(2): 279–288.
- [31] AL-FUGARA A K, AHMADLOU M, AL-SHABEEB A R, et al. Spatial mapping of groundwater springs potentiality using grid search-based and genetic algorithm-based support vector regression[J]. Geocarto International, 2022, 37(1): 284–303.
- [32] LIU Y S, LI J, WANG T F, et al. Study on the friction resistance calculation method of a flexible shaft of wire rope based on genetic algorithm[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(19): 2836–2844.
- [33] GAO W, HAN J. Prediction of destroyed floor depth based on principal component analysis (PCA)-genetic algorithm (GA)-support vector regression (SVR)[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(4): 3481–3491.