

# 区块链增强果蔬质量追溯可信度方法研究与系统实现

弋伟国<sup>1</sup> 何建国<sup>1,2</sup> 刘贵珊<sup>2</sup> 康宁波<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学物理与电子电气工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学食品与葡萄酒学院, 银川 750021)

**摘要:** 质量追溯相关数据通过物联网感知设备采集后添加到区块链, 在数据存储环节可以解决数据易被篡改问题从而增强数据可信度。数据直接存储在区块链中会造成系统吞吐量小、响应时间长, 利用“数据库+区块链”的双存储设计虽然能大大提高响应速度, 但是针对果蔬质量追溯系统, 其响应速度依然不能满足要求。基于哈希加密算法的不可逆性、区块链数据结构天然的不可篡改性 and Hyperledger Fabric 平台完善的成员管理机制在数据存储环节增强了数据可信度, 针对果蔬质量追溯的特点设计了数据哈希值二次上链和验证的方法, 改进了“数据库+区块链”的双存储设计, 改进后的方法在数据查询方面时间复杂度由原来的线性阶降低为常数阶。通过试验发现, 所设计的系统能够实现数据无法篡改进而提高数据可信度, 改进后的方法在数据查询方面效率大幅提升, 平均查询用时为 0.066 s, 且随着数据条数增加查询用时基本保持不变, 解决了区块链技术应用在果蔬质量追溯系统中查询效率低的问题。基于 Hyperledger Fabric 平台, 利用改进后的方法开发实现了果蔬质量追溯系统, 并取得了较好的应用效果。

**关键词:** 果蔬; 质量追溯; 区块链; 哈希值; Hyperledger Fabric

**中图分类号:** TS207.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)02-0309-07

**OSID:**



## Development and Implementation of Blockchain to Enhance Traceability and Reliability of Fruit and Vegetable Quality

YI Weiguo<sup>1</sup> HE Jianguo<sup>1,2</sup> LIU Guishan<sup>2</sup> KANG Ningbo<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2. School of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Quality-related data collecting by the Internet of things sensing device was added to the blockchain, which could solve the problem of data being easily tampered and increase the data credibility in the storage link. However, data stored directly in the blockchain can result in low system throughput and long response time. The dual storage design of “database + blockchain” can greatly improve the response speed, but its response speed still cannot meet the demand. Aiming to improve the dual-storage design of “database + blockchain” by using the method of data Hash value secondary chain and verification based on the characteristics of fruit and vegetable quality traceability. The time complexity of the improved method was reduced from linear order to constant order in terms of data query. The results showed that the efficiency of the improved method was greatly enhanced. The average query time was 0.066 s. And the query time could remain constant as the increase of data items, which solved the problem of low query efficiency for the application of blockchain technology in the fruit and vegetable quality traceability system. According to Hyperledger Fabric platform, the improved method was used to realize the development of fruit and vegetable quality traceability system, which achieved good demonstration effect when it was applied to fruit and vegetable enterprises.

**Key words:** fruits and vegetables; quality traceability; blockchain; Hash value; Hyperledger Fabric

收稿日期: 2021-10-17 修回日期: 2021-11-22

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大科技项目(2018BCF01001)

作者简介: 弋伟国(1991—),男,助教,主要从事农业信息化研究, E-mail: ywg@nxu.edu.cn

通信作者: 刘贵珊(1979—),男,副教授,博士,主要从事食品科学与工程研究, E-mail: liugs@nxu.edu.cn

## 0 引言

果蔬供应链往往涉及农业种植企业、物流公司、监管部门、消费者等多个参与实体,追溯过程具有点多、线长、面广的特点<sup>[1]</sup>,追溯数据具有多源异构的特点,过程复杂度高和数据耦合性强使果蔬质量追溯体系的建立尤为困难。文献[2]提出利用人工智能技术降低追溯过程断链程度;文献[3]提出通过区块链技术重新构建追溯体系,完成追溯信息的上链管理,形成农产品供应链联盟系统内的信息可溯源;文献[4]提出的链上链下追溯信息双存储设计,降低区块链数据存储的负载。利用区块链技术解决质量追溯系统可信度低、链条不完整、存在信息孤岛等问题已成为业内共识。

目前果蔬质量追溯体系存在的问题是各参与方对数据的信任度较低,供应链各参与实体之间处于一种博弈关系,各个实体间信息不对称,造成对追溯数据的信任度低和信任成本高<sup>[5]</sup>。传统质量追溯系统应用中心化数据库,追溯过程各个环节的数据由企业自主管理,存在信息丢失和被篡改的可能,产生纠纷时举证困难、责任难以明确<sup>[6]</sup>,增强追溯数据的可信度是目前亟需解决的技术问题<sup>[7]</sup>。

在增强追溯数据的可信度研究方面,一些学者进行了研究<sup>[8-12]</sup>,近些年来针对质量追溯数据可信度增强方法研究主要集中在通过物联网数据采集设备减少数据采集环节的人为干预,通过非对称加密算法防止数据传输过程篡改,在数据存储和处理端采用分布式系统多节点共同验证来保证数据真实性。随着区块链技术的发展,利用区块链天然的数据不可伪造篡改能力保证质量追溯系统数据可信度的研究越来越多,但是区块链平台数据读取速度慢的特点使其应用在果蔬质量追溯这种需要大量读取数据的系统时往往受到限制,因此需要结合实际应用特点研究保证数据可信并提高数据读取效率的解决策略<sup>[13-18]</sup>。

本文针对果蔬质量追溯系统数据可信度低的问题,将区块链技术应用到果蔬质量追溯系统,利用二次上链方法提高查询效率,通过试验验证并应用到果蔬质量追溯系统中,研究提升果蔬质量追溯系统可信度和提高果蔬质量追溯查询效率的方法。

## 1 可信追溯方法研究

### 1.1 追溯流程

将果蔬质量追溯从供应链角度划分为种植、仓储、物流和销售环节。种植环节包括播种、施肥、除草、浇水、收割、采摘等作业,需具备记录产地信息、

田地环境变量、作业时间、作业人员、农资信息、完成进度、作业照片等功能;仓储环节需记录果蔬入库时间、出库时间、冷库温湿度;物流环节需记录果蔬打包上车时间、物流过程物流车 GPS 定位和冷链温湿度;销售环节能够记录果蔬销售城市和分销地点。

如图1所示,从追溯流程角度要实现正向查询和反向追溯,消费者通过扫描果蔬包装上的二维码能够查询果蔬从种植到销售的可视化数据并对产品进行评价和投诉,在果蔬出现质量问题时监管部门和供应链参与机构能够反向追溯导致果蔬质量问题的环节和因素;从数据可信角度供应链参与实体能够提交数据,并能够保证提交的数据是多方可信的。果蔬在进入销售环节追溯链形成后追溯数据基本确定,此时如果完成数据可信验证将会大大减少消费者查询用时,提高系统响应速度。

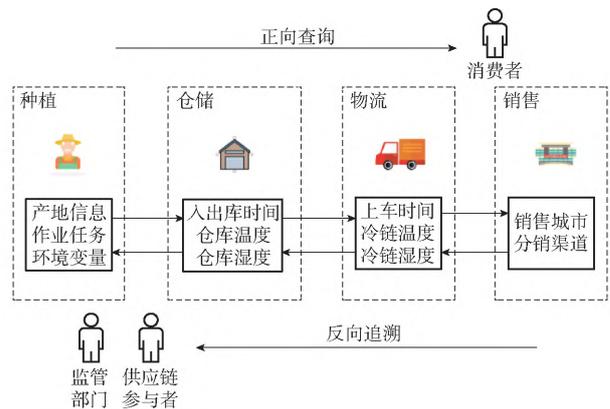


图1 查询和追溯过程

Fig. 1 Query and trace process

### 1.2 数据存储与验证方法

质量追溯系统中的数据是实时产生的,田间气象站和冷库及物流车上安装的感知设备产生的数据是基于时间序列的,这些数据需要实时存储,如果将完整数据直接存储在区块链系统中会造成系统阻塞。可以采用“数据入库+哈希值上链”的方式,保存数据时将原始数据存储在数据库中,将原始数据的哈希值添加到区块链上;读取数据时先读取数据库中的数据并计算哈希值,然后从区块链中查询该数据的哈希值,将计算的哈希值与区块链上的哈希值进行比对,即可验证数据是否被篡改。

“数据入库+哈希值上链”的方法在数据量小且对响应时间要求不高的情况下能够满足要求,但是果蔬质量追溯系统需要追溯果蔬全生命周期的所有数据,消费者进行一次追溯查询操作涉及农田环境、种植作业、仓储和物流等多个环节,需要查询多条记录。从区块链获取哈希值进行比对验证非常消耗系统资源和时间,尤其在消费者追溯环节对系统响应时间极高,系统延时会严重影响到用户使用体验。

本文在“数据入库 + 哈希值上链”方法的基础上通过数据哈希值二次上链和验证进行了改进。具体步骤为:

(1) 数据保存。数据保存到数据库后计算数据哈希值,并将哈希值添加到区块链,完成第 1 次上链;在这个步骤中,数据输入可异步完成,无需用户或感知设备等待,对响应时间要求低,计算哈希值并添加到区块链中造成的等待时间对系统性能影响较小。

(2) 提前验证并将数据打包上链。在果蔬销售环节追溯流程结束后追溯链形成,追溯数据已确定,追溯链相关数据在步骤(1)中已全部添加到数据库和区块链中。系统自动读取追溯链涉及的所有数据,并与区块链上的数据比对验证数据是否被篡改,完成第 1 次验证,验证结束后对所有数据打包后再次计算哈希值  $h_1$ ,并把哈希值  $h_1$  添加到区块链,完成第 2 次上链。

(3) 数据追溯。从数据库读取本次追溯涉及的所有数据,打包计算数据哈希值  $h_2$ ,再从区块链获取数据哈希值  $h_1$ ,对比  $h_1$  和  $h_2$  是否相等即可验证数据的真实性,完成第 2 次验证。这个步骤中追溯果蔬质量相关数据时,用户处于等待状态,对系统响应时间要求高,需要较快的数据查询速度。

### 1.3 理论分析

#### 1.3.1 数据可信度

数据在存储环节的不可篡改性是数据可信的重要基础,在数据存储到数据库之前利用 MD5 算法计算数据哈希值,在追溯链形成后把追溯链中涉及的数据和哈希值逐条验证,通过后将所有数据打包再利用 MD5 算法计算数据哈希值。

MD5 算法将数据按 512 位为 1 组进行分组,分组后又划分为 16 个 32 位子分组。对于每个子分组的计算由 4 圈组成,每圈有 16 步,每圈的运算中包括 4 个非线性函数,即

$$\begin{cases} f_1(X, Y, Z) = (X \& Y) \vee (\bar{X} \wedge Z) \\ f_2(X, Y, Z) = (X \& Z) \vee (Y \& \bar{Z}) \\ f_3(X, Y, Z) = X \wedge Y \wedge Z \\ f_4(X, Y, Z) = X \vee \bar{Y} \wedge \bar{Z} \end{cases} \quad (1)$$

算法的最终输出由 4 个 32 位分组组成,将这 4 个 32 位分组合级联后生成一个 128 位散列值为最终结果<sup>[19]</sup>。从算法过程和非线性函数可以看出 MD5 算法是对原始数据的有损压缩计算,无论原始数据多长都会生成一个长度为 128 位的哈希值。

有研究表明通过一定的碰撞试验可以产生相同哈希值的原数据<sup>[20]</sup>,但是本文通过两次哈希值计算

并且数据具有一定的实际意义和特定的数据格式,通过碰撞产生的原始数据是随机的,经过程序的格式检测即可判断出真伪。

以上分析证明了通过把数据哈希值存储在区块链,原始数据存储在数据库,无法在哈希值不变的情况下修改原始数据,但是篡改原始数据的同时修改对应的哈希值可以实现数据篡改,下面将分析如何保证哈希值的不可篡改。

在区块链系统中每个哈希值生成一个数据区块<sup>[21]</sup>,如图 2 所示每个数据区块包含区块头和区块体两部分:区块头封装了前一区块哈希值、当前区块的哈希值、当前区块随机数、Merkle 根以及时间戳等信息<sup>[22]</sup>;区块体包括当前区块的交易以及经过验证的区块创建过程中生成的所有交易记录,对于本文来说交易记录就是原始数据的哈希值,这些记录最终生成唯一的 Merkle 根记入区块头<sup>[23]</sup>。通过每个区块存储前一个区块的哈希值使区块首尾相连形成区块链,当区块链中任意区块的信息被篡改则所有区块的哈希值必然发生改变,以此来保证区块链上数据不可篡改。

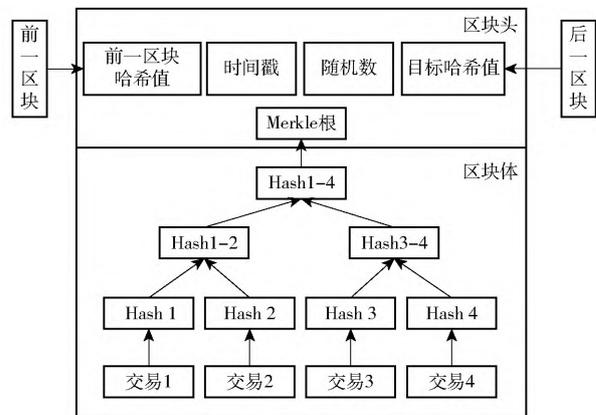


图 2 区块结构图

Fig. 2 Structure diagram of block

#### 1.3.2 存储效率

普通方法在追溯查询环节需要从区块链读取追溯相关数据的哈希值并从数据库中读取相关数据逐条计算哈希值,改进后的方法只需从区块链读取一次哈希值后从数据库读取所有相关数据并打包计算哈希值对比验证,两种方法的用时计算公式为

$$\begin{cases} T_1 = nt_1 + t_2 \\ T_2 = t_1 + t_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $T_1$ ——普通方法用时

$T_2$ ——改进后的方法用时

$n$ ——数据哈希值个数

$t_1$ ——从区块链读取一条数据哈希值用时

$t_2$ ——从数据库关联查询多条数据用时



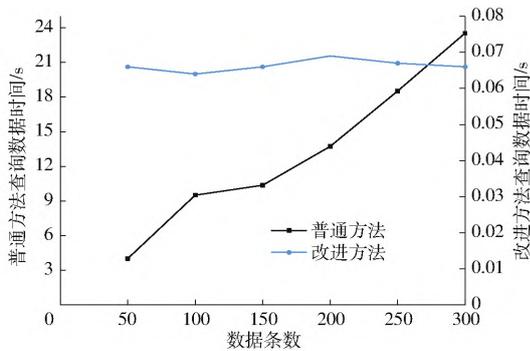


图 5 普通方法和改进方法在不同数据条数下查询数据时间对比

Fig. 5 Comparison of data query time of common method and improved method under different data pieces

层架构及工具有 Java、JavaScript、Node.js、Spring、SpringMVC、MyBatis、Express、Hyperledger Fabric、MySql、Maven、Tomcat、Git 等;从功能上可将系统分为管理平台、数据平台和追溯客户端 3 个子系统,追溯系统管理平台和数据平台服务端开发语言采用 Java,使用 Spring、SpringMVC、MyBatis(经典的 SSM 框架)分别作为软件系统的 IoC 和 AOP 容器、MVC 架构、数据持久化工具,浏览器端采用 HTML、JavaScript、CSS 等前端编程语言实现,项目构建采用 Maven,Web 容器采用 Tomcat;追溯客户端服务端采用 Node.js 语言开发,使用 Express 框架,追溯客户端之所以采用基于 Node.js 环境开发而没有采用 Java,主要是因为追溯客户端后端业务相对简单,主要是数据渲染,对系统响应时间要求较高,Node.js 以非阻塞方式处理输入/输出,这意味着单个线程可以同时管理多个输入/输出请求,无需等待一个请求完成即可开始处理其他请求,响应速度较快;3 个子系统的数据存储数据库选用 MySQL,区块链平台选用 Hyperledger Fabric。

## 2.2 系统开发

### 2.2.1 区块链搭建

Fabric 系统分为种植机构、仓储机构、物流机构和监管部门 4 个组织,每个组织内都包含承担不同功能的 Peer 节点。如图 6 所示,每个组织都有各自对应的 Fabric-ca 服务器负责动态生成 Fabric 的账号,Committer Peer 接收生成的交易区块,Leader Peer 负责将交易从排序节点分发到组织中的其他节点,Endorse Peer 在满足背书策略的条件下对交易进行确认,Anchor Peer 负责与其他组织中的节点进行通信,所有的组织共用一个统一的 Orderer 集群,Kafka 是一个分布式消息队列系统,负责打包数据。

每个参与方都可以向 Fabric 系统中添加数据,

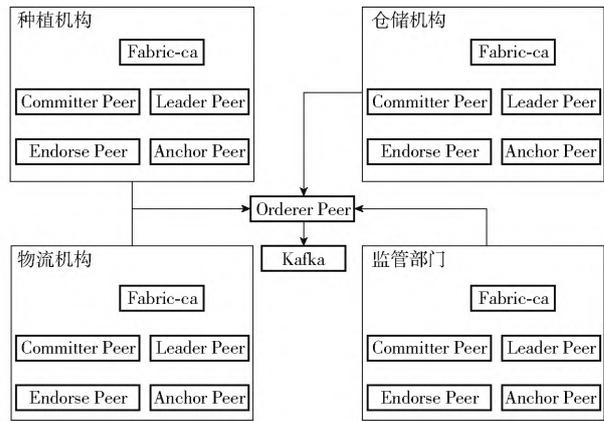


图 6 Fabric 系统结构图

Fig. 6 Fabric system structure diagram

并通过 Gossip 广播协议同步到其他节点,当一个节点接收到交易信息后,随机选择  $x$  个节点同步消息,节点收到信息后,更新数据,这样使得每个节点都能维持完整的链上数据,且不需要节点时刻处于连接状态,还能处理节点故障和拜占庭问题<sup>[24]</sup>。

### 2.2.2 硬件系统搭建

在农田安装气象环境监测站感知农田环境因子。气象站由数据采集器、环境传感器、视频监控系、物联网数据传输模块组成,主机电源供电方式采用户外太阳能供电和内置锂电池组供电,数据采集模块采用 MODBUS485 通信,自动识别各类型支持 485 通信的传感器,最多可采集 256 个传感器数据,目前可采集空气温度、露点温度、空气湿度、光照强度、大气压力、风速、风力、风向、降水量、土壤温度和土壤湿度。主机采取的多种远程数据传输方式,能够通过以太网、WiFi 或 4G 网络将数据实时传输到数据平台。

### 2.2.3 软件系统开发

管理系统部分工作界面如图 7 所示,用户角色分为系统管理员和业务管理员,系统管理员是负责维护系统的工作人员,具有最高权限,业务管理员是种植机构、仓储机构、物流机构和监管部门工作人员;管理员可在企业管理界面根据业务实际需要添加企业,消费者可以通过扫描追溯码查看企业名称、描述、地点和照片;使用气象站、冷库和物流车感知



图 7 果蔬质量追溯管理平台部分界面

Fig. 7 Partial interface of fruit and vegetable quality traceability platform

设备之前需由业务管理员将设备信息添加到系统中,包括设备名称、设备类型、支持的网络类型、通信协议、硬件 ID; 果蔬存在一年收获多茬的情况, 批次管理为了区分同一块农田种植的多茬果蔬, 在果蔬种植前种植机构管理员需在系统中添加批次。

图 8 为气象站检测农田光照强度的曲线图, 另外还可检测空气温湿度、露点温度、大气压力、风速、降水量、土壤温湿度、冷库和物流车门开关状态、物流车 GPS 位置等信息, 针对每个指标可以设置预警值, 当达到预警值时会通过短信将预警信息推送给管理人员。

消费者追溯客户端界面如图 9 所示, 消费者可以通过扫描包装上的二维码查询果蔬种植企业信

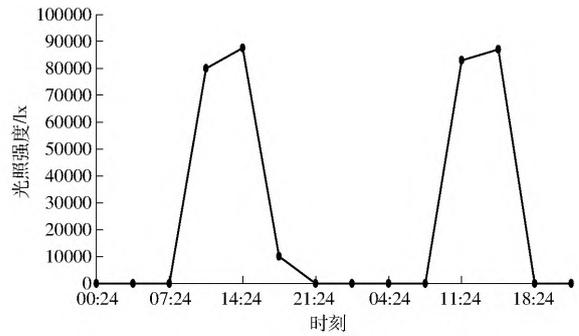


图 8 物联网平台数据检测曲线

息、企业位置、种植过程、物流信息、农田环境信息、冷库温湿度和物流车温湿度, 并能对果蔬进行评价和投诉。



图 9 追溯客户端界面

Fig. 9 Traceability client interface

如图 10 所示, 消费者在数据验证界面可以从数据库中获取本次追溯查询的所有原始数据, 从区块链中获取本次追溯查询的哈希值, 该页面还可以计算原始数据的哈希值, 消费者通过计算原始数据哈

希值后与从区块链获取的哈希值比较, 如果相等则说明原始数据未被篡改, 如不同则说明数据被篡改。

### 2.3 应用与示范

将本文研究的系统应用在宁夏鑫茂祥现代农业发展有限公司, 该企业主要从事宁夏回族自治区供港菜心和芥蓝的生产, 其两家子公司从事供港蔬菜的贮藏和运输。本文研究的果蔬质量追溯系统有效地提高了供港蔬菜的品牌效益, 起到了质量控制效果。

### 3 结论

(1) 基于区块链的数据哈希值二次上链和验证方法增强了果蔬质量追溯系统数据存储可信度, 能够保证质量追溯多个参与实体之间数据的真实性, 同时解决了区块链存储果蔬质量追溯数据时消费者追溯查询用时过长问题, 追溯查询算法时间复杂度由线性阶降低为常数阶, 消费者追溯查询用时控制



图 10 数据验证页面

Fig. 10 Data validation interface

在 0.066 s 左右,在数量条数为 300 时,查询用时是普通方法的 0.29%,随着数据条数的增加查询时间基本保持不变。

(2) 基于 Hyperledger Fabric 平台,采用 Kafka 共

识机制,使用 JavaWeb、Node.js 等技术开发质量追溯系统具有很高的可行性,本文的实现方案和技术细节为开发区块链相关应用提供了方案设计和技术实现方面的参考依据。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘晓云,王晓春.“物联网+区块链”的农产品质量溯源体系研究[J].常州工学院学报,2018,31(5):60-65.  
LIU Xiaoyun,WANG Xiaochun. Research on the traceability system of agricultural product quality based on “Internet of Things + Block Chain” [J]. Journal of Changzhou Institute of Technology,2018,31(5):60-65. (in Chinese)
- [2] 郑立华,冀荣华,王敏娟,等.农产品追溯统一编码方案设计与应用[J].农业机械学报,2019,50(增刊):385-392.  
ZHEN Lihua,JI Ronghua,WANG Minjuan, et al. Design and application of traceable unified coding scheme for agricultural products [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):385-392. (in Chinese)
- [3] 付东波,陈峰,杨胜明,等.区块链农产品质量追溯系统的实现与应用[J].农场经济管理,2021(7):19-24.  
FU Dongbo,CHEN Feng,YANG Shengming, et al. Implementation and application of blockchain agricultural product quality traceability system [J]. Farm Economic Management,2021(7):19-24. (in Chinese)
- [4] 杨信廷,王明亭,徐大明,等.基于区块链的农产品追溯系统信息存储模型与查询方法[J].农业工程学报,2019,35(22):323-330.  
YANG Xinting,WANG Mingting,XU Daming, et al. Data storage and query method of agricultural products traceability information based on blockchain [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 323-330. (in Chinese)
- [5] TRUONG N,LEE G M,SUN K, et al. A blockchain-based trust system for decentralised applications: when trustless needs trust [J]. Future Generation Computer Systems,2021,124:68-79
- [6] 张海涛,王锋,张健,等.基于可追溯系统的水产品供应链结构优化机制及管理模式[J].中国渔业经济,2008,26(6):48-53.  
ZHANG Haitao,WANG Feng,ZHANG Jian, et al. Application of traceable system in seafood supply chain [J]. Chinese Fisheries Economics,2008,26(6):48-53. (in Chinese)
- [7] CARO M P,ALI M S,VECCHIO M, et al. Blockchain-based traceability in agri-food supply chain management: a practical implementation [C]//2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture-Tuscany (IoT Tuscany). IEEE, 2018: 1-4.
- [8] 代纪磊.基于区块链与物联网耦合的DLS公司生鲜猪肉质量追溯体系研究[D].济南:山东大学,2019.  
DAI Jilei. Research on fresh pork quality traceability system of DLS company based on blockchain and internet of things coupling [D]. Jinan: Shandong University,2019. (in Chinese)
- [9] 王可可,陈志德,徐健.基于联盟区块链的农产品质量安全高效追溯体系[J].计算机应用,2019,39(8):2438-2443.  
WANG Keke,CHEN Zhide,XU Jian. Efficient traceability system for quality and safety of agricultural products based on consortium blockchain [J]. Journal of Computer Applications,2019,39(8):2438-2443. (in Chinese)
- [10] 施明毅,刘崇玉,温川飙,等.基于区块链与NB-IOT物联网的中药材流通质量追溯系统的设计与研发[J].中国中药杂志,2020,45(17):4267-4272.  
SHI Mingyi,LIU Chongyu,WEN Chuanbiao, et al. Design and development of quality traceability system for circulation of Chinese herbal medicine based on blockchain and NB-IOT [J]. China Journal of Chinese Materia Medica,2020,45(17):4267-4272. (in Chinese)
- [11] NYALETEY E, PARIZI R M, ZHANG Q, et al. BlockIPFS-blockchain-enabled interplanetary file system for forensic and trusted data traceability [C]//2019 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain). IEEE, 2019: 18-25.
- [12] MAOUCHE M E,ERSOY O,ERKIN Z. DECOUPLES: a decentralized, unlinkable and privacy-preserving traceability system for the supply chain [C]//Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing,2019: 364-373.
- [13] HUANG J, KONG L, CHEN G, et al. B-IoT: blockchain driven internet of things with credit-based consensus mechanism [C]//2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE, 2019: 1348-1357.
- [14] SALAH K, NIZAMUDDIN N, JAYARAMAN R, et al. Blockchain-based soybean traceability in agricultural supply chain [J]. IEEE Access, 2019, 7: 73295-73305.
- [15] YU B, ZHAN P, LEI M, et al. Food quality monitoring system based on smart contracts and evaluation models [J]. IEEE Access,2020,8: 12479-12490.
- [16] SRIVASTAVA A, DASHORA K. A fuzzy ISM approach for modeling electronic traceability in agri-food supply chain in India [J/OL]. Annals of Operations Research, <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04072-6>.
- [17] KAMILARIS A, FONTS A, PRENAFETA-BOLDU F X. The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 91(1): 640-652.
- [18] 孙传恒,于华竟,徐大明,等.农产品供应链区块链追溯技术研究进展与展望[J].农业机械学报,2021,52(1):1-13.  
SUN Chuanheng,YU Huajing,XU Daming, et al. Review and prospect of agri-products supply chain traceability based on blockchain technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(1):1-13. (in Chinese)
- [19] UR REHMAN A, XIAO D, KULSOOM A, et al. Block mode image encryption technique using two-fold operations based on chaos, MD5 and DNA rules [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(7): 9355-9382.

(下转第345页)

- Advances in Earth Science, 2016, 31(1): 14–22. (in Chinese)
- [18] 王丹丹, 吴普特, 赵西宁. 黄土高原退耕还林(草)效益评价研究进展[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 223–228.  
WANG Dandan, WU Pute, ZHAO Xining. Benefit evaluation of conversion of cropland of forest project [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(3): 223–228. (in Chinese)
- [19] 韦景树, 李宗善, 冯晓娟, 等. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2433–2444.  
WEI Jingshu, LI Zongshan, FENG Xiaoyu, et al. Ecological and physiological mechanisms of growth decline of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2433–2444. (in Chinese)
- [20] 殷淑燕, 黄春长. 黄土高原苹果基地土壤干燥化原因及其对策[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 76–80.  
YIN Shuyan, HUANG Chunchang. Soil dryization of the apple base in the Loess Plateau and its countermeasures [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(2): 76–80. (in Chinese)
- [21] 田璐, 张敬晓, 高建恩, 等. 深层干化土壤水分恢复试验研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 255–262.  
TIAN Lu, ZHANG Jingxiao, GAO Jian'en, et al. Experiment on dry soil water restoration in deep layer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 255–262. (in Chinese)
- [22] 张岩, 张青春, 刘宝元. 降水变化对陕北黄土高原植被覆盖度和高度的影响[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 268–272.  
ZHANG Yan, ZHANG Qingchun, LIU Baoyuan. Study on vegetative coverage and height variation in Northern Loess Plateau [J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(2): 268–272. (in Chinese)
- [23] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 107–111.
- [24] 胡伟, 陈豫. 黄土高原半干旱区旱作农田土壤干燥化研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(4): 75–79.  
HU Wei, CHEN Yu. Research on soil desiccation on dry farmland in semi-arid area of Loess Plateau [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(4): 75–79. (in Chinese)
- [25] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干燥化效应[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 71–81.  
YANG Lei, WEI Wei, CHEN Liding, et al. Soil desiccation in deep soil layers under different vegetation types in the semi-arid loess hilly region [J]. Geographical Research, 2012, 31(1): 71–81. (in Chinese)
- [26] 李艳梅, 王克勤. 人工植被的土壤水分状况与水分动态研究[J]. 贵州林业科技, 2003, 31(3): 1–7.  
LI Yanmei, WANG Keqin. Research advance of soil water conditions and dynamics of planted forest [J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2003, 31(3): 1–7. (in Chinese)
- [27] 高学睿, 同程晟, 王玉宝, 等. 黄土高原典型区雨水资源化潜力模拟与评价[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 275–283.  
GAO Xuerui, YAN Chengsheng, WANG Yubao, et al. Simulation and evaluation of rainwater harvesting potential in typical areas of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 275–283. (in Chinese)
- [28] 杨洁, 金继明, 邵进, 等. 黄土高原中部典型流域植被恢复对径流的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 258–266, 257.  
YANG Jie, JIN Jiming, SHAO Jin, et al. Vegetation restoration and its impact on runoff in typical areas of middle Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 258–266, 257. (in Chinese)

## (上接第315页)

- [20] WANG X, FENG D, LAI X, et al. Collisions for Hash functions MD4, MD5, HAVAL-128 and RIPEMD [J]. Cryptology Eprint Archive Report, 2004, 2004: 199.
- [21] 史锦山, 李茹. 物联网下的区块链访问控制综述[J]. 软件学报, 2019, 30(6): 1632–1648.  
SHI Jinshan, LI Ru. Survey of blockchain access control in internet of things [J]. Journal of Software, 2019, 30(6): 1632–1648. (in Chinese)
- [22] 李燕, 马海英, 王占君. 区块链关键技术的研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(20): 13–23.  
LI Yan, MA Haiying, WANG Zhanjun. Research progress on key technologies of blockchain [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(20): 13–23. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 孙俊. 基于区块链的农产品追溯系统研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.  
SUN Jun. Research on retrospective system of agricultural products based on blockchain [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019. (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 于合龙, 陈邦越, 徐大明, 等. 基于区块链的水稻供应链溯源信息保护模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 328–335.  
YU Helong, CHEN Bangyue, XU Daming, et al. Modeling of rice supply chain traceability information protection based on blockchain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 328–335. (in Chinese)