

5G 技术在食品产业链中的研究现状与展望

解子凡¹ 王丽娟^{1,2} 刘思源^{1,2} 刘 博¹ 刘哲旭¹ 董铁有¹

(1. 中原食品实验室, 河南 漯河 462044; 2. 中国农业大学营养与健康系, 北京 100083)

摘要: 5G 作为新一代移动通信技术, 凭借高速率、低时延和大连接等优势, 在食品产业链数字化与智能化转型中展现出显著潜力。文章梳理了国内外关于 5G 在食品产业链中的研究进展与应用探索, 重点分析了其在原料生产、食品加工、储运冷链与质量追溯等方面的典型案例与技术路径。总体来看, 5G 已成为推动食品产业链发展的重要支撑, 但相关研究与实践仍多处于试点阶段, 在标准体系建设、数据安全保障与网络覆盖等方面仍有待进一步完善。

关键词: 5G; 食品产业链; 智能制造; 冷链物流; 质量追溯

Research progress and prospects of 5G technology in the food supply chain

Xie Zifan¹ Wang Lijuan^{1,2} Liu Siyuan^{1,2} Liu Bo¹ Liu Zhexu¹ Dong Tiejou¹

(1. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe, Henan 462044, China; 2. Department of Nutrition and Health, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As a new generation of mobile communication technology, 5G demonstrates significant potential in the digitalization and intelligent transformation of the food supply chain, owing to its advantages of high data rates, low latency, and massive connectivity. This paper reviews the research progress and application exploration of 5G in the food supply chain in China and abroad, with a focus on typical cases and technical pathways in raw material production, food processing, storage and cold-chain logistics, and quality traceability. Overall, 5G has become an important support for promoting the development of the food supply chain. However, related research and practices are still mostly at the pilot stage, and further improvements are needed in standard system construction, data security assurance, and network coverage.

Keywords: 5G; food supply chain; intelligent manufacturing; cold-chain logistics; quality traceability

食品产业链涵盖食品加工、储运冷链及质量追溯等关键环节, 其协同运行直接关系到食品供给的安全性、稳定性与品质水平^[1]。近年来, 尽管中国食品工业规模持续增长, 2022 年百万规模以上食品工业主营业务收入已突破 9.1 万亿元, 但产业在生产效率、冷链损耗率、食品安全风险及追溯体系完善度等方面仍存在突出短板, 成为制约行业高质量发展的主要瓶颈^[2]。

面对消费者对食品安全性、透明度和高品质的更高要求, 以及全球产业加速数字化、智能化发展的趋势, 食品工业的技术升级已成为必然^[3-4]。国家“十四五”数字经济规划和食品工业发展规划均强调推动 5G、人工智能

与物联网等技术在食品制造、智慧冷链和追溯体系中的深度应用^[5]。

在众多食品产业的新兴技术中, 5G 技术作为新一代移动通信技术的核心, 凭借高速率、低时延和大规模连接等显著优势, 能够支撑智能化车间的实时协同控制、食品加工设备的故障预测与远程运维、冷链物流的高频环境监测, 以及基于物联网的全流程质量追溯等应用需求^[6-7]。近年来, 国内外关于“5G+食品产业”的探索已逐渐展开, 但现有研究多集中于单一环节的单个应用, 缺乏对 5G 技术在食品产业链全流程应用场景的系统性梳理, 对 5G 技术的适用性、潜在价值及其局限性亦缺乏综合研

基金项目: 漯河市食品生物制造产业研发联合基金重点项目(编号: CYLH2522001)

通信作者: 王丽娟(1988—), 女, 中国农业大学副教授, 博士。E-mail: wanglijuan2023@cau.edu.cn

收稿日期: 2025-09-19 **改回日期:** 2026-03-24

引用格式: 解子凡, 王丽娟, 刘思源, 等. 5G 技术在食品产业链中的研究现状与展望[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 220-227.

Citation: Xie Zifan, Wang Lijuan, Liu Siyuan, et al. Research progress and prospects of 5G technology in the food supply chain[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 220-227.

究。文章拟围绕5G技术在食品产业链中的应用和研究进展进行综述,系统分析5G支撑下的物联网架构、关键技术优势及存在的问题,并结合产业趋势对其未来发展方向进行展望,为食品工业智能化升级提供理论依据。

1 5G无线通信技术

1.1 5G关键技术

如图1所示,在5G技术三大核心应用场景中,增强型移动宽带^[8](eMBB)满足高清视频与大带宽需求,关注高带宽与高吞吐,峰值速率可达20 Gbit/s,适合支持食品生产现场的高清视频监控、机器视觉质检和远程运维指导等业务^[9];超可靠低时延通信^[10](URLLC)面向实时性和高可靠性场景,提出了“毫秒级时延”和“99.999%可靠性”的严格要求^[11],为食品加工装备的实时控制、协同机器人和安全联锁提供通信保障;大规模机器类通信^[12](mMTC)则支持海量设备接入,可在每平方公里内支持百万级设备在线,满足原料基地、加工车间和冷链体系中大量传感器、RFID与智能标签的接入需求^[13]。为满足这些差异化需求,5G引入了多项关键技术,其中网络切片(network slicing)^[14]、非时隙调度(mini-slot)^[15]、毫米波通信(millimeter wave)^[16]以及移动边缘计算(MEC)^[17]最具代表性,对推动食品产业链的数字化与智能化转型具有重要意义。

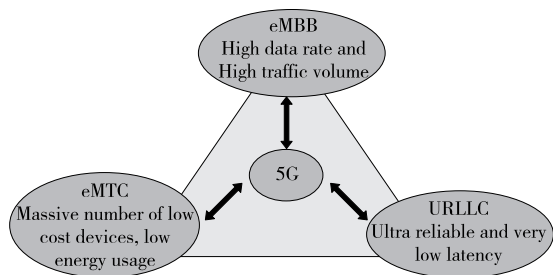


图1 5G核心应用场景示意图^[7]

Figure 1 Schematic diagram of the core application scenarios of 5G

网络切片通过在同一物理网络上划分多个逻辑上的虚拟网络,为不同业务场景提供定制化的服务质量(QoS)保障。例如,高清视频传输需要高带宽,而URLLC业务则要求低时延和高可靠性,两者在同一网络中可能存在冲突。网络切片通过资源隔离与调度机制实现“一网多用”,常见方式包括基于QoS优先级的软隔离、基于资源块(RB)预留的部分隔离,以及基于载波的完全隔离^[18]。在食品产业链中,网络切片能够确保生产线控制、冷链运输监控和消费端追溯查询等不同业务在一张5G网络上同时运行而互不干扰,从而实现差异化保障与资源高效利用。

传统的无线调度方式以一个完整时隙即14个OFDM符号为最小传输单元,这种固定粒度在URLLC场景下可能带来额外时延^[19]。5G引入的非时隙调度机制(图2)允许以更小的传输单元(如2,4或7个符号)进行调度,实现“随到随传”^[20]。该机制显著降低了关键任务的等待时间,提升了实时性。在食品产业链中,非时隙调度特别适用于冷链运输过程中的温湿度异常告警、智能工厂设备的快速联动控制,以及远程质检设备的实时操作反馈,能够为食品安全提供毫秒级通信保障。

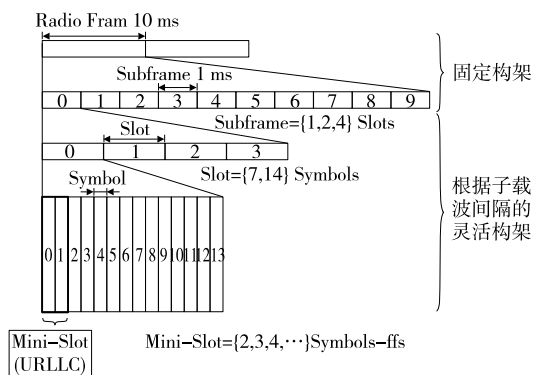


图2 非时隙调度示意图

Figure 2 Schematic diagram of mini-slot scheduling

毫米波通信利用30~300 GHz的高频频段,能够提供“GHz”量级的带宽,从而实现远高于4G和常规5G中低频段的传输速率。但由于频率高、波长短,毫米波的穿透能力较弱,覆盖范围有限,更适合在局部范围内部署高密度小基站,以实现高速率和低时延的通信^[21]。这一特性让5G在食品产业链中更适合部署在工厂和仓储等局部高数据需求场景,为食品工业复杂环境下的高速率、大容量数据传输提供了关键支撑。

边缘计算是5G的重要支撑技术之一,其核心思想是将计算和存储能力下沉至网络边缘节点,使数据能够在本地完成处理,而无需全部回传至远程核心网或云平台。这种架构显著降低了数据传输时延,减少了回传带宽压力,并提升了系统的实时性与安全性^[22]。如图3所示,边缘计算体系结构主要由用户终端、边缘服务器和核心网络构成。用户产生的数据首先传输至临近的边缘服务器进行处理,仅在必要时才回传至核心网或云端。在食品产业链中,边缘计算可实现生产车间的实时监测、设备故障预测、冷链运输车辆的本地数据分析等功能。例如,当冷链车辆中的温度传感器检测到异常时,可在本地边缘节点即时完成数据分析与告警,而无需依赖远程云端处理,从而避免时延造成的食品损耗。

1.2 5G组网架构

随着5G在工业互联网领域的加速部署,基于5G的

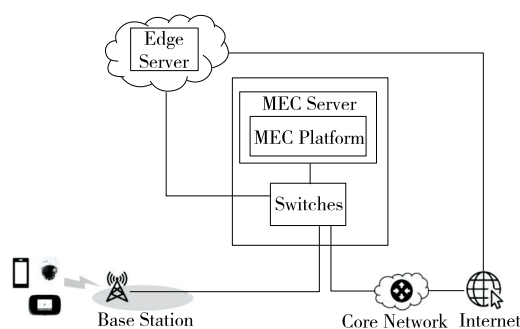
图3 边缘计算体系结构示意图^[23]

Figure 3 Schematic diagram of edge computing architecture

物联网架构逐渐成为食品加工、智能工厂及冷链物流等场景的重要通信基础。如图4所示,5G工业网络部署架构由现场接入终端、5G接入网、核心网以及工厂内IT/OT系统组成,实现从设备层到企业管理平台的端到端连接。

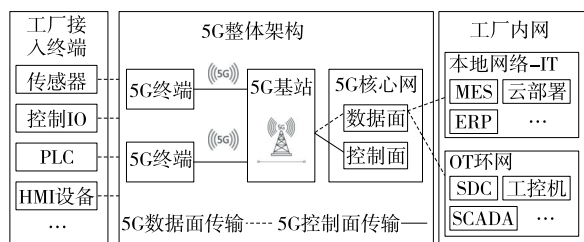


图4 5G工业网络部署示意图

Figure 4 Schematic diagram of 5G industrial network deployment

在食品加工及装备智能化场景中,生产车间中的传感器、PLC、分布式 I/O、HMI 以及工业摄像头等设备通过 5G 实现无线接入,负责采集温度、压力、运行状态和视觉特征等关键工艺数据。5G 工业终端^[24](如 CPE、工业模组)承担设备与网络之间的桥接功能,负责协议转换与数据上传,并可结合本地 MEC 节点执行图像预处理、故障检测等任务,减少核心网投入负荷。为了提升网络覆盖与高并发能力,生产现场通常采用宏站与小微站混合部署^[25],以兼顾广域覆盖与高密度实时业务。5G 核心网通过服务化架构^[26]实现灵活的控制与资源调度,结合用户面功能(UPF)的本地化部署,可进一步降低数据处理时延,使车间设备能够获得更稳定、更具确定性的通信服务。最终,来自现场的各类数据被传输至企业 IT 系统(如 MES、ERP)或 OT 系统(如 SCADA、SDC),用于生产调度、质量管理、设备预测性维护及食品追溯分析,构成设备网络平台一体化的 5G 食品工业数字化体系。

2 5G 在食品产业链中的应用

2.1 食品质量溯源

食品质量溯源贯穿原料生产、加工制造、冷链运输与仓储流通,是实现食品“来源可查、去向可追、责任可究”的关键手段,其建设水平直接关系到食品安全监管能力和消费者信任度^[27]。传统溯源体系依赖人工记录和离线数据采集,存在数据断点多、真实性不足、时效性差等问题,难以满足现代食品供应链对实时性、透明度与精细化管理的要求。在这一背景下,5G 凭借低时延、高可靠与大连接等优势,为食品质量追溯系统提供了实时采集、跨域协同和链条级信息共享的新技术基础^[28]。

在原料种植与养殖环节,5G 提升了源头数据的连续性与可验证性,降低了自然环境、气候波动及病害等因素的负面影响,使原产地信息能够形成结构化、可穿透的记录链条^[29]。Rathinavel 等^[30]利用 5G 将土壤墒情、气象数据与无人机影像实时上传至监控平台,提高了病虫害预警能力,为溯源体系提供了连续、结构化的种植环境记录。Damsgaard 等^[31]在欧洲农场的测试表明,5G 网络可实现 11~13 ms 的低时延与超 90% 的覆盖率,使得农机作业状态、作物长势等信息可以在生产过程中持续回传,为构建高可信度的原产地证明提供可能。Pajo 等^[32]在商业化鲑鱼养殖场的试验表明,5G 能够有效支撑多视频流与传感器数据的稳定传输,优化投饵策略与健康监测。欧盟“5G-HEART”项目^[33]在希腊与挪威鱼场的试点进一步验证了 5G 网络同时支撑多路高清视频流和大规模传感器的并发接入能力,并结合 AI 算法实现投饵颗粒检测和鱼群行为识别,使生长过程的关键节点能够被实时记录,为后续溯源提供可验证证据。

在质量检测和溯源平台层面,5G 主要承担高频次、多模态质量数据的实时采集与可信共享功能。Liu^[34]提出的 TinyML+5G 边缘检测框架能够在毫秒级完成水果表面缺陷识别,检测精度达到 95.2%,减少了上传带宽占用,适用于生产线上实时质检场景。Lukacs 等^[35]在匈牙利红薯供应链中结合近红外光谱和机器视觉,利用二维码与 5G 区块链实现了数字化追溯系统,保证了检测结果的可追溯与透明化。Huang 等^[36]设计的基于 5G-IoT 与区块链的农产品安全追溯平台,将二维码识别与 U-Net+记忆模块算法结合,提升了链上数据存证的准确性与鲁棒性。此外,Villegas-Ch 等^[37]提出“轻量级区块链+5G”的可追溯系统,该系统在 10 节点、50 个传感器规模下的冷链和易腐食品场景中实现了 105 ms 响应时间和 5 s 故障恢复能力,有效兼顾了实时性与稳定性。以上研究表明,5G 提供了贯通生产、检测和流通的数据基础,使食品追溯从离线记录演变为实时、连续、可信的链条级监控体系。

在冷链物流环节,由于乳制品、肉类、水产及速冻食

品等对温湿度及环境参数要求严格^[38],信息传递的时延或失真可能造成食品品质下降与经济损失。5G解决了传统冷链系统依赖分散式传感器、窄带通信和人工记录,导致跨区域协同困难、设备状态难以实时掌握的问题^[39]。Han等^[40]指出5G与物联网结合可实现全过程温湿度监控与能耗优化,推动冷链系统向透明化和绿色化发展。Lagorio等^[41]指出在长链条跨区域冷链中,5G可解决传统系统区域切换时监测中断的问题,但同时提醒工业应用仍受限于平台集成与隐私合规要求。李进等^[42]提出的多层次5G时延保障方案,从通信网络层面提升了URLLC场景下的传输稳定性,实现了低于20 ms的确定性数据通信,增强了冷链运输的可靠性。Trichias等^[43]在VITAL-5G跨港口冷链试验中进一步量化5G的工程收益:港区事故率下降超过10%,靠港等待时间缩短20%以上,验证了5G在车队协同、设备远程运维与多节点监控中的实际价值。殷振凯^[44]则基于5G与北斗短报文技术,提出面向远洋运输的船载冷链监测系统,实现了远洋运输过程中冷库数据的稳定回传,保证了长航程食品品质。

在仓储配送环节,5G的低时延与大连接能力使得智能仓储、精准分拣与路径优化得到显著提升。Zhou等^[45]构建的5G无人仓储架构在物流园区实际部署后,使AGV调度时延降低至20 ms以内,仓储作业效率提升约30%,人工操作减少70%。Gowrishankar等^[46]进一步通过引用边缘计算进一步提升仓储数据处理能力,生鲜损耗率下降约8%,食品仓储数据处理时延缩短40%。配送调度方面,Wang^[47]将5G通信与改进蚁群算法结合,实现复杂城市路网中的低时延路径规划,有效降低食品运输时间与损耗。朱丹玉等^[48]构建了基于5G与云平台的数字化冷链管理系统,实现了温湿度监控、运输路径优化与车辆定位的一体化控制。

尽管现有研究证明5G能显著提升食品质量溯源中的数据采集与链条贯通能力,但在真实场景中仍面临多项具有食品供应链特征的瓶颈。首先,源头数据连续性不足仍是最大挑战^[49],农田、牧场及海上养殖的5G网络在区域切换与复杂环境下易出现信号衰减与丢包现象,导致关键生长环境记录无法形成连续链条^[50]。其次,质检与冷链环节的多模态高上行需求与现网能力不匹配^[51],基于图像、光谱和传感融合的AI质检系统在食品分级、异物识别与鲜度评估中往往需要持续上传高密度数据流,而当前5G上行速率在复杂金属设备环境中易受多路径衰落影响,导致上传抖动与丢帧,进而影响质检模型的实时性与稳定性。最后,当前食品追溯系统由于原料数据、加工数据、物流数据、质检数据分散于不同公司和平台,而缺乏统一的跨链路一致性验证机制,导致难以建立可端到端验证的溯源体系,从而限制了5G追溯系统在监管端的可信应用^[52]。

2.2 食品智能制造

食品加工制造是食品产业链中自动化程度最高、质量控制要求最严格的环节,其设备数量多、流程复杂,对通信的实时性与可靠性具有天然需求^[53]。传统食品车间普遍依赖有线网络或低带宽无线通信,难以满足高速视觉检测、设备协同与柔性调度的要求。数据上传不及时可能导致产品质量偏差未被及时捕捉,造成批量报废;而生产线间缺乏互联互通,则限制了多机协同和快速配方切换,增加能耗与运维成本^[54]。在此背景下,5G网络凭借低时延、高带宽和大连接能力,成为推动食品智能制造和生产车间数字化改造的重要基础设施^[55]。

现有研究^[56]表明,食品加工设备之间的协作对通信网络的实时性高度敏感,核心需求集中在高带宽视觉检测、低时延协作控制和稳定的数据回传等方面。典型场景包括饼干分拣^[57]、速冻食品装箱^[58]、饮料灌装控制^[59]等环节,机械臂需对传送带的运动状态作出毫秒级响应,任何时延波动都可能造成产品破损或灌装误差。为应对这些挑战,5G+MEC的架构设计能够提升本地处理能力、降低回传时延,同时利用网络切片保障关键业务优先级。部分研究^[60]进一步提出5G与时间敏感网络(TSN)的融合,以实现设备间的确定性同步。例如,在饼干分拣产线中,TSN保障的微秒级同步可显著减少产品破碎率;在饮料灌装线中,瓶口定位与灌装阀门动作的高速匹配使灌装偏差明显降低。这些研究表明,5G具有推动食品生产车间实现多装备精准协同的技术潜力。

在数字化车间的应用场景上,5G的高带宽与低时延特性满足了视觉检测、标签识别和柔性生产的需求。Alimadani等^[61]在食品加工视觉检测系统研究中指出,5G能够保证多路高清图像并发上传时的稳定带宽,使深度学习质检模型的误检率降低12%~18%,有效支持数字化产线高速运行。Kook等^[62]在智能灌装车间中利用5G网络与机器学习模型实现了瓶身与标签的实时识别,端到端结果反馈时延约435 ms/箱,满足500 ms的时延要求,平均分类准确率达到96.7%。Kabeer^[63]指出5G与IoT融合可使数据采集频率提升5~20倍,AI优化模型因此得以基于更高时效的数据运行,使生产线可实现实时配方调整、动态排产与资源协调。Lundgren等^[64]进一步量化了通信性能对生产柔性的影响,在大规模部署场景中,低时延对生产率与柔性的影响指数为0.75,是保证生产灵活性的关键影响因子。

在装备运维方面,现有工业5G研究普遍将状态监测和预测性维护视为重点应用之一^[65]。Brown等^[66]在对5G智能制造能力的系统评述中指出,5G专网与TSN融合可为振动、温度等状态监测数据提供高可靠、低时延链路,从而为食品设备条件监测和预测性维护奠定通信基础。5G-ACIA发布的通信测试标准^[67]指出面向工业场景的

5G URLLC 能够在 10 ms 级时延和 99.999% 可靠性约束下稳定承载设备诊断与远程监控业务,适用于对停机风险高度敏感的食品设备维护场景。Henrichs 等^[68]关注于食品智能制造过程中的高能耗设备(如巴氏杀菌、微波解冻、干燥清洗等)数字孪生模型构建,借助 5G 的实时数据采集与回传,其仿真结果显示单位能耗有望降低 5%~10%,验证了 5G 在食品工艺优化中的价值。Zhu 等^[69]则在 5G 网络数字孪生故障诊断研究中提出通过增强型生成模型弥补小样本不足,应对食品加工设备普遍存在传感数据噪声大、故障样本稀缺、环境工况复杂等特征。

在工程实践层面,国内外已有典型案例验证了部署 5G 的可行性。Yang 等^[70]构建了基于 5G 与物联网的智能工厂系统架构,通过 5G 网络连接多类传感器与控制模块,实现了生产环境参数的实时采集与精细化调节。系统可将环境调控时延缩短至 0.3 s,整体运行稳定性超过 98%,为工厂运维的实时性与可靠性提供了支撑。Nokia 公司与悉尼科技大学合作建设的“5G 微型啤酒厂”通过 5G 专网与数字孪生技术,实现了从酿造到灌装环节的实时监控与工艺优化^[71]。中国移动在亚洲最大的巧克力生产基地部署了 5G 专网与边缘云,集成 AGV 无人叉车、机器视觉与生产调度系统,实现了原料、包材与成品在车间与仓储之间的全流程自动化搬运,AGV 搬运时延低于 20 ms,现场部署工作量减少约 80%,产品优质率稳定在 95% 以上^[72]。这些成果显示,5G 正在从实验室走向真实食品加工环境,成为推动食品工厂数字化的重要引擎。

尽管现有研究和试点项目均验证了 5G 在食品加工程制造中的潜在价值,但工业场景的全面落地仍面临多重挑战。首先,5G 与 PLC、SCADA、DCS 等传统 OT 系统之间的接口与协议缺乏统一标准,导致网络与控制系统的深度协同仍受限。5G-ACIA 发布的研究报告指出,当前 5G 与工业控制系统之间的协作仍需要协议适配、中间件转译和多平台集成,缺乏端到端的一体化标准^[73]。其次,5G 工业网络部署与运维成本仍较高,企业级 5G 专网的建设、频谱授权、边缘节点部署及终端改造均需较大投资,对中小食品企业而言门槛较高^[74]。因此,未来相关研究有必要在可量化评估体系的支撑下,从通信侧与工艺侧协同设计指标,并结合标准化的参考架构,系统评估 5G 在不同类型食品工厂中的应用成效与适用边界,为从局部试点向多产线复制、再到全厂域和多工厂集成提供工程依据。

3 结论与展望

通过对国内外文献与应用实践的系统梳理可以看出,5G 已逐渐成为食品产业链数字化升级的重要技术支撑:在食品智能制造环节,5G 的低时延和高可靠性为设备协同、柔性调度和数字孪生驱动的工艺优化提供了关键

通信能力;在食品质量追溯中,5G 支撑多模态检测数据的实时采集,并促进区块链与边缘计算追溯平台的高效运行;在冷链物流中,5G 在跨区域通信、环境监测与仓储配送协同方面展现性能优势,使冷链管理向透明化与智能化方向发展。整体来看,这些研究共同表明 5G 正在从单点应用逐步向多环节协同延伸,并已在若干试点场景中展现工程可行性。然而,不论是智能制造、追溯体系还是冷链物流,其规模化部署均仍处于起步阶段,缺乏跨场景的系统化验证与产业级评估,技术潜力与行业价值尚未完全释放。

展望未来,5G 在食品产业链的深入应用需要在以下 4 个方向持续推进。

(1) 在工程验证与评估方面,当前不同研究采用的通信参数、业务指标和工艺评价方式差异较大,亟需构建面向食品行业的场景化 KPI 框架,包括上行吞吐量、端到端时延、抖动、可靠性、可用度以及设备效率、能耗、产品良率等工艺侧指标,并依托开放测试平台形成可复现、可量化和可对比的验证体系。

(2) 在标准与互联互通方面,尽管 3GPP、5G-ACIA 等组织已提出工业 5G 的技术框架,但食品生产设备、冷链监测终端与追溯平台长期采用异构协议,其接口、语义与数据模型仍缺乏统一规范。未来研究需结合食品加工与冷链物流的实际工况,推动 OT/IT 系统与 5G 终端之间的轻量化适配、协议标准化与语义互通,为多设备、多系统协同奠定基础。

(3) 在数据安全与合规治理方面,食品安全检测数据与消费者行为数据具有高度敏感性,未来研究需关注跨环节传输中的一致性、隐私保护与可问责性,并探索隐私计算、同态加密与区块链存证等技术与 5G 系统的深度融合。

(4) 在消费端延伸方面,5G 在食品零售与餐饮消费环节仍具未发掘潜力。例如,基于 5G 的溯源扫码可使消费者即时获取食品来源与冷链信息;在餐饮与外卖平台中,5G 可支持订单、备餐与配送的全流程实时可视化与智能调度。未来研究可进一步探索消费端与上游环节的无缝衔接,实现“消费即追溯”的闭环体系。

5G 正在推动食品产业链从局部数字化向全链条智能化演进,在实时感知、跨环节协同与全程追溯中发挥着日益关键的作用。随着未来标准的细化和数据安全机制的完善,食品产业链有望从零散试点迈向系统化应用,实现产业效率、食品安全与可持续发展的全面提升。

参考文献

- [1] 龙文进,樊胜根.新时代国家大食物安全治理现代化研究[J].农业经济与管理,2025(2): 12-22.
- Long W J, Fan S G. Research on the modernization of China's

- big food security governance in the new era[J]. *Agricultural Economics and Management*, 2025(2): 12-22.
- [2] 魏麟, 李春雷. 新质生产力赋能食品产业高质量发展: 作用机理、现实困境与突破路径[J]. *粮油食品科技*, 2025, 33(1): 246-253.
- Wei L, Li C L. Empowering the high-quality development of the food industry with new quality productivity: mechanism, challenges and solutions[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2025, 33(1): 246-253.
- [3] 李兆丰, 刘炎峻, 徐勇将, 等. 数字化食品在新时代下的发展与挑战[J]. *食品科学*, 2022, 43(11): 1-8.
- Li Z F, Liu Y J, Xu Y J, et al. Development and challenges of digital foods in the new area[J]. *Food Science*, 2022, 43(11): 1-8.
- [4] 张守文. 加快数字化转型升级, 实现行业高质量发展[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(7): 4-8.
- Zhang S W. Accelerate digital transformation and upgrading, realize high quality development of the industry[J]. *China Food Additives*, 2021, 32(7): 4-8.
- [5] 陈腾鹏, 陈松洲. 中国数字经济的发展现状与发展趋势分析[J]. *肇庆学院学报*, 2023, 44(2): 55-65.
- Chen T P, Chen S Z. Analysis of present situation of China's digital economy development and its development trend[J]. *Journal of Zhaoqing University*, 2023, 44(2): 55-65.
- [6] Hassoun A, Jagtap S, Trollman H, et al. From food industry 4.0 to food industry 5.0: identifying technological enablers and potential future applications in the food sector[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(6): e370040.
- [7] Esenogho E, Djouani K, Kurien A M. Integrating artificial intelligence Internet of Things and 5G for next-generation smartgrid: a survey of trends challenges and prospect[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 4 794-4 831.
- [8] Khan B S, Jangsher S, Ahmed A, et al. URLLC and eMBB in 5G industrial IoT: a survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022, 3: 1 134-1 163.
- [9] Njoku J N, Ifeanyi Nwakanma C, Kim D S. The role of 5G wireless communication system in the metaverse[C]// 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC). Jeju Island: IEEE, 2022: 290-294.
- [10] Li Z X, Uusitalo M A, Shariatmadari H, et al. 5G URLLC: design challenges and system concepts[C]// 2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Lisbon, Portugal: IEEE, 2018: 1-6.
- [11] Khanh Q V, Hoai N V, Manh L D, et al. Wireless communication technologies for IoT in 5G: vision, applications, and challenges[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 2 022(1): 3229294.
- [12] Pokhrel S R, Ding J, Park J, et al. Towards enabling critical mMTC: a review of URLLC within mMTC[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 131 796-131 813.
- [13] Joshi M, Hu K X, Soto-Valle G, et al. Next generation RF modules for 5G, IoT, AR/VR and RFID applications[J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2023, 32(2n04): 2350016.
- [14] Mathew A. Network slicing in 5G and the security concerns [C]// 2020 Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). Erode, India: IEEE, 2020: 75-78.
- [15] Cumurecu O, Torpi H, Caliskan A. Highly efficient circularly polarized radial line slot array antenna using non-uniform slot density for 5G communication system[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 115 688-115 698.
- [16] Jijo B T, Zeebaree S R M, Zebari R R, et al. A comprehensive survey of 5G mm-wave technology design challenges[J]. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 2021: 1-20.
- [17] Liyanage M, Porambage P, Ding A Y, et al. Driving forces for multi-access edge computing (MEC) IoT integration in 5G[J]. *ICT Express*, 2021, 7(2): 127-137.
- [18] Badawadagi S S, Kumar Cm M. SliceNet: a hybrid CNN model for network slicing in 5G communications[C]// 2024 Third International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT). Trichirappalli, India: IEEE, 2024: 1-5.
- [19] Loginov V, Troegubov A, Lyakhov A, et al. Enhanced collision resolution methods with mini-slot support for 5G NR-U[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 146 137-146 152.
- [20] Li Y. Comparative analysis of enhanced mobile broadband and mini-slot contributions to high reliability and low latency of 5G network[J]. *SHS Web of Conferences*, 2022, 144: 02009.
- [21] Ashraf S, Sheikh J A, Ashraf A, et al. 5G millimeter wave technology: an overview[M]// *Intelligent signal processing and RF energy harvesting for state of art 5G and B5G networks*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 97-112.
- [22] Pathirana T, Nencioni G. Availability model of a 5G-MEC system[C]// 2023 32nd International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Honolulu, HI: IEEE, 2023: 1-10.
- [23] Rekoputra N M, Tseng C W, Wang J T, et al. Implementation and evaluation of 5G MEC-enabled smart factory[J]. *Electronics*, 2023, 12(6): 1 310.
- [24] Lu J, Huang G W, Kuai W K, et al. Research on remote eSIM provisioning management technology for 5G terminal[J]. *Journal of ICT Standardization*, 2024, 12(2): 135-162.
- [25] Dhalbisoi S, Rout A, Sahoo R K, et al. A comparative analysis on 5G cell free massive mimo in next generation networking environment[C]// 2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSPP). Hyderabad, India: IEEE, 2022: 1-5.
- [26] Brown G, Analyst P, Reading H. Service-based architecture for

- 5G core networks[N]. Heavy Reading Repotrs, 2017-11.
- [27] 林轲亮, 梁业成, 苏时彬. 数字赋能食品安全法律监管路径研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(12): 59-64.
- Lin K L, Liang Y C, Su S B. Research on legal supervision paths of digitally enabled food safety[J]. Food & Machinery, 2024, 40(12): 59-64.
- [28] Mehannaoui R, Mouss K N, Aksa K. IoT-based food traceability system: architecture, technologies, applications, and future trends[J]. Food Control, 2023, 145: 109409.
- [29] 刘洋, 岳晓鹏, 唐孝宇, 等. 气候变化情景下农业绿色生产转型路径研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(9): 1 882-1 894.
- Liu Y, Yue X P, Tang X Y, et al. Research on the pathways for agricultural green production transformation under climate change scenarios[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(9): 1 882-1 894.
- [30] Rathinavel S, Kavitha R, Gitanjali J, et al. Role of 5G technology in enhancing agricultural mechanization[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1258(1): 012010.
- [31] Damsgaard S B, Hernández Marcano N J, Nørremark M, et al. Wireless communications for Internet of farming: an early 5G measurement study[J]. IEEE Access, 2022, 10: 105 263-105 277.
- [32] Pajo J F, Haukø M, Skaret-Thoresen R, et al. Digitalization in the aquaculture industry: validation trials over a commercial 5G network[C]// 2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). Gothenburg, Sweden: IEEE, 2023: 520-525.
- [33] Kim H. Demo: 5th generation health aquaculture and transport validation trials[C]// 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Seoul, Korea: IEEE, 2022: 1-2.
- [34] Liu Y X. TinyML induced portable food defect detection for edge computing[J]. Internet Technology Letters, 2025, 8(4): e70044.
- [35] Lukacs M, Toth F, Horvath R, et al. Advanced digital solutions for food traceability: enhancing origin, quality, and safety through NIRS, RFID, blockchain, and IoT[J]. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2025, 14(1): 21.
- [36] Huang Y H, Xie X, Ning W Y, et al. Design of agricultural product traceability platform based on 5G-IoT and blockchain [C]// 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Harbin: IEEE, 2021: 323-326.
- [37] Villegas-Ch W, Govea J, Santiago Moncayo-Moncayo P, et al. Optimization of the traceability of perishable products through light blockchain and IoT in the food industry[J]. IEEE Access, 2025, 13: 67 599-67 615.
- [38] 向明月. 生鲜农产品冷链物流包装技术研究及应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 103-109, 141.
- Xiang M Y. Research and application progress of cold-chain logistics packaging technology of fresh agricultural products [J]. Food & Machinery, 2023, 39(8): 103-109, 141.
- [39] Ndraha N, Hsiao H I, Vlajic J, et al. Time-temperature abuse in the food cold chain: review of issues, challenges, and recommendations[J]. Food Control, 2018, 89: 12-21.
- [40] Han J W, Zuo M, Zhu W Y, et al. A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: current status, challenges, and future trends[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 536-551.
- [41] Lagorio A, Cimini C, Pinto R, et al. 5G in Logistics 4.0: potential applications and challenges[J]. Procedia Computer Science, 2023, 217: 650-659.
- [42] 李进, 黄云飞, 姜有强. 面向智慧仓储物流的5G确定性网络技术研究与实践[J]. 通信技术, 2024, 57(10): 1 104-1 112.
- Li J, Huang Y F, Jiang Y Q. Research and practice of 5G deterministic network technology for smart warehousing logistics[J]. Communications Technology, 2024, 57(10): 1 104-1 112.
- [43] Trichias K, Landi G, Seder E, et al. VITAL-5G: innovative network applications (NetApps) support over 5G connectivity for the transport & logistics vertical[C]// 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). Porto, Portugal: IEEE, 2021: 437-442.
- [44] 殷振凯. 船载冷链监测系统关键技术研究及实现[D]. 烟台: 烟台大学, 2024: 5-10.
- Yin Z K. Research and implementation of key technologies of ship-borne cold chain monitoring system[D]. Yantai: Yantai University, 2024: 5-10.
- [45] Zhou H, Huo M D, Tang S Y, et al. Research and application of key technologies of intelligent unmanned warehousing based on 5G[C]// 2024 Sixth International Conference on Next Generation Data-driven Networks (NGDN). Shenyang: IEEE, 2024: 1-5.
- [46] Gowrishankar V, Veena P, Ponmurugan D, et al. Edge computing enabled smart warehouse management system for food processing industries[C]// 2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Delhi, India: IEEE, 2023: 1-7.
- [47] Wang J. Joint distribution and route optimization of 5G networked cold chain logistics for fresh agricultural products [J]. Academic Journal of Agricultural Sciences, 2023, 4(1): 42-53.
- [48] 朱丹玉, 李现伟. 基于数字智能化的冷链物流管理技术研究[J]. 中国物流与采购, 2023(3): 54-55.
- Zhu D Y, Li X W. Research on cold chain logistics management technology based on digital intelligence[J]. China Logistics & Purchasing, 2023(3): 54-55.
- [49] Raja S R, Subashini B, Prabu R S. 5G technology in smart farming and its applications[M]// Intelligent robots and drones

- for precision agriculture. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 241-264.
- [50] European Commission. Farm to fork strategy: for a fair, healthy and environmentally-friendly food system[J]. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, 2020, 381: 1-9.
- [51] Van Hilten M, Wolfert S. 5G in agri-food - a review on current status, opportunities and challenges[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201: 107291.
- [52] Lai M B, Vergamini D, Brunori G. Food supply chain: a framework for the governance of digital traceability[J]. Foods, 2025, 14(12): 2 032.
- [53] 齐晓霞. 新时代食品加工机械的自动化与智能化趋势[J]. 食品与机械, 2025, 41(1): 250.
- Qi X X. Automation and intelligentization trends of food processing machinery in the new era[J]. Food & Machinery, 2025, 41(1): 250.
- [54] 朱世荣. 信息技术在食品生产自动化控制中的应用[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 260.
- Zhu S R. Application of information technology in automation control of food production[J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 260.
- [55] Zhang X F, Lim S, Lee C, et al. Integration of 5G and OPC UA for smart manufacturing of the future[C]// 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). Atlanta, GA: IEEE, 2023: 1-6.
- [56] Adeniyi A, Aigbavboa C. Usage in food industry operations: barriers and benefits[J]. Application of Emerging Technologies, 2023, 115: 127.
- [57] Sathe A, Deshpande A. Automated visual quality inspection and sorting[C]// 2017 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3). Mumbai, India: IEEE, 2018: 1-6.
- [58] Long J. Dynamic analysis of alternative elements in an automated packaging system based on 5G Internet of Things [J]. Journal of Sensors, 2022, 2022(1): 4909942.
- [59] Guo S S, Lu B B, Wen M W, et al. Customized 5G and beyond private networks with integrated URLLC, eMBB, mMTC, and positioning for industrial verticals[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2022, 6(1): 52-57.
- [60] Godor I, Luvisotto M, Ruffini S, et al. A look inside 5G standards to support time synchronization for smart manufacturing[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2020, 4(3): 14-21.
- [61] Alimadani R, Adedeji A A, Narimani M. A review of IoT applications in food processing and related fields[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2025, 2025(1): 3064441.
- [62] Kook S, Baek S, Nam H, et al. Demo: ML-based vision classification in the smart brewing factory testbed[C]// 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Seoul, Korea: IEEE, 2022: 1-2.
- [63] Kabeer M M. Next-generation food manufacturing: AI as a catalyst for productivity and quality enhancement[J]. Global Food Research, 2025, 1(1): 1-18.
- [64] Lundgren C, Turanoglu Bekar E, Barring M, et al. Determining the impact of 5G-technology on manufacturing performance using a modified TOPSIS method[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2022, 35(1): 69-90.
- [65] Mahmood A, Abedin S F, Sauter T, et al. Factory 5G: a review of industry-centric features and deployment options[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2022, 16(2): 24-34.
- [66] Brown G, Analyst P, Reading H. Ultra-reliable low-latency 5G for industrial automation[J]. Technol Rep Qualcomm, 2018, 2: 1-11.
- [67] Willmann S, Rauchhaupt L. Aspects of testing when introducing 5G technologies into industrial automation[M]// Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020: 276-288.
- [68] Henrichs E, Noack T, Pinzon Piedrahita A M, et al. Can a byte improve our bite? an analysis of digital twins in the food industry[J]. Sensors, 2022, 22(1): 115.
- [69] Zhu X R, Zhao L Y, Cao J M, et al. Fault diagnosis of 5G networks based on digital twin model[J]. China Communications, 2023, 20(7): 175-191.
- [70] Yang Z B, Gao F Y. Design and implementation of a smart factory system based on 5G and IoT technology[C]// 2023 International Conference on Network, Multimedia and Information Technology (NMITCON). Bengaluru, India: IEEE, 2023: 1-5.
- [71] Goffi P E, Tremblay R, Oakes B. Engineering a digital twin for the monitoring and control of beer fermentation sampling[EB/OL]. 2025: arXiv: 2508.18452. <https://arxiv.org/abs/2508.18452>.
- [72] 傅文军, 吴海明, 胡曼宁, 等. 基于 5G 智云专网的智慧巧克力工厂[J]. 中国仪器仪表, 2023(1): 17-20.
- Fu W J, Wu H M, Hu M N, et al. Mars smart chocolate factory based on 5G smart cloud private network[J]. China Instrumentation, 2023(1): 17-20.
- [73] Gómez-Jerez J, Cañete-Martin J, Lucas-Estaó M C, et al. 5G UE and network asset administration shells for the integration of 5G and industry 4.0 systems[C]// 2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Padova, Italy: IEEE, 2024: 1-8.
- [74] Alsulami M H. Challenges facing the implementation of 5G[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2023, 14(5): 6 213-6 226.