

温室环境控制方法研究现状分析与展望

胡瑾^{1,3}, 杨永霞², 李远方², 侯军英², 孙章彤², 王浩宇², 何东健^{2,3*}

(1. 西北农林科技大学信息工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100;
3. 农业农村部农业物联网重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 环境控制方法是实现温室蔬菜高效生产的关键。随着现代控制技术的快速发展, 温室环境控制方法逐步从手动、定时控制方法, 转变为设定值控制和智能控制等方式。该文概述了以设定值为目标实现环境控制的方法, 归纳了模糊控制、解耦控制、人工智能控制和表型控制等智能控制方法的特点, 总结了现有温室环境调控领域控光、控温、控气、通风、灌溉和“云-边-端”协同控制系统的优劣。针对现存问题, 指出该领域的发展趋势为构建考虑扰动因素影响的温室环境控制方法, 研制基于作物生长和表型评价体系的环境调控模型, 以及建立多模型融合的“云-边-端”协同温室环境调控系统。相关技术的发展将为温室的智能化与信息化发展提供重要的决策依据和借鉴意义。

关键词: 温室; 模型; 环境控制; 智能算法; 调控模型; 多目标优化算法; 环境调控系统

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310214

中图分类号: S-1; S626.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0112-17

胡瑾, 杨永霞, 李远方, 等. 温室环境控制方法研究现状分析与展望[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 112-128. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310214 <http://www.tcsae.org>

HU Jin, YANG Yongxia, LI Yuanfang, et al. Analysis and prospect of the environmental control systems for greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 112-128. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310214 <http://www.tcsae.org>

0 引言

设施农业是采用工程技术手段营造相对可控的环境条件, 从而实现作物高效优质生产的现代农业方式。截至2021年末, 中国农业设施数量达2 800多万, 设施栽培面积突破4 000万亩(267万 hm^2), 占地面积稳居世界第一。但中国设施农业普遍存在设施老旧、信息化程度低等问题, 导致设施蔬菜单产与先进国家相比差距较大^[1]。因此, 分析温室内温度、光照、水分、 CO_2 和肥力等环境因素对作物生长的影响, 建立生理状态与环境因耦合的环境控制方法, 对提高温室作物的产量、品质与经济效益具有重要意义。

随着传感器网络与通信技术的发展, 农业环境监测技术与自动化控制装备得到大幅提升。现代温室环境控制方法已从传统的手动、定时控制方法, 逐步转化为基于设定值的控制^[2]、PID反馈控制^[3-4]和智能控制^[5-7]方式。与传统控制方法相比, 设定值控制方法在一定程度上提高了控制精度, 促进了植物生长和减少了资源消耗^[8], 但无法依据环境变化实现反馈控制。PID控制方法能够根据环境监测数据实现反馈控制, 但易受温室环境

动态变化的影响, 导致控制过程产生较大波动。

目前, 将现代温室与传感器、大数据、物联网和智能算法相结合, 实现环境智能控制的方法得到广泛研究, 主要包括模糊控制、解耦控制、神经网络控制和基于表型的环境控制方法。智能控制系统实现高效调控的核心在于系统是否集成了耦合复杂环境影响的智能调控模型^[9]。现有温室环境智能调控模型主要包括单因子、多因子和多目标调控模型^[10-12], 随着表型获取技术的发展, 基于表型的环境控制方法已成为环境调控领域的新方向, 并在温室水肥管理领域出现了应用案例^[13-14]。但由于在气候种类、温室结构、作物种类等方面的差异, 模型的通用性和适应性都存在一定不足, 即使在中国使用荷兰成套的环境智能调控模型, 其种植效果也难以达到欧洲的水平^[15]。针对上述问题, 如何建立适应中国农业生产特性的温室调控决策方法与模型显得尤为重要。因此, 本文在综述国内外温室环境控制方法研究进展的基础上, 通过分析现有技术的优势和局限性, 对该领域未来的发展进行展望和分析, 以期对未来中国温室环境调控领域的研究提供潜在的研究方向和思路。

1 基于设定值的温室环境控制方法

基于设定值的温室环境控制方法通常以农业专家经验确定环境参数值, 结合被控环境因素的当前状态, 通过手动或定时控制方式调控环境参数, 维持温室作物生长在设定的环境范围中。该方法操作简单且广泛应用于温室生产中^[2,16], 但由于温室种类和作物品种差异较大, 环境参数设定值的确定与优化是实现基于设定值控制的

收稿日期: 2023-10-15 修订日期: 2023-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1100602-3); 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-66)

作者简介: 胡瑾, 教授, 研究方向为设施环境调控和智能信息处理。

Email: hujin007@nwsuaf.edu.cn

*通信作者: 何东健, 教授, 研究方向为农业信息化。

Email: hdj168@nwsuaf.edu.cn

关键。同时,合理的控制方法能使控制系统受控环境参数更好地跟踪设定值。

1.1 基于专家经验的环境参数设定值选取

基于专家经验的环境参数设定值选取方法依赖操作人员的主观经验,以历史环境数据和实时环境数据来人为设定环境控制目标值。植物对光和 CO_2 等环境因素的需求会随作物生长状态和外界环境的变化而动态调整^[17]。受环境因素、地理位置和种间差异的影响,适宜作物生长的最佳环境设定值存在差异。因此,在实际应用中,需要根据作物实际生长需求和专家经验来确定目标值。现有基于专家经验的环境调控设定值的研究,主要围绕温度、光照、水肥等关键环境参数展开。李胜利等^[18]通过探究高海拔温室内温度与番茄幼苗形态、开花数及坐果率的关系,确定了高山地区番茄的适温范围为 $15\sim 33^\circ\text{C}$ 。段青青等^[19]通过对照试验研究光质和补光时段对于温室甜椒生长、产量以及品质的影响,得到光环境调控的最优组合。QU 等^[20]以黄瓜产量、质量和水肥利用率为评价指标,通过正交试验确定气温、灌溉量和施肥频率的最佳参数范围。上述研究均通过作物实际生长需求和专家经验确定环境参数的大致调控范围,但参数确定周期长、局限性大,难以实现温室环境的精准调控。

以上研究表明以专家经验确定不同作物的环境参数设定值并建立专家知识库,对温室环境调控具有一定指导意义;但该方法仅能提供粗略的调控范围,无法根据外界环境变化及时调整控制策略来满足作物对光照、水分和营养物质的需求。

1.2 基于机理模型的设定值优化

温室通过被动吸收太阳辐射为作物提供适宜环境。室内环境受调控设备状态、作物生长情况和室外环境扰动变量的动态影响。此外,温室的热交换和热耗散速率与采光材料、面积、地理位置等结构参数密切相关。基于能量和物质平衡理论建立的温室内环境机理模型可以描述系统的变化规律,适用于温室生产中环境设定值的优化设计。温室内环境的动态微分方程表示为^[21]

$$\frac{dX_m}{dt} = f(X_m, U_n, V_o, D_p, C_q, t) \quad (1)$$

式中 X_m 为 m 维室内环境变量(温度、湿度、 CO_2 浓度等); U_n 为 n 维温室控制设备状态变量(加温、除湿、补光等); V_o 为 o 维作物生理状态变量(光合速率、呼吸速率、蒸腾速率等); D_p 为 p 维室外环境扰动变量(温度、光照、风速等); C_q 为 q 维温室结构参数(尺寸、材料、地理位置等); t 为时间, s ; f 为基于能量和物质平衡的非线性函数。

众多学者基于机理模型建立温室环境模型,以优化环境参数的控制量,为改善温室控制策略提供理论支持。WANG 等^[22]提出基于系统辨识的温室温度自适应控制系统,系统根据输入输出数据选择模型类别,使用系统辨识自适应调整确定模型中的未知参数,保证实际温度逐渐接近设定值。然而,温室作物与环境的互作关系存

在时间尺度不统一的问题,机理模型无法有效反映温室环境的动态变化规律。针对该问题,徐立鸿等^[23]提出秒时间尺度的温室番茄作物-环境互作模型,利用贝叶斯优化方法及温室实际生产数据,对互作模型中作物生长模型和小气候模型的未知参数进行参数辨识,同时该模型将环境变化以及执行机构动作直接反映在作物状态上,可以满足顶天窗、内外遮阳网、内保温网和加热泵等执行机构的在线控制需求。

此外,机理模型也广泛用于环境变化规律解释与预测中。SANCHEZ 等^[24]综合考虑温室环境、作物生长和设备状态等参数,基于能量平衡建立动态温度预测模型,根据预测温度控制环境设备的启停,优化原有温室温度控制策略,并通过不同地点温室验证了该方法的有效性。LI 等^[25]基于质量守恒定律分析了温室顶部通风时室内温度、湿度、日照强度等因素的变化,为调整温室通风策略提供依据。LIU 等^[26]考虑环境参数、通风口角度和通风持续时间,采用机理模型实现温室内温湿度预测,为温室环境控制提供理论基础。机理模型根据温室环境的动态变化建立精确数学模型,但需要通过大量试验获取温室结构、作物生长和环境等信息,相关参数复杂且获取难度大,因此基于机理模型的设定值优化方法有效性和适用性受限。

1.3 设定值控制的实现

基于经验的环境设定值控制方法通过单片机等控制器,根据环境实时监测结果与经验设定目标之间的差值驱动执行机构做出相应决策,实现温室内环境参数的调控。但当温度和湿度等环境条件发生变化时,系统不能及时调整和优化控制策略,可能会影响控制效果。

针对温室系统具有时变性、时滞性和非线性特点^[27],环境调控方法逐步转化为以设定值为目标、基于环境监测实时反馈的动态调控方式。PID 控制是一种经典的反馈控制方式,通过比例、积分与微分运算对系统误差 $e(t)$ 进行反馈控制,从而保证系统稳定运行^[28]。PID 控制的输出 $u(t)$ 为

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dx + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式中 $e(t)$ 为实际测量值与设定值的差值, K_P 、 T_I 、 T_D 分别为比例增益、积分时间常数和微分时间常数。

PID 控制器通过调整 3 个参数即可改善系统的动态和静态特性,原理简单、使用方便,多用于温室温湿度控制^[3-4]。然而,温室气候条件的不确定性较强,反馈控制过程易产生较大波动,若控制误差较大则会对作物造成损害。同时, PID 控制器为线性控制器,参数难以自适应调整,对于非线性复杂系统难以实现良好的控制效果。针对上述问题,众多学者将 PID 控制器与神经网络和智能优化算法相结合,以改善其控制性能。WU 等^[29]设计 PSO-BP-PID 算法实现温室温湿度控制, BP 神经网络用于补偿传感器误差,利用 PSO 算法对系统参数进行优化,降低了调控成本。WANG 等^[30]提出基于 RBF 神

经网络的温室温度自适应 PID 控制方法, 与传统 PID 方法相比, 自适应控制策略的平均标准误差减小, 且具有良好的实时控制性能, 为温室生产实际应用中环境控制策略的制定提供参考; 与阈值控制方法相比, PID 控制能通过反馈调节保证温室环境的稳定控制, 但其需要依据经验设定控制阈值, 且通常仅用于单因子环境控制, 在复杂的多因子环境下难以达到满意的控制效果, 故应结合智能控制方法实现温室环境精准调控。

2 温室环境智能控制方法

近年来, 将传统温室与传感器、无线通信、物联网、人工智能决策等技术相结合已成为现代温室实现环境智能控制的关键。其中, 数据是实现决策的基础, 各类传感器和监测设备为获取环境与作物生长数据提供支撑, 进而实现温室环境智能调控。

2.1 模糊控制

温室系统易受外界环境影响, 建立精确控制模型十分困难。而模糊控制不依赖于被控对象的数学模型, 对于常规非线性方法难以处理的问题具有良好适用性^[31]。模糊控制原理如图 1 所示, 由计算机采样获取被控量的

精确值, 并将其与给定值比较获得误差信号; 误差信号作为模拟控制器的输入, 经模糊量化处理后合成模糊控制规则, 再根据推理获取模糊决策控制量; 最后通过非模糊化处理将模糊量转换为精确量输入到执行机构中, 实现被控对象的精确控制^[32]。

部分学者以专家知识库为基础, 采用模糊控制方法实现温室环境控制。例如, RIAHI 等^[5]设计一种模糊控制器, 实现了温室温度、湿度和通风速率的智能控制。WANG 等^[6]提出一种具有分层控制策略的温室卷帘模糊控制方法, 可以有效决策卷帘转置开关, 满足温室作物生长的温度需求。在模糊控制过程中, 隶属度函数的形状和参数对系统稳定性具有重要影响^[33]。MOHAMED 等^[34]采用遗传算法对隶属度函数进行优化, 结果表明优化后的控制系统响应速度明显提高, 控制信号更加平滑。模糊控制器中隶属度函数和模糊规则多基于设计者经验建立, 具有较强主观性。应用智能算法对隶属度函数进行优化可以进一步改善控制结果, 但模糊规则确定后无法在线调整, 难以适应系统突发扰动的情况, 后续研究应着重于研究模糊规则的自适应调整方法以改善控制器的性能。

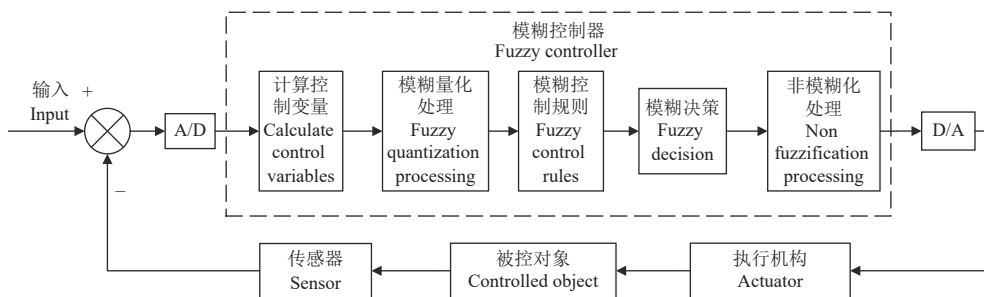


图 1 模糊控制原理

Fig.1 Principle of fuzzy control

2.2 解耦控制

温室是多输入和多输出的复杂非线性系统, 其不同控制参数之间会相互影响。对单个因子按给定目标值进行控制时, 也会引起其他因子的变化, 难以获得最佳控制性能。解耦控制则通过设计合适的控制策略, 可以把具有耦合影响的多参数控制过程转化为彼此独立的单输入、单输出过程, 实现一个调节器只对其对应的被控过程独立地进行调节^[35]。

温度和湿度控制是温室控制中的重要研究内容, 二者间的耦合关系较强, 因而对其解耦是实现精准控制与节能调节的有效途径。常用解耦控制方法包括前馈补偿解耦控制、反馈前馈解耦控制和模糊解耦控制等。程文锋等^[36]采用反馈前馈解耦算法解除温度和湿度间的强耦合关系, 求出使温室能量动态平衡方程完全线性化解耦的温度和湿度调控量, 保证温湿度控制具有良好的跟随效果。AZAZA 等^[37]考虑温室白天和夜间需要供暖或通风, 设计模糊解耦控制结构来保持温湿度有效控制, 同时通过最小化执行器换向次数和操作时间减少能源消耗。除温度和湿度外, 龚瑞昆等^[38]增加对 CO_2 浓度的考虑,

通过将前馈补偿解耦算法应用于温室三维系统中, 显著提高了系统的稳定性。解耦方法多以确定的数学模型为基础, 而对于复杂的温室系统, 难以建立融合多种环境因子的精准数学模型。此外, 不同温室的数学模型并不相同, 因此解耦控制方法不具有通用性, 难以广泛应用于温室控制系统中。

2.3 人工智能控制

人工智能算法具有强大的自学习和非线性拟合能力^[39], 其通过训练学习获得知识, 已成为实现温室资源管理^[40]、精准灌溉^[41]、肥料施用^[42]以及病害识别^[43]的有力工具。神经网络算法是实现人工智能的一种重要方式, 典型的神经网络结构有三层, 包括输入层、隐藏层和输出层^[44], 如图 2 所示。

但神经网络算法具有收敛速度慢、容易陷入局部极小化等缺点, 故通常与遗传算法^[45]、粒子群算法^[46]等寻优算法相结合以改善网络性能。例如, 苏战战等^[7]基于温度、 CO_2 、光照强度等环境参数, 采用 RF-GSO 算法动态计算理想光照强度, 实现了温室光环境智能调控。考虑到土壤水分动态变化幅度小, CHEN 等^[47]提出了基

于遗传优化 T-S 模糊神经网络的灌溉预测模型，具有良好的预测效果，为提高温室番茄水资源利用率提供新思路。此外，由于空气温、湿度变化具有较强的时滞性，CHOI 等^[48] 基于神经网络实现温、湿度提前预测，为优化控制温室加温、通风、湿帘等设备状态提供重要基础。

人工智能算法可以从大量的温室环境数据中挖掘出有价值的信息和规律，实现对温室环境的精准监测、智能调控和优化管理，从而提高作物的生长效率和质量。与设定值控制方法相比，基于神经网络的智能控制方法能更充分考虑不同环境因子间的相互作用，但也未考虑作物的实际生长需求。

考虑作物生理或生长状态能最大程度满足作物需求，因此利用人工智能算法建立融合作物生理特征的数据驱动模型，是实现科学有效的温室环境智能调控的关键。光合作用和蒸腾作用是实现作物生长发育的基础生理反应，其效率直接影响作物的产量和品质^[49]。基于作物生理信息的温室环境调控方法，是以光合速率、蒸腾速率等生理特性为基础，采用人工智能算法寻找环境调控目标值，实现温、光、水、气、肥等环境因素的动态调节。

近年来，采用数据驱动方法实现融合作物生长需求的温室环境智能调控成为新的研究热点，主要围绕单因子、多因子和多目标调控三方面展开。

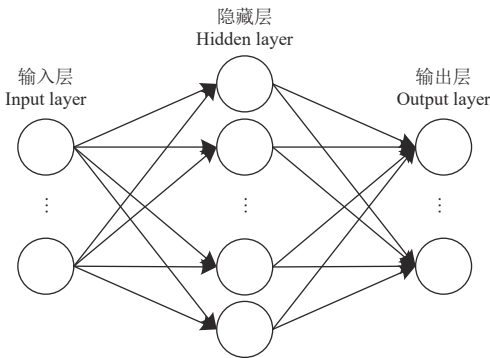


图 2 神经网络结构
Fig.2 Structure of neural network

2.3.1 单因子环境智能调控

在实际温室生产中，根据作物生长需求快速精准地获取环境调控的动态目标点被广泛研究，单因子环境调控模型相关研究成果如表 1 所示。

表 1 单因子环境调控模型相关研究成果

Table 1 Research achievements in single factor environmental regulation models					
调控对象 Regulation target	作物 Crop	调控依据 Regulation foundation	调控模型 Regulation model	模型结果或性能指标 Model results or performance indicators	文献序号 Reference number
水分	番茄	蒸腾速率日变化	基于作物蒸腾规律的灌溉控制模型	该模型相较于定时灌溉的灌溉量和回流量分别降低了 32% 和 57%	[50]
	番茄	净光合速率最优	利用 GA 优化 BP 算法的灌溉决策模型	模型 R^2 为 0.973 8，均方误差为 1.51×10^{-5}	[51]
	番茄	水分利用率最大	通过 PSO 算法获取土壤含水率，并基于 SVR 算法建立作物需水模型	与光合最优模型相比，该模型的水分利用率提高 15.22%，土壤平均含水率下降 12.76%，模型 R^2 为 0.978 8，均方根误差为 0.23%	[52]
	生菜	含水量响应曲线的曲率拐点	采用 Logistic 方程拟合叶绿素荧光参数对基质含水量的响应曲线，并以拐点作为灌溉调控特征值	相较于传统的基质含水量灌溉控制方式，该模型灌溉节水率可达 23.5%，水分利用效率提高 18.1 kg/m^3	[53]
温度	番茄	温度模型预测结果	基于人工神经网络的温室温度预测模型	在冬季和夏季，模型的均方根误差分别为 $0.32 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.60 \text{ }^\circ\text{C}$ ，减少能源消耗分别为 9.67% 和 23.61%	[54]
	/	温度模型预测结果	基于机器学习算法的温室温度预测模型	与基于规则和基于不确定系统的预测控制方法相比，该方法的总成本分别降低 14% 和 4%	[55]
	/	温度模型预测结果	基于 NARX 神经网络的温室温度预测模型	模型的平均绝对误差为 $2.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ，均方误差为 $0.58 \text{ }^\circ\text{C}$ ，有效控制时间提高 23.8%	[56]
光	黄瓜	光饱和点调控	利用 ACO 和 GA 优化 SVM 算法构建光环境调控模型	模型的 R^2 为 0.99，均方根误差为 7.79	[10]
	番茄	光饱和点调控	基于多元回归算法构建光饱和点模型	比传统补光减少能耗 10%，模型的 R^2 为 0.989	[57]
	黄瓜	光饱和点调控	利用 PSO 优化 SVR 算法构建光环境调控模型	模型的 R^2 为 0.999 3，均方根误差为 2.349	[58]
	番茄	光饱和点调控	利用 APSO 优化 ELM 算法构建光环境调控模型	模型具有较快的收敛速度和较高的精度	[59]
	番茄	U 弦长曲率获取光响应曲线曲率拐点	利用 GA 优化 SVR 算法构建光环境优化调控模型	与光饱和点调控相比节约光能 60.49%，模型的 R^2 、均方根误差、平均绝对误差分别为 0.984、9.55、7.92，	[60]
CO ₂	黄瓜	CO ₂ 饱和点调控	基于改进型鱼群优化 SVM 算法构建 CO ₂ 调控模型	模型的 R^2 为 0.965，最大相对误差为 3.056%	[61]
	番茄	CO ₂ 饱和点调控	基于 SVM 算法构建 CO ₂ 调控模型	模型的 R^2 为 0.981 5，均方根误差为 1.092 5	[62]
	番茄	CO ₂ 响应曲线曲率最大点调控	基于 SVR 算法构建 CO ₂ 优化调控模型	与 CO ₂ 饱和点调控相比，CO ₂ 供需量下降 57.14%，模型的均方根误差为 4.42	[63]
氮肥	番茄	氮素浓度响应曲线的曲率特征点调控	采用多项式拟合获得叶绿素荧光度对氮素浓度的响应曲线，并基于曲率特征点确定氮素浓度调控目标区间	番茄干质量平均提高 33.8%，叶片磷浓度提高 10.2%，叶片钾浓度提高 11.3%，叶片氮浓度降低 0.8%，氮肥用量减少 51.4%	[64]

环境控制目标值将直接影响能耗和作物生长发育，探寻合理的目标值是实现温室环境智能调控的关键。其中，土壤水分时变性较弱，是影响作物生长发育的重要环境因子之一，部分学者综合环境对作物生长发育的影

响建立基于作物需求的灌溉决策模型^[50-52]，为实现温室精准灌溉提供了参考依据。温度、光照和 CO₂ 易受外部气候条件和内部遮阳、通风、湿帘等设备运行影响，动态变化性强^[65]，在作物生长和最终产量中起着重要作用^[66]。

其中, 温度是温室中重要的环境因素之一, 其时滞性和非线性的特征制约了温室温度控制装备的智能化发展, 学者们则通过构建温度预测模型来缓解温度时滞性等问题, 从而实现温度精准控制^[55-56]。温室光和 CO₂ 调控模型的研究主要集中在独立调控模型上, 出现了以饱和点为调控目标的光^[10,57-59]与 CO₂^[61-62]单因素调控模型, 确保了作物净光合速率最优。上述研究考虑环境因素对植物光合速率的影响, 结合寻优算法实现了光与 CO₂ 饱和点的动态获取。以光合速率最大为目标的调控策略为温室环境的动态调控提供重要思路, 提高了温室环境调控模型的通用性与精确性; 但饱和点一般处于作物生长适宜环境区间, 会导致调控效率和资源利用率降低, 同时可能会产生早衰现象, 因此该方法难以实现资源节约的高效控制。

为解决调控效率的问题, 基于光合限制点的调控方法已成为新的研究方向。分析发现, 在达到适宜条件前光合响应曲线呈快速上升趋势, 光合限制点则为其进入适宜区间的标志。适宜区间内环境变化对作物光合影响减弱, 资源利用率会快速下降。基于此现象, 有学者提出了基于曲率理论的单一环境因子优化调控策略^[60,63]。研究表明, 针对不同调控对象, 以限制点为调控目标值可在获取较高的光合速率的同时降低环境调控成本, 与饱和点调控相比调控效率进一步提升。

光合速率虽然直接反映 CO₂ 净同化率, 但其不能灵敏地表征环境调控效率、作物衰老速度和轻微胁迫等生理状态^[66]。仅以光合速率作为评价环境调控效果的唯一标准, 也会导致作物生长效率低、环境胁迫、长时干物质累积降低等现象。而叶绿素荧光参数可以实现对作物光合作用、非生物胁迫和衰老速率的有效表征, 且与干物质积累等生理参数显著相关。叶绿素荧光分析技术是以植物体内叶绿素为探针的一种先进高效的植物活体测定技术, 已在植物胁迫生理学、光合作用研究等方面得到了广泛的应用。李永^[53]采用 Logistic 方程拟合叶绿素荧光参数对基质含水量的响应曲线, 并以曲线拐点为灌溉特征值建立灌溉控制策略。袁凯凯等^[64]利用 U 弦长曲率获取叶绿素荧光对温室番茄氮素浓度响应曲线的曲率特征点, 得到番茄生长的适宜氮素浓度区间为 7.2~

9.8 mmol/L。以上研究表明, 叶绿素荧光作为作物生理特征的反馈参数, 可以用于基于作物的温室环境调控研究中。

综上, 基于单因子的环境调控策略有利于改善传统温室生产模式, 但植物生长发育受温度、光照强度、CO₂ 等多环境因子的耦合影响^[67], 单因子调控方法受环境因子间的耦合限制, 调控性能存在一定局限性。充分考虑作物生理需求和外部气候的互作关系, 提高多因子协调下温室系统的智能化管控水平, 是为温室智能化进一步发展的重要内容。

2.3.2 多因子耦合环境协同调控

近年来学者们亦探寻了多环境因子协同的调控方法, 相关研究成果如表 2 所示。为实现适宜温度条件下光与 CO₂ 的高效调控, 白京华^[68]利用 U 弦长曲率-爬山法获取光与 CO₂ 联合调控区域, 并基于欧式距离最近原则结合移动渐近线算法实现调控目标值的动态获取。GAO 等^[69]采用 U 弦长曲率计算光合预测模型的离散光响应曲线曲率, 并以曲率最大值点作为调控边界确定目标调控区间。单慧勇等^[11]通过曲线平滑的差分曲率寻优获取曲率最大值, 建立有限 CO₂ 输入量的最优补气时间和补气量调控模型, 并采用 BP 神经网络实现光照度优化调控。上述以光合响应曲线曲率最大值点为优化目标的温室环境调控模型能兼顾作物需求和经济效益, 但未考虑光与 CO₂ 耦合的曲面特征。因此, 徐立鸿等^[70]基于直角双曲线修正模型建立蓝莓净光合速率光响应模型, 通过粒子群优化高斯曲率算法获取曲面曲率最值点, 并建立不同温度下的光与 CO₂ 调控策略, 但该模型难以应用于修正区间外的其他环境条件, 限制了模型通用性。

建立多环境因子协同的温室环境调控研究更具实际应用价值, 但获取调控目标受光合响应曲线或曲面线形影响较大, 测量噪声亦会对其产生影响, 故面向不同环境条件仅通过曲率理论获得调控目标值会出现作物光合速率降低、物质积累差异显著等问题。同时, 温室环境控制在时间和空间上改变了小气候, 引起日间的叶片光合速率空间分布不均匀^[71], 后续研究除考虑环境因素外, 还应考虑作物光合作用的物理、生理和生化过程的时空变异特性, 优化温室环境控制策略。

表 2 温室光与 CO₂ 协同调控模型相关研究成果

Table 2 Research achievements in multi factor environmental collaborative regulation models			
作物 Crop	调控模型 Regulation model	调控效果对比 Comparison of regulation effects	文献序号 Reference number
黄瓜	采用曲线平滑的差分曲率法获取曲率最大点, 并基于 BP 神经网络构建有限 CO ₂ 资源条件下的温室光气耦合调控模型	验证结果表明模型的最大误差在 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内; 模型的 R^2 为 0.9888, 均方根误差为 3.2036, 平均绝对误差为 3.3621	[11]
黄瓜	采用 U 弦长曲率-爬山法获取曲线曲率最大点, 并基于欧式距离最近原则, 通过移动渐近线算法寻优获取不同环境的调控目标	与 CO ₂ 传统补施相比, 碳浓度降低 42.62%, 光合下降 13.53%; 与光饱和点相比, 光照强度降低 27.5%, 光合下降 3.6%	[68]
番茄	采用 U 弦长曲率-爬山法获取曲线曲率最大点, 利用多项式拟合调控区间	该模型相较于饱和点调控, 作物的光合降低 24.40%, 但其光需求下降了 60.49%	[69]
蓝莓	采用粒子群优化高斯曲率算法获取曲面曲率最大点, 并采用多项式拟合获取调控区间	与最大净光合速率饱和点的调控对比发现, 作物的光照强度下降 60.73%, CO ₂ 浓度减少 25.00%, 净光合速率降低 14.29%	[70]

2.3.3 多目标环境优化调控

在温室实际生产过程中, 多个环境调控目标之间相

互制约, 即某个目标性能的改善往往以损失其它目标性能为代价。例如, 补光和增加 CO₂ 浓度可以提升作物的

光合速率，但会导致温室生产能耗大幅增加。因此，温室环境调控是一个冲突的多目标控制问题，基于多目标算法建立环境优化调控模型是进一步实现温室环境高效调控的关键。根据种植者在不同阶段的需求实现温室环境调控，调控目标通常包括两个，一是降低环境调控成本或能耗，二是提高作物产量或品质。多目标环境调控模型的相关研究成果如表 3 所示。

始终将温室内温度、湿度、光照和 CO₂ 等关键环境参数处于作物生长最佳条件的成本昂贵，以成本或能耗最低为目标建立环境调控模型成为研究热点。LIU 等^[12]以调节成本最小为目标确定补光灯的最佳占空比，实现光环境优化控制。辛萍萍^[72]构建调控成本函数和光合次

优目标函数，并采用 PSO 算法实现效益优先的光与 CO₂ 协同调控。以作物净光合速率最大和能量消耗最小为目标函数，徐立鸿等^[73-74]采用 NSGA-II 多目标算法分别构建了温光协同调控、光与 CO₂ 优化调控策略。上述研究中的光合预测值与实际光合值之间可能存在误差，导致多目标优化结果不是最优值。基于此问题，LIU 等^[75]利用高斯混合模型对光合速率模型进行误差补偿，并基于改进的 NSGA-II 算法构建以作物光合速率最大化、能耗成本最小化为目标的温室光环境多目标优化模型，在满足作物光合作用需求的同时降低了补光成本。以上研究虽然降低了成本与能耗，但受温室结构与种植方式影响，成本函数变化较大，模型的适用范围小。

表 3 多目标优化环境调控模型相关研究成果

Table 3 Research achievements in multi-objective optimization of environmental regulation models				
调控目标 Regulation target	作物 Crop	调控模型 Regulation model	调控结果对比 Comparison of regulation effects	文献序号 Reference number
光饱和点和调控成本最低	番茄	基于 ISSVM 建立光合预测模型，采用 SOPSO 算法获取光饱和点，并以调节成本最低为目标确定补光灯的最佳占空比，实现光环境调控	该方法与以固定阈值为目标的光环境控制方法相比，调节成本降低 16.13%，节约 0.367 7 \$	[12]
净光合速率次优和调控成本最低	番茄	基于 GA-SVR 建立光合速率预测模型，利用 L 离散曲率-PSO 算法建立光合次优模型，并通过 PSO 算法实现效益优先的光与 CO ₂ 协同调控	与光合最优的协同调控方式相比，效益优先调控方式的光合速率下降 11.67%，需光量减少 36.66%，CO ₂ 需求量降低 29.79%。	[72]
净光合速率最大和能耗最小	蓝莓	采用直角双曲线修正模型实现蓝莓净光合速率预测，通过 PSO 算法建立温室能耗模型，基于 NSGA-II 算法对温室光合优化调控进行寻优	节能优先策略可在不降低作物光合作用的前提下，节约能耗约 21.3%；效益优先策略可在降耗约 8.6% 的前提下，提升蓝莓实际净光合速率近 28.9%	[73]
净光合速率最大和能耗最小	蓝莓	基于 SVR 建立蓝莓光能和 CO ₂ 消耗机理模型，利用 NSGA-II 算法得到不同温度范围内光和 CO ₂ 目标调节值的 Pareto 最优解	与阈值控制和高斯曲率最大策略相比，节能优先策略分别降低能源消耗 22.33% 和 19.08%；在相同的能量消耗下，效益优先策略分别提升净光合速率高 8.40% 和 4.42%	[74]
净光合速率最大和能耗最小	番茄	采用误差补偿 ELM 算法实现番茄净光合速率预测，并基于平均距离聚类的 NSGA-II 算法实现光环境多目标优化	与误差补偿前的优化模型相比，该方法所得结果更接近实际值，不仅提高了光合速率，而且在一定程度上降低了能耗成本。	[75]
作物干质量最大和成本最低	生菜	采用 BP 神经网络构建生菜植株叶面积预测模型，引入叶面积修正因子构建生菜生长的干物质生产修正模型，同时基于遗传算法获取不同温度和生长时间下生菜最大干重所对应的光照强度	与恒定补光相比，该调控方式的栽培架上、中、下层生菜干质量变化量分别提高了 13.95%、9.52% 和 9.06%；而每增加 1 kg 产量补光成本分别下降了 14.15%、9.54% 和 9.03%	[76]
作物产量最大和光耗最低	番茄	建立冠层光照分布和作物产量模型，通过对光照进行非线性约束，确定光能消耗与最优产量之间的关系，实现光环境优化调控	与温室阈值控制策略相比，在相同的能耗条件下，该调控策略下作物产量提高了 12.3%；在相同产量的条件下，能耗降低 30.1%	[77]
产量、水肥利用率、肥料偏生产力和果实综合品质最优	番茄	基于 NSGA-II 算法建立番茄产量、水分利用率、肥料偏生产力和果实综合品质的多目标优化模型，利用遗传算法寻优得到最佳的灌溉量和施肥量	在最佳水肥管理策略下，最优产量为 25.85 t·hm ⁻² ，最优水分利用效率为 13.77%，最优糖酸比为 9.51，利益比率为 0.357	[78]
产量、水分利用率、氮肥利用率和品质综合评分最优	黄瓜	基于二次多项式回归方程，建立以灌水水平和施氮量为自变量，产量、品质综合评分和水氮利用率为目标函数的多目标优化模型，并采用遗传算法寻优获得水氮管理策略	在最佳水氮管理方案下，最优产量为 114.50 t·hm ⁻² ，最优水分利用效率为 28.64 kg·m ⁻³ ，最优化氮肥利用率为 71.18%，最优果实综合品质贴合度为 0.52	[79]

为提高作物产量和品质以最大化经济效益，部分研究以增加产量为目标完成环境调控工作。周静^[76]以生菜为研究对象，基于作物干物质生产模型确定光调控目标值，在保证投入产出比和光能利用率的同时提升了生菜干质量，实现生菜多层立体栽培模式的智能补光；XU 等^[77]以番茄为研究对象，建立冠层光照分布模型和作物产量模型，通过对光照进行非线性约束，实现以产量最高为目标的光照优化控制。为实现温室作物高品质生产，赵文举等^[78]基于 NSGA-II 算法建立番茄产量、水分利用率、肥料偏生产力和果实综合品质的多目标优化模型，并利用遗传算法寻优得到最佳的水肥管理策略。马新超等^[79]使用二次多项式回归建立了以灌水水平及施氮量为自变量，产量、品质和水氮利用率为目标函数的多目标

优化模型，并采用遗传算法实现水氮优化管理。

在多目标优化算法领域中，随着目标函数复杂度的增加，逼近分裂解前沿的解会激增，非劣解过多会导致最优解难以获取。因此，如何根据决策者的不同需求选择合适的非劣解，解决现有多目标优化存在计算效率低、非劣解集内数量过多、目标值筛选困难的问题，是实现温室环境调控中最优调控目标值获取的关键。同时，大幅提升作物产量和品质必然导致能源消耗过量，后续研究应着重于减少能源消耗的同时提高作物品质与产量，实现温室高效、清洁、可持续发展。

2.4 基于作物表型的环境控制

作物表型是作物受基因与环境因素相互作用后呈现的性状，是研究“基因型-表型-环境型”作用机制的重

要桥梁。表型信息包括形态学参数(株高、茎粗、叶面积等)和生理学参数(叶绿素、光合速率、叶片含水量等)^[80]。基于表型的环境控制方法需实时监测作物表型参数,包括作物的叶面积、叶面温度、茎流量等生长数据,利用机器学习和深度学习等智能方法进行数据挖掘和分析并快速准确地评估作物性状,通过融合参数优化设定与反馈控制方法实现温室环境动态反馈调节。与其他环境控制方法相比,该方法可及时发现作物生长过程中的潜在问题,并根据实际情况采取相应措施调整,具有更强的泛化性与可靠性。

2.4.1 作物表型参数的获取

高效准确的表型参数获取为温室环境精细化管理提供科学依据。人工测定作物表型参数的劳动强度大且时效性较差^[81]。随着各类传感器的广泛应用,作物表型采集技术迅速发展,参数获取方法包括接触式和非接触式两种^[82]。接触式植物生理传感器有叶片厚度传感器、叶片温度传感器、茎流传感器等,该方法测量稳定,但易损伤作物。图像处理、计算机视觉和高通量表型技术属于非接触式检测技术,为无损监测温室作物表型参数提供技术支撑。经典图像处理方法包括图像变换、图像分割、图像识别等,可用于实现作物病虫害识别^[83]和果实成熟度分级^[84]等领域。计算机视觉技术主要用于获取作物生长指标(鲜质量、干质量、高度、叶面积和直径)^[85]和果实数目^[86]等形态学参数。受限于拍摄距离、光照条件和遮挡程度等因素的影响,计算机视觉技术更侧重于理论研究,难以在复杂多变的实际温室中应用。三维重建是计算机视觉领域的重要研究内容,主要通过多视角的作物二维图像重构得到三维模型^[87]。该模型能更好地提取作物的株高、株型等参数,但难以全面捕获复杂植株的三维信息,导致重建模型精度较低。叶绿素荧光成像、高光谱成像、多光谱成像属于高通量表型分析方法,多用于监测作物生理特性^[88]和检测早期作物胁迫(生物胁迫与非生物胁迫)^[89]等研究。然而,高昂的设备价格限制了这些技术在规模化温室作物表型分析中的广泛应用,低成本、高精度的作物表型获取方法仍是未来的研究重点。

2.4.2 基于表型参数的温室水肥控制

目前,基于作物表型参数进行温室水肥科学管控得到了广泛应用。作物蒸腾量和需水量密切相关,以作物蒸腾量来计算需水量,制定合理节水灌溉模式,对温室灌溉管理具有重要意义。CHOI等^[90]通过叶面积测量仪和环境传感器测量番茄植株的叶面积指数、饱和水汽压差、光辐射强度,建立作物蒸腾预测模型,估算温室作物的灌溉量以控制灌溉设备作业。李莉等^[13]以作物叶面积指数和空气温、湿度、光照强度等环境因子为输入,基于RF-GRU建立温室番茄蒸腾量预测模型,依据模型计算结果自适应控制灌溉设备,为温室高效节水灌溉提供技术支撑。茎流速率是一种可衡量作物蒸腾作用的指标,通过测量茎流的变化可以表征作物需水情况,从而为灌溉控制提供依据。孙国祥等^[91]考虑作物的辐射积和

茎流累积量建立温室黄瓜节水灌溉模型,计算作物总耗水量,根据计算结果控制灌溉系统实现精准灌溉。FERREIRA等^[14]通过多光谱相机获取不同有机肥水平处理下的番茄植株多光谱图像,基于图像处理技术提取作物植被指数和形态特征(面积、等效直径、周长等),利用形态参数建立回归模型实现番茄作物的施肥预测,通过监测作物生长状态并提取作物的形态特征动态计算需施肥量,控制施肥设备进行施肥量的动态调整,该研究有利于改善传统农业规模化、粗放式的施肥管理方式。

除受水肥影响外,作物表型还受其他环境因子的耦合影响,但现有研究未综合考虑表型与多环境因子之间的互作关系。利用作物表型参数表征作物的品质与生长状态,具有直观和实时监测等优势,但通过作物表型特性反演其对特定环境因子的调控需求的难度较大。未来有望基于传感器和植物高通量表型平台等对温室环境信息、调控设备状态、作物表型参数等进行全面感知,采用数字孪生技术对监测数据进行模型化分析,为温室系统提供更精确的环境调控策略。

3 温室环境调控系统

随着物联网技术的普及,将物联网技术应用于温室作物生产,推动温室智能化高效化发展。基于物联网技术的智能化温室环境监测与调控系统总体结构如图3所示,利用各类传感器和智能监测设备实现温室环境数据实时感知,将获取数据上传到云平台进行存储、显示和数据管理,采用上层模型进行数据分析与处理获得作物生长的最佳条件,并通过驱动补光、控温、灌溉等作业设备实现温室环境智能调控。

3.1 温室光照控制系统

光照是影响作物光合作用的重要因子,过低或过高的光强均会影响温室作物光合作用的效率。通过改变光质、光强和光周期等光环境条件,调节作物的光合作用和物质代谢,是温室栽培领域的重要技术之一^[92]。

温室光环境控制主要包括遮光控制和补光控制。当棚内光照强烈,影响作物正常生长时,可以覆盖遮阳或者喷洒降温剂来遮挡部分光照。然而,高温弱光、高温干燥等极端条件会影响作物的产量和品质,过度依赖遮光进行降温并不适宜。温室自然光照不足影响作物光合作用效率,利用人工光源调节温室光照,具体分为光合补光和光周期补光。光合补光主要应用于高纬度地区或连续阴天,防止因光强较弱或光照时数不足造成不良影响;而光周期补光则是为了抑制或促进花芽分化、调节开花期。此外,不同补光位置对温室蔬菜的生长发育亦具有显著影响,补光光源主要分为顶部补光和株间补光,温室番茄和黄瓜的株间补光系统如图4所示^[93]。张仲雄等^[94]设计了一种基于植株需光差异的温室黄瓜株间光环境智能调控系统,相比于顶部补光方式,平均株高、茎粗分别增长了8.03%和7.24%,产量提升了0.28 kg/m²,说明该株间补光系统提高经济效益,具有应用推广价值。

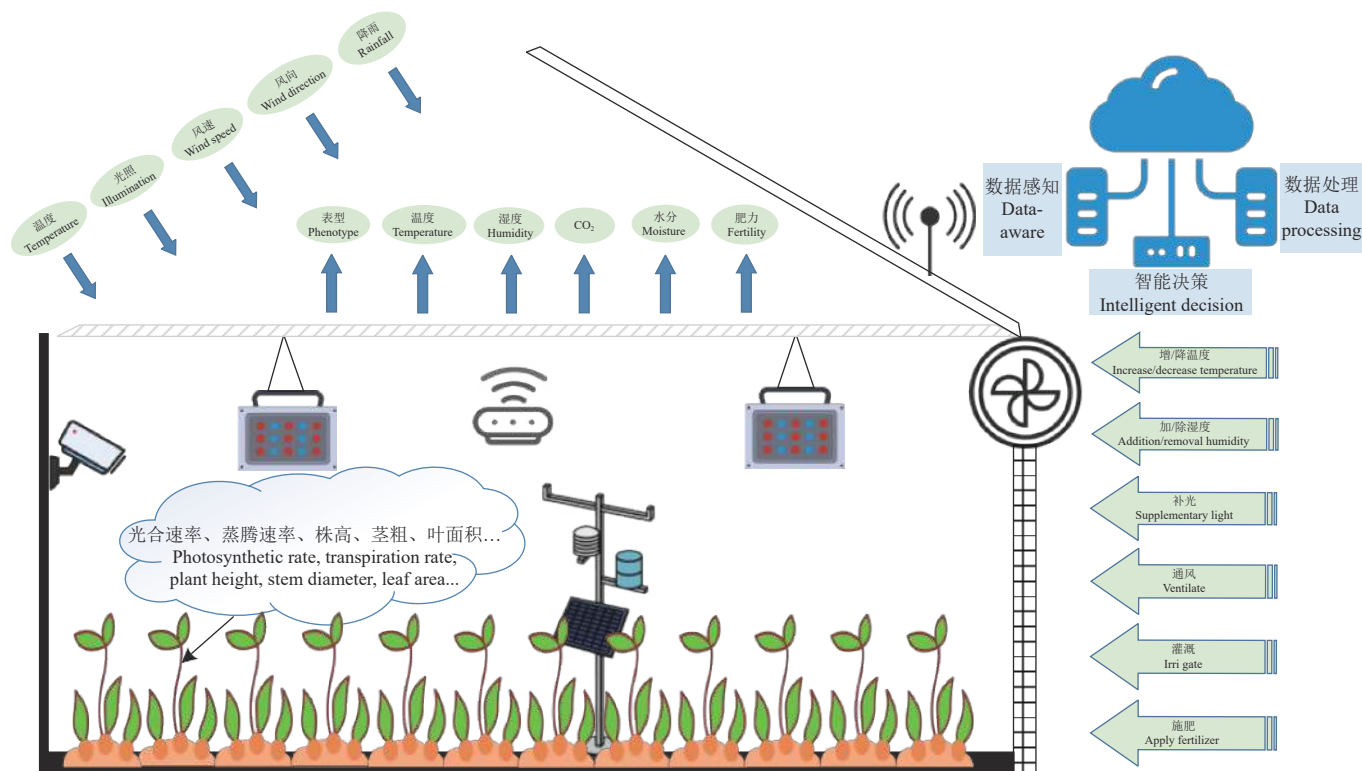


图 3 智能温室环境监测与调控系统

Fig.3 Environmental monitor and regulation system of intelligent greenhouses

图 4 温室株间补光系统^[93]Fig.4 Greenhouse inter plant supplementary light system^[93]

通常来说，温室光照控制系统主要由传感器、控制器、补光装置和驱动装置等部件组成，其工作原理是：当传感器检测到光强不足时，将信号发送到控制器，通过启动补光装置达到补充光辐射的目的。温室智能控光系统考虑了作物对光质、光强和需光量等的差异，根据红蓝光目标光强与实时光强的差值精确计算补光量，通过 PWM 占空比调整输出光强。例如，NIU 等^[95]开发了一种基于 LabVIEW 和 STM32 的温室智能补光系统，基于 LabVIEW 的上位机实现对环境数据的存储和处理，利用 WiFi 模块实现补光设备与上位机之间的无线通信，并根据实时光强变化动态调节 PWM 信号，控制 LED 红、绿、蓝光源模块输出，实现光强和光质比自适应调节。MOHAGHEGHI 等^[96]设计了一种温室光环境智能控制系统，该系统由物联网、光照传感器、可调光 LED 灯和相机组成，可以实时监测作物生长状态，并根据作物不同生长阶段所需的光配方实现准确补光。综合考虑外界环

境对作物光合作用影响的动态补光系统已得到广泛研究及应用，未来应考虑作物光合累积和能量利用效率，最大程度避免非生物胁迫，减缓作物老化速度，在保证品质的同时兼顾作物的品种特性和生长周期，实现更智能和高效的温室光环境控制。

3.2 温室温度控制系统

温度是作物生长最重要的环境因素之一，它通过改变酶的活性影响作物光合速率，进而影响作物生长、质量和形态^[97]。高效的温室温度控制系统可以避免作物遭受高温或低温胁迫，保证作物产量。

温室温度控制系统的实现方式主要包括通风降温、湿帘降温、采暖加热以及智能自动化控制等。通风降温是最常见的降温方式，通过打开门窗或通风系统使室内热量排出。湿帘降温是一种高效降温方式，由纸质多孔湿帘、水循环系统和风扇组成，降温过程在核心纸垫内完成，纸垫表面附有轻薄水膜，当室外热空气被风机抽吸穿过纸垫时，水膜上的水蒸发吸热，经过处理后凉爽湿润的空气进入室内，从而实现温室降温。采暖加热是温室在寒冷天气中保持恒温的重要方法，常见方式有电热加热、水加热、暖风加热以及太阳能蓄能供暖等。智能控制系统则是根据温室内各种传感器采集环境信息，当实测温度值超出设定范围，系统会自动启动或关闭温控设备，以维持温室内温度稳定。毕然等^[98]开发温室温度控制系统，采用模糊控制方式调节通风和加热设备实现温度控制，该系统使温室温度控制精度提高 10.8%，减少人工工作量，具有较高的经济效益。考虑温室整体加温高能耗问题，张卓等^[99]设计一种适用于矮株作物的

根区加热系统, 该系统主要由加热板、继电器、电源、通信模块、单片机及传感器等组成, 利用模糊 PID 控制算法控制作物根区温度到设定值; 验证结果表明, 该系统能有效提高作物根区温度, 同时对地上环境也具有升温效果, 有助于缓解低温胁迫对冬季作物生长的影响。

MAHMOOD 等^[100]提出了一种基于数据驱动模型的温室温度控制方法(图 5), 采用人工神经网络实现室内温度动态预测, 并提出一种基于最小化温室运行成本函数和粒子群算法优化预测模型的控制策略, 确保系统能稳定运行; 验证结果表明, 在冬季和夏季的温度预测中, 均方根误差分别为 0.32℃ 和 0.60℃, 实现温度精准预测; 与现有温度控制系统相比, 能源分别减少了 9.67% 和 23.61%, 降低控制成本和能耗。基于模型预测的环境控制方法在每个时间步调整最佳控制策略, 但温室温度受环境变化和设备状态扰动影响较大, 因此融合扰动因素的模型预测控制方法是实现温室温度精准控制和高效管理的有效途径。



图 5 温室外部供暖系统^[100]
Fig.5 Greenhouse external heating system^[100]

3.3 温室 CO₂ 控制系统

CO₂ 是光合碳同化的重要环境因素之一, 在相对密闭的温室中, 作物的光合能力易受限于 CO₂ 浓度水平^[101]。CO₂ 含量不足或者过量都会影响作物的生长和发育, 因此精确调控温室 CO₂ 是提高作物抗病性、品质和产量的重要途径^[102]。

温室降低 CO₂ 可通过自然通风或人工通风方式实现, KOZAI 等^[103]开发了一种零平衡 CO₂ 控制器, 在温室通风时降低 CO₂ 浓度, 该控制器实现温室内 CO₂ 与室外水平一致。补施 CO₂ 的方法主要包括: 燃烧法、化学反应法和生物法。燃烧法是通过 CO₂ 发生器燃烧液化石油气、丙烷气、天然气等产生 CO₂。化学反应法则是利用酸碱反应或碳酸盐热解等方式产生二氧化碳, 例如刘中华等^[104]设计了一种温室 CO₂ 控制系统, 该系统由控制程序、电子模块、电磁阀等组成, 利用稀硫酸和碳酸盐的化学反应设计 CO₂ 反应装置, 同时考虑 CO₂ 纯度问题设计洗气装置, 当温室内 CO₂ 浓度超过预设范围时通过控制电磁阀开闭实现温室 CO₂ 智能控制。生物法是利用微生物发酵作用产生 CO₂, TAKEYA 等^[105]设计 CO₂ 控制系统, 系统由 CO₂ 传感器、控制器、废气冷凝净化器、输气管组成, 通过收集从夜间加热器排出的废气, 并经过冷却、

净化处理得到 CO₂, 控制器根据系统设置进行 CO₂ 补充控制, 实现废物的循环利用。

现代温室 CO₂ 智能控制系统主要依赖于物联网技术、传感器、自动化控制等技术实现。LI 等^[106]研制了基于无线传感网络的远程管理系统进行温室环境监测, 并利用 BP 神经网络预测番茄不同生长阶段的光合速率, 确定番茄生长的最佳 CO₂ 浓度, 将其作为 CO₂ 控制器的设定值, 实现温室番茄 CO₂ 的定量调控。考虑资源利用率与经济效益问题, ZHANG 等^[107]采用环境-植物耦合模型模拟了作物光合速率的空间分布, 并通过计算作物冠层的光合碳同化能力随 CO₂ 使用量的变化定量分析 CO₂ 利用率, 进而开发了一种温室 CO₂ 局部控制系统(图 6)。温室 CO₂ 调控成本较高, 未来研究应更加注重成本与效益, 可通过智能控制算法调节通风设备, 以保持 CO₂ 浓度在适宜范围内。此外应根据作物在不同生长阶段对 CO₂ 的需求实现温室 CO₂ 优化调控, 在作物生长速度较快的阶段提高 CO₂ 浓度以促进作物生长, 在成熟阶段降低 CO₂ 浓度以提高果实品质。

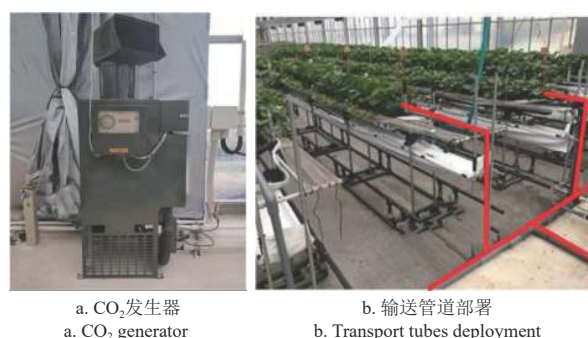


图 6 温室 CO₂ 局部控制系统^[107]
Fig.6 Greenhouse CO₂ local control system^[107]

3.4 温室通风控制系统

温室通风是保证室内外气体交换的重要措施, 良好的通风系统有利于调节温室温度、湿度和排出有害气体, 为作物提供适宜的环境条件^[108]。温室常用的通风方式包括自然通风和机械通风。自然通风是最经济的降温除湿方法, 主要通过开关窗来调节温室内外空气的交换实现通风效果, 包括顶开窗和侧开窗。机械通风则是通过风机等设备强制实现空气流动以达到快速通风的效果^[109]。

现代化智能温室采用自动化通风控制系统, 通过采集温室内的各项环境数据, 并根据作物的生长模型制定适宜的通风策略, 实现精准通风控制, 但需设备和技术支持。曹晏飞等^[110]设计了一种基于无线通讯技术的多段式自动通风控制系统, 利用 GPRS 将温度数据传输到云平台, 再根据多段式通风控制要求实现自动化通风。DAHLAN 等^[111]提出了一种温室通风系统优化控制策略, 通风系统由 6 台排风机和 2 台轴流风机组成(图 7), 根据温度传感器测量温室温度, 并基于能耗最小化原则实现温室风机智能控制。JUNG 等^[112]提出了基于温度预测模型的温室通风控制方法, 首先建立反馈神经网络预测室内未来 30min 的温度, 之后开发基于温度预测模型

的温室通风控制系统；与传统通风控制系统相比，两者的均方根误差分别为 2.45°C 和 3.01°C ，证明该方法能改善通风控制性能。现有温室通风控制系统无法根据温度、湿度、 CO_2 等参数精确调节通风量，通常针对温室进行整体通风，而忽略作物的实际需求，造成大量的能源浪费。未来的智能通风系统应具备自适应能力，根据历史数据和实时监测结果不断优化通风策略，降低温室生产能耗，同时满足作物在不同季节和气候条件的生长需求。

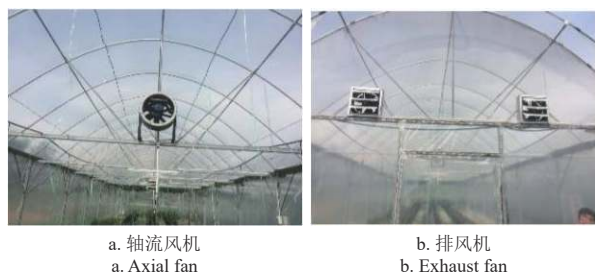


图 7 温室轴流风机和排风机位置分布^[111]

Fig.7 Distribution of axial fan and exhaust fan in greenhouse^[111]

3.5 温室水肥控制系统

温室是相对封闭的生产环境，作物所需水分和肥料完全取决于人工措施，传统的漫灌和喷灌方式资源利用率低。为提高农业灌溉的效率，需根据土壤类型和作物生理生长需求，选择合适的灌溉方式。例如滴灌技术，根据作物需肥规律，保证水肥定时定量供给，实现精准灌溉，提高水肥利用效率。现有阈值式水肥控制系统，可随时灌溉施肥，保证水肥均衡供应，维持作物生长发育稳定。

随着农业技术的发展，温室水肥智能控制系统结合作物生长需求，自动供给适量的水和肥料，为作物提供良好的生长环境^[113]。赵鹏飞等^[114]开发了一套温室水肥一体化智能控制装备（图 8），由灌溉装置、配肥装置、环境监测和控制系统组成，该装备整体运行稳定，可以实现环境实时监测、水肥动态混合及按需控制等功能。卞东超等^[115]开发了蓝莓温室智能水肥一体化系统，包括环境信息采集子系统、智能化服务平台、灌溉施肥子系统以及环境调节设备；通过传感器实时监测温室环境信息并上传到智能服务平台，该平台自动调节模糊 PID 控制算法实现灌溉施肥。此外，计算机视觉技术也被应用于温室水肥系统的监控和管理中。QIU 等^[116]设计了一套灌溉和肥料动态控制系统，利用搭载的计算机视觉平台监测并识别番茄生长状态，结合最佳水肥条件下的番茄表型参数，对比分析作物水肥缺乏状况，实现水肥优化控制。目前已有的温室水肥控制系统对于室内环境和作物生长状态的感知与分析能力较弱，无法根据实时数据做出智能决策。未来的水肥控制系统应结合大数据和人工智能技术，对水肥使用量和作物生长信息进行在线监测与分析，优化水肥供给策略，提高温室生产的经济效益。



图 8 温室水肥控制装备^[114]

Fig.8 Greenhouse water and fertilizer control equipment^[114]

3.6 “云一边一端”协同的温室环境控制系统

独立的环境控制系统难以实现多源数据的融合，无法适应多样化的温室生产需求，基于“云一边一端”协同的温室环境控制系统成为未来的发展趋势。“云一边一端”协同的温室环境控制系统是一种基于云计算、边缘计算和物联网技术的智能控制系统。除了传统控制系统的基础监测和控制功能，“云一边一端”协同的温室环境控制系统还提供更加智能化的服务，利用边缘计算技术，数据处理完成在数据产生的近距离范围，提高计算效率；利用云计算技术，完成海量数据挖掘和大数据分析，实现更精准的温室环境控制和管理^[117]。蔚瑞华等^[118]发明基于边云协同的温室环境控制物联网系统，通过挂载传感设备的监测云终端采集温室内环境和温室外气象数据，基于云端服务器进行数据处理和模型训练，通过远程控制灌溉、卷帘、风机、补光和遮阳等设备实现对温室环境的精准控制。高炎^[119]发明智慧农业大棚边云协同控制系统，该系统包括本地控制模块、边缘控制模块和远程控制模块，在边缘控制和远程控制出现冲突时，能够通过竞争算法决策判断来规避风险，有效地避免大棚设备发生失控错乱的情况。夏鸽飞等^[120]发明基于云边端协同的可控农业温室环境智能控制系统，获取温室内各个区域的作物红外图像信息和环境温度信息，分析温度变化趋势，预测下一个时间点各节点的温度，完成对各节点的温度调控，该系统实现作物智能监测和温室温度控制，避免作物发生病害的问题。

现有云-边-端协同的温室环境控制系统在实际应用中存在挑战：1）如何有效处理边缘设备产生的数据以提高环境控制效率；2）如何实现多个云服务器、边缘端服务器和设备间的有效协同；3）如何解决边端资源异构性给系统一体化管理、运行和维护带来的问题；4）如何合理调度资源以保证系统的高效稳定。随着科技的进步，云-边-端协同的温室环境控制系统应更多元化和智能化，应用场景更丰富。多模型融合的“云-边-端”协同温室环境调控系统是未来温室系统的主要发展方向，为实现温室农业全过程智能管理和精准作业提供可能性。

4 总结与展望

本文对温室环境控制方法的研究现状进行总结与分

析,为实现温室环境高效调控,未来可以从以下三个方面开展工作:

1) 考虑扰动因素影响的温室环境控制方法。现有将人工智能算法应用于温室环境调控的研究,能充分考虑不同环境因子之间的相互作用。但温室系统具有强滞后性,且受环境变化和设备状态扰动影响较大。因此,未来需建立考虑扰动因素影响的模型预测控制方法,减少环境调控次数,降低调控能耗,实现温室环境精准控制和节能管理。此外,未来还需在提升模型精度的基础上降低模型计算的时间复杂度,以提高环境调控效率。

2) 基于作物生长和表型评价体系的环境调控模型。采用数据驱动方法实现温室环境智能调控已成为温室发展的主要趋势。现有基于作物生长的环境调控模型不能灵敏地表征作物衰老速度和轻微胁迫等生理状态,作物表型获取技术具有直观无损、实时监测的优势。因此,未来应加强作物表型与环境互作关系的基础理论研究,通过表型参数实现作物生理状态反演与健康状况评价,并将表型信息作为反馈建立基于作物生长和表型评价体系的动态环境调控模型,优化温室作物产量与品质。

3) 多模型融合的“云—边—端”协同温室环境调控系统。单一模型推广应用难度大,综合的环境调控策略不易实现。未来需开发支持多模型融合的“云—边—端”协同温室环境调控系统:云平台负责多模型存储与计算,通过对全局数据的处理和分析,综合最优调度在“云”端制定;局部最优策略在“边”端实现,依据云端指令与和本地情况局部调整控制参数以提升系统性能;具体的决策操作由“端”执行,同时将执行结果反馈回“云”端和“边”端,形成有效的闭环控制系统,进而实现温室资源的统一调度和优化管理。

[参 考 文 献]

- [1] 许艺, 李新旭, 杨哲, 等. 我国连栋玻璃温室番茄长季节栽培产量与荷兰存在差距的原因分析[J]. 中国蔬菜, 2020(10): 1-8.
- [2] 孙荣高, 孙德超. 基于经验数据的温室内的温湿度过程控制系统[J]. 电子工程师, 2004(9): 70-72.
SUN Ronggao, SUN Dechao. Greenhouse temperature and humidity process control system based on experimental data[J]. Informatization Research, 2004(9): 70-72. (in Chinese with English abstract)
- [3] MONTOYA R, GARCIA M, GUZMAN J, et al. Simple tuning rules for feedforward compensators applied to greenhouse daytime temperature control using natural ventilation[J]. *Agronomy-Basel*, 2020, 10(9): 1327.
- [4] 高立婷, 戴思慧, 徐新明, 等. 温室温湿度耦合控制方法研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(12): 24-30.
GAO Liting, DAI Sihui, XU Xinming, et al. Research on Temperature and Humidity Coupling Control Method of Greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(12): 24-30. (in Chinese with English abstract)
- [5] RIAHI J, VERGURA S, MEZGHANI D, et al. Intelligent control of the microclimate of an agricultural greenhouse powered by a supporting PV system[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(4): 1350.
- [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] 苏战战, 李莉, 李文军, 等. 基于 RF-GSO 的温室番茄自适应调光系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊 1): 339-346.
SU Zhazhan, LI Li, LI Wenjun, et al. Design and experiment on adaptive dimming system for greenhouse tomato based on RF-GSO[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(增刊 1): 339-346. (in Chinese with English abstract)
- [8] ARIFFIN M, RAMLI M, AMIN M, et al. Automatic climate control for mushroom cultivation using IoT approach[C]// IEEE 10th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET). Malaysia: IEEE, 2020.
- [9] GUO Y, ZHAO H, ZHANG S, et al. Modeling and optimization of environment in agricultural greenhouses for improving cleaner and sustainable crop production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 285: 124843.
- [10] XIN P, LI B, ZHANG H, et al. Optimization and control of the light environment for greenhouse crop production[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 8650.
- [11] 单慧勇, 李晨阳, 张程皓, 等. 有限二氧化碳资源条件下的温室光气耦合优化调控模型[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 471-479.
SHAN Huiyong, LI Chenyang, ZHANG Chenghao, et al. Optimal control model of greenhouse light gas coupling under limited CO₂ resources[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(2): 471-479. (in Chinese with English abstract)
- [12] LIU T, YUAN Q, WANG Y. Hierarchical optimization control based on crop growth model for greenhouse light environment[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 180: 105854.
- [13] 李莉, 李伟, 耿磊, 等. 基于 RF-GRU 的温室番茄结果前期蒸腾量预测方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 368-376.
LI Li, LI Wei, GENG Lei, et al. Prediction method of greenhouse tomato transpiration in early fruiting stage based on RF-GRU[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 368-376. (in Chinese with English abstract)
- [14] FERREIRA L, KRUS A, VALERO C, et al. Monitoring plant status and fertilization strategy through multispectral images[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 435.
- [15] 李跃洋, 苏铁, 王胤, 等. 中国与荷兰设施园艺对比分析[J]. 中国蔬菜, 2020(6): 11-15.
- [16] SUBAHI A, BOUAZZA K. An Intelligent IoT-Based System

- Design for controlling and monitoring greenhouse temperature[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 125488-125500.
- [17] LI H, GUO Y, ZHAO H, et al. Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 191: 106558.
- [18] 李胜利, 李阳, 周利杰, 等. 豫西高山夏季番茄育苗温度适宜度定量评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 194-202.
- LI Shengli, LI Yang, ZHOU Lijie, et al. Quantitative assessment of temperature suitability of alpine summer tomato seedling in west of Henan province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(4): 194-202. (in Chinese with English abstract)
- [19] 段青青, 张禄祺, 张自坤, 等. 补光时间及光质对温室甜椒生长及产量品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 213-222.
- DUAN Qingqing, ZHANG Luqi, ZHANG Zikun, et al. Effects of spectrum and duration of supplemental illumination on growth, yield and fruit quality of greenhouse sweet pepper[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(24): 213-222. (in Chinese with English abstract)
- [20] QU F, ZHANG Q, JIANG Z, et al. Optimizing irrigation and fertilization frequency for greenhouse cucumber grown at different air temperatures using a comprehensive evaluation model[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 273: 107876.
- [21] 张雪花, 张武, 杨旭, 等. 农业温室环境控制方法研究综述[J]. *控制工程*, 2017, 24(1): 8-15.
- ZHANG Xuehua, ZHANG Wu, YANG Xu, et al. Survey of research methods on agricultural greenhouse environment control[J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(1): 8-15. (in Chinese with English abstract)
- [22] WANG L, WANG B. Construction of greenhouse environment temperature adaptive model based on parameter identification[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 174: 105477.
- [23] 徐立鸿, 孟凡峥, 蔚瑞华. 秒尺度温室番茄作物-环境互作模型构建与验证[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(8): 212-222.
- XU Linong, MENG Fanzheng, WEI Ruihua. Development and verification of tomato crop-environment interaction model in second timescale greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(8): 212-222. (in Chinese with English abstract)
- [24] SANCHEZ M, LI M, RODRIGUEZ F, et al. Development and test verification of air temperature model for Chinese solar and Spanish Almeria-type greenhouses[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(4): 66-76.
- [25] LI H, LI A, HOU Y, et al. Analysis of heat and humidity in single-slope greenhouses with natural ventilation[J]. *Buildings*, 2023, 13(3): 606.
- [26] LIU R, LI M, GUZMAN J, et al. A fast and practical one-dimensional transient model for greenhouse temperature and humidity[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 186: 106186.
- [27] 杨承磊, 兰玉彬, 王庆雨, 等. 神经网络在温室小气候预测中的应用[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(5): 89-99.
- YANG Chenglei, LAN Yubin, WANG Qingyu, et al. Application of neural network in greenhouse microclimate prediction[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(5): 89-99. (in Chinese with English abstract)
- [28] 柴天佑, 周正, 郑锐, 等. 端边云协同的 PID 整定智能系统[J]. *自动化学报*, 2023, 49(3): 514-527.
- [29] WU W, YAO B, HUANG J, et al. Optimal temperature and humidity control for autonomous control system based on PSO-BP neural networks[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2023, 17(15): 2097-2019.
- [30] WANG Y, LU Y, XIAO R. Application of nonlinear adaptive control in temperature of Chinese solar greenhouses[J]. *Electronics*, 2021, 10(13): 1582.
- [31] 韦玉翡, 赵建贵, 高安琪, 等. 温室环境参数模糊专家控制系统的设计[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(6): 183-188.
- [32] BENYEZZA H, BOUHEDDA M, REBOUH S. Zoning irrigation smart system based on fuzzy control technology and IoT for water and energy saving[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 302: 127001.
- [33] DONG Y, SONG Y, WEI G. Membership-function-dependent model predictive control for nonlinear systems in a piecewise-fuzzy framework[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2022, 443: 308-323.
- [34] MOHAMED S, HAMEED I. A GA-Based adaptive neuro-fuzzy controller for greenhouse climate control system[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, 57(2): 773-779.
- [35] 付焕森, 李元贵, 夏华凤. 温室系统温湿度、水肥耦合的解耦控制器设计[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(6): 430-432.
- [36] 程文锋, 杨祥龙, 王立人. 温室温湿度的反馈前馈线性化解耦控制[J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2012, 42(增刊 1): 5-10.
- CHEN Wenfeng, YANG Xianglong, WANG Liren. Feedback feedforward linear decoupling control of temperature and humidity in greenhouse[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(Supp.1): 5-10. (in Chinese with English abstract)
- [37] AZAZA M, ECHAIEB K, TADEO F, et al. Fuzzy decoupling control of greenhouse climate[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40: 2805-2812.
- [38] 龚瑞昆, 王鹏, 王海平, 等. 基于前馈补偿算法的温室系统解耦控制[J]. *江苏农业学报*, 2017, 35(5): 1188-1193.
- GONG Ruikun, WANG Peng, WANG Haiping, et al.

- Decoupling control system of greenhouse based on feedforward compensation algorithm[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 35(5): 1188-1193. (in Chinese with English abstract)
- [39] ESCAMILLA G, SOTO Z, TOLEDANO A, et al. Applications of artificial neural networks in greenhouse technology and overview for smart agriculture development[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(11): 3835.
- [40] MOHAGHEGHI A and MOALLEM M. Intelligent spectrum controlled supplemental lighting for daylight harvesting[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(5): 3263-3272.
- [41] GU Z, ZHU T, JIAO X, et al. Neural network soil moisture model for irrigation scheduling[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 180: 105801.
- [42] 宋卓研, 徐晓辉, 宋涛, 等. 基于 PSO-BP 优化 PID 模型的水肥控制系统研究[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(9): 83-89.
- SONG Zhuoyan, XU Xiaohui, SONG Tao, et al. Research on water and fertilizer control system based on PSO-BP optimization PID model[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(9): 83-89. (in Chinese with English abstract)
- [43] OZBILGE E, ULUKOK M, TOYGAR O, et al. Tomato disease recognition using a compact convolutional neural network[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 77213-77224.
- [44] ESCAMILLA G, SOTO Z, TOLEDANO A, et al. Applications of artificial neural networks in greenhouse technology and overview for smart agriculture development[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(11): 3835.
- [45] 刘宇, 惠鸿飞, 路永乐, 等. 基于遗传算法优化神经网络的多源信息融合室内定位方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2020, 28(1): 67-73.
- LIU Yu, HUI Hongfei, LU Yongle, et al. Multi-source information fusion indoor positioning method based on genetic algorithm to optimize neural network[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, 28(1): 67-73. (in Chinese with English abstract)
- [46] 陈秋莲, 郑以君, 蒋环宇, 等. 基于神经网络改进粒子群算法的动态路径规划[J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 49(2): 51-55.
- CHEN Qiulian, ZHENG Yijun, JIANG Huanyu, et al. Improved particle swarm optimization algorithm based on neural network for dynamic path planning[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(2): 51-55. (in Chinese with English abstract)
- [47] CHEN Z, ZHAO C, WU H, et al. A water-saving irrigation decision-making model for greenhouse tomatoes based on genetic optimization T-S fuzzy neural network[J]. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 2019, 13(6): 2925-2948.
- [48] CHOI H, MOON T, JUNG D, et al. Prediction of air temperature and relative humidity in greenhouse via a multilayer perceptron using environmental factors[J]. *Journal of Bio-Environment Control*, 2019, 28(2): 95-103.
- [49] 王强, 张欣薇, 黄英金, 等. 光环境和温度对商陆净光合速率、蒸腾速率和瞬时水分利用效率的协同影响[J]. *植物生理学报*, 2021, 57(1): 187-194.
- WANG Qiang, ZHANG Xinwei, HUANG Yingjin, et al. Synergistic effects of light environment and temperature on net photosynthetic rate, transpiration rate and instant water use efficiency of *Phytolacca americana*[J]. *Plant Physiology Journal*, 2021, 57(1): 187-194. (in Chinese with English abstract)
- [50] 王柳, 丁小明, 李恺, 等. 椰糠条栽培番茄的蒸腾反馈智能灌溉系统研制[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(8): 133-142.
- WANG Liu, DING Xiaoming, LI Kai, et al. Development of transpiration feedback intelligent irrigation system for tomato under coconut coir slabs cultivation condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(8): 133-142. (in Chinese with English abstract)
- [51] WAN X, LI B, CHEN D, et al. Irrigation decision model for tomato seedlings based on optimal photosynthetic rate[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(5): 115-122.
- [52] 胡瑾, 隆星月, 邓一飞, 等. 基于水分利用率与光合速率的温室作物需水模型研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 362-370.
- HU Jin, LONG Xingyue, DENG Yifei, et al. Water demand model for greenhouse crops considering water use efficiency and photosynthetic rate[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(10): 362-370. (in Chinese with English abstract)
- [53] 李永. 基于叶绿素荧光的温室基质栽培灌溉控制系统[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- LI Yong. Irrigation control system for greenhouse matrix cultivation based on chlorophyll fluorescence[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [54] ESMAILI M, ALINIAEIFARD S, MASHAL M, et al. CO₂ enrichment and increasing light intensity till a threshold level, enhance growth and water use efficiency of lettuce plants in controlled environment[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2020, 48(4): 2244-2262.
- [55] CHEN W, YOU F. Semiclosed greenhouse climate control under uncertainty via machine learning and data-driven robust model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, 30(3): 1186-1197.
- [56] 杜太行, 刘德, 孙曙光, 等. 基于模型预测的日光温室温度优化控制[J]. *中国测试*, 2022, 48(1): 85-91.
- DU Taihang, LIU De, SUN Shugaung, et al. Optimal temperature control of solar greenhouse based on MPC

- method[J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(1): 85-91. (in Chinese with English abstract)
- [57] 刘源, 宋涛, 徐晓辉, 等. 基于多元回归模型的精准光照系统[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(6): 162-166.
LIU Yuan, SONG Tao, XU Xiaohui, et al. Design of intelligent lighting system based on multivariate regression model[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(6): 162-166. (in Chinese with English abstract)
- [58] 张海辉, 张盼, 胡瑾, 等. 融合叶位光合差异的设施黄瓜立体光环境优化调控模型[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(2): 266-272.
ZHANG Haihui, ZHANG Pan, HU Jin, et al. Optimization regulation model of stereo light environment for facility cucumbers with leaf position photosynthetic differences[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2): 266-272. (in Chinese with English abstract)
- [59] YUAN Q, LIU T, DING X, et al. Optimal regulation method of greenhouse light environment considering photosynthetic rate model error[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022: 2108334.
- [60] GAO P, TIAN Z, LU Y, et al. A decision-making model for light environment control of tomato seedlings aiming at the knee point of light-response curves[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198: 107103.
- [61] 辛萍萍, 张珍, 王智永, 等. 基于支持向量机-改进型鱼群算法的 CO₂ 优化调控模型[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 249-256.
XIN Pingping, ZHANG Zhen, WANG Zhiyong, et al. Carbon dioxide optimal control model based on support vectorimproved fish swarm algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 249-256. (in Chinese with English abstract)
- [62] 季宇寒, 李婷, 张漫, 等. 基于 WSN 的温室 CO₂ 气肥优化调控系统研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(增刊 1): 201-207.
JI Yuhan, LI Ting, ZHANG Man, et al. Design of CO₂ fertilizer optimizing control system on WSN[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(Supp.1): 201-207. (in Chinese with English abstract)
- [63] 胡瑾, 田紫薇, 汪健康, 等. 基于离散曲率的温室 CO₂ 优化调控模型研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 337-346.
HU Jin, TIAN Ziwei, WANG Jiankang, et al. Carbon dioxide optimal control model based on discrete curvature[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 337-346. (in Chinese with English abstract)
- [64] 袁凯凯, 卢苗, 李慧敏, 等. 基于 U 弦长曲率的番茄氮肥调控目标区间获取方法[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(11): 188-196.
YUAN Kaikai, LU Miao, LI Huimin, et al. Data acquisition of regulating target range for tomato nitrogen fertilizer using U-chord curvature[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(11): 188-196. (in Chinese with English abstract)
- [65] 赖帅彬, 潘新雅, 简春霞, 等. 转苜蓿 MsOr 基因烟草光合-光响应和光合-CO₂ 响应曲线特征研究[J]. *草地学报*, 2020, 28(1): 20-30.
LAI Shuaibin, PANXinya, JIAN Chunxia, et al. Characteristics of photosynthetic-light response and photosynthetic-CO₂ response curves in transgenic alfalfa MsOr gene tobacco[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(1): 20-30. (in Chinese with English abstract)
- [66] REN B, JUAN H, ZHANG J, et al. Effects of urea mixed with nitrapyrin on leaf photosynthetic and senescence characteristics of summer maize (*Zea mays* L.) waterlogged in the field[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(6): 1586-1595.
- [67] ATKINS I, BOLDT J. Photosynthetic responses of greenhouse ornamentals to interaction of irradiance, carbon dioxide concentration, and temperature[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2022, 147(2): 82-94.
- [68] GAO P, LI B, BAI J, et al. Method for optimizing controlled conditions of plant growth using U-chord curvature[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 185: 106141.
- [69] 白京华. 基于光合速率预测模型的黄瓜幼期 CO₂-光照协同调控目标参数获取方法[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
BAI Jinhua. Target parameter acquisition method of coregulation of CO₂-light in cucumber juvenile based on photosynthetic rate prediction model[D]. Yangling: Northwest A&FUniversity, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [70] 徐立鸿, 刘辉辉, 蔚瑞华. 基于高斯曲率最大化的蓝莓温室光照与 CO₂ 综合调控策略[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(7): 354-362.
XU Lihong, LIU Huihui, WEI Ruihua. Integrated control strategy of light and CO₂ in blueberry greenhouse based on maximizing gaussian curvature[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7): 354-362. (in Chinese with English abstract)
- [71] KIMURA K, YASUTAKE D, KOIKAWA K, et al. Spatiotemporal variability of leaf photosynthesis and its linkage with microclimates across an environment-controlled greenhouse[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 195: 97-115.
- [72] 辛萍萍. 效益优先的温室环境多因子协同调控模型与方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
XIN Pingping. Multi-factor coordination control model and method of greenhouse environment for benefit-priority[D]. Yangling: Northwest A&FUniversity, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [73] 徐立鸿, 徐赫, 蔚瑞华. 温室蓝莓光温协调优化模型与控

- 制策略研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 360-369.
- [74] WEN X, XU L, WEI R. Research on control strategy of light and CO₂ in blueberry greenhouse based on coordinated optimization model[J]. *Agronomy -Basel*, 2022, 12(12): 2988.
- [75] LIU T, YUAN Q, DING X, et al. Multi-objective optimization for greenhouse light environment using Gaussian mixture model and an improved NSGA-II algorithm[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 205: 107612.
- [76] 周静. 生菜生长光温协同影响机理及多层立体栽培光环境调控策略[D]. 江苏: 江苏大学, 2021.
ZHOU Jing. Synergistic effect mechanism of light and temperature on lettuce growth and light regulation strategy for stereoscopic cultivation[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [77] XU L, WEI R. Optimal greenhouse lighting scheduling using canopy light distribution model: a simulation study on tomatoes[J]. *Lighting Research and Technology*, 2020, 52(2): 233-246.
- [78] 赵文举, 马锋, 曹伟, 等. 水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 95-101.
ZHAO Wenju, MA Feng, CAO Wei, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of tomatoes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(2): 95-101. (in Chinese with English abstract)
- [79] 马新超, 轩正英, 谭占明, 等. 温室沙培黄瓜生产效应的水氮耦合方案优化[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(4): 809-820.
MA Xinchao, XUAN Zhengying, TAN Zhanming, et al. Optimization of water-nitrogen coupling scheme for production effect of cucumber in sand culture in greenhouse[J]. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 2023, 35(4): 809-820. (in Chinese with English abstract)
- [80] LI J, FENG S, QU Y, et al. Identifying the primary meteorological factors affecting the growth and development of Tartary buckwheat and a comprehensive landrace evaluation using a multi-environment phenotypic investigation[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(14): 6104-6116.
- [81] 程志强, 方圣辉. 基于水稻三维模型的表型参数提取及生物量估测[J]. 河南农业科学, 2023, 52(7): 144-153.
CHENG Zhiqiang, FANG Shenghui. Rice phenotypic parameters extraction and biomass estimation based on three-dimensional model[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(7): 144-153. (in Chinese with English abstract)
- [82] 李恺, 魏晓明, 何芬. 基于植物生理检测参数的温室环境控制研究进展[J]. 北方园艺, 2020(15): 130-137.
LI Kai, WEI Xiaoming, HE Fen. Research progress of greenhouse environmental control based on plant physiological detection[J]. *Northern Horticulture*, 2020(15): 130-137. (in Chinese with English abstract)
- [83] DENG L, WANG Z, WANG C, et al. Application of agricultural insect pest detection and control map based on image processing analysis[J]. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2020, 38(1): 379-389.
- [84] SIDDIQUEE K, ISLAM M, DOWLA M, et al. Detection, quantification and classification of ripened tomatoes: A comparative analysis of image processing and machine learning[J]. *IET Image Processing*, 2020, 14(11): 2442-2456.
- [85] GANG M, KIM H, KIM D. Estimation of greenhouse lettuce growth indices based on a two-stage CNN using RGB-D images[J]. *Sensors*, 2022, 22(15): 5499.
- [86] AFONSO M, FONTEIJN H, FIORENTIN F, et al. Tomato fruit detection and counting in greenhouses using deep learning[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 571299.
- [87] ZHAO G, CAI W, WANG Z, et al. Phenotypic parameters estimation of plants using deep Learning-Based 3-D reconstruction from single RGB image[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 2506705.
- [88] SHURYGIN B, CHIVKUNOVA O, SOLOVCHENKO O, et al. Comparison of the non-invasive monitoring of fresh-cut lettuce condition with imaging reflectance hyper spectrometer and imaging PAM-fluorimeter[J]. *Photonics*, 2021, 8(10): 425.
- [89] JAVORNIK T, CAROVIC S, GUNJACA J, et al. Monitoring drought stress in common bean using chlorophyll Fluorescence and Multispectral Imaging[J]. *Plants-Basel*, 2023, 12(6): 1386.
- [90] CHOI Y, SHIN J. Development of a transpiration model for precise irrigation control in tomato cultivation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 267: 109358.
- [91] 孙国祥, 李永博, 汪小昆, 等. 基于作物生理信息的夏季温室黄瓜节水灌溉模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 1-5.
SUN Guoxiang, LI Yongbo, WANG Xiaochan, et al. Watersaving irrigation model based on the information of crop physiological for the summer greenhouse cucumber[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [92] PEREIRA J, MOUAZEN A, FOO M, et al. A framework of artificial light management for optimal plant development for smart greenhouse application[J]. *PLoS One*, 2021, 16(12): e0261281.
- [93] 杨碧云, 徐永, 陈艺群. 人工补光在促进设施瓜果生产上的应用探讨[J]. 农业工程技术, 2022, 42(13): 23-26.
- [94] 张仲雄, 李斌, 冯盼, 等. 基于植株需光差异特性的设施黄瓜立体光环境智能调控系统[J]. 智慧农业, 2020, 2(2): 94-104.
- [95] ZHANG Zhongxiong, LI Bin, FENG Pan, et al. Stereoscopic light environment intelligent control system based on characteristic differences of facility cucumber plants light requirements[J]. *Smart Agriculture*, 2020, 2(2): 94-104. (in Chinese with English abstract)
- [95] NIU P, LI Y, TIAN H, et al. Design of adaptive LED

- supplemental lighting system based on LabVIEW[J]. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2016, 9(10): 373-384.
- [96] MOHAGHEGHI A, MOALLEM M. An energy-efficient PAR-Based horticultural lighting system for greenhouse cultivation of lettuce[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 8834-8844.
- [97] MOORE C, MEACHAM H, LEMONNIER P, et al. The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: from enzymes to ecosystems[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(8): 2822-2844.
- [98] 毕然, 张德忠, 张建喜. 面向形象设计的农作物温控系统应用研究[J]. *农机化研究*, 2022, 44(11): 229-233.
- BI Ran, ZHANG Dezhong, ZHANG Jianxi. Study of crop temperature control system based on image design[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(11): 229-233. (in Chinese with English abstract)
- [99] 张卓, 汪小昆, 赵进, 等. 温室盆栽作物根区加热系统的设计和试验[J]. *华南农业大学学报*, 2020, 41(1): 124-132.
- ZHANG Zhuo, WANG Xiaochan, ZHAO Jin, et al. Design and experiment of root heating system for greenhouse potted crops[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2020, 41(1): 124-132. (in Chinese with English abstract)
- [100] MAHMOOD F, GOVINDAN R, BERMAK A, et al. Data-driven robust model predictive control for greenhouse temperature control and energy utilisation assessment[J]. *Applied Energy*, 2023, 343: 121190.
- [101] ZHANG Y, YASUTAKE D, HIDAKA K, et al. CFD analysis for evaluating and optimizing spatial distribution of CO₂ concentration in a strawberry greenhouse under different CO₂ enrichment methods[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 179: 105811.
- [102] LI Y, DING Y, LI D, et al. Automatic carbon dioxide enrichment strategies in the greenhouse: A review[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 171: 101-119.
- [103] KOZAI T, KUBOTA C, TAKAGAKI M, et al. Greenhouse environment control technologies for improving the sustainability of food production[C]//XXIX International Horticultural Congress on Horticulture: Sustaining Lives, Livelihoods and Landscapes (IHC2014). Australia: ISHS, 2015.
- [104] 刘中华, 刘珂, 李招弟. 温室 CO₂ 智能释放系统的设计研究[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(4): 55-57.
- LIU Zhonghua, LIU Ke, LI Zhaodi. Design of intelligent release system of CO₂ in solar greenhouse[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(4): 55-57. (in Chinese with English abstract)
- [105] TAKEYA S, MUROMACHI S, MAEKAWA T, et al. Design of ecological CO₂ enrichment system for greenhouse production using TBAB+ CO₂ semi-clathrate hydrate[J]. *Energies*, 2017, 10(7): 927.
- [106] LI T, ZHANG M, JI Y, et al. Management of CO₂ in a tomato greenhouse using WSN and BPNN techniques[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2015, 8(4): 43-51.
- [107] ZHANG Y, YASUTAKE D, HIDAKA K, et al. Crop-localised CO₂ enrichment improves the microclimate, photosynthetic distribution and energy utilisation efficiency in a greenhouse[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 371: 133465.
- [108] HE X, WANG J, GUO S, et al. Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 149: 16-25.
- [109] WANG S, YIN H, ZHANG W, et al. Applied research of internet of things technology in agricultural greenhouse[C]//Journal of Physics: Conference Series. China: IOP Publishing, 2020, 1575(1): 012223.
- [110] 曹晏飞, 季李一珂, 王庭庭, 等. 基于 GPRS 技术的日光温室多段式自动通风控制系统设计[J]. *北方园艺*, 2020(12): 70-75.
- CAO Yanfei, JILI Yike, WANG Tingting, et al. Design of multistage automatic ventilation control system for Chinese solar greenhouse based on GPRS technology[J]. *Northern Horticulture*, 2020(12): 70-75. (in Chinese with English abstract)
- [111] DAHLAN N, HALID A, HASHIM T, et al. Temperature based control of ventilation system for optimum climate in tomato greenhouse[J]. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2018, 12(2): 655-661.
- [112] JUNG D, KIM H, KIM J, et al. Model predictive control via output feedback neural network for improved multi-window greenhouse ventilation control[J]. *Sensors (Switzerland)*, 2020, 20(6): 1756.
- [113] ZHANG J, ZHANG W, ZHANG F, et al. Research of adaptive nonlinear model by integrated irrigation of water and soils in greenhouse for environment and ecological balance[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. China: IOP Publishing, 2021, 804(4): 042087.
- [114] 赵鹏飞, 王旭峰, 胡灿, 等. 智能温室水肥一体化装备设计与试验[J]. *农机化研究*, 2022, 44(9): 224-228.
- ZHAO Pengfei, WANG Xufeng, HU Can, et al. Design and test of water and fertilizer integrated equipment in intelligent greenhouse[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(9): 224-228. (in Chinese with English abstract)
- [115] 卞东超, 杨发展, 赵国栋, 等. 蓝莓温室智能水肥一体化系统构建[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(8): 55-61.
- BIAN Dongchao, YANG Fazhan, ZHAO Guodong, et al. Construction of intelligent water and fertilizer integration system for blueberry greenhouse[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(8): 55-61. (in Chinese)

- with English abstract)
- [116] QIU Q, CAO S, KONG F, et al. Intelligent Control System of Water and fertilizer in greenhouse based on tomato phenotype discrimination and growth environment prediction[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. China: IOP Publishing, 2020, 440(4): 042081.
- [117] 郭斌, 刘思聪, 刘琰, 等. 智能物联网: 概念、体系架构与关键技术[J]. *计算机学报*, 2023, 46(11): 2259-2278.
- GUO Bin, LIU Sichong, LIU Yan, et al. AloT: The concept, architecture and key techniques[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2023, 46(11): 2259-2278. (in Chinese with English abstract)
- [118] 蔚瑞华, 徐立鸿, 陈立涵. 一种基于边云协同的温室环境控制物联网系统: 中国专利, CN112653728B[P]. 2022-04-05.
- [119] 高炎. 一种智慧农业大棚边云协同同步控制系统及其控制方法: 中国专利, CN114740764A[P]. 2022-07-12.
- [120] 夏鸽飞, 张中华, 吕名礼, 等. 基于云边端协同的可控农业温室环境智能控制系统及方法: 中国专利, CN116774747A[P]. 2023-09-19.

Analysis and prospect of the environmental control systems for greenhouse

HU Jin^{1,3}, YANG Yongxia², LI Yuanfang², HOU Junying², SUN Zhangtong², WANG Haoyu², HE Dongjian^{2,3*}

(1. College of information engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Key Laboratory for Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

Abstract: Facility agriculture is one of the most important indicators to achieve efficient and high-quality crop production in modern agriculture. Optimal environmental parameters can also be adjusted to improve crop growth, yield, and quality in the greenhouse. Therefore, environmental control and regulation technologies have been widely used to achieve efficient vegetable production. This review aims to summarize the recent research status in the field of environmental regulation in greenhouses. New approaches were also proposed for future research priorities. Greenhouse environment system was gradually shifted from the manual and timed to the threshold, feedback, and intelligent control systems, with the rapid development of artificial intelligence (AI) technology. Firstly, the main properties of different control systems were evaluated from an application perspective. Among them, the threshold control was simple and widely used, but it failed to adjust the control strategy in time following the dynamic changes of the external environment, in order to meet the needs of crops for light, water, and nutrients. The feedback control shared the stable environment through feedback regulation but was unsuitable for the complex multivariable conditions. Intelligent control was widely used to balance the interaction between different environmental factors in modern greenhouses. Afterward, the intelligent control methods were investigated for greenhouse environments, including fuzzy, decoupling, neural network, and environmental control, according to the crop phenotype parameters. Specifically, the mathematical model was independent of the controlled object in the fuzzy control, and easy to handle with nonlinear issues. However, the outline fuzzy was difficult to handle the sudden disturbances in the regulation system. In decoupling control, the appropriate control strategies were designed to transform the multiple parameters with coupling effects into a single variable. The regulation model was also constructed to integrate the multiple environmental factors and crop physiological needs. The intelligent control of the environment was realized in the development of greenhouse agriculture. The Neural networks were used to extract valuable information from a large amount of greenhouse environment data, thus providing powerful tools for the regulation models. The intelligent models mainly included single-factor, multi-factor, and multi-objective environment regulation. The data-driven method was one of the research hotspots in the intelligent regulation of greenhouse environments. However, the universality and economic benefits were the key limiting factors of regulation models. Efficient and accurate acquisition of phenotypic parameters greatly contributed to the fine management of greenhouse environments, indicating the intuitive, real-time monitoring, and dynamic regulation. However, it was still lacking in the interaction between phenotype and multiple environmental factors, which failed to apply directly in greenhouse production. In addition, the existing environmental control systems were evaluated for the light, temperature, air, ventilation, and irrigation greenhouse. Research directions were proposed to urgently improve and optimize the control system. Finally, future research and development trends were also recommended to construct the greenhouse environmental regulation, considering disturbance factors. Environmental regulation models were developed using crop growth and phenotype evaluation. A "cloud-edge-end" system of greenhouse environmental regulation was established to integrate multiple models. This finding can provide new ideas and references for the subsequent development of environmental control systems in greenhouses.

Keywords: greenhouse; model; environmental control; intelligent algorithm; regulation model; multi-objective optimization algorithm; environmental control system