

基于区块链的蒜黄质量溯源系统设计与实现

鲁世清¹, 李永超², 陈磊³, 高竞育², 杨鹤¹, 陈淑鑫^{1,2,3}

(1. 天津仁爱学院 智算工程学院, 天津 301636; 2. 齐齐哈尔大学 机电工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161000;
3. 天津市电子计算机研究所有限公司, 天津 300221)

摘要: 针对蒜黄供应链信息碎片化、可溯数据易篡改及完整性缺失等问题, 提出基于区块链的蒜黄质量溯源系统。该系统通过集成 FISCO BCOS 联盟链与 IPFS 分布式存储技术, 构建覆盖种植、加工、流通全过程的防篡改数据管理体系; 同时开发智能合约实现农事信息自动化上链与权限分级管控, 利用 IPFS 存储非结构化文件以优化链上资源分配; 基于多节点联盟链架构部署智能合约, 完成数据存证、动态查询与多主体协同监管任务。测试结果表明, 该系统在资源受限环境下的峰值吞吐量达 1 850 TPS, 且内存占用率低于 87%, 具备高效性与稳定性。该系统可在一定程度上缓解短周期农产品溯源数据实时性不足、可信度低等问题, 为提升供应链透明度与质量监管效能提供了可扩展的技术方案。

关键词: 区块链; 蒜黄; 分布式存储; 智能合约; 溯源

DOI: 10.11907/rjdk.251202

中图分类号: TP311

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1672-7800(2025)007-0095-09



Design and Implementation of A Blockchain-Based Garlic Sprout Quality Traceability System

LU Shiqing¹, LI Yongchao², CHEN Lei³, GAO Jingyu², YANG He¹, CHEN Shuxin^{1,2,3}

(1. School of Intelligent Computing Engineering, Tianjin Ren'ai University, Tianjin 301636, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161000, China; 3. Tianjin Electronic Computer Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300221, China)

Abstract: A blockchain based garlic quality traceability system is proposed to address issues such as fragmented information in the garlic supply chain, easy tampering of traceable data, and lack of integrity. The system integrates FISCO BCOS consortium chain and IPFS distributed storage technology to build a tamper proof data management system covering the entire process of planting, processing, and circulation; simultaneously developing smart contracts to achieve automated on chain and hierarchical control of agricultural information, utilizing IPFS to store unstructured files to optimize on chain resource allocation; deploy smart contracts based on a multi node alliance chain architecture to complete tasks such as data authentication, dynamic querying, and multi-party collaborative supervision. The test results show that the system has a peak throughput of 1 850 TPS in resource constrained environments, with a memory occupancy rate of less than 87%, demonstrating high efficiency and stability. This system can to some extent alleviate the problems of insufficient real-time and low credibility of short cycle agricultural product traceability data, and provide a scalable technical solution for improving supply chain transparency and quality supervision efficiency.

Key Words: blockchain; garlic sprout; distributed storage; smart contract; traceability

收稿日期: 2025-03-20

扫描二维码阅读全文:



基金项目: 黑龙江省工程技术研究中心开放课题项目(DWCGQKF202107); 黑龙江省高等教育教学改革研究项目(SJGYY2024239); 天津市制造业高质量发展专项资金项目(20232184); 全国高等院校计算机基础教育研究会计算机基础教育教学研究项目(2024-AFCEC-572); 天津仁爱学院新一轮教学成果重点培育项目(PYY2404); 2023年天津市普通高等学校本科教学质量与教学改革研究项目(B231403806)

作者简介: 鲁世清(1981-), 女, 硕士, 天津仁爱学院智算工程学院讲师, 研究方向为数据科学、智能仿真、区块链; 李永超(1999-), 男, CCF 学生会员, 齐齐哈尔大学机电工程学院硕士研究生, 研究方向为系统设计及应用; 陈磊(1995-), 男, 天津市电子计算机研究所有限公司工程师, 研究方向为网站开发与区块链技术应用; 高竞育(2003-), 女, 齐齐哈尔大学机电工程学院学生, 研究方向为区块链技术及其应用; 杨鹤(2004-), 男, 天津仁爱学院智算工程学院学生, 研究方向为软件工程; 陈淑鑫(1978-), 女, 博士, 齐齐哈尔大学机电工程学院教授、硕士生导师, 研究方向为系统设计及应用。本文通讯作者: 陈淑鑫。

0 引言

近年来,全球食品安全事件频发,不仅严重威胁消费者健康,而且持续削弱社会对农产品质量安全的信任^[1-2]。河北省青县“瘦肉精”事件^[3]、“土坑酸菜”非法加工问题^[4]以及“香精勾兑的泰国香米”^[5]等事件相继曝光,反映出我国农产品供应链监管中的信息滞后与追溯机制缺失,进一步引发公众对食品安全的深层次担忧^[6-7]。在该背景下,供应链特征复杂、信息流通速度要求较高的农产品面临的质量安全风险尤为突出。其中,蒜黄作为一种生长周期短、市场流通频率高的鲜销类蔬菜,在生产过程中受环境因素影响显著,加之其产地分布广泛且种植主体高度分散,导致供应链呈现出高度碎片化和动态变化的特征。这种特性不仅放大了信息的不对称性,而且使得传统依靠纸质记录或中心化数据库的溯源体系难以及时、准确地覆盖其从种植到销售的完整流转路径,极易出现数据滞后、信息孤岛和追溯断链等问题^[8]。

鉴于蒜黄供应链的特殊性,亟需构建具备数据防篡改、全程可追溯、信息高效共享能力的数字化追溯体系,以保障食品质量安全、增强消费者信心。统一的数据标准可实现跨主体、跨系统的高效协同与信息互认,提升供应链的透明度与响应能力,为企业质量管理与政府监管提供可靠的数据支持。

1 相关工作

农产品供应链日益复杂,保障溯源信息的真实性与完整性已成为产品质量安全监管的重要技术需求。传统的农产品溯源体系依托条形码、射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术标签及中心化数据库等技术,借助数字标识实现信息的存储与查询,已在农业生产与流通环节获得广泛应用。然而,该类方案在节点信任机制与数据安全性方面存在先天缺陷,时常存在信息不对称、各方信任度欠缺以及中心化存储易出现数据篡改风险等问题^[9]。

随着区块链技术的发展,其去中心化、不可篡改和数据可追溯的特性为农产品溯源带来新的解决方案^[10]。基于区块链的溯源系统通过分布式账本和密码学机制实现多节点间数据的同步记录与防篡改存证,可显著降低节点失效或信息篡改导致的质量监管风险,提升溯源数据的完整性与透明性^[11]。同时,智能合约的引入支持业务逻辑的自动执行,降低人为干预,增强供应链上下游的协同与信任机制^[12]。

尽管区块链技术在提升溯源数据防篡改性和跨主体信任度方面具备显著优势,但其应用仍受到架构特性的限制,主要体现在以下两方面:其一,链上存储资源有限,难以承载大规模或频繁变动的非结构化数据,通常需要结合IPFS(InterPlanetary File System)等去中心化存储系统实现

数据的完整记录;其二,受共识机制约束,区块链在交易确认速度与实时性方面存在短板,难以满足某些场景下对数据同步时效的严格要求。

传统溯源体系虽然存在信任缺陷,但是利用多重数字签名、哈希链与分布式存储架构等优化手段可在一定程度上提升其数据防篡改能力。同时,借助可信计算环境与安全芯片等硬件级安全机制亦能增强数据源可信性,有效缓解信息伪造问题。目前,传统体系的安全性提升仍依赖于特定节点的可信假设,难以从架构层彻底消除中心化所带来的信任风险。因此,传统方案与基于区块链的溯源系统并非简单的替代关系,更适合作为面向不同场景的技术互补。在具体应用方面,国内文献报道中,陆丽娜等^[13]提出运用智能合约与加密算法构建农业科学数据溯源模型,用于降低农业数据的信任风险,提高数据的可信性与规范性。张新等^[14]提出基于多链的果蔬全程监管模型,实现对果蔬产品全生命周期的穿透式管理。卞立平等^[15]提出基于联盟链的农产品溯源系统,通过节点权限管理、数据加密和哈希匹配检索等模块实现多级溯源,但并未使用自动化数据上链替代手工录入,无法保证溯源信息源头的真实性和可信度。刘双印等^[16]提出基于区块链的农产品质量安全可信溯源系统,提升了农产品溯源数据的安全性和可信度,但并未考虑具体场景的复杂性,可能影响其通用性与稳定性。伍德伦等^[17]提出一种基于身份验证的果蔬区块链信息存储溯源模型,但系统主要保障数据完整性,尚缺乏细粒度的访问控制、用户权限管理机制设计。国外文献报道中,Cao等^[18]提出基于区块链技术的高级架构框架,推动食品供应链中的持续性溯源通信。Andry等^[19]通过区块链技术对咖啡供应链的每个环节进行记录与追踪,提升供应链透明度,保障农民出售价格的公平性以及消费者对产品质量的知情权。

综上所述,已有研究在农产品溯源系统的技术架构、数据安全性与透明性方面取得一定进展,推动了区块链在农业领域的应用。大部分研究集中在供应链稳定性较高、流通周期较长或产地集中的农产品,短周期、高频流通、生产主体分散的农产品场景尚缺乏系统化设计与适配性验证,现有研究难以满足其溯源需求。此外,部分研究尚未充分融合IPFS等去中心化存储方案,导致信息更新滞后,降低了系统的实用性和准确性。为此,针对蒜黄这一生命周期短、供应链复杂性较高的农产品,本文设计一种融合区块链与IPFS的全链条农产品溯源架构,确保信息的可信存证,重点解决短周期农产品溯源场景下的数据安全性与系统适配性问题,弥补现有研究的不足,提升蒜黄产品质量监管的科学性与消费者的信任水平。

2 溯源体系与系统设计

2.1 蒜黄产品质量溯源体系构建

2.1.1 区块链溯源机制设计

保障蒜黄品质安全与提升种植效益是该系统的核心

目标。蒜黄产品质量溯源系统涵盖从种植到销售的多个关键环节,包括种植、加工、配送、销售、质检和监管机构多个主体。每个主体负责各环节的溯源任务,确保数据的真实性。主体间的信息交换均需通过私钥进行数字签名,并附上公钥供后续验证。该机制不仅确保了信息在传输过程中的安全性与不可篡改性,而且增强了信息流通效率,使蒜黄产品质量溯源系统中各主体之间形成明确的职责链条。

蒜黄产品质量溯源系统的各个环节均设置溯源码,用于提高数据传输的自动化程度。由于蒜黄溯源供应链繁杂,为减轻区块链的存储负担,系统采用分布式数据库存储数据。如图 1 所示,图片数据通过 IPFS 进行处理,存储在分布式节点中,同时利用 P2P 传输优化访问速度。此外,区块链的智能合约技术将蒜黄质量管理体系要求、产品标准等关键规则程序化,促进产业链上各主体之间的协同合作,提高了蒜黄产品质量溯源管理的自动化程度。

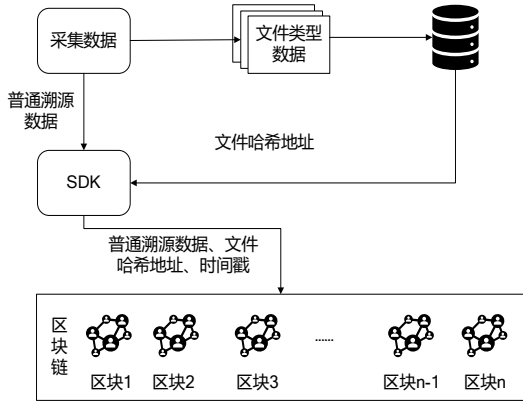


Fig. 1 Schematic diagram of IPFS and blockchain data collaborative storage

图 1 IPFS 与区块链数据协同存储示意图

2.1.2 联盟链结构设计

在蒜黄产品质量溯源系统中,各环节具有不同的职能和严格的运行机制,因此区块链采用去中心化分布式存储的 FISCO BCOS 联盟链架构,用拜占庭容错机制(Practical Byzantine Fault Tolerance, PBFT)使得联盟链上的单一节点无法篡改数据,任何篡改均需获得超过 1/3 节点的授权^[20]。该机制解决了 FISCO BCOS 溯源链中各环节间的信任危机,极大提高了外部恶意篡改数据的成本,保障了蒜黄产品从农场源头到消费者手中的全链条质量透明度与可信度。FISCO BCOS 是基于 Web3.0 技术的企业级、全链路国产化联盟链底层平台,其结合 Webase 区块链管理系统实现节点管理、智能合约部署、用户私钥生成、交易解析以及交易审计等多项功能。如图 2 所示,蒜黄产品质量溯源系统联盟链由农场、加工企业、配送中心、销售终端、质检机构及监管部门等 6 个实体协同构成。

2.2 总体架构设计

蒜黄产品质量溯源系统依托市场标准化的农产品供

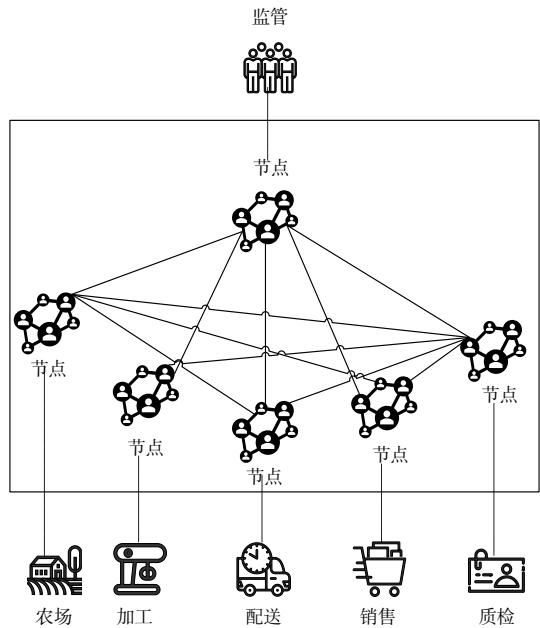


Fig. 2 Alliance chain structure of garlic yellow product quality traceability system

图 2 蒜黄产品质量溯源系统联盟链结构

应链结构构建整体框架,涵盖种植、加工、流通、销售、质检、监管等 6 个关键环节。每个环节均采集相应数据,包括作物 ID、名称、生产周期、投入等,实现全方位溯源。基于方便人机交互的 Web 技术构建农产品全链路溯源界面,通过管理从生产到消费端的整个信息链实现质量跟踪,构建完整的溯源框架。

系统架构包括物理层、应用层和数据存储层,具体如图 3 所示。其中,物理层包括农产品供应链中涉及的主体,如农场、加工厂、运输、质检、销售、监管机构等,这些主体通过系统上传和查询数据,促进整个供应链的信息流动与共享。应用层利用农产品溯源系统的 API 提供多个功能模块,包括:①农产品信息录入模块。用于记录农产品种植、加工、运输等信息;②农产品监管信息上链模块。将监管信息存储至区块链,用于确保数据可信性与透明性;③农产品信息溯源模块。为用户提供查询功能,提升供应链透明度;④区块链模块。基于 FISCO BCOS 联盟链技术,确保数据上链与共识机制的稳定性;⑤IPFS 文件存储模块。用于存储大规模数据,如图片、检验报告等,减轻区块链存储压力;⑥系统管理模块。提供权限管理、数据访问控制等功能,确保系统的安全性与规范性。数据存储层采用链下存储与分布式文件存储相结合的方式,用于提升数据查询的效率与安全性。链下数据存储层依托国产数据库、MySQL 与 Redis 存储结构化数据;文件存储层使用 IPFS 技术实现去中心化文件存储与快速访问;链上数据存储层涵盖数据区块、节点管理、智能合约、共识机制、哈希算法与非对称加密等核心技术,确保数据的安全性与不可篡改性。

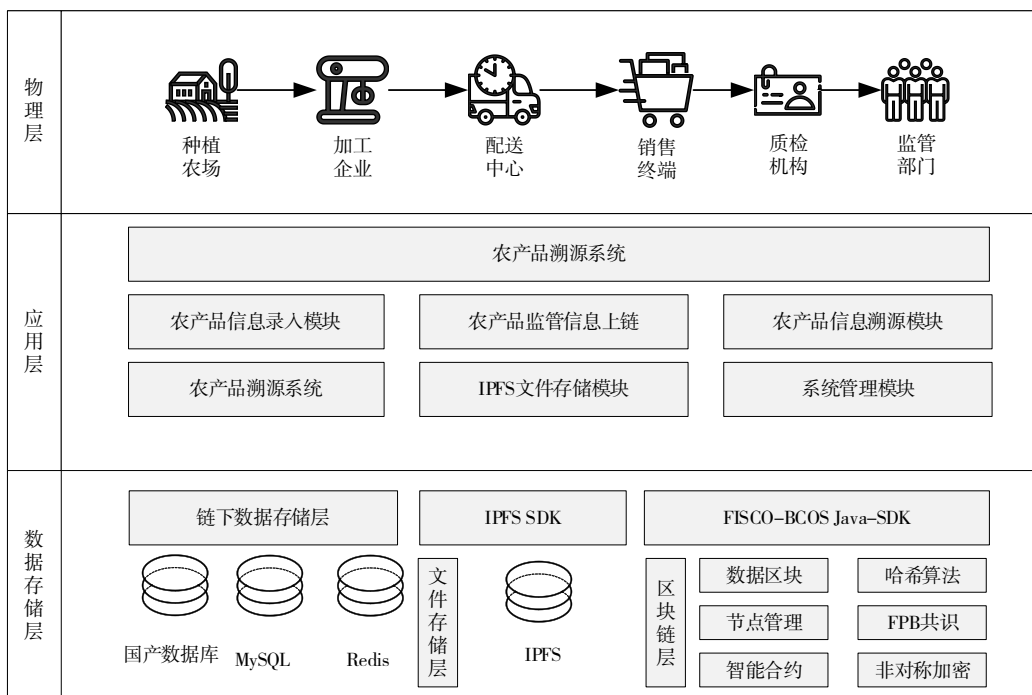


Fig. 3 System architecture

图3 系统架构

2.3 溯源系统功能设计

本文从系统架构与溯源机制出发,针对不同用户角色提出差异化功能设计,以全面满足质量溯源的应用需求。系统整体划分为基本功能模块与业务处理功能模块两大部分。基本功能模块包括用户注册、个人信息管理、平台维护及用户管理等,用于构建稳定安全的运行环境。其中,用户注册模块集成 OAuth2.0 协议与人机验证机制,有效防范恶意注册;个人信息管理模块确保用户数据合规更新;平台维护模块保障系统稳定运行;用户管理模块引入基于角色的访问控制(Role-Based Access Control, RBAC)模型,支持权限分级、角色绑定及访问审计。业务处理功能模块包括数据信息管理与溯源两个子模块,前者实现蒜黄质量数据的采集、分类存储与区块链上链,保障数据真实性与不可篡改性;后者支持基于批次的精准溯源查询,借助区块链技术实现数据的透明可追溯,为监管者与消费者提供实时、可信的信息验证手段,增强供应链全流程的安全性可控性。溯源信息如表1所示。

2.4 智能合约设计

智能合约作为区块链技术的核心组成部分,通过自动化、去中心化的操作显著提高信任度、降低成本并增强透明度^[21]。本文设计的智能合约业务逻辑如表2所示。通过调用 AddRecord 函数,用户可将新的栽培记录插入表格。在查询链上数据时,GetRecord 函数利用 cultivationID 进行查找,并返回对应的栽培记录。智能合约的自动执行可有效减少人为错误和中介干预,提升农业生产过程的效率与透明度。通过该合约,用户可便捷地添加和查询栽培记录,并获取作物栽培过程中的详细信息。

Table 1 Traceability information

表1 溯源信息

阶段	溯源信息
种植信息	种植编号、种植时间、种植人员、种植时间、生长周期、农事信息、土壤信息
加工信息	作物重量、订单信息、加工时间、加工批次、工厂地址、产品名称
运输信息	驾驶员信息、车辆信息、运输日期、货物重量、订单信息、运输路线
销售信息	销售经理、消费者信息、产品信息、库存时间、销售时间、销售地点
质检信息	作物信息、营养成分、农药残留、重金属含量、监测方法、质检报告
监管信息	种植信息、加工信息、质检信息、运输信息、销售信息

Table 2 Smart contract business logic design

表2 智能合约业务逻辑设计

合约功能	合约业务逻辑	合约方法	描述
数据上链	溯源数据上链	AddRecord	上链数据包括种植编号、种植时间、种植人员等
数据查询	溯源数据查询	GetRecord	通过产品溯源码查询产品溯源数据

2.4.1 权限控制算法

为实现数据操作的安全可信性与可控性,需在智能合约中引入有效的权限控制机制,确保只有具备合法权限的用户才能执行关键操作。权限控制算法的伪代码为:

1. $R = \{None, Farmer, Processor, Logistics, Retailer, Inspector, Regulator\}$
2. $U = \{U_i | i \in N\}$
3. $role: U \rightarrow R$
4. $IsRegulator(u) \leftrightarrow role(u) = Regulator$

5. $\text{HasRole}(u, r) \leftrightarrow \text{role}(u) = r$

6. $\text{AssignRole}(U_c, U_i, r_j)$:

$$= \begin{cases} (\text{role}(U_i) \leftarrow r_j, & \text{if } \text{IsRegulator}(U_c) \\ \perp, & \text{otherwise} \end{cases}$$

7. $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$

8. $\rho: F \rightarrow R$

9. $\text{HasRole}(u, r) \leftrightarrow \text{role}(u) = r$

10. $\text{CanExecute}(u, f) \leftrightarrow \text{HasRole}(u, \rho(f))$

11. $\forall f \in F: \begin{cases} \text{CanExecute}(u, f), & f \in F_u \\ \neg \text{CanExecute}(u, f), & f \notin F_u \end{cases}$

权限控制算法的具体步骤为:

(1) 定义系统中的角色集合。

(2) 设所有用户构成集合 $U = \{U_i | i \in N\}$, 即每个用户 U_i 由自然数 i 标识。

(3) 定义映射 $\text{role}: U \rightarrow R$, 表示每个用户对应唯一角色。

(4) 监管者判断函数 $\text{IsRegulator}(u)$, 在用户 u 拥有角色 Regulator 时成立: $\text{IsRegulator}(u) \leftrightarrow \text{role}(u) = \text{Regulator}$ 。

(5) 角色判断函数 $\text{HasRole}(u, r) \leftrightarrow \text{role}(u) = rK$, 即判断用户 u 是否具有角色 r 。

(6) 角色赋值函数, 对于角色分配操作 $\text{AssignRole}(U_c, U_i, r_j)$, 其可执行性由调用者 U_c 是否为监管者决定: 若 $\text{IsRegulator}(U_c)$ 成立, 则将用户 U_i 的角色设定为 r_j , 即 $\text{role}(U_i) \leftarrow r_j$ 。否则, 返回未定义 $\perp$, 表示操作无效。

(7) 在系统中定义功能集合 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ 。

(8) 定义角色—功能映射关系: $\rho: F \rightarrow R$ 映射, 每个功能 $f \in F$ 对应唯一可访问的角色 $\rho(f)$ 。

(9) 判断用户是否拥有某角色。

(10) 执行条件判断函数: $\text{CanExecute}(u, f) \leftrightarrow \text{HasRole}(u, \rho(f))$, 即用户 u 能否执行功能 f 取决于其是否具有 f 所需的角色权限。

(11) 对所有功能 $f \in F$ 引入最小权限原则: 若功能 f 属于用户 u 所拥有的权限集合 F_u , 则 $\text{CanExecute}(u, f)$ 成立; 若功能 $f \notin F_u$, 则 $\neg \text{CanExecute}(u, f)$ 成立, 即禁止访问非授权功能。

供应链中不同主体的数据访问权限应符合业务需求, 因此权限管理机制十分必要。系统设定固定的角色集合与功能集合, 用户利用 role 函数绑定唯一角色, 功能通过 ρ 映射到所需角色。监管者角色具有唯一权限分配能力, 只有满足 IsRegulator 条件的用户才能调用 AssignRole 函数为其他用户分配角色。访问控制使用 CanExecute 函数判定, 用户仅在拥有与功能匹配的角色时才能执行对应操作。此外, 引入最小权限原则, 定义每个用户的功能访问集合, 明确规定用户只能执行被授权的最小功能集, 从而有效防止权限滥用, 强化系统的精细化管理与安全边界控制。

2.4.2 质检报告算法

质检报告自动化审核算法的伪代码为:

1. $R = \{\text{None}, \text{Farmer}, \text{Processor}, \text{Logistics}, \text{Retailer}, \text{Inspector}, \text{Regulator}\}$

2. $B = \{b_i | i \in N\}$

3. $U = \{u_i | i \in N\}$

4. $\text{Threshold} = \langle p_{\max}, h_{\max}, m_{\max} \rangle, p_{\max}, h_{\max}, m_{\max} \in R^+$

5. $\text{WarnRatio} = 0.8$

6. $\text{Report}(b) = \langle t_b, p_b, h_b, m_b, s_b, e_b \rangle$

7. $\text{Submit}(u, b, p, h, m)$

8. $\neg e_b \Rightarrow$

$$\begin{cases} s_b = \text{不合格}, & \text{if } (p > p_{\max}) \vee (h > h_{\max}) \vee (m > m_{\max}) \\ s_b = \text{预警}, & \text{if } (p > \text{WarnRatio} \cdot p_{\max}) \vee (h > \text{WarnRatio} \cdot h_{\max}) \vee (m > \text{WarnRatio} \cdot m_{\max}) \\ s_b = \text{合格}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

9. $\text{Report}(b): = \langle \text{now}, u, p, h, m, s_b, \top \rangle$

10. $\text{Query}(b) = \text{Report}(b)$, if $e_b = \top$

11. $\text{Regulator} \subseteq U$

12. $\text{SetThreshold}(u, x, v)$

$$13. u \in \text{Regulator} \rightarrow \begin{cases} p_{\max}: = v, & \text{if } x = p \\ h_{\max}: = v, & \text{if } x = h \\ m_{\max}: = v, & \text{if } x = m \end{cases}$$

质检报告自动化审核算法的具体步骤为:

(1) 定义角色集合, 定义质检报告编号, 定义用户集合。

(2) 定义阈值向量, 分别代表农药残留、重金属、微生物指标的最大安全限值。

(3) 设置预警系数 $\text{WarnRatio} = 0.8$, 用于界定预警阈值, 各类指标超过最大阈值的 80% 时触发预警状态。

(4) 定义质检报告数据结构 $\text{Report}(b) = \langle t_b, u_b, p_b, h_b, m_b, s_b, e_b \rangle$, 其中包括检测时间 t_b , 检测员 p_b , 检测指标 p_b, h_b, m_b , 状态 s_b 以及报告是否存在标识 e_b 。

(5) 当用户 u 提交报告 $\text{Submit}(u, b, p, h, m)$ 时, 系统自动判断以下规则: 若任一检测值超出相应最大阈值 $p > p_{\max}, h > h_{\max}, m > m_{\max}$, 则 $s_b: = \text{不合格}$ 。若上述条件不满足且报告尚未存在, 即 $\neg e_b$, 则进入下一步判断: 若任一检测值超过 80% 阈值 $p > 0.8 \cdot p_{\max}, h > 0.8 \cdot h_{\max}, m > 0.8 \cdot m_{\max}$, 则 $s_b: = \text{预警}$, 否则 $s_b: = \text{合格}$ 。

(6) 更新并存储报告内容为 $\text{Report}(b): = \langle \text{now}, u, p, h, m, s_b, \top \rangle$, 其中 $\top$ 表示报告已存在。

(7) 查询操作 $\text{Query}(b)$ 返回报告 $\text{Report}(b)$, 前提为 $e_b = \top$, 即该报告存在。

(8) 定义监管者集合 $\text{Regulator} \subseteq U$ 。

(9) 阈值更新函数 $\text{SetThreshold}(u, x, v)$ 仅允许监管者 $u \in \text{Regulator}$ 调用, 参数 $x \in \{p, h, m\}$ 指示修改指标种类, $v \in R^+$ 为新阈值。若满足条件, 则相应最大阈值被更新为 $p'_{\max}, h'_{\max}, m'_{\max}$ 。

以上算法可实现对质检数据的提交、状态判断、存储、

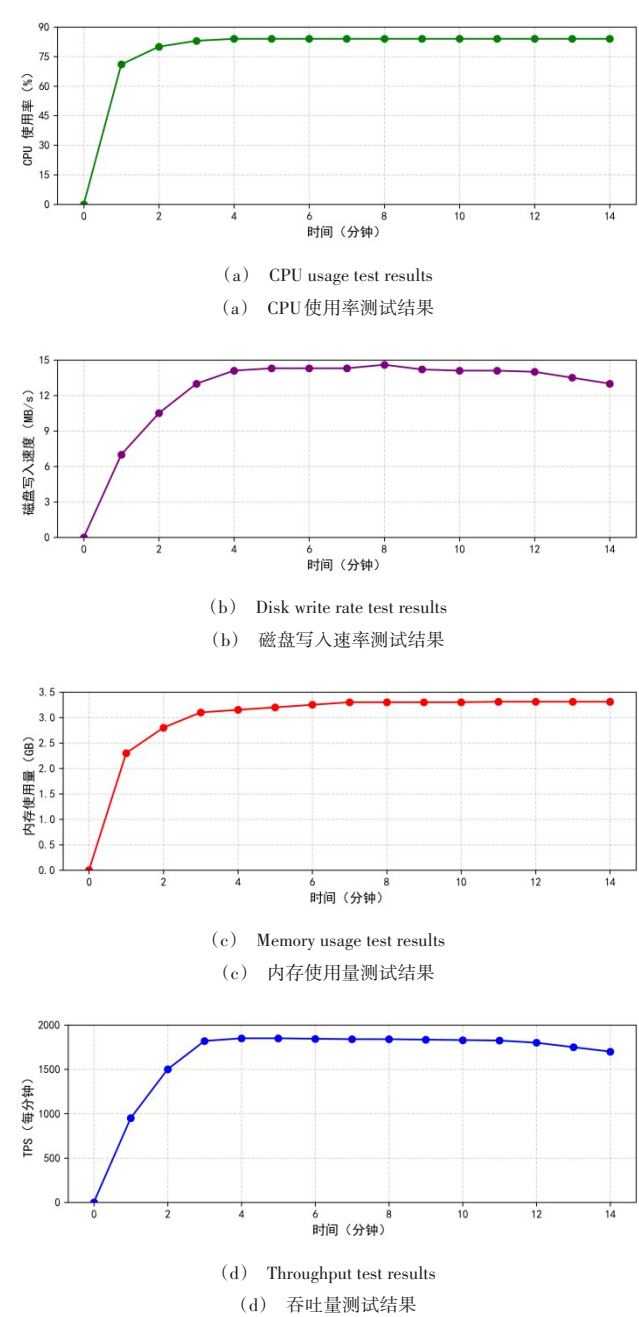


Fig. 5 System test results
图5 系统测试结果

3.3.2 比较分析

为评估蒜黄产品溯源系统在不同区块链架构下的性能表现,本文基于统一的测试环境(虚拟机配置为2核CPU、4 GB内存,区块容量设定为500笔交易)对FISCO BCOS与Hyperledger Fabric进行比较实验。测试采用JMeter工具模拟并发交易,重点分析系统吞吐能力、交易延迟分布及资源利用率。在FISCO BCOS测试中,联盟链由3个节点构成。如表3所示,该系统平均TPS达1 905.67,峰值为1 925,99%的交易延迟控制在586.67 ms以内,整体响应稳定且高效。在资源利用方面,系统CPU占用率始终低于90%,内存消耗不超过3.5 GB,表明该架构在高并发条件下具备良好的资源调度能力与可扩展性。

Hyperledger Fabric架构包含1个Orderer、2个Org以及4个Peer节点。实验结果如表4所示。该架构在相同硬件配置下的平均TPS仅为180,响应延迟显著增加,最高可达1 550 ms,并出现0.05%~0.15%的交易错误率。究其原因,系统性能受限主要源于其多阶段背书机制、复杂的通道管理及账本同步流程,导致整体开销较大。

综上所述,FISCO BCOS通过引入高效的PBFT共识机制与并发优化策略,显著提升了资源受限环境下的吞吐效率和响应能力,优于Hyperledger Fabric在同样测试环境下的表现。因此,FISCO BCOS更契合蒜黄溯源场景对实时性、高并发与数据一致性的综合需求。

3.3.3 功能实现

用户在溯源平台输入唯一的溯源码后,系统会调用区块链智能合约接口,从链上链下双重检索存储的产品全生命周期数据,并以结构化形式返回查询结果。这一双重数据管理体系全面覆盖蒜黄产品从种植、加工、配送、销售、质检和监管的各个环节,确保全流程数据的透明性和不可篡改性。同时,系统还实现了蒜黄产品的基础信息管理,包括蒜黄编号、种植地、种植周期等关键数据的记录与维护,如图6所示,该平台使用去中心化技术确保供应链各环节数据的不可篡改性与透明性,有效提高了农产品安全性与溯源效率。消费者可实时溯源产品来源,增强信任感。监管部门更便捷地监督交易与质量信息,保障食品安全,提升产品市场竞争力。

Table 3 FISCO BCOS experimental results
表3 FISCO BCOS实验结果

标签	数量	平均时间/ms	中位数时间/ms	90%/ms	95%/ms	99%/ms	Min/ms	Max/ms	Erro/%	吞吐量/TPS
label1	12 500	285.00	270.00	380.00	410.00	580.00	45.00	620.00	0.00	1 902.00
label2	12 500	298.00	285.00	395.00	430.00	650.00	50.00	720.00	0.00	1 890.00
label3	12 500	275.00	260.00	360.00	390.00	530.00	40.00	590.00	0.00	1 925.00
平均值	12 500	286.00	271.67	378.33	410.00	586.67	45.00	643.33	0.00	1 905.67

4 结语

基于区块链的蒜黄质量溯源系统采用FISCO BCOS联盟链架构,结合IPFS文件系统,确保蒜黄种植、加工、运输

等环节数据的全流程透明性与不可篡改性。通过引入智能合约,系统可实现自动化质量监控与高效率数据管理,增强溯源过程的可靠性和消费者的信任度;区块链技术的引入有效解决了传统溯源系统中数据易篡改和信息不对称的问题。该系统不仅为蒜黄产业的质量监管提供了重

Table 4 Hyperledger Fabric experimental results

表 4 Hyperledger Fabric 实验结果

标签	数量	平均时间/ms	中位数时间/ms	90%/ms	95%/ms	99%/ms	Min/ms	Max/ms	Erro/%	吞吐量/TPS
label1	12 500	716.00	700.00	1 200.00	1 350.00	1 500.00	700.00	1 550.00	0.10	180
label2	12 500	746.00	730.00	1 250.00	1 400.00	1 520.00	700.00	1 580.00	0.15	180
label3	12 500	690.00	670.00	1 180.00	1 320.00	1 480.00	700.00	1 530.00	0.05	180
平均值	12 500	717.33	700.00	1 210.00	1 356.67	1 500.00	700.00	1 553.33	0.10	180



Fig. 6 Data query and analysis

图 6 数据查询与分析

要支持,而且为其他农产品溯源体系的建设提供了参考,具备扩展至更多农产品领域的潜力。然而,该系统在数据采集及时性与精确性方面仍存在提升空间,特别是在种植阶段的农药残留监测方面。此外,尽管联盟链架构可增强数据安全性,不同节点的维护成本和计算负载对中小企业的推广可能构成挑战。为应对随着数据量增加而带来的链上存储压力和计算负载瓶颈,未来可通过优化存储方式和提高共识机制效率的方式来提升系统性能。

参考文献:

- [1] HU S Y. Food safety supervision issues and governance in live streaming marketing[J]. Food & Machinery, 2023, 39(12):65-69.
胡水英. 网络直播营销中的食品安全监管问题与治理[J]. 食品与机械, 2023, 39(12):65-69.
- [2] SMITH C J. Food safety and health—past problems and future solutions[J]. Engineering, 2020, 6(4):384-393.
- [3] SUN Y L, KANG L Y. The resurgence of clenbuterol: when will the pain of food safety end?[J]. China Food Industry, 2021(6):10-13.
孙永立,康凌宇. 瘦肉精重出江湖食品安全之殇何时休[J]. 中国食品工业, 2021(6):10-13.
- [4] GAO Q W. Why is it difficult to supervise "pit pickled vegetables"?[J]. Legal Forum, 2022(3):296-297.
高秦伟. “土坑酸菜”为何监管难[J]. 法治论坛, 2022(3):296-297.
- [5] CHEN J P. Discussion on legal application for rice flavoring additives based on the "3·15" exposed "Thai jasmine rice blended with flavor" incident[J]. China Brand and Anti-Counterfeiting, 2023(3):14-17.
陈晋平. 由“3·15”晚会曝光的“香精勾兑泰国香米”事件谈大米添加香精该适用何种法律进行处罚[J]. 中国品牌与防伪, 2023(3):14-17.
- [6] WU C Z. Consumer health concerns, emotional perception and green food consumption intention: a comparative study of different consumer groups[J]. Journal of Commercial Economics, 2021(23):58-61.
吴粹中. 消费者健康关注、情感感知与绿色食品消费意愿:不同消费群体的比较研究[J]. 商业经济研究, 2021(23):58-61.
- [7] JIA P P, LI D J, JIN H Z, et al. Impact of credibility label structural cues on consumers' purchase intention for healthy food[J]. Nankai Business Review, 2020, 23(2):179-190.
贾培培,李东进,金慧贞,等. 信誉标签结构线索对消费者健康食品购买意愿的影响研究[J]. 南开管理评论, 2020, 23(2):179-190.
- [8] HAN J W, YANG X T. Smart supply chain of agricultural products: connotation, key technologies and future directions[J/OL]. Smart Agriculture (Chinese & English), 2025-03-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1681.S.20250501.1202.002.html>.
韩佳伟,杨信廷. 农产品智慧供应链:内涵、关键技术与未来方向[J/OL]. 智慧农业(中英文), 2025-03-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1681.S.20250501.1202.002.html>.
- [9] WANG L, REN J R, WANG T, et al. Design and implementation of an anti-counterfeiting traceability system for grain based on blockchain[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(4):1625-1634.
王莉,任健荣,王涛,等. 基于区块链的粮食防伪溯源系统的设计与实现[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(4):1625-1634.
- [10] LI D K, XU D M, SUN C H, et al. Design of a sweet potato quality and safety traceability system based on blockchain[J]. Software Guide, 2022, 21(12):110-115.

- 李登奎,徐大明,孙传恒,等. 基于区块链的甘薯质量安全追溯系统设计[J]. 软件导刊,2022,21(12):110-115.
- [11] CHEN F Z, DIAO R H. Design and implementation of climate quality certification and traceability system for characteristic agricultural products based on Chang'an chain [J/OL]. Software Guide, 2025-03-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1671.TP.20250307.1907.002.html>.
- 陈伏政,刁仁宏. 基于长安链的特色农产品气候品质认证与溯源系统的设计与实现[J/OL]. 软件导刊,2025-03-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1671.TP.20250307.1907.002.html>.
- [12] ZHANG J B, KANG S, ZHANG Z Q, et al. Trusted verification mechanism of smart contract behavior for consortium blockchain [J/OL]. Journal of Software, 2025-03-20. <https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.007311>.
- 张建标,康双,张兆乾,等. 面向联盟链的智能合约行为可信验证机制[J/OL]. 软件学报, 2025-03-20. <https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.007311>.
- [13] LU L N, YIN L H, YU X, et al. Research on agricultural scientific data traceability model based on blockchain [J]. Information Science, 2024, 42(11):54-60.
- 陆丽娜,尹丽红,于啸,等. 基于区块链的农业科学数据溯源模型构建研究[J]. 情报科学,2024,42(11):54-60.
- [14] ZHANG X, LIU C X, XU J P, et al. Construction and implementation of multi-chain based whole-process holographic information management model for fruits and vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(6):365-379.
- 张新,刘崇宣,许继平,等. 基于多链的果蔬全程全息信息管理模型构建与系统化实现[J]. 农业机械学报,2024,55(6):365-379.
- [15] BIAN L P, SUN A D, SUN X M, et al. Construction considerations and design scheme of a deep traceability system for agricultural products based on blockchain technology [J]. Journal of Jiangsu Agriculture, 2022,38(4):1092-1098.
- 卞立平,孙爱东,孙晓明,等. 基于区块链技术的农产品深度溯源系统建设思考和设计方案[J]. 江苏农业学报,2022,38(4):1092-1098.
- [16] LIU S Y, LEI M Y X, XU L Q, et al. Research on credible traceability system for agricultural product quality and safety based on blockchain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(6):327-337.
- 刘双印,雷墨馨兮,徐龙琴,等. 基于区块链的农产品质量安全可信溯源系统研究[J]. 农业机械学报,2022,53(6):327-337.
- [17] WU D L, RAO Y. Design of a blockchain-based information storage and traceability model for fruits and vegetables based on identity authentication [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39 (2) : 434-443.
- 伍德伦,饶元. 基于身份验证的果蔬区块链信息存储溯源模型设计[J]. 江苏农业学报,2023,39(2):434-443.
- [18] CAO S, XU H, BRYCESON K P. Blockchain traceability for sustainability communication in food supply chains: an architectural framework, design pathway and considerations [J]. Sustainability, 2023, 15 (18) : 13486.
- [19] ANDRY A, SRI W, PUSPITA W, et al. Blockchain traceability model in the coffee industry [J]. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 2023, 9(1): 100008.
- [20] ZHOU K, CHEN F, LU T Y, et al. A review of consensus algorithms in blockchain [J/OL]. Computer Science, 2025-03-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.TP.20250317.1848.036.html>.
- 周凯,陈福,鲁添元,等. 区块链共识算法综述[J/OL]. 计算机科学, 2025-03-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.TP.20250317.1848.036.html>.
- [21] SUN C H, WEI Y R, XING B, et al. Research on anti-counterfeiting traceability of seed potatoes based on smart contracts and digital signatures [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(7): 392-403.
- 孙传恒,魏玉冉,邢斌,等. 基于智能合约和数字签名的马铃薯种薯防窜溯源研究[J]. 农业机械学报,2023,54(7):392-403.

(责任编辑:尹晨茹)