农业产业链可信数据空间：理论框架、运行机制与实施路径

张 新[1]，陈明阳[1]，赵峙尧[1]，池 程[2]，王小艺[1]，许继平[1*]

（1. 北京工商大学计算机与人工智能学院，北京 100048，中国；2. 国家工业信息安全发展研究中心，北京 100040，中国）

摘 要：［**目的/意义**］构建全国一体化数据市场已成国家战略重点。针对当前农业产业链数据要素流通中存在的数据孤岛严重、权属界定困难、隐私泄露风险高及价值挖掘不足等痛点，本文旨在提出农业产业链可信数据空间领域化框架，明确其架构层次、运行机制与实施路径，为农业数据主权保护、受控共享、审计追溯与价值协同提供系统化参考。［**方法**］依据《可信数据空间技术架构》标准，结合农业产业链多主体、长链条、弱算力和数据异构等特征，采用领域化适配方法构建总体架构，梳理语义互操作、连接器受控交互、隐私计算与区块链存证等运行机制；依托自主研发的综合服务平台，结合2023—2025年某市约12万条食品安全抽检监测数据和有机农场业务流程开展场景化说明。［**结果和讨论**］首先构建了包含基础设施与数据资源层、核心层、能力支撑层及应用生态层的4层总体架构，明确了由深层语义互操作、连接器受控交互、价值共创与动态信任共同驱动的数据流转闭环场景说明显示，平台可支撑数据标准化接入、风险画像、链上存证、权限控制和审计追溯等能力，并从制度、技术、生态与实操4个维度提出实施路径。［**结论**］该框架可在原始明文数据不集中汇聚的前提下，为农业产业链数据受控流转、数据主权保护与价值协同提供参考，并为农业数据要素流通和产业链协同转型提供支撑。

关键词：农业产业链；数据流转；可信数据空间；数据要素流通；数据连接器；联邦学习；农业信息化体系

中图分类号：S24；TP391 **文献标识码：**A **文章编号：**SA202605005

引用格式：张新, 陈明阳, 赵峙尧, 池程, 王小艺, 许继平 . 农业产业链可信数据空间:理论框架、运行机制与实施路径[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(4): 238-254. DOI：10.12133/j.smartag.SA202605005

ZHANG Xin, CHEN Mingyang, ZHAO Zhiyao, CHI Cheng, WANG Xiaoyi, XU Jiping. Trusted Data Space for the Agricultural Industry Chain: Theoretical Framework, Operating Mechanism, and Implementation Path[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(4): 238-254. DOI：10.12133/j.smartag.SA202605005 (in Chinese with English abstract)

0 引 言

随着数字经济的深入发展，数据已跃升为继土地、劳动力、资本、技术之后的第五大关键生产要素。2024年，国家数据局等部门联合印发《“数据要素×”三年行动计划（2024—2026年）》，明确提出要“提升农业数据资源开发利用水平”，标志着中国农业数字化转型已从单纯的“技术应用”阶段迈向“要素价值化”的新阶段[1]。在农业产业链中，跨环节的数据协同与流转是破解上下游信息不对称、提升整体质量安全水平的核心驱动力。

现阶段，国内外学者围绕农业产业链数据跨域流通与共享信任问题开展了大量研究。首先，在农业数据平台与农业大数据治理方面，已有研究指出，智慧农业技术体系和农业生产大数据治理能够提升农业生产管理、质量安全监管与产业链协同能力[2,3]。农产品质量安全保障、公共数据开放和数据要素化研究也表明，数据资源开发利用有助于提高农业生产效率、促进绿色转型和提升质量安全治理水平[4-6]。但此类研究多以数据汇聚、集中存储和平台侧分析为主要路径，在跨主体数据流通中仍面临权属边界不清、平台侧数据垄断、共享意愿不足以及数据出域后持续管控能力有限等问题。

其次，在区块链溯源与可信存证方面，分布式账本、智能合约和可信标识等技术能够缓解传统农产品溯源数据易篡改、责任链条难追溯等问题。相关研究已提出基于可编辑区块链[7]、区块链透明化

收稿日期：2026-05-06

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFF1101103）；国家自然科学基金项目（62402020）

作者简介：张 新，博士，教授，研究方向为区块链和AI融合应用、可信数据空间与隐私计算。E-mail：zhangxin@btbu.edu.cn

*通信作者：许继平，博士，副教授，研究方向为农业产业链数据要素可信流转。E-mail：xujiping@139.com

copyright©2026 by the authors （登录www.smartag.net.cn免费获取电子版全文）

机制与农业数字化协同[8,9]、区块链与自主身份认证的跨组织协同共享模型[10]，为批次追踪、质量证明和责任追溯提供技术支撑。区块链与物联网融合也被认为是支撑农业全流程数据采集、可信记录与供应链协同的重要路径[11]。但区块链溯源更侧重“数据是否可信记录”和“记录是否可追溯”，对数据共享后的使用目的、调用频次、二次转存和商业机密保护等问题支撑不足，难以单独解决农业经营主体“不敢共享、不愿协同”的问题。

再次，在隐私计算与联邦学习方面，联邦学习、多方安全计算和差分隐私等技术被引入粮食供应链、农产品供应链风险检测和食品质量控制等场景，可在原始明文数据不出域的前提下实现多节点联合建模与风险协同分析[12-14]。面向食品供应链和农食领域的数据协同研究进一步表明，跨筒仓联邦学习能够在一定程度上降低跨企业、跨区域协同中的隐私泄露风险[15,16]。但隐私计算主要解决“不共享原始数据如何联合计算”的问题，尚难以单独提供统一的数据产品目录、主体身份管理、数字合约约束、使用控制策略、链上审计和收益分配机制。相关综述也指出，农业场景中的数据异构、参与主体分散、基础设施能力差异和治理规则不足，仍是制约隐私计算规模化落地的重要因素[17,18]。

针对全产业链数据要素流通中存在的数据孤岛严重、权属界定困难及隐私泄露等困境，“可信数据空间（Trusted Data Space, TDS）”提供了一种全新的破解范式。可信数据空间是基于共识规则、连接多方主体、实现数据资源共享共用的新型基础设施[19]。其核心机制体现在三大维度：一是依托统一的数据产品目录与标识规范，构筑底层的资源互操作能力；二是基于标准“连接器”与“使用控制”策略，确保数据在离开持有者域后的全链路可控与“可用不可见”；三是依托可信审计与隐私计算协同，促进数据要素的安全合规流通与价值共创。

基于农业产业链数据要素价值实现的迫切需求，本文在《可信数据空间技术架构》所确立的通用框架基础上，围绕农业产业链多主体、长链条、弱信任、数据异构与质量安全监管等场景特征，提出了面向农业产业链场景的可信数据空间领域理论框架。与既有农业大数据平台主要侧重数据汇聚、存储与分析不同，本文进一步强调数据跨主体流通后的数字合约约束、连接器受控交互、使用控制执行与全过程审计机制；与通用可信数据空间技术架构相比，本文围绕农业生产、加工、仓储、物流、销售、监管、金融与保险等环节，对参与主体、数据对象、语义模型、连接器部署方式和典型数字合约策略进行了农业场景化细化；从可信数据空间视角，将区块链溯源、隐私计算、联邦学习和连接器使用控制等技术纳入“数据发现-合约授权-受控交付-密态计算-链上审计-价值协同”的分析框架中，形成面向农业产业链数据可信流通与价值共创的系统性解释。

1　农业产业链可信数据空间的应用价值与战略逻辑

农业产业链具有环节长、主体分散、数据异构等特征[20,21]，传统依赖“物理搬家”的中心化数据平台极易诱发核心企业数据垄断与中小主体隐私顾虑的双重矛盾，相关研究已从农业供应链优化[22]、农食供应链环境风险与协同调度[23,24]等方面进行了讨论。引入可信数据空间的首要价值，在于通过统一架构实现多源异构数据的“物理分散、逻辑融合”。依托标准化的流通底座支撑元数据与知识图谱的三维语义协同，该范式能有效打破企业业务系统与终端物联网设备间的深层异构壁垒，从而显著提升产业链的响应速度与抗风险韧性，大幅降低跨域交互成本[25]。

同时，该范式的核心要义在于保障数据主权，构建“可用不可见”的可信流通环境，这也是驱动数字农业可持续发展的基石[26]。可信数据空间依托技术与制度的双重体系赋能，有效破解了流转过程中的信任赤字难题[27]。通过在业务节点广泛部署声明式使用控制策略，强化数据提供方对数据使用过程的动态控制能力；结合联邦计算机制，支持核心配方、客户名单等高敏感数据在不出域前提下进行密态联合建模，并将流转记录与策略校验上链存证，构建出由密码学与共识机制背书的信任生态。

在此基础上，其深层战略目标是驱动沉淀的要素资源向“资产增值”状态跃迁。通过跨域全量数据的融合分析，不仅能支撑精准种植、智能产销等增值服务，其内部沉淀的不可篡改要素资产更能破解生物资产难估值的痛点，催生基于数字信用的供应链金融、参数化理赔等新业态。区别于对已有孤立技术的简单堆砌，可信数据空间作为新型国家级数据流通基础设施，实现了对现有技术的多维演进[28,29]。从协同机理看，相关研究认为可信数据空

间能够将数据、算法、算力、规则与服务等多元要素纳入统一协同框架，推动数据资源从点对点共享向生态化流通和价值共创演进[30,31]；从信任支撑看，区块链可为可信数据空间中的存证审计、可信协同和数据要素流通提供可验证的信任支撑[32,33]。在上述要素协同与信任支撑基础上，可信数据空间进一步依托标准化“连接器”，将安全边界从传统的静态访问控制延伸至出域后的动态“使用控制”[34,35]。通过对接国家数据基础设施统一互通标准[36,37]，该范式从基础逻辑上实现了“数据所有权”与“使用权”的深度解耦，为农业产业链的多主体协同确立了具有一定前瞻性的基础框架。

2 农业产业链可信数据空间总体架构

为明确研究对象，本文将农业产业链可信数据空间界定为：在国家可信数据空间通用技术架构基础上，面向农业生产、加工、仓储、物流、销售、监管及服务协同等多主体场景，以接入连接器、数字合约、使用控制、目录管理、语义互操作、隐私计算和存证审计为核心支撑，在原始数据物理分布和主体系统相对独立的前提下，实现农业数据资源可信发现、受控调用、密文计算、结果交付和价值协同的数据流通利用机制。其参与主体包括农业生产主体、加工企业、仓储物流企业、采购企业、批发市场、商超电商、监管部门及第三方数据服务商等；数据对象涵盖农事生产、产地环境、物联网传感、质量检测、仓储冷链、交易流通、市场需求和风险监管等数据。

基于上述定义，农业产业链可信数据空间的系统边界主要体现为“原有业务系统不替代、原始明文数据不集中、跨主体交互受控”。具体而言，该空间不是各主体原有业务系统的替代平台，也不以集中汇聚原始明文数据为前提，而是在各主体本地系统之外形成受控互联层。其中，可信数据空间服务平台承担身份认证、目录管理、数字合约管理、策略调度和存证审计等公共支撑功能；接入连接器作为各主体接入空间的入口，负责数据产品封装、合约履行、策略执行、数据交付和日志上报。其运行过程体现为数据流、控制流和价值流的协同：数据流对应连接器封装后的受控调用与结果输出，控制流对应身份认证、目录检索、合约签署、策略执行和日志存证，价值流对应数据在溯源监管、采购定价、产销匹配、风险预警和供应链协同等场景中的业务价值转化。

2.1 总体架构设计

本文遵循《可信数据空间技术架构》标准与“数据可用不可见”的流通原则，紧扣农业产业链主体分散、数据异构、隐私敏感等典型特征，系统提出了包含基础设施与数据资源层、可信数据空间核心层、数据能力支撑层、农业产业链应用生态层的4层总体架构。需要说明的是，本文并非重新提出可信数据空间的通用技术架构，而是在国家《可信数据空间技术架构》所规定的服务平台、接入连接器、数字合约、使用控制、目录管理和存证审计等基础能力之上，结合农业产业链多主体、长链条、弱算力和数据异构等特征，对参与主体、数据对象、语义关系、连接器部署和数字合约策略进行领域化适配。具体而言，本文将通用主体细化为种植养殖主体、加工企业、仓储物流企业、商超电商、监管部门、金融保险机构和第三方数据服务商等；将通用数据产品映射为农事生产、物联网环境、质量检测、冷链物流、交易订单、金融风控和理赔触发等数据；并围绕批次、地块、设备、检测指标、流通节点和风险事件等核心实体，构建农业语义映射关系，设计轻量化连接器与差异化数字合约策略。基于上述设计思路，农业产业链可信数据空间在数据资源、核心流转、能力支撑和应用生态之间形成分层协同关系，其总体架构如图1所示。

（1）基础设施与数据资源层。本层涵盖了农业产业链所有环节的异构数据源以及软硬件设施，其中包括农业产业链物联网传感器设备、集成轻量级人工智能（Artificial Intelligence, AI）视觉大模型的产地智能化处理与分选装备、边缘计算节点，以及各农业产业链经营主体的企业资源计划（Enterprise Resource Planning, ERP）业务系统与政府公共数据池等。该层承担了海量农产品在生产、加工与流通环节的数据实时采集、智能初筛以及本地化安全驻留工作，为上层数据流通提供基础数据资源和物理支撑。

（2）可信数据空间核心层。本层是实现数据“物理分散、逻辑统一”的中央枢纽与流转引擎，严格遵循控制流与数据流分离的核心交互逻辑；其一是部署到各业务主体边缘侧连接器起到数据主权保护的关键端点作用，严格对齐国家基础设施标准，底层数据在跨域之前需要深度绑定数字合约。连接器则会依托扩展集成的使用控制组件与隐私计算安全网关，以数字合约为准则，实时拦截违规访问，仅在策略校验通过后，才可通过加密通道完成

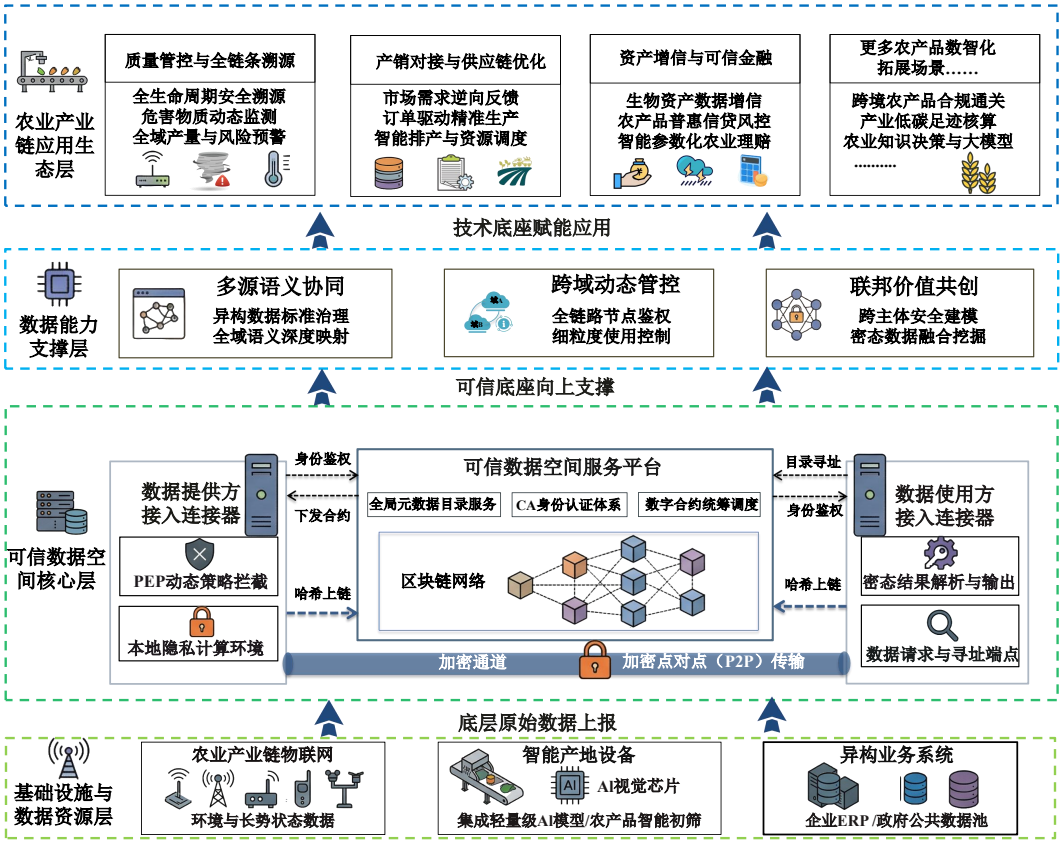


图 1　农业产业链可信数据空间架构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the agricultural industry chain trusted data space architecture

跨域节点间的数据交付；其二是农业产业链可信数据空间服务平台作为联邦式公共基础设施，重点承担目录管理、证书认证机构（Certificate Authority, CA）身份认证与数字合约的全局统筹调度服务，不直接接触底层核心明文数据，与底层的区块链节点配合起来后，该层通过“合约缔结、策略拦截、链上审计”这三者之间的协同机制，能有效弥补农业产业链数据流转后出现的控制权真空。

（3）数据能力支撑层。该层面向可信数据空间运行过程提供通用技术支撑。一是构建深层语义互操作能力，通过标准化语义解析接口与协同组件，支撑本体模型、元数据和知识图谱融合的三维协同机制，推动跨系统数据从“概念与结构对齐”向“上下文感知与语义消歧”演进。二是提供可信管控能力，结合区块链哈希存证与使用控制机制，在数据跨域调用全周期内执行身份鉴权与细粒度行为控制，形成“事前策略约束、事中动态拦截、事后链上审计”的数据主权保护机制。三是提供价值共创能力，集成联邦学习、多方安全计算等隐私计算组件，支持高敏感农业产业链数据在原始数据不出域前提下完成密态参数交互、联合建模与价值挖掘。以横向联邦学习在跨域农业产业链供需预测中的应用为例，区别于传统的“裸端”联邦建模，在可信数据空间架构下，各参与主体的联合建模必须受控于标准连接器。各节点在本地连接器的“隔离沙箱”内独立训练模型时，策略执行点会实时阻断模型的任何试图越权读取或下载底层明文特征的违规指令，仅允许符合数字合约声明的加密梯度参数流出本域。这一机制不仅发挥了联邦学习“数据不动模型动”的密态挖掘优势，更依托数据空间的底层强制管控，填补了传统隐私计算在执行端缺乏主权控制与动态信任背书的系统性漏洞。

（4）农业产业链应用生态层。该层作为数据空间顶层价值的最终出口，旨在打破传统业务系统的物理孤岛，赋能数据要素在多元主体间的合规流通与业务协同。依托底层的技术赋能与可信支撑，该生态层能够灵活适配并驱动全产业链海量数智化场景的落地实施。例如，在全链条质量追溯与安全管控场景中，通过跨环节异构数据的逻辑拼接，不仅能实现农业产业链全生命周期的可信溯源与危害物质动态监测，更能汇聚气象、土壤等多维状态数据，开展精准的全域产量评估与灾害风险预警；在

供应链优化与产销协同场景中，受使用控制策略严格保护的市场消费端数据可形成安全的逆向反馈机制，进而有效驱动产地开展订单化的智能排产与全链条资源的敏捷调度。此外，底层沉淀的不可篡改要素资产更能跨界转化为生物资产增信凭证，为农业产业链普惠信贷风控、智能参数化理赔等可信金融场景提供坚实的数据底座。随着可信数据空间共识网络的不断繁荣，该生态层还将持续向外扩展，赋能诸如跨境农产品合规通关、产业低碳足迹核算以及基于农业大模型的智库决策等更加广阔的前沿领域，全面驱动农业全产业链向数据驱动、信任传递与高韧性协同的现代农业新范式加速转型。

2.2 与现有的数据平台架构对比

为进一步凸显农业产业链可信数据空间在架构方面的优势与理论价值，本文将其与传统农业产业链大数据平台进行对比。本文所指的传统农业产业链大数据平台，主要是以中心化数据汇聚、统一存储、集中治理和平台侧分析为主要特征的农业数据管理系统，典型形态包括区域农业农村大数据平台、农产品质量安全追溯平台、智慧农场数据平台和供应链协同管理平台等。此类平台通常通过抽取、转换、加载（Extract-Transform-Load, ETL）、接口接入或批量上报等方式，将生产、加工、仓储、物流、销售和监管数据汇聚至中心平台，再由平台统一开展可视化展示、统计分析、风险预警和追溯查询。相比之下，农业产业链可信数据空间不仅关注数据汇聚与分析，更强调数据跨主体流通后的控制权、使用权、审计权和价值分配机制。因此，本节从整合性、去中心化架构形态、自主可控性、生态开放性和可扩展性5个维度展开对比分析。

在整合性方面，传统平台高度依赖数据的“物理搬家”，通常采用ETL工具将多源异构数据强制汇聚至中心服务器，不仅成本高昂，且极易导致底层农业产业链数据失真[38-40]；而农业产业链可信数据空间能依托本体模型、元数据与知识图谱三者融合形成的三维互操作机制，允许原始物理数据在本地安全驻留，仅通过连接器映射发布标准目录与语义关联，即可以较低的改造成本实现跨越不同农业产业链主体的“逻辑统一”与深层业务协同。在去中心化架构形态演进方面，传统平台极易因核心企业或运营方的“单极化”控制而形成数据垄断，导致中小农户在数据收益分配中处于相对弱势地位[41,42]；农业产业链可信数据空间则采用多中心与联邦式的网络拓扑，跨域寻址严格依托可信数据空间服务平台的数据产品目录检索（而非数据截留）完成。这种架构不仅能打破垄断，更能确保供应链上下游各参与主体在数据交互中获得一个对等的地位。

在自主可控与生态开放性维度，传统平台长期饱受“交付即失控”的问题与严重的“厂商锁定（Vendor Lock-in）”效应困扰，极易导致农业产业链核心机密泄露，并形成封闭的信息孤岛[43，44]。可信数据空间则通过标准化的可信协议与标准化连接器，构建了一种“即插即用”的开放互操作生态，更关键的是，它将安全管控边界由静态的“访问控制”深度延伸至动态的“使用控制”，强制限定数据接收方的使用目的与频次，从而实现“数据可用不可见”，赋予数据提供方完整的数据主权。此外，在系统可扩展性层面，面对海量农业产业链物联网与溯源数据的高频并发，传统平台只能依靠不断升级中心服务器进行纵向扩容，极易触及性能瓶颈[45-47]。农业产业链可信数据空间则充分融合分布式边缘计算架构理念，将网络算力与存储压力均衡分散于各边缘节点的连接器中。网络规模的扩大仅需要在边缘侧做一次低成本的横向扩展，这种有助于降低单点故障风险的弹性架构，能为将来全面融入国家数据基础设施体系、承载全国一体化的海量农业产业链数据流通提供延展空间。上述从整合性、架构形态、自主可控、生态开放性和可扩展性5个维度形成的对比结果见表1。

3 农业产业链可信数据空间的关键运行逻辑

为保障前述4层架构的有效落地，本节系统性阐释了农业产业链可信数据空间的四大关键运行逻辑。这4个逻辑在空间内部并不是孤立运行的，而是形成了1个咬合紧密的流转闭环，如图2所示：一是底层通过“三维语义互操作”消除机器认知方面的障碍，让数据“听得懂”；二是核心环节通过“基于连接器的受控交互”捍卫数据主权，让数据“管得住”；三是上层借助“隐私计算与联邦学习”释放跨域协作的红利，让数据“用得好”；四是最终由“区块链与智能合约”夯实利益分配机制，让数据“分得清”。这四者环环相扣，共同构筑了农业产业链数据要素化流转的完整生命周期。与单独采用区块链溯源、隐私计算或联邦学习不同，本文

表 1　农业产业链可信数据空间与传统数据平台架构对比

Table 1　Architecture comparison between the trusted data space for the agricultural industry chain and traditional data platforms

对比维度	传统数据平台架构	农业产业链可信数据空间	核心技术支撑
整合性	物理汇聚，异构数据需强行转换，成本高昂	物理分散，逻辑统一	知识图谱、本体模型、元数据标准化
架构形态	单极中心化，易形成核心企业或平台方的数据垄断	多中心、联邦式协同	联邦网络拓扑、可信数据空间服务平台
自主可控	“交付即失控”，隐私与商业机密易泄露	全链路主权保护（可用不可见）	使用控制、数字合约
生态开放性	封闭生态，存在严重“厂商锁定”效应与数据孤岛	标准组件，即插即用	标准连接器、统一信任机制
可扩展性	中心纵向扩容成本高，海量溯源数据易引发性能瓶颈	边缘水平扩展，降低单点瓶颈风险	分布式架构、边缘计算节点

重点不在于提出新的单项算法，而在于从可信数据空间视角阐释区块链、隐私计算、连接器和使用控制等技术在农业产业链数据流通中的协同关系。其中，语义互操作负责解决农业多源异构数据“找得到、读得懂”的问题；接入连接器与使用控制负责解决数据跨域后“用什么、谁来用、如何用、用多久”的主权控制问题；隐私计算与联邦学习负责在原始数据不出域前提下实现跨主体联合建模和价值挖掘；区块链与智能合约负责对合约签署、策略执行、数据调用、结果交付和收益结算进行存证审计。由此，本文形成的不是“区块链+联邦学习+隐私计算”的并列组合，而是以数字合约为规则纽带、以连接器为执行端点、以隐私计算为价值加工引擎、以区块链为审计与激励基础的农业产业链数据可信流转闭环。

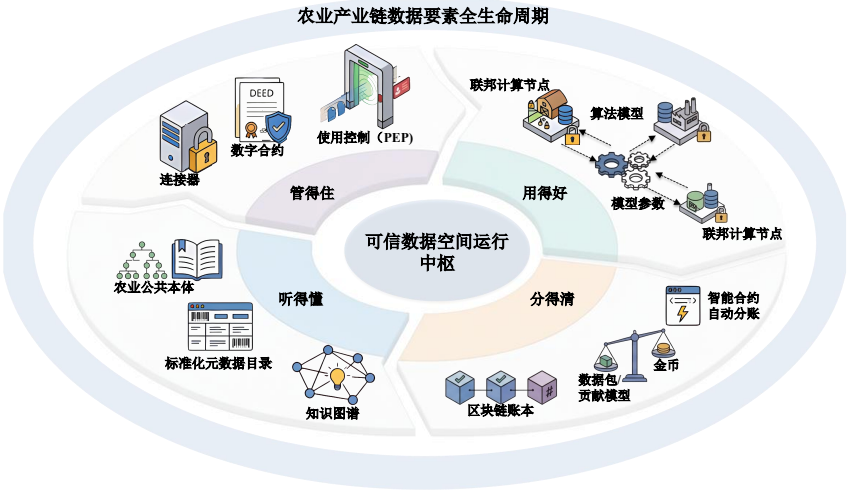


图 2　农业产业链可信数据空间运行逻辑环形视图

Fig. 2　Circular view of the operational logic of the agricultural industry chain trusted data space

3.1　基于本体、元数据与知识图谱的深层语义互操作逻辑

针对农业产业链中数据来源极度分散、模态高度异构这一现实痛点，本文在“数据物理不搬家”的流通理念基础上，提出基于本体模型、元数据与知识图谱融合的深层语义互操作机制。一是系统通过抽象农业产业链全生命周期的核心实体与关联属性，构建具有行业共识的农业产业链公共本体模型，从而为跨域交互确立统一的认知基座与“概念对齐”的基准。二是在实际执行层面，各个业务主体会依托本地组件并依据预置本体完成底层字段的语义映射，随后边缘侧的连接器将映射结果自动合规封装为标准化元数据目录并对外发布，以较低技术摩擦实现机器可读的“结构对齐”。三是针对复杂的跨域调用，系统引入全产业链知识图谱与图推理算法，自动结合数据所处的具体业务上下文完成“语义消歧”。这种从“结构”到“概念”再到“语境”的三维协同机制，在最大程度保护企业既有信息技术（Information Technology, IT）资产的同时，消除了跨农业产业链的深层异构壁垒。

3.2 基于连接器与数字合约的数据主权受控交互逻辑

为破解农业产业链主体因担忧核心机密泄露而陷入的“不敢共享”博弈困局，农业产业链可信数据空间将安全管控的重心下沉到了边缘侧的连接器上，并依托数字合约与动态使用控制，构建了“可用不可见”的交互屏障。为进一步说明连接器在数据提供方、可信数据空间底座与数据使用方之间的受控交互关系，图3展示了农业产业链可信数据空间连接器内部架构与交互机制。

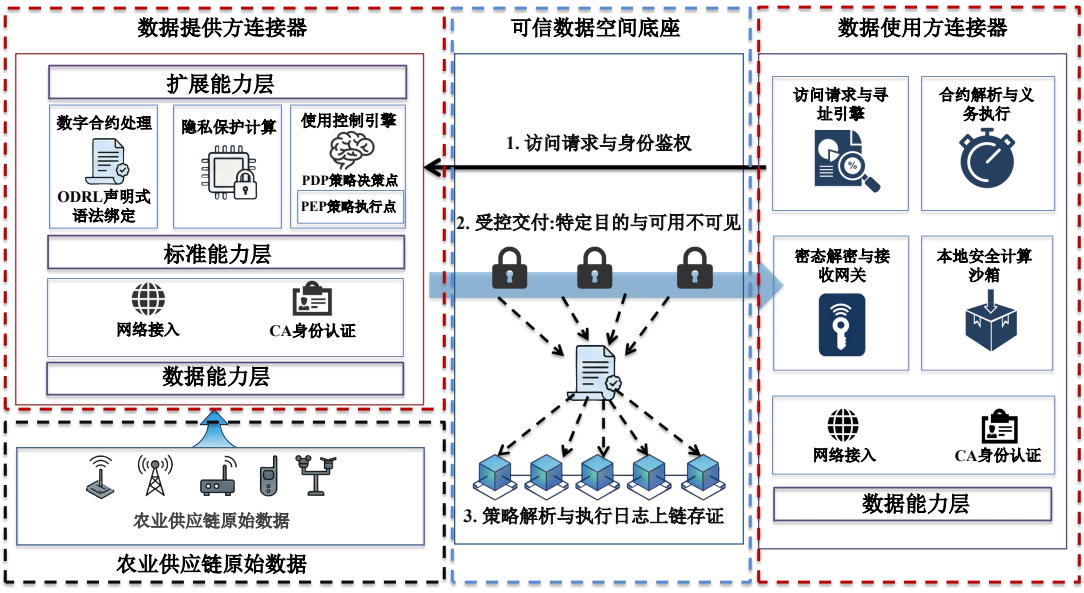


图3 农业产业链可信数据空间连接器内部架构与受控交互机制

Fig. 3 Internal architecture and controlled interaction mechanism of the agricultural industry chain trusted data space

当农业产业链原始数据准备跨域流转时，数据提供方会通过本地连接器将原始数据封装，并深度绑定包含特定使用目的、计算边界与留存期限的数字合约。在技术实现上，数据使用目的和使用频次并非仅停留在文本约定层面，而是由数字合约、策略决策点和策略执行点共同实现。首先，数据提供方在数字合约中以结构化字段声明允许的使用目的、调用接口、使用次数、时间窗口、结果输出形式和禁止行为；其次，数据使用方每次发起调用时，连接器会将请求主体、请求时间、调用目的、数据产品标识和操作类型提交至策略决策点进行匹配；再次，策略执行点根据判定结果控制数据是否进入沙箱、是否允许算法调用、是否允许输出结果，并同步更新调用计数。对于超过合约规定次数、偏离约定目的或试图下载、转存明文数据的请求，策略执行点将直接阻断，并将拦截日志上报至存证审计模块。需要说明的是，对于已经被违规下载并脱离受控环境的数据，单纯依靠技术手段难以实现绝对控制。因此，本文所强调的“强制限定”主要发生在数据出域前和受控使用过程中：对于禁止出域的原始明文数据，通过连接器、沙箱环境和使用控制策略阻断下载、转存和越权调用；对于合约允许交付的脱敏结果或计算结果，则通过最小化交付、结果水印、调用日志、履约证明和链上存证等方式降低二次滥用风险，并为事后审计与责任追溯提供证据支撑。

在实际交互链路中，该机制可概括为“资源检索与身份核验-合约解析与策略判定-沙箱执行与受控输出-日志哈希上链”4个环节。首先，数据使用方依托可信数据空间服务平台完成资源目录检索和主体身份核验；其次，提供方连接器解析与数据产品绑定的数字合约，并由策略决策点（Policy Decision Point, PDP）生成准入判定；再次，策略执行点（Policy Enforcement Point, PEP）仅允许合规请求在隔离沙箱内完成模型调用、密态计算或结果交付；最后，系统将策略解析、字段调用、结果输出和异常拦截等日志生成哈希并上链存证，形成“事前合约约束、事中策略执行、事后链上审计”的闭环。为增强策略可读性与互操作性，本文采用关联数据的JavaScript对象表示法（JavaScript Object Notation for Linked Data, JSON-LD）格式描述基于开放数字权利语言（Open Digital Rights Language,

ODRL）标准的数据受控共享策略，对数据使用目的、调用范围、输出形式和禁止行为进行结构化表达。例如，在农产品采购与定价协同场景中，可通过数字合约明确规定数据仅允许用于“定价计算”，并禁止“下载”与“转存”等行为。

为进一步说明“可用不可见”的实现方式，本文以农产品采购与定价协同场景为例进行说明。

如图4所示，采购企业或批发市场希望利用农场侧多源数据开展定价分析和需求预测，但不直接下载农场原始明文数据，而是通过可信数据空间服务平台提交模型调用申请。服务平台依据数字合约对模型用途、调用频次、可访问字段和结果输出形式进行校验，并向农场侧接入连接器下发控制策略。校验通过后，模型进入农场本地受控沙箱，仅访问合约授权范围内的产地数据、传感器数据、质检数据和市场数据，在本地完成价格区间测算、采购适配性判断等计算过程。

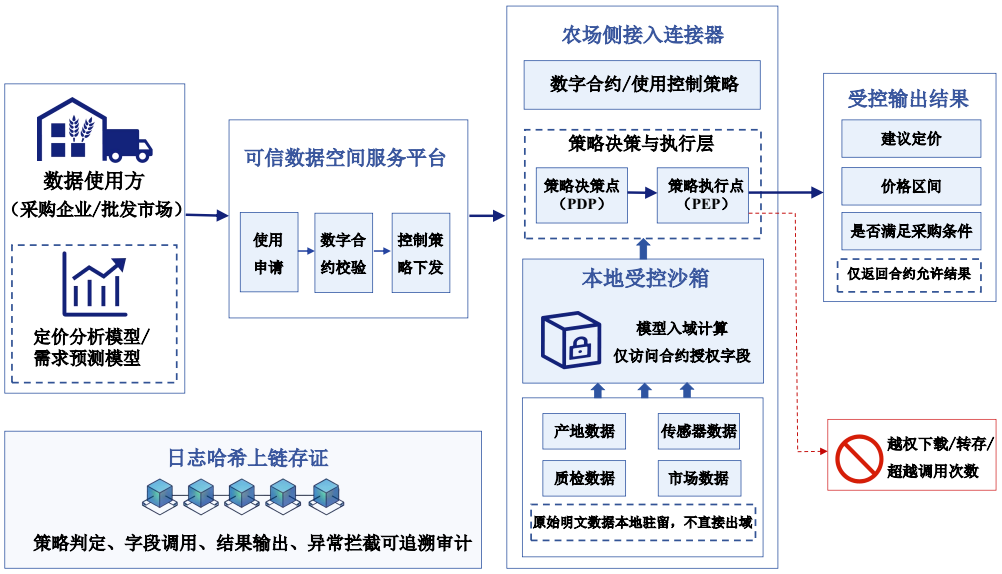


图4　“可用不可见”的本地沙箱计算与受控输出机制示意图

Fig. 4　Schematic diagram of local sandbox computing and controlled output mechanism for “usable but invisible” data

计算完成后，系统仅向数据使用方返回数字合约允许范围内的结果，如建议定价、价格区间或是否满足采购条件等，不返回原始数据明文。与此同时，策略判定、字段调用、结果输出和异常拦截等关键操作被记录并进行日志哈希上链存证；对于超越授权范围的下载、转存或超频调用请求，PEP将予以阻断并保留审计证据。由此，“可用不可见”在本文中体现为“数据不直接出域、算法入域计算、结果受控输出、过程可审计与追溯”的可信流通模式。

3.3　基于隐私计算的多元主体价值共创机制

农业产业链要实现价值共创，高度依赖跨节点之间的数据深度融合。为充分释放数据要素的乘数效应，架构全面引入包含联邦学习、多方安全计算（Secure Multi-Party Computation, MPC）在内的隐私计算技术作为底层加工引擎。

在业务协同中，参与各方的底层明文数据被严格限制在本地节点驻留，取而代之的是由空间服务平台统一分发的加密算法模型，在各主体连接器的隔离沙箱内进行局部运算与密态参数交互。这种“数据不出域、模型入域运行”的密态计算范式，有助于实现数据的所有权与使用权分离开来，让高敏感农业产业链数据在受控保护的状态下完成联合建模。通过上述机制，单体农户沉睡的碎片化数据能无缝转化为全局的业务洞察与数字信用资产，促进全产业链数据价值的协同释放与共创增值。

3.4　基于共识规则与激励机制的多元主体协同

可信数据空间中的“共识规则”是多元主体开展数据流通、使用控制、审计追溯与价值分配时共同遵循的规则集合。在农业产业链场景中，其主要包括身份准入规则、数据产品目录与标识规则、数字合约规则、使用控制与存证审计规则、贡献评估与收益分配规则等。其中，身份准入规则用于明确

各类主体的可信身份与角色权限；目录与标识规则用于支撑农业数据产品的可发现、可识别和可追溯；数字合约规则用于约定数据使用目的、调用次数、可见范围和禁止行为；使用控制与存证审计规则用于约束连接器、策略决策点、策略执行点和本地沙箱的执行过程；贡献评估与收益分配规则用于支撑数据价值共创后的权益确认。

在上述规则体系中，区块链主要承担可信存证、合约触发和审计追溯功能，并不直接存储农业原始明文数据。其链上记录对象主要包括数据产品标识、主体身份摘要、数字合约哈希值、策略执行日志哈希值、结果摘要哈希值、异常拦截日志、时间戳和数字签名等；原始农业数据、模型参数和业务明文仍保留在各主体本地系统或接入连接器的受控环境中。其运行流程可概括为“合约存证-策略执行-日志上链-审计追溯-激励结算”：数字合约签署后进行链上存证，连接器依据合约执行身份、用途、频次和字段授权校验，策略执行日志生成哈希值后上链，监管方或相关主体据此开展审计追溯，并在业务收益产生后，由智能合约按照预设规则完成权益确认与结算。

价值共创的长效运行需要依托稳定的信任与激励机制。本架构基于区块链存证与智能合约的自动执行能力，构建融合贡献评估、权益确认与收益分配的动态激励机制：一是将连接器权限管控、计算任务和策略执行日志转化为加密哈希值并同步上链，形成防篡改的审计账本；二是通过数字合约预设多方利益分配的基准规则，并将合约摘要、分账规则或关键参数进行链上备案；三是当业务收益或结算条件被触发时，链上智能合约依据已备案的数字合约规则完成权益确认和结算流程，并将执行结果写入链上审计记录。该机制有助于缓解传统中心化平台中数据贡献难以量化、收益分配不透明等问题，为农业产业链数据要素的持续流通提供内生动力。

4 农业产业链可信数据空间综合服务平台与典型场景说明

为说明前文提出的农业产业链可信数据空间框架在典型场景中的适配方式，本文依托课题组自主研发的农业产业链可信数据空间综合服务平台开展场景化说明。该平台以“食品风险全程全息预警与评价可视化系统”为核心原型基础，基于面向服务架构（Service-Oriented Architecture, SOA）与长安链开源框架构建，集成风险因子数据库、风险画像、风险预警、风险评价、靶向查检、区块链管理、权限管理和报告生成等功能模块，面向农业产业链及食品安全监管场景提供数据接入、风险分析、权限管控、链上存证和决策支持等服务。

本文所述综合服务平台并非单纯的平台展示系统，而是面向农业产业链可信数据空间落地需求的原型化服务平台。其说明重点在于展示前文提出的语义互操作、连接器受控交互、数字合约约束、区块链存证审计、风险画像与靶向查检等关键能力，如何在真实农业产业链与食品安全数据场景中形成可运行、可观察、可追溯的业务闭环。本节以北京某有机农场及其上下游业务流转为典型应用对象，同时，结合2023—2025年某市食品安全抽检监测数据，说明平台的数据接入与风险分析基础。某市数据覆盖区级监督抽检、食用农产品抽检、应急临时抽检及专项抽检等任务类型，涵盖流通、餐饮、生产等主要监管环节。系统累计接入抽检监测数据约12万条，其中2023年40 096条、2024年43 383条、2025年36 582条，覆盖蔬菜、水果、畜禽肉及副产品、食用油、粮食加工品等主要食品大类，以及农药残留、兽药残留、重金属污染物、食品添加剂、品质指标等多类风险项目。

4.1 综合服务平台模块与可信数据空间技术架构的对应关系

根据《可信数据空间技术架构》对可信数据空间服务平台、接入连接器、数字合约、使用控制、目录管理和存证审计等能力的要求，本文将综合服务平台的功能模块与标准能力进行映射。平台不以集中汇聚农业产业链所有原始明文数据为目标，而是通过风险因子数据库、权限管理、区块链管理和风险分析服务等模块，支撑多源农业产业链与食品安全数据的标准化接入、受控调用、风险画像生成和链上存证审计。

由表2可见，综合服务平台与可信数据空间技术架构之间并非概念套用关系，而是在农业产业链与食品安全风险治理场景下形成了对应的功能实现路径。其中，风险因子数据库对应数据资源目录与治理能力，风险画像和知识图谱对应语义互操作能力，区块链管理模块对应存证审计能力，权限管理和策略配置模块对应身份管理与使用控制能力，风险预警、风险评价和查检决策模块则对应可信数据空间面向业务应用的服务输出能力。

表2　综合服务平台模块与可信数据空间技术架构能力的对应关系

Table 2　Correspondence between integrated service platform modules and technical architecture capabilities of trusted data space

可信数据空间关键能力	综合服务平台对应模块	功能说明
身份管理	权限管理模块、角色管理、节点权限配置	支持监管部门、企业、消费者等不同角色的分级访问与权限配置
目录管理	风险因子数据库、数据导入、数据查询	支持多源抽检数据接入、字段标准化映射、数据检索与报表管理
数字合约管理	数字合约策略配置、链上智能合约接口配置、访问策略配置	支持数据使用目的、访问权限、调用边界和存证规则的结构化表达
数据使用控制	权限分级、脱敏展示、PEP拦截日志	支持越权访问、非授权字段调用、下载转存等异常行为的拦截和记录
存证审计	区块链管理模块、数据上链、防伪溯源、交易统计	支持数据摘要上链、交易哈希查询、区块高度展示和调用日志审计
数据产品与服务目录	风险画像、风险预警、风险评价、查检决策模块	支持风险画像服务、预警服务、评价服务和靶向查检服务输出
空间运行监测	数据驾驶舱、区块链运行统计	支持风险态势、节点数量、交易笔数、区块高度和业务运行状态展示

4.2 数据基础与有机农场业务流转上链流程

本文从“数据接入-标准化治理-风险画像-链上存证-权限控制-业务输出”6个环节说明平台运行流程。平台首先说明多源异构数据如何按照统一模型完成标准化接入，重点对抽样信息、食品类别、监管环节、检测项目、检测结果和结果判定等关键字段进行映射，并按照时间、空间、主体、危害四维标识进行标准化处理。在此基础上，系统将食品类别、检测项目、抽样环节、区域主体和结果判定等要素进行关联，形成统计画像、机器学习聚类画像和知识图谱关联画像，用于识别重点食品类别、关键危害物和高风险抽检环节。同时，平台采用长安链区块链平台作为底层可信存证支撑，将数据摘要、调用日志、异常拦截记录、风险报告摘要等信息进行链上存证，并通过区块高度、交易哈希、时间戳和节点状态实现审计追溯。

以北京某有机农场番茄、叶菜等农产品业务流转场景为例，平台将上链过程划分为数据采集、字段标准化、摘要生成、智能合约调用、链上存证和链下核验6个步骤。首先，农场侧通过接入连接器或平台数据导入接口采集批次编号、采摘时间、产地信息、农事操作记录、检测报告编号、检测项目、检测结果、冷链温度、流通节点和责任主体等关键字段；其次，平台依据“时间-空间-主体-危害”四维标识对字段进行清洗和映射，标准化后的原始明文数据保存在链下风险因子数据库中；再次，系统对单一批次的检测结果、流通节点、温度记录和责任主体等关键信息生成哈希摘要；随后，具备权限的节点调用数据存证智能合约，提交数据产品标识、批次编号、数据摘要、提交主体、时间戳和签名信息；最后，区块链节点将数据摘要、交易哈希、区块高度、时间戳和主体签名写入链上账本。监管方或授权主体可重新计算链下数据哈希，并与链上摘要进行比对，以判断链下数据是否被篡改。该流程形成“原始数据链下留存、关键摘要链上存证、调用过程可追溯、数据篡改可核验”的可信存证模式。

4.3 典型应用场景与关键运行逻辑对应关系

本文进一步梳理典型应用场景与关键机制之间的对应关系，如表3所示。

由表3可知，典型场景并非孤立案例，而是分别对应语义互操作、连接器受控交互、隐私计算、区块链存证和动态信任等运行逻辑。平台说明的重点在于展示这些机制在农业产业链与食品安全风险治理中形成闭环支撑的方式。

在全链路可信溯源与精准追责场景中，有机农场的农产品从育苗、种植、采摘、分拣、包装、冷链运输到商超销售，需要经过多个主体和多个环节。依托综合服务平台，农场侧、检测机构、物流企业和销售终端可将关键字段进行标准化封装，并将数据摘要进行链上存证，从而在不集中暴露全部明文数据的前提下实现跨环节溯源。当监管部门需要查看某一批次农产品的风险状态时，可通过数据驾驶舱和风险因子数据库检索批次编号、检测项目、抽样时间、流通节点和主体信息。系统根据预置的元数据映射关系，自动关联不同环节的批次信息与检测信息，并在平台中生成溯源路径。对于消费者或普通外部主体，平台仅展示绿色认证、检测合格结论、冷链状态等脱敏信息；对于监管用户，平台可进一步展示检测项目、检测结果、流通环节和链上存证摘要。

图5对应平台的数据驾驶舱模块，主要用于展

表3 典型应用场景与关键运行逻辑对应关系

Table 3 Correspondence between typical application scenarios and key operational logic

典型应用场景	对应关键运行逻辑	运行方式	场景说明
全链路可信溯源与精准追责	语义互操作、连接器受控交互、区块链存证	通过批次、主体、检测项目和流通节点的元数据关联，实现对异常批次逆向追踪	支持异常批次的路径还原和链上摘要核验
资产增信与风险评估	数字合约、使用控制、本地沙箱、智能合约	在授权字段范围内调用检测数据、经营数据和物联网数据，输出风险评估结果	支持授权结果输出、越权访问拦截和风险评估结果生成
产销密态匹配	隐私计算、连接器受控交互、数据可用不可见	市场需求数据与生产数据不直接交换明文数据，通过模型或分析结果进行受控协同	支持需求预测、排产建议和结果受控输出
风险预警与靶向查检	语义互操作、知识图谱、链上审计	将食品类别、检测项目、区域、主体和结果判定构建为风险关联网络	支持重点品类、重点危害物和重点区域识别
权限控制与审计追溯	身份管理、使用控制、区块链存证	不同主体依据角色权限访问不同粒度数据，异常操作被写入审计日志	支持分级访问、异常拦截和链上审计查询

示服务平台对多源数据资源、风险态势和关键业务模块的统一呈现能力。其展示内容包括按区域、食品类别、危害物和时间维度进行筛选展示，联动风险画像、风险预警、查检决策和区块链管理等功能入口，以及形成面向监管主体的全局态势感知视图。

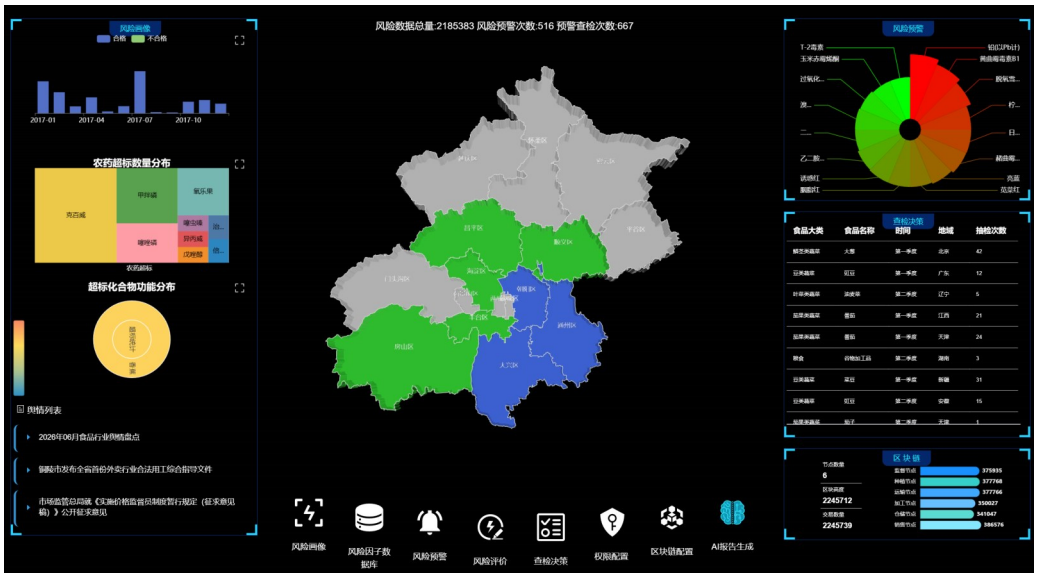


图5 农业产业链可信数据空间全局资源态势感知舱

Fig. 5 Global resource situation awareness cockpit of the trusted data space for the agricultural industry chain

在异常追溯场景中，若终端检测发现某批次农产品存在农残超标风险，监管方可通过平台发起逆向追踪请求。系统依据批次编号、检测报告编号和链上存证哈希，定位相关采摘、分拣、冷链和销售节点，并对链下数据重新计算哈希与链上摘要进行比对。该场景说明，该机制可支持异常批次的路径还原、责任节点辅助定位和数据完整性核验，体现了“元数据目录检索-语义关联-链上存证-逆向追溯”的运行逻辑。

在资产增信与风险评估场景中，农场扩大温室大棚规模时往往面临生物资产估值困难、信用信息不足和风险证明材料分散等问题。综合服务平台可将农场的检测记录、生产批次、环境数据、订单流转和历史风险情况进行标准化治理，并以数据摘要、风险报告摘要和操作日志的形式进行链上存证，为后续资产增信和风险评估提供可信依据。平台不直接向外部主体开放农场完整的明文数据，而是通过数字合约和使用控制策略限定数据调用范围。若外部模型试图访问非授权字段、下载底层明文或超出约定调用频次，系统将阻断该请求，并将异常日志写入审计链路。该场景主要说明数字合约约束、连接器受控交互和“可用不可见”机制，其关注重点并非实际放款或理赔金额，而是授权字段调用、越权访问拦截、结果受控输出和链上日志记录等可观察内容。

在风险画像与靶向查检场景中，平台通过统计

分析、机器学习和知识图谱等模块，对某市2023—2025年食品抽检监测数据进行风险识别。系统将食品类别、食品细类、检测项目、抽样环节、区域主体和结果判定等要素组织为风险关联关系，用于识别高风险品类、关键危害物和重点抽检环节。该场景主要说明语义互操作和知识图谱方法可为风险线索发现、异常批次追溯和靶向查检决策提供辅助支撑。

4.4 区块链存证与权限控制说明

为说明平台对数据主权保护和审计追溯的支撑能力，本文基于系统内置区块链管理模块开展权限控制与链上存证分析。平台区块链管理模块包括数据上链、防伪溯源、交易统计、加密算法配置、智能合约配置和节点权限配置等功能，可展示节点数量、累计交易笔数、区块高度、交易趋势、交易构成和最新区块记录。

图6展示了平台区块链管理模块，主要用于说明链上存证和审计追溯能力。界面中的节点数量、区块高度、累积交易数量、交易趋势和最新交易记录，分别反映区块链网络运行状态、数据存证规模和链上审计线索。通过交易哈希，可进一步查询数据摘要、时间戳、提交主体、合约调用记录和相关交易信息，从而支撑对数据调用、PEP拦截和风险报告生成过程的审计追溯。

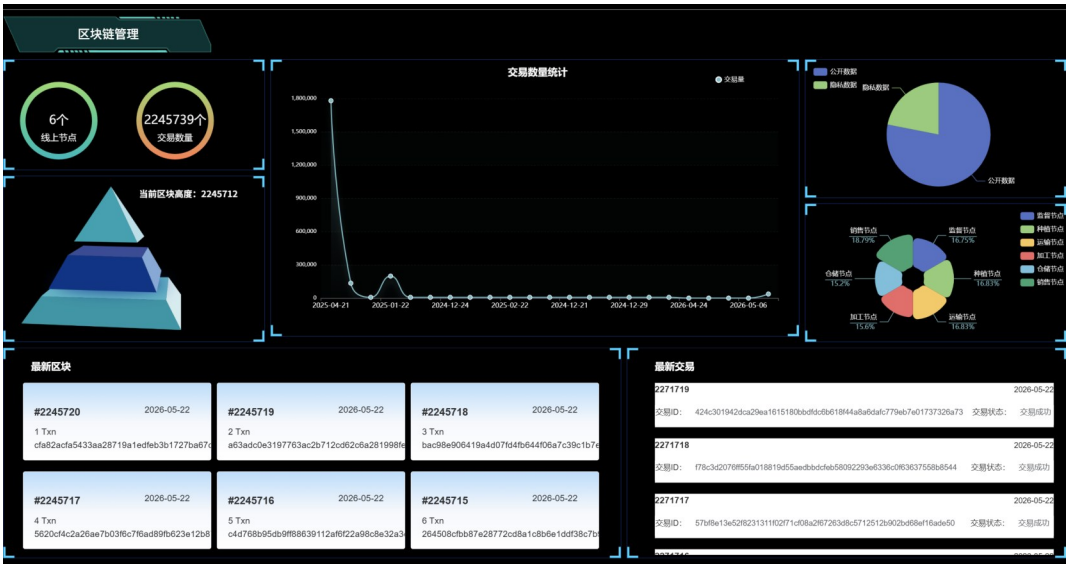


图6　赋能数据主权与动态管控的区块链存证与审计追溯视图

Fig. 6　Blockchain-based evidence preservation and audit tracing view enabling data sovereignty and dynamic control

在权限控制方面，本文设置政府监管部门、农场及关联企业、终端消费者3类主体，分别模拟风险监测、企业数据调用和脱敏溯源查询等操作。不同主体依据角色权限访问不同粒度的数据：监管部门可查看风险画像、抽检记录和链上存证摘要；企业可查看自身的相关生产和检测数据；消费者仅可查看脱敏后的合规溯源信息。对于越权查询、非授权字段访问和下载转存请求，系统记录异常操作并生成拦截日志。

表4从数据接入、字段治理、风险画像、上链存证、溯源核验、权限控制和审计追溯等方面梳理了原型平台的场景化说明与功能对应关系。该平台能够展示多源数据标准化接入、关键字段映射、风险画像构建、权限分级控制和链上存证审计等过程，为农业产业链可信数据空间的场景化落地提供参考。

4.5 与其他行业可信数据空间的技术栈与架构差异

在完成平台模块映射与场景化说明基础上，本文进一步比较农业产业链可信数据空间与其他行业可信数据空间的技术栈和架构适配方面的差异。与金融、工业、档案和图书馆等行业可信数据空间相比，农业产业链场景在主体结构、数据类型、边缘算力和监管目标等方面具有更强的复杂性。金融场景更关注征信风控、合规审计和实时交易安全，工业场景更关注设备互联、工业协议适配和边缘控制，档案与图书馆场景则更关注知识组织、长期保存和公共服务治理。相比之下，农业产业链可信数据空间更需要关注轻量级接入连接器、农业领域语

表4 农业产业链可信数据空间原型平台场景化说明与功能对应关系

Table 4 Scenario-based description and functional correspondence of the prototype platform for the trusted data space of the agricultural industry chain

说明对象	对应运行逻辑	观察内容	场景化说明
数据接入与标准化治理	目录管理、语义互操作	接入数据规模、年份跨度、任务类型、监管环节、字段映射数量	接入2023—2025年抽检监测数据约12万条,其中2023年40 096条、2024年43 383条、2025年36 582条;覆盖4类抽检任务、3类监管环节,完成抽样单编号、抽样时间、样品名称、食品类别、检测项目、检测结果等12类关键字段映射
风险画像与靶向查检	语义互操作、风险画像、知识图谱	食品类别覆盖、风险项目覆盖、风险关联实体类型	覆盖蔬菜、水果、畜禽肉及副产品、食用油、粮食加工品等5类主要食品;覆盖农药残留、兽药残留、重金属污染物、食品添加剂、品质指标等5类风险项目;构建食品类别、检测项目、抽样环节、区域主体、结果判定等5类关联实体
有机农场数据上链	区块链存证、智能合约调用	上链流程步骤、链上记录要素、链下核验方式	将农场批次数据上链流程细化为数据采集、字段标准化、摘要生成、智能合约调用、链上存证、链下核验6个步骤;链上记录数据摘要、交易哈希、区块高度、时间戳、主体签名等5类要素;支持链下数据哈希重算与链上摘要比对
全链路可信溯源	语义互操作、链上存证、受控访问	溯源路径节点数、链上核验要素	支持生成"食品类别-检测项目-抽样环节-主体"4级风险路径;支持基于交易哈希、区块高度、时间戳等3类链上信息进行摘要核验
权限控制与异常拦截	数字合约、使用控制、本地沙箱	用户角色数量、权限粒度、异常操作类型	设置政府监管部门、农场及关联企业、终端消费者3类用户角色;支持监管级、企业级、消费者级3级数据可见范围;对越权查询、非授权字段访问、下载转存等3类异常操作进行拦截并记录PEP日志
消费者脱敏溯源查询	细粒度权限控制、脱敏展示	可见数据层级、敏感数据屏蔽类型	普通用户仅可查看脱敏溯源切片;企业经营数据、完整检测明文、内部风险分析结果等3类敏感信息不向普通用户开放
区块链审计追溯	区块链存证、审计追溯	审计查询入口、审计记录要素	支持基于交易哈希查询链上存证摘要;审计记录包括数据摘要、时间戳、提交主体、合约调用记录、异常拦截日志等5类信息

义互操作、批次级数据产品目录、数字合约使用控制、链上存证审计，以及面向质量安全监管和产销协同的风险画像能力。

综上，基于自主研发的农业产业链可信数据空间综合服务平台，围绕有机农场和某市食品安全抽检数据，开展初步场景化说明。总体来看，平台能够在农业产业链与食品风险治理场景中支撑多源数据接入、四维标识映射、风险画像构建、知识图谱关联、权限分级控制和区块链存证审计等功能，初步展示了语义互操作性、连接器受控交互、数字合约约束、可用不可见、链上审计和价值协同等关键机制的应用方式。由于农业产业链可信数据空间仍属于面向数据可信流通的新型范式，当前内容主要是基于原型平台支撑下的场景化说明，后续将进一步围绕轻量级接入连接器、数字合约自动执行、跨主体使用控制策略下发、风险数据产品目录建设和多区域互联互通开展扩展研究。

5 农业产业链可信数据空间实施路径

为确保农业产业链可信数据空间从理论架构稳步迈向产业落地，系统性消除当前农业产业链数据要素流通的重重壁垒，本文从制度、技术、生态与实操4个维度提出以下实施路径与对策建议。农业产业链可信数据空间的四维实施路径及其由试点建设向规模化应用演进的总体逻辑如图7所示。

5.1 制度层面:完善农业产业链数据分类分级标准,界定数据权属

农业产业链数据涉及生产、加工、流通、监管等多主体，数据权属边界和使用责任较为复杂，容易制约跨主体流通。面对这一复杂局面：一是加快完善农业产业链数据分类分级的国家或行业标准；二是要基于数据的来源、用途，以及潜在的风险，实施差异化安全保障策略；三是在现行法律框架下，迫切需要依托可信数据空间中的数字合约机制，推进农业产业链数据资源持有权、加工使用权和产品经营权的结构性分离。通过明确界定各方权属边界，为数字合约的设定与自动化执行提供坚实的法理支撑，从源头层面化解多主体介入数据跨域流通所伴随的各类顾虑。

5.2 技术层面:攻关轻量级连接器技术,推动隐私计算纵深应用

农业产业链可信数据空间向技术应用下沉时，面临一个突出矛盾：高并发密码学的计算需求，同农村边缘侧计算算力薄弱的现实构成尖锐冲突。广大农户与基层合作社普遍缺少IT运维能力，再加上农业产业链物联网环境比较复杂，直接部署重型的管控节点会引发网络与性能上的瓶颈，亟待推进底层技术的普适化与轻量化改造。一方面，研发端需

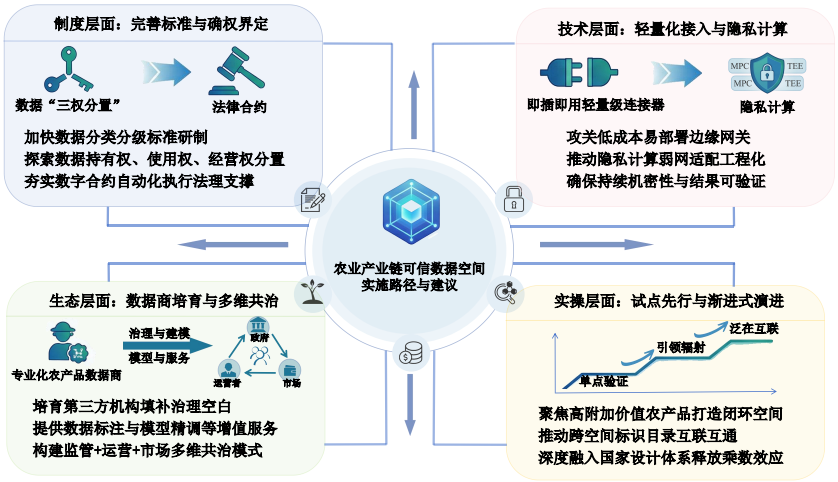


图 7　农业产业链可信数据空间四维实施路径与演进架构图

Fig. 7　Four-dimensional implementation pathway and evolutionary architecture diagram of the agricultural industry chain trusted data space

要将主攻方向放在低成本、易部署的“轻量级接入连接器”这种软硬件一体化设备上面，使得基层数据提供方能通过即插即用的方式接入。另一方面，需大力推动隐私保护计算、数据沙箱等技术在弱网算力约束下的工程化适配与集成。通过在连接器侧集成相关组件，切实保障高敏感农业产业链数据在流转过程中的机密性与结果可验证性，从而扫除“可用不可见”在基层落地的技术障碍。

5.3　生态层面：培育专门化“数据商”，构建多维共治模式

目前，农业产业链数据要素市场面临着“数据治理与合规成本高”与“传统农业主体付费意愿低”的商业化断层难题，仅靠单体农企自发共享难以维持长效运转。为完善生态闭环，需参照国家数据基础设施的角色定位，大力培育专门服务于农业产业链的第三方“数据商”，促使其深度参与空间的运营。这些专业服务机构可通过接入连接器，在合法合规的前提下提供数据治理、脱敏标注、算法模型开发等增值服务，从而填补传统农业产业链经营主体在数据处理能力上的空白。在此之上，构建由农业农村、市场监管、数据管理等相关主管部门协同监管，专业运营方负责日常运行，市场主体广泛参与的多方共治生态。由此形成从底层数据供给到顶层业务赋能的商业正向循环，提升多主体参与数据流通的持续性。

5.4　实操层面：试点先行，引领辐射，全面覆盖

农业产业链可信数据空间涉及多环节、多主体和多系统协同，落地初期容易面临参与动力不足、标准不统一和跨域互信不足等问题。因此，其实施过程宜采取“先建试点、引领辐射、全面覆盖”的渐进式路径，避免一次性铺开造成新的系统割裂。

一是试点先行阶段，宜选择基础条件较好、链条较完整的优势产业链或核心产区，围绕质量追溯、风险预警或供应链协同等具体场景开展小范围试点，重点检验连接器接入、目录管理、数字合约和链上存证等关键环节的可操作性。

二是进入区域辐射阶段，前期独立运行的逻辑可信数据空间应按照“三统一”标准，规范接入省级或国家级的农业产业链区域或行业功能节点，实现身份、标识与目录的全面互联互通。这意味着单一供应链的数据闭环开始向产业集群网络延伸，系统性地突破了单一物理空间的局限，达成了跨域跨空间的数据互联互通，使得农业产业链数据能够在区域范围内支持供需撮合与协同调度。

三是到了全面覆盖阶段，成网连片的农业产业链可信数据空间会作为核心业务节点，有序地融入国家数据基础设施体系里面。通过数据基础设施公共服务，农业产业链数据要素将打破行业壁垒，实现与金融、气象、交通物流等其他数据流通利用设施的互信互认与协同应用。到这时，全国一体化农业产业链数据要素市场将稳步成型，深度释放乘数效应，为现代农业的数字化转型提供坚实的数据支撑。

6　总结与展望

本文立足于“数据要素×现代农业”的背景，

在国家可信数据空间通用技术架构基础上，围绕农业产业链数据流通场景，提出了可信数据空间的领域化理论框架，并进一步阐释了与数据对象、主体关系和业务流程相适配的运行机制与实施路径。通过提出涵盖了基础设施、核心枢纽、能力支撑与应用生态的4层架构体系，本文从框架层面对多源农业产业链数据跨域交互的信任支撑与流通逻辑进行了分析。该架构一方面依托部署在边缘侧的标准化连接器与履行中介目录寻址功能的可信数据空间服务平台；另一方面依托基于本体模型的语义映射机制，并与“使用控制”策略结合，在原始明文数据不集中汇聚的前提下，实现对高敏感农业产业链数据“可用不可见”的受控流转。这不仅能打破传统中心化数据平台的垄断格局与封闭生态，更为海量且异构的农业产业链数据确立一个兼顾了数据主权保护与高效价值流转的可信流通框架。

然而，作为一种新型数据流通基础设施，农业产业链可信数据空间从理论架构走向规模化产业落地仍面临诸多现实挑战。一是在制度与合规层面，农业产业链数据涉及多主体、多环节和多类型权益，支撑数字合约执行的数据权属边界和责任划分仍需进一步明确。二是在技术工程层面，基层经营主体的信息化基础和运维能力相对有限，轻量化接入连接器、隐私计算组件和弱网算力环境下的工程适配仍需进一步完善。三是在生态运营层面，农业产业链数据商、专业运营方和多方共治机制仍处于培育阶段，多元主体参与数据流通的内生动力和利益分配机制有待完善。

今后，农业产业链可信数据空间的规模化落地将成为构建全国一体化农业产业链数据要素市场的重要方向。在全链路品牌保护、供应链金融风控、参数化理赔和产销协同等场景中，连接器、使用控制和数字合约等机制有望促进农业数据要素在多主体协同中的价值释放。随着底层密态计算组件的持续攻关、制度权属边界的日益清晰，以及“农业产业链数据商”共治生态的日趋繁荣，农业产业链可信数据空间有望更好地融入国家数据基础设施体系。这一新型数智底座的体系化部署将推动我国农业产业链底层数据从“沉睡的物理资源”向“高流动性的数字资产”转化，为实现农业产业链的智能化转型与高韧性协同发展提供关键的基础支撑。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] 国家数据局,中央网信办,科技部,等. 国家数据局等部门关于印发《"数据要素×"三年行动计划(2024—2026年)》的通知:国数政策〔2023〕11号[EB/OL]. [2026-04-20]. https://www.cac.gov.cn/2024-01/05/c_1706119078060945.htm

[2] 曹冰雪, 赵春江, 李瑾, 等. 中国智慧农业技术发展现状、挑战与展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(21): 1-10.
CAO B X, ZHAO C J, LI J, et al. Current status, challenges and prospects of smart agriculture technology development in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(21): 1-10.

[3] 郭威, 吴华瑞, 朱华吉, 等. 农业生产大数据治理: 关键技术、应用分析与发展方向[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(3): 17-34.
GUO W, WU H R, ZHU H J, et al. Agricultural big data governance: Key technologies, applications analysis and future directions[J]. Smart Agriculture, 2025, 7(3): 17-34.

[4] 张小允, 许世卫, 王晓伟. 数字经济背景下提高中国农产品质量安全保障水平探究[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(2): 205-214.
ZHANG X Y, XU S W, WANG X W. Strategies to enhance the quality and safety assurance of Chinese agricultural products in the digital economy[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(2): 205-214.

[5] LI J Q, YU Y. Impact of government public data openness on agricultural total factor productivity[J]. International Review of Economics & Finance, 2025, 104(C). DOI: 10.1016/j.iref.2025.104561.

[6] REN J Z, WANG M, LI X J, et al. Data elements and agricultural green total factor productivity: Evidence from a quasi-natural experiment based on public data openness in China[J]. Agriculture, 2025, 15(11): 1130.

[7] 陈枫, 赵春江, 杨信廷, 等. 基于可编辑区块链的农产品供应链追溯高效存储查询模型[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 143-152.
CHEN F, ZHAO C J, YANG X T, et al. High-efficiency storage and retrieval model to trace agri-food supply chain using redactable blockchain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(16): 143-152.

[8] CORDERO-GUTIÉRREZ R, LAHUERTA-OTERO E, ZAPATERO-GONZÁLEZ A. Leveraging blockchain for ecosystem service transparency: Enhancing consumer value and sustainability in the beef industry[J]. Agricultural and Food Economics, 2025, 13(1): 45.

[9] 陈奕延, 李晔, 李存金, 等. 可持续性与数字化: 区块链驱动的循环农业研究[J]. 生态经济, 2022, 38(3): 123-133.
CHEN Y Y, LI Y, LI C J, et al. Sustainability and digitalization: Research on blockchain driven circular agriculture[J]. Ecological Economy, 2022, 38(3): 123-133.

[10] AMRAOUY O, BENBRAHIM M, KABBAJ M N. A blockchain- and self-sovereign identity-based collaborative framework for secure and verifiable cross-organizational data sharing in smart irrigation[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101654.

[11] TORKY M, HASSANEIN A E. Integrating blockchain and the Internet of Things in precision agriculture: Analysis, opportunities, and challenges[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105476.

[12] 许继平, 李卉, 王浩宇, 等. 基于联邦学习的粮食供应链隐私数据要素协同计算研究[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(4): 79-91.
XU J P, LI H, WANG H Y, et al. Collaborative computing of food supply chain privacy data elements based on federated learning [J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 79-91.

[13] 张新, 肖柳君, 许继平, 等. 基于分布式联邦学习的农产品供应链跨域风险信息检测研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 56-66, 89.
ZHANG X, XIAO L J, XU J P, et al. Distributed federated learning framework for cross-domain risk information detection in agricultural product supply chains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 56-66, 89.

[14] 吴国栋, 胡全兴, 刘旭, 等. 差分隐私增强的大米区块链品控模型[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(4): 149-159.

WU G D, HU Q X, LIU X, et al. Differential privacy-enhanced blockchain-based quality control model for rice[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(4): 149-159.
[15] GAVAI A, BOUZEMBRAK Y, MU W J, et al. Applying federated learning to combat food fraud in food supply chains[J]. npj Science of Food, 2023, 7: 46.
[16] DURRANT A, MARKOVIC M, MATTHEWS D, et al. The role of cross-*Silo* federated learning in facilitating data sharing in the agri-food sector[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106648.
[17] DEMBANI R, KARVELAS I, AKBAR N A, et al. Agricultural data privacy and federated learning: A review of challenges and opportunities[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110048.
[18] GARRO R J, WILSON C S, SWAIN D L, et al. A systematic literature review on the applications of federated learning and enabling technologies for livestock management[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 234: 110180.
[19] 国家数据局. 国家数据局关于印发《可信数据空间发展行动计划（2024—2028年）》的通知:国数资源〔2024〕119号[EB/OL]. https://www.nda.gov.cn/sjj/zwgk/zcfb1122/202411221641421829 15964_pc.html.
[20] 齐培杨, 孙传恒, 谭昌伟, 等. 基于PQ-ECIES的蔬菜物联网区块链防伪追溯系统[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(2): 237-250.
QI P Y, SUN C H, TAN C W, et al. Vegetable IoT blockchain anti counterfeiting traceability system based on PQ-ECIES[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(2): 237-250.
[21] 景旭, 刘滋雨, 秦源泽. 基于区块链中继技术的集群式农产品供应链溯源模型[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 299-308.
JING X, LIU Z Y, QIN Y Z. Traceability model of cluster agricultural product supply chains based on blockchain relay technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 299-308.
[22] 刘秋云. 数字农业背景下农产品供应链优化与成本控制研究[J]. 当代农机, 2026(2): 97-98.
[23] JIAN W S, GAO J L, XIA X Y, et al. Environmental stressors in seafood supply chains: From molecular mechanisms to advanced preservation strategies[J]. Food Chemistry, 2025, 495: 146376.
[24] HOSSEINI A, GOLI A. Energy-Aware Dual-Channel agricultural supply chain network design under uncertainty[J]. Computers & Industrial Engineering, 2025, 207: 111294.
[25] MORCHID A, ISMAIL A, KHALID H M, et al. Blockchain and IoT technologies in smart farming to enhance the efficiency of the agri-food supply chain: A review of applications, benefits, and challenges[J]. Internet of Things, 2025, 33: 101733.
[26] 房洪伟, 胡然然, 热孜燕·瓦卡斯. 智慧农业发展综合评价体系构建、实践格局与驱动机制[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(3): 26-39.
FANG H W, HU R R, REZIYAN WAKASI. Construction of a comprehensive evaluation system, practice pattern, and driving mechanism for smart agriculture development[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(3): 26-39.
[27] 王冰星, 苏竟琳, 李茜荧. 农业可信数据空间建设现状探讨与展望[J]. 中国总会计师, 2025(11): 41-44.
[28] 周毅, 陈成. 我国可信数据空间研究: 框架构建、主题演化与未来方向[J]. 电子政务, 2026(8): 29-40.
[29] 尚思远, 杜学绘, 刘敖迪, 等. 区块链赋能可信数据空间安全的研究进展[J]. 电子学报, 2025, 53(12): 4833-4858.
SHANG S Y, DU X H, LIU A D, et al. Research progress on blockchain-enabled trusted data space security[J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(12): 4833-4858.
[30] 唐长乐. 可信数据空间多元要素协同的理论建构与实践映照[J]. 图书馆论坛, 2026, 46(5): 27-38.
TANG C L. Theoretical construction and practical reflection on the synergy of multiple elements in trusted data spaces[J]. Library Tribune, 2026, 46(5): 27-38.
[31] 唐长乐, 张志腾. 可信数据空间赋能档案数据资产化: 概念、作用与路径[J]. 北京档案, 2026(2): 33-40.
[32] 陈福, 周凯, 朱建明, 等. 基于区块链的可信数据空间数据要素演化博弈研究[J]. 通信学报, 2025, 46(10): 100-117.
CHEN F, ZHOU K, ZHU J M, et al. Evolutionary game analysis of data elements in a blockchainbased trusted data space[J]. Journal on Communications, 2025, 46(10): 100-117.
[33] 中国工商银行金融科技研究院区块链研究团队. 区块链赋能可信数据空间建设的研究与实践[J]. 中国金融电脑, 2025(8): 62-67.
[34] ZHANG X H, LI X H, MIAO Y B, et al. A data trading scheme with efficient data usage control for industrial IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(7): 4456-4465.
[35] 刘军. 现下可信数据空间建设面临的挑战及应对建议[J]. 网络安全和信息化, 2026(1): 1-2.
[36] 王强, 陈鹏玮. 图书馆可信数据空间建设: 场景观察、风险透视与治理演进[J]. 图书馆, 2026(2): 31-39.
WANG Q, CHEN P W. Building trustworthy data spaces in libraries: Scenario observation, risk exploration and governance evolution[J]. Library, 2026(2): 31-39.
[37] 管涛, 许茂恒. 可信数据空间的构建逻辑与路径:基于全生命周期理论[J]. 图书与情报, 2025(5): 123-132.
GUAN T, XU M H. The architectural logic and implementation pathways of trusted data spaces: A full lifecycle theory perspective[J]. Library and Information, 2025(5): 123-132.
[38] NYOMAN KUTHA KRISNAWIJAYA N, TEKINERDOGAN B, CATAL C, et al. Data analytics platforms for agricultural systems: A systematic literature review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195: 106813.
[39] CRAVERO A, SEPÚLVEDA S, GUTIÉRREZ F, et al. From precision agriculture to intelligent agricultural ecosystems: A systematic review of machine learning and big data applications[J]. Agronomy, 2026, 16(5): 516.
[40] QIN C, ZHAO P Q, QIAN Y, et al. A comprehensive review of big data intelligent decision-making models for smart farms[J]. Agronomy, 2025, 15(12): 2898.
[41] 王新, 张圆圆, 许苗, 等. 基于异构数据集成技术的农业信息综合管理网络平台开发[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 211-218.
WANG X, ZHANG Y Y, XU M, et al. Development of integrated network platform for heterogeneous agricultural information remote monitoring terminal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 211-218.
[42] AISSI M E MEL, BENJELLOUN S, LAKHRISSI Y, et al. A scalable smart farming big data platform for real-time and batch processing based on lambda architecture[J]. Journal of System and Management Sciences, 2023, 13(2): 17-30.
[43] JIANG S B, HU S. Research on Smart Agriculture Big Data Platform Based on the Internet of Things[C]// Proceedings of the 2023 4th International Conference on Big Data and Social Sciences (ICBDSS 2023). Dordrecht, The Netherlands: Atlantis Press International BV, 2023: 365-374.
[44] 马为红, 李嘉位, WANG Zhiquan, 等. 商业化肉牛繁育大数据平台设计与关键技术[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(2): 99-109.
MA W H, LI J W, WANG Z Q, et al. Design and key technologies of big data platform for commercial beef cattle breeding[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(2): 99-109.
[45] 杨晨雪, 李娴, 周清波. 知识图谱驱动下粮食生产大数据应用现状与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(2): 26-40.
YANG C X, LI X, ZHOU Q B. Knowledge graph driven grain big data applications: Overview and perspective[J]. Smart Agriculture, 2025, 7(2): 26-40.
[46] 许继平, 韩佳琪, 张新, 等. 基于可信区块链和可信标识的粮油质量安全溯源研究[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 48-59.
XU J P, HAN J Q, ZHANG X, et al. Quality and safety traceability of grains and oils based on trusted blockchain and trusted identity[J]. Food Science, 2023, 44(3): 48-59.
[47] 吴政娴, 文娟. 农业大数据与隐私计算技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 184-199, 276.
WU Z X, WEN J. Research on agricultural big data and privacy computing technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 184-199, 276.

Trusted Data Space for the Agricultural Industry Chain: Theoretical Framework, Operating Mechanism, and Implementation Path

ZHANG Xin[1], CHEN Mingyang[1], ZHAO Zhiyao[1], CHI Cheng[2], WANG Xiaoyi[1], XU Jiping[1*]

(1. *School of Computer and Artificial Intelligence*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*;
2. *National Industrial Information Security Development Research Center*, *Beijing* 100040, *China*)

Abstract: [Objective] Data across the agricultural industrial chain are generated throughout production, processing, storage, logistics, sales and supervision. Such data feature dispersed stakeholders, long-link processes, multi-source heterogeneity, and high privacy- and business-information sensitivity. Nevertheless, current agricultural big-data platforms and standalone technologies including blockchain-enabled traceability, privacy-preserving computation and federated learning cannot systematically resolve bottlenecks in cross-entity data circulation, such as data ownership confirmation, controlled utilization, audit tracing and value-oriented collaboration. Accordingly, this paper proposes a trusted data-space framework tailored for agricultural production, circulation, supervision and service collaboration scenarios to satisfy requirements for trusted cross-entity data circulation. It elaborates the framework's layered architecture, core operational mechanisms and implementation paths, offering systematic references for agricultural data sovereignty protection, controlled data sharing, audit tracing and value collaboration. **[Methods]** Based on the national standard Technical Architecture of Trusted Data Space and the characteristics of the agricultural industry chain, including multiple stakeholders, long-chain processes, limited computing capacity at edge nodes, and data heterogeneity, a domain-adaptation approach was adopted to construct the overall framework and analyze its operating mechanisms. The framework design focused on semantic interoperability, connector-based controlled interaction, privacy-preserving computation, and blockchain-based evidence preservation. A self-developed integrated service platform was then used for preliminary scenario-based analysis, combining about 120 000 food safety sampling and monitoring records from a city during 2023—2025 with the business workflow of an organic farm. The analysis covered standardized data access and governance, risk profiling, on-chain evidence preservation, trusted traceability, permission control, abnormal request interception, and audit tracing. **[Results and Discussions]** A four-layer architecture was established, consisting of an infrastructure and data resource layer, a trusted data space core layer, a data capability support layer, and an agricultural industry chain application ecosystem layer. The operating mechanism formed a closed loop jointly driven by deep semantic interoperability, connector-based controlled interaction, value co-creation through privacy-preserving computation, and dynamic trust supported by blockchain and smart contracts. Under this framework, ontology models, metadata, and knowledge graphs supported concept alignment, structural mapping, and contextual disambiguation; connectors, digital contracts, and usage control policies constrained usage purposes, invocation frequency, field scope, output forms, and prohibited behaviors; privacy-preserving computation and federated learning enabled cross-entity collaborative analysis without centralizing raw plaintext data; and blockchain recorded contract hashes, log hashes, result digests, and abnormal interception records for auditable tracing. The platform-based scenario description showed that the framework could support standardized data access, risk profiling, on-chain evidence preservation, role-based permission control, abnormal operation interception, and audit tracing in agricultural and food safety risk governance scenarios. In the organic-farm workflow, the mechanism was reflected by keeping raw data off-chain, storing key digests on-chain, controlling data use within authorized environments, and retaining auditable records of the process. Compared with conventional centralized agricultural data platforms, this framework emphasized physical distribution with logical integration and extends security protection from access control to continuous usage control after cross-entity interaction. The four-dimensional implementation pathway further indicated that institutional rules, lightweight connectors and privacy-preserving components, specialized data intermediaries, and progressive pilot deployment should advance in coordination. **[Conclusions]** The proposed trusted data space framework provides a systematic approach to controlled data circulation, data sovereignty protection, auditability, and value collaboration among multiple stakeholders in the agricultural industry chain without requiring centralized aggregation of raw plaintext data. It can serve as a reference for the circulation of agricultural data elements and the collaborative transformation of the agricultural industry chain, while providing a basis for integration with the national data infrastructure system.

Keywords: agricultural industry chain; data circulation; trusted data space; data element circulation; data connector; federated learning; agricultural informatization system

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2022YFF1101103); National Natural Science Foundation of China (62402020)

First author: ZHANG Xin, E-mail: zhangxin@btbu.edu.cn

***Corresponding author:** XU Jiping, E-mail: xujiping@139.com