

增强 HACCP 计划的可信可视溯源应用研究

葛 艳^{1,2} 郑珂亦¹ 邹一波^{1,2} 陈 明^{1,2} 王文娟^{1,2}

(1.上海海洋大学信息学院,上海 201306; 2.农业农村部渔业信息重点实验室,上海 201306)

摘要:为提升水产品危害分析及关键控制点(Hazard analysis and critical control points,HACCP)体系国家标准在保障质量溯源方面的数据可信、可读,以国家标准中的巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划为例,结合语义建模和区块链技术,提出了巴氏杀菌蟹肉增强 HACCP 计划可信可视溯源模型(Enhanced HACCP credibility and visualization traceability model,EHCVTM)。该模型结合国家标准对巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划进行语义理解,构建巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划质量安全数据体系(HACCP quality and safety data system,HQSDS)并设计知识表示。为所得的增强 HACCP 计划的执行数据设计合理的数据存储结构、智能合约,实现“有风险上链,无风险自治”、“高风险直接上链,低风险加密上链”的数据分级存储管理模式。然后借助图数据库实现不同需求的可视化展示。最终实现了基于 EHCVTM 的 HACCP 质量溯源应用原型并进行测试。结果表明,基于此模型的应用保障了质量溯源风险数据的可信度,提高了数据反馈时的可读性,增强了质量溯源平台预警能力,使企业内部完成精细化监控,企业外部多方监督,质量安全风险公开,安全责任定位精确。且基于区块链的系统吞吐量达到 300 笔/s,可基本满足溯源系统的业务需求。该研究为基于 HACCP 国家标准的水产品质量安全风险监控可信可视溯源提供了新思路。

关键词:危害分析及关键控制点;溯源;安全风险分级;区块链;可视化

中图分类号:TS207.7;TP309 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2023)11-0385-12 **OSID:** 

Enhanced HACCP Credibility and Visualization Traceability Model

GE Yan^{1,2} ZHENG Keyi¹ ZOU Yibo^{1,2} CHEN Ming^{1,2} WANG Wenjuan^{1,2}

(1. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. Key Laboratory of Fisheries Information, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: To improve the data credibility and readability of the hazard analysis and critical control points (HACCP) national standard for aquatic products in terms of quality traceability, the enhanced HACCP credibility and visualization traceability model (EHCVTM) was proposed by using the example of the pasteurized crabmeat HACCP plan in the national standard. By combining semantic modeling and blockchain technology, the model comprehended the pasteurized crabmeat HACCP plan according to the national standard, a HACCP quality and safety data system (HQSDS) was established for the plan, and the knowledge representation was designed. A reasonable data storage structure and smart contracts for the generated enhanced HACCP plan was further devised, achieving a data classification storage mode of “risky data on-chain, risk-free data autonomous” and “high-risk data directly on-chain, low-risk data encrypted on-chain”. Then different visualization displays were implemented by using a graph database to meet various needs. The application prototype based on EHCVTM for HACCP traceability was tested and proven successfully. The results demonstrated that this model ensured the credibility of risk data in traceability, improved data readability during feedback, strengthened the platform’s warning capability, and enabled internal monitoring for enterprises, externally multi-party supervision, public risk disclosure for quality safety, and precise positioning of safety responsibility. Moreover, the blockchain-based system achieved a throughput of 300 transactions per second, which effectively met the traceability system’s business requirements. The research result can provide a perspective for credible and visual traceability of aquatic products quality and safety risk monitoring based on the HACCP national standard.

Key words: hazard analysis and critical control points; traceability; security risk classification; blockchain; visualization

收稿日期:2023-08-02 修回日期:2023-09-07

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2021B0202070001)

作者简介:葛艳(1974—),女,副教授,博士,主要从事质量安全风险评估、溯源和农业信息化研究,E-mail: yge@shou.edu.cn

通信作者:陈明(1966—),男,教授,博士,主要从事农业溯源、农业信息技术和食品冷链物流智能化技术研究,E-mail: mchen@shou.edu.cn

0 引言

食品安全一直是颇受关注的课题^[1]。水产品因其独特的口感和较高的营养价值而受到人们的喜爱。但水产品保质期短、易腐败变质等特点使其在运输、加工和销售等过程中容易出现质量安全风险,致病菌在虾类和蟹类中也均有一定的检出率,这些微生物的存在意味着食品安全风险的存在^[2]。因此保障水产品质量安全具有重要意义^[3-4]。

危害分析与关键控制点(HACCP)是一种侧重于预防的有效控制体系。它以科学和系统化为基础,确定特定危害及相应的控制措施,达到保障食品安全的目的^[5]。HACCP从20世纪80年代后期推广使用至今,已在食品加工领域有了大量的实施案例^[6-12],且在水产品生产加工过程中也广泛使用,具有一定的有效性^[13]。多位研究人员对实施HACCP计划的需求和效益进行了研究和探讨^[14-17],也有学者将HACCP计划与水产品溯源相结合,并将物联网、知识建模等技术融入其中,进行基于HACCP的可追溯系统创新研究^[18-20]。

现如今,我国国家标准化管理委员会早已发布了水产品HACCP计划国家标准GB/T 19838—2005《水产品危害分析与关键控制点(HACCP)体系及其应用指南》^[21]。牟向伟等^[22]通过知识语义建模与知识推理,建立统一的知识表示和推理规则,以增强HACCP知识的共享和重用,并对国家标准中提出的生食牡蛎HACCP计划进行试验,证实有效。邹一波等^[23]针对国标中的生食牡蛎HACCP计划进行了本体语义建模研究,构建了基于生食牡蛎加工HACCP计划的语义基础模型,可以完整地表述生食牡蛎HACCP计划覆盖的知识。葛艳等^[24]结合HACCP质量体系和区块链溯源,针对国标中的生食牡蛎HACCP计划使用智能合约实现各关键控制点质量好坏的自动判断,增强溯源数据的可信度。

作为提升数据可信的区块链技术多个行业领域中都得到广泛应用^[25],在食品行业也不例外^[26]。张新等^[27]基于区块链智能合约,为稻米供应链构建了专属于其信息流转特性的动态模型并将其合约化,实现了稻米供应链复杂数据的动态监管和人员行为的可信监督。景旭等^[28]结合生产实践中的合同交易过程,提出了一种针对猕猴桃全产业链质量溯源的跨组织链上合同交易机制,解决了产业链由不同组织构成的溯源数据不连续问题。李修华等^[29]专注于农产品溯源系统中的隐私泄漏问题和区块链中的加密策略的创新研究,构建了面向小麦区块链追溯系统的分级监管模型。李佳利等^[30]围绕融合

了HACCP体系的农产品区块链追溯系统,改进并实现了一套完整的面向上链前中后阶段的上链机制。

文献[27-29]有针对性地对不同农产品进行了数据监管不足、溯源数据不连续、隐私数据保护等问题的相关研究,但缺少基于HACCP质量控制体系的精细化、可信溯源研究。文献[30]虽然基于HACCP体系为优化上链存储和上链后的安全预警问题提出了新的改进方案,但其选择将未超过关键限值的合格数据进行上链,而本文认为风险即责任,溯源的重点应该是保证风险数据的可信,同时需要适当为企业内部风险数据提供隐私保护,还要使溯源结果对溯源的终端用户而言,从质量安全风险控制角度是可读的。

因此,本文从水产品HACCP计划国家标准的质量安全监管和溯源服务的视角出发,以巴氏杀菌蟹肉HACCP计划为例,思考如何对国标做深度理解,获取质量安全监管和溯源的核心数据信息。并针对企业内部预警、外部监管,不同层次的不同溯源需求提供分层、可信且可读的数据管理,为基于HACCP计划国家标准的水产品质量安全可信可视溯源提供一种更细致的分层管理思路。

1 增强 HACCP 计划的可信可视溯源模型构建

标准GB/T 19838—2005作为水产加工行业HACCP体系的建立、实施和保持的应用指南,对水产加工行业食品安全控制具有重要的意义。标准覆盖两部分,正文部分是HACCP体系指南的具体内容,附录提供两个HACCP计划示例。作为对水产加工行业食品安全控制具有指导意义的国家标准,也是水产品质量安全溯源的重要依据。

为了有效提取质量安全溯源的关键数据点,首先从质量安全监管以及溯源对质量数据需求的角度,在标准中做深度的数据理解,并结合附录中的巴氏杀菌蟹肉HACCP计划进行数据的筛选和重组。然后,针对其中质量安全数据定义不同的安全级别,针对不同安全级别的数据规划不同的应用场景,最大程度控制质量安全风险。同时,为不同安全级别的数据赋予不同的安全保护措施,确保质量安全数据的可信。最后,为了提高溯源数据的可读性,构建了溯源数据的分层可视化架构。完整的巴氏杀菌蟹肉增强HACCP计划可信可视溯源模型EHCVTM如图1所示。

模型由4层构成,自下而上分别为数据理解层、数据存储层、数据安全保护层和数据可视化层。

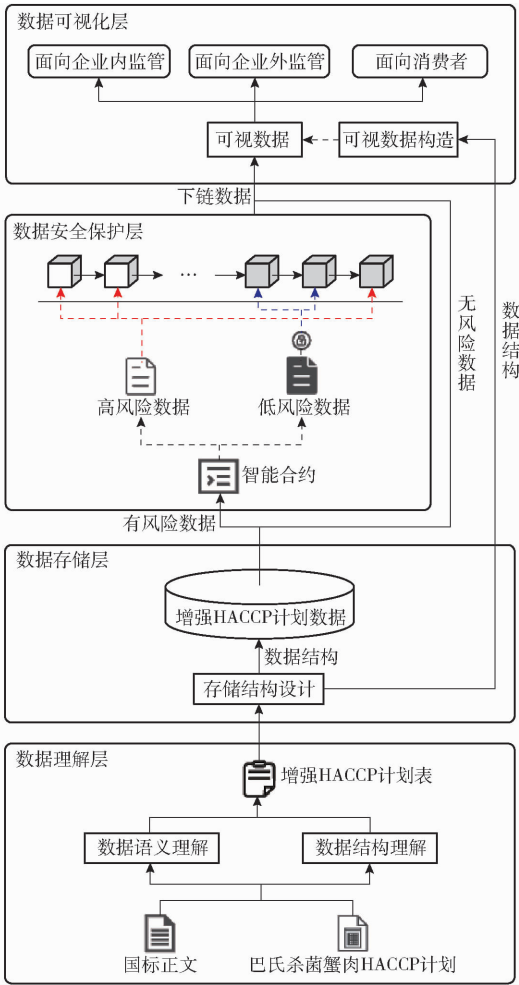


图 1 巴氏杀菌蟹肉增强 HACCP 计划可信可视溯源模型

Fig. 1 Enhanced HACCP credibility and visualization traceability model for pasteurized crabmeat

(1)数据理解层是模型的基础层。它负责结合标准中的正文对巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划进行解构与重组,使其转化为数据知识体系,即形成巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划质量安全数据体系 HQSDS;并设计知识表示。同时,由于对不同类别数据的要求不同,它将从整体层面指导数据存储结构的设计,辅助数据更合理地完成分类存储及最终的数据可视化展示,保障加工过程中的风险控制和责任定位。

(2)数据存储层是数据中心,主要负责基础监控数据的存储,并对有风险数据 and 无风险数据进行分流。

(3)数据安全保护层是保证有风险数据安全可信的关键层。它根据不同安全风险,定义数据的分类应用架构,负责风险数据的加密存储,方便企业内部及时调整策略,降低质量安全风险,也保证有风险数据的不可篡改性。

(4)数据可视化层是数据的具象化展示层。它在数据理解层的指导下,从数据分类存储层中读取数据并重构,借助图数据库以图谱的形式完成可视

化展示。其中,面向企业内用户的质量数据可视化展示帮助企业人员了解 HACCP 计划运行情况,及时做出调整以降低风险,同时对 HACCP 计划的修正起到反馈作用。面向企业外监管部门,可以追踪溯源有风险产品的完整高风险数据链条。面向消费者的质量安全认证展示帮助消费者知晓产品的质量安全风险状况。

2 关键技术

2.1 HACCP 计划的领域知识理解

国标以及附录的巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划示例表为基于巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划的质量保障可信可视溯源提供了应用指导,它所覆盖内容较全面,面向的用户也更丰富,针对于质量安全保障溯源系统而言,信息略显凌乱,有价值的数据分散在国标的各处,数据难成体系,不便有效利用。因此,聚焦国标正文 HACCP 体系建立、实施与保持方案,并分析巴氏杀菌蟹的 HACCP 计划示例,在最大限度保持原始计划表数据信息的同时,以巴氏杀菌蟹 HACCP 计划各个关键控制点的全程监控数据可记录、可获取、出现问题可准确定位、可追踪溯源为基本出发点,构建了如图 2 所示的增强巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划表。

增强巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划仍然主要覆盖 CCP 计划、监控计划、纠偏计划和验证计划。考虑到显著危害在计划执行监控中具有相对稳定性,不涉及监控内容,在增强 CCP 计划中予以删除。考虑到操作限值作为对日常监控以及预警管理有重要意义,加入到增强 HACCP 计划表中,编号为 3 +。CCP2 和 CCP3 涉及到温度操作限值分别定义为 MinT 和 MaxT,而具体数值由企业在实际执行过程中,根据企业风险管理能力自主决定。

从广义角度来说,CCP 计划的内涵不仅仅是确定关键控制点和设计限值,还包含监控、发现问题后采取纠偏行动以及后期进行验证操作等一系列行为。与操作限值列对应,为更早期地发现问题,增加警告列,编号为 5 +。它将在超过对应操作限值情况下做出友情提醒,可以进一步降低或避免出现超过关键限值情况的可能性。原始计划表中的记录计划由于已溶解在前述列中,因此将其删除。

在进行了上述知识内容上的理解后,对巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划表进行知识结构上的划分,将其分为 3 个维度。表格第 1 行作为结构的第 1 维度:行标题的定义、列标题。图 2 中(1)、(3)、(3 +)列抛去第 1 行后的部分为结构的第 2 维度,表示复合行标题,其中每一行对应一个关键控制点的基础

第1维度											
(1) CCP	(3) 各预防措施的关键限值	(3+) 操作限值	(4) 监控				(5) 纠偏行动	(5+) 警告	(6) 验证		
			什么	方法	频率	谁					
CCP1 包装/密封	罐的卷封要达到生产 厂商制定的规格要求		罐头卷缝	罐缝解剖 评估 肉眼检查 罐缝	封罐机开机(或 调整后开机) 时和加工中每 4h,各监测一罐 每隔0.5 h监测 一罐	品管	重新调整封罐机 扣留和评估前次 检查合格后 生产的产品		每天审查监控、纠偏记录		
CCP2 巴氏杀菌	对 401×301型罐,最 低水浴温度为 87℃, 时间为 120 min。 该加热达到F=31(参照 温度:85℃,Z=16)和 6D杀处理	实际最低水浴 温度为MinT	巴氏杀菌 的水浴温 度和时间	温度记录 仪	每批	品管	重新蒸煮、废弃 产品或扣留评估	发出警告信息 实施相应的 纠偏措施	每天审查监控、纠偏记录 杀菌有效性验证(存档) 每天用水银标准温度计 校准温度记录仪,每年 校准水银标准温度计		
CCP3 成品冷藏	冷藏库的最高温不 超过10℃	实际最高温不 超过MaxT	冷藏库的 温度	温度记录 仪和视觉 检查	操作过程中每 4 h检查一次	品管	基于暴露的时间 和温度对产品进 行扣留和评估 对冷藏库温进行 调整	发出警告 信息 实施相应的 纠偏措施	每天审查监控、纠偏 记录 每7 d用水银标准温度计 校准温度记录仪		

第2维度

第3维度

图 2 增强巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划表

Fig. 2 Enhanced HACCP plan for pasteurized crabmeat

描述。(4)、(5)、(5+)、(6)列抛去第1行后的部分为结构的第3维度,描述每个关键控制点采取的监控、纠偏、验证计划的执行要点。

2.2 数据分级安全存储模式设计

基于上述的增强巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划表开展质量安全风险监控,产生的监控数据根据风险大小定义为零级、一级、二级 3 个等级。

零级数据是对应于每一个关键控制点预防措施的操作限制以内的监控数据组。这组数据远离安全风险,这一级的数据基本不会对质量安全带来风险。一级数据是超出关键控制点预防措施的操作限值,但尚未达到关键限值的监控数据组,这一级的数据没有直接带来安全风险,但已经是企业内进一步降低质量安全风险的前期预警数据,也是企业内部监管的重点,是企业调整安全管理措施的重要依据。这部分数据无需共享给其他企业,是企业内部的共享数据。二级数据是指超出关键控制点预防措施的关键限值的监控数据组。这一级的数据是在 HACCP 计划中,最终可能产生质量安全风险的直接数据,也是监管和追溯溯源的重点,是企业间共享数据。其中,一级、二级数据统称为有风险数据。

为了杜绝风险数据的恶意篡改,引入区块链作为风险数据的存储方案。葛艳等^[24]选择将所有关键控制点的关键限值指标的定期观测数据和纠偏、验证数据均进行区块链存储。但区块链系统的高冗余存储特性带来了去中心化和安全性优势的同时,日益增长的数据量也会造成存储空间的浪费以及效率问题^[31]。因此,本文根据监控数据的分级特点,

制定优化安全管理和存储方案,如表 1 所示。

表 1 风险数据分级存储方案设计

Tab. 1 Risk data hierarchical storage scheme design

分级	数据特点	安全控制策略	存储方案
一级	≥ 操作限值 & < 关键限值	加密上链	区块链
二级	≥ 关键限值	直接上链	区块链

鉴于传统的关系型数据库在吞吐量及数据访问机制上存在的明显优势^[32],所有 HACCP 计划执行数据统一存储至关系型数据库,保障日常的业务监控和后台系统运作。针对有风险数据,为保证其不被篡改还同步使用区块链进行存储,保障产品的风险控制和责任定位,实现“有风险上链,无风险自治”的管理模式。针对上链数据,又根据高风险数据外部统一监管,低风险数据企业内部管理层自行监管的原则,保护企业隐私,设计了“高风险直接上链,低风险加密上链”的安全存储模式。

2.2.1 HACCP 计划执行数据存储结构设计

增强巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划的执行数据覆盖了经由危害分析确定的关键控制点(CCP)数据以及对应的监控、纠偏、警告和验证数据,CCP 数据又包括关键控制点预防措施的关键限值、操作限值数据等,如图 2 所示。针对这些数据,设计如图 3 所示的数据存储结构。

其中 haccp_plan 表是 HACCP 的前期规划表,用于存储 HACCP 执行计划的操作限值、关键限值以及各子计划的执行要点等前期计划内容。剩余表为 HACCP 计划执行数据表:3 张独立的 ccp_data 表

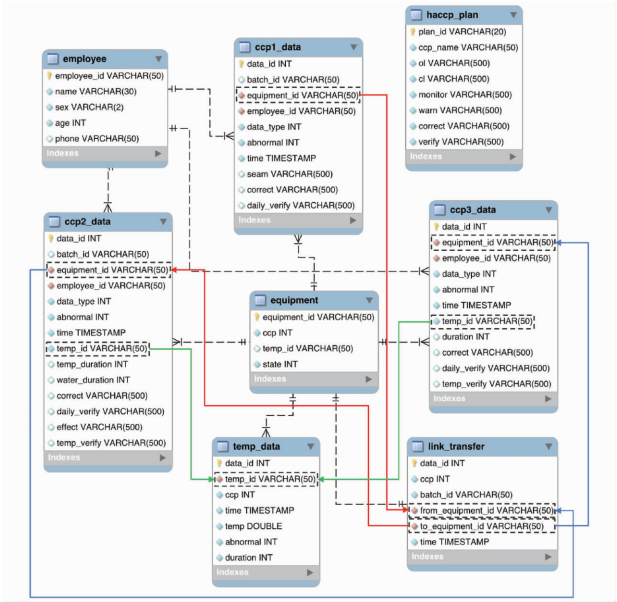


图 3 HACCP 计划执行数据 ER 图

Fig. 3 ER diagram of HACCP plan execution data

对应图 2 中增强 HACCP 计划表中的 3 个关键控制点数据表,覆盖了当前关键控制点的基本信息和其对应的监控、纠偏、验证计划产生的数据信息。employee 表和 equipment 表分别对应计划表中监控数据的“谁”以及获得监控数据的加工设备,如封罐机、巴氏杀菌设备等,temp_data 表为所有温度数据的记录表,link_transfer 表则实现 3 个关键控制点之间的有机链接,以达到监控数据不断连的效果。如图 3 中的箭头所示,表达了数据之间的绑定关系,红线表示 CCP1 与 CCP2 之间的链接,蓝线表示 CCP2 与 CCP3 之间的链接,绿线表示 CCP2、CCP3 与温度数据之间的绑定关系。

以 CCP1 数据表为例,表中使用数据号 data_id、批次号 batch_id、设备号 equipment_id、监管人编号 employee_id、时间戳 timestamp、异常标记 exception、卷缝情况 seam、纠偏措施 correct、每日验证记录 daily_verify 字段来描述包装/密封关键控制点的监控、纠偏、验证数据,其中使用 exception 字段来描述该数据在首次质量判断中被认为是一、二级数据。

2.2.2 风险数据上链存储结构设计

风险数据除了上述的结构化存储外,也通过区块链进行同步存储。为了完整存储风险数据并方便后续的检索,在上述结构化数据所覆盖的信息之外,额外增加异常标记、质量判断结果属性来描述数据的风险级别及对应级别的质量问题描述信息。

上链数据在区块链中采用键值对(Key-Value)数据库存储,其中关键控制点的质量安全风险数据包装为 JSON 格式作为 Value 存储。以 CCP1 数据

结构为例,其 JSON 格式存储结构为

```
&Packing {
    BatchID:      batch_id,
    EquipmentID:  equipment_id,
    Supervisor:   employee_id,
    Timestamp:    time,
    Seam:         seam,
    UnusualFlag:  flag,
    QualityRes:   res,
    Correct:      correct,
    DailyVerify:  daily_verify
}
```

Key 则存储对应数据的唯一索引值,用代表当前关键控制点的数字、代表不同数据类型的字母、批次号或设备号以及时间戳的组合来表示。作为账本中数据的唯一标识,该 Key 还可用来区分具体的 Value 数据是监控数据、纠偏数据或是验证数据。如 Key 为“1#1#681744#20230405080000”则表示该条数据是 CCP1 批次号为“681744”的监控数据,数据时间为 2023 年 4 月 5 日 08:00。

2.3 数据加密

区块链技术虽能保证数据的安全性和不可篡改性,但由于信息在网络中是公开透明的,也就意味着数据拥有者不愿意被披露的信息依旧对链上的所有组织可见^[33]。为了有限度披露上链数据,针对风险等级为二级的数据,作为公开数据直接上链,以加强多方监督和保证准确的责任定位;而风险等级为一级的数据主要用于帮助本企业进行内部的风险预警管理和优化,进行加密处理后再上链。

融合对称加密算法计算量小、加密效率高的优点和非对称加密算法安全性更强的优点,且随机生成的密钥和混合加密使信息更不易被破解,使用对称加密算法(Advanced encryption standard, AES)和非对称加密算法相结合的方式对数据进行加密^[34-35]。其中,应用最广泛的非对称加密算法包含 RSA(Rivest-Shamir-Adleman)算法和 ECC(Elliptic curve cryptography)算法,而后者能以更短的密钥实现与前者相同的安全等级,且加密速度更快^[36]。所以本文选择后者作为加密使用的非对称加密算法。

加密过程如图 4 所示。首先,在本地生成并管理 ECC 密钥对,保证定期更新且私钥只供内部人员获取。然后,结合智能合约自动化地生成一个 AES 密钥,使用该密钥加密上链数据,同时使用 ECC 公钥对 AES 密钥进行加密处理。最后,将上链数据的密文和 AES 密钥的密文一同上链。

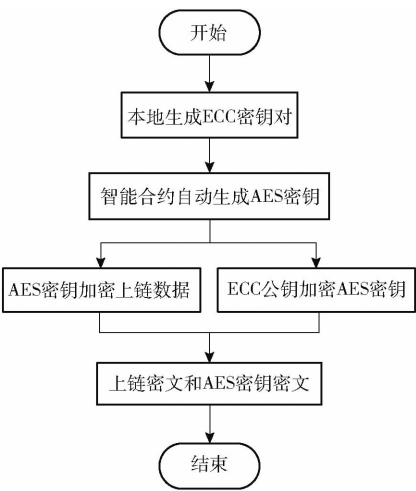


图 4 隐私数据加密流程

Fig.4 Encryption process of private data

2.4 智能合约设计

区块链中的智能合约是一种包含执行条件与执行逻辑的脚本代码。它扩展了区块链操纵数据的能力,只有在满足特定条件的时候才会进行相应的操作或传输数据^[37]。因此,开发者可通过设计相关算法借助智能合约自动化地完成数据处理工作。

结合增强 HACCP 计划(图 2)以及上链数据结构的设计,智能合约涉及链上数据获取算法、数据加密算法、数据上链算法、数据查询算法 4 大类。其中,数据上链算法中包含对输入的监控数据进行二次质量判断,调用链上数据获取算法辅助质量判断,后调用数据加密算法对一级风险数据进行加密操作。以巴氏杀菌环节的监控数据上链算法为例,其伪代码如表 2 所示。通过调用温度数据获取算法,访问并获取该时间段的实时温度记录,将该时段水浴温度、水浴时长与关键限值进行比较,标记异常,累积计算温度异常持续时间,输出质量判断结果,若为一级风险数据则调用数据加密算法对其进行加密后一起上链存储。后期需要读取数据时就可以直接得到带有质量判断结果的数据,同时这些数据在可视化图谱中会展示出相应的警告节点。

2.5 数据可视化设计

对各个关键控制点的质量安全监管数据进行分类可视化,有助于分别针对不同类用户的数据使用需求,提供专有的可读、易懂数据可视化图谱。

2.5.1 可视化数据分类定义

增强 HACCP 计划溯源数据图谱所面向的用户主要分为两类:企业内部监管部门、企业外部政府监管。企业内部监管部门可获取所有溯源数据。作为企业内部监管部门,可以看到完整的监管数据。其中,独有的数据是仅超过操作限值的一级风险数据,帮助企业内部更全局地监控各个关键控制点的情

表 2 监控数据质量判断算法

Tab.2 Algorithm for quality judgment of monitoring data

算法	CCP2 的监控数据上链
输入	Datatype, BatchID, EquipmentID, Supervisor, Timestamp, WaterDuration, TempID, TempStratTime, TempEndTime
输出	value, priKey
	1: tempList = getTempList(ccp, TempID, TempStratTime, TempEndTime) // 通过 getTempList 方法获取当前监控时间段的温度列表
	2: unusualDuration = 0
	3: unusualFlag = false
	4: for t = 0 -> len(tempList) do
	5: temp = tempList[t]
	6: if temp < criticalLimit then
	7: unusualFlag = true
	8: unusualDuration = unusualDuration + getDurationOfUnusualTemp (temp)
	9: end if
	10: end for
	11: if unusualFlag then
	12: resMessage = “水浴温度低于关键限值。”
	13: else
	14: resMessage = “水浴温度仅低于操作限值。”
	15: end if
	16: if WaterDuration ! = 120 then
	17: unusualFlag = true
	18: resMessage = resMessage + “请注意,水浴时间不 符合要求。”
	19: else
	20: resMessage = resMessage + “水浴时间仅不符合操 作限制。”
	21: end if
	22: value = json(arg[], unusualFlag, unusualDuration, resMessage) // 将数据封装为 JSON
	23: object = value
	24: if ! unusualFlag then
	25: value, priKey = encryption(value, eccPubKey) // 加密数据和返回加密密钥
	26: object = json(value, priKey)
	27: end if
	28: stub. PutState(key, object)

况,更好地优化加工操作。作为企业外部政府监管,可监察该企业超过关键限值的二级风险数据,以达到外界监督的目的。

2.5.2 增强 HACCP 计划二元数据结构

知识图谱(Knowledge graph)作为结构化的语义知识库,用于以符号形式描述物理世界中的概念及其关系^[38],是数据的一种直观展示形式。其数据模型是以图论中的图结构为数据结构的图数据模型的继承和发展。

对增强巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划数据表做知

识提取,将其中的 CCP 计划、监控计划、纠偏计划、验证计划的数据抽象为实体,如某关键控制点的监控数据被封装为一个实体。这些抽象对象之间的关系为联系。

基于此,本文将完整的增强 HACCP 计划定义为实体集与联系集构成的二元组 (E,R) 。 $E=\{C,D\}$ 是构成该计划定义的实体集, C 表示关键控制点实体, D 表示衍生实体。其中衍生实体为衍生数据的抽象对象,而衍生数据主要是指围绕关键控制点产生的监控、纠偏、验证数据等,也包含针对关键限值中的一些需要提前记录以便于监控中进行判断的数据。衍生实体只能依赖于某实体存在。

取任意实体,与之相关的联系集 R 可表示为

$$R(E_i)=E_i(\{(R_{E_i},E_{i+1})\},\{(R_{D_{ij}},D_{ij})\})$$
$$(i=1,2,\cdots,m;j=0,1,\cdots,n) \tag{1}$$

式中 E_i ——任意实体,设为第 i 个实体
 R_{E_i} —— E_i 与 E_{i+1} 之间的联系
 D_{ij} —— E_i 的第 j 个衍生实体
 $R_{D_{ij}}$ —— E_i 与 D_{ij} 之间的联系
 m ——对应实体个数
 n —— E_i 的衍生实体的最大个数
 $\{\}$ ——可选项符号,例如, E_i 为没有衍生实体的实体时,则 $(R_{D_{ij}},D_{ij})$ 不存在; E_i 为有多个衍生实体的实体时,则 $(R_{D_{ij}},D_{ij})$ 有多个

2.5.3 静态实体与动态实体定义

在上述定义的基础上,将增强 HACCP 计划表(图 2)中的各子计划定义、操作说明等静态数据抽象而来的实体定义为静态实体。而动态实体则是监控、纠偏、验证计划在执行过程中所产生的动态数据的抽象对象。

静态实体相当于对象的型,一旦 HACCP 计划

确定,则具有一定的稳定性。动态实体相当于对象的值,它是在稳定的 HACCP 计划执行过程中产生的实时状态,具有灵活多变性。

静态实体描述了当前 HACCP 计划所覆盖的、待监控的关键控制点和每一个关键控制点包含的待执行的子计划对象信息,以及为了完成这些子计划或者获取监控数据所需的设备等衍生实体信息。

动态实体则描述了增强 HACCP 计划执行过程中所产生的关键控制点数据对象的信息以及它们的子计划所产生的衍生数据对象,例如监控数据实体、温度验证数据实体等衍生实体的信息。

2.5.4 可视化展示结构

静态实体及联系的可视化展示结构可以表达为图 5 所示的静态实体联系图。每个实体用一个圆表示,直径较大的圆表示关键控制点静态实体,周围较小的圆为相应的静态衍生实体。各关键控制点静态实体间按照业务流程顺序实现连接,如箭头方向所示。除此之外的其他联系箭头表达了实体与衍生实体之间的衍生关系。静态实体联系图清晰反映该增强 HACCP 计划对应的关键节点业务链接关系以及 3 个关键控制点的各个子计划实体内容。

动态实体及联系的可视化展示结构可表达为图 6 所示的动态实体联系图。它反映了增强 HACCP 计划执行过程中所产生的实时数据之间的业务流程及时间关系,完整描述了加工过程中的关键控制点的监控、纠偏、验证数据。以“1001”批次的蟹肉加工过程中的一段业务流程所产生的动态实体之间的结构为例,CCP1 数据节点、CCP2 数据节点通过“批次号/机器设备号/时间序列”的形式进行标识,CCP3 数据节点则通过“机器设备号/时间序列”进行标识,相应衍生实体节点与其标识相同。

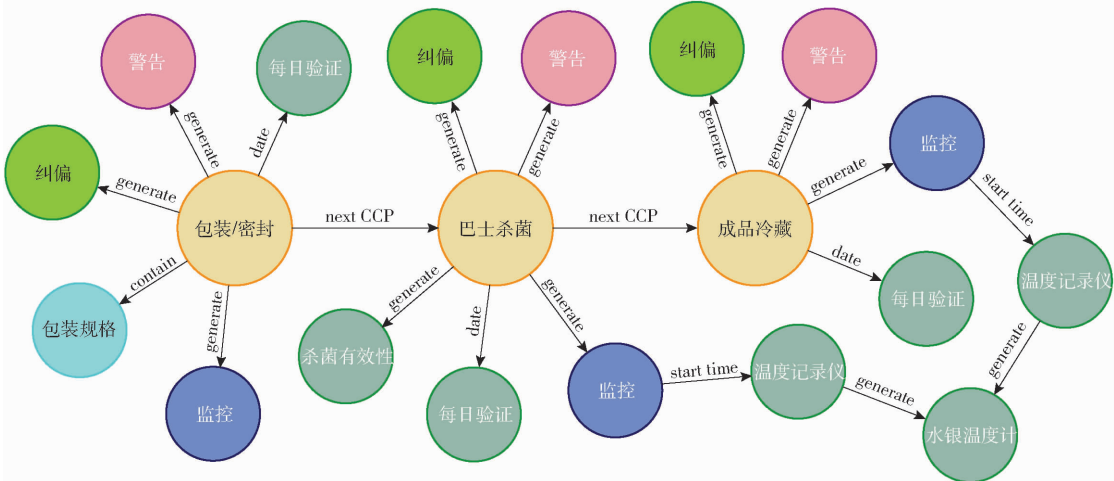


图 5 静态实体联系图

Fig.5 Static entities linkage diagram

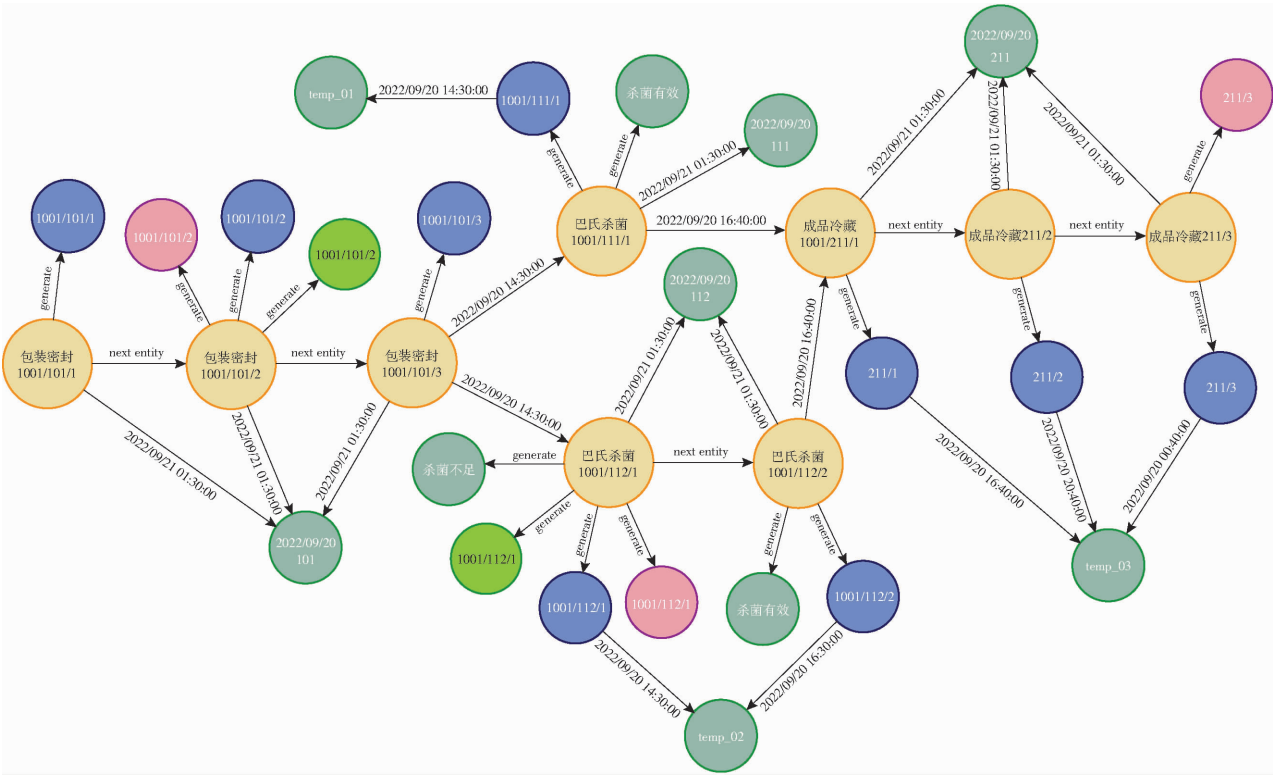


图 6 部分动态实体联系图

Fig. 6 Partial dynamic entities linkage diagram

为便于信息查看,在可视化展示时动静态实体间存在映射关系。其中 CCP 静态实体与 CCP 动态实体对应相连,如图 7 所示,此映射可以更直观反映出每一个 CCP 的所有监控点状况,并可以直观选择某一个监控点进一步展开其细节数据来观察。

如图 6 中动态实体部分可视为由 3 个 CCP1 分块、3 个 CCP2 分块和 3 个 CCP3 分块拼接组成。较为特殊的是,在 CCP1 静态实体中包含一个存储约束条件的衍生实体“包装规格”,但在动态实体展示结构的构建中,该衍生实体作为判断条件已融入到

监控过程中,所以在动态实体可视化展示中该衍生实体不再出现。

3 原型实现与测试

3.1 实验环境概述

在系统实现中,区块链开发平台采用 Hyperledger Fabric,智能合约的编写使用 Go 语言,区块链网络部署至云服务器;系统整体架构采用前后端分离模式,前端使用 Vue,后端基于 SpringBoot 和 Mybatis,使用 Java 语言进行系统开发。系统配置和软件版本等内容如表 3 所示。

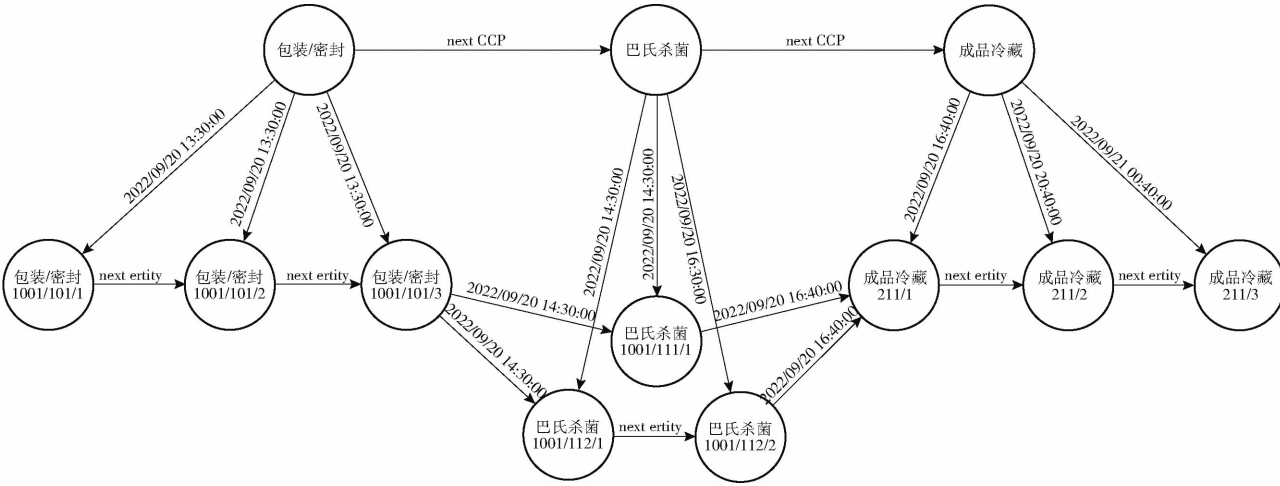


图 7 CCP 静态实体和 CCP 动态实体映射图

Fig. 7 Map of CCP static entities and CCP dynamic entities

表 3 开发环境说明

Tab.3 Development environment specification

开发环境	工具及版本号
云服务器	CentOS 7.9,2 核,2 GB
本地环境	MacOS 13,Apple M1 Pro,16 GB
区块链部署容器	Docker 19.03.13
区块链开发工具	Hyperledger Fabric 2.2.1,
	Hyperledger Fabric SDK Java 1.4.7
区块链可视化工具	Hyperledger Explorer 1.1.8
区块链测试工具	Tape 0.2.5,Hyperledger Caliper 0.4.2
前端开发框架	Vue 2.6.14
后端开发框架	SpringBoot 2.7.4,Mybatis 2.1.3
数据库	MySQL 8.0.31, Neo4j 3.5.35
开发语言	Java 11.0.16.1, Go 1.17.6

3.2 实验逻辑框架

基于知识库与区块链技术的巴氏杀菌蟹肉 HACCP 质量溯源原型实现的实验逻辑架构图如图 8 所示。为了验证溯源模型构建的合理性,首先补充数据采集模块,本采集模块包括人工录入和物联网相结合的方式。其中,CCP2、CCP3 作为涉及温度监控的环节,每个设备通过独立的温度采集子系统动态采集设备内温度。其余信息则通过人工录入方式采集。采集到的数据汇聚至业务服务器,服务器将数据规范化存储至 MySQL 和 Hyperledger Fabric 平台。后业务服务器与数据库交互,从区块链平台获取有风险数据,从 MySQL 获取无风险数据,经过筛选整合存储至 Neo4j,完成重要数据的可视化展示。在 Hyperledger Fabric 区块链网络模块中,配置 3 个与部门对应的组织、3 个 Order 节点,每个组织设置 1 个 Peer 节点。

3.3 功能实现

质量溯源原型包含信息采集、温度数据采集、数据可视化图谱展示和消费者溯源 4 个主要部分。前端使用 Vue 组件化快速搭建各种用户交互界面,使用 axios 库向后端接口发送请求获取数据填充至前端页面,使用 vis.js 在前端完成可视化图谱的渲染。

对于信息采集部分来说,用户来自 3 个部门,分别对应 3 个关键控制点所在的加工环节,通过账号密码登录并填写相应信息。前端会将录入的信息发送给后端,计划录入界面如图 9 所示,相应的计划录入接口在收到请求后解析其中的内容并触发相应数据库的存储操作或通过 sdk 调用区块链网络中的智能合约完成数据的上链操作。

对于温度数据采集部分来说,它通过基于 MQTT 传输协议的温度采集子系统进行操作。系统中的温度采集模块由 ESP8266 – WiFi 模块和温湿度传感器 DHT22 组成,以 200 ms 的间隔频率对环境温度进行采集。其中 DHT22 用于获取实时温度,ESP8266 – WiFi 模块用于连接网络进行数据传输。通过 MQTT 协议将温度数据传输至服务器进行解析,记录数据异常标记和异常持续时间,后进行分级存储。

根据可信应用模型(图 1)和系统逻辑框架(图 8)可知,上述采集的数据将进入 Neo4j 数据库以生成面向用户的可视化图谱。部分测试数据生成的图谱全貌如图 10 所示。图中主要为风险数据,而隐藏了静态数据节点以及部分验证数据节点,无风险数据在可视化时也进行了聚合。

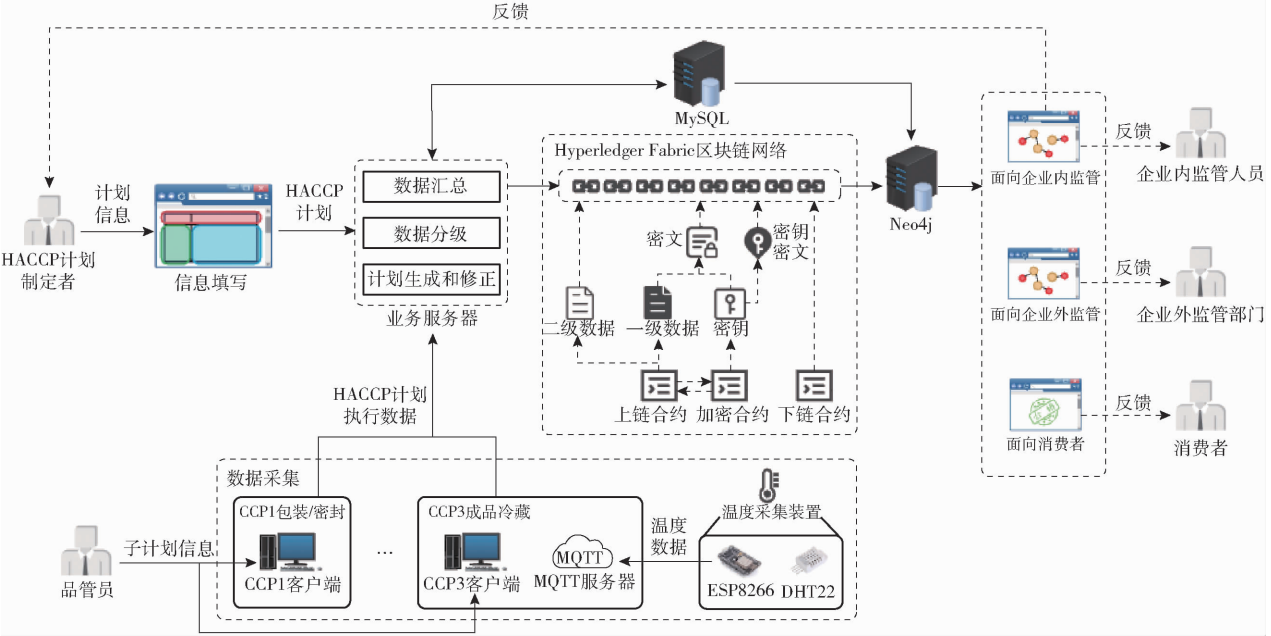


图 8 系统实现逻辑架构图

Fig.8 Diagram of experimental logical architecture



图 9 CCP1 计划信息录入界面

Fig. 9 Interface for entering CCP1 plan information

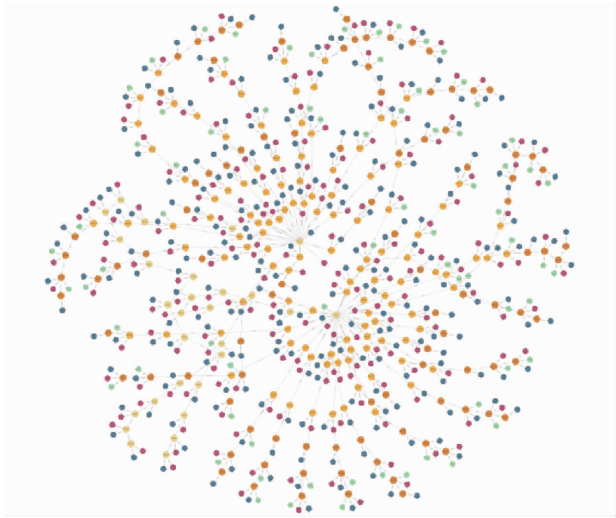


图 10 部分巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划的可视化全貌图

Fig. 10 Full visual view of HACCP plan for partially pasteurized crabmeat

以某批次为例,其在加工过程中所产生的一级、二级风险数据的可视化图谱界面如图 11 所示。为了与一级风险进行区分,二级风险数据的警告节点由粗线圈标注,且光标接触相应节点时浮窗会展示节点信息,描述该节点的风险数据。由图 11b 可知,所见节点均为断链状态,说明目前的监测数据仅存在各个关键控制点上零星的二级风险数据,不存在每个关键控制点上均为二级风险的完整数据链。

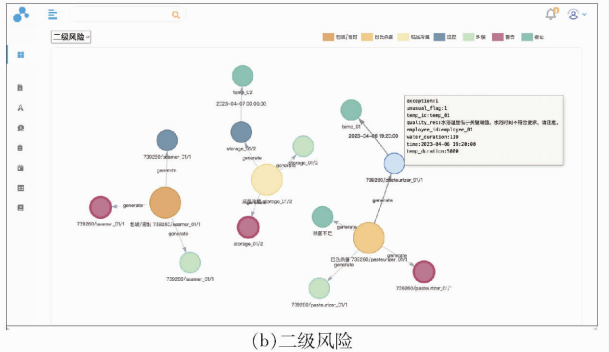
为方便消费者了解所购买产品的相关信息、产品合格认证等,系统需要提供消费者溯源产品的渠道。通过跨度一个多月、覆盖全国十几个省份的广泛市场调研发现,消费者对于产品溯源中具体的风险细节和溯源存储机制并没有过多的关注,他们主要的关注点在于产品是否存在安全风险,是否合格或者是否经过国家认证。所以,本文所设计的系统原型为消费者提供了简单的产品查询。消费者可通过包装上的编码对产品进行查询,查询结果如图 12 所示。

3.4 区块链网络性能测试

Hyperledger Fabric 允许开发者对自身出块机制



(a)一级风险



(b)二级风险

图 11 数据可视化界面

Fig. 11 Visual display interface of data



图 12 消费者查询结果

Fig. 12 Interface of query results

进行自定义,该出块机制对最终的区块链网络的性能也有着一定的影响。本文考虑到各条交易的大小将绝对区块大小设置为 20 MB、首选区块大小设置为 20 480 KB,固定变量分别对块中最大交易量和出块时间进行测试,以确定在实验环境下最优块中交易数量和出块时间。

使用 Tape 对区块链网络发起 11 个变量的测试,块中最大交易数变量 6 个,出块时间变量 5 个。每个变量进行 8 轮测试,每轮测试交易数为 2 000 条,结果去掉最高值与最低值求平均,所得到的结果如图 13 所示。图 13a 中固定出块时间为默认设置 2 s,交易吞吐量 (TPS) 在每区块最大交易数为 150 条时达到最好成绩,图 13b 中则固定块中最大交易数为 150 条,说明 TPS 在出块时间为 2、3 s 时达到较好成绩。所以选择块中最大交易数为 150 条,出块时间为 2 s。在此基础上分别测试 2 000、4 000、

6 000、8 000、10 000 条数据的上链吞吐量,结果如图 14 所示,数据在上链时吞吐量稳定在 123 笔/s 左右,不会因上链数据而受到影响。

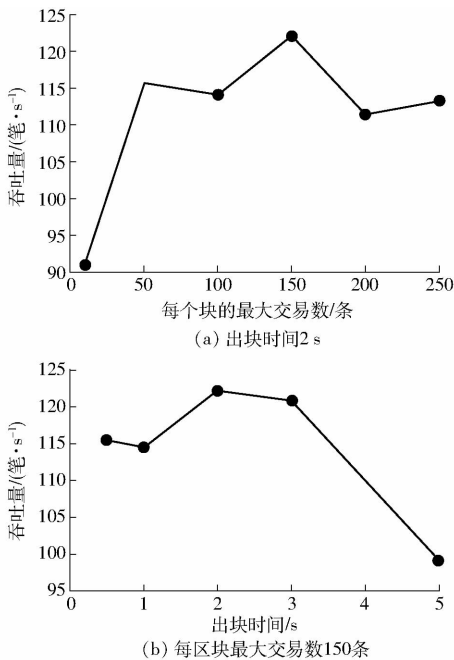


图 13 最优出块机制

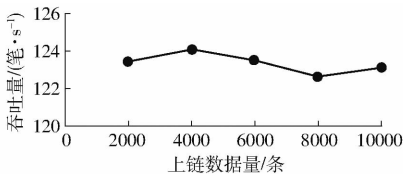


图 14 上链吞吐量

基于此,再使用 Hyperledger Caliper 对区块链网络进行性能测试,测试在不同并发量下交易的吞吐量与延迟情况,为保证测试结果的客观性,依旧采取每个变量 8 轮测试、测试结果去掉最高最低求平均的方式进行测试。结果如图 15 所示,说明交易吞吐量在并发量达到 400 笔/s 时开始趋于稳定,在并发量达到 600 笔/s 时稳定在 300 笔/s 左右,这样的吞吐量情况在性能上满足实际应用。

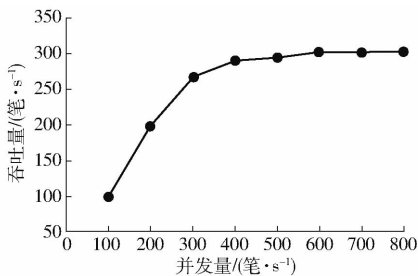


图 15 系统性能测试结果

4 结论

(1)基于水产品 HACCP 国家标准,以巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划为例,结合语义建模和区块链技术,构建了巴氏杀菌蟹肉增强 HACCP 计划可信可视溯源模型(EHCVTM)。模型涵盖了对 HACCP 计划的理解、重组、数据获取、可视化等一系列过程,为基于 HACCP 国家标准的可信可视质量溯源系统的构建提供新的解决思路。

(2)以巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划为例,在对 HACCP 计划全面理解的基础上,从数据监控和不同层次溯源的不同数据需求角度,调整并拓展了原始的巴氏杀菌蟹肉 HACCP 计划表;优化上链数据,形成质量数据“有风险上链,无风险自治”、“高风险直接上链多方监管,低风险加密上链内部监管”的分层次上链模式;实现不同层次溯源数据的不同风格可视化展示,辅助企业内部质量的精细化监控、提前预警和反馈;企业外部多方监督,保证安全风险公开、方便责任的精细化定位。既有利于企业内部数字资源等保护,也有利于质量风险公开监管。

(3)增强 HACCP 计划的可信溯源是对 HACCP 计划执行过程监控数据的溯源,同时又防止了数据的恶意篡改,对企业内部管理层、监管机构以及消费者而言,溯源数据都是真实可信的。

(4)经过测试,基于 EHCVTM 的溯源应用系统可实现数据采集、数据分级安全管理、数据可视化、数据溯源等基本功能,且基于区块链的系统吞吐量达到 300 笔/s,可基本满足溯源系统的业务需求。

参 考 文 献

[1] CARVALHO F P. Pesticides, environment, and food safety[J]. Food and Energy Security, 2017, 6(2):48-60.

[2] 屠鸿薇,池岚,黄盼盼,等. 2017—2019 年广东省动物性水产品 7 种致病微生物污染状况分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020,11(9):2980-2985.

TU Hongwei, CHI Lan, HUANG Panpan, et al. Analysis of the pollution status of 7 pathogenic microorganisms in animal aquatic products in Guangdong Province from 2017 to 2019[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020,11(9):2980-2985. (in Chinese)

[3] JENNINGS S, STENTIFORD G D, LEOCADIO A M, et al. Aquatic food security: insights into challenges and solutions from an analysis of interactions between fisheries, aquaculture, food safety, human health, fish and human welfare, economy and environment[J]. Fish and Fisheries, 2016, 17(4): 893-938.

- [4] AL-BUSAIDI M A, JUKES D J, BOSE S. Hazard analysis and critical control point (HACCP) in seafood processing: an analysis of its application and use in regulation in the Sultanate of Oman[J]. Food Control, 2017, 73: 900–915.
- [5] Food Agricultural Organization (FAO). Hazard analysis and critical control point (HACCP) system and guidelines for its application: annex to CAC/RCP 1–1969. Rev.3[S]. 1997.
- [6] LEE J A, HATHAWAY S C. The challenge of designing valid HACCP plans for raw food commodities[J]. Food Control, 1998, 9(2–3): 111–117.
- [7] SORIANO J M, MOLTO J C, MANES J. Development of a nutritional HACCP plan[J]. Journal of the American Dietetic Association, 2002, 102(10): 1399–1401.
- [8] GORAYEB T C C, CASCIATORI F P, DEL BIANCHI V L, et al. HACCP plan proposal for a typical Brazilian peanut processing company[J]. Food Control, 2009, 20: 671–676.
- [9] KOHILAVANI, ZZAMAN W, FEBRIANTO N A, et al. Embedding Islamic dietary requirements into HACCP approach[J]. Food Control, 2013, 34: 607–612.
- [10] ALLATA S, VALERO A, BENHADJA L. Implementation of traceability and food safety systems (HACCP) under the ISO 22000:2005 standard in North Africa: the case study of an ice cream company in Algeria[J]. Food Control, 2017, 79: 239–253.
- [11] ASADUZZAMAN M. The implementation of hazard analysis critical control point (HACCP) plan for chicken nugget plant[J]. Asian Food Science Journal, 2021, 20(5): 11–24.
- [12] AREVALO H A, ROJAS E M M, FONSECA K B B, et al. Implementation of the HACCP system for production of Tenebrio molitor larvae meal[J]. Food Control, 2022, 138: 109030.
- [13] CORMIER R J, MALLET M, CHIASSON S, et al. Effectiveness and performance of HACCP-based programs[J]. Food Control, 2007, 18(6): 665–671.
- [14] MOTARJEMI Y, KAFERSTEIN F, MOY G, et al. Importance of HACCP for public health and development—the role of the World Health Organization[J]. Food Control, 1996, 7(2): 77–85.
- [15] YANG Y H, WEI L J, PEI J N. Application of meta-analysis technique to assess effectiveness of HACCP-based FSM systems in Chinese SLDBs[J]. Food Control, 2019, 96: 291–298.
- [16] DZWOLAK W. Assessment of HACCP plans in standardized food safety management systems—the case of small-sized Polish food businesses[J]. Food Control, 2019, 106:106716.
- [17] LIU F, RHIM H, PARK K, et al. HACCP certification in food industry: trade-offs in product safety and firm performance [J]. International Journal of Production Economics, 2021, 231: 107838.
- [18] WANG X, FU D Q, FRUK G, et al. Improving quality control and transparency in honey peach export chain by a multi-sensors-managed traceability system[J]. Food Control, 2018, 88: 169–180.
- [19] FENG H H, CHEN J, ZHOU W, et al. Modeling and evaluation on WSN-enabled and knowledge-based HACCP quality control for frozen shellfish cold chain[J]. Food Control, 2019, 98: 348–358.
- [20] WANG W S, XU J C, ZHANG W F, et al. Optimization and validation of the knowledge-based traceability system for quality control in fish waterless live transportation[J]. Food Control, 2021, 122: 107809.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 水产品危害分析与关键控制点 (HACCP) 体系及其应用指南: GB/T 19838—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [22] 牟向伟, 陈燕, 曹妍. 农产品冷链 HACCP 管理体系知识建模与推理[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 300–308. MOU Xiangwei, CHEN Yan, CAO Yan. HACCP knowledge modeling and reasoning for agricultural products cold-chain logistics[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 300–308. (in Chinese)
- [23] 邹一波, 李清雨, 陈明, 等. 基于生食牡蛎 HACCP 计划的语义建模研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 290–299. ZOU Yibo, LI Qingyu, CHEN Ming, et al. Semantic modeling based on raw oyster HACCP program[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 290–299. (in Chinese)
- [24] 葛艳, 黄朝良, 陈明, 等. 基于区块链的 HACCP 质量溯源模型与系统实现[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 369–375. GE Yan, HUANG Chaoliang, CHEN Ming, et al. HACCP quality traceability model and system implementation based on blockchain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 369–375. (in Chinese)
- [25] MOHANTA B K, JENA D, PANDA S S, et al. Blockchain technology: a survey on applications and security privacy challenges[J]. Internet of Things, 2019, 8: 100107.
- [26] MARKOVIC M, JACOBS N, DRYJA K, et al. Integrating Internet of things, provenance, and blockchain to enhance trust in last mile food deliveries[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2020, 4: 563424.
- [27] 张新, 彭祥贞, 许继平, 等. 基于区块链智能合约的稻米供应链动态监管模型[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 370–382. ZHANG Xin, PENG Xiangzhen, XU Jiping, et al. Dynamic supervision model of rice supply chain based on blockchain and smart contract[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 370–382. (in Chinese)
- [28] 景旭, 秦源泽. 面向猕猴桃质量溯源的联盟链跨组织链上合同交易机制[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 282–290. JING Xu, QIN Yuanze. Consortium blockchain inter-organizational contract transaction mechanism for kiwi fruit quality traceability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 282–290. (in Chinese)
- [29] 李修华, 罗潜, 杨信廷, 等. 面向小麦区块链追溯系统的分级监管模型设计与实现[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 363–371. LI Xiuhua, LUO Qian, YANG Xinting, et al. Design and implementation of blockchain hierarchical supervision model for wheat supply chain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 363–371. (in Chinese)

TAO Hongge, CHEN Huanxin, XIE Junlong, et al. Flow uniformity index based on area-weighted and mass-weighted average velocity[J]. CIESC Journal, 2010, 61 (Supp. 2) :116 – 120. (in Chinese)

[33] KANG Y X, FU W W, QIU Z Y, et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of Chinese jujubes[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012:386214 .

[34] 陈林涛, 马旭, 李泽华, 等. 水稻秧盘形变测度方法与等级评价研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6) : 159 – 166. CHEN Lintao, MA Xu, LI Zehua, et al. Deformation measurement technology and grade evaluation of rice seedling trays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6) :159 – 166. (in Chinese)

[35] 吴孟秋, 雷登文, 朱广飞, 等. 基于动网格的白萝卜热风干燥热质传递研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2) : 293 – 302. WU Mengqiu, LEI Dengwen, ZHU Guangfei, et al. Hot-air drying heat and mass transfer of white radish based on moving mesh[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2) : 293 – 302. (in Chinese)

[36] 孙庆运, 张宗超, 贾振超, 等. 玉米果穗深床层热风干燥特性试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2) : 285 – 292, 337. SUN Qingyun, ZHANG Zongchao, JIA Zhenchao, et al. Hot air drying characteristics in deep bed of corn ear [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2) : 285 – 292, 337. (in Chinese)

[37] 王瑞芳, 王竞成, 赵东海, 等. 香蕉低压过热蒸汽-真空组合干燥研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3) : 392 – 399. WANG Ruifang, WANG Jingcheng, ZHAO Donghai, et al. Drying of banana using combined low-pressure superheated steam and vacuum drying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (3) : 392 – 399. (in Chinese)

[38] 宿佃斌, 曾诗雨, 吕为乔, 等. 微波红外振动床协同干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8) : 423 – 434. SU Dianbin, ZENG Shiyu, LÜ Weiqiao, et al. Design and experiment of microwave infrared vibrating-bed dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8) : 423 – 434. (in Chinese)

[39] 郎旭敏, 徐亚元, 肖亚冬, 等. 不同组合干燥方式对胡萝卜脆片品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2) : 493 – 502. LANG Xumin, XU Yayuan, XIAO Yadong, et al. Effects of different combined drying methods on the quality of carrot chips [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(2) : 493 – 502. (in Chinese)

(上接第 396 页)

[30] 李佳利, 陈宇, 钱建平, 等. 融合 HACCP 体系的农产品区块链追溯系统精准上链机制改进[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20) :276 – 285. LI Jiali, CHEN Yu, QIAN Jianping, et al. Improvement of the precise up-chain mechanism of the agricultural products blockchain traceability system integrating the HACCP system[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(20) : 276 – 285. (in Chinese)

[31] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4) : 481 – 494. YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4) : 481 – 494. (in Chinese)

[32] 邵奇峰, 金澈清, 张召, 等. 区块链技术: 架构及进展[J]. 计算机学报, 2018, 41(5) : 969 – 988. SHAO Qifeng, JIN Cheqing, ZHANG Zhao, et al. Blockchain: architecture and research progress[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(5) : 969 – 988. (in Chinese)

[33] 祝烈煌, 高峰, 沈蒙, 等. 区块链隐私保护研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(10) : 2170 – 2186. ZHU Liehuang, GAO Feng, SHEN Meng, et al. Survey on privacy preserving techniques for blockchain technology [J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(10) : 2170 – 2186. (in Chinese)

[34] 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)

[35] 邢斌, 于华竟, 徐大明, 等. 基于区块链的红茶质量安全追溯系统开发及应用[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(11) :133 – 138. XING Bin, YU Huajing, XU Daming, et al. Development and application of traceability system for black tea based on blockchain[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(11) : 133 – 138. (in Chinese)

[36] 孟悦, 周耿, 李煜甫. 一种基于 ECC 算法的安全认证方法[J]. 电脑知识与技术(学术版), 2021, 17(3) : 75 – 76. MENG Yue, ZHOU Geng, LI Yufu. Security authentication method based on ECC algorithm[J]. Computer Knowledge and Technology, 2021, 17(3) : 75 – 76. (in Chinese)

[37] YANG L. The blockchain: state-of-the-art and research challenges[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2019, 15: 80 – 90.

[38] JI S X, PAN S R, CAMBRIA E, et al. A survey on knowledge graphs: representation, acquisition, and applications[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(2) :494 – 514.