

基于区块链的河豚供应链可信溯源优化研究

陈明^{1,2} 孙浩¹ 邹一波^{1,2} 葛艳^{1,2} 陈希¹

(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: 针对河豚供应链环节复杂、监管要求高以及溯源系统信息传递繁杂、数据查询效率低的问题,以提高河豚溯源查询效率和安全性为目的,建立了基于区块链技术的河豚供应链溯源优化模型,并搭建相应系统。首先,对河豚供应链业务供应链信息进行分析,整理并提取供应链各业务环节溯源码信息和产品信息;然后,基于区块链技术建立河豚供应链可信溯源优化模型架构,设计多链的存储模式和快速查询流程并制定相应的智能合约;最后,基于Hyperledger Fabric实现了一种河豚供应链信息溯源系统,并使用Caliper性能测试工具测试。结果表明,在数据记录条数大于1 000条后,本文模型查询效率高于传统单链模型,在10 000条数据记录上链后,本文模型较传统单链模型查询效率提高约92.9%。以江苏省某河豚企业为例,实现河豚供应链信息安全传递和快速溯源。所提出的模型可以应用到河豚行业从而提高溯源效率和安全性,为河豚行业提供一个防篡改、查询效率高的模型。

关键词: 河豚供应链; 区块链; 溯源效率; 智能合约

中图分类号: TP311.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0295-10

OSID:



Trusted Traceability Optimization of Pufferfish Supply Chain
Based on Blockchain

CHEN Ming^{1,2} SUN Hao¹ ZOU Yibo^{1,2} GE Yan^{1,2} CHEN Xi¹

(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: In view of the complex links of the pufferfish supply chain, high regulatory requirements, complicated information transmission in the traceability system, and low data query efficiency, in order to improve the efficiency and security of pufferfish traceability query, a type of pufferfish supply chain traceability optimization model based on blockchain technology was established, and a corresponding system was built. Firstly, the supply chain information of the pufferfish supply chain business was analyzed, the traceability source information and product information of each business link of the supply chain was sorted out and extracted; and then based on the blockchain technology, the trusted traceability optimization model architecture of the pufferfish supply chain was established, and a multi-chain storage mode and fast query process and formulate corresponding smart contracts were designed; finally, a pufferfish supply chain information traceability system was implemented based on Hyperledger Fabric, and tested by using the Caliper performance test tool. The results showed that when the number of data records was greater than 1 000, the query efficiency of the model would be higher than that of the traditional single-chain model. After 10 000 data records were uploaded to the chain, the query efficiency of this model was about 92.9% higher than that of the traditional single-chain model. Taking a pufferfish enterprise in Jiangsu Province as an example, the information security transmission and rapid traceability of the pufferfish supply chain were realized. The proposed model can be applied to the pufferfish industry to improve the traceability efficiency and security, and it can provide a tamper-proof and high query efficiency model for the pufferfish industry.

Key words: pufferfish supply chain; blockchain; traceability efficiency; smart contract

收稿日期: 2021-10-29 修回日期: 2022-01-26

基金项目: 江苏现代农业产业关键技术创新项目(CX(20)2028)

作者简介: 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

河豚是一种剧毒鱼类，特别是肝脏、性腺和血液中含有大量的河豚毒素^[1]，不当处理或错误食用可能会导致中毒。然而由于它肉质美味细腻和营养丰富，自古以来深受食客喜爱^[2]。国家相关部门严禁销售野生河豚、养殖河豚活鱼和未加工整鱼^[3]，但是近年来销售和食用河豚中毒人死亡等事件^[4-6]仍时有发生。河豚不同于其他水产品，根据国家相关规定，河豚产品需拥有明确可溯源标识才可以在市场上流通。传统溯源模型通过数据库存储数据，数据库在上传或更新数据时存在信息篡改的风险。因为河豚溯源信息的分布式存储特性，溯源时需要依次查询供应链的数据库，所以溯源效率较低。这些问题导致传统溯源模型难以应用于河豚供应链，因此河豚行业急需建立一个可靠有效的溯源模型^[7]。

农产品供应链溯源研究中，一些研究结合射频识别设备(Radio frequency identification, RFID)、二维码、同位素技术和移动无线监测等技术，提供了供应链全程溯源系统^[8-11]，建立了供应链食品质量安全溯源体系^[12-14]，实现了农产品可溯源性和食品质量安全性的需求。但传统的溯源技术还存在以下问题：供应链中各个厂商不同的底层平台导致的信息孤岛效应；溯源系统的防篡改能力不足。区块链技术由于其不可篡改和分布式的特点常应用于溯源系统中，其分布式特点可以打破部门壁垒，实现信息共享^[15]。近些年来国内外学者将区块链技术应用到农产品溯源过程中^[16-18]，利用量子密钥分发技术提高数据安全性^[19]，结合危害分析及关键控制点(Hazard analysis and critical control points, HACCP)保障产品安全^[20-21]等。

但是区块链技术牺牲了部分效率来保证数据安全性^[22]，这是因为区块链及其存储方式应用于溯源系统时，需要多次遍历区块链来获取数据，所以导致了溯源查询效率低^[23]，从而限制了区块链在河豚供应链溯源中的应用。针对区块链溯源效率低的问题，杨信廷等^[24]通过区块链溯源模型外接本地数据库的方式存储区块号来实现快速溯源。但溯源的过程中采用本地数据库会削弱区块链的不可篡改性、去中心化、分布式的特点。

本文以提高基于区块链的河豚供应链溯源模型的查询效率为目的，将对河豚业务供应链信息进行分析，整理并提取供应链各业务环节主要信息；基于区块链技术建立河豚供应链溯源存储优化模型，设计多链快速查询模式并制定供应链信息溯源智能

合约，构建河豚供应链信息溯源系统；以江苏省某河豚企业供应链信息为例，进行相应的性能对比测试，以期实现基于区块链河豚供应链模型的快速溯源。

1 相关技术基础

区块链是一种分布式的数字账本，可以通过区块记录多个交易信息，不依赖于单个节点进行安全维护，因此确保了信息的安全性^[25]。区块链由连续的多个区块组成，区块由区块头和区块体组成，区块头中包含区块号、当前区块哈希值、前一区块哈希值、时间戳等数据，区块体中记录了交易详细信息，具体包括交易数量、交易标识码(Identification, ID)、交易双方地址等数据，交易数据通过Merkle树逐级将哈希值传递到根节点，保证了交易具有防篡改特点^[26]。由于区块链计算能力和共识算法相应速度有限，当数据量增加时，其交易吞吐量会快速下降^[27]。交易ID是由一串固定长度的随机Byte种子+证书中的身份信息部分组成的哈希字符串^[28]，交易ID具有唯一性并且具有对应的交易地址，并且采用交易地址可以更快地查询到相应的交易。

智能合约是运行在区块链上的一段计算机程序，在预定条件满足时，能够自动强制地执行合同条款，实现“代码即法律”的目标^[29]。在以太坊公链中，智能合约可同时运行在全网所有节点，任何机构和个人都无法将其强行停止。在联盟链中，因为节点数量的有限性，同时为了提高系统运行效率，节点之间不会竞争记账权，而依据智能合约生成的交易直接记录到区块链中。智能合约扩展了区块链的功能，丰富了区块链的上层应用，依照商业逻辑编写完智能合约代码后，需要将其发布到区块链网络节点上^[23]。

2 河豚供应链业务信息分析

河豚供应链的特点是环节众多，厂商之间相互独立，并且监管部门对河豚的溯源要求较高，导致业务信息数据结构不统一，需要记录和传递的数据量大。本文针对河豚业务信息特点，对河豚供应链从溯源的角度分为养殖、加工、仓储、物流、销售5个阶段，最后进入末端消费者手中，如图1所示。将河豚供应链各环节业务信息分为溯源码信息和一般产品信息。溯源码信息可以实现一码一物相互对应，消费者通过溯源码即可查找到对应的产品信息。产品信息包括厂商信息、合格证明信息。以加工阶段为例，加工厂商对河豚加工环节信息进行记录，以加工批号作为加工阶段溯源码，通过加工溯源码对加工

阶段的业务信息溯源。对河豚产品中河豚毒素残留影响最大的是加工阶段的解剖去毒环节,这个环节工艺水平将会直接影响后续河豚产品的食品安全。所以在加工阶段所需要记录的数据不仅有加工溯源

码、厂商名称、加工时间、加工温度等,还要记录病原微生物、河豚毒素合格证明信息^[30]。河豚供应链业务信息分析可以为后续建立河豚供应链溯源模型提供基础。

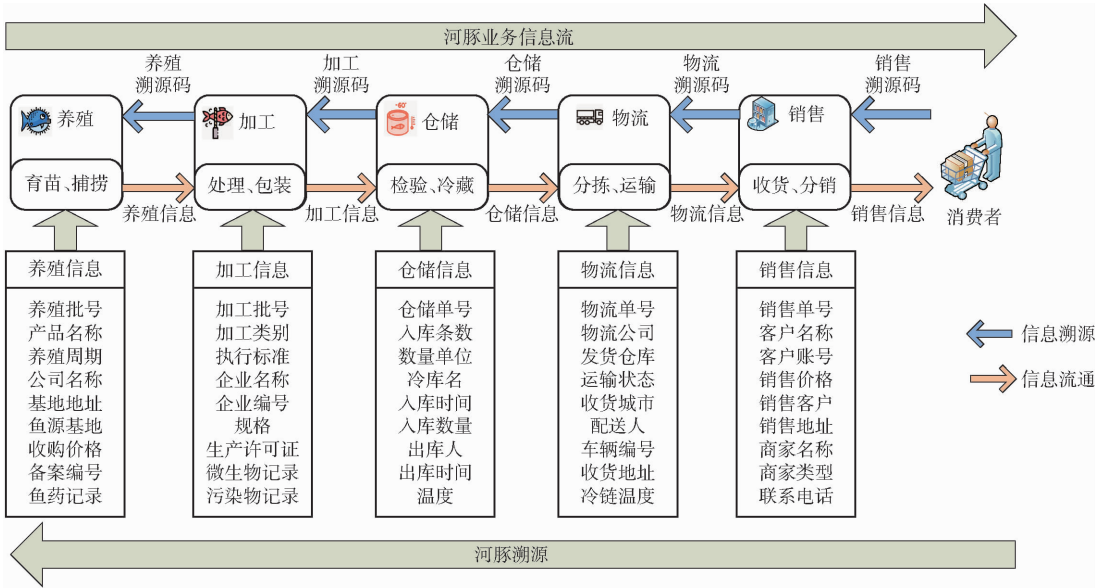


图 1 河豚供应链溯源业务信息

Fig. 1 Tracing business information of pufferfish supply chain

3 多链河豚溯源优化模型构建

3.1 河豚供应链溯源优化模型架构

一般区块链溯源模型在利用单链结构上链时,不同环节的数据需要分开上链,各环节上链数据不会连续地存在区块上,导致查询时需要顺序遍历整条链才能查找到全部溯源数据,随着数据量的增加,顺序遍历的速度会线性增加,从而使得查询速度变慢^[31]。本文针对河豚供应链特点,结合实际溯源的需求,基于区块链和智能合约技术,搭建河豚供应链信息溯源模型,如图 2 所示。信息溯源模型统一管理供应链所有生产环节的信息,将映射关系根节点信息存储到主链中,叶子节点信息存储到子链中,来实现快速溯源查询。模型在去中心化的环境中存储了所有生产环节厂商的数据以及关联信息,这样既保障了溯源数据的防篡改、可信性、安全性,同时保证了溯源查询的高效性。

整个模型可分为 3 个模块:供应链数据采集、数据处理、区块链网络。供应链数据采集由各环节厂商通过传感器收集数据后经过规整成为最初的原始数据。数据处理模块由数据上链、数据映射、数据查询、数据验证 4 部分组成,数据上链部分由各环节厂商节点进行同步上链操作,调用上链合约各个环节的数据上链到相应的子链,危害信息还需要调用校验合约校验显著危害是否符合要求,限值信息是否超过限值,如果全部合格则正常上链,否则返回相应

不合格报错。数据查询部分由消费者通过客户端节点来进行查询,通过主链查询到映射关系,通过映射关系中的子链交易地址在各条子链中快速定位到交易数据,数据验证部分对交易中的数据进行验证,将所有数据拼接成为完整的河豚溯源数据,校验数据完整性。区块链网络模块由子链和主链区块文件、共识算法等组成,维护数据存储和数据查询。

数据上链时,厂商在采集信息之后将溯源信息通过上链合约调用数据加密模块将明文数据转换为密文数据,之后提交上链请求将密文数据传输给各自的子链,在子链存储密文数据可以防止上下游数据泄露。子链在收到请求后将密文数据生成交易,然后将交易存储在当前区块中。子链上链合约会将交易哈希地址和河豚溯源码返回给该环节节点,节点调用映射合约将溯源码和各交易建立映射关系,最后将该河豚映射关系存储到主链中。至此溯源信息上链阶段完成。

数据溯源时消费者需要先将河豚包装上的溯源码输入到客户端节点,客户端节点验证溯源码格式之后,传输至区块链底层网络。通过调用映射合约对主链进行查询,获取到映射关系并返回节点,通过映射关系得到各子链的交易哈希地址,节点分别对各子链通过交易地址索引查询,通过交易地址可以直接定位到某个区块的交易信息。获取到各条子链的密文数据后,调用数据解密模块将密文数据解密为明文数据,最后拼接成完整的河豚溯源信息并在

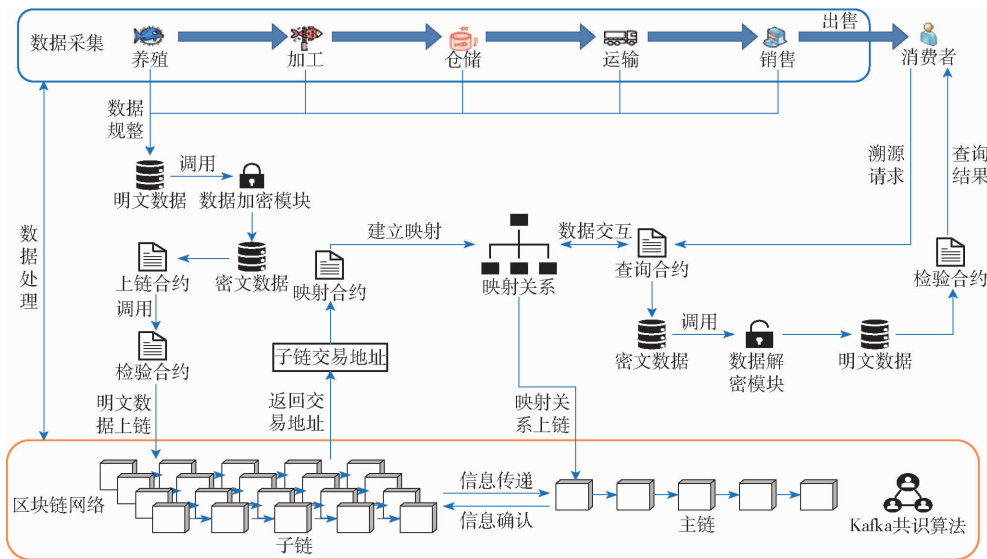


图 2 模型总体架构

Fig. 2 Overall model architecture

客户端展示。

3.2 多链存储模式设计

根据图 1 河豚业务流程分析设计出映射关系数据结构,如图 3 所示,数据映射是本模型提高溯源查询效率的关键,映射关系是一种类似于树的数据结构,反映了产品溯源码与交易地址之间的一对多关系。溯源时通过映射关系进行索引,查询速度会较快。通过根节点记录了产品溯源码、各阶段批号或单号和交易地址,通过交易地址寻址到叶子节点,子链中的交易 ID 具有唯一性,防止数据被篡改。叶子节点将厂商信息、产品信息、合格证明等信息分类存储,图 3 中省略号表示各阶段的叶子节点。通过这一流程来实现市场监管和质量安全的需求,在河豚数据上链的过程中通过区块链的时间戳实现了防篡改功能。

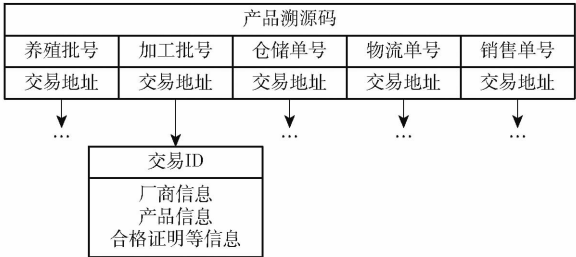


图 3 映射关系数据结构

Fig. 3 Mapping data structure

例如某河豚水产品具体信息映射关系根节点数据如表 1 所示,写入区块链的溯源码包括养殖批号、加工批号、仓储单号、物流单号、销售单号。养殖批号同时作为河豚的产品溯源码,溯源码与子链存储溯源信息的交易地址形成映射关系,溯源码作为索引和唯一标识。

表 1 主链映射关系根节点数据

Tab. 1 Root node data of main chain mapping relationship

环节	溯源码	交易哈希地址
养殖	HT20150701	9bbb3b72e16305f1459ad6fb95bfa190bea9f97341bc8db58c67bf5155bfd357
加工	17003YL17066HA-4	03a5399d70ec8b4cf28f7ab8aa5c81ef519824bcd3e91abdfa6b7bedcfa21d4c
仓储	RK17291-01	762c1393c4c9c78fc8fcb2bc1b1e56c550f6d69718d31ad0c8cdd8e46d50527d
物流	YS4144122602181	23dbc854a39db0af2f12baac21cdb03d7b46b7bc0a49cbdc716dca059d29bafb
销售	201712178980097	0b8bdc176bb7fe9774abea63b90d70fb8eccf15a3867413dc1d70e590ccf5023

3.3 多链快速查询流程

在区块链查询过程中随着数据量的增加查询时间会线性增加,如何保证数据安全的同时提升溯源的查询效率是研究重点。本文提出了一种多链快速查询流程,主链仅存储少量的映射关系数据,主要供应链信息存储在子链中,并建立与子链交易之间的映射关系,避免大数据量的遍历查询。

如图 4 所示,本河豚溯源模型的具体操作如下:建立区块链网络;客户端节点注册;河豚水产品溯源数据采集;编写智能合约;河豚水产品溯源数据上链;河豚水产品溯源数据查询。具体数据存储如图 5 所示,在上链操作前,通过智能合约将本环节数据标准化。上链时,任何环节出现显著危害信息无合格证明或危害信息超限值都会报错并及时终止生

产。上链后需要对映射关系进行更新操作来维护映射关系的实时性。主链中会存储映射关系,在子链传来交易信息后主链会先查找是否已存在该溯源码的映射关系。如果主链不存在记录就新建该溯源码的映射关系,将产品溯源码和子链中的交易哈希地址建立起一对多映射关系。进行查询操作时,首先在主链节点进行顺序查找,找到一个批次号所在的交易地址,然后递归地在交易地址所指向的子链节点进行查找。直到查找到所有子链节点,然后在子链节点上进行交易数据查找,找出交易地址所对应的交易数据。消费者通过调用智能合约获取该河豚全部溯源信息。

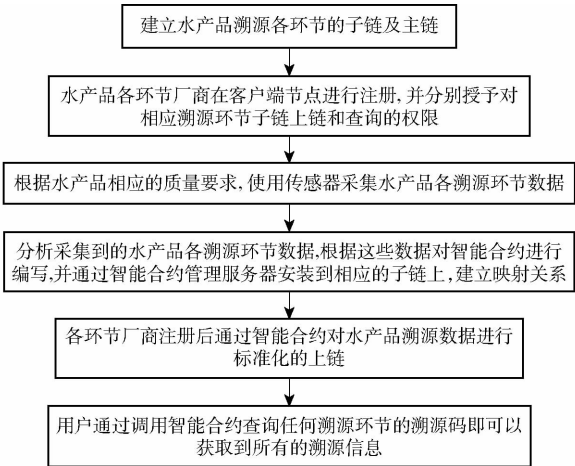


图 4 多链快速查询流程图

Fig. 4 Multi-chain quick query process

链溯源查询信息流如图 5 所示,供应链的各个阶段将本阶段的信息上链至相应子链,子链将信息

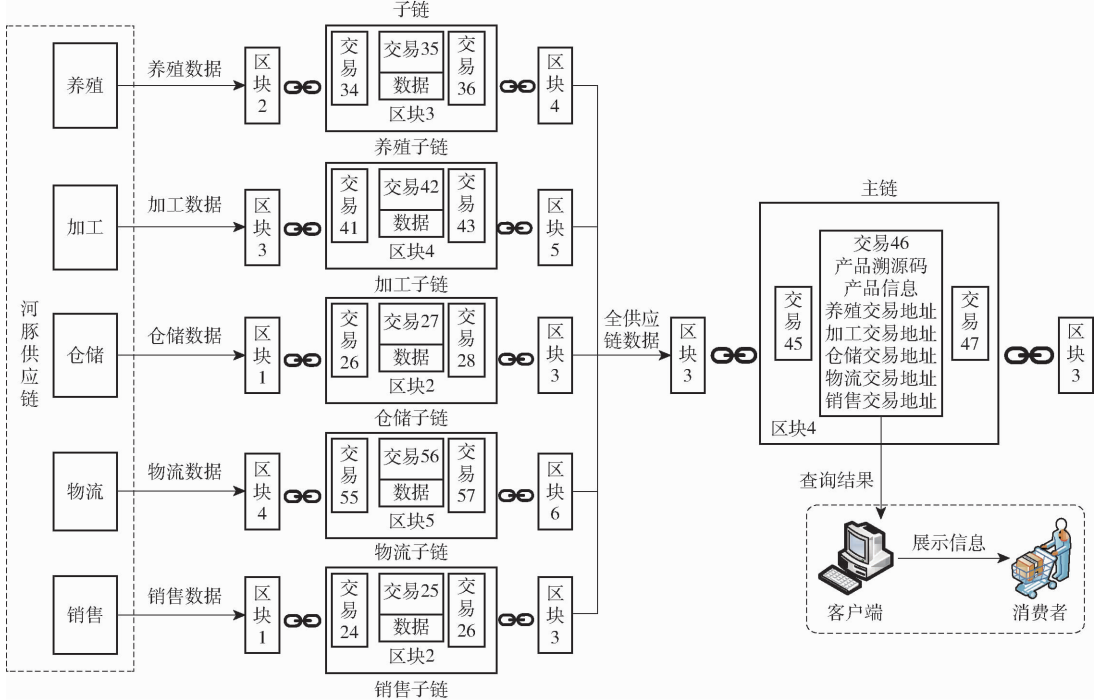


图 5 多链溯源查询信息流

Fig. 5 Multi-chain traceability query information flow

存储到交易中,当主链发送溯源查询请求后,通过映射关系快速查询到各阶段信息后拼接成完整的全供应链溯源信息,传递给主链,主链通过智能合约将查询结果传递给客户端展示给消费者。

3.4 智能合约设计

数据上链通过上链合约实现,上链合约主要实现了河豚安全性判断功能。通过对河豚显著危害数据是否在限值内进行判断,严格管控河豚的食用安全。以河豚供应链仓储阶段为例,各环节厂商以 JavaScript 对象简谱 (JavaScript object notation, JSON) 格式将不同溯源信息调用相应的上链合约上传至区块链账本中,返回交易哈希地址,仓储信息上链具体上链算法为

输入: 河豚溯源码 BatchCode, 冷藏库温度 Temperature, 金属碎片大小 MetalSize

输出: 成功交易哈希地址 TxID, 失败返回错误原因

1. message = Stub. GetState (BatchCode) // 查子链中是否存在 BatchCode 记录
2. If (MetalSize 大于金属碎片大小限值)
3. return “金属碎片过大” // 上链失败, 返回失败原因
4. If (Temperature 大于冷藏库温度限值)
5. return “生物的致病菌生长过度” // 上链失败, 返回失败原因
6. message. encryption(); // 调用加密模块加密
7. Stub. PutState (message) // 将密文数据上链
8. return TxID // 上链成功, 返回交易哈希地址

映射关系通过映射合约建立并写入主链,当该河豚产品尚未建立映射关系时,新建映射关系,当河豚产品已经存在映射关系则更新其映射关系。具体算法如下:各环节节点通过调用智能合约进行上链,智能合约首先将本环节的所有数据都上传到相应的子链,然后将其中的溯源码和子链交易哈希地址建立映射关系,映射关系中如果已有该溯源码的数据,则更新相应的交易哈希地址,具体映射合约算法为

输入:河豚溯源码 BatchCode,交易哈希地址 TxID,更新各环节 Breed Procees Pransport Storge Sales

输出:返回映射关系 Index

```
1. BatchCodeAsBytes := stub. GetState( BatchCode) //
  查询主链中是否有映射关系
2. Index := &Index{} // 没有则新建映射关系
3. func UpdateIndex ( args []string) // 有则更新映射
  关系
4. if updateItem == " Breed" { // 更新各环节交易
  哈希地址
5. Index. BreedTxId = TXID
6. } else if updateItem == " Process" {
7. Index. ProcessTxId = TXID
8. } else if updateItem == " Transport" {
9. Index. TransportTxId = TXID
10. } else if updateItem == " Storage" {
11. Index. StorageTxId = TXID
12. } else if updateItem == " Sales " {
13. Index. SalesTxId = TXID
14. }
15. stub. PutState( BatchCode, Index) // 将映射关系
  写入主链
16. return Index
```

当用户对河豚溯源查询时,通过查询合约输入溯源码查询到子链上的信息,具体的查询合约算法为

输入:河豚溯源码 BatchCode

输出:返回子链溯源信息 Ciphertext

```
1. Stub. GetState( BatchCode) // 查询主链中是否存
  在 BatchCode 记录
2. ( BreedTxId, ProcessTxId, StorageTxId,
  TransportTxId, SalesTxId ) = GetMapping
  ( BatchCode) // 存在映射关系,获取映射关系中的交
  易哈希地址
3. Ciphertext. Breed = BreedChain. GetState
  ( BreedTxId) // 根据交易哈希地址,请求养殖子链交
  易信息
4. Ciphertext. Process = ProcessChain. GetState
```

```
( ProcessTxId) // 请求加工子链交易信息
5. Ciphertext. Storage = StorageChain. GetState
  ( StorageTxId) // 请求仓储子链交易信息
6. Ciphertext. Transport = TransportChain. GetState
  ( TransportTxId) // 请求物流子链交易信息
7. Ciphertext. Sales = SalesChain. Getstate
  ( TransportTxId) // 请求销售子链交易信息
8. Ciphertext. Decrypt() ; // 调用解密模块解密
9. return Ciphertext // 返回溯源信息
```

4 河豚全供应链溯源系统实现

4.1 系统架构

基于河豚供应链的溯源优化模型,设计了河豚供应链信息溯源系统架构。该系统架构如图 6 所示,分为 Web 应用层、接口层、智能合约层、存储层、网络层、业务层 6 层。

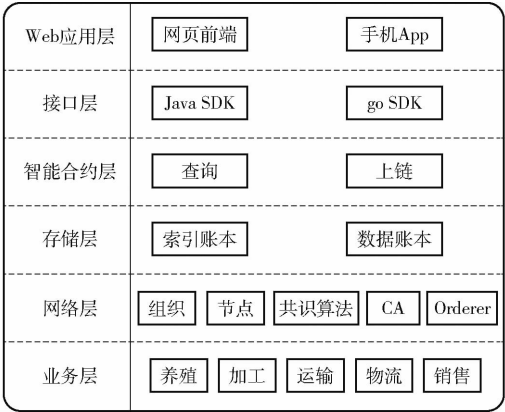


图 6 系统分层架构

Fig. 6 System layered architecture

应用层主要是将系统以可视化的界面展示在消费者面前,消费者可以通过前端输入溯源码进行河豚的溯源。接口层主要连接 Web 应用层和智能合约层,各环节的厂商通过程序接口调用智能合约的相关函数实行数据上链。智能合约层编写数据查询和数据上链函数,并被安装到多链模型中,智能合约实现索引账本和数据账本的更新。存储层存有多链模型的数据结构,主要包括索引账本和数据账本两部分。网络层包括 Hyperledger Fabric 区块链的相关网络节点、组织、共识算法、证书授权机构 (Certification authority, CA)、Orderer 节点等。业务层就是连接各环节原本供应商的信息系统,各环节厂商将溯源信息进行上链。

4.2 案例分析

在上述模型的基础上,实现了基于区块链的河豚供应链溯源系统,本系统基于江苏省某河豚企业的河豚数据,在本数据的基础上编写相应的智能合约、接口及前端应用。本文研究成功应用于江苏省

某河豚产品供应链厂商,该厂商包括完整的河豚养殖、加工、仓储、物流、销售环节,相关环节的溯源记录比较完整、清晰。如图7所示,Web前端界面包括可信溯源、区块链浏览器、交易查询、节点监控等,与传统的河豚溯源系统相比,区块链技术保证数据的去中心化存储,同时应用了本文提出的区块链溯源优化模型和多链快速查询模式,在应用后,溯源流程的溯源效率大大提升,且安全性得到保证,溯源信息的防篡改能力得到有效保障。



图7 系统工作界面
Fig.7 System working interface

5 性能比较分析

目前的区块链溯源方法主要是单链存储模型,性能分析时分别对单链存储模型和本文提出的多链存储模型建立实验环境进行测试并对比结果。实验硬件运行内存为32 GB,硬盘容量为1 TB,带宽为100 Mb/s;环境基础采用Ubuntu 16.04, Docker 19.03;区块链架构使用Hyperledger Fabric 1.4.2。每次实验的数据采用测试10次的平均值。设置区块大小为10 MB,交易大小为512 KB,每10个交易打包生成一个区块,出块时间为2 s。共识算法采用Kafka,批处理信息阈值为16 KB,发送消息最大值为1 MB,等待请求响应的最长时间为30 s。本文采用性能测试工具Caliper v0.2.0对溯源系统进行性能测试。

如图8所示,本文提供的查询方法由主链查询时间和子链查询时间两部分组成。当数据量增加到1 000条时,总查询时间为0.161 s,主链查询时间为0.08 s,子链查询时间为0.081 s,当数据量增加到10 000条时查询时间逐渐增加至0.196 s,其中主链查询时间为0.086 s,占43.9%,子链查询时间为0.11 s,占56.1%。

若查询某河豚溯源码,在单链查询中,针对5个追溯企业上传的数据,需对整条链按溯源码对内容遍历查询5次。在多链查询中,整个过程分为主链

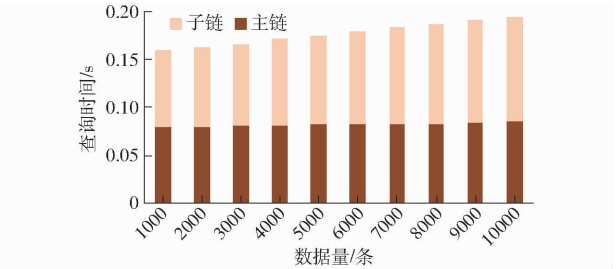


图8 主链和子链查询两阶段时间占比
Fig.8 Proportion of time in two stages of main chain sub-chain query

查询和子链查询两阶段:主链查询阶段首先根据溯源码到主链遍历查询映射关系,然后从映射关系得到子链交易哈希地址;子链查询阶段通过得到的交易哈希地址快速定位到子链的交易记录。多链查询速度快的原因有两点:主链查询阶段采用遍历查询,但是主链仅存储映射关系,区块长度较短,单链模型中将所有溯源信息存储到一条链上,区块长度较长,所以主链的遍历查询比单链遍历查询要快很多;子链查询阶段是按映射关系中的交易哈希地址查询,速度会远快于单链中按内容遍历查询。

如图9a所示,当数据量增加到1 000条时,多链查询时间为0.161 s,单链查询时间为0.372 s;当数据量增加到10 000条时,多链查询时间逐渐增加至0.196 s,单链查询时间为2.769 s。在上链数据量达到10 000条时查询效率可以提升约92.9%。

节点架构如图10所示,单链查询中,所有节点都是处于一个组织中,只维护同一条链。多链查询中,将节点分为主链组织和子链组织,分别包含主链节点和子链节点,主链组织维护主链,子链组织同时维护5条子链。针对不同节点可能影响实验结果,本文实验对单链查询和多链查询分别设置2、4、6、8个节点进行实验,多链查询中节点分配情况如下:2节点,主链组织1个节点,子链组织1个节点;4节点,主链组织2个节点,子链组织2个节点;6节点,主链组织3个节点,子链组织3个节点;8节点,主链组织4个节点,子链组织4个节点。

多节点测试采用网络负载均衡的方式选择不同的区块链节点同步查询。节点查询吞吐量指直接从区块链节点发起交易查询、执行智能合约、收到节点查询结果这一过程的吞吐量,这一过程仅在节点执行,所以吞吐量较大。客户端查询吞吐量指从客户端浏览器发起交易到远程的区块链节点中查询的吞吐量,需要将交易提交到节点,整个过程需要网络传输信息,所以吞吐量较小。如图9b所示,随着节点数的增加,节点查询吞吐量会逐渐增加,节点数分别为2、4、6、8时,单链节点查询吞吐量分别为697、

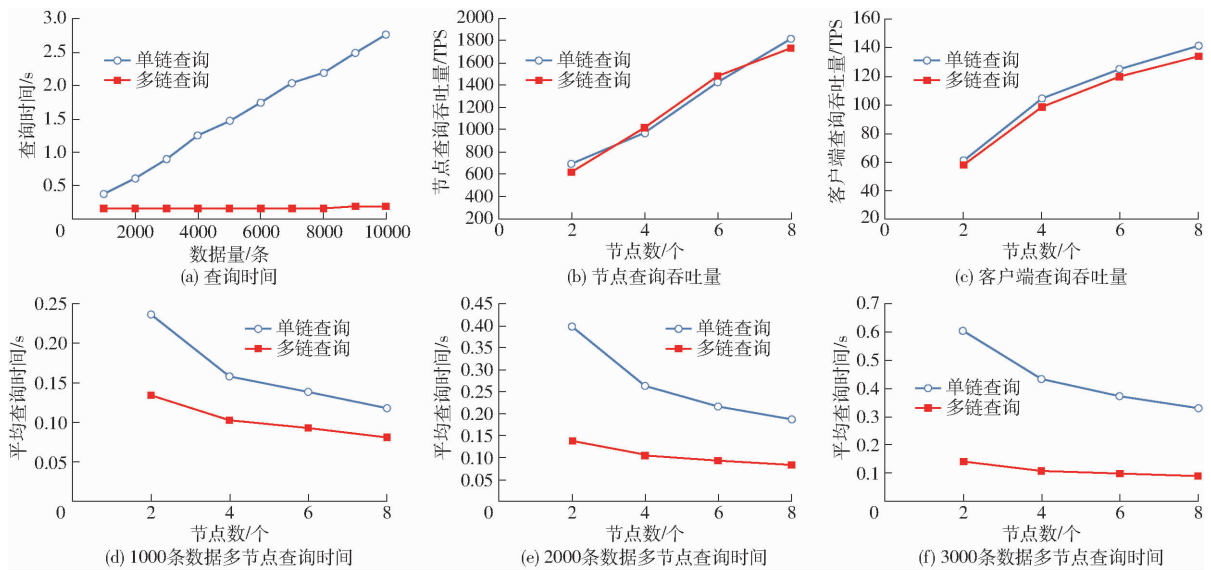


图9 两种查询方法对比

Fig. 9 Comparisons of two query methods

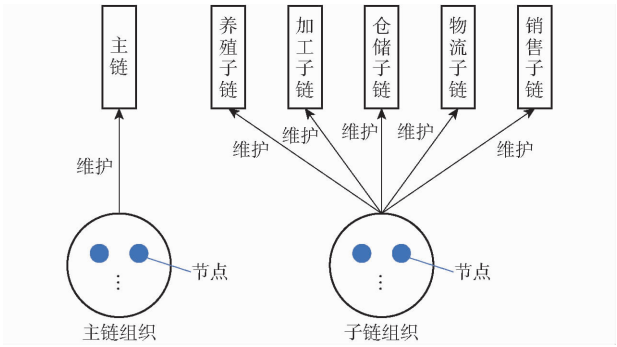


图10 节点架构

Fig. 10 Node architecture

972、1 427、1 819 TPS (Transactions per second, 每秒交易数);多链节点查询吞吐量分别为 623、1 019、1 486、1 735 TPS,两者差距不大。如图 9c 所示,随着节点数的增加,客户端查询吞吐量都会逐渐增加。节点数分别为 2、4、6、8 时,单链客户端查询吞吐量分别为 61、104、125、141 TPS;多链客户端查询吞吐量分别为 58、99、120、134 TPS。在客户端查询吞吐量方面,单链查询比多链查询稍高一些。

如图 9d~9f 所示,针对 2、4、6、8 个节点的不同情况,分别在链上存储 1 000、2 000、3 000 条数据。然后测试同时发起 10 次查询,取单次查询时间平均值。实验显示随着节点数的增加,两种方式查询时

间都会缩短,并且多链查询时间都会小于单链查询时间。

从测试结果可以看出,与传统的单链存储模型相比,在数据量较多时,多链存储模型可以大大提升查询效率,并且对吞吐量影响较小。

6 结论

(1)提出的多链溯源模型相比较以往的区块链单链溯源模型,在数据记录条数大于 1 000 条时,该模型查询效率将高于传统单链模型,在 10 000 条数据记录上链后,较传统单链模型查询效率提高约 92.9%。该模型可以实现完全的链上数据存储,使得溯源数据的安全性得到保证,河豚供应链各环节和溯源模型的联系更加紧密,减少了供应链各环节的孤岛效应,各环节可以方便地进行数据上链,保证消费者可以查询到完整、真实、全面的河豚溯源信息。

(2)基于 Hyperledger Fabric 框架结合河豚溯源案例实现了河豚溯源模型的应用,通过该应用验证了本文提出的模型的可靠性和适用性,为河豚行业提供了一个安全的溯源模型,对消费者来说保证了河豚溯源信息的真实性,为监管者提供了一个方便有效的监管模型。

参 考 文 献

[1] 黄军,严美姣,陈国宏. 河豚毒素的起源及其研究进展[J]. 生物技术通讯,2006,17(6):998-1000.
HUANG Jun, YAN Meijiao, CHEN Guohong. The origin and research progress of tetrodotoxin [J]. Biotechnology Communications, 2006,17(6):998-1000. (in Chinese)

[2] 李秋芬,徐怀恕. 河豚毒素 (TTX) 及其微生物起源[J]. 海洋通报,1994,13(4):86-91.
LI Qiufen, XU Huaishu. Tetrodotoxin (TTX) and its microbial origin[J]. Ocean Bulletin, 1994,13(4):86-91. (in Chinese)

[3] 殷芹. 小鼠法和高效液相色谱法测定野生河豚不同组织内河豚毒素的含量[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.

- YIN Qin. Determination of tetrodotoxin content in different tissues of wild puffer fish by mouse method and high performance liquid chromatography[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese)
- [4] 肖静. 餐饮企业非法经营河豚案例评析[J]. 中国食品药品监管, 2020(2): 70-73.
XIAO Jing. Analysis on the case of illegal operation of puffer fish in catering enterprises[J]. China Food and Drug Administration, 2020(2): 70-73. (in Chinese)
- [5] 秦风. 吃河豚中毒引发赔偿之诉[J]. 法律与生活, 2017(23): 52-53.
QIN Feng. Compensation suit caused by poisoning by eating puffer fish[J]. Law and Life, 2017(23): 52-53. (in Chinese)
- [6] 张恒, 李剑森, 梁骏华, 等. 从一起河豚中毒调查探讨河豚食用安全性的风险管理措施[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(4): 541-545.
ZHANG Heng, LI Jiansen, LIANG Junhua, et al. Discussing the risk management measures of pufferfish edible safety from an investigation of pufferfish poisoning[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2016, 28(4): 541-545. (in Chinese)
- [7] 何蒲, 于戈, 张岩峰, 等. 区块链技术与应用前瞻综述[J]. 计算机科学, 2017, 44(4): 1-7, 15.
HE Pu, YU Ge, ZHANG Yanfeng, et al. Overview of blockchain technology and application prospects[J]. Computer Science, 2017, 44(4): 1-7, 15. (in Chinese)
- [8] 颜波, 石平, 黄广文. 基于 RFID 和 EPC 物联网的水产品供应链可追溯平台开发[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 172-183.
YAN Bo, SHI Ping, HUANG Guangwen. Development of aquatic product supply chain traceability platform based on RFID and EPC internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 172-183. (in Chinese)
- [9] HUA Xufeng, WANG Wenqing, TIAN Yunchen, et al. Design of aquatic product traceability system based on anti-collision RFID techniques[J]. Advanced Materials Research, 2013, 763: 2017-2022.
- [10] ZHAO Shanshan, ZHAO Yan, ROGERS K, et al. Application of multi-element (C, N, H, O) stable isotope ratio analysis for the traceability of milk samples from China[J]. Food Chemistry, 2020, 310(5): 125826.
- [11] 袁红春, 从斯琳. Petri 网的水产品溯源系统模型[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(9): 42-45.
YUAN Hongchun, CONG Silin. Petri net based aquatic product traceability system model[J]. Sensors and Microsystems, 2016, 35(9): 42-45. (in Chinese)
- [12] XIAO Xinqing, FU Zetian, ZHANG Yongjun, et al. SMS-CQ: a quality and safety traceability system for aquatic products in cold-chain integrated WSN and QR code[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(1): e12303.
- [13] ZHANG Yongjun, FU Zetian, XIAO Xinqing, et al. MW-MTM: a mobile wireless monitoring and traceability management system for water-free live transport of aquatic products[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(3): e12495.
- [14] 赵训铭, 刘建华. 射频识别(RFID)技术在食品溯源中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 212-216.
ZHAO Xunming, LIU Jianhua. Research progress in the application of radio frequency identification (RFID) technology in food traceability[J]. Food and Machinery, 2019, 35(2): 212-216. (in Chinese)
- [15] 蔡维德, 郁莲, 王荣, 等. 基于区块链的应用系统开发方法研究[J]. 软件学报, 2017, 28(6): 1474-1487.
CAI Weide, YU Lian, WANG Rong, et al. Research on application system development method based on blockchain[J]. Journal of Software, 2017, 28(6): 1474-1487. (in Chinese)
- [16] HANG L, ULLAH I, KIM D H. A secure fish farm platform based on blockchain for agriculture data integrity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170(2): 1-3.
- [17] FENG Huanhuan, WANG Xiang, DUAN Yanqing, 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(3): 121031.
- [18] KAMBLE S, GUNASEKARAN A, SHARMA R. Modeling the blockchain enabled traceability in agriculture supply chain[J]. International Journal of Information Management, 2020, 52: 101967-101969.
- [19] 何静, 胡鑫月. 基于量子区块链的食品冷链溯源系统构建[J/OL]. 食品科学: 1-11[2021-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210927.2306.030.html>.
- [20] 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)
- [21] 魏立斐, 朱嘉英, 衡旭日, 等. 基于区块链技术和 HACCP 管理的智能化水产品质量安全溯源系统的设计与实现[J]. 渔业现代化, 2020, 47(4): 89-96.
WEI Lifei, ZHU Jiaying, HENG Xuri, et al. Design and implementation of an intelligent aquatic product quality and safety traceability system based on blockchain technology and HACCP management[J]. Fishery Modernization, 2020, 47(4): 89-96. (in Chinese)
- [22] 王千阁, 何蒲, 聂铁铮, 等. 区块链系统的数据存储与查询技术综述[J]. 计算机科学, 2018, 45(12): 12-18.
WANG Qian'ge, HE Pu, NIE Tiezheng, et al. Overview of data storage and query technology in blockchain systems[J]. Computer Science, 2018, 45(12): 12-18. (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 technology: architecture and progress[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(5): 969-988. (in Chinese)
- [24] 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. Information storage model and query method of agricultural product

- traceability system based on blockchain[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 323–330. (in Chinese)
- [25] 祝烈煌, 董慧, 沈蒙. 区块链交易数据隐私保护机制[J]. 大数据, 2018, 4(1): 46–56.
ZHU Liehuang, DONG Hui, SHEN Meng. Blockchain transaction data privacy protection mechanism[J]. Big Data, 2018, 4(1): 46–56. (in Chinese)
- [26] 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. A review of blockchain privacy protection research[J]. Computer Research and Development, 2017, 54(10): 2170–2186. (in Chinese)
- [27] 韩璇, 袁勇, 王飞跃. 区块链安全问题: 研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 206–225.
HAN Xuan, YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain security issues: research status and prospects[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 206–225. (in Chinese)
- [28] 王群, 李馥娟, 王振力, 等. 区块链原理及关键技术[J]. 计算机科学与探索, 2020, 14(10): 1621–1643.
WANG Qun, LI Fujuan, WANG Zhenli, et al. Blockchain principles and key technologies[J]. Computer Science and Exploration, 2020, 14(10): 1621–1643. (in Chinese)
- [29] 贺海武, 延安, 陈泽华. 基于区块链的智能合约技术与应用综述[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(11): 2452–2466.
HE Haiwu, YAN An, CHEN Zehua. Overview of smart contract technology and application based on blockchain[J]. Computer Research and Development, 2018, 55(11): 2452–2466. (in Chinese)
- [30] 谢瑞彬, 李会, 张娟, 等. 鲉鱼毒素检测及物种鉴定技术研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 306–315.
XIE Ruibin, LI Hui, ZHANG Juan, et al. Recent advances in techniques for tetrodotoxin detection and species identification of tetrodotoxic fish: a review[J]. Food Science, 2022, 43(5): 306–315. (in Chinese)
- [31] 朱燕超. 面向区块链系统的查询处理研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
ZHU Yanchao. Research on query processing for blockchain systems[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020. (in Chinese)
-

(上接第 225 页)

- [30] GALVAO R K H, ARAUJO M C U, JOSE G E, et al. A method for calibration and validation subset partitioning[J]. Talanta, 2005, 67(4): 736–740.
- [31] 罗批, 郭继昌, 李镭, 等. 基于偏最小二乘回归建模的探讨[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2002, 35(6): 783–786.
LUO Pi, GUO Jichang, LI Qiang, et al. Modeling construction based on partial least squares regression[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2002, 35(6): 783–786. (in Chinese)
- [32] 秦占飞, 常庆瑞, 谢宝妮, 等. 基于无人机高光谱影像的引黄灌区水稻叶片全氮含量估测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 77–85.
QIN Zhanfei, CHANG Qingrui, XIE Baoni, et al. Rice leaf nitrogen content estimation based on hyperspectral imagery of UAV in Yellow River diversion irrigation district[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 77–85. (in Chinese)
- [33] 孙宗保, 王天真, 刘小裕, 等. 高光谱结合波长选择算法串联策略检测调理牛排新鲜度[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(10): 3224–3229.
SUN Zongbao, WANG Tianzhen, LIU Xiaoyu, et al. Detection of prepared freshness using hyperspectral technology combined with wavelengths selection methods combination strategy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(10): 3224–3229. (in Chinese)
- [34] 黄文江. 作物病害遥感监测机理与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009: 102–150.
- [35] JI H, WANG W Z, CHONG D F, et al. CARS algorithm-based detection of wheat moisture content before harvest[J]. Symmetry, 2020, 12(1): 115.
- [36] JIANG H, XU W D, CHEN Q S. Comparison of algorithms for wavelength variables selection from near-infrared (NIR) spectra for quantitative monitoring of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) cultivations[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 214: 366–371.
- [37] 刘良云. 植被定量遥感原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 136–178.
- [38] 宋相中, 唐果, 张录达, 等. 近红外光谱分析中的变量选择算法研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4): 1048–1052.
SONG Xiangzhong, TANG Guo, ZHANG Luda, et al. Research advance of variable selection algorithm in near infrared spectroscopy analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4): 1048–1052. (in Chinese)
- [39] 刘潭, 许童羽, 于丰华, 等. 改进特征波段选取和混合集成建模的东北粳稻叶绿素含量估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8): 2556–2564.
LIU Tan, XU Tongyu, YU Fenghua, et al. Chlorophyll content estimation of northeast japonica rice based on improved feature band selection and hybrid integrated modeling[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(8): 2556–2564. (in Chinese)