设施蔬菜智能管控技术研究进展与展望

王 剑[1], 赵浩森[1], 马 越[1], 邢 斌[2], 朱文颖[2*]

(1. 北京市数字农业农村促进中心,北京 101117,中国; 2. 北京市农林科学院信息技术研究中心,北京 100097,中国)

摘 要: [**目的/意义**] 在科技飞速发展与消费者需求多样化的背景下,传统农业向信息化、智能化转型进程加快,开展设施蔬菜智能管控技术研究对提升蔬菜产量品质、保障市场稳定供应、推动蔬菜产业高质量发展具有重要意义。本文旨在为设施蔬菜智能化管控技术的发展提供科学依据与决策参考。[**进展**] 本文系统剖析了物联网、区块链、人工智能等信息技术在设施蔬菜管控关键领域的应用创新成果。在产地环境精准调控方面,实现了设施内温湿度、光照、二氧化碳浓度等环境参数的精准监测与智能调控,为蔬菜生长创造最优环境;在栽培信息化管理领域,整合水肥一体化智能设备、农业机器人作业系统与病虫害防治,优化全流程信息化管控,有效提升栽培效率与蔬菜品质;在仓储信息化管控方面,通过产地仓储保鲜、智能分等分选,以及追溯信息化平台的应用,有效提升蔬菜流通品质与安全保障水平。[**结论/展望**] 本文探讨了中国设施蔬菜智能管控技术发展过程中面临的传感器精度稳定性不足、调控决策滞后、设备协同机制缺失,病虫害防治整合性差、蔬菜品质追溯难及风险预警滞后等问题,提出硬件优化与多技术融合支撑精准感知及智能调控、强化设备协同优化、病虫害防治整合、数字孪生与元宇宙融合构建虚实联动仓储管理体系等建议对策。最后,展望了设施蔬菜智能化管控技术在产地环境精准调控、栽培管理信息化和仓储信息化管控3个方面的未来发展方向。

关键词: 设施蔬菜;仓储保鲜;智能化调控;水肥一体化;病虫害防治;人工智能

中图分类号: S24;S-1 **文献标识码:** A **文章编号:** SA202508003

引用格式:王剑, 赵浩森, 马越, 邢斌, 朱文颖. 设施蔬菜智能管控技术研究进展与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(1): 104-119. DOI: 10.12133/j.smartag.SA202508003

WANG Jian, ZHAO Haosen, MA Yue, XING Bin, ZHU Wenying. Research Progress and Prospects of Intelligent Control Technology for Facility Vegetable[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(1): 104-119. DOI: 10.12133/j.smartag.SA202508003 (in Chinese with English abstract)

0 引 言

随着居民消费升级和健康意识的持续增强,市场对蔬菜的品质和产量稳定性提出更高要求。传统露地栽培模式受季节变化、极端天气等自然环境因素的制约明显,难以持续稳定地满足市场需求。在此背景下,设施栽培通过构建温室大棚等人工可控环境空间,有效突破了自然条件限制,实现了蔬菜反季节、周年化生产,为保障市场供应、满足消费需求提供了有效解决方案[1]。目前,中国设施蔬菜产业仍面临发展不均衡、传统种植模式效率低等问题,在智能化管控技术应用上存在传感器精度稳定性不足、设备协同性差等瓶颈,严重制约了产业的高质量发展。在全球农业数字化转型背景下,将物联网、大数据、人工智能等信息技术与现代化农业管理深度融合,已成为提升蔬菜产业竞争力,推动其可持续发展的核心路径。SALEMINK 等[2]通过研究157篇文献,总结了发达国家数字信息技术发展与农村经济的关系,充分证实了信息技术对农业和农村经济的深远影响。发达国家在农业信息化领域构建了成熟的技术体系,为全球设施农业发展提供了可借鉴案例[3,4]。美国在农业信息化应用方面成果显著。BABAJANOV 等[1]指出互联网技术的广泛应用重塑了美国农业的生产模式,无人机、全球定位系统等技术在农村地区实现规模化应用,其

收稿日期:2025-08-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2001304);北京市农林科学院创新能力建设项目(KJCX20251003)

作者简介:王 剑,学士,副研究员,研究方向为农业信息化。E-mail: wanggaojie@126.com

*通信作者:朱文颖,硕士,高级工程师,研究方向为农业信息化,E-mail: zhuwy@nercita.org.cn

copyright©2026 by the authors

中物联网技术通过实时监测与精准调控温室环境，使美国温室蔬菜单产提升了40%。荷兰则聚焦环境精准调控，BLACKMORE[5]通过信息化技术实现农业生产精细化管理。YANG等[6]将大数据、虚拟现实等前沿技术融入传统农业，推动了农业生产向智能化方向转型。SHAFIK等[7]利用人工智能、深度学习和精准农业等技术在病虫害的早期快速完成准确检测，显著减少了化学农药的使用，提升了蔬菜的品质安全。

相较于发达国家，中国农业信息化虽起步较晚，但发展势头迅速，已构建起相对完整的农业信息化技术体系[8,9]。经历萌芽期、成长期、成熟期的阶段性演进，中国农业信息化逐步迈入以智慧化、数字化为核心特征的农业4.0时代[10,11]。众多学者围绕农业信息化展开深入研究。李瑾等和赵春江等[12-14]借鉴国际先进的现代农业模式，通过对比分析“互联网+”在国内外的应用现状与发展趋势，提出了中国现代农业发展的落地对策。王艳艳[15]系统梳理了国内农业信息化政策演变脉络，剖析了农村地区信息化现状并提出完善的建议。在设施蔬菜智能管控领域的研究同样取得显著成果。郑雅杰等[16]研究了土壤栽培条件下设施蔬菜精细化灌溉施肥模式对其生长及产量的影响，发现每日定量滴灌施肥增量20%的处理可实现设施蔬菜的高效生产。姜天月等[17]归纳了设施蔬菜生产过程中常见的昆虫天敌，为绿色病虫害防治提供了思路。顾文威等[18]研究了中小型机械在设施蔬菜园区的应用，实现了机械化有机施肥、土壤深翻换茬、起垄覆膜、植保和运输作业，显著降低了劳动强度和成本。刘志新等[19]通过变异系数分析、相关性分析、聚类分析、灰色关联度分析等多种数据分析方法，筛选出适合无土栽培的蔬菜品种。王琦等[20]研究不同比例红蓝光夜间补光对番茄果实生长生理的影响，确定了促进设施番茄生长、提高果实品质的最佳蓝红光补光比例。王文元和倪纪恒[21]研究不同遮阳部位与遮阳密度对番茄光合特性的影响，发现采用顶部单层遮阳能有效提升番茄光合特性。胡雯雯等[22]提出设施蔬菜水肥一体化系统，构建环境信息采集系统、智能服务平台、灌溉施肥系统，以及大棚自动控制系统，实时监控设施蔬菜生长环境和生长发育情况，并根据番茄不同生长阶段需肥规律，实现灌溉施肥的定时定量控制，提高水肥利用率。

基于上述国内外设施蔬菜智能管控技术的研究，本文聚焦物联网、区块链、人工智能等信息化技术在产地环境精准调控、栽培信息化管控、仓储信息化管控等关键环节的应用现状，深入剖析当前设施蔬菜智能管控所面临的技术瓶颈与挑战，针对问题提出面向未来的技术升级路径和解决方案，旨在为设施蔬菜智能管控技术发展提供理论支撑与实践参考，助力提升设施蔬菜生产效率与品质，优化资源配置，推动构建现代化、数字化、智能化的设施蔬菜产地管控系统，以期为产业高质量发展提供有力支持。

1　设施蔬菜农业发展现状

1.1　全球设施蔬菜农业发展现状

设施农业通过人工构建可控环境空间，实现作物的优质高产[23]。国际农业工程学会（International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering, CIGR）将其定义为“利用工程手段构建可控生长空间，通过主动干预环境参数实现农业生产要素优化配置的集约化生产方式”，强调了环境因子的主动调控能力，将设施农业与传统被动保护型农业进行明确区分[24]。从区域发展特征来看，全球设施蔬菜形成发达国家引领技术、发展中国家扩展规模的差异化格局。荷兰设施蔬菜具有先进的温室设备，生产高度专业化。美国设施蔬菜具有集中化规模化、区域专业化与社会化服务体系完善的特征，机械化与自动化水平位居世界前列，其生产流程已实现全程机械化作业，涵盖良种选育、播种、收获、加工，以及运输等关键环节。以色列则通过先进的多用途机器人技术，可在温室环境中高效完成各类劳动密集型作业，自主开发设计研制自动收割机，通过减少采摘过程中蔬菜损害的方式来提高生产效率。

1.2　中国设施蔬菜农业发展现状

中国国家标准《高标准农田建设通则》（GB/T 30600—2022）侧重生产功能，将设施蔬菜定义为采用透光覆盖材料、环境调控设备和栽培技术体系等手段，实现反季节或区域适应性生产的农业形态[25]。对比国际定义，中国标准未明确要求环境因子的主动控制能力，反映中国设施农业发展的阶段特征。相较于露地种植，设施蔬菜栽培通过融合科学管理方法与现代信息技术，实现生产的系统化、精细化控制，展现出环境可控性强、生育期缩短、产量倍增等显著优势[26]。现代设施蔬菜信息

化系统包括感知层、传输层、认知层和控制层，依托日光温室、连栋温室和塑料大棚等设施类型，实现蔬菜全生育期的环境精准调控、生长状态动态监测、资源高效利用及产量品质协同提升[27]。

中国作为设施蔬菜生产的大国，其设施蔬菜种植面积约达256.7万hm^2，播种面积约为400万hm^2[28]。该领域亩产为同类作物露地栽培的3.5倍，年产量达2.6亿t，仅利用3%的耕地便产出了种植业17%产值的产品，总产值突破1万亿元，占蔬菜总产值的45%左右，产生了显著的经济效益[29, 30]。然而，蔬菜产业发展仍面临诸多挑战。以设施番茄为例，2023年中国设施类型结构如表1所示，基础设施智能化水平较低，环境主动调控技术仍有待提升，约63%设施处于环境半调控状态，环境自动控制系统的覆盖率仅为28.7%，远低于荷兰（95%）和日本（82%）等设施农业发达国家。设施类型结构失衡，传统日光温室为主占总面积61.2%，现代化连栋温室占比不足8%，导致生产效率受限[30]。

表1 2023年中国番茄设施类型结构

Table 1 Structure of tomato facility types in China in 2023

设施类型	面积占比/%	自动化水平/%	单产/(kg/m^2)
日光温室	61.2	15～20	18～22
塑料大棚	30.8	<5	12～15
连栋温室	7.6	70～85	30～35
植物工厂	0.4	>95	40～45

2 设施蔬菜智能管控技术应用现状

设施蔬菜智能管控技术是指将物联网、区块链、人工智能等信息技术应用于设施蔬菜的关键领域，主要涵盖产地环境精准调控、栽培管理信息化、仓储信息化管控3个方面，为蔬菜产业可持续发展提供强有力的技术支持，如图1所示。

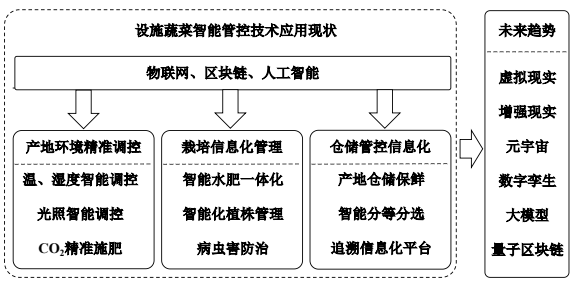


图1 设施蔬菜智能化管控技术应用现状框架图

Fig. 1 Framework diagram of current applications of information-based management and control technologies in vegetable production facilities

2.1 产地环境精准调控

产地环境精准调控主要应用物联网技术实现蔬菜在温室大棚内生长过程中的实时监测、数据采集、传输与分析，可划分为数据采集层、数据传输层、数据处理层和应用层4个层次[31]。数据采集层是物联网的核心环节，通过在设施内部署温湿度、气体传感器、全球定位系统等智能设备，实现对设施蔬菜生长环境温湿度、产品位置信息、品质检测数据等的实时监测与采集，环境采集模块主要由传感器模块、通信模块和电源模块组成[32]，该模块通过485接口，利用单片机完成传感器数据的采集工作，对蔬菜长势具有显著影响的环境参数主要包括温湿度、光照和CO_2浓度等，环境信息采集模块可对上述参数进行实地采集，并通过4 G数据传输单元（Data Transfer Unit, DTU）通信模块将数据上传至服务器监控平台，为后续数据处理与调控决策提供基础数据支持[33, 34]。环境信息采集模块如图2所示。作物本体监测方面，德国综合技术通讯公司的SF-4M茎流仪采用热平衡原理，通过测量加热环与参比环的温差计算蒸腾速率，在监测中的实际误差小于5%[35]。以色列菲泰克农业科技公司的Fruit-Sence果实膨大传感器采用应变片技术，分辨率达0.1 mm，可精准追踪果实直径变化与生长速率的关系（R^2>0.93）[36]。

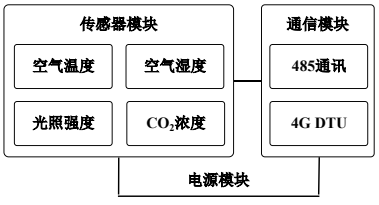


图2 环境信息采集模块

Fig. 2 Environmental information acquisition module

在数据传输层，将采集的多源异构数据稳定传输到云端服务器或边缘侧中央数据库，构建多网络协同传输架构，通过对比测试验证，较传统紫蜂协议技术，低功耗广域网技术在设施蔬菜温室环境中展现出显著优势[37]。在数据处理层，通过异常值剔除等方式完成海量数据清洗和高效存储分析，提取环境参数与蔬菜生长状态的关联特征，为调控决策提供有价值的数据支持。在应用层，基于处理后的数据搭建监测、预警、调控一体化系统平台，实现技术成果的产业化落地，显著提高设施蔬菜年平均产量[38]。

2.1.1　温度智能调控系统

温度智能调控系统监测、调节蔬菜从种子萌芽到收获各个阶段需要适宜的温度，以番茄生长阶段为例，不同生育期对各环境参数需求存在差异，温度、光合光量子通量密度（Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD）、相对湿度（Relative Humidity, RH）、CO_2如表2所示。设施栽培中，冬季保暖和夏季降温是温度调控两大核心问题。

表2　设施番茄各生育期环境参数优化值

Table 2　Optimization values of environmental parameters for facility tomatoes at different growth stages

生长阶段	昼温/℃	夜温/℃	PPFD/(μmol/(m²·s))	RH/%	CO_2/(μmol/mol)
幼苗期	22～24	16～18	200～400	60～65	400～600
开花期	24～26	18～20	300～500	55～60	800～1 000
结果期	26～28	20～22	500～800	50～55	1 000～1 200
成熟期	28～30	22～24	300～500	45～50	600～800

日光温室是中国北方地区最为普遍的设施类型，为提升冬季保温性能，科研人员开展了大量实践与创新。在温室结构优化方面，采用墙体设计厚度可达1.5 m，部分地区采用空心墙体并填充保温材料，显著增强墙体的隔热保温能力。马少辉等[39]设计了一套基于模糊比例-积分-微分（Proportional Integral Derivative, PID）控制的塑料大棚温湿度系统，由温湿度测量模块、控制输出模块、显示和报警模块组成，以加强模块间通信的连接性和抗干扰性，使效率与稳定性得到提高。除了传统塑料薄膜外，增设内保温幕和外保温被，内保温幕选择保温效果良好的无纺布或聚乙烯保温膜，夜间覆盖作物上方，可有效减少室内热量向上散失，外保温膜傍晚覆盖在温室顶部和前屋面，材质多为保温棉和泡沫板等，进一步阻挡热量向室外传导。两者结合可使冬季室温提高2～3 ℃，为蔬菜安全越冬提供有力保障。高温阶段主要通过通风、遮阳及湿帘风机降温等措施降低室内温度。通风系统不断优化，新型通风系统采用顶侧通风结合方式，配备智能化通风控制设备，通过安装室内温度传感器、风速传感器等，实时监测室内外温度差和风速。杨士晔[40]通过梯度隶属度函数构建不同天气条件下日间温度适宜度函数，温室番茄栽培的温度适宜度函数模型如公式（1）所示。

$$\mathrm{Opt}(T_{\mathrm{air},\,i_{(w)}})=\begin{cases}\dfrac{T_{\mathrm{air},\,i_{(w)}}-T_{\mathrm{air}G0,\,\min}}{T_{\mathrm{air}G1,\,\min(w)}-T_{\mathrm{air}G0,\,\min}}, & T_{\mathrm{air},\,i_{(w)}}\in[\,T_{\mathrm{air}G0,\,\min},\,T_{\mathrm{air}G1,\,\min(w)}\,)\\ 1, & T_{\mathrm{air},\,i_{(w)}}\in[\,T_{\mathrm{air}G1,\,\min(w)},\,T_{\mathrm{air}G1,\,\max(w)}\,)\\ \dfrac{-(T_{\mathrm{air},\,i_{(w)}}-T_{\mathrm{air}G0,\,\max})}{T_{\mathrm{air}G0,\,\max}-T_{\mathrm{air}G1,\,\max(w)}}, & T_{\mathrm{air},\,i_{(w)}}\in[\,T_{\mathrm{air}G1,\,\max(w)},\,T_{\mathrm{air}G0,\,\max}\,]\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\mathrm{Opt}(T_{\mathrm{air},\,i_{(w)}})$为$w$天气条件下，$i$时刻空气温度的适宜度；$T_{\mathrm{air},\,i_{(w)}}$为$w$天气条件下，$i$时刻的空气温度；$T_{\mathrm{air}G0,\,\min}$为番茄栽培最低气温边界值；$T_{\mathrm{air}G1,\,\min(w)}$为$w$天气条件下，番茄栽培最适温度最小边界值；$T_{\mathrm{air}G1,\,\max(w)}$为$w$天气条件下，番茄栽培最适温度最大边界值；$T_{\mathrm{air}G0,\,\max}$为番茄栽培最高气温边界值。所有天气条件下，夜间温度适宜函数模型统一使用公式（2）表示。

$$\mathrm{Opt}(T_{\mathrm{air},\,i_{(\mathrm{night})}})=\begin{cases}\dfrac{0.5(T_{\mathrm{air},\,i_{(\mathrm{night})}}-T_{\mathrm{air}G0,\,\min})}{T_{\mathrm{air}G0.5,\,(\mathrm{night})}-T_{\mathrm{air}G0,\,\min}}, & T_{\mathrm{air},\,i_{(\mathrm{night})}}\in[\,T_{\mathrm{air}G0,\,\min},\,T_{\mathrm{air}G1,\,\min(\mathrm{night})}\,)\\ 1, & T_{\mathrm{air},\,i_{(\mathrm{night})}}\in[\,T_{\mathrm{air}G1,\,\min(\mathrm{night})},\,T_{\mathrm{air}G1,\,\max(\mathrm{night})}\,)\\ \dfrac{-(T_{\mathrm{air},\,i_{(\mathrm{night})}}-T_{\mathrm{air}G0,\,\max})}{T_{\mathrm{air}G0,\,\max}-T_{\mathrm{air}G1,\,\max(\mathrm{night})}}, & T_{\mathrm{air},\,i_{(\mathrm{night})}}\in[\,T_{\mathrm{air}G1,\,\max(\mathrm{night})},\,T_{\mathrm{air}G0,\,\max}\,]\end{cases}\tag{2}$$

式中：$\mathrm{Opt}(T_{\mathrm{air},\,i_{(\mathrm{night})}})$为所有天气条件下，夜间$i$时刻空气温度的适宜度；$T_{\mathrm{air},\,i_{(\mathrm{night})}}$为所有天气条件下夜间$i$时刻的室内空气温度，℃；$T_{\mathrm{air}G1,\,\min(\mathrm{night})}$为夜间番茄栽培最适温度最小边界值；$T_{\mathrm{air}G1,\,\max(\mathrm{night})}$为夜间番茄栽培最适温度最大边界值。

2.1.2　湿度协同控制技术

湿度协同控制技术能够确保设施蔬菜所在环境的适宜湿度，直接影响蔬菜病害发生率，可通过通风换气、滴灌与微喷灌、除湿设备等技术的多参数耦合控制实现湿度调节。通风换气是降低设施内空气湿度最经济有效的方法。滴灌系统将水分和养分缓慢、均匀地滴入作物根部附近土壤，使土壤湿度保持适宜植株生长的范围，减少土壤表面水分蒸发，可降低空气相对湿度10%～15%。微喷灌技术通过微喷头将水以细小雾滴形式喷洒在作物表面和根部周围，兼具降温增湿作用。除湿设备主要包括冷凝式除湿机和转轮式除湿机。此外，地面覆盖地

膜也可有效减少土壤水分蒸发，在降低空气湿度的同时提高地面温度，促进蔬菜根系生长。刘传龙[41]针对设施番茄栽培环境中的温湿度因子展开研究，通过融合粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）与神经网络算法，建立了与大棚番茄生长需求高度适配的最优温湿度调控模型。该模型为大棚番茄生长环境的优化提供了理论支撑，可有效促进番茄产量与品质的协同提升。计算温室番茄栽培的空气相对湿度适宜度函数模型可整理为公式（3）[40]。

$$\mathrm{Opt}(\mathrm{RH}n_i)=\begin{cases}\dfrac{\mathrm{RH}n_i-\mathrm{RH}n_{G0,\min}}{\mathrm{RH}n_{G1,\min}-\mathrm{RH}n_{G0,\min}}, & \mathrm{RH}n_i\in[\mathrm{RH}n_{G0,\min},\mathrm{RH}n_{G1,\min})\\ 1, & \mathrm{RH}n_i\in[\mathrm{RH}n_{G1,\min},\mathrm{RHn}_{G1,\max})\\ \dfrac{-(\mathrm{RH}n_i-\mathrm{RH}n_{G0,\max})}{\mathrm{RH}n_{G0,\max}-\mathrm{RH}n_{G1,\max}}, & \mathrm{RH}n_i\in[\mathrm{RH}n_{G1,\max},\mathrm{RH}n_{G0,\max}]\end{cases} \tag{3}$$

式中：$\mathrm{Opt}(\mathrm{RH}n_i)$为生长阶段$n$的$i$时刻空气相对湿度的适宜度；$\mathrm{RH}n_i$为生长阶段$n$的$i$时刻温室内空气相对湿度，$n$为某一生长环节；$\mathrm{RH}n_{G0,\min}$为第$n$生长阶段番茄栽培相对湿度最小值；$\mathrm{RH}n_{G1,\min}$为第$n$生长阶段最适栽培相对湿度最小值；$\mathrm{RH}n_{G1,\max}$为第$n$生长阶段最适栽培相对湿度最大值；$\mathrm{RH}n_{G0,\max}$为第$n$生长阶段番茄栽培相对湿度最大值。

2.1.3 光照调控技术

光照调控技术通过精准调节蔬菜生长所需的PPFD、光周期及光谱组成，是设施蔬菜实现高产优质的重要保障。蔬菜光合作用效率与产量品质形成，高度依赖光量、光周期及光质的协同适配，但由于覆盖材料遮挡、温室结构遮阳及自然光照季节性变化等因素，导致蔬菜光合效率下降。针对上述瓶颈，需构建硬件优化、智能调控一体光照提升系统。覆盖材料与结构的被动优化技术选择透光率达90%以上的塑料薄膜，减少水滴凝结和灰尘附着。优化温室结构设计通过屋面角度和跨度，减少骨架遮阳面积，提高设施内光照均匀度。基于智能系统的主动调控技术构建感知、决策、执行闭环管控系统，核心采用量子传感器实时捕获PPFD动态，由物联网控制器调用作物光需求专家数据库，通过可调光发光二极管驱动器实现光谱无级调节、PPFD精准输出，增加果实中可溶性固形物（Soluble Solids Content, SSC）、可溶性糖、维生素C含量和糖酸比，显著提高果实品质[42]。彭琛等[43]研发的蔬菜大棚环境监测系统是多因子协同管控技术延伸，引入OpenMV机器视觉模块，可实现对大棚内温度、湿度、光照等关键环境参数的高效采集、智能处理及深度分析，便于用户直观掌握棚内数据动态并实施针对性调控。

2.1.4 CO_2精准施肥技术

CO_2精准施肥技术能够自动调节设施内CO_2浓度，作为光合作用的重要原料，对蔬菜生长发育和产量形成起关键作用。在设施栽培中，由于空间密闭，植株光合作用消耗大量CO_2，导致设施内CO_2浓度在白天低于外界，成为限制光合作用的重要因素。常用的CO_2施肥方法主要有化学反应法、钢瓶气法和生物发酵法等。化学反应法通过硫酸与碳酸氢铵反应产生CO_2。钢瓶气法将压缩的CO_2气体通过减压装置输送到设施内，配备CO_2浓度传感器和自动控制系统，自动调节控制CO_2释放量，确保设施内浓度维持在适宜水平。生物发酵法利用微生物发酵有机物产生CO_2。张海辉等[44]设计了一套基于无线传感网的设施环境CO_2精准调控系统，该系统包括主控节点、监测节点及补施节点，通过Zig Bee协议实现节点间信息交互，可精准均匀补充CO_2。

2.2 栽培管理信息化

2.2.1 智能水肥一体化

智能水肥一体化是通过数字化手段整合灌溉与施肥作业的协同调控技术体系，可满足温室环境精准管控需求。PARADKAR等[45]构建了一套基于传感器的智能水肥一体化系统对设施番茄的生长过程管理优化，与对照组相比显著提高了设施番茄的产量，有效提升了节水效率。张宝峰等[46]基于物联网架构开发了智能水肥一体化系统，该系统的采集控制层通过单片机和传感器完成温室环境参数采集，通过可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）、传感器和执行器组成执行模块，控制水泵和阀门完成施肥灌溉，通过通用分组无线技术（General Packet Radio Service, GPRS），DTU和基站组成网络传输层，将数据传输到终端应用层，系统总架构如图3所示。

在温室大棚智能水肥一体化系统中，AT80C51单片机作为核心控制单元负责系统的整体调度与协调，该单片机通过数据接口与土壤湿度传感器实时通信，持续采集并处理土壤信息，当检测值低于阈值时触发灌溉控制逻辑，通过驱动继电器模块以启

动灌溉水泵[47]。康艺凡等[48]基于无线传感器物联网监控与自动控制技术，耦合蔬菜作物的水肥需求模型，设计并开发了一套集环境感知、智能决策与自动控制、灌溉施肥于一体的智能水肥一体化系统，该系统能够实现对蔬菜生长环境与生理状态的实时监测与动态感知，使水肥利用效率提升40%，实现按需足量灌溉。马宇飞[49]对温室大棚与水肥一体化智能监控系统进行了设计，以PID算法为核心，融合反向传播神经网络与PSO，构建了智能控制算法，有效提升温室大棚水肥一体化控制的效率与精度。

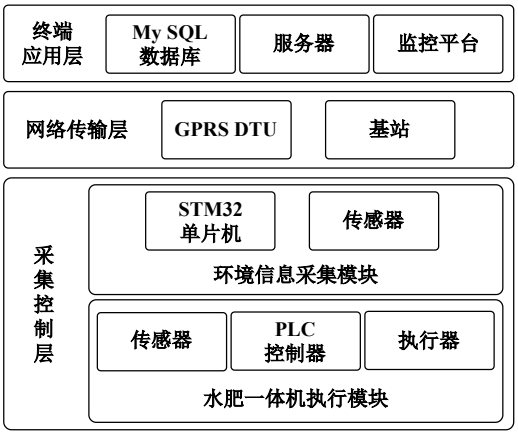


图3　水肥一体化系统总体架构图

Fig. 3　Overall architecture of the system

2.2.2　智能化植株管理

智能化植株管理作为现代设施农业的重要技术手段，包括吊蔓、整枝、打杈、疏花、疏果、授粉等多个环节的信息化应用，成为蔬菜高产优质目标的关键技术体系[50]。人工智能的发展为智能化植株管理提供有力支持，将人工智能技术引入植株管理流程，有效提升了劳动效率，优化了植株生长调控的精准度。人工智能主要涵盖机器学习、深度学习和计算机视觉等[51]。机器学习通过数据预处理、模型训练优化等流程，利用随机森林和支持向量机等算法提取数据特征，实现预测与决策[52]。深度学习基于神经网络处理复杂数据，涉及人工神经网络、卷积神经网络和循环数据网络等，其中卷积神经网络与机器视觉结合适用于图像等空间数据的处理，循环神经网络则擅长分析序列数据[53]。

智能农业机器人是人工智能在设施蔬菜领域的载体。自动吊蔓机器人通过电机驱动和轨道系统，根据植株生长高度自动调整吊绳长度，确保植株直立生长，节本增效35%。智能整枝机器人采用图像识别技术准确区分主枝、侧枝和徒长枝等，机械臂和刀具实现精准修剪，识别准确率高达96.7%，基于机器视觉的疏果设备，利用YOLO（You Only Look Once）算法分析果实图像，识别畸形果、病果及多余果实，高压气流去除成功率高达98%，确保果实大小均匀、品质优良。张华等[54]针对设施番茄精准授粉机器人的研究进展与未来发展方向展开系统性探究，重点剖析了番茄花朵目标识别、检测等核心技术环节，梳理了采摘末端执行器研发过程中存在的关键问题并给出相应解决路径，同时对智能化植株管理的发展前景进行了前瞻性分析与展望。

2.2.3　病虫害信息化防治

病虫害信息化防治作为现代植保体系的核心构成，通过物联网感知、大数据分析和智能装备的集成应用，实现了物理防治精准化、生物防治智能化和化学防治绿色化的协同创新。物理防治利用光、热、声波、辐射等技术控制害虫，主要包括智能防虫网系统、黄板蓝板诱杀、太阳能杀虫灯物联网等。智能防虫网系统是在通风口设置防虫网。QING等[55]设计了基于计算机视觉的识别系统，利用YOLO模型及其轻量级变体来识别植株病虫害，使烟粉虱、蚜虫等害虫虫口密度降低80%，准确率达98.7%。黄板蓝板诱杀利用害虫趋色性诱捕，基于大数据和机器学习预测害虫发生趋势，通过图像识别统计害虫种类和数量调整悬挂策略，结合位置优化算法降低诱杀盲区37%[56]。梁会成[57]提出两种番茄叶片病害检测方法，分别基于轻量级YOLOv5模型与Swin-YOLOv5模型构建而成。相较于原模型，这两种检测模型的精确率及平均精度均值均有提升，且检测模块具备可扩展性，为用户后续开发及加载更多检测模型提供了可行路径。张袁源[58]提出一种基于残差重采样网络与双线性注意力机制的病害早晚期识别算法。该算法具备较强的细微特征捕获能力及多尺度特征提取能力，能够结合无人机或智能喷雾设备实现精准施药，从而减少农药用量，对于蔬菜早期病害的及时发现与晚期病害的精准识别均具有重要指导价值。太阳能杀虫灯物联网通过特定波长诱捕鳞翅目害虫，有效控制种群数量，使其密度降低70%。

生物防治利用有益生物及其代谢产物控制病虫害，核心技术包括生物农药应用等，如苏云金杆菌可通过产生毒蛋白控制害虫，对非靶标生物和环境影响小，可实现化学农药减量52.7%。化学防治以

绿色、环保、可持续的方法控制害虫以减少生态影响，常见的化学防治技术包括信息素、植物源农药、昆虫生长调节剂、核糖核酸（Ribonucleic Acid, RNA）干扰技术等，如表3所示。

表3 绿色化学防治的主要技术

Table 3 The main technologies of green chemical control

名称	特点	优点	缺点
信息素	通过干扰昆虫交配,减少害虫种群,防治成本降低40%	精准靶向、抗性风险低、资源高效、生态兼容	合成复杂、稳定性差、应用局限性、时效性短、推广受限
植物源农药	从植物中提取具有杀虫、杀菌或除草活性的化合物	天然安全、环境兼容、多靶点、资源可再生	制备成本高、稳定性不足、速效性差、原料局限、靶向性模糊
昆虫生长调节剂	通过干扰昆虫蜕皮、繁殖等生长发育过程,提供有效害虫控制手段	靶向调控、抗性延缓、亚致死效应、兼容性强	速效性差、温度敏感、施用局限、残留风险、成本高
RNA干扰	通过特异性降解目标基因的mRNA来抑制基因表达	靶标专一性强、无残留、抗药性风险低、开发周期短	合成成本高、环境稳定性差、施用技术要求高、政策审批滞后

2.3 仓储信息化管控

仓储信息化管控对维持蔬菜品质、延长货架期及保障产业效益至关重要。蔬菜采后易受环境影响导致品质劣变，损失率较高，通过融合信息化技术，能够实现产后保鲜、分拣到追溯全流程的智能化管控。其中，仓储保鲜主要包括预冷保鲜、气调保鲜、涂膜保鲜和生物保鲜，智能分等分选主要包括外部特征分选和内部品质分选，追溯信息化平台主要包括信息感知、信息处理、信息决策，以及区块链技术。蔬菜产后仓储管控信息化体系如图4所示。

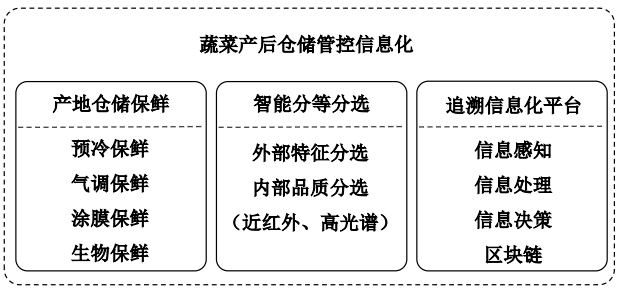


图4 蔬菜产后仓储管控信息化体系图

Fig. 4 Information system diagram for storage and control of vegetables after harvesting

2.3.1 仓储保鲜技术

仓储保鲜技术包括预冷保鲜、气调保鲜、涂膜保鲜和生物保鲜等，通过不同原理提升产后蔬菜保鲜效果，延缓蔬菜成熟与腐败。

预冷保鲜通过迅速降低蔬菜的田间热量，抑制其呼吸作用和微生物繁殖，保持蔬菜的优良感官品质和营养价值[59, 60]。不同蔬菜冷藏温度不同，相同蔬菜在不同成熟期冷藏温度也不同，以番茄为例，不同成熟度番茄的冷藏温度参数如表4所示。预冷保鲜技术可分为真空预冷、水预冷和空气预冷[44]。真空预冷通过降低冷却室内气压加速蔬菜降温。DIRAPAN等[61]研究表明，通过采用真空预冷技术，西蓝花的市场货架期可从原本5 d显著延长至12 d，为西蓝花的流通保鲜提供了有效的技术支撑。WANAKAMOL等[62]研究结果显示，采用预冷技术不仅能显著延缓鲜切生菜表面的褐变进程、有效抑制微生物的生长繁殖，还将生菜货架期从3 d延长至9 d，且该技术应用所产生的额外成本仅为1.05%。水预冷包括冰水预冷和冷水预冷2种方式。ZHANG等[63]研究表明，对甜玉米冰水预冷处理，能够在存储及流通过程中有效维持其品质与质量。空气预冷包括强制通风预冷和压差预冷2种方式。WANG等[64]探究了卷心莴苣通风预冷在2种运行模式下的冷却效率，结果表明，这2种模式的预冷时间较人工经验估算时间分别缩短43.2%和18.8%。王佳捷等[65]研究表明，采用高风速与低风温的压差预冷方式，不仅能有效缩短预冷时间、减少电能消耗，还可提升西蓝花的贮藏品质，降低其失重率和腐烂率，延缓品质劣变进程。

表4 不同成熟期番茄冷藏参数优化

Table 4 Optimization of refrigeration parameters for tomatoes at different maturity stages

成熟阶段	适宜温度/℃	相对湿度/%	预期保鲜期/d
绿熟期	10～13	85～90	28～35
转色期	8～10	80～85	21～28
红熟期	2～4	90～95	14～21

气调保鲜通过调节仓储环境气体成分，降低氧气含量，提高CO_2浓度，抑制蔬菜的呼吸代谢，保持蔬菜休眠状态，减少营养消耗，有效保持其品质，适合长期贮藏情况[66]。虞新新等[67]研究表明，4%的低氧环境可显著抑制番茄呼吸作用，维持番茄品质且稳定性最佳。大型种植基地和仓储中

心通过气调库精确调控氧气、CO_2和氮气比例，将氧气含量控制在2%～5%，CO_2含量维持在3%～6%，结合温度控制显著延长番茄保鲜期，保持果实硬度、色泽和口感[68]。气调包装能够调节包装内气体成分，是气调保鲜常见的实现方式[69]。孙小静等[70]通过对比实验研究发现，采用厚度为MP40的气调包装，能够有效维持小米椒低温贮藏条件下的商品性，并延长其贮藏时间。

涂膜保鲜是在蔬菜或果实表面涂抹可食用膜，形成半透性屏障，减少水分散失、调节气体交换，同时可添加防腐剂、抗氧化剂等增强保鲜效果，常用涂膜材料有壳聚糖、海藻酸钠、淀粉等[71]。壳聚糖膜可降低蔬菜或果实贮藏期间的呼吸强度和失重率，延缓维生素C和有机酸降解，抑制蔬菜或果实的腐烂。于有伟等[72]研究了水溶性壳聚糖/可得然胶可食性复合涂膜对番茄灰霉的抑制作用及机理，结果显示，复合涂膜对灰葡萄孢霉菌生长有显著的抑制作用，显著抑制病斑的扩大。该技术成本低、操作简便，适用于产地初加工环节，与冷藏、气调等结合可进一步增强保鲜效果。

生物保鲜是指利用有益微生物或其代谢产物抑制有害微生物生长，从而保障蔬菜或果实品质的技术。赵月[73]研究表明，将拮抗酵母菌悬浮液喷洒于番茄表面后，可定植并形成生物保护膜，能够替代或减少化学杀菌剂使用。该技术具有绿色环保的特点，但面临成本和稳定性两大挑战，一方面菌剂成本较化学保鲜高30%～35%；另一方面若冷链运输中出现断链情况，会导致酵母菌失活率超过15%，实现该技术的大规模推广，还需要进一步对其优化[74]。

2.3.2　智能分等分选技术

智能分等分选技术借助多传感器技术、机器视觉技术及人工智能模型，能够快速、高效且智能化地评估蔬菜或果实的物理特性与内部品质[75]。该技术不仅可有效提升蔬菜或果实的分拣质量，还能优化分拣效率与准确性，降低人工成本，满足市场对蔬菜或果实的多样化需求。下文将从基于图像处理的外部物理特性分选与基于无损检测的内部品质分选两个维度，系统梳理国内外智能分等分选技术的研究现状与进展。

蔬菜的外部物理特性，如大小、形状、颜色、表面缺陷，是决定其品质和市场价值的重要指标，直接影响消费者的接受程度。在外部特征分选方面，基于图像处理技术的外部物理特性分选方法，已成为提升分选效率与精度的关键技术支撑[76]。ZUO[77]采用彩色相机采集番茄图像，结合图像预处理与特征提取技术，采用支持向量机算法对番茄进行分选，通过分析颜色、纹理与形状特征实现3级分类，准确率高达99.9%。RAIKAR等[78]采用智能手机采集秋葵图像，按照长度划分为小、中、大和特大4类，采用机器视觉技术和亚历克斯神经网络、谷歌神经网络、50层残差神经网络的深度学习模型进行分级，在3 200个样本数据集上的准确率分别为63.45%、68.99%和99%。JAHANBAKHSHI和KHEIRALIPOUR[79]采用图像处理技术对胡萝卜进行形状分类，选取135个不同规则与不规则形状的样本，提取长度、周长等特征后，经特征选择用线性判别分析和二次判别分析方法分类，准确率分别为92.59%和96.30%。

蔬菜内部品质分选技术主要基于无损检测原理，旨在对糖度、硬度、水分、成熟度、SSC含量以及损伤、农药残留和病害等内部特性进行快速与非破坏性评估，其中，近红外光谱和高光谱成像技术是应用最广泛的两种方法[80]。近红外光谱检测技术通过解析样品在近红外光波段的吸收、反射及透射特性，可实现对果蔬内部成分的定性判别与定量测定。王加龙等[81]研发了一套以微型光谱仪为核心的便携式可见近红外光谱检测系统，用于对贝贝南瓜SSC含量及硬度的快速无损检测，结果表明，相较于其他算法，基于反向传播神经网络与多元线性回归所建立的预测模型具有最优精度与稳定性。邢书海等[82]基于近红外光谱系统采集了180个西葫芦样本，经过多种预处理后建立主成分回归、逐步多元线性回归和偏最小二乘回归硬度预测模型，结果表明偏最小二乘回归模型效果最优，校正集、预测集相关系数分别为0.979、0.976，验证模型相关系数为0.886。张雯雯等[83]探索近红外光谱结合深度学习网络对紫菜水分定量检测的可行性，收集479组干条斑紫菜光谱及水分数据，经预处理后建立4种传统模型与1种卷积神经网络模型，结果表明，平滑结合二阶导数预处理的卷积神经网络模型最优，优化后预测效果更佳，可快速准确进行紫菜的无损检测。高光谱成像技术通过采集蔬菜在特定光谱范围内的图像信息，提取反映其内部品质的特征参数，进而实现对蔬菜内部品质的快速、无损、精准分选。徐一新等[84]研究了利用高光谱技术对番茄内部品质的精准判断，采用多元散射校正法、竞争性自适应重加权采样法、偏最小二乘法

融合方法监测番茄糖度，可有效实现番茄糖度监测，其决策系数高达0.904。

2.3.3 追溯信息化平台

追溯信息化平台作为蔬菜产后全流程透明化管理与质量安全精准管控的核心支撑，对保障蔬菜品质安全具有关键作用。追溯信息化平台由信息感知、信息处理和信息决策3部分组成，如图5所示[85]。在信息感知层面，采用物联网技术，将传感器、包装标识、射频识别、近场通信、电子交易识别及移动终端等感知技术，应用于生产、加工、储运、交易及监管溯源各环节，以实现追溯数据的全面采集[86, 87]。在信息处理方面，借助大数据、人工智能与区块链等技术对多源异构数据进行融合处理，达成数据清理与标准化治理、质量安全风险智能预警及全流程追溯链条动态重构，为农产品质量安全追溯技术体系赋予强劲的数据驱动效能[88, 89]。在信息决策方面，为蔬菜产业生产加工、物流、批发零售、消费者、政府职能部门全链条提供追溯信息化平台。

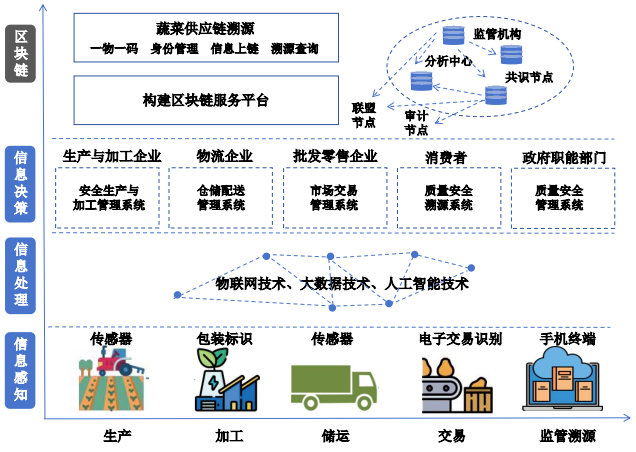


图5 设施蔬菜追溯体系图

Fig. 5 Facility vegetable traceability system diagram

区块链技术在蔬菜产后供应链管理质量安全追溯中发挥核心作用[90, 91]。基于分布式存储、对等网络、共识机制和加密算法，有效解决蔬菜产业采收后的加工、运输，以及销售环节数据共享的安全信任问题，实现蔬菜产业数据的真实透明可靠，核心功能包括追溯数据存证、隐私保护加密和智能监管3个部分[92, 93]。追溯数据存证通过多链和链上链下协同技术，解决供应链中视频数据等全流程海量数据的存储问题，基于Hyperhledger Fabric框架构建的蔬菜质量安全追溯系统，可实现蔬菜从田间到餐桌的全链条数据可信存证[94, 95]。隐私保护加密综合对称加密算法、非对称加密算法、哈希算法、数字签名、零知识证明和联邦学习等技术，确保数据在共享过程中的隐私安全[96, 97]。智能监管通过节点接入认证、节点权限管理、节点行为审查、节点追踪、跨链监管等技术，实现蔬菜全供应链透明化监管，提升风险防控能力[98, 99]。

大模型技术为蔬菜产后管理带来智能化升级，经过在大规模数据上训练，具有庞大参数的深度神经网络模型，分为语言大模型、视觉大模型，以及多模态大模型[100]。语言大模型（Generative Pre-trained Transformer, GPT）以对话机器人为代表，研究农业问答能力，用于农户的专业培训[101]。王婷等[102]基于栽培农技知识设计了知识对象识别与知识问答两种下游任务，使用多种学术数据来源提取标注栽培技术相关的知识，提升农户的培训效率。视觉大模型技术在蔬菜病虫害防控领域具有重要应用价值，多模态模型为农业问题提供了综合性解决方案，将语言大模型与视觉大模型等能力深度融合，通过统一的模型架构，实现多种农业问题的全面分析与处理。LEE等[103]提出并设计了1套以番茄种植过程中的生长监测与收获日期预测为核心功能的综合系统。该系统以物联网摄像头作为数据采集前端，融合先进的深度学习算法，可对番茄花朵的绽放至凋谢、果实的青涩至成熟全过程进行持续追踪，不仅能精准判定植株开花期、对未成熟果实进行精确计数，还能通过智能分析模型可靠预测番茄收获日期。王丽和傅延富[104]通过在多模态方向的深入开发，持续提升模型的分析、预测与决策能力，为实现综合化的智慧农业服务筑牢技术根基，为蔬菜产业信息化带来更高效、智能的全流程解决方案。

3 设施蔬菜智能管控技术存在的问题

近年来，中国设施蔬菜智能管控技术虽取得显著成果，但在产地环境精准调控、栽培管理信息化与仓储信息化管控等方面仍面临诸多挑战。

3.1 产地环境精准调控:传感器精度稳定性不足,调控决策滞后

设施蔬菜产地环境具有高湿、高肥及光环境复杂交替的显著特征，空气湿度长期维持在80%～95%，氨气等挥发物浓度随施肥周期频繁波动，弱光与补光动态交替，导致温湿度、CO_2、光照等关键传感器难以维持长期稳定监测精度，误差常超过5%。因结露、腐蚀易导致信号漂移，直接破坏监

测数据的可靠性。同时，产地环境调控缺乏基于多源异构数据融合的快速响应机制，现有数据处理方式缺乏高效整合能力，难以实时支撑环境调控决策，形成数据冗余却支持不足的困境。

设施内不同区域的环境参数存在显著空间异质性，棚室边缘与中心、植株冠层与根部的温度差可达5～8 ℃，这种微环境差异直接影响蔬菜局部生长状态。现有传感器布点方案多为均匀分布式，难以精准捕捉关键生育区的微环境差异，无法以最少传感器数量实现全域高精度表征，造成了监测盲区与资源浪费的双重问题。此外，当前设施蔬菜产地管控以经验驱动为主，尚未构建起依托物联网、边缘计算与人工智能计算构建的智能决策模型，缺乏对环境参数的动态感知与闭环控制机制，自主学习与自适应调整能力薄弱，无法满足蔬菜生长全周期的精准环境需求。

3.2 栽培管理信息化：设备协同机制缺失，病虫害防治整合性差

在设施蔬菜栽培管理信息化进程中，设备协同与兼容性问题突出，虽有多种智能水肥一体化系统方案，但不同品牌、型号的传感器与控制元件间兼容性欠佳，常出现数据传输异常、控制指令执行偏差等状况。智能化植株管理技术多独立运作，缺乏协同作业机制，无法数据共享，导致作业流程缺乏连贯性，整体效率受限。且现有智能化装备多针对单一作物设计，跨作物适配性差，开发通用设备面临诸多技术难题，增加研发成本与时间周期。

病虫害信息化防治的整合性不足同样制约栽培管理效率，物理、生物与化学防治手段未形成紧密闭环整合体系。当物理防治未能有效控制害虫密度时，系统无法自动、及时触发生物防治建议或精准化学施药指令，延误防治时机。多种病虫害复合发生时，系统难以精准判断主次矛盾，无法给出科学合理的综合防治策略，致使防治效果大打折扣。同时，智能虫情监测系统、智能病害检测设备等建设成本高，对于小规模种植户而言，经济负担过重，限制了技术推广应用。

3.3 仓储信息化管控：蔬菜品质追溯难，风险预警滞后

在蔬菜仓储信息化管控过程中，仓储环境参数监测存在精度不足和覆盖不全的问题，现有监测设备在低温、高湿环境中易受干扰，不同仓储环节的信息未实现有效互通，生产、存储、运输、销售等环节的数据分散，难以形成完整的信息链。同时，缺乏对仓储全流程的动态追踪与预测分析手段，无法实时掌握蔬菜品质变化情况，品质追溯只能依赖有限的人工记录，存在较大局限性。当仓储环境出现异常或蔬菜或果实品质下降时，风险预警滞后，不能及时采取措施，导致蔬菜损耗率较高，且无法通过精准决策实现供应链资源的高效配置。此外，尚未构建起物理空间与虚拟空间的有效关联，难以实现对仓储过程的全面、精准管控。

4　设施蔬菜智能管控技术发展建议

通过从产地环境精准调控、栽培管理信息化和仓储信息化管控角度分析设施蔬菜智能管控技术发展过程存在的问题，提出硬件优化与多技术融合支撑精准感知及智能调控、互联网构建全链条数字化与绿色管控体系和数字孪生与元宇宙融合构建虚实联动仓储管理体系的对策与建议，旨在推动设施蔬菜产业信息化发展升级。

4.1 硬件优化与多技术融合支撑精准感知及智能调控

针对设施蔬菜产地环境精准调控中存在的问题，在硬件优化方面采用防结露与抗腐蚀一体化的传感器防护设计：通过在传感器表面涂覆聚四氟乙烯涂层，显著提升设备在高湿、高肥恶劣环境下的防护性能，从硬件源头降低结露与气体腐蚀对监测精度的影响[105]。在此基础上，依托物联网技术构建分布式传感器监测网络，实现对温湿度、CO_2浓度、PPFD等环境参数的全面感知[106, 107]。运用边缘计算技术对传感器采集的数据进行实时预处理，减少数据传输延迟，同时对瞬时干扰信号进行实时校准和补偿，基于设施蔬菜栽培的历史数据和环境特征，构建动态误差修正模型[108]。通过物联网实时采集、边缘计算快速处理、人工智能深度分析的技术路线，构建基于多源异构数据融合的智能决策模型，为设施蔬菜环境动态感知与闭环控制提供高精准数据支持。

基于设施蔬菜关键生育期的植株生长模型和环境参数空间分布规律，采用分层布点法优化传感器网络布局：在植株关键生育区增加传感器密度，针对棚室边缘与中心、植株冠层与根部等差异显著区域设置差异化布点方案。在此基础上，利用有限传感器监测数据，通过对空间数据的插值处理，实现

全域环境参数的高精度表征。在数据处理与决策环节，开发自适应调控算法，借助人工智能计算提升系统自主学习能力，根据蔬菜不同生育期的生长需求和环境动态变化，动态调整传感器监测重点和调控策略。

4.2 强化设备协同优化与病虫害防治整合

针对设施蔬菜栽培管理信息化进程中存在的问题，在智能水肥一体化系统兼容性提升上，推行标准化协议，鼓励控制器等设备制造商采用国际通用成熟的通信协议，从源头保障不同品牌型号设备间的数据互通。构建统一的数据交互平台，自动吊蔓、智能整枝、疏果等机器人通过该平台实现数据共享与交互。研发通用型智能植株管理设备，利用多模态感知技术，使设备同时识别多种作物特征。基于深度学习的多作物图像识别模型，通过不同作物植株形态、生长规律大量学习，实现对多种作物关键部位的准确识别，配合调节机械执行部件，灵活切换作业方式，降低跨作物适配成本。

建立物理、生物、化学病虫害防治手段的闭环整合机制，系统自动根据害虫种类、密度，以及当前环境参数，从预设生物防治方案中筛选合适生物防治措施。开发针对多种病虫害复合发生情况的智能诊断与决策系统[109]。运用多源数据融合技术，将病虫害图像识别数据、环境监测数据、作物生长数据等进行综合分析，通过构建病虫害优先级别算法，依据病虫害对作物危害程度、扩散速度精准判断主次矛盾，给出科学合理的综合防治策略。

4.3 数字孪生与元宇宙融合构建虚实联动仓储管理体系

探索数字孪生与元宇宙在设施蔬菜仓储管理中的创新应用，基于仓储环境监测设备采集的温湿度、气体成分等数据，构建物理仓储空间对应的虚拟数字孪生体[110]。通过传感器网络将仓储环境、蔬菜品质等实时信息传输至虚拟空间，实现物理空间信息在虚拟空间的实时镜像。借助元宇宙技术搭建虚拟管控平台，整合存储、运输、销售等全流程数据，实现生产数据、物流信息、市场需求的实时互通[111]。利用大数据分析和人工智能算法对虚拟镜像中的数据进行预测分析，提前预判仓储环境变化趋势和蔬菜品质下降风险，构建虚实联动的管控系统[112]。

设施蔬菜智能管控通过该系统实现了仓储环境等信息的实时镜像与预测分析，确保蔬菜产后存储、运输、销售全流程的品质可追溯，每一批次蔬菜都能通过数字孪生体查询到各环节的详细信息。当系统监测到异常情况时，及时触发风险预警，以支持管理人员快速响应并进行处理。同时，基于虚拟空间的模拟分析，优化仓储策略和供应链资源配置，实现决策优化、供应链资源高效配置和精准化管理，提升设施蔬菜仓储信息化管控水平。

5 结论与展望

中国设施蔬菜智能管控技术包括产地环境精准调控、栽培管理信息化和仓储信息化管控3个部分：产地环境精准调控涉及温湿度、光照、CO_2浓度精准智能调控，存在传感器精度稳定性不足、调控决策滞后等问题，建议硬件优化与多技术融合支撑精准感知及智能调控。栽培管理信息化涉及智能水肥一体化、智能化植株管理、病虫害信息化防治，存在设备协同机制缺失、病虫害防治整合性差等问题，建议强化设备协同优化与病虫害防治整合。仓储信息化管控包括仓储保鲜、智能分等分选及追溯信息化平台，存在蔬菜品质追溯难及风险预警滞后等问题，建议将数字孪生与元宇宙融合构建虚实联动仓储管理体系。未来主要研究和应用方向如下：

1）在产地环境精准调控方面，依托物联网、边缘计算与人工智能计算，构建基于多源异构数据融合的智能决策模型，实现设施蔬菜产地环境参数的动态感知与闭环控制。通过开发自适应调控算法，提升自主学习能力，推动产地管控从经验驱动向数据驱动的智能化、自动化转变，以满足蔬菜生长全周期的精准环境需求。

2）在栽培信息化管理方面，通用型设备将逐渐成为主流，融合多模态感知技术、柔性机器人技术的新型设备，能够适应不同蔬菜作物的植株管理需求，设备间数据交换形成智能植株管理网络，基于海量病虫害数据构建知识图谱，系统自动匹配最佳物理、生物、化学综合防治方案，推动设施蔬菜产业向绿色、高效、可持续方向发展。

3）在仓储信息化管控方面，探索数字孪生与元宇宙在设施蔬菜仓储管理中的创新应用，通过构建物理空间与虚拟空间的数字孪生体，实现仓储环境等信息的实时镜像与预测分析，构建虚实联动的管控系统，确保蔬菜产后存储、运输、销售全流程的品质可追溯、风险可预警、决策可优化，最终达

成供应链资源的高效配置与精准化管理。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] BABAJANOV A, ABDIRAMANOV R, ABDURAHMANOV I, et al. Advantages of formation non-agricultural land allocation projects based on GIS technologies[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 227: 05001.

[2] SALEMINK K, STRIJKER D, BOSWORTH G. Rural development in the digital age: A systematic literature review on unequal ICT availability, adoption, and use in rural areas[J]. Journal of Rural Studies, 2017, 54: 360-371.

[3] MALECKI E J. Digital development in rural areas: Potentials and pitfalls[J]. Journal of Rural Studies, 2003, 19(2): 201-214.

[4] BISWAS D. Economics of information in the web economy[J]. Journal of Business Research, 2004, 57(7): 724-733.

[5] BLACKMORE S. Precision farming: An introduction[J]. Outlook on Agriculture, 1994, 23(4): 275-280.

[6] YANG C S, LIU H F, JIANG Y F. Demonstration system of agricultural informatization courses for web teaching[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 336/337/338: 2087-2090.

[7] SHAFIK W, TUFAIL A, DE SILVA L C, et al. Deep learning technique for plant disease classification and pest detection and model explainability elevating agricultural sustainability[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 1491.

[8] 孙忠富, 杜克明, 郑飞翔, 等. 大数据在智慧农业中研究与应用展望[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(6): 63-71.
SUN Z F, DU K M, ZHENG F X, et al. Perspectives of research and application of big data on smart agriculture[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(6): 63-71.

[9] 赵星, 廖桂平, 史晓慧, 等. 物联网与云计算环境下的农业信息服务模式构建[J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 142-147.
ZHAO X, LIAO G P, SHI X H, et al. The construction of agricultural information service system which combines the technology of the internet of things and cloud computing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 142-147.

[10] 韩佳伟, 朱文颖, 张博, 等. 装备与信息协同促进现代智慧农业发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 55-63.
HAN J W, ZHU W Y, ZHANG B, et al. Equipment and information collaboration to promote development of modern smart agriculture[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 55-63.

[11] 李道亮 . 农业 4.0: 即将到来的智能农业时代[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 207-214.
LI D L. Agriculture 4.0, the approaching age of intelligent agriculture[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 207-214.

[12] 李瑾, 马晨, 赵春江, 等. “互联网+”现代农业的战略路径与对策建议[J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 50-57.
LI J, MA C, ZHAO C J, et al. Strategic path and countermeasures for developing Internet plus modern agriculture[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 50-57.

[13] 赵春江, 李瑾, 冯献, 等. "互联网+"现代农业国内外应用现状与发展趋势[J]. 中国工程科学, 2018, 20(2): 50-56.
ZHAO C J, LI J, FENG X, et al. Application status and trend of "internet plus" modern agriculture in China and abroad[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(2): 50-56.

[14] 李瑾, 冯献, 郭美荣, 等. "互联网+"现代农业发展模式的国际比较与借鉴[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(2): 194-202.
LI J, FENG X, GUO M R, et al. The international comparison, tendency and reference of the development mode of "Internet+" modern agriculture[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(2): 194-202.

[15] 王艳艳 . 农业信息化对农业经济增长的影响探究[J]. 中国市场, 2021(26): 50-51.
WANG Y Y. Exploration of the impact of agricultural informatization on agricultural economic growth[J]. China Market, 2021 (26): 50-51.

[16] 郑雅杰, 杨明, 李仪曼, 等 . 精细化灌溉施肥对设施番茄生长及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(4): 143-148.
ZHENG Y J, YANG M, LI Y M, et al. Effects of fine irrigation and fertilization on plant tomato growth and yield[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(4): 143-148.

[17] 姜天月, 马中正, 汪晓丽, 等 . 我国设施番茄天敌昆虫应用研究进展[J/OL]. 蔬菜, 2025: 1-10. (2025-03-20)[2025-05-20]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx filename=SCZZ202503190 01&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
JIANG T Y, MA Z Z, WANG X L, et al. Research progress on the application of natural enemies of tomatoes in greenhouse in China [J/OL]. Vegetables, 2025: 1-10. (2025-03-20). https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail. aspx filename=SCZZ20250319001&dbname =CJFD&dbcode=CJFQ.

[18] 顾文威, 韩晨, 谷少委 . 设施番茄机械化生产装备应用实践及效益分析[J]. 农业装备技术, 2025, 51(1): 17-19.
GU W W, HAN C, GU S W. The application practice and benefit analysis of mechanized production equipment for tomato growth [J]. Agricultural Equipment & Technology, 2025, 51(1): 17-19.

[19] 刘志新, 郑北平, 张洪亮, 等 . 适合无土栽培设施种植的樱桃番茄品种筛选[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(21): 166-174.
LIU Z X, ZHENG B P , ZHANG H L, et al. Screening of cherry tomato cultivars for soilless cultivation in greenhouse[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(21): 166-174.

[20] 王琦, 谭占明, 程云霞, 等 . 不同比例红蓝光夜间补光对番茄生长生理的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(9): 58-66.
WANG Q, TAN Z M, CHENG Y X, et al. Effects of supplementing red and blue light at different ratios at night on growth and physiology of tomato[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(9): 58-66.

[21] 王文元, 倪纪恒 . 温室不同遮阳部位与遮阳密度对番茄光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(16): 197-202.
WANG W Y, NI J H. Influences of different shading positions and shading densities on tomato photosynthesis in greenhouse[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(16): 197-202.

[22] 胡雯雯, 徐识溥, 刘勇, 等 . 设施番茄智能水肥一体化系统设计[J]. 上海农业学报, 2024, 40(4): 104-109.
HU W W, XU S P, LIU Y, et al. Design of intelligent water and fertilizer integrated system for facility tomatoes[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2024, 40(4): 104-109.

[23] LI M, MA J, JIA W. Application of automatics in environment control of facility agriculture[C]// 2016 ASABE Annual International Meeting, St. Joseph, Michigan, USA: ASABE, 2016: 162461237.

[24] SRIMAL W, SIRAJ M, ANJUM R, et al. Towards sustainable future: A review of emerging technologies in controlled environment agriculture[J]. Mitteilungen Klosterneuburg, 2024: 79-96.

[25] 国家市场监督管理总局、中国国家标准化管理委员会 . 高标准农田建设 通则: GB/T 30600—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Well-facilitated farmland construction—General rules: GB/T 30600—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[26] GE J K, ZHAO L F, GONG X W, et al. Combined effects of ventilation and irrigation on temperature, humidity, tomato yield, and quality in the greenhouse[J]. HortScience, 2021, 56(9): 1080-1088.

[27] 张秋生, 丁小明 . 设施蔬菜产业发展(六) 我国规模化连栋玻璃温室发展现状与建议[J]. 中国蔬菜, 2024(3): 1-6.
ZHANG Q S, DING X M. Development status and suggestions of large scale gutter connected glass greenhouse in China[J]. China Vegetables, 2024(3): 1-6.

[28] 陈永生 . 设施蔬菜产业发展(二)2022—2023 年中国蔬菜机械化发展概况[J]. 中国蔬菜, 2023(10): 5-10.
CHEN Y S. Development of vegetable mechanization in China

from 2022 to 2023[J]. China vegetables, 2023(10): 5-10.
[29] 李天来. 设施蔬菜产业发展(一) 我国设施蔬菜产业发展现状及展望[J]. 中国蔬菜, 2023(9): 1-6.
LI T L. Development status of China's facility vegetable industry and outlook[J]. China Vegetables, 2023(9): 1-6.
[30] 王牧野, 李建平, 李俊杰, 等. 成本收益视角下中国设施蔬菜生产效率研究: 以黄瓜、番茄栽培为例[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(12): 170-183.
WANG M Y, LI J P, LI J J, et al. Research on China's facility cultivation efficiency from the perspective of cost benefit: Taking cucumber and tomato cultivation as an example[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(12): 170-183.
[31] 杨信廷, 钱建平, 孙传恒, 等. 农产品及食品质量安全追溯系统关键技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 212-222.
YANG X T, QIAN J P, SUN C H, et al. Key technologies for establishment agricultural products and food quality safety traceability systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 212-222.
[32] 杨宝朔, 漆昌桂, 樊一尘, 等. 基于模糊控制的西瓜温室远程监控系统的研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(8): 91-95, 129.
YANG B S, QI C G, FAN Y C, et al. Research on remote monitoring system of watermelon greenhouse based on fuzzy control[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(8): 91-95, 129.
[33] 韩毅, 许春雨, 宋建成, 等. 基于物联网的日光温室智能监控系统设计与实现[J]. 北方园艺, 2016(9): 207-210.
HAN Y, XU C Y, SONG J C, et al. Design and implementation of intelligent solar greenhouse monitoring system based on internet of things[J]. Northern Horticulture, 2016(9): 207-210.
[34] 朱丹, 陈学东, 张学俭, 等. 基于物联网的设施农业温室远程监控系统研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 176-181.
ZHU D, CHEN X D, ZHANG X J, et al. Research on remote monitoring system of greenhouses for facility agriculture based on Internet of Things[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 176-181.
[35] LASCANO R J, GOEBEL T S, BOOKER J, et al. The stem heat balance method to measure transpiration: Evaluation of a new sensor[J]. Agricultural Sciences, 2016, 7(9): 604-620.
[36] MORANDI B, MANFRINI L, ZIBORDI M, et al. A low-cost device for accurate and continuous measurements of fruit diameter [J]. HortScience, 2007, 42(6): 1380-1382.
[37] 海涛, 李娜娜, 周文杰, 等. 基于LPWAN物联网的光伏温室智能监控系统设计[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(5): 100-109.
HAI T, LI N N, ZHOU W J, et al. Design of intelligent monitoring system for photovoltaic greenhouse based on LPWAN internet of things[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2021, 39(5): 100-109.
[38] 廖建尚. 基于物联网的温室大棚环境监控系统设计方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 233-243.
LIAO J S. Design of agricultural greenhouse environment monitoring system based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(11): 233-243.
[39] 马少辉, 孟婷, 吴智勋, 等. 基于PID控制的塑料大棚温湿度系统设计与试验[J]. 农业工程, 2025, 15(5): 57-63.
MA S H, MENG T, WU Z X, et al. Design and experiment of plastic greenhouse temperature and humidity system based on PID control[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(5): 57-63.
[40] 杨士晔. 日光温室番茄栽培温湿度评价与调控策略优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
YANG S Y. Evaluation of temperature and humidity and optimization of control strategy for tomato cultivation in Chinese solar greenhouse[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024.
[41] 刘传龙. 设施番茄温室温湿度智能调控系统研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
LIU C L. Research on intelligent control system of temperature and humidity in tomato greenhouse[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
[42] 丁小涛, 姜玉萍, 王虹, 等. LED株间补光对番茄生长和果实品质的影响[J]. 上海农业学报, 2016, 32(6): 48-51.
DING X T, JIANG Y P, WANG H, et al. Effects of LED supplementary lighting among plants on tomato growth and fruit quality [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2016, 32(6): 48-51.
[43] 彭琛, 莫锦恋, 王丰. 机器视觉在农业蔬菜大棚环境监测系统中的研究与设计[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2021, 33(2): 68-72.
PENG C, MO J L, WANG F. Research and design of machine vision in environmental monitoring system of agricultural vegetable greenhouse[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science And Technology), 2021, 33(2): 68-72.
[44] 张海辉, 邵志成, 张佐经, 等. 基于无线传感网的设施环境二氧化碳精准调控系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 325-331, 360.
ZHANG H H, SHAO Z C, ZHANG Z J, et al. Regulation system of CO_2 in facilities based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 325-331, 360.
[45] PARADKAR V, RAY S K, BHAT A G, et al. Improving yield of tomatoes grown in greenhouses using IoT based nutrient management system[J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2023, 13(10): 2349-2365.
[46] 张宝峰, 陈枭, 朱均超, 等. 基于物联网的水肥一体化系统设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(3): 98-104.
ZHANG B F, CHEN X, ZHU J C, et al. Design and experiment of integrated water and fertilizer system based on internet of things[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(3): 98-104.
[47] 王淏. 基于AT80C51单片机的智能化温室灌溉和温度调控系统构建[J]. 中国农机装备, 2025(3): 47-49.
WANG H. Construction of an intelligent irrigation and temperature control system in greenhouse based on AT80C51 micro-controller[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2025(3): 47-49.
[48] 康艺凡, 杨英茹, 李友丽, 等. 基于番茄基质栽培的日光温室智能水肥一体化系统构建[J]. 河北农业科学, 2024, 28(6): 97-104.
KANG Y F, YANG Y R, LI Y L, et al. Construction of an intelligent water fertilizer integration system for solar greenhouse based on tomato substrate cultivation[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2024, 28(6): 97-104.
[49] 马宇飞. 温室大棚与水肥一体化智能监控系统设计[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2024.
MA Y F. Design of intelligent control system for greenhouse and inte-grated water-fertilizer management[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2024.
[50] 王艳芳, 杨夕同, 雷喜红, 等. 连栋温室番茄工厂化生产植株精细化管理技术[J]. 中国蔬菜, 2019(1): 85-89.
WANG Y F, YANG X T, LEI X H, et al. Fine management technology for engineering production of tomato plants in multi span greenhouses[J]. China Vegetables, 2019(1): 85-89.
[51] 左敏, 纪慧卓, 苏礼君, 等. 人工智能在食品安全中的最新应用及进展[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 1-13.
ZUO M, JI H Z, SU L J, et al. Advancements and modern applications of artificial intelligence in ensuring food safety[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(10): 1-13.
[52] 丁浩晗, 谢祯奇, 沈嵩, 等. 基于人工智能的集成食品检测技术应用与展望[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(5): 13-23, 32.
DING H H, XIE Z Q, SHEN S, et al. Application and prospect of integrated food testing technology based on artificial intelligence [J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(5): 13-23, 32.
[53] 刘晶璟. 人工智能技术在食品安全监管领域应用研究[J]. 微型电脑应用, 2018, 34(6): 40-43.
LIU J J. Application of artificial intelligence technology in food

safety supervision[J]. Microcomputer Applications, 2018, 34(6): 40-43.
[54] 张华, 朱婷倩, 张运来, 等. 设施番茄精准授粉机器人研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(6): 798-808.
ZHANG H, ZHU T Q, ZHANG Y L, et al. Research progress on precision pollination robots for facility tomatoes[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(6): 798-808.
[55] QING J J, DENG X L, LAN Y B, et al. GPT-aided diagnosis on agricultural image based on a new light YOLOPC[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108168.
[56] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]// 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2016: 779-788.
[57] 梁会成. 基于深度学习的番茄叶部病变检测方法研究[D]. 西安: 西京学院, 2023.
LIANG H C. Research on tomato leaf lesion detection method based on deep learning[D]. Xi'an: Xijing University, 2023.
[58] 张袁源. 基于深度学习的番茄病害早晚期识别系统的设计与实现[D]. 合肥: 安徽大学, 2023.
ZHANG Y Y. Design and implementation of early and late tomato disease recognition system based on deep learning[D]. Hefei: Anhui University, 2023.
[59] MAKULE E, DIMOSO N, TASSOU S A. Precooling and cold storage methods for fruits and vegetables in sub-Saharan Africa: A review[J]. Horticulturae, 2022, 8(9): 776.
[60] 鞠琪, 李长亮, 冯毓琴, 等. 预冷技术在西蓝花保鲜中的应用研究进展[J]. 寒旱农业科学, 2023(8): 709-712.
JU Q, LI C L, FENG Y Q, et al. Application and research progress on the precooling technologies in broccoli preservation[J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2023(8): 709-712.
[61] DIRAPAN P, BOONYAKIAT D, POONLARP P. Improving shelf life, maintaining quality, and delaying microbial growth of broccoli in supply chain using commercial vacuum cooling and package icing[J]. Horticulturae, 2021, 7(11): 506.
[62] WANAKAMOL W, KONGWONG P, CHUAMUANGPHAN C, et al. Hurdle approach for control of enzymatic browning and extension of shelf life of fresh-cut leafy vegetables using vacuum precooling and modified atmosphere packaging: Commercial application[J]. Horticulturae, 2022, 8(8): 745.
[63] ZHANG C, ZHOU P C, MEI J, et al. Effects of different pre-cooling methods on the shelf life and quality of sweet corn (*Zea mays* L.)[J]. Plants, 2023, 12(12): 2370.
[64] WANG X F, FAN Z Y, LI B G, et al. Forced-air cooling of iceberg lettuces: Cooling efficiency in relation to commercial operating strategies[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 139: 84-92.
[65] 王佳捷, 孙颖, 刘雅慈, 等. 压差预冷对西蓝花贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 227-235.
WANG J J, SUN Y, LIU Y C, et al. Forced air pre-cooling effect on broccoli storage quality and reactive oxygen species metabolism[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(23): 227-235.
[66] FANG Y J, WAKISAKA M. A review on the modified atmosphere preservation of fruits and vegetables with cutting-edge technologies[J]. Agriculture, 2021, 11(10): 992.
[67] 虞新新, 吕恩利, 陆华忠, 等. 不同气调环境对番茄保鲜品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 135-139.
YÜ X X, LYU E L, LU H Z, et al. Effects of different modified atmosphere on fresh-keeping quality of tomato[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(12): 135-139.
[68] 李春媛, 陆小宇, 赵竞伊, 等. 不同成熟度番茄货架期间品质及挥发性物质变化研究[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(4): 97-105.
LI C Y, LU X Y, ZHAO J Y, et al. Quality and volatile compounds changes of tomatoes at different maturity stages during shelf life[J]. Storage and Process, 2025, 25(4): 97-105.
[69] 吴宪玲, 李晓敏, 周雪婷. 气调包装技术在食品包装中的应用[J]. 农业科技与装备, 2021(6): 86-87.
WU X L, LI X M, ZHOU X T. Application of modified atmosphere packaging in food packaging[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2021(6): 86-87.
[70] 孙小静, 苏丹, 陆敏, 等. 基于主成分分析法研究自发气调包装对鲜食小米椒的保鲜效果[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(3): 55-64.
SUN X J, SU D, LU M, et al. Effects of spontaneous modified atmosphere packaging on the preservation of fresh edible *Capsicum annuum* L. based on principal component analysis[J]. Storage and Process, 2025, 25(3): 55-64.
[71] PAIDARI S, ZAMINDAR N, TAHERGORABI R, et al. Edible coating and films as promising packaging: A mini review[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(5): 4205-4214.
[72] 于有伟, 刘坤渝, 张少颖, 等. 水溶性壳聚糖/可得然胶可食性复合涂膜对樱桃番茄灰霉的抑制作用及机理[J]. 食品科学, 2024, 45(22): 239-246.
YU Y W, LIU K Y, ZHANG S Y, et al. Inhibitory effect and mechanism of water-soluble chitosan/curdlan edible composite coating on *Botrytis cinerea* in cherry tomato[J]. Food Science, 2024, 45(22): 239-246.
[73] 赵月. 拮抗酵母对番茄果实灰霉病的抑制作用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
ZHAO Y. Study on inhibition of the antagonistic yeast on gray mold of postharvest tomato fruit[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017.
[74] YU Y, GUO W B, LIU Y X, et al. Effect of composite coating treatment and low-temperature storage on the quality and antioxidant capacity of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* cv. Junzao)[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 288: 110372.
[75] YU J F, ZHANG Z, LI Y F, et al. In-field grading and sorting technology of apples: A state-of-the-art review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109383.
[76] 张哲, 马斌, 罗娜, 等. 果蔬农产品产地智能化处理技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 1-16, 46.
ZHANG Z, MA B, LUO N, et al. Research progress and prospects of key technologies for intelligent treatment of fruits and vegetables agricultural products at origin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 1-16, 46.
[77] ZUO H C. Analysis and detection of tomatoes quality using machine learning algorithm and image processing[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2022, 13(12): 410-419.
[78] RAIKAR M M, S M M, KUCHANUR C, et al. Classification and grading of okra-ladies finger using deep learning[J]. Procedia Computer Science, 2020, 171: 2380-2389.
[79] JAHANBAKHSHI A, KHEIRALIPOUR K. Evaluation of image processing technique and discriminant analysis methods in postharvest processing of carrot fruit[J]. Food science & Nutrition, 2020, 8(7): 3346-3352.
[80] 张保华, 李江波, 樊书祥, 等. 高光谱成像技术在果蔬品质与安全无损检测中的原理及应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2743-2751.
ZHANG B H, LI J B, FAN S X, et al. Principles and applications of hyperspectral imaging technique in quality and safety inspection of fruits and vegetables[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10): 2743-2751.
[81] 王加龙, 马坤, 高鹏, 等. 基于可见-近红外光谱技术研发便携式贝贝南瓜品质无损检测仪[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 254-262.
WANG J L, MA K, GAO P, et al. A portable non-destructive detector for kabocha squash quality based on visible and near-infrared spectroscopy[J]. Food Science, 2025, 46(6): 254-262.
[82] 邢书海, 张淑娟, 孙海霞, 等. 基于可见/近红外光谱西葫芦硬度的无损检测模型的建立[J]. 山西农业科学, 2020, 48(1): 58-60, 121.
XING S H, ZHANG S J, SUN H X, et al. Establishment of non-destructive testing model of zucchini hardness based on visible/near infrared spectrum[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(1): 58-60, 121.

[83] 张雯雯, 胡亚东, 孙文珂, 等. 基于近红外光谱与深度学习的紫菜水分无损检测[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 190-197.
ZHANG W W, HU Y D, SUN W K, et al. Non-destructive detection of water content in *porphyra* based on near-infrared spectroscopy and deep learning[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 190-197.
[84] 徐一新, 戴海宸, 张月, 等. 基于相位成像的番茄果实糖度检测[J]. 中国激光, 2024, 51(3): 0307109.
XU Y X, DAI H C, ZHANG Y, et al. Detection of tomato fruit sugar content based on phase imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(3): 0307109.
[85] 孙传恒, 朱文颖, 邢斌, 等. 中国农产品质量安全可追溯体系发展历程与展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12): 1-14.
SUN C H, ZHU W Y, XING B, et al. Development history and prospects of agricultural product quality and safety traceability system in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(12): 1-14.
[86] AMPATZIDIS Y G, VOUGIOUKAS S G, BOCHTIS D D, et al. A yield mapping system for hand-harvested fruits based on RFID and GPS location technologies: Field testing[J]. Precision Agriculture, 2009, 10(1): 63-72.
[87] PIGINI D, CONTI M. NFC-based traceability in the food chain [J]. Sustainability, 2017, 9(10): 1910.
[88] 卢升荣, 陈希, 刘瑶. 生鲜农产品冷链物流追溯系统设计[J]. 物流技术, 2022, 41(10): 138-141.
LU S R, CHEN X, LIU Y. Design of cold chain logistics traceability system for fresh agricultural products[J]. Logistics Technology, 2022, 41(10): 138-141.
[89] 智丽平, 肖文可. 大数据与粮食质量安全监管的融合及应用研究[J]. 食品安全导刊, 2024(32): 165-168.
ZHI L P, XIAO W K. Research on the integration and application of big data and grain quality safety supervision[J]. China Food Safety Magazine, 2024(32): 165-168.
[90] GEORGE W, AL-ANSARI T. Review of blockchain applications in food supply chains[J]. Blockchains, 2023, 1(1): 34-57.
[91] ELLAHI R M, WOOD L C, BEKHIT A E A. Blockchain-based frameworks for food traceability: A systematic review[J]. Foods, 2023, 12(16): 3026.
[92] 孙传恒, 于华竟, 徐大明, 等. 农产品供应链区块链追溯技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 1-13.
SUN C H, YU H J, XU D M, et al. Review and prospect of agri-products supply chain traceability based on blockchain technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 1-13.
[93] 张长贵, 张岩峰, 李晓华, 等. 区块链新技术综述: 图型区块链和分区型区块链[J]. 计算机科学, 2020, 47(10): 282-289.
ZHANG C G, ZHANG Y F, LI X H, et al. Survey of new blockchain techniques: DAG based blockchain and sharding based blockchain[J]. Computer Science, 2020, 47(10): 282-289.
[94] 于丽娜, 张国锋, 贾敬敦, 等. 基于区块链技术的现代农产品供应链[J]. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 387-393.
YU L N, ZHANG G F, JIA J D, et al. Modern agricultural product supply chain based on block chain technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (S1): 387-393.
[95] LIU S, HUA G W, KANG Y X, et al. What value does blockchain bring to the imported fresh food supply chain [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 165: 102859.
[96] 孙传恒, 于华竟, 罗娜, 等. 基于智能合约的果蔬区块链溯源数据存储方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 361-370.
SUN C H, YU H J, LUO N, et al. Blockchain traceability data storage method of fruit and vegetable foods supply chain based on smart contract[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 361-370.
[97] ZHAO B, JIN W Q, DEL SER J, et al. ChatAgri: Exploring potentials of ChatGPT on cross-linguistic agricultural text classification[J]. Neurocomputing, 2023, 557: 126708.
[98] VIJAYARAGAVAN S, PUNARSELVAM E, KUPPURASU N. Decentralized block chain provenance security system using secure sharable advanced encryption standard for distributed agriculture information security[J]. Neuro Quantology, 2022, 20(8): 6738-6749.
[99] KUMAR P, GUPTA G P, TRIPATHI R. PEFL: Deep privacy-encoding-based federated learning framework for smart agriculture [J]. IEEE Micro, 2022, 42(1): 33-40.
[100] JAYABALAN J, JEYANTHI N. Scalable blockchain model using off-chain IPFS storage for healthcare data security and privacy[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2022, 164: 152-167.
[101] 郭旺, 杨雨森, 吴华瑞, 等. 农业大模型: 关键技术、应用分析与发展方向[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(2): 1-13.
GUO W, YANG Y S, WU H R, et al. Big models in agriculture: Key technologies, application and future directions[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(2): 1-13.
[102] 王婷, 王娜, 崔运鹏, 等. 基于人工智能大模型技术的果蔬农技知识智能问答系统[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(4): 105-116.
WANG T, WANG N, CUI Y P, et al. Intelligent question answering system of fruit and vegetable agricultural technology knowledge based on artificial intelligence big model technology[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 105-116.
[103] LEE U, ISLAM M P, KOCHI N, et al. An automated, clip-type, small internet of things camera-based tomato flower and fruit monitoring and harvest prediction system[J]. Sensors, 2022, 22 (7): 2456.
[104] 王丽, 傅延富. 智慧农业技术在设施蔬菜中的研究进展[J]. 优质农产品, 2025(7): 53-55.
WANG L, FU Y F. Research progress of intelligent agricultural technology in protected vegetables[J]. High Quality Agricultural Products, 2025(7): 53-55.
[105] WAIKHOM O, KALITA P, KASHYAP R, et al. Surface-modification for flexible chemiresistive gas sensors: Strategies for high performance and scalability[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 524: 168344.
[106] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
[107] FANG H, HE Y. A Pocket PC based field information fast collection system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 254-260.
[108] KANWAL T, REHMAN S U, IMRAN A, et al. Energy-efficient Internet of Things-based wireless sensor network for autonomous data validation for environmental monitoring[J]. Computer Systems Science and Engineering, 2025, 49(1): 185-212.
[109] LI J W, QIAO Y L, LIU S, et al. An improved YOLOv5-based vegetable disease detection method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107345.
[110] 顾生浩, 卢宪菊, 王勇健, 等. 数字孪生系统在农业生产中的应用探讨[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 82-89.
GU S H, LU X J, WANG Y J, et al. Application of agricultural digital twin system in crop production system[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(10): 82-89.
[111] 陈枫, 孙传恒, 邢斌, 等. 农业元宇宙: 关键技术、应用情景、挑战与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(4): 126-137.
CHEN F, SUN C H, XING B, et al. Agricultural metaverse: Key technologies, application scenarios, challenges and prospects[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(4): 126-137.
[112] MAVANI N R, ALI J M, OTHMAN S, et al. Application of artificial intelligence in food industry: A guideline [J]. Food Engineering Reviews, 2022, 14(1): 134-175.

Research Progress and Prospects of Intelligent Control Technology for Facility Vegetable

WANG Jian[1], ZHAO Haosen[1], MA Yue[1], XING Bin[2], ZHU Wenying[2*]

（1. *Beijing Digital Agriculture and Rural Development Promotion Center*, *Beijing* 101117, *China*; 2. *Information Technology Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*）

Abstract: [Significance] With the advancement of technology and diversified consumer demands, traditional agriculture is gradually transforming towards information and intelligence. Conducting research on intelligent management and control technologies for facility vegetable production is of great significance for improving vegetable yield and quality, ensuring stable market supply, and promoting high-quality development of the vegetable industry. The purpose of this article is to systematically collate the research status, key technologies and application constraints in the field of intelligent management and control of facility vegetables. By analyzing the development trends of environmental regrlation, growth monitoring and precise management, it provides scientific basis, theoretical support and decision-making references for the intelligent upgrading, technological innovation and policy formulation of Chinese facility vegetable industry, so as to boost the high-quality and sustainable development of facility agriculture. **[Progress]** This paper systematically analyzes the innovative applications of information technologies such as Internet of Things, block chain, and artificial intelligence in critical domains of facility vegetable production information, including precise regulation of the production environment, intelligent cultivation management and smart storage information management. In terms of precise regulation of the production environment, a temperature and humidity model for the optimal growth environment of tomatoes has been established, primarily utilizing Internet of Things technology. This enables precise monitoring and intelligent control of environmental parameters such as temperature, humidity, light, and carbon dioxide concentration within the facility, creating an optimal environment for vegetable growth. In the field of intelligent cultivation management, the integration of intelligent integrated water and fertilizer equipment, agricultural robotic operation systems, and pest and disease control has optimized the whole-process information-based management, effectively improving cultivation efficiency and vegetable quality. The integrated water and fertilizer systems apply Internet on Things technology to coordinate irrigation and fertilization through digital methods. Agricultural robotic operation systems are based on artificial intelligence, encompassing technologies such as machine learning, deep learning, neural networks and image processing. The pest and disease control section highlights the information-based applications in physical control, biological control and chemical control. In terms of smart storage information management, the application of origin storage preservation technology, intelligent classification and sorting systems, as well as traceability information platforms has significantly enhanced the circulation quality and safety assurance level of vegetables. Specifically, the origin storage preservation technology focuses on the development status of pre-cooling preservation, controlled atmosphere preservation, biological preservation and coating preservation. Intelligent grading and sorting technologies are categorized into non-destructive testing for both the external and internal quality of vegetables. The traceability information platform, leveraging blockchain and large model technologies, enables more intelligent management of facility vegetable production. **[Conclusions and Prospects]** This paper explores the problems encountered in the development of intelligent management and control technology for protected vegetables, including insufficient accuracy and stability of sensors, lagging regulatory decision-making, lack of equipment coordination mechanisms, poor integration of pest and disease control, fragmentation of information in the whole process of storage, difficulty in quality traceability, and lagging risk warning. Corresponding countermeasures and suggestions are proposed as follows: optimization of hardware, multi-technology integration to support precise perception and intelligent regulation, enhancement of equipment coordination and optimization, integration of pest and disease control, and construction of a virtual-real interactive storage management system through the integration of digital twins and metaverse. Finally, the paper prospects the future development direction of facility vegetable in precise control of production environment, cultivation management information, and storage information control.

Key words: facility vegetable; storage and preservation; intelligent control; water and fertilizer integration; pest and disease control; artificial intelligence

Foundation items: National Key Research and Development Program Project (2023YFD2001304); Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences Project (KJCX20251003)

First author: WANG Jian, E-mail: wangaojie@126.com

***Corresponding author:** ZHU Wenying, E-mail: zhuwy@nercita.org.cn