

人工智能驱动下的食品冷链安全智能追溯与监控体系

曾小青 张羽月 谢文清 周建华

(长沙理工大学经济与管理学院, 湖南 长沙 410076)

摘要:针对食品冷链安全治理中信息断层、风险响应滞后、责任主体模糊三大障碍,构建以人工智能技术为核心,融合物联网与区块链技术为一体的冷链安全追溯与监控体系。在对食品冷链全流程风险分析基础上,依托供应链韧性理论、信息不对称理论、HACCP与ISO 22000食品安全标准等理论框架,围绕多源数据采集与追溯、食品品质动态评估、风险预测预警、智能调度优化与区块链可信存证五大功能模块进行了系统架构设计;研究提出了“感知、评估、预测、决策、存证”协同运行架构,可实现多源数据融合、品质动态评估与风险预警,推动了传统冷链安全治理从“事后追责”向“事前预警、事中监控”的主动防控模式转变,明确了人工智能技术在冷链安全治理中的应用功能定位。

关键词:食品冷链;安全追溯;人工智能;区块链;智能监控;风险预警

An AI-driven safety traceability and monitoring system for food cold chain

ZENG Xiaoqing ZHANG Yuyue XIE Wenqing ZHOU Jianhua

(School of Economics and Management, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410076, China)

Abstract: Targeting the three major obstacles—information fragmentation, delayed risk response, and ambiguous accountability—in food cold chain safety governance, this study constructs an integrated cold chain safety traceability and monitoring system centered on artificial intelligence technology and incorporating the Internet of Things and blockchain. On the basis of a comprehensive risk analysis of the entire food cold chain process, and drawing on theoretical frameworks including supply chain resilience theory, information asymmetry theory, HACCP, and ISO 22000 food safety standards, this study designs a system architecture organized around five functional modules: multi-source data collection and traceability, dynamic food quality assessment, risk prediction and early warning, intelligent scheduling optimization, and blockchain-based trusted evidence storage. This study then proposes a collaborative operational architecture encompassing perception, assessment, prediction, decision-making, and evidence storage, which enables multi-source data fusion, dynamic quality evaluation, and risk warning. This advances the transformation of cold chain safety governance from a reactive post-incident accountability model to a proactive prevention and control model of pre-incident warning and in-process monitoring, while clarifying the functional positioning of artificial intelligence technology in cold chain safety governance.

Keywords: food cold chain; safety traceability; artificial intelligence; blockchain; intelligent monitoring; risk warning

冷链物流(cold chain logistics, CCL)是保障食品品质与安全、降低流通损耗、提升市场经济价值的核心基础设施。根据联合国粮食及农业组织(FAO)^[1]统计,全球每年约有13亿t食物在“从田间到餐桌”的流通过程中损失或浪费。若能对冷链基础设施进行系统性现代化改造,

可减少约50%的冷链相关损失^[2]。从政策层面看,国家《“十四五”冷链物流发展规划》(2021)及2025年修订实施的《食品安全法实施条例》相继出台,标志着食品冷链安全追溯与监控已从企业自愿行为上升为具有强制约束力的制度性要求。此外,预制菜产业发展驶入快车道。

基金项目:国家社会科学基金资助(编号:21BGL176)

通信作者:曾小青(1975—),男,长沙理工大学教授,博士。E-mail: zengxq@csust.edu.cn

收稿日期:2026-04-02 **改回日期:**2026-06-10

引用格式:曾小青,张羽月,谢文清,等. 人工智能驱动下的食品冷链安全智能追溯与监控体系[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 67-74.

Citation: ZENG Xiaoqing, ZHANG Yuyue, XIE Wenqing, et al. An AI-driven safety traceability and monitoring system for food cold chain [J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 67-74.

2024 年 3 月 18 日,国家市场监督管理总局等六部委联合发布《关于加强预制菜食品安全监管 促进产业高质量发展的通知》^[3],明确了预制菜的定义和范围,并要求加强全链条食品安全风险管控,规范冷藏冷冻和冷链物流等环节,强化预制菜食品安全监管。

然而,传统冷链物流体系存在三大约束:其一,环境感知能力薄弱,容易出现信息断层;其二,制冷设备调控实时性与自适应能力不足,难以对环境变化进行实时响应;其三,供应链协同机制不完善,责任主体不清晰^[4],导致冷链系统出现高腐损与高碳排放,影响食品安全与经济社会可持续发展。

以物联网、人工智能、区块链、大数据为代表的新一代信息技术的快速崛起,为冷链物流的数智化转型提供了重要的技术支撑,正重塑食品冷链安全追溯与监控的治理体系,推动冷链系统向实时感知、自适应决策与自动化执行的闭环智能系统演进^[5-6]。冷链智能化将是未来几年最具变革意义的产业技术应用场景。预计到 2027 年,全球超过 65% 的大型食品供应链企业将实现智能化转型^[7]。

新兴技术为食品冷链数智化转型创造了条件,但在系统层面仍存在诸多不足:① 技术应用呈现模块化、单点式特征,各技术模块之间缺乏协同;② 缺乏兼具理论高度与实践操作性的综合方案,冷链系统与供应链韧性、数字化治理、HACCP 以及 ISO 22000 安全管理体系的耦合不足^[8-9]。鉴于此,研究拟将理论框架与技术体系进行整合,构建人工智能驱动的食品冷链安全追溯与监控体系架构,以期实现食品冷链治理从被动的事后追责向主动防控模式转变。

1 研究现状

1.1 食品冷链安全追溯与监控的演进脉络

食品冷链追溯研究经历了从单一技术工具探索到系统集成应用、再到智能化治理的三阶段演进历程。

(1) 单一技术工具探索期(2000—2012 年)。早期研究^[10-11]主要聚焦于射频识别(RFID)技术在食品溯源中的应用,探讨其在标签读写精度、抗干扰能力与成本效益方面的可行性。Ruiz-Garcia 等^[12]在其系统综述中指出,RFID 技术在农产品供应链中的核心价值在于实现产品在多个节点之间流转的无纸化自动识别。与此同时,部分学者关注到条形码与二维码等传统标识技术在追溯精度上的先天局限,提出构建统一编码标准的政策建议^[10]。该阶段研究以技术性验证为主,对追溯系统的整体架构与多主体协同问题关注不足。

(2) 多传感器协同与系统集成期(2012—2021 年)。随着物联网技术的成熟与传感器成本的大幅下降,研究视野逐步扩展至多传感器协同采集与数据实时传输领

域^[13]。Jedermann 等^[14]从“减少食物损失”的全球视角,论证了智能物流系统通过持续监测温度、湿度、气体浓度与振动等环境参数,实现果蔬剩余货架期(remaining shelf life, RSL)的实时预测,将冷链追溯从“事后记录”拓展至“全程优化”。该阶段涌现出大量冷链监控方案^[15]。

(3) 区块链赋能与智能化治理期(2021 年至今)。引入区块链技术成为冷链追溯研究的重要方向,其核心价值在于以去中心化机制解决多主体环境下的“数据真实性”悖论^[16-17]。Mishra 等^[18]针对不同规模场景提出了差异化的溯源架构选择策略:对于高价值国际冷链,许可联盟链(permissioned consortium chain)提供了信任与性能的最优平衡;对于中等规模运营,中心化与去中心化的混合系统是务实选择;对于中小企业,采用密码哈希与中心化审计的轻量级数字平台可以降低建设与运营成本。Vasileiou 等^[19]进一步将合作博弈论的利润、风险分摊契约与区块链智能合约相结合,为多主体协作提供了兼顾公平性与透明性的执行框架。此外,Monteiro 等^[8]将数字孪生技术引入冷链追溯研究后指出,通过构建物理冷链系统的虚拟映像,可实现对追溯数据偏差的动态校验与异常事件的前瞻性预测,标志着冷链追溯进入“智能化治理”新阶段。

1.2 AI 在食品冷链追溯与监控中的应用

AI 技术涵盖机器学习与智能优化等核心方法,其快速发展为冷链物流各环节的智能化升级提供了强大支撑。AI 在温度监控、路径优化、品质检测与需求预测等核心场景中的应用已取得系列突破性进展。

(1) 温度监测与控制优化方面:Park 等^[20]基于深度确定性策略梯度(DDPG)算法开发了自适应冷库温度控制器,实时监测并有效抑制外部波动和频繁开门操作对库温的扰动,试验证明该控制器在仿真环境中理论节能效率可达 50%。Han 等^[21]运用计算流体力学(CFD)仿真分析了预冷参数(气流速度、湿度、温度和时间)对苹果冷却速率、制冷能耗和冷害程度的综合影响。Chen 等^[22]通过多目标优化模型,在兼顾成本、环保和时间的同时,确保冷链运输中的温度稳定,并通过考虑网络故障等不确定性因素,增强了冷链系统的温度控制韧性。

(2) 运输过程追溯与路径优化方面:Shi 等^[23]开发了融合城市治理约束的智能绿色冷链物流调度系统,并通过 Dijkstra 算法与第三代非支配排序遗传算法的多目标优化模型,对冷链运输过程进行追溯并优化路径选择,实现了运营成本、车辆调度频次与碳排放的协同优化。Wasi 等^[24]将图神经网络(GNN)引入冷链物流网络优化中,通过建模仓储节点间的空间拓扑关系,系统推进了 GNN 在供应链场景中的应用研究;结果表明,GNN 模型在 6 类供应链任务上均显著优于传统机器学习与深度学习方法,性能提升幅度达 10%~40%。

(3) 品质检测方面:跨模态智能感知技术的应用成果已十分丰富。李鑫等^[25]使用时间卷积网络(TCN)结合有效通道注意力网络(ECA-NET)建立香蕉新鲜度识别模型(ECA-TCN),取得了更好的新鲜度识别效果。Chaudhary等^[26]系统梳理并分析利用NIRS和HSI技术进行无损芒果分级的数据模型,推动芒果智能化、实时化与自动化分级。Rahman等^[27]则将图像识别与传感器数据融合应用于冷冻鱼品质检测,实现了在不破坏包装的前提下对微生物污染风险的概率化预测,为冷链品质管控从“抽检”走向“全检”提供了可行路径。

(4) 需求预测与库存优化方面:Cui等^[28]基于长短期记忆神经网络(LSTM)与注意力机制(attention mechanism),构建了考虑节假日效应、天气变量与历史销售模式的多因素冷链需求预测模型,实测预测误差较传统指数平滑法显著下降,在大型生鲜零售场景中显著降低了库存积压与缺货损失。有关研究正在与智能补货、动态定价等先进供应链管理方式深度融合,成为冷链数字化转型的重要商业场景。

1.3 研究述评

现有研究已取得丰富成果,但仍存在以下不足:① 研究多以工程应用为导向,理论与实践之间存在断层;② 物联网感知、计算机视觉评估与区块链存证等关键技术研究虽进步较快,但端到端协同机制尚不完善。因此,在对食品冷链全流程风险分析的基础上,研究依托供应链韧性理论、信息不对称理论、HACCP与ISO 22000体系以及多源信息融合等理论框架,设计涵盖多源数据采集与追溯、品质动态评估、风险预测预警、智能调度优化与区块链可信存证五大核心模块的系统架构。

2 食品冷链全流程风险分析

食品冷链全流程是指从原料生产、采前处理、预冷降温、低温仓储、冷藏运输、分拣包装到终端零售的全链条温控管理体系。依据HACCP框架的危害识别原则,从安全监控角度可归纳为五大关键控制环节:预冷处理、冷库仓储、冷藏运输、分拣包装与末端配送,各环节在温控敏感性、危害类型与监控技术需求方面呈现高度差异化特征。

(1) 预冷处理环节是冷链安全的起始关键点,目标是在最短时间内将产品温度从田间采收温度(通常20~35℃)降至目标贮藏温度(通常0~4℃)。预冷环节的主要风险包括预冷速率不足(因制冷量不够或装载密度过高导致)、冷害发生(过低温度导致细胞膜损伤,多见于热带水果)与表面冷凝水污染(因温差过大为微生物提供繁殖载体)。

(2) 冷库仓储环节是冷链安全的核心缓冲节点,目标是在产品入库至出库期间将温度及温度波动幅度控制在

合理范围。该环节的主要风险包括温度分层现象(因气流组织不合理导致冷库不同区域温差超过1.5℃)、频繁开门引起的“热冲击”(每次开门导致进货口区域温升0.5~2.0℃)、湿度失控以及不同品类的交叉污染。全国冷库专项检查数据表明,仓储环节问题中温度分层现象占比最高,其次为设备维护不及时引发的断电风险与货物混放引起的交叉污染。

(3) 冷藏运输环节是冷链全流程风险最集中的动态节点,目标是在产品从仓储地转运至目的地的过程中,将车厢内温度持续控制在规定范围内,并对温度偏差进行及时响应。该环节面临的外部扰动最复杂,主要风险包括路途中气温波动、装卸作业频次、驾驶员操作规范性和制冷机组故障。在冷链运输温控异常事件中,超过60%源于信息传递延迟或人为疏漏,该环节对实时温控技术需求非常迫切。

(4) 分拣包装环节是冷链连续性最易中断的操作节点,目标是在尽可能短时间内完成产品的分级、称重、包装与标签作业,并将产品温度回升幅度控制在品质安全阈值以内。该环节主要风险来源于两个维度:① 温度链断裂。分拣作业通常在常温或半冷环境中进行,若操作时间过长,高敏感品类如浆果、切割蔬菜的品质下降变得不可弥补。② 交叉污染风险。不同批次、不同来源产品的混合操作若缺乏规范隔离措施,会引发微生物的水平传播,且作业时间越长,产品暴露于常温环境的窗口越宽,交叉污染的概率也随之上升。

(5) 末端配送环节是产品从分拣中心送达消费者手中的“最后一公里”,是冷链全流程温控管理最薄弱的终端节点。该环节的主要风险包括运输工具不达标,全程缺乏有效制冷保障;客户签收延误,产品在快递驿站长时间暴露于常温下;配送路线分散导致的监管盲区,单次配送涉及点位多、时间窗口短,温控数据难以实时回传与核查。

3 理论框架

3.1 供应链韧性理论

供应链韧性(supply chain resilience, SCR)理论源自系统工程与危机管理领域,由Christopher等^[29]提出,是指供应链在遭遇内外部扰动时,保持持续运作并从破坏性事件中快速恢复的能力。该理论包括可见性(visibility)、柔性(flexibility)和鲁棒性(robustness)3个特性。可见性是指系统对全链条状态变化的实时感知能力,是打破信息孤岛、实现跨主体数据共享的根本前提;柔性是系统在扰动发生后能够灵活调整运营策略、动态重构资源配置并快速恢复正常运转的能力;鲁棒性则是系统在遭遇外部冲击时保持基本功能不崩溃的能力。

就食品冷链而言,可见性维度要求系统实现跨节点、

跨主体的数据实时汇聚与全程状态呈现,从根本上消除信息孤岛^[30];柔性维度驱动智能优化与动态决策模块的设计,要求系统在感知到异常后能够立即执行调整方案^[31];鲁棒性维度则要求底层传感网络与数据通道具备冗余容错能力^[32]。三者相互支撑、层层递进,为设计具有韧性的食品冷链安全追溯与监控系统提供了理论指导。

3.2 信息不对称理论

诺贝尔经济学奖得主 Akerlof^[33]的“柠檬市场”模型揭示了信息不对称如何导致市场失灵。在食品冷链中,供应商拥有远比消费者和监管者更多的信息优势,这种结构性信息优势容易催生道德风险(信息断层使履约行为难以观察)和逆向选择(责任模糊使得劣质主体驱逐高质量主体)^[34]。

AI与区块链技术消除或削减信息不对称的机制。AI与区块链技术的融合,从3个机制层面系统削减了冷链信息不对称^[35]。①数据全量化与实时化:物联网传感器将温湿度采集从“抽样”变为“全量”、从“静态”变为“动态”、从“事后”变为“实时”,大幅压缩了信息隐瞒的操作空间。②数据不可篡改性:区块链以哈希链式存储固化数据时间戳,数据造假成本极高,从机制层面抑制了道德风险行为^[36]。③信息穿透性:区块链公钥基础设施(PKI)与权限分级访问机制,使政府监管机构可穿透式查验任意批次产品的完整生命周期记录,消费者可通过扫描二维码获取经加密验证的溯源报告,从根本上重塑了供应链的权责结构与信任机制。

3.3 HACCP与ISO 22000食品安全管理体系

HACCP(hazard analysis and critical control points,危害分析与关键控制点)体系,是全球食品安全管理的规范性框架。通过推广 HACCP 体系并聚焦关键控制点(CCP),以技术赋能精准监管,可有效解决资源约束与监管需求的矛盾^[37]。ISO 22000标准在 HACCP 原则基础上引入了食品安全管理体系(food safety management system, FSMS)框架要素。FSMS是一套基于戴明环(PDCA)的集成化过程管理体系,将 HACCP、前提方案、追溯系统、供应链管理等整合在一起^[38]。

在冷链场景中,HACCP与ISO 22000框架以及AI技术三者结合,产生了以下协同效应:

(1) CCP从静态设定转向动态感知。传统 HACCP 框架中,关键控制点的温控阈值由专家经验预设。AI系统通过持续学习历史数据与实时环境参数,可动态校准各 CCP 的控制边界,使控制措施的精准性大幅提升^[39]。

(2) 纠偏行动从人工判断转向自动触发。传统体系中,超限告警需经人工复核后才能启动纠偏程序。AI可在温度偏差超限后自动触发制冷强化指令,并同步推送至责任人,缩短纠偏响应时间。

(3) 验证与确认活动从周期性抽审转向持续监控。

HACCP体系要求对 CCP 的监控结果定期开展验证。AI系统通过机器学习模型对海量历史数据进行异常模式挖掘,可自动执行验证活动,识别人工定期抽查难以发现的系统性偏差趋势^[40]。

3.4 多源信息融合理论

多源信息融合(multi-source information fusion, MSIF)是一门综合性交叉学科,起源于20世纪70年代,最初被称为多传感器信息融合,后被引入工业物联网与智能系统领域^[41]。多源信息融合的核心价值在于通过整合异构数据源,系统消除单一数据源的不确定性,在食品冷链安全保障中日益发挥关键作用^[42]。冷链追溯场景至少涵盖6个方面的信息源:①物联网传感器数据(温度、湿度、CO₂浓度、乙烯浓度、震动强度);②地理时空数据(GPS轨迹、GIS地理围栏、入库/出库时间戳);③产品标识数据(RFID标签、条形码、二维码、GTIN编码);④区块链存证数据(哈希摘要、智能合约执行日志、多方签名记录);⑤第三方检测报告(农药残留、微生物指标、重金属含量);⑥外部环境数据(气象API、交通拥堵指数、突发事件预警)。这些数据在时间粒度、空间分辨率、数据结构与采集频率方面均存在显著差异。

借鉴 MSIF 理论,可构建冷链追溯的三级融合架构,如表1所示:数据级融合在传感器原始数据层通过时空对齐与校准,消除不同设备之间的系统误差;特征级融合提取各传感器数据流的高维特征向量,通过深度神经网络进行特征关联,识别单一数据源无法检出的异常事件;决策级融合利用产品类型、批次历史与供应商评级等多源信息,进行综合风险评分,为食品召回与应急响应提供科学依据。

4 系统架构设计

针对食品冷链安全治理中信息断层、响应滞后与责任模糊三大障碍,研究依托四大理论框架,融合人工智能、物联网与区块链3类技术,设计食品冷链安全追溯与监控系统架构。该架构围绕多源数据采集与追溯、食品品质动态评估、风险预测与预警、智能调度优化与区块链可信存证五大功能模块展开,在数据感知、风险管控、品质研判、责任确权与决策支持等方向形成整体性、协同性的治理能力。系统总体架构如图1所示。

4.1 多源数据采集与追溯

(1) 多源数据采集。冷链数据来源高度分散。现代冷链物联网部署通常采用节点层、接入层和汇聚层3层架构,其中节点层部署温湿度传感器、无线温度标签、气体浓度传感器、GNSS定位模块及振动/倾斜各类传感器,覆盖温度、湿度、位置、气体成分与物理状态5类核心数据。接入层依据不同场景采用差异化通信方案:仓储环境采用 Zigbee、LoRa 等低功耗协议,运输环节采用 4G/5G/NB-

表1 食品冷链多源信息整合三级架构

Table 1 Three-tier architecture for multi-source information integration in food cold chain

融合级别	信息源类型	融合方法	融合价值
数据级融合	物联网传感器(温度、湿度、气体、震动)	时空对齐与校准、消除多设备系统误差	标准化、同步的多维传感数据;设备间数据一致性提高
特征级融合	多源异构数据(GPS轨迹、GIS围栏、RFID、条码、时间戳、检测报告、气象数据)	深度神经网络、高维特征向量提取与关联、异常事件识别	识别单一数据源无法检出的异常;生成可解释的风险特征向量
决策级融合	产品类型、批次历史、供应商评级、综合环境因素	多源信息贝叶斯推断、综合风险评估模型	科学化食品召回决策;应急响应方案生成;供应链信誉评估

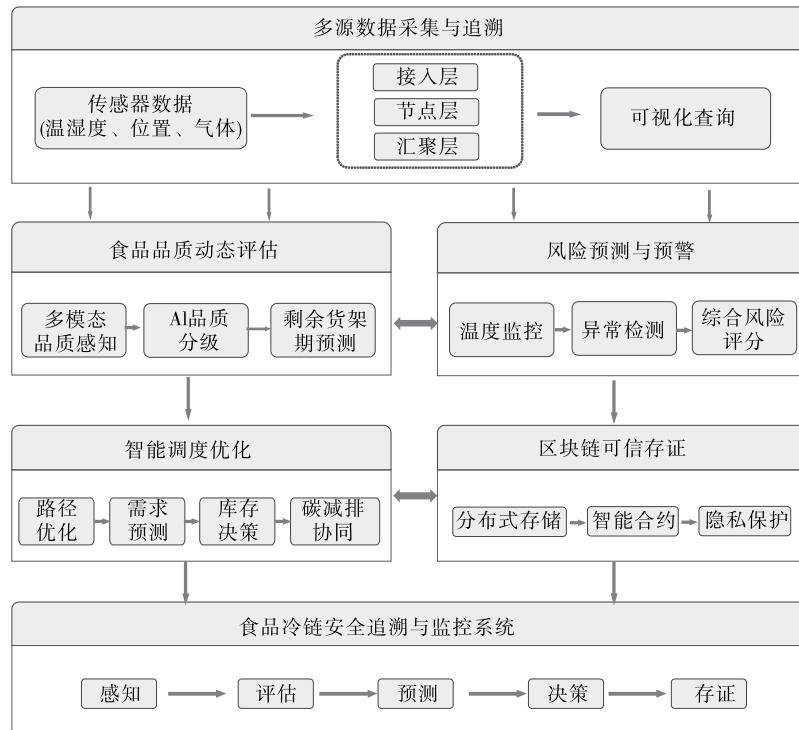


图1 AI赋能的食品冷链安全追溯与监控系统架构

Figure 1 Architecture of an AI-driven safety traceability and monitoring system for food cold chain

IoT 通信技术,末端配送采用蓝牙 5.0 或 NFC。汇聚层边缘网关负责多协议适配与本地异常预判,可独立维持数据存储,确保追溯链条不因网络波动而发生中断。

(2) 追溯信息可视化查询与展示。可视化数据屏以数字地图、热力图、雷达图等形式,实时呈现全网冷链运营状态,支持按品类、区域、时间维度进行穿透查询。消费者、监管人员与冷链从业者均可通过扫描产品二维码或 RFID 标签,调取产品从产地到终端的全链条流转记录,查看各节点温湿度曲线、地理轨迹、操作人员与检验报告等信息。

4.2 食品品质动态评估

(1) 多模态品质感知。可综合视觉、气味、光谱等多维度信息进行食品品质判断。AI 在食品品质分级中可达到 96% 以上的准确率;当前,YOLO 目标检测模型在冷库

巡检中检测速度可达 30 帧/s,可满足流水线实时处理需求。近红外光谱(NIR)结合深度学习可实现非接触快速预测,检测速度从分钟级压缩至秒级;电子鼻结合机器学习通过挥发性有机化合物(VOC)特征谱,可提前检出微生物腐败信号。

(2) 剩余货架期预测。剩余货架期(remaining shelf life, RSL)预测将深度学习模型与食品腐败动力学方程相融合,可显著提升预测可靠性。因此,基于品质评分的自动分拣系统能够将剩余货架期较短的产品优先调配;在智能分拣与动态定价方面,结合动态折扣促销策略,有效降低临期损耗,推动冷链运营从被动报损转向主动干预;在供应链金融与保险核定方面,可追溯的品质评分取代主观人工估损,为保险公司提供标准化的核赔依据,提升结算效率并降低道德风险;在监管合规审计方面,非接

触式全量检测逐步替代传统人工抽检,为监管机构提供更完整、更具可追溯性的合规证据链,推动食品安全监管从抽样验证向全程留痕转变。

4.3 风险预测与预警

传统超限告警只在问题出现时触发,而 AI 预测模型可在偏差超出阈值前就发出预警。比如,长短期记忆模型(LSTM)能有效捕捉温度变化趋势,及早进行温度偏差控制;孤立森林(isolation forest)与自编码器(autoencoder)无需标注异常样本即可实现异常检测;XGBoost等集成学习方法融合温度、湿度、运输时长、车辆维护记录与货品敏感度等多维特征,可进行综合风险评分,实现冷链风险“一单一评”。

4.4 智能调度优化

(1) 智能调度、路径优化与需求预测。传统冷链调度以人工经验为主,AI 调度引擎通过将温控合规要求、车辆装载率约束纳入统一的多目标优化框架,实现配送路径优化,提升时效,降低空载率。需求预测方面,预测模型能够整合历史销售数据、节假日效应、气象信息与社交媒体情绪指数等特征,相比传统指数平滑等统计方法,在预测精度上具有明显优势。库存智能决策模块将需求预测结果与剩余货架期 RSL 预测联动,自动触发补货或促销指令,推动冷链管理模式从“以供定需”向“以需驱供”模式转变。

(2) 碳减排协同优化。冷链物流的碳排放来源多样, AI 技术通过 4 条路径协同推动冷链减排:精准温控减少制冷机组低效运行;路径优化降低运输总里程与车辆空载率;需求预测减少因库存失衡引发的重复运输;品质精准评估避免质量不确定性所带来的额外能耗,对冷链行业实现“双碳”目标具有重要的现实意义,也为冷链企业参与碳市场交易、完善 ESG 信息披露提供了可量化的技术支撑。

4.5 区块链可信存证

(1) 区块链在冷链追溯中的应用。食品冷链各类主体利益诉求不一。区块链通过分布式存储与加密哈希链机制,使历史数据一经写入便无法篡改,从技术层面保证了追溯数据的真实性。冷链行业普遍采用的联盟链由冷链企业、检测机构与监管部门共同维护,兼顾了数据安全性与业务效率的平衡。

(2) 智能合约与数据隐私保护。智能合约将冷链业务规则转化为链上自动执行的代码逻辑。典型场景包括:当温控全程合规时自动发放货款;若超限事件触发,则按比例自动扣除违约保证金;若检出问题食品批次,则自动下达召回指令并冻结相关交易记录。消除了结算与追责流程中的人工干预环节,可有效降低纠纷处理成本,并提升供应链各方的履约效率。此外,联盟链在节点间共享数据时,零知识证明(ZKP)与同态加密(HE)

等隐私计算技术能够实现“可验证真实性、不暴露原始内容”的数据流通模式,在保护商业隐私的同时维持追溯体系的完整性。

5 结论

人工智能正重塑食品冷链安全治理体系。为克服食品冷链的信息断层、响应滞后与责任模糊障碍,该研究对冷链安全追溯与监控系统架构进行设计,涵盖五大核心功能,形成了“感知、评估、预测、决策、存证”的协同框架。

当前冷链产业已进入高质量发展新阶段。为加快数字化升级,建议政府重点推进:① 将冷链数智化纳入国家食品安全战略与预制菜产业发展的顶层设计;② 建立跨企业、跨地域的国家级冷链数据共享平台,实现互联互通与可信交互;③ 建立融资与税收激励机制,降低中小企业的技术应用门槛;④ 发挥第三方机构的监督职能,形成多元协同治理格局。最终实现食品冷链治理从“事后追责”向“事前预警、事中监控”的主动防控模式转变。

参考文献

- [1] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). The state of food and agriculture: moving forward on food loss and waste reduction[R]. Rome: FAO, 2019: 5.
- [2] ZHANG Y, ZOU Y F, LIU L Q, et al. A digital twin-driven dynamic shelf life approach for mitigating food loss across fruit supply chains[J]. Journal of Stored Products Research, 2026, 117: 103016.
- [3] 市场监管总局,教育部,工业和信息化部,等.关于加强预制菜食品安全监管促进产业高质量发展的通知(国市监生发〔2024〕27号)[EB/OL]. (2024-03-18) [2025-12-28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6940808.htm. State Administration for Market Regulation, Ministry of Education, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Notice on strengthening food safety supervision of prepared dishes and promoting high-quality industrial development (No. 27 [2024] of the State Administration for Market Regulation) [EB/OL]. (2024-03-18) [2025-12-28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6940808.htm.
- [4] 陈俊,刘会阁.食品工程中利用人工智能技术的冷链物流温度预测模型构建[J].中外食品工业, 2025(5): 29-31. CHEN J, LIU H G. Construction of a cold chain logistics temperature prediction model using artificial intelligence technology in food engineering[J]. Global Food Industry, 2025 (5): 29-31.
- [5] LI S Y, ZHOU Y P, ZHANG Y J, et al. An overview of artificial intelligence applications in food cold chain transportation[C]// Proceedings of the 2023 5th International Conference on Robotics Systems and Automation Engineering. United Kingdom: ACM, 2023: 34-40.
- [6] 郑根让.农产品冷链物流中基于时空网络的AI温湿度异常预

- 警与调度技术[J]. 自动化与仪器仪表, 2026(2): 97-101.
- ZHENG G R. AI temperature and humidity anomaly early warning and dispatching technology based on spatio-temporal network in agricultural product cold chain logistics[J]. Automation & Instrumentation, 2026(2): 97-101.
- [7] LAVELLE J, RUANE B. Gartner identifies top trends in supply chain technology for 2024: interplay between humans and machines is a key theme driving multiple trends[EB/OL]. (2024-03-20) [2026-05-11]. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-03-20-gartner-identifies-top-trends-in-supply-chain-technology-for-2024>.
- [8] MONTEIRO J, BARATA J. Digital twin-enabled regional food supply chain: a review and research agenda[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2025, 45: 100851.
- [9] 阮俊虎, 孙元威. 人工智能赋能农业产业链供应链韧性提升: 逻辑、挑战与路径[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2026, 26(1): 24-37.
- RUAN J H, SUN Y W. Enhancing agricultural industry chain and supply chain resilience through artificial intelligence empowerment: logic, challenges and paths[J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2026, 26(1): 24-37.
- [10] REGATTIERI A, GAMBERI M, MANZINI R. Traceability of food products: general framework and experimental evidence [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2): 347-356.
- [11] 曾小青, 彭越, 王琪. 物联网加区块链的食品安全追溯系统研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 100-105.
- ZENG X Q, PENG Y, WANG Q. Research on food safety traceability system based on IoT and blockchain technology[J]. Food & Machinery, 2018, 34(9): 100-105.
- [12] RUIZ-GARCIA L, LUNADEI L. The role of RFID in agriculture: applications, limitations and challenges[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(1): 42-50.
- [13] 韩彬, 冷冬梅, 徐毓谦, 等. 肉品冷链物流监控技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 19-30.
- HAN B, LENG D M, XU Y Q, et al. Research progress in monitoring technology of cold chain logistics for meat products [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 19-30.
- [14] JEDERMANN R, NICOMETO M, UYSAL I, et al. Reducing food losses by intelligent food logistics[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2014, 372(2017): 20130302.
- [15] 吴铭峰. 基于人工智能技术的船舶冷链物流监控系统[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(2): 196-198.
- WU M F. Design of ship cold chain logistics monitoring system based on artificial intelligence technology[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(2): 196-198.
- [16] 周春华, 吴霞云. 食品经营企业行政责任主体双罚制分离构想[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 70-75, 98.
- ZHOU C H, WU X Y. The concept of separation of double punishment system for the main body of administrative responsibility of food business enterprises[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 70-75, 98.
- [17] DUMAN E, AYDOĞAN E. Enhancing traceability and reliability in cold chain logistics through hyperledger fabric and IoT[J]. Applied Sciences, 2025, 15(22): 12149.
- [18] MISHRA A, KUNDU T, KAPOOR R, et al. Blockchain adoption in cross-border cold supply chains: cost, efficiency and trust[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2025, 201: 104236.
- [19] VASILEIOU M, KYRGIAKOS L S, KLEISIARI C, et al. Digital transformation of food supply chain management using blockchain: a systematic literature review towards food safety and traceability[J/OL]. Business & Information Systems Engineering. (2025-06-12) [2025-12-29]. <https://doi.org/10.1007/s12599-025-00948-0>.
- [20] PARK J W, JU Y M, KIM Y G, et al. 50% reduction in energy consumption in an actual cold storage facility using a deep reinforcement learning-based control algorithm[J]. Applied Energy, 2023, 352: 121996.
- [21] HAN J W, BADÍA-MELIS R, YANG X T, et al. CFD simulation of airflow and heat transfer during forced-air precooling of apples[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(2): e12390.
- [22] CHEN J, GE S L, CHONG H Y, et al. Multi-objective optimisation of container with food cold chain using multimodal transport under uncertainties in network structure and ad-hoc situations[J]. Promet - Traffic&Transportation, 2025, 37(5): 1 376-1 392.
- [23] SHI Y H, LIN Y, LIM M K, et al. An intelligent green scheduling system for sustainable cold chain logistics[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 209: 118378.
- [24] WASI A T, ISLAM M S, AKIB A R, et al. Graph neural networks in supply chain analytics and optimization: concepts, perspectives, dataset and benchmarks[EB/OL]. (2024-11-13) [2025-12-06]. <https://arxiv.org/abs/2411.08550>.
- [25] 李鑫, 朱磊, 张媛, 等. 基于注意力时间卷积网络的香蕉新鲜度识别与剩余货架期预测 [J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 153-159.
- LI X, ZHU L, ZHANG Y, et al. Freshness recognition and remaining shelf life prediction of banana based on attention temporal convolutional network[J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 153-159.
- [26] CHAUDHARY R K, NEUPANE A, WANG Z L, et al. Mango quality assessment using near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: a systematic review[J]. Agronomy, 2025, 15(10): 2 271.
- [27] RAHMAN M M, SHIBATA M, NAKAZAWA N, et al. Non-destructive approach for the prediction of pH in frozen fish

- meat using fluorescence fingerprints in tandem with chemometrics[J]. *Fishes*, 2022, 7(6): 364.
- [28] CUI L G, CHEN Y C, DENG J, et al. A novel attLSTM framework combining the attention mechanism and bidirectional LSTM for demand forecasting[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 254: 124409.
- [29] CHRISTOPHER M, PECK H. Building the resilient supply chain[J]. *The International Journal of Logistics Management*, 2004, 15(2): 1-14.
- [30] 冯燕芳, 陈永平. 技术赋能下生鲜农产品冷链物流质量提升途径研究[J]. *价格理论与实践*, 2024(4): 72-76, 224.
- FENG Y F, CHEN Y P. Research on ways of quality improvement of cold chain logistics for fresh agricultural products by technology empowerment[J]. *Price (Theory & Practice)*, 2024(4): 72-76, 224.
- [31] LEE H L. The triple-a supply chain[J]. *Harvard Business Review*, 2004, 82(10): 102-112.
- [32] PATEL A S, BRAHMBHATT M N, BARIYA A R, et al. Blockchain technology in food safety and traceability concern to livestock products[J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e16526.
- [33] AKERLOF G A. The market for "lemons": quality uncertainty and the market mechanism[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1970, 84(3): 488.
- [34] QIAN J P, YU Q Y, JIANG L, et al. Food cold chain management improvement: a conjoint analysis on COVID-19 and food cold chain systems[J]. *Food Control*, 2022, 137: 108940.
- [35] YU W B, OUYANG Z W, ZHANG Y F, et al. Research progress on the artificial intelligence applications in food safety and quality management[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2025, 156: 104855.
- [36] 沙蓓蓓. 人工智能视角下双渠道供应链的创新驱动因素研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(7): 9.
- SHA B B. Research on innovation-driven factors of dual-channel supply chain from the perspective of artificial intelligence[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(7): 9.
- [37] 傅卫卫. 食品安全法律监管的逻辑演进与路径创新[J]. *食品与机械*, 2026, 42(1): 259-260.
- FU W W. The logical evolution and path innovation of legal regulation on food safety[J]. *Food & Machinery*, 2026, 42(1): 259-260.
- [38] NGUYEN T T B, LI D. A systematic literature review of food safety management system implementation in global supply chains[J]. *British Food Journal*, 2022, 124(10): 3 014-3 031.
- [39] BENEFO E O, KARANTH S, PRADHAN A K. Applications of advanced data analytic techniques in food safety and risk assessment[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 48: 100937.
- [40] PINDI M. Revolutionizing cold chain logistics: leveraging IoT and AI for enhanced food safety and waste reduction[J]. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2025, 26(2): 1 412-1 424.
- [41] ZHANG P F, LI T R, WANG G Q, et al. Multi-source information fusion based on rough set theory: a review[J]. *Information Fusion*, 2021, 68: 85-117.
- [42] ADADE S Y S, LIN H, JOHNSON N A N, et al. Advanced food contaminant detection through multi-source data fusion: strategies, applications, and future perspectives[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2025, 156: 104851.