

果蔬农产品产地智能化处理技术研究进展与展望

张哲^{1,2} 马斌^{1,2} 罗娜^{1,2} 邢斌^{1,2} 李珊珊^{1,2} 杨信廷^{1,2}

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;

2. 农产品质量安全追溯技术及应用国家工程研究中心, 北京 100097)

摘要: 在全球农业产业转型升级背景下,果蔬农产品产地处理技术面临着效率提升与品质管控的双重挑战。以人工智能、物联网和大数据为核心驱动的智能化解解决方案,正深度重构产地处理全链条的技术范式。本文通过系统梳理果蔬农产品产地处理过程中的采收、分选、预冷、保鲜储藏、包装和产地运输等关键环节,深入分析了智能化技术在各环节的主要应用。重点回顾了智能分等分选技术、预冷与保鲜包装技术以及产地溯源技术的研究进展,综述了相关技术在国内外的应用现状,并展望了果蔬农产品产地处理过程中关键技术的发展趋势,提出智能化、数字化与绿色化技术的深度融合将成为推动行业革新的重要动力。

关键词: 果蔬农产品; 产地处理; 智能分等分选; 预冷与保鲜; 包装; 产地溯源

中图分类号: TS255.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2025)06-0001-16

OSID:



Research Progress and Prospects of Key Technologies for Intelligent Treatment of Fruits and Vegetables Agricultural Products at Origin

ZHANG Zhe^{1,2} MA Bin^{1,2} LUO Na^{1,2} XING Bin^{1,2} LI Shanshan^{1,2} YANG Xinting^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Engineering Laboratory for Agri-product Quality Traceability, Beijing 100097, China)

Abstract: With the ongoing transformation and upgrading of the global agricultural industry, fruits and vegetables agricultural products origin handling technologies are facing dual challenges: improving operational efficiency and ensuring stringent quality control. Intelligent solutions powered by artificial intelligence, the Internet of Things, and big data are reshaping the entire technological framework of origin handling, enabling automation, precision, and data-driven decision-making. It systematically reviewed the key stages of fruits and vegetables origin handling, providing an in-depth analysis of how intelligent technologies that were applied across different stages. It highlighted recent advancements in intelligent grading and sorting, pre-cooling and preservation, packaging, and origin traceability, emphasizing their role in enhancing supply chain efficiency and improving quality management. Furthermore, it explored how breakthroughs in these technologies contribute to optimizing logistics, reducing post-harvest losses, and ensuring food safety. Looking ahead, it discussed emerging trends in fruits and vegetables origin handling, stressing that the deep integration of intelligence, digitalization, and sustainability would be a key driving force for industry innovation. The adoption of smart technologies not only enhanced operational efficiency but also promoted environmentally friendly and resource-efficient practices. The research result can provide a quantifiable framework for technology selection and an all-encompassing optimization path for the evolution of the fruits and vegetables smart supply chain. Ultimately, it supported the paradigm shift from traditional experience-based post-harvest handling to a more efficient, data-driven approach, offering valuable insights for researchers and industry practitioners alike.

Key words: fruits and vegetables; origin handling; intelligent grading and sorting; pre-cooling and preservation; packaging; origin traceability

收稿日期: 2025-03-19 修回日期: 2025-04-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2001304)

作者简介: 张哲(1998—),男,博士生,主要从事农产品追溯技术研究, E-mail: zhangzhe@mails.jlau.edu.cn

通信作者: 杨信廷(1974—),男,研究员,博士,主要从事农产品智慧供应链研究, E-mail: yangxt@nercita.org.cn

0 引言

果蔬农产品的产地处理是保障产品品质与安全、提升流通效率的关键流程,直接影响农业可持续发展。该流程涵盖多个处理环节,各环节的技术水平与管理效能共同决定了最终产品的市场竞争力^[1]。然而,由于果蔬农产品易腐、易损且季节性强^[2],传统处理方式常因技术局限导致资源利用率低、产品损耗率高及管理效能不足等问题^[3],严重制约了供应链整体效益的提升。

现代农业技术的发展,特别是智慧供应链技术的创新,为农产品产地处理技术转型升级提供了重要支撑。产地处理技术正向智能化方向发展,通过传感器数据采集、实时监控和数据分析,实现各环节的精准调控与优化调度,提高整体作业效率、减少损耗,并保障食品质量与安全。近年来,产地处理技术的创新与应用深受国家重视,农业农村部 and 国务院办公厅分别发布《“十四五”全国农产品产地市场体系发展规划》^[4]和《“十四五”冷链物流发展规划》^[5],重点强调构建三级产地市场体系,完善冷链物流等基础设施,以及冷链物流在降低农产品损耗、保障食品安全和助力乡村振兴中的战略地位。上述政策的提出,不仅为解决传统处理技术的碎片化问题提供了新机遇,更推动了整个产业向智能化、标准化和绿色化方向转变。

本文全面梳理果蔬农产品产地处理的技术体系,重点探讨智能化技术在产地处理关键环节的应用现状与发展前景。分析分选、预冷、保鲜贮藏、包装和产地溯源等核心技术的应用成效与实施瓶颈,并结合政策背景与行业需求,展望技术发展的未来趋势,为果蔬农产品智慧供应链的标准化建设与技术创新提供参考。

1 果蔬农产品产地处理关键环节

果蔬农产品产地处理是指采收后为保持产品品质和延长货架期所实施的技术处理过程,其核心目标是降低储运销售环节的质量损耗,保障农产品新鲜度与安全性。其中,采收、分选、预冷、保鲜贮藏、包装、产地运输、产地追溯是影响产地处理效率和效果的关键环节,见图 1。

采收环节:采收作为果蔬产地处理的首要环节,标准化操作直接影响产品品质与商品价值。需重点把控采收时机,规范采收流程,并严格制定田间初选标准,以确保果蔬符合最佳加工要求,避免不当采摘影响后续处理。

分选环节:分选是确保果蔬农产品质量标准化

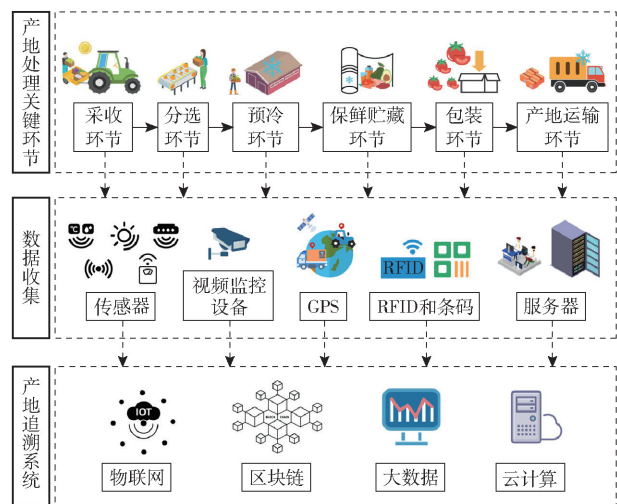


图 1 果蔬农产品产地处理关键环节框图

Fig. 1 Block diagram of key stages of fruit and vegetable agricultural products at origin

的关键步骤。为解决传统人工分选易产生的效率低、人工成本高的问题^[6],现代分选环节普遍采用自动化设备和智能技术。通过信息采集,涵盖果蔬的尺寸、重量、颜色及外观缺陷等多维度数据,确保农产品符合标准化要求。

预冷环节:预冷是通过快速降温减缓果实呼吸作用,从而延长保鲜期的主要手段。尤其对于易腐果蔬,采摘后需尽早进行预冷,以防温度过高加速腐烂。预冷的效果直接影响后续的贮藏和运输质量。

保鲜贮藏环节:在保鲜贮藏环节,果蔬农产品需在特定温湿度条件下存放,以最大程度保留新鲜度和营养成分。不同种类的果蔬对贮藏环境的要求各异,温湿度的精确控制至关重要,任何偏差都可能导致果实过快成熟或腐烂。

包装环节:包装不仅能保护果蔬免受外界损害,还在展示品质和建立消费者信任中起着关键作用。包装材料应能有效减少运输过程中的碰撞和压迫,同时保持良好的通气性,延缓腐烂。

产地运输环节:果蔬的产地运输是连接生产和市场的关键过程。运输过程中需要控制温湿度,避免长时间暴露在高温或潮湿环境中,以减少腐烂和损失。合理的运输方式能有效保障果蔬的质量,确保其安全抵达目的地。

产地追溯系统:果蔬农产品产地追溯系统的核心目标是提高供应链的透明度和可追溯性。通过信息化技术记录、追踪和管理关键数据,确保消费者能够追溯到农产品的原产地、生产过程及质量安全信息。系统通过实时上传、动态监控和溯源分析,为供应链的精细化管理提供有力保障。

果蔬农产品产地处理各环节数据的系统性采集

与整合是构建高效追溯系统的基础。表 1 整理了各环节涉及的数据信息及收集方式,明确了各阶段核心数据及技术实现路径,为追溯系统的数据标准化和跨环节协同提供了参考。

表 1 果蔬农产品产地处理关键信息与智能化采集方式

Tab.1 Key information and intelligent collection methods of fruit and vegetable agricultural products processing at origin		
处理阶段	关键信息	智能化采集方式
采收环节	采收时间(精确到小时)	传感器/IoT 设备;智能农机内置时间记录、温湿度传感器同步时间戳
	产地位置(包含经纬度)	GPS 定位系统;智能农机内置
	采收方式(人工/机械)	智能农机数据;机械采收设备自动记录操作日志、无人机或摄像头监控采收现场
	采收天气(温度/相对湿度/光照强度)	环境传感器;田间气象站实时采集温湿度、光照数据
	采收量(单日/批次)	称量传感器;采收机械内置称量系统
分选环节	分选标准(大小/颜色/瑕疵率)	视觉识别系统;AI 摄像头结合图像识别算法自动分级
	分选设备参数(速度/精度)	设备传感器;分选机内置传感器采集设备参数
	分选损耗率	数据处理;分选前后质量数据与分选日志计算生成损耗报表
预冷环节	预冷温度(初始/目标温度)	温度传感器;预冷库内多点温度监控
	预冷时间(开始/结束时间)	IoT 设备;预冷设备自动记录时间并与温度数据绑定
	预冷方式	设备日志;预冷设备自动生成操作日志
	预冷后产品状态(失水率)	称量传感器;预冷前后质量与相对湿度数据计算失水率
保鲜贮藏环节	贮藏环境(温度/相对湿度/气体成分)	环境监测系统;库内温湿度传感器、气体(O ₂ /CO ₂)分析仪实时监测
	贮藏时间(入库/出库时间)	RFID/条码;产品批次扫码记录出入库时间
	贮藏损耗(腐烂率/失重率)	AI 摄像头+称量;定期巡检记录腐烂情况并结合质量分析
包装环节	包装材料(类型/规格)	RFID/条码;包装材料批次扫码记录材质、规格等
	包装时间与责任人	操作记录系统;包装线员工扫码记录
	包装完整性(密封性/破损率)	视觉检测系统;AI 摄像头检测包装密封性
	追溯标识(批次/产地码)	追溯码;绑定全环节数据,支持消费者扫码查询
产地运输环节	运输路线(实时位置/路径规划)	GPS 系统;车载 GPS 实时追踪位置并优化路线
	运输环境(温度/相对湿度/震动)	IoT 传感器;冷链车载温湿度传感器与震动监测仪实时上传
	运输时效(出发/到达时间)	物流管理系统;自动记录时间节点、异常延迟报警

由此可见,采收环节的时空数据、分选环节的品控指标、运输环节的环境参数等,均需通过标准化协议实现跨系统兼容,最终汇入追溯平台形成完整数据链条。统一的信息采集标准不仅为降低损耗、优化资源配置提供量化依据,也为消费者端“一码溯源”的可靠性奠定基础。

2 关键技术研究成果

2.1 智能分等分选技术

智能分等分选技术利用传感器、图像处理算法和人工智能模型,实现对农产品外部物理特性和内部品质的快速、高效评估^[7]。该技术能够有效提升果蔬农产品质量,优化供应链分选环节,提高处理效率,广泛应用于大小、形状、糖度、硬度、色泽等多维特性分选。下面从基于图像处理的外部物理特性分选和基于无损检测的内部品质分选两方面,介绍国内外智能分等分选技术的研究进展。

2.1.1 基于图像处理的外部物理特性分选

随着机器视觉和深度学习技术的快速发展,基于图像处理的外部物理特性分选技术已成为提升分选效率与精度的核心手段。该技术通过图像预处理

和特征提取,结合机器学习或深度学习算法实现自动化分级。表 2 介绍了常见果蔬农产品在智能分等分选中的数据采集方式、分级标准、算法及效果。

基于图像处理的外部物理特性分选技术通过融合机器视觉与深度学习算法,显著提升了果蔬分选的自动化水平与精度,成为破解传统人工分选效率低、主观性强等问题的核心方案。由表 2 可以看出,针对不同果蔬品类,研究者已开发出多样化的技术路径。

值得注意的是,果品通过颜色、形状等显性特征实现了高分选准确度的分选,而叶类蔬菜由于褶皱多、质地脆弱且易损伤,分选研究主要集中于损伤检测,精细化分级技术尚不成熟。例如,武振超等^[16]设计了异常生菜自动分选系统,发现生菜分选更注重搬运过程,以及叶片相互交叉严重,使用图像分割时易出现误判现象,因此评估叶片完整性,克服叶类蔬菜图像叶片交叉遮挡是目前亟需解决的问题。此外,现有技术缺乏高精度与柔性传感手段,难以实现高效无损检测。相比之下,果品因其规则的外形和稳定的物理特性,更易适配现有算法与设备。

表 2 果蔬农产品智能分等分选关键技术、算法及效果

Tab.2 Key technologies, algorithms, and efficacy in intelligent grading and sorting of fruit and vegetable agricultural products

果蔬品类	数据采集方式	分级标准	分等分选算法	准确率/%
番茄 ^[8]	彩色相机	按照大小、纹理、颜色和形状划分。一级:质量最佳;二级:质量中等;三级:质量最差	支持向量机(Support vector machine,SVM)	99.79~99.9
芒果 ^[9]	公开数据集	按照表面缺陷划分:合格和不合格	卷积神经网络(Convolutional neural network,CNN)	98.5
苹果 ^[10]	工业相机	按照大小、表面缺陷、颜色和形状划分。一级果;高等果;二级果;中等果;其他等级果;低等果	支持向量机	94.12
秋葵 ^[11]	智能手机	按照长度划分:小、中、大和特大4类	AlexNet、GoogLeNet 和 ResNet50	63.45/68.99/99
胡萝卜 ^[12]	成像系统	按照形状划分:规则样品和不规则样品	线性判别分析(Linear discriminant analysis,LDA)和二次判别分析(Quadratic discriminant analysis,QDA)	92.59/96.3
木瓜 ^[13]	智能手机	按照成熟度划分:未成熟、部分成熟和成熟	K 近邻算法(K-Nearest neighbor,KNN)	100
葡萄 ^[14]	大恒工业相机	按照品种划分:巨峰葡萄、红富士葡萄和维多利亚葡萄	GA-YOLO	96.87
山楂 ^[15]	智能手机	按照成熟度划分:未成熟、成熟和过熟	Inception-V3、ResNet-50 和 CNN	100/99.63/99.63

2.1.2 基于无损检测的内部品质分选

内部品质分选技术以无损检测为核心,针对农产品的糖度、硬度、含水率、成熟度、可溶性固形物含量、损伤、农药残留和病害等内部特性进行评估^[17]。这些内部品质指标直接影响农产品的营养价值、口感和储存性能,是消费者和市场对农产品质量评价的重要依据。

光学传感、成像技术和数据分析算法的快速发展,使基于近红外光谱和高光谱成像技术的农产品内部品质分选技术逐渐成为研究热点。近红外光谱检测技术是指通过分析样品对近红外光的吸收、反射或透射特性,实现对果蔬内部成分的定性或定量分析。刘豪等^[18]基于可见/近红外光谱设计了柑橘糖度在线检测分选系统,运用偏最小二乘回归法(PLSR)结合 X-Y 共生距离法(SPHY)和竞争自适应重加权算法(CARS)构建了 SPXY-CARS-PLSR 柑橘糖度在线检测模型,糖度检测准确率为 92%。王加龙等^[19]搭建了以微型光谱仪为核心部件的便携式可见-近红外光谱检测装置,实现了贝贝南瓜可溶性固形物含量(Soluble solids content,SSC)和硬度的快速无损检测,结果显示使用反向传播神经网络和多元线性回归建立的模型预测效果最佳。GUO 等^[20]利用近红外光谱技术对苹果的 SSC 含量和成熟度进行了无损检测,结果显示漫反射光谱结合蚁群优化算法提高了苹果 SSC 的检测精度,PLS-LDA 模型在预测果实成熟度时,准确率为 99.35%。于怀智等^[21]基于近红外光谱漫透射技术对黄桃硬度和 SSC 进行了检测分析,结果显示 SPA-PLS 建立的模型最好,其决定系数分别为 81.1% 和 91.6%。

从上述研究进展可以看出,近红外光谱技术凭借其无损、高效的优势,已成为果蔬内部品质分选的核心手段,但是存在明显的模型泛化性不足问题,现有模型多针对单一品种或场景开发,跨品种迁移需重新标定光谱数据库,耗时耗力。另外,该技术多聚焦在果品中,叶类蔬菜的适应性较差。

高光谱成像检测技术是通过同时获取目标的空间信息和连续光谱信息,利用不同波长下的光谱反射特性,实现对果蔬内部成分和外部特征的无损检测与精准评估。许丽佳等^[22]利用高光谱成像技术结合不同特征光谱变量提取方法构建不同模型,对猕猴桃糖度进行了无损检测,结果发现(CARS+IRIV)-SPA-ELM 模型为检测猕猴桃糖度的最优预测方法,其预测集相关系数为 0.839 0。李瑞等^[23]针对 961~1 665 nm 有效波段采用偏最小二乘回归法对蓝莓果柄侧、花萼侧、整个果实的平均光谱数据进行了硬度和糖度的建模。研究发现在硬度预测上的效果较好,但是在糖度预测上结果有偏差。综上所述,采用高光谱成像检测技术可以对多种果蔬进行内部无损检测。但是,在小型果实的预测效果方面差,精度低于大果实果蔬,如苹果、柑橘等。未来研究中需采用更高分辨率的高光谱图像采集系统,获取更精确的高光谱图像数据。此外,还需要提升在小型果实检测中的精度,同时可以考虑与近红外光谱检测技术结合。

基于近红外光谱和高光谱成像技术的内部品质分选技术对果蔬内部无损检测还涉及猕猴桃、苹果、黄桃、紫菜等多种水果和蔬菜,具体如表 3 所示。表中 ACO 为蚁群优化算法,PLS 为偏最小二乘算法,

MSC 为多元散射校正,UVE 为无信息变量去除算法,SPA 为连续投影算法,Detrend 为去趋势法,ANN 为人工神经网络,IRIV 为迭代保留信息变量法,

ELM 为极限学习机,SNV 为标准正态变量变换,MLR 为多元线性回归,SG 为卷积平滑处理法,VCPA 为变量组合集群分析,GA 为遗传算法。

表 3 基于光谱和成像技术的内部品质分选研究成果

Tab.3 Research results on internal quality sorting technology based on spectroscopy and imaging techniques					
技术	检测产品	检测特性	检测模型	决定系数	文献序号
近红外光谱 检测技术	柑橘	糖度	SPXY – CARS – PLSR	0. 836	[18]
	猕猴桃	糖度	Stacking 集成学习模型	0. 853	[24]
	苹果	糖度	MSC – PLS	0. 949 9	[25]
	赛买提杏	糖度	PLS	0. 96	[26]
	贝贝南瓜	硬度和可溶性固形物含量	多元线性回归和反向传播神经网络	0. 910 7、0. 895 5	[19]
	库尔勒香梨	硬度和可溶性固形物含量	MSC – UVE – PLSR 和 MSC – SPA – PLSR	0. 83、0. 93	[27]
	苹果	可溶性固形物含量和成熟度	漫反射光谱结合 ACO 算法和 PLS – LDA	0. 88、0. 993 5	[20]
	灵武长枣	硬度	Detrend – CARS – PLSR	0. 868	[28]
	西葫芦	硬度	PLSR	0. 886	[29]
	黄桃	硬度和可溶性固形物含量	SPA – PLS	0. 811、0. 916	[21]
	苹果	酸度	ANN 和元启发式算法	0. 925	[30]
	火龙果	酸度	SPA、PLS	0. 925 5	[31]
	紫菜	含水率	CNN	0. 994	[32]
	红枣	含水率	PLS	0. 850	[33]
	蓝莓	新鲜度	SVM	0. 88	[34]
高光谱成像 检测技术	猕猴桃	糖度	(CARS + IRIV) – SPA – ELM	0. 839 0	[26]
	苹果	糖度	马氏距离 + PCA + BP 神经网络	0. 890 81	[35]
	番茄	糖度	MSC + CARS + PLS	0. 904	[36]
	蜜桔	糖度	MSC – CARS – LSSVM 和 SNV – PLSR	0. 955、0. 936	[37]
	枇杷	糖度	SPA – MLR	0. 822	[38]
	蓝莓	硬度	PLS	0. 871	[23]
	李子	硬度	SNV + BP 神经网络	0. 723	[39]
	红提	酸度和硬度	MSC – CARS – SPA – PLSR 和 SG – CARS – PLSR	0. 985 1、0. 929 1	[40]
	香水梨	硬度	VCPA + PLSR	0. 933	[41]
	青梅	酸度	SPA + GA	0. 792 5	[42]
	南果梨	酸度	SPA – PSO – BP	0. 911	[43]

2.2 预冷与保鲜包装技术

2.2.1 果蔬预冷技术

预冷作为果蔬采后冷链管理中的关键环节,能够迅速降低果蔬的田间热量和自身代谢,不但可以抑制采后生理生化变化和微生物生长,而且可以延长保鲜期和贮藏期,保持果蔬的优良感官品质及营养价值^[44]。不同的预冷方式对各类果蔬的采后保鲜效果有显著差异,果蔬预冷技术根据所使用的冷媒类型可分为真空预冷、水预冷和空气预冷^[45],其中压差预冷在空气预冷中应用最为广泛^[46]。

真空预冷是一种通过降低冷却室内气压加速果蔬降温的技术。当果蔬进入真空冷却室时,真空泵将室内压力降至固定值,使果蔬表面的水分迅速蒸发,吸收周围热量从而实现降温,制冷系统则将冷量输送至冷却室,排水系统收集蒸发的水蒸气以保持湿度平衡^[47]。真空预冷的冷却速率是传统冷却方式的 8 ~ 16 倍,且液态转气态的吸热过程迅速且均

匀^[48]。然而,真空预冷的能耗较高,设备投资成本较大,且可能导致食品干耗的增加。应用真空预冷技术,DIRAPAN 等^[49]成功将西兰花的市场销售期从 5 d 延长至 12 d。WANAKAMOL 等^[50]通过研究显著延缓了新鲜切割生菜表面的褐变,抑制了微生物生长,使货架期从 3 d 延长至 9 d,且额外成本仅为 1. 05%。宋晓燕等^[51]发现真空预冷能显著改善草莓的保鲜效果,提升营养成分,延缓变质和腐烂,并有效延长贮藏期。未来可通过优化参数、降低能耗等方式,提高经济性和实用性,进一步推动该技术在农产品供应链中的应用。

水预冷包括冰水预冷和冷水预冷两种方式。冰水预冷通过将碎冰或薄冰直接放入果蔬包装箱中,利用融冰过程吸收热量,实现降温。该方法具有降温速度快、果蔬失水少的优点,但也存在交叉污染的风险。ZHANG 等^[52]发现冰水预冷能够有效维持甜玉米的品质和质量。而邓浩等^[53]通过研究发现冰

水预冷对红毛丹的保鲜效果不如压差预冷和冷风预冷。冯雅蓉等^[54]对冰水预冷在甜樱桃中的应用进行了研究,结果显示,冰水预冷处理的果实耐贮性较差,且易滋生微生物。冷水预冷又分为浸没式、喷淋式和组合式 3 种方式。郭嘉明等^[55]设计了移动式荔枝蓄冷喷淋预冷装置,有效提升了荔枝的预冷效果。ZHANG 等^[56]通过实验发现冷水预冷能有效延长黄桃的货架期,优于其他预冷方法。综上,水预冷技术在不同实验中表现出不同的预冷效果,后续不同品类的果蔬需要进一步筛选和验证适合的预冷方式。同时,交叉污染和微生物滋生问题仍需关注。

空气预冷主要包括强制通风预冷和压差预冷两种方法。强制通风预冷通过强力风扇增强空气流动,提高热交换效率,迅速将果蔬温度降至适宜存储温度,从而减少热量积聚和微生物生长^[57]。该方法在樱桃^[58]、苹果^[59]、卷心莴苣^[60]等果蔬的预冷中取得良好效果。压差预冷则利用气体压差和蒸发作

用,克服了冷库预冷不均匀、时间长等问题,广泛适用于多种果蔬^[61]。张忠星等^[62]通过研究发现,送风速度对预冷效果存在较大影响,高风速能够提高压差预冷效果,但缺点是会增加能耗。王佳捷等^[63]发现高风速和低风温的压差预冷可有效缩短预冷时间、节约电能,并改善西兰花的贮藏品质,降低失重率和腐烂率,延缓品质劣变。总体而言,空气预冷技术能有效提高冷却效率,特别适用于大批量果蔬的快速预冷,但能耗和风速优化仍是研究重点。

不同预冷技术的选择需根据蔬菜特性、贮运要求等因素综合考量。对于水分含量高、易腐果蔬,冰水预冷能有效保持品质并减少水分流失;而坚果、根茎类等耐储作物则更适合采用压差预冷,以确保冷却均匀性,不同预冷方式的优缺点见表 4。随着技术进步,融合人工智能与物联网的智能预冷系统可实现精准控温与能耗优化^[64-65]。同时,使用多技术协同作业可有效提升预冷效率,从而全面提高果蔬供应链的保鲜效能与经济效益。

表 4 不同预冷方式优缺点

Tab.4 Advantages and disadvantages of various pre-cooling methods

技术类型		优点	缺点	适用果蔬类型
真空预冷		降温速度快、均匀性好;卫生	设备成本高、能耗大;失重率较高	表面积大、呼吸速率高的果蔬
	冰水预冷	降温极快;保湿效果好;失重率低	易引发冷害;易造成交叉污染	表皮较厚、耐冷冲击的果蔬
水预冷			降温速度较慢;耗水量大;	
	冷水预冷	成本较低;操作简单;比较均匀	残留水珠可能加速腐烂	耐水性强的果蔬
空气预冷	强制通风预冷	设备简单;成本低	冷却不均匀、时间长;易导致表面失水	长期贮藏的耐贮果蔬
	压差预冷	冷却速度较快、均匀性优于强制通风	需严格码放;设备投资较高	包装类果蔬

2.2.2 果蔬保鲜贮藏

果蔬保鲜贮藏的核心目标是进一步减缓果蔬的代谢速率,以延长存储期并保持其营养成分和感官品质。实现这一目标的关键在于精确调控储存环境中的温度、相对湿度和气体成分等因素^[66]。低温处理能够显著降低果蔬的代谢活动,减少呼吸速率并抑制水分蒸发,从而有效延缓衰老过程。

相对湿度的调控有助于维持果蔬的水分平衡,防止水分流失引起的脱水与干枯。气体成分的调节,尤其是氧气、二氧化碳和氮气的精确配比,可以抑制果蔬的过度呼吸,减缓老化、腐烂等生理变化。这些技术通过不同的物理或化学手段,进一步提升果蔬的保鲜效果^[67],常见的果蔬保鲜贮藏技术见表 5。

表 5 果蔬保鲜贮藏常见技术原理与特点

Tab.5 Principles and characteristics of common preservation and storage technologies for fruits and vegetables

技术	原理	优势	文献序号
低温贮藏	将环境温度控制在 0 ~ 15℃,可减缓果蔬代谢,抑制病菌生长,减少水分蒸发,防止果蔬过早成熟或变质	降低呼吸速率,抑制微生物繁殖,延长贮藏期	[68]
气调贮藏	调节环境氧气含量,减缓果实呼吸,抑制呼吸作用,保持果蔬休眠状态,减少营养消耗,有效保持其品质	适合长期贮藏,可减少营养流失和水分损失,提高贮藏稳定性	[69]
辐射保鲜	利用电子射线等辐射杀灭害虫和病菌,抑制食品代谢和酶活性,延长贮藏和保鲜期	可有效杀菌、减少腐败,不影响食品原有风味	[70 - 71]
生物膜技术	通过天然可食用原料在食品表面形成薄膜,减少氧化、水分流失,抑制病菌,延缓果蔬腐败	环保无污染,对果蔬品质影响小,可与其他保鲜技术结合	[72]
超高压处理	在常温或略高温下,利用液体传压介质施加 100 MPa 以上压力,杀菌灭酶的同时保持食品品质	保持食品原有风味和营养,灭菌高效	[73]

利用上述果蔬保鲜贮藏方式,谢宇等^[74]对比分析了卡因菠萝在常温、普通冷藏、气调贮藏3种方式下感官评价、黑心率、失重率、可溶性固形物含量以及质构指标之间的差异,结果表明,气调贮藏能有效保持新鲜菠萝的品质,是菠萝保鲜的有效方法。周丹蓉等^[75]研究了成熟度和温度与芙蓉李贮藏期间生理生化特性、果皮蜡质结构的关系,发现芙蓉李的蜡质结构的数量和形态变化可能会影响贮藏性。吴中营等^[76]研究了不同采收期宁陵金顶谢花酥梨半地下通风库贮藏效果,并提出了不同采收期的贮藏建议。张惠敏等^[77]探究了不同保鲜剂处理对血橙果实品质和贮藏性能的影响。

当前的果蔬贮藏技术在不同品种、采收期和环境条件下表现出差异化的贮藏效果。气调贮藏和低温贮藏被证明在延长贮藏期、保持果蔬品质方面具有显著优势,而蜡质结构、成熟度等因素对果蔬耐贮性也起着关键作用。未来,需结合智能传感监测系统优化贮藏环境,探索纳米保鲜涂层、新型气调包装

等创新手段,提高果蔬贮藏稳定性,降低损耗率。

2.2.3 果蔬包装技术

包装技术的应用是解决果蔬农产品在运输过程中受机械损伤或病原侵染、易腐烂变质等问题的有效手段,减少果蔬损耗并降低包装成本对果蔬产业的高质量发展具有重要意义。传统果蔬包装技术主要包括纸箱包装、塑料包装和泡沫包装等^[78],这些包装方式在保证果蔬运输过程中的安全性和防护性方面起到了重要作用。然而,在物流运输过程中,纸箱容易受潮,导致果蔬腐烂。塑料袋虽然可以保持湿气,但过度封闭会加速果蔬的腐烂过程。泡沫包装虽然有很好的缓冲作用,但不透气,容易使包装内的湿气积聚,对果蔬的保鲜反而产生负面影响。

随着现代农产品供应链日益发展,食品工业全球化进程加快,消费者对可持续和环保包装的需求增长,分销网络扩展中对保护和保鲜的需求逐步加强,包装技术持续创新发展。目前,在果蔬农产品销售市场上,常见包装技术如表6所示。

表6 果蔬包装常见技术
Tab.6 Common packaging technologies for fruits and vegetables

技术	概念原理	优势	文献序号
活性包装	通过释放或吸收特定物质主动调节包装内环境,抑制微生物生长与果蔬代谢	延长货架期,减少化学防腐剂使用,适用于高附加值果蔬	[79–80]
可食用涂料或薄膜	采用可食用或可降解材料形成保护膜,减少水分流失与氧化	环保可降解,透气性可控,降低包装废弃物	[81]
气调包装	调节包装内气体成分,抑制呼吸作用与微生物活性	延缓成熟与腐败,延长货架期	[82]
纳米封装	利用纳米材料增强包装的抗菌、防潮或阻隔性能	长效抗菌,适用于易腐果蔬	[83–84]
智能包装	集成传感器与信息技术,实时监测并反馈果蔬品质变化	动态预警腐败风险,消费者可扫码获取新鲜度数据	[85–87]

采用活性包装技术,杨辉等^[88]使用含有1%丁香精油和1%葡萄籽精油的乙烯-乙烯醇共聚物活性薄膜在冷藏条件下,显著提高了圣女果的保鲜效果,减少烂果率并延长储藏期,刘宝安等^[89]则是降低了番茄腐烂率,维持了樱桃番茄果实贮藏品质。ZHU等^[90]研究发现,含纳米氧化锌和表面活性剂的低密度聚乙烯薄膜具有优异的防雾、抗菌性能,有效延缓生菜质量退化,适用于果蔬保鲜。TAVASSOLI-KAFRANI等^[91]认为在芒果果实上应用可食用薄膜和涂料是保持其质量和安全的有效方法。ESMAEILI等^[92]研究了芦荟凝胶与气调包装协同作用下的草莓果实变化,发现草莓的质量损失显著降低且保质期有效延长。孙小静等^[93]经过对比实验得出,MP40厚度气调包装袋可有效保持小米椒低温贮藏的商品性,延长贮藏期。

结合现代科学技术的发展,智能包装技术利用先进的传感器^[94],调节材料^[95]和信息技术^[96],实时

监控并调节包装内部的环境条件^[97],在果蔬新鲜度监测包装、成熟度监测包装和温度监测包装中取得了较好的应用成效。

2.3 产地溯源技术

不同地域环境对果蔬品质和营养成分具有显著影响,同一品类的农产品因产地不同,其商品价值也存在较大差异。为了区分果蔬农产品的产地来源,市场上普遍采用产品注册认证标签的方式对果蔬农产品的产地进行标注,但仍无法避免不法商贩通过伪造或误标等手段,损害品牌信誉并侵害消费者权益。针对这类问题,产地溯源技术不断完善,现阶段主要可为两大类:化学与生物分析型溯源和信息技术驱动型溯源。

2.3.1 化学与生物分析型溯源

化学与生物分析型溯源通过检测果蔬中与产地环境密切相关的化学或生物标志物,建立“成分-产地”关联模型,实现精准溯源。其核心依据是土壤、

水源、气候等环境因素对果蔬成分的长期影响。通过分析果蔬农产品元素组成^[98]、同位素比率^[99]、光谱特征^[100]等来确认其生产地和生产环境。常用的产地溯源技术包括矿物元素分析、稳定同位素分析、有机成分分析和 DNA 指纹分析等方法^[101]。稳定同位素分析通过 C、H、O、N、S、Sr、Pb、B 等同位素比值反映产地的气候与灌溉水源差异。目前,已经广泛应用于果蔬产地溯源中。例如,于寒冰等^[102]通过联合分析草莓中稳定同位素和矿物元素的特征指标所构建的复合溯源模型能实现 100% 产地精准判别,显著优于单一技术方法。MUÑOZ-REDONDO 等^[103]通过分析牛油果中 5 种稳定同位素比值及 46 种元素含量,构建的 PLS-DA 模型以 98% 的准确率区分西班牙与非西班牙产牛油果,验证了稳定同位素与元素谱结合技术在地理溯源中的高效性。OPATIC 等^[104]在欧洲及地中海地区结合轻元素同位素与 11 种元素指纹技术,构建了多变量判别模型,生菜、甜椒和番茄的识别准确率为 86.2%、71.1% 和 74.4%,实现了跨国蔬菜地理溯源,为建立国家级产地认证监测体系提供了实践依据。

基于化学与生物分析进行产地溯源具有一定优势,其检测精度较高,更适用于高附加值产品的地理标志认证。但存在设备昂贵和检测周期长等局限,同时还依赖大量标样数据库。因此,未来的发展也

更趋向于多技术的融合,以避免单一技术带来的精度差等问题。

2.3.2 信息技术驱动型溯源

信息技术驱动型溯源通过整合物联网、区块链和大数据等技术,构建覆盖生产、加工、流通全链条的智能化追溯体系,已成为提升果蔬农产品质量安全与品牌价值的关键手段。物联网技术通过部署温湿度、光照强度、土壤传感器及 GPS 定位设备,实时采集果蔬生长环境与物流路径的动态数据,结合 RFID 标签或二维码赋予产品唯一数字标识,形成连续、不可篡改的数据链。李彪等^[105]基于 RFID 与二维码技术构建了新疆哈密瓜溯源系统,通过多技术融合实现全生命周期数据追溯,显著提升产品质量可控性与政府监管效能,同时强化了品牌溢价效应。

区块链技术的去中心化特性确保了数据的安全性和可信度,防止了信息篡改和伪造的风险。这一技术主要应用于在果蔬农产品的质量追溯和供应链管理,尤其在一些高价值的农产品和存在掺假风险的品类中应用广泛。通过区块链溯源系统,消费者可以通过扫描二维码查询区块链上的信息,直接查看产品的详细产地和生产过程,提升产品的透明度与信任度。同时,农产品的供应链各方可以共享数据,提升生产效率,确保食品安全,减少食品欺诈和浪费。表 7 展示了区块链技术在农产品供应链溯源中的应用成果。

表 7 区块链技术在农产品供应链溯源中的研究成果

Tab.7 Research progress on blockchain technology in traceability of agricultural product supply chains			
技术方案	核心创新	技术优势	文献序号
多链协同架构与跨链追溯	主从多链分层存储模型	降低数据冗余、提升查询效率、 兼顾隐私性与协同效率	[106]
	多链协同模型		[107-108]
	跨链交互与属性访问控制		[109]
智能合约驱动的自动化溯源	新鲜度评价与可信追溯	新鲜度评价分析、自动化违规 检测	[110]
	防窜货自动识别		[111]
	果蔬区块链数据存储方法		[112]
	门限代理重加密隐私数据共享方法		[113]
隐私保护与数据安全机制	属性可搜索加密	保护隐私数据、原产地可信溯源	[114]
	边缘计算		[115]

目前,农产品区块链溯源技术的研究主要聚焦在多链协同架构与跨链追溯、智能合约驱动的自动化溯源和隐私保护与数据安全机制等方面。在果蔬供应链中,孙传恒等^[106]针对全供应链区块链溯源系统中异构数据共享与隐私保护难题,构建了基于多链架构的追溯模型,通过分链差异化存储与访问控制实现数据安全流转,有效解决敏感数据保护、风险监管及跨主体协同问题,为果蔬供应链可信追溯提供多链协同范式。杨信廷等^[109]提出了基于属性

的跨链访问控制模型,主要针对果蔬供应链中异构多链数据共享与隐私保护问题,通过利用基于中继链的跨链技术实现多链之间的跨链通信,为多链协同追溯提供可扩展解决方案。孙传恒等^[112]提出了基于多链架构的加密溯源框架,主要解决区块链单链架构难以满足果蔬供应链溯源数据高效存储与安全共享的问题,通过数据分类加密存储、链间授权访问和智能合约解密查询机制,在降低存储压力的同时实现了隐私数据共享。然而,大部分研究仍基于

农产品供应链的共性框架,侧重于通用型作物供应链模式的溯源机制设计,忽略了不同果蔬品类在生化属性、供应链脆弱点及商品化特征等方面的独特性。为实现精准溯源创新,未来研究需充分融合区块链技术优势,深度结合特定果蔬品类的产业特征,从全生命周期角度进行数据解析,设计出更具针对性和适应性的溯源机制。

综上所述,信息技术驱动式溯源技术通过多技术协同架构构建了全链条动态、可信的追溯网络,显著提升了果蔬农产品的质量监管效率与市场竞争力。其核心价值在于借助数据全链路可视化与全流程智能化重构产业信任机制,形成“从种植到消费”的数字化责任闭环,为农业全要素数字化转型提供基石支撑。未来研究应突破现有技术集成框架,将大数据驱动的多源异构数据融合、云端链协同计算与轻量化机器学习模型相结合,构建具有品种适应性的风险预警与溯源优化动态模型。同时,人工智能与大模型技术的深度应用将推动溯源系统向知识化决策迈进,通过自然语言交互、因果推理与多模态数据融合,构建具有行业认知能力的智能追溯生态。

3 国内外应用现状

3.1 果蔬分选技术应用

智能分等分选技术主要应用于智能分选机。目前,国外企业主要集中在挪威、瑞士、荷兰、法国和美国等国家,其机械化和智能化程度较高,设备种类多样化。TOMRA 公司是挪威的分选机生产企业,产品种类覆盖外部质量分选和内部品质分选,从小果分选机到光学分选机,其产品可以实现多种农产品的分选与检测。瑞士 Bühler 集团主要生产基于光学分析的智能分选机,其中 SORTEX E1D 型分选机的分选对象包括速冻蔬菜、水果和浆果等,采用 PloarVision 和 Profile 技术可检测颜色和外观缺陷,分选效率达 7 t/h。荷兰 AWETA 公司的产品主要集中于基于超声波技术的果蔬品质分选。检测产品包括苹果、鳄梨、柑橘、黄瓜、芒果等多种果蔬农产品,在全球超过 45 个国家和地区都有应用和服务。法国 MAF RODA 公司的果蔬分选设备结合光谱分析、激光和紫外线对产品进行内部和外部品质分选,同时结合溯源体系对每个果实进行来源追踪,可以满足多种果蔬的分选需求。VERYX 2.0 光学分选平台是由美国 KEY TECHNOLOGY 公司研发制造,平台集成超高分辨率成像和机器学习算法,可以实现对多种果蔬的分选和缺陷检测,在全球超 80 个国家或地区广泛应用。国内智能分选机的研究和制造起步较晚,但经过前期设备引进和技术探索,智能分选

机行业同样展现出强劲的增长趋势,许多企业开始自研智能分选机并逐步推广和应用。嘉创利农机械公司研发了外部品质分选系统、内部品质检测系统、颜色识别系统、直径分选系统和智能称重系统五大核心技术,确保了每一颗果蔬都能以最佳状态抵达消费者手中。REEMOON 绿萌科技公司联合国内高等科研机构和院校,应用机器视觉、高光谱、人工智能等技术,分选覆盖 50 余种果蔬品种,同时面向全球推广应用。浙江德菲洛智能机械制造有限公司针对果皮脆弱型和硬皮类水果的品质分选分别设计了解决方案,设备支持多种果蔬的分级分选。总体来看,国内智能分选技术在基础分选领域已接近国际水平,但在高端检测、智能算法、传感器等方面仍需突破。未来应重点发展高光谱成像、自适应分选等技术,推动国产设备向智能化、精准化方向发展。

3.2 果蔬预冷技术应用

发达国家在果蔬预冷技术领域已建立起成熟完善的体系,欧美国家预冷技术起步早,日本更是通过立法将预冷作为果蔬采后处理的强制性环节。Star Cool 集成冷藏箱是由丹麦 Maersk Container Industry 公司研发制备,能有效提升蓝莓、荔枝等易腐农产品的保存周期。日本三菱重工设计集装箱式预冷机组,结合真空和压差技术,适用于荔枝、樱桃等易腐水果。国内 COLDMAX 科美斯公司在预冷机制备上成绩突出,其设备涉及真空预冷机、压差预冷机和冷水预冷机等,在果蔬预冷保鲜方面经验丰富。大型连锁超市、高端电商平台及出口企业正逐步建立起较为完善的预冷体系,但是,中小型流通企业和传统农贸市场仍缺乏基本的预冷设施,预冷意识薄弱。预冷设备的自主研发能力正在提升,但核心部件仍依赖进口。总体来看,我国产地处理领域的预冷技术应用仍处于初级阶段,呈现出“重点品类有突破、整体普及率低”、“大型企业有投入、中小企业缺动力”、“设备数量有增长、技术水平待提升”的特点。

3.3 果蔬包装技术应用

保鲜包装技术主要应用于智能包装机和包装材料。我国果蔬农产品包装技术与国际先进水平相比仍存在一定差距。德国 MULTIVAC 公司的热成型拉伸膜包装机配备 FreshSAFE 包装系统,采用开放式网膜,可延长果蔬农产品的保质期。agrofresh 公司针对多种果蔬研发了智能包装技术,可以延长保质期、减少浪费,为客户提供更优质的农产品。法国 MAF RODA 公司研发了苹果包装机器人,该机器人配备 iQS 技术,用于外部质量和颜色检测,确保只包装高质量的水果。美国 Amcor 公司为浆果、樱桃、橙子、苹果、葡萄、西瓜等新鲜果蔬定制了渗透膜以

保持新鲜度。荷兰 Apeel 公司从柑橘皮提取多糖形成可食用膜,该植物基涂膜剂可以减少水分流失,已在牛油果、柑橘、柠檬等果品广泛应用。国内基础包装设备已接近国际水平,但在智能气体调控、活性材料、超高速自动化等领域还存在一定差距。

3.4 果蔬农产品溯源系统

发达国家在果蔬农产品溯源系统领域已形成较为成熟的技术体系。美国 Trustwell 公司开发的 FoodLogiQ 区块链溯源平台可实时记录果蔬种植、采收、加工、运输等全链条数据,并实现了供应链可视化。美国 IBM Food Trust 平台采用分布式账本技术,已服务于沃尔玛、家乐福等零售巨头,实现芒果、蓝莓等易腐果蔬的分钟级源头追溯。法国 MAF RODA 公司在溯源方面也进行了许多工作,从自动印刷系统到更复杂的生产管理系统,为果蔬农产品提供可追溯性解决方案。国内果蔬溯源系统建设呈现“政府主导、企业参与”的二元发展格局。农业农村部主导的“国家农产品质量安全追溯管理信息平台”已覆盖农产品生产、加工、流通到消费全链条的数字化管理,旨在实现“来源可查、去向可追、责任可究”的质量安全目标。阿里巴巴“蚂蚁链”打造区块链溯源系统,消费者可查看农产品的种植、施肥记录及分选加工等信息。但中小型生产基地仍普遍采用传统纸质档案管理,存在数据孤岛、信息断层和技术集成度不足等问题。虽然我国在基础编码应用上已趋成熟,但在实时数据采集、跨国标准对接、消费者交互体验等方面还存在短板。

4 未来展望

随着智慧农业技术的推广应用,果蔬产地处理技术在提质增效方面成效显著,但仍面临技术适配性、系统协同性和可持续性挑战。例如,在技术应用层面,智能化设备的高成本和技术成熟度制约了普及进程;农产品冷链流通水平尚低于发达国家水平,特别是在偏远地区,冷链断链严重加剧了预冷果蔬在运输过程中的损耗程度;在可持续发展层面,环保包装材料的研发应用呈现加速态势,可降解薄膜的透气性调控、纳米复合材料的抗菌性能优化等创新,正推动包装材料碳足迹降低,但成本仍是规模化应用的瓶颈;溯源技术正从“可追溯”向“可信追溯”升级,但跨主体数据共享机制缺失制约了全程追溯的实现等。这些问题指明了未来技术突破和产业升级的发展方向。本文围绕智能化、绿色化和系统化三大维度,展望果蔬产地处理技术的发展路径和应用前景。

4.1 分等分选轻量化

果蔬分等分选技术的轻量化发展是多维度协同创新的关键。在硬件层面,开发适配智能手机终端的轻量化模型,降低传统分选设备的体积和重量,同时保持基础分选准确率。在感知系统方面,构建便携式“外观-内部”双维度检测装置,实现果蔬品质的快速无损评估。特别针对叶类蔬菜等易损品类,通过自适应深度学习算法有效克服叶片褶皱和重叠带来的成像干扰,有效解决叶类蔬菜分拣问题。在系统架构上,采用“端-边-云”协同计算模式,通过模型剪枝和量化技术将计算复杂度降低,使普通智能手机也能实现实时分选处理。此类轻量化技术的推广应用,可降低中小农户的分选设备投入成本及操作复杂度,为促进精准农业技术在资源受限场景下的普及提供可行性路径。

4.2 预冷技术精准化

果蔬预冷的智能化精准调控与绿色节能是主要创新发展方向。在智能化方面,通过构建果蔬-环境多物理场耦合模型,实现预冷过程的虚拟仿真与参数优化。结合边缘计算设备和实时传感器网络,动态监测果蔬核心温度与冷害风险指标,实现按品种、按成熟度的个性化预冷方案定制。在绿色化维度,采用光伏-储能混合供电系统,配合相变蓄冷材料和变频制冷技术,降低能耗;开发基于物联网的移动式预冷单元,满足产地即时预冷需求。系统化方面,建立覆盖众多主流品种的预冷策略知识库,集成生理特性数据库和专家决策系统,通过云端协同实现预冷方案的智能推荐与远程优化。该技术体系可有效提升预冷效率,降低果蔬采后损耗率,推动冷链环节碳减排,为构建智慧低碳的农产品供应链提供核心技术支撑。

4.3 保鲜包装绿色化

保鲜包装技术将聚焦绿色材料与智能动态响应。在智能化升级方面,需要更加关注动态响应型包装系统的研发,包括 pH 敏感型变色标签和气体调控薄膜,能够实时感知并响应果蔬腐败过程中释放的挥发性有机化合物,实现货架期动态延长。在数据监测整合层面,区块链赋能的智能标签技术需进一步突破实现,通过集成 NFC 芯片和温湿度历史记录功能,消费者扫码可追溯产品从采收至零售的全链条数据,提升供应链透明度。这些创新将推动保鲜包装从被动保护向主动调控转变,实现食品安全、环境保护和经济效益的多赢局面。

4.4 产地溯源数字化

多源数据融合、隐私保护和智能决策是产地溯源数字化技术发展的核心需求。结合近红外光谱特

征、稳定同位素指纹和区块链技术,可构建“成分特征-地理标识-流通轨迹”多维溯源模型,提升产地鉴别准确性。在隐私保护方面,实现溯源数据在供应链各环节的安全共享,降低敏感信息泄露风险。同时,利用大模型技术在大数据解析与供应链动态

建模方面的优势,增强全生命周期数据解析和智能决策能力。产地溯源技术的优化与创新,将为构建全链条可追溯、数据不可篡改的农产品数字身份认证系统提供关键支撑,推动农产品智慧供应链的数字化转型升级。

参 考 文 献

[1] 赵建勋,田长青,唐明生,等. 蔬菜产地处理过程碳排放模型建立与计算分析[J]. 冷藏技术, 2024, 47(3): 6-11.
ZHAO Jianxun, TIAN Changqing, TANG Mingsheng, et al. Development of carbon emission model of vegetable treatment process in producing area and emission analysis[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2024, 47(3): 6-11. (in Chinese)

[2] FACCHINI F, SILVESTRI B, DIGIESI S, et al. Agri-food loss and waste management:win-win strategies for edible discarded fruits and vegetables sustainable reuse[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 83: 103235.

[3] 全好林,彭世豪,邬佳娟,等. 基于供应链的果蔬冷链物流优化研究[J]. 全国流通经济, 2022(30): 16-19.
TONG Haolin, PENG Shihao, WU Jiajuan, et al. Research on optimization of fruit and vegetable cold chain logistics based on supply chain[J]. China Circulation Economy, 2022(30): 16-19. (in Chinese)

[4] 农业农村部关于印发《“十四五”全国农产品产地市场体系发展规划》的通知[EB/OL]. (2022-04-01) [2024-12-13]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2022/202203/202204/t20220401_6395165.htm.

[5] 国务院办公厅关于印发“十四五”冷链物流发展规划的通知[EB/OL]. (2021-11-26) [2024-12-13]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5667300.htm.

[6] 柳军,孔杰,皮杰,等. 果蔬分拣设备研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 120-125.
LIU Jun, KONG Jie, PI Jie, et al. Research status and development trend of fruit and vegetable sorting equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(8): 120-125. (in Chinese)

[7] YU J, ZHANG Z, LI Y, 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.

[8] ZUO H. 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.

[9] NITHYA R, SANTHI B, MANIKANDAN R, et al. Computer vision system for mango fruit defect detection using deep convolutional neural network[J]. Foods, 2022, 11(21): 3483.

[10] HU G, ZHANG E, ZHOU J, et al. Infield apple detection and grading based on multi-feature fusion[J]. Horticulturae, 2021, 7(9): 276.

[11] RAIKAR M M, MEENA S M, KUCHANUR C, et al. Classification and grading of okra-ladies finger using deep learning[J]. Procedia Computer Science, 2020, 171: 2380-2389.

[12] JAHANBAKHSI 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.

[13] BEHERA S K, RATH A K, SETHY P K. Maturity status classification of papaya fruits based on machine learning and transfer learning approach[J]. Information Processing in Agriculture, 2021, 8(2): 244-250.

[14] CHEN J, MA A, HUANG L, et al. GA-YOLO: a lightweight YOLO model for dense and occluded grape target detection [J]. Horticulturae, 2023, 9(4): 443.

[15] AZADNIA R, FOULADI S, JAHANBAKHSI A. Intelligent detection and waste control of hawthorn fruit based on ripening level using machine vision system and deep learning techniques[J]. Results in Engineering, 2023, 17: 100891.

[16] 武振超,杨睿哲,王文奇,等. 异常水培生菜自动分选系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 282-290.
WU Zhenchao, YANG Ruizhe, WANG Wenqi, et al. Design and experiment of sorting system for abnormal hydroponic lettuce [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 282-290. (in Chinese)

[17] 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 Baohua, LI Jiangbo, FAN Shuxiang, 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. (in Chinese)

[18] 刘豪,龚中良,文韬,等. 基于可见/近红外光谱的柑橘糖度在线检测分选系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2023, 49(4): 497-502.
LIU Hao, GONG Zhongliang, WEN Tao, et al. Design and experiment of an online detection and sorting system for citrus sugar content based on visible/near infrared spectroscopy[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2023, 49(4): 497-502. (in Chinese)

[19] 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 Jialong, MA Kun, GAO Peng, et al. To develop a portable quality non-destructive detector for kabocha squash based on visible and near-infrared spectroscopy[J]. Food Science, 2025, 46(6): 254–262. (in Chinese)

- [20] GUO Z, CHEN X, ZHANG, et al. Dynamic nondestructive detection models of apple quality in critical harvest period based on near-infrared spectroscopy and intelligent algorithms[J]. Foods, 2024, 13(11): 1698.

- [21] 于怀智, 陈东杰, 姜沛宏, 等. 近红外光谱对蒙阴黄桃硬度和可溶性固形物的在线检测 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 216–221.

YU Huaizhi, CHEN Dongjie, JIANG Peihong, et al. Online prediction of soluble solids and firmness of Mengyin peaches based on Vis/NIR diffuse-transmission spectroscopy[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 216–221. (in Chinese)

- [22] 许丽佳, 陈铭, 王玉超, 等. 高光谱成像的猕猴桃糖度无损检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2188–2195.

XU Lijia, CHEN Ming, WANG Yuchao, et al. Study on non-destructive detection method of kiwifruit sugar content based on hyperspectral imaging technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(7): 2188–2195. (in Chinese)

- [23] 李瑞, 傅隆生. 基于高光谱图像的蓝莓糖度和硬度无损测量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1): 362–366.

LI Rui, FU Longsheng. Nondestructive measurement of firmness and sugar content of blueberries based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.1): 362–366. (in Chinese)

- [24] 郭志强, 张博涛, 曾云流. 近红外光谱结合 Stacking 集成学习的猕猴桃糖度检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(10): 2932–2940.

GUO Zhiqiang, ZHANG Botao, ZENG Yunliu. Study on sugar content detection of kiwifruit using near-infrared spectroscopy combined with Stacking ensemble learning[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(10): 2932–2940. (in Chinese)

- [25] 刘燕德, 崔惠桢, 李斌, 等. 基于可见-近红外光谱技术的苹果糖度光照位置优化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(11): 3373–3379.

LIU Yande, CUI Huizhen, LI Bin, et al. Study on optimization of apple sugar degree and illumination position based on near-infrared technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(11): 3373–3379. (in Chinese)

- [26] 彭娟, 邵学广, 楚刚辉. 微型近红外光谱法快速检测赛买提杏糖度[J]. 分析试验室, 2023, 42(10): 1285–1291.

PENG Juan, SHAO Xueguang, CHU Ganghui. Rapid detection of Cymaiti apricot soluble solids content by miniature near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2023, 42(10): 1285–1291. (in Chinese)

- [27] CHE J, LIANG Q, XIA Y, et al. The study on nondestructive detection methods for internal quality of Korla fragrant pears based on near-infrared spectroscopy and machine learning[J]. Foods, 2024, 13(21): 3522.

- [28] 彭雅玲, 邱雪, 张海红, 等. 近红外光谱技术检测灵武长枣果肉硬度和贮藏时间[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(1): 182–188.

PENG Yaling, QIU Xue, ZHANG Haihong, et al. Near-infrared spectroscopy for the determination of hardness and storage time of jujube fruit[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(1): 182–188. (in Chinese)

- [29] 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 Shuhai, ZHANG Shujuan, SUN Haixia, et al. Establishment of nondestructive testing model of zucchini hardness based on visible/near infrared spectrum[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(1): 58–60, 121. (in Chinese)

- [30] POURDARBANI R, SABZI S, ROHBAN M H, et al. Using metaheuristic algorithms to improve the estimation of acidity in Fuji apples using NIR spectroscopy[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13(6): 101776.

- [31] 罗霞, 洪添胜, 罗阔, 等. 近红外光谱技术无损检测火龙果有效酸度[J]. 现代食品科技, 2016, 32(7): 276–282.

LUO Xia, HONG Tiansheng, LUO Kuo, et al. Non-destructive measurement of the active acidity of pitaya by near-infrared spectroscopy[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(7): 276–282. (in Chinese)

- [32] 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 Wenwen, HU Yadong, SUN Wenke, 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. (in Chinese)

- [33] 杨植, 王振磊, 林敏娟. 基于近红外光谱技术的红枣水分无损检测[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(12): 2320–2326.

YANG Zhi, WANG Zhenlei, LIN Minjuan. Nondestructive testing of jujube water based on the NTRS[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(12): 2320–2326. (in Chinese)

- [34] 曾明飞, 朱玉杰, 冯国红, 等. 基于可见/近红外光谱的蓝莓新鲜度快速评价[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(20): 252–259.

ZENG Mingfei, ZHU Yujie, FENG Guohong, et al. Rapid evaluation of blueberry freshness based on visible/near-infrared spectroscopy[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(20): 252–259. (in Chinese)

- [35] 陈杰, 姚娜, 武宁, 等. 基于 BP 神经网络的苹果高光谱图像糖度定量分析[J]. 塔里木大学学报, 2022, 34(4): 69–76. CHEN Jie, YAO Na, WU Ning, et al. Quantitative analysis of sugar content in apple hyperspectral image based on BP neural network[J]. Journal of Tarim University, 2022, 34(4): 69–76. (in Chinese)
- [36] 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): 104–112. XU Yixin, DAI Haichen, ZHANG Yue, et al. Detection of tomato fruit sugar content based on phase imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(3): 104–112. (in Chinese)
- [37] 李斌, 万霞, 刘爱伦, 等. 基于高光谱成像技术的涌泉蜜桔糖度最优检测位置[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(1): 128–139. LI Bin, WAN Xia, LIU Ailun, et al. Optimal position for suger content detection of Yongquan honey oranges based on hyperspectral imaging technology[J]. Chinese Optics, 2024, 17(1): 128–139. (in Chinese)
- [38] 冯树南, 谭涛, 尚静, 等. 枇杷糖度无损检测及可视化研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2): 157–163. FENG Shunan, TAN Tao, SHANG Jing, et al. Non-destructive detection and visualization of sugar content in loquat[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(2): 157–163. (in Chinese)
- [39] 孟庆龙, 张艳, 尚静. 高光谱成像结合 BP 网络无损检测李子的硬度[J]. 激光与红外, 2019, 49(8): 968–973. MENG Qinglong, ZHANG Yan, SHANG Jing. Nondestructive detectionon firmness of plums based on hyperspectral imaging and BP network[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(8): 968–973. (in Chinese)
- [40] 高升, 徐建华. 高光谱成像的红提总酸与硬度的预测及其分布可视化[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 327–336. GAO Sheng, XU Jianhua. Hyperspectral imaging for prediction and distribution visualization of total acidity and hardness of red globe grapes[J]. Food Science, 2023, 44(2): 327–336. (in Chinese)
- [41] 孙博康, 刘贵珊. 基于高光谱技术检测香水梨硬度的研究[J]. 食品安全导刊, 2021(19): 118–120.
- [42] 赵茂程, 杨君荣, 陆丹丹, 等. 基于高光谱成像的青梅酸度检测方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 318–323. ZHAO Maocheng, YANG Junrong, LU Dandan, et al. Detection methods of greengage acidity based on hyperspectral imaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 318–323. (in Chinese)
- [43] 张芳, 邓照龙, 田有文, 等. 基于高光谱成像技术的南果梨酸度无损检测方法[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(2): 231–239. ZHANG Fang, DENG Zhaolong, TIAN Youwen, et al. Non-destructive testing method for acidity of nanguo pear based on hyperspectral imaging technology[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(2): 231–239. (in Chinese)
- [44] 鞠琪, 李长亮, 冯毓琴, 等. 预冷技术在西兰花保鲜中的应用研究进展[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(8): 709–712. JU Qi, LI Changliang, FENG Yuqin, et al. Application and research progress on the precooling technologies in broccoli preservation[J]. Journal of Cold–Arid Agricultural Sciences, 2023, 2(8): 709–712. (in Chinese)
- [45] XIANG B, ZHANG X. Advancements in the development of field precooling of fruits and vegetables with/without phase change materials[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 109007.
- [46] 董庆鑫, 矫佳伟, 杨大恒, 等. 冷链物流中预冷技术及其对果蔬品质影响的研究进展[J]. 冷藏技术, 2023, 46(4): 78–82. DONG Qingxin, JIAO Jiawei, YANG Daheng, et al. Research progress of precooling technology in cold chain logistics and its influence on fruit and vegetable quality[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2023, 46(4): 78–82. (in Chinese)
- [47] 罗健生, 郑元法, 赵建云, 等. 果蔬真空预冷机控制系统的设计[J]. 时代农机, 2016, 43(3): 65–66. LUO Jiansheng, ZHENG Yuanfa, ZHAO Jianyun, et al. Design of fruit and vegetable vacuum precooling machine control system[J]. Times Agricultural Machinery, 2016, 43(3): 65–66. (in Chinese)
- [48] 焦丹, 韩忠君. 基于智慧冷链预冷机的保鲜监控系统[J]. 食品工业, 2024, 45(10): 42–47. JIAO Dan, HAN Zhongjun. Monitoring system based on intelligent cold chain precooling machine[J]. The Food Industry, 2024, 45(10): 42–47. (in Chinese)
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 宋晓燕, 焦琳涵, 徐如颖, 等. 真空预冷处理对草莓冷藏贮藏品质的影响[J]. 制冷技术, 2024, 44(1): 73–81. SONG Xiaoyan, JIAO Linhan, XU Ruying, et al. Effect of vacuum precooling treatment on storage quality of strawberries[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2024, 44(1): 73–81. (in Chinese)
- [52] ZHANG C, ZHOU P, 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.
- [53] 邓浩, 尹青春, 林玉钦, 等. 不同预冷方式对红毛丹贮藏品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(1): 1–4. DENG Hao, YIN Qingchun, LIN Yuqin, et al. Effect of different precooling methods on quality of Rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) during storage[J]. The Food Industry, 2021, 42(1): 1–4. (in Chinese)
- [54] 冯雅蓉, 杜俊杰. 预冷方式对甜樱桃采后耐贮性及新橙皮苷代谢的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 239–250.

- FENG Yarong, DU Junjie. Effects of precooling treatments on postharvest storability and neohesperidin metabolism in sweet cherries[J]. Food Science, 2023, 44(15): 239–250. (in Chinese)
- [55] 郭嘉明, 蔡威, 林济诚, 等. 移动式荔枝蓄冷喷淋预冷装置控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 367–375.
- GUO Jiaming, CAI Wei, LIN Jicheng, et al. Design and test of control system of mobile lychee storage and spraying precooling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 367–375. (in Chinese)
- [56] ZHANG Y, GUO M, MEI J, et al. Effects of different postharvest precooling treatments on cold-storage quality of yellow peach (*Amygdalus persica*)[J]. Plants, 2022, 11(18): 2334.
- [57] 王东礼. 强制通风预冷及包装对葡萄运输效果的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2010.
- WANG Dongli. Effect of forced air pre-cooling and packaging in grape transportation[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [58] LIU F, JIA B, LI Z, et al. Thermodynamics analysis for forced air pre-cooling of cherry[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(11): e13881.
- [59] JIA B, YANG L, ZHANG L, et al. Energy consumption in relation to the number of stacked packages in forced air pre-cooling of apples[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(5): e14021.
- [60] WANG X, FAN Z, LI B, 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.
- [61] 侯冬苗. 可移动式双温区压差预冷装置设计与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016.
- HOU Dongmiao. Design of a movable double temperature zone pressure precooling device and experimental study [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2016. (in Chinese)
- [62] 张忠星, 张云鹏, 王旭荣, 等. 送风速度对结球生菜压差预冷性能的影响[J]. 中国果菜, 2023, 43(7): 5–10.
- ZHANG Zhongxing, ZHANG Yunpeng, WANG Xurong, et al. Effect of air supply speed on the forced air cooling performance of lettuce[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(7): 5–10. (in Chinese)
- [63] 王佳捷, 孙颖, 刘雅慈, 等. 压差预冷对西兰花贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 227–235.
- WANG Jiajie, SUN Ying, LIU Yaci, 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. (in Chinese)
- [64] VERREYDT C, COBBINAH SAM E, CELIS A M, et al. Identifying cooling heterogeneity during precooling and refrigerated trailer transport for the citrus supply chain by extensive temperature monitoring within full-scale experiments [J]. Food Control, 2024, 165: 110672.
- [65] YANG B, HUNG Y C, KUMAR G D, et al. From sunburn detection to optimal cooling: a review of recent applications of thermal imaging to improve preharvest and postharvest handling of fruit and vegetables [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 337: 113527.
- [66] 张若瑜, 张卫国. 果蔬保鲜贮藏的冷链仓储环境分析[J]. 物流技术与应用, 2019, 24(增刊1): 62–65.
- ZHANG Ruoyu, ZHANG Weiguo. Analysis of cold chain warehousing environment for fresh fruits and vegetables[J]. Logistics & Material Handling, 2019, 24(Supp.1): 62–65. (in Chinese)
- [67] LEE J Y, YANG S Y, YOON K S. Control measures of pathogenic microorganisms and shelf-life extension of fresh-cut vegetables[J]. Foods, 2021, 10(3): 655.
- [68] 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.
- [69] FANG Y, WAKISAKA M. A review on the modified atmosphere preservation of fruits and vegetables with cutting-edge technologies[J]. Agriculture, 2021, 11(10): 992.
- [70] BISHT B, BHATNAGAR P, GURURANI P, et al. Food irradiation: effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables—a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 372–385.
- [71] YAO J, CHEN W, FAN K. Recent advances in light irradiation for improving the preservation of fruits and vegetables: a review[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103206.
- [72] YU Y, GUO W, LIU Y, 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.
- [73] LEVY R, OKUN Z, SHPIGELMAN A. High-pressure homogenization: principles and applications beyond microbial inactivation[J]. Food Engineering Reviews, 2021, 13: 490–508.
- [74] 谢宇, 丁力行, 黄桂颖, 等. 不同贮藏方式对卡因菠萝品质的影响[J]. 制冷, 2024, 43(6): 50–55.
- XIE Yu, DING Lixing, HUANG Guiying, et al. Effect of different storage methods on quality of caine pineapple[J]. Refrigeration, 2024, 43(6): 50–55. (in Chinese)
- [75] 周丹蓉, 叶新福, 方智振, 等. 成熟度和温度对芙蓉李贮藏期间生理生化特性及蜡质结构的影响[J]. 核农学报, 2025, 39(1): 128–139.
- ZHOU Danrong, YE Xinfu, FANG Zhizhen, et al. Effects of maturity and temperature on physiological and biochemical characteristics and wax structure of furongli plum during storage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(1):

- 128–139. (in Chinese)
- [76] 吴中营, 张四普, 崔巍, 等. 不同采收期对酥梨品质和通风库贮藏保鲜效果的影响[J]. 河南农业科学, 2024, 53(11): 164–172.
WU Zhongying, ZHANG Sipu, CUI Wei, et al. Effects of different harvesting periods on the quality of suli pear and fresh-keeping effect in semi-underground ventilation storeroom[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(11): 164–172. (in Chinese)
- [77] 张惠敏, 尹豪杰, 唐嘉怡, 等. 不同保鲜剂处理对血橙果实品质和贮藏性能的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(10): 8–15.
ZHANG Huimin, YIN Haojie, TANG Jiayi, et al. Effect of different preservative treatments on the quality and storage performance of blood orange fruit[J]. Storage and Process, 2024, 24(10): 8–15. (in Chinese)
- [78] 刘诗泓, 杨若梅, 刘星雨. 区块链背景下果蔬运输包装技术及应用研究[J]. 中国包装, 2024, 44(4): 29–32.
- [79] FABG Z, ZHAO Y, WARNER R D, et al. Active and intelligent packaging in meat industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 61: 60–71.
- [80] 许超群, 梁旭茹, 岳淑丽, 等. 基于果蔬保鲜的活性包装技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(16): 305–310.
XU Chaoqun, LIANG Xuru, YUE Shuli, et al. Research progress of active packaging technology on fruit and vegetable preservation[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(16): 305–310. (in Chinese)
- [81] 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.
- [82] 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 Xianling, LI Xiaomin, ZHOU Xueting. Application of modified atmosphere packaging in food packaging[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2021(6): 86–87. (in Chinese)
- [83] QADRI O S, YOUNIS K, SRIVASTAVA G, et al. Nanotechnology in packaging of fresh fruits and vegetables[M]//BARMAN K, SWATI S, SIDDIQUI M W. Emerging Postharvest Treatment of Fruits and Vegetables. New York: Apple Academic Press, 2018: 147–166.
- [84] TAGHIPOUR L, ASSAR P. Nano-packaging technology for conserving the quality of fruits and vegetables[M]//ALI S, MIR S A, DAR B N, et al. Sustainable Postharvest Technologies for Fruits and Vegetables. Boca Raton: CRC Press, 2025: 227–243.
- [85] 党玲玉. 智能包装技术在食品包装中的应用[J]. 中国包装, 2024, 44(11): 11–14.
- [86] 刘涛, 李帅, 张海波, 等. 活性包装与智能包装在果蔬贮藏保鲜中的应用进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 196–203.
LIU Tao, LI Shuai, ZHANG Haibo, et al. Application progress of active packaging and intelligent packaging in the storage and preservation of fruits and vegetables[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 196–203. (in Chinese)
- [87] DEL ROSARIO MOREIRA M. Intelligent packaging of fruits and vegetables[M]//BANGAR S P, TQIF M. Intelligent Packaging. New York: Academic Press, 2024: 179–216.
- [88] 杨辉, 胡雅婕. 活性包装薄膜对冷藏圣女果的保鲜效果研究[J]. 农业科技与装备, 2024(5): 61–64.
YANG Hui, HU Yajie. Study on the preservation effect of active packaging film on refrigerated cherry tomatoes[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2024(5): 61–64. (in Chinese)
- [89] 刘宝安, 利莹, 陈尧, 等. 控释抗菌涂膜活性包装对采后樱桃番茄果实品质的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1–18. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070180>.
LIU Baoan, LI Ying, CHEN Yao, et al. Effect of controlled release antimicrobial-coated active packaging on postharvest quality of cherry tomato fruit[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1–18. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070180>. (in Chinese)
- [90] ZHU K, WANG H, CHEN C, et al. Development of polyethylene antifogging and antibacterial packaging films for lettuce preservation[J]. LWT, 2023, 181: 114772.
- [91] TAVASSOLI-KAFRANI E, GAMAGE M V, DUMÉL F, et al. Edible films and coatings for shelf life extension of mango: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(9): 2432–2459.
- [92] ESMAEILI Y, ZAMINDAR N, PAIDARI S, et al. The synergistic effects of aloe vera gel and modified atmosphere packaging on the quality of strawberry fruit[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12): e16003.
- [93] 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 Xiaojing, SU Dan, LU Min, et al. Effects of modified atmosphere packaging on the freshness of red pepper by principal component analysis[J]. Storage and Process, 2025, 25(3): 55–64. (in Chinese)
- [94] 邵平, 刘黎明, 吴唯娜, 等. 传感器在果蔬智能包装中的研究与应用[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 349–355.
SHAO Ping, LIU Liming, WU Weina, et al. Research and application of sensors in intelligent packaging of fruits and vegetables[J]. Food Science, 2021, 42(11): 349–355. (in Chinese)
- [95] 李增辉, 李亚娜, 王晓, 等. 智能指示剂在食品包装中的应用[J]. 武汉轻工大学学报, 2021, 40(5): 21–27.

- LI Zenghui, LI Yana, WANG Xiao, et al. Application of intelligent indicator in food packaging[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2021, 40(5): 21–27. (in Chinese)
- [96] 何青萍. 预警型智能包装在食品安全中的应用和设计[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 167–176.
HE Qingping. Application and design of early warning intelligent packaging in food safety[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 167–176. (in Chinese)
- [97] 廖恺芯, 夏宇轩, 王军. 果蔬可视化新鲜度检测智能包装研究进展[J]. 湖南包装, 2021, 36(2): 35–37, 44.
LIAO Kaixin, XIA Yuxuan, WANG Jun. Research progress of intelligent packaging for visual freshness detection of fruits and vegetables[J]. Hunan Packaging, 2021, 36(2): 35–37, 44. (in Chinese)
- [98] 习佳林, 郭阳, 李安, 等. 基于多元素和稳定同位素技术的桃产地溯源[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(9): 62–68.
XI Jialin, GUO Yang, LI An, et al. Traceability of the origin of *Prunus persica* based on multi-element and stable isotope techniques[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(9): 62–68. (in Chinese)
- [99] 刘宗科, 妙玲. 稳定同位素技术在果蔬类地理标志保护中应用分析[J]. 中外食品工业, 2024(13): 117–119.
- [100] 刘文艳, 闫忠心, 郝力壮, 等. 光谱技术在食品产地溯源中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 421–430.
LIU Wenyan, YAN Zhongxin, HAO Lizhuang, et al. Research progress in the application of spectroscopic technology in the traceability of food origin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 421–430. (in Chinese)
- [101] 唐甜甜, 解新方, 任雪, 等. 稳定同位素技术在农产品产地溯源中的应用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 360–367.
TANG Tiantian, XIE Xinfang, REN Xue, et al. Application of stable isotope technology in tracing the geographical origin of agricultural products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 360–367. (in Chinese)
- [102] 于寒冰, 郭阳, 李安, 等. 基于稳定同位素和元素技术的草莓产地溯源[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(3): 162–168.
YU Hanbing, GUO Yang, LI An, et al. Traceability of *Fragaria ananassa* Duch. origin based on stable isotope and elemental technology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(3): 162–168. (in Chinese)
- [103] MUÑOZ-REDONDO J, BERTOLDI D, TONON A, et al. Multi-element and stable isotopes characterization of commercial avocado fruit (*Persea americana* Mill) with origin authentication purposes[J]. Food Control, 2022, 137: 108975.
- [104] OPATIC A M, NEČEMER M, LOJEN S, et al. Stable isotope ratio and elemental composition parameters in combination with discriminant analysis classification model to assign country of origin to commercial vegetables—a preliminary study[J]. Food Control, 2017, 80: 252–258.
- [105] 李彪, 蒋平安, 宁松瑞, 等. 基于 RFID 和二维码技术的新疆哈密瓜溯源系统[J]. 农机化研究, 2014, 36(8): 196–201.
LI Biao, JIANG Pingan, NING Songrui, et al. Xinjiang Hami Melons' traceability system based on the RFID and the two dimensional code technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(8): 196–201. (in Chinese)
- [106] 孙传恒, 万宇平, 罗娜, 等. 面向追溯主体的果蔬全供应链区块链多链模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 416–427.
SUN Chuanheng, WAN Yuping, LUO Na, et al. Blockchain multi-chain model of fruit and vegetable supply chain for traceability subjects[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 416–427. (in Chinese)
- [107] 孙传恒, 杨晓虎, 罗娜, 等. 基于区块链的三文鱼冷链多链协同监管模型研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 360–370.
SUN Chuanheng, YANG Xiaohu, LUO Na, et al. Blockchain based salmon cold chain multi-chain collaborative supervision model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 360–370. (in Chinese)
- [108] 张新, 刘崇宣, 许继平, 等. 基于多链的果蔬全程全息信息管理模型构建与系统化实现[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 365–379.
ZHANG Xin, LIU Chongxuan, XU Jiping, et al. Construction and systematic implementation of multi-chain-based management model for fruits and vegetables in full-process and information scheme[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 365–379. (in Chinese)
- [109] 杨信廷, 李金辉, 罗娜, 等. 基于属性访问控制模型的果蔬跨链追溯系统设计与实现[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 376–388.
YANG Xinting, LI Jinhui, LUO Na, et al. Fruit and vegetable cross-chain traceability system based on attribute access control models[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 376–388. (in Chinese)
- [110] 马文琪, 孙传恒, 罗娜, 等. 基于区块链的远洋捕捞产品新鲜度评价与可信追溯模型研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 428–441.
MA Wenqi, SUN Chuanheng, LUO Na, et al. Freshness evaluation and reliable traceability model of pelagic fishing products based on blockchain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 428–441. (in Chinese)

WANG Lipeng, GUAN Zhi, LI Qingshan, et al. Survey on blockchain-based security services[J]. Journal of Software, 2023, 34(1): 1–32. (in Chinese)

[35] 曾诗钦, 霍如, 黄韬, 等. 区块链技术研究综述:原理、进展与应用[J]. 通信学报, 2020,41(1): 134–151.
ZENG Shiqin, HUO Ru, HUANG Tao, et al. Survey of blockchain: principle, progress and application [J]. Journal on Communications, 2020, 41(1): 134–151. (in Chinese)

[36] 黄穗, 李健, 范冰冰. IABC: 一种基于区块链和布谷鸟过滤器的跨域认证方法[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(12): 2620–2625.
HUANG Sui, LI Jian, FAN Bingbing. IABC: a cross-domain authentication method based on blockchain and cuckoo filter[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(12): 2620–2625. (in Chinese)

[37] IMGHORE A, OMARY F, EL-YAHYAUI A. Schnorr-based conditional privacy-preserving authentication scheme with multisignature and batch verification in VANET[J]. Internet of Things, 2023,23: 100850.

[38] 房梁, 殷丽华, 郭云川, 等. 基于属性的访问控制关键技术研究综述[J]. 计算机学报, 2017,40(7): 1680–1698.
FANG Liang, YIN Lihua, GUO Yunchuan, et al. A survey of key technologies in attribute-based access control scheme[J]. Jouenal of Computers, 2017,40(7):1680–1698. (in Chinese)

[39] 田秀霞, 杨明夷. 家庭物联网中基于智能合约的访问控制机制[J]. 计算机工程, 2023,49(3): 18–28.
TIAN Xiuxia, YANG Mingyi. Smart contract-based access control mechanism in home IoT[J]. Computer Engineering, 2023, 49(3): 18–28. (in Chinese)

(上接第 16 页)

[111] 孙传恒, 魏玉冉, 邢斌, 等. 基于智能合约和数字签名的马铃薯种薯防窜溯源研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 392–403.
SUN Chuanheng, WEI Yuran, XING Bin, et al. Anti-channeling traceability of seed potatoes based on smart contracts and digital signatures [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 392–403. (in Chinese)

[112] 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 Chuanheng, YU Huajing, LUO Na, 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. (in Chinese)

[113] 王少华, 孙传恒, 罗娜, 等. 面向预制食品溯源的隐私数据加密共享方法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 405–418.
WANG Shaohua, SUN Chuanheng, LUO Na, et al. Privacy data encryption sharing method for prepared food traceability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 405–418. (in Chinese)

[114] 刘晓辉, 罗娜, 邢斌, 等. 基于属性可搜索加密的农产品区块链追溯隐私数据访问控制方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 433–443.
LIU Xiaohui, LUO Na, XING Bin, et al. Attribute-based searchable encrypted agricultural blockchain traceability private data access control method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 433–443. (in Chinese)

[115] 孙传恒, 袁晟, 罗娜, 等. 基于区块链和边缘计算的水稻原产地溯源方法研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 359–368.
SUN Chuanheng, YUAN Sheng, LUO Na, et al. Traceability method of rice origin based on blockchain and edge computing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 359–368. (in Chinese)