

# 数字孪生赋能预制菜冷链发展的研究进展

匡红云<sup>1,2</sup>, 郝皓<sup>1,2</sup>, 游世胜<sup>2\*</sup>, 苏醒<sup>3</sup>

(1. 上海市逆向物流与供应链协同创新中心, 上海第二工业大学, 上海 201209) (2. 上海第二工业大学经济与管理学院, 上海 201209) (3. 上海艾伦物流有限公司, 上海 201800)

**摘要:** 疫情、宅经济助推预制菜所代表的“便捷化餐饮”新消费潮流。数字技术催生新的情景应用和价值创造, 推动要素、流程和组织管理的创新, 赋能产业升级。该研究分析我国预制菜冷链供应链中存在的产地预冷缺乏、信息要素不流通问题, 比如冷链配套设施不足、冷链操作不规范、最后一公里配送及销售损耗。数字孪生模型可模拟和预测预制菜在冷链过程中的质量变化, 引入物联网和区块链等技术后可实现产品的运输监控和追溯溯源。该研究提出利用数字孪生技术搭建预制菜的数字化冷链追溯溯源系统, 实施预制菜冷链供应链的供应链、数字链、信任链和利益链的“链条化”发展, 尝试探索一条适合我国预制菜发展的数字化道路, 助力预制菜与冷链供应链的数字化转型和产业发展。

**关键词:** 预制菜; 冷链供应链; 数字孪生; 数字化

文章编号: 1673-9078(2024)06-356-363

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0359

## Advances in the Development of a Digital Twin to Empower the Pre-prepared Cold Food Chain

KUANG Hongyun<sup>1,2</sup>, HAO Hao<sup>1,2</sup>, YOU Shisheng<sup>2\*</sup>, SU Xing<sup>3</sup>

(1. Shanghai Collaborative Innovation Center of Reverse Logistics and Supply Chain, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China) (2. School of Economics and Management, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China) (3. Shanghai Aaron Logistics Co. Ltd., Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The COVID-19 pandemic and stay-at-home economy have contributed to a new consumer trend of “convenience dining,” as represented by pre-prepared foods. Digital technologies have given rise to new application and value creation scenarios, driven innovation across operations, processes, and organizational management, and empowered industrial upgrading. Thus, problems related to the lack of pre-cooling at the origin and poor information in the cold supply chain for pre-prepared foods in China were analyzed, including insufficient cold chain support facilities, irregular cold chain operations, last-mile distribution, and sales losses. The digital twin model can simulate and predict changes in the quality of pre-prepared foods during the cold chain process, while the introduction of technologies such as the Internet of Things and blockchain can enable transport monitoring and the traceability of products. This study proposes leveraging digital twin technology to establish a digital cold chain tracking and tracing system for pre-prepared foods. It aims to develop supply,

引文格式:

匡红云, 郝皓, 游世胜, 等. 数字孪生赋能预制菜冷链发展的研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(6): 356-363.

KUANG Hongyun, HAO Hao, YOU Shisheng, et al. Advances in the development of a digital twin to empower the pre-prepared cold food chain [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 356-363.

收稿日期: 2023-03-26

基金项目: 上海市逆向物流与供应链协同创新中心开放课题 (A30YD230111)

作者简介: 匡红云 (1975-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 酒店管理, E-mail: hykuang@sspu.edu.cn

通讯作者: 游世胜 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品冷链供应链, E-mail: sazen\_you@126.com

digital, trust, and benefit chains within the cold pre-prepared food supply chain, exploring a digital pathway tailored to the development of pre-prepared foods in China. Ultimately, this initiative seeks to drive digital transformation and industrial development within the pre-prepared foods and cold supply chain sector.

**Key words:** pre-prepared food; cold supply chain; digital twin; digitalization

疫情、宅经济助推新业态出现和消费结构的转型升级, 预制菜所代表的“便捷化餐饮”逐渐成为消费新潮流。据《2022-2023年中国预制菜产业发展趋势及商业布局分析报告》分析预测, 2026年预制菜市场规模将达10 720亿元。预制菜可有效减少食品在流通过程中被污染的风险, 但它需要冷链保障仓储运输的恒温、冷藏和冷冻环境。冷链是将预制菜从“田间地头”、“加工车间”送至“百姓餐桌”的关键一步<sup>[1]</sup>, 然而我国的冷链基础设施薄弱、冷链技术和管理水平不高<sup>[2]</sup>, 这在一定程度上限制了预制菜产业的发展。我国每年因冷链“断链”造成约1 200万t水果和1.3亿t蔬菜的损耗, 损失超千亿元。2021年国家商务部、国家发展改革委等发布《商贸物流高质量发展专项行动计划》, 提出加快推进冷链物流发展, 提高城乡冷链设施网络覆盖水平。《“十四五”冷链物流发展规划》提出, 2025年我国初步形成衔接产地销地、覆盖城市乡村的冷链物流网络。

连锁餐饮、外卖行业的快速扩张, 加速市场对预制菜冷链需求的增长, 同时也暴露出预制菜产业在加工技术、冷链运输和食品安全等诸多问题<sup>[3-5]</sup>。随着工业4.0的兴起, 数字孪生广泛用于供应链的建模、模拟和流程优化, Krupitzer等<sup>[6]</sup>将数字孪生用于食品生产的混合建模。Burgos等<sup>[7]</sup>用数字孪生分析新冠疫情对食品零售供应链的影响, 帮助提升食品零售供应链的抗风险能力。在数字孪生的建模中, Defraeye等<sup>[8]</sup>开发了芒果的生物模型, 模拟和预测芒果在冷链中的变化, 帮助改善冷藏和运输中的食物损耗; Shrivastava等<sup>[9]</sup>建立了草莓的物理包装模型, 确定供应链中关键节点, 量化包装内水果质量的质量损失。数字孪生还用于辅助食品的加工生产, Kannapinn等<sup>[10]</sup>提出物理的、数字驱动的数字孪生框架, 将数字孪生的节点信息用于自动化烹饪的研发; Nget等<sup>[11]</sup>构建微波加热的数字孪生模型, 并通过传热系数模拟预测食物的温度变化和水分流失, 帮助改善柬埔寨微波烹饪的情况。本研究分析预制菜冷链供应链所面临的“断链”风险, 通过借鉴、引入数字孪生技术, 提出预制菜冷链供应链断链问题的解决方案, 为预制菜相关产业研究和管理实践提供参考。

## 1 预制菜与冷链供应链

近年来, 我国预制菜产业迎来高速发展, 整个行业处于快速上升期。据数据调查显示, 2015~2020年预制菜的相关企业注册数量逐年上升。从图1可以看出, 2020年企业注册数量到达峰值16 221家, 现累计超过7.2万家预制菜相关企业。预制菜的市场规模也在逐年上涨, 仅2022年市场规模就达到4 151.5亿元。对标日本成熟的预制菜体系, 其预制菜市场份额占比为60%, 而我国预制菜的市场份额占比仅有20%左右<sup>[12]</sup>。未来可预见, 预制菜有潜力成为下一个万亿级市场。

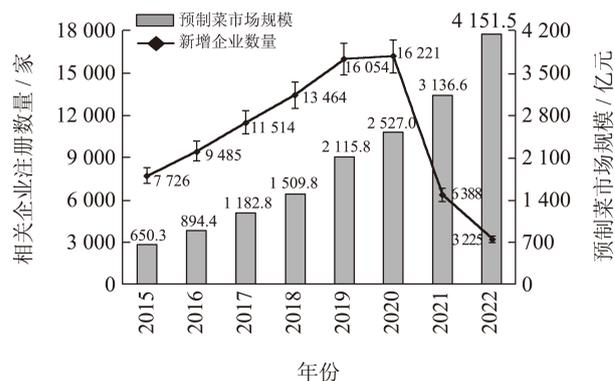


图1 我国预制菜的发展趋势

Fig.1 The development trend of pre-prepared food in China

注: 数据来源于国家统计局、中商产业研究院、NCBD等。

### 1.1 预制菜的属性

预制菜一般是指将各种食材配以辅料加工制作成成品或半成品, 经简易处理即可食用的便捷风味菜品。按加工程度及烹制要求(即食、复热和烹煮等)预制菜可划分为即食、即热、即烹和即配这四大类。即食预制菜是指开袋即可食用的产品, 如罐头、肉干等; 即热预制菜指需加热后再食用的产品, 如自热火锅、快餐料理包等熟食; 即烹预制菜指将调料与主料进行混合后的菜品, 如腌制牛排、冷冻牛排等非即食生制品; 即配预制菜是指分装好的净菜、净肉, 如肉丝、肉片和炒菜组合包等初加工制品。

社会生活节奏不断加快, 使得年轻消费群体的

餐食模式愈发追求便利化、快捷化。预制菜所代表的新餐饮模式的兴起<sup>[13-15]</sup>适应了新时代的新消费需求,具有积极的社会意义。从食品属性来看<sup>[16]</sup>,预制菜是最接近终端食品的一类食品。它推动将初级农产品转化为标准化、工业化的食品,助力农业产业升级,是推动农业高质量发展、实现乡村振兴的有利抓手。此外,我国食品工业体系逐渐完善。在预制菜的B端市场,中央厨房(OEM代工厂)模式和外卖餐饮模式克服了传统餐饮的租金高、人工成本高、食材成本高和利润低等问题,经济效益显著。

## 1.2 预制菜与冷链供应链的关系

### 1.2.1 传统农产品的冷链困局

电商背景下,人们对品质化、差异化和品牌化的生鲜冷链需求快速增长。新冠疫情、非洲猪瘟等禁运政策也进一步刺激了国内市场对冷链的需要。然而,我国是典型的大国小农,绝大多数农户的种植规模都在50亩以下。国内农产品供应链还处于发展的初级阶段,在大规模、远距离的流通体系下造就了我国传统农产品“流通难”的困窘局面。生鲜农产品在流通过程中会挥发出敏感性气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 等),导致冷链中存在空间上的不兼容性<sup>[17]</sup>。农产品多样性也对冷链的预冷、包装、仓储和运输等环节作业有着不同的标准和要求。此外,我国冷链资源在时空上分布不均,一方面是由于我国农业的结构分散,农产品有着很强的地域性和季节性特征,导致冷链资源呈现出时间上的分布不均,表现为“淡季闲置、旺季紧缺”的周期性现象;另一方面是由于我国冷链企业和配套设施大多集中在沿海地带和一线城市,然而生鲜农产品的交易市场大多集中在中西部地区,使得冷链资源呈现出“东多西少”的空间分布不均。

### 1.2.2 预制菜提升冷链供应链的利用效率

在食品供应链的生命评估中<sup>[18]</sup>,新鲜农产品的远距离运输受限于其损耗。食品工厂将农产品制成半成品或成品的预制菜,可确保食品供应链在生产方面获得更高的灵活性,使得整个食品供应链在全年保持在较高的利用水平。农产品在制成标准化的预制菜产品后,不仅提升了农产品的经济效益,还有助于提升冷链的运作效率,帮助冷链供应链实现降本增效。预制菜的恒温、冷冻和冷藏包装,一方面节省仓储运输的空间,提高单位空间的利用率,降低冷链运作的能耗;另一方面,规整的包装也更利于成批打包、叉车装卸搬运和仓储运输,如纸箱

打包、托盘作业和集装箱托运等,逐步规范冷链的管理和作业。此外,预制菜商品便于进行SKU管理及产品的运输监控和追踪溯源,更加符合我国现有的冷链运作体系。

## 2 预制菜冷链供应链中存在的问题

预制菜冷链供应链是将农产品从田间送到车间,再将预制菜从工厂送至消费者手中,最终完成交付的一整套“无断链”的冷链保障体系,包含产地预冷、仓储、运输配送和销售等环节,涵盖食品质量安全、智能设备、智慧冷链及政策标准等诸多领域<sup>[19,20]</sup>。预制菜冷链供应链的“无断链”是要求所有环节都处在所必需的低温环境,也是目前降低损耗的最有效方式之一。

### 2.1 冷链的“断链”分析

食品的腐损是“不可逆的”,一旦出现腐损其价值将会大大折扣甚至完全丧失。根据预制菜冷链的作业顺序,可依次划分为:产地预冷环节、仓储环节、运输和配送环节及零售环节。如表1所示,其中产地预冷环节是最容易忽视的,也是最难以解决的环节之一。此外,预制菜在流通过程中还容易受到来自站点、关口和检验检疫等不确定和不稳定因素的影响,进一步增加了腐损的风险。

### 2.2 产地预冷缺乏

当前,70%以上的农业生产主体仍未参与产地预冷环节,农户的冷链意识水平普遍不高。农村看似远离城市、远离消费者,实则与预制菜冷链供应链密切相关。产地预冷是在源头上保障预制菜的食品质量安全,也关系到后续冷链各环节的开展及管理。农村地区缺乏产地预冷,主要体现在以下两个方面:一方面是农村地区的冷链发展相对滞后,冷链基础配套设施的建设成本高、冷链设施的利用率低,普遍存在信息化水平不高、劳动力不足及监管体系混乱等问题;另一方面是农村地区的市场要素不完备,农户几乎不参与农产品的流通,产地预冷的实施难度大。农户群体的组织程度较低,缺乏行业协会等组织,且在交易中长期处于弱势地位、缺乏议价能力,微薄的利润更难以支付高昂的冷链费用。政府部门相继出台了冷链的相关改革措施和办法,却未能从根本上解决关键性问题,导致“产地冷链薄弱——加大政策扶持——农户仍未采用冷链——产地更弱”的恶性循环。

表 1 “断链”环节分析  
Table 1 Analysis of the “broken” in the cold chain

“断链”发生的环节	“断链”的现状	原因/表现
产地预冷环节	农户冷链意识水平不高,且难以承担冷链费用	农村信息要素不流通,农产品利润率普遍偏低
	农户倾向于尽快出售农产品	农产品批量小,农户缺乏议价能力,为降低损耗风险往往尽快销往农贸批发市场
	农产品经历收购商和中间商的多层级流转	收购过程中大多不使用冷链,极大增加了产品的腐损风险、缩短了产品保质期
仓储环节	预冷的场景单一,错失最佳的预冷时间	大多采用冷库预冷,采收运送至冷库的途中容易出现腐损
	冷库的管理水平不高	企业错峰用电,仓储的装卸、搬运等的操作不规范
	冷库无法满足多样化、精细化的作业需求	传统的恒温、冷冻和冷藏仓库忽视了流通加工等功能的设计
运输和配送环节	冷链的运输及转运效率低下,运输操作存在一定的乱象	缺乏冷链技术和信息技术,普遍存在返程车辆空驶、车辆混用等情况
	冷链的运输监控和追踪溯源难度大	缺少配套的运输监控和追踪溯源体系
	缺乏有关部门的监督管理	食品安全质量检查、冷链承运资格审查、车辆是否合规等
销售环节	销售地区缺乏冷链中转基地	中心城区缺少大型的中转冷库及相应的配套设施
	销售卖场的制冷设备不足	卖场缺少冰箱、冰柜和冷柜等制冷设备
	顾客频繁存取打破了“恒温”环境,产品损耗率高且难以发现食品内部的腐损	缺少智能设备,不支持温度的实时监控和警报,以及设备制冷功率的智能调节

产地预冷的工序繁杂,新鲜收获的农产品在预冷过程中需根据产品的特性对其进行修整和分级。预冷前的修整和分级,是将农作物采收后的残枝败叶、泥土等杂质去除,减少大量有害微生物的同时剔除机械伤、病虫害和外观畸形等不符合要求的产品。预冷后的修整和分级,是将产品原料中的非食用部分去除(如根茎类菜的地上叶部分、鱼内脏等),提高商品地价值、降低贮藏和运输中的损耗。预制菜容易发生变质,在现有的技术条件下,冷冻冷藏是性价比最高的食品保质手段。当前主流的预冷方式有:冷水预冷(接近0℃)、包装/接触加冰预冷、强制通风预冷(压差预冷)、真空预冷和冷库预冷。在冷冻冷藏的过程中,细胞中的水份会形成冰晶,导致营养流失、口感变差,甚至影响产品的外观品相;长时间的冷冻冷藏还会出现重结晶,小冰晶聚集和融合形成大冰晶(晶体尺寸增加、晶核数减少),晶体由光滑变得锐利。因此,食材预冷大多采用速冻的方式来缩短冻结时间,减少细胞液的流失,保证食品的品质和新鲜度。

### 2.3 冷链配送损耗

国内冷链配送的“最后一公里”存在“断链”、“脱冷”现象。从宏观层面来看,由于物流行业各自为政,交管局、城市规划、城管执法单位的权责

不统一,在运输车辆和配送管理上容易发生争执。例如,城市通过设置车辆通行证来控制大型车辆进入城区,这也限制了冷链派送车辆的行驶范围和停靠区域。从运作层面来看,冷链配送的时效要求高,但冷链的配送设备不足、城市道路拥堵等问题凸显,容易导致配送环节出现货损。冷链配送完成后,预制菜的解冻需有计划地进行,反复的冷冻和解冻不仅会造成营养物质的流失、卖相品质的劣化,还容易滋生细菌影响食品安全。冷藏解冻是将冷冻产品转移至冷藏环境,静待解冻,是肉类常见的解冻方法;冷水解冻适用于产品急用时的解冻,流水解冻的效果最佳;微波解冻则是用电磁微波进行加热解冻,解冻的时间较短,但容易出现局部过热和内部解冻效果不佳的现象(外部表面已经出现过热,而内部中心仍未解冻)。

冷冻和解冻过程中的蛋白质、脂肪等会有不同程度的损耗,中式菜肴更注重蒸、烧、炒、炖等复杂的烹调工艺,进一步加剧了营养物质的流失。因此,在预制菜加工过程中,生产商额外添加营养物质以弥补菜肴营养物质的流失,并使用微波辅助加热、超高压热处理等技术以减少风味和香气的损耗。在预制菜上架销售时,厂商要严格控制好收货、储存、搬运和销售等各环节的损耗,在收货过程中,按质量标准进行验货和签收;在储存过程中,避免

出现损坏破包,减少交叉感染和串味;在搬运过程中,减少出现磨损和划伤,注意轻拿轻放、防压防碰;在销售过程中,把控好销售时的损耗,如顾客的挑选损耗(剩下小的、品相不好的),商品的正常损耗(腐烂变质),以及摆放不当的损耗(挤压变形、磕碰)。

## 2.4 信息要素不流通

传统食品供应链的信息要素不流通,各环节主体间存在严重的信息不对称现象,进而引发市场的“柠檬效应”(由于信息的不对称,难以分辨商品的好坏,低劣产品充斥市场,高质产品被驱逐出市场),间接导致下游经销商无法区分上游生产者(农户)的产品质量。农产品的产、供、销各节点的信息要素不流通,导致农产品出现供给和需求的不平衡,进而引发“农民卖难、市民买贵”的现象。小农决策是基于风险厌恶的短期决策,为避免市场价格变动、降低损耗风险,农户倾向于尽快出手,将农产品销往品质不敏感的批发市场,结果被动接受远低于市场价格的收购价。中间商和收购商在农产品的收购中垄断了农产品收购的定价权、赚取高额差价,却难以支撑国内大规模、远距离的冷链运输。最终,中间商们在抬高农产品售价的同时,还造成了大批量的农产品腐损。在农产品的生产种植过程中,农户接收不到来自消费端的数据反馈,难以打破“种少了不够卖,种多了又容易滞销”的困境。此外,国内农产品市场还面临来自国际市场的外部冲击,进一步缩减国内农户的获益空间。食品供应链中存在的信息不公开、交易不透明,变相导致各环节参与主体过分注重自身的利益<sup>[21]</sup>,割裂地将自己看作任务执行的个体,进而忽视供应链整体的利益,最终未能形成食品供应链的利益共同体。

## 3 数字赋能预制菜冷链供应链

预制菜将迎来数字化转型发展和产业升级,这与冷链供应链的标准化、规模化的发展目标相一致。借鉴国外的冷链体系的建设经验,预制菜冷链供应链可由政府、农业主体及相关企业共同建设。预制菜冷链供应链融合现代化的数字技术,搭建预制菜的数字化冷链追踪溯源系统,打通从“田间地头”到“百姓餐桌”的冷链通道,加速农村地区信息要素的流通;实施数字驱动的供应链、数字链、信任

链和利益链的“链条化”发展,提高农户参与产地预冷的积极性。

### 3.1 数字孪生的概念

数字孪生(Digital Twin)也被称为数字映射、数字镜像,它是某一对象或系统的整个生命周期的虚拟表示,孪生体根据物理实体实时反馈的信息和数据进行监控、仿真分析和计算,在虚拟空间内完成对物理实体的映射。数字孪生模型大致可分为三类:第一类是统计模型,属于典型的数字分析模型,通过计算产品内外部的损耗来对照实验数据并进行模型校准;第二类是数据驱动模型,利用VR等技术进行模型的开发、校准、验证和确认;第三类是物理模型,也被称为机械模型,大多依赖产品的CAD几何形状、材料特性及初始物理模型确定边界条件,模拟相关的物理、化学和微生物等反应过程。

数字孪生集成了传感器数据、人工智能、机器学习等技术,建立了一个实时更新的、真实准确的模型,可用以支撑对产品生命周期中进行各项活动的决策。它可捕获和识别产品的细节变化,有助于应对复杂多变的食品冷链供应链;通过场景模拟和算法训练将虚拟模型与现实数据进行对照演算,界定和量化产品的质量损失,可实现数据驱动的预防性作业。由于数字孪生模型是通过分析大量的数据来模拟食品内、外部的质量变化,并揭示冷链运作过程中最相关的反应过程和关键耦合<sup>[22]</sup>,因此数字孪生模型对数据透明性和广泛性有着很高的要求<sup>[23-25]</sup>。

### 3.2 数字化冷链追踪溯源系统

随着物联网和区块链在冷链中的广泛应用,RFID标签强化了冷链的运输监控和数据采集能力(如产品批号、仓库、车辆、温湿度及各环节作业的节点信息),通过摄像头、WSN传感器和RFID阅读器等设备,实时传输Internet的云端数据库。如图2所示,收集的数据交由数字孪生模型进行解析、演算和模拟预测,可识别预制菜在冷链运输过程中的内外部环境因素,诊断腐损发生的源头,如磕碰、温湿度、光照、微生物反应等容易忽视的细节<sup>[26]</sup>。基于数字技术搭建的可追溯系统,各环节参与者共享预制菜的冷链状态和信息,包括产品的动态监控、追踪定位、库存管理和车辆调度,以及传达供应链不同层级间的指令和协调运作。

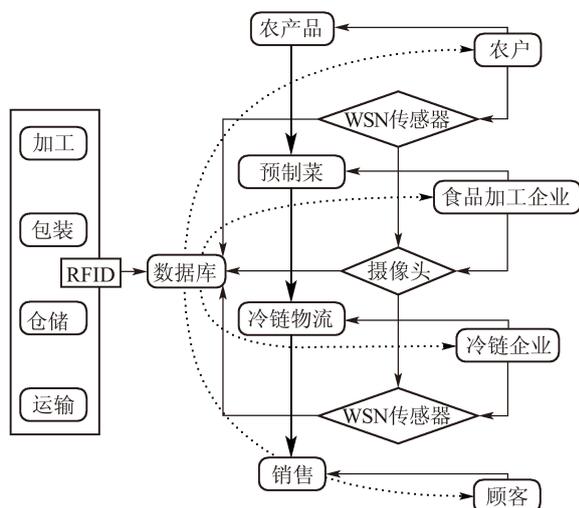


图2 数字化冷链追踪溯源系统  
Fig.2 Digital cold chain traceability system

数字化的可追踪溯源系统，不仅有助于解决交易不透明和信息不公开的问题，还能帮助解决追踪溯源的信息数据的透明化和可视化等难题，助力构建“农产品-食品工厂-消费市场”的预制菜冷链供应链的运作体系。预制菜的数字化冷链追踪溯源系统，打通了供应链各环节参与者的信息通道，促进各环节信息要素的流通，加速预制菜与冷链供应链的深度融合。在产地遇冷环节，供应商从技术层面把控食材原料，按品质进行分级处理，迅速开展预冷作业，打包分装后短驳迅速发往冷库或食品工厂；在仓储环节，标准化的预制菜产品更适配于国内现有的冷冻、冷藏等设施，利用物联网技术搭建智能化的仓储管理系统，减少企业错峰用电、冷链操作不规范等乱象；在运输和配送环节，数字孪生等数字技术帮助提升冷链的信息化水平，大幅提升冷链各环节之间的转运效率；在销售环节，RFID标签连接读卡设备，实时监控卖场制冷设备的温度变化，动态联网智能调节设备的制冷功率，快速恢复顾客存取后的温度波动、减少产品损耗。冷链作业的信息数据记录存储于数据库中，便于有关部门开展冷链承运商的资格审查、车辆是否合规及预制菜的安全质量检查等。

### 3.3 预制菜冷链供应链的“链条化”

为缓解冷链配套设施的压力，配合国内现有的冷链运作体系，预制菜冷链供应链结合数字孪生等技术，实施供应链、数字链、信任链和利益链的“链条化”发展。如图3所示，预制菜产业链充分衔接冷链供应链的各环节，打造农户、供应商和顾客的

利益共同体。

(1) 供应链。数字化的预制菜冷链供应链是一个涵盖产地预冷、仓储、运输和配送及销售的一整套体系，借助数字孪生等技术可实现供给端和需求端的模块化匹配，使得同一职能内部所有业务相互协调，保持供应链的整体最优。数字孪生模型助力预制菜冷链供应链的结构升级，优化冷链的运作，为供应链方案提供相应指标，如冷链绩效、供应链响应速度等。数字孪生模型还可以帮助冷链设施的选址建设，充分考虑建设成本、劳动力要素、税收等，权衡是否靠近消费者及其它配套设施，实现预制菜产业的集群化建设、冷链配套建设和运输线路规划等。

(2) 数字链。预制菜冷链供应链的产、供、销的全链条数字化，数字孪生模型将基于历史数据、市场销售及竞争等因素，对电子商务运作进行模拟；在阈值范围内的预测市场的供需变化，灵活把控预制菜的产能结构和供应计划；以预测为基准制定平衡响应性和效率的预制菜运作方案，开展预制菜的产品营销等。数字孪生模型结合物联网等技术，正、逆向传递冷链供应链的节点信息和数据，方便顾客及时查询预制菜的运输状态，确保顾客能够在正确的时间、正确的地点获取所需的产品。数字孪生模型还能对市场销售数据进行解析，将数据信息反馈至预制菜的供应终端，反哺作用于农户的种植以及食品工厂的加工生产。

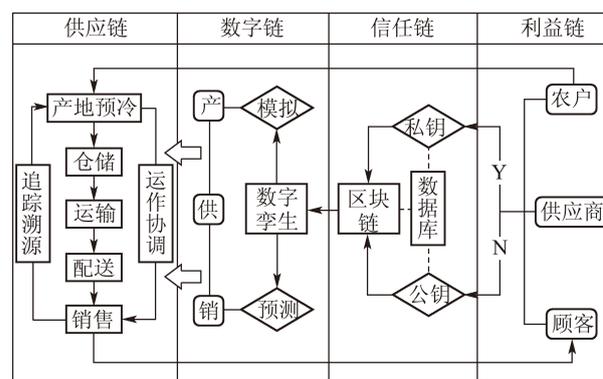


图3 预制菜冷链供应链的“链条化”  
Fig.3 The “chaining” of the cold chain supply chain for pre-prepared food

(3) 信任链。预制菜冷链供应链的交易主体间通过智能合约进行交易，交易的信息按时间排列存储在区块链的分布式数据库中，区块链成员通过身份验证访问数据网络，私钥可以进行交易（向区块链添加信息）。分布式数据库中存储的信息不能被篡改和删除，既

保障交易数据的信息安全性，还有效降低食品的欺诈风险。数字孪生模型配合区块链，可实现产品的运输监控和追踪溯源，极大提高预制菜冷链供应链的透明性和可追溯性；让更多的供应链主体愿意参与冷链供应链，提升农户参与产地预冷的积极性；订单的可视性也进一步增强顾客的购买信心。

(4) 利益链。预制菜冷链供应链的发展对于预制菜的各行业、各环节主体都有重大意义。从农户的角度来看，预制菜带动相关产业的标准化和规模化发展，减少农产品的损耗，帮助农户赚取更多的利润；极大地提升农户的市场参与度，开始积攒农产品的口碑。从供应商的角度来看，区块链技术从源头上消除假冒伪劣产品，数字孪生技术保障预制菜冷链供应链的运作效率，形成涵盖管理规划、模拟预测、监控警报和追踪溯源的一整套的冷链运作体系。从顾客的角度来看，顾客享受到更实惠、更便捷、更有品质的预制菜产品，在无需支付额外费用的条件下可对预制菜进行产品认证和追踪溯源。顾客扫描预制菜包装上的二维码，即可一键获取产品信息，包括但不限于产地、原料、食品工艺、食用方法和烹煮建议，以及生产日期和保质期等信息。

### 3.4 数字孪生赋能预制菜冷链供应链的发展

3.0 时代的数字化餐饮是“中央厨房+智能烹饪设备+预制菜”，数字孪生赋能预制菜加速一、二、三产业的供应链融合，逐步转向以客群需求为中心的精细化经营模式和数字化管理体系。数字孪生的核心是要建立虚拟数字孪生体，利用数字模型、传感器更新、运行历史等数据反映预制菜全生命周期过程，对孪生体进行仿真、控制、预测来反哺预制菜的生产运营管理。数字孪生赋能预制菜冷链供应链的最终目的是要实现数字化落地应用，加快预制菜冷链供应链的数字化进程，提供更安全、更可靠且更透明的数字服务和决策支持、优化冷链的运作方案。从原始食材到食品工业化量产的冷链供应链体系，北京优诺科技股份有限公司提供一站式数字孪生可视化管理平台和智慧解决方案。优诺科技推出的低代码、零代码数字孪生开发平台带来多元化、轻量化的数字孪生场景搭建和可视化应用开发，具有良好的开发性和扩展性；数字孪生智慧农业管理平台集成物联网、大数据等实现对农业现场气象、土壤、水源、养殖产品的统一监测和管理，1:1 还原赋能农业供应链的数字化变革；智慧工厂数字孪生 IOC 平台基于 3D 场景模拟工艺流水状态发现生产线中的隐含问

题，支持调节特定的流程参数模拟仿真工艺的变化，辅助进行一系列的生产管理和运营决策。

数字孪生赋能预制菜冷链供应链的可视化发展，下一阶段是推进预制菜在冷链流通加工中的模拟预测。在产品研发阶段，数字孪生通过虚拟孪生体进行仿真调试加快预制菜的新品研发，缩短开发周期、降低成本试错；在生产管理阶段，数字孪生结合物联网技术、仿真技术，动态监测预制菜的生产情况；在运营决策阶段，数字技术提供预制菜的大数据云平台 and 数字管理系统，支持轻量化、可视化大数据看板，动态解析供应链数据、监测仓储物流周转、协调生产排期和效率。依托数字孪生搭建的预制菜冷链供应链体系，可从技术层面把控食材品质，全程监控预制菜加工、仓储、冷链等环境数据；对预制菜进行模拟仿真与预测评估，发现冷链供应链环节中产品质量损失及诱发食品变质的潜在风险，实施数据驱动的预防作业；数据的留存便于开展预制菜的追踪溯源，推动预制菜产业向着稳定、规范、有序的绿色可持续方向发展。例如，在追踪进出口产品的冷链运输中<sup>[27]</sup>，通过数据监测验证时间-温度的质量模型，成功将数据集转化为可操作性指标，提升了冷链运输的整体效率；在下游迟付款及上游部分预付款的供应关系中<sup>[28]</sup>，通过构建食品生产商的单位时间利润、需求与损耗的孪生模型，大幅提升了食品供应商的生产效益，减少食材原料的损耗。

## 4 总结与展望

我国预制菜产业处于初级发展阶段，在食品安全和流通技术等诸多方面还存在一定问题，亟须加快发挥数字技术在预制菜冷链供应链中的创新驱动作用，逐步实现数字驱动的融合发展。“无断链”对预制菜冷链供应链至关重要，关系广大人民的食物质量安全，也是提升产业经济效益的重要保障。本文提出借助数字孪生等技术搭建预制菜的数字化冷链追踪溯源系统，实现产品的运输监控和追踪溯源，让更多的农业主体愿意参与产地预冷，促进供应链各环节的信息要素流通；实施预制菜与冷链的供应链、数字链、信任链、利益链的结合发展，打造农户、供应商和顾客的利益共同体。政府有关部门可牵头行业协会组织，构建预制菜的生产许可和食品安全认证体系，全面落实预制菜的食物安全管理责任，逐步规范食品企业的加工工艺和加工

流程,如食品有害物质检测和微生物检测等;企业需加强供应链系统的信息安全建设,减少网络安全隐患和供应链遭受攻击后因传递造成的大规模破坏,做好网络安全防范工作,如源代码安全监测、软件开发后的完整性测试及网络渠道和安全监测等。

### 参考文献

- [1] 谢蕊蕊.我国生鲜农产品冷链物流“最先一公里”发展探讨[J].商业经济研究,2022,2:114-117.
- [2] KAYIKCI Y, SUBRAMANIAN N, DORA M, et al. Food supply chain in the era of industry 4.0: blockchain technology implementation opportunities and impediments from the perspective of people, process, performance, and technology [J]. *Production Planning & Control*, 2020, 33(2-3): 301-321.
- [3] 黄红星,刘晓珂,林伟君.基于全产业链视角的粤港澳大湾区农产品冷链物流业发展分析[J].广东农业科学,2023, 50(1):90-100.
- [4] 贾艳艳.预制菜现状、质量与安全展望研究[J].中国食品工业,2022,355(17):54-57.
- [5] KRUPITZER C, NOACK T. Digi Food Twin: digital biophysical twins combined with machine learning for optimizing food processing [J]. *Engineering Proceedings*, 19(1): 42.
- [6] BURGOS D, IVANOV D. Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: a digital twin-based impact analysis and improvement directions [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 152: 102412.
- [7] DEFRAEYE T, TAGLIAVINI G, WU W, et al. Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149: 778-794.
- [8] SHRIVASTAVA C, SCHUDEL S, SHOJI K, et al. Digital twins for selecting the optimal ventilated strawberry packaging based on the unique hydrothermal conditions of a shipment from farm to retailer [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 199: 112283.
- [9] KANNAPINN M, PHAM M K, SCHAFER M. Physics-based digital twins for autonomous thermal food processing: efficient, non-intrusive reduced-order modeling [J]. *Computational Engineering, Finance, and Science (cs. CE)*, 2022, 81: 103143.
- [10] NGET S, MITH H, BOUE G, et al. The development of a digital twin to improve the quality and safety issues of cambodian pate: the application of 915 MHz microwave cooking [J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1187.
- [11] VRAT P, GUPTA R, BHATNAGAR A, et al. Literature review analytics (LRA) on sustainable cold-chain for perishable food products: research trends and future directions [J]. *Opsearch*, 2018, 55(3-4): 601-627.
- [12] 柴容,王艳.预制菜:餐桌上的千亿新战场[J].中国食品工业,2021,316(1):105-113.
- [13] 黄燕燕,梁艳彤,陆云慧,等.水产品预制菜行业发展现状[J].现代食品科技,2023,39(2):81-87.
- [14] 王娟,高群玉,娄文勇.我国预制菜行业的发展现状及趋势[J].现代食品科技,2023,39(2):99-103.
- [15] 赵超凡,陈树俊,李文兵,等.预制菜产业发展问题分析[J].现代食品科技,2023,39(2):104-109.
- [16] 赵福振,杨格,杨铭铎,等.发展预制菜产业的意义与前景——基于预制菜的食品属性[J].中国调味品,2022, 47(10):215-220.
- [17] BHATNAGAR A, VRAT P, SHANKAR R. Multi-criteria clustering analytics for agro-based perishables in cold-chain [J]. *Journal of Advances in Management Research*, 2019, 16(4): 563-593.
- [18] BOENZI F, DIGIESI S, FACCHINI F, et al. Life cycle assessment in the agri-food supply chain: fresh versus semi-finished based production process [J]. *Sustainability*, 2022, 14(20): 13010.
- [19] 张德权,刘欢,孙祥祥,等.预制菜肴工业化加工技术现状与趋势分析[J].中国食品学报,2022,22(10):39-47.
- [20] LOISEL J, DURET S, CORNUÉJOLS A, et al. Cold chain break detection and analysis: can machine learning help? [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112: 391-399.
- [21] GHADGE A, KARAME, MOGALE D G, et al. Sustainability implementation challenges in food supply chains: a case of UK artisan cheese producers [J]. *Production Planning & Control*, 2020, 32(14): 1191-1206.
- [22] ONWUDE D I, CHEN G, EKE-EMEZIE N, et al. Recent advances in reducing food losses in the supply chain of fresh agricultural produce [J]. *Processes*, 2020, 8(11): 1431.
- [23] FENG H, WANG X, DUAN Y, et al. Applying blockchain technology to improve agri-food traceability: a review of development methods, benefits and challenges [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 121031.
- [24] TANWAR S, PARMAR A, KUMARI A, et al. Blockchain adoption to secure the food industry: opportunities and challenges [J]. *Sustainability*, 2022, 14(12): 7036.
- [25] BHAT S A, HUANG N-F, SOFI I B, et al. Agriculture-food supply chain management based on blockchain and IoT: a narrative on enterprise blockchain interoperability [J]. *Agriculture*, 2021, 12(1): 40.
- [26] GOEDHALS-GERBER L L, KHUMALO G. Identifying temperature breaks in the export cold chain of navel oranges: a western cape case [J]. *Food Control*, 2020, 110: 107013.
- [27] SHOJI K, SCHUDEL S, ONWUDE D, et al. Mapping the postharvest life of imported fruits from packhouse to retail stores using physics-based digital twins[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 176: 105914.
- [28] GHOSH P K, MANNA A K, DEY J K, et al. A deteriorating food preservation supply chain model with downstream delayed payment and upstream partial prepayment [J]. *Rairo - Operations Research*, 2022, 56(1): 331-348.