

# 数字供应链下区块链技术采纳的三方演化博弈分析\*

康博涵, 周剑桥, 张烜通  
(中国兵工物资集团有限公司, 北京 100089)

**摘要:** 数据正逐渐成为驱动经济社会发展的新质生产要素, 伴随着数据驱动下供应链运营模式的数字化变革, 区块链技术为解决数字供应链下信息不透明、数据确权难等问题提供了新的选择。通过分析区块链在供应链中数据共享机制问题, 构建由数据供给主体、参与共享客体以及供应链共享管理平台组成的三方演化博弈模型, 分析各博弈主体策略选择的稳定性, 并分析关键因素对系统演化的影响。研究发现: 参数的数值关系影响供应链数据共享的演化稳定策略, 数据共享主客体参与方在三方演化博弈过程中会受到来自平台方激励和惩罚机制、参与主客体共享数据量和增量效用、潜在损失和运营成本等多种潜在因素的影响; 低质量数据共享造成不同平台成本损失的差异性, 则是供应链平台方是否采纳区块链平台运营模式的关键因素。在丰富相关理论研究的同时, 为供应链数据要素共享中的区块链应用实践提供参考。

**关键词:** 数字供应链; 区块链; 数据共享; 三方演化博弈; 仿真分析

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.19358/j.issn.2097-1788.2026.02.007

**中文引用格式:** 康博涵, 周剑桥, 张烜通. 数字供应链下区块链技术采纳的三方演化博弈分析 [J]. 网络安全与数据治理, 2026, 45(1): 50-59.

**英文引用格式:** Kang Bohan, Zhou Jianqiao, Zhang Xuanton. Three-party evolutionary game analysis of blockchain technology adoption under the digital supply chain [J]. Cyber Security and Data Governance, 2026, 45(1): 50-59.

## Three-party evolutionary game analysis of blockchain technology adoption under the digital supply chain

Kang Bohan, Zhou Jianqiao, Zhang Xuanton  
(China Ordins Group Co., Ltd., Beijing 100089, China)

**Abstract:** Data is gradually becoming a new productive factor driving the development of the economy and society. Alongside the digital transformation of supply chain operating models driven by data, blockchain technology offers a new solution to issues such as information opacity and difficulties in data ownership recognition within digital supply chains. By analyzing the data-sharing mechanism of blockchain in supply chains, we construct a tripartite evolutionary game model consisting of data providers, participating sharing entities, and a supply chain sharing management platform. We analyze the stability of strategy choices among different game participants and assess the impact of key factors on system evolution. The study demonstrates that the numerical relationships between parameters influence the evolutionary stable strategies for data sharing in supply chains. During the tripartite evolutionary game process, participants in data sharing will be affected by various potential factors, including the incentive and punishment mechanisms of the platform, the amount and incremental utility of data shared by participating entities, potential losses, and operational costs. The variability in costs due to low-quality data sharing across different platforms is a crucial factor determining whether the supply chain platform opts for a blockchain-based operational model. The research enriches the theoretical framework while providing practical references for the application of blockchain in supply chain data element sharing.

**Key words:** digital supply chain; blockchain; data sharing; three-party evolutionary game; simulation analysis

\* 基金项目: 中国兵工物资集团科技创新项目“基于主数据中枢的轻量级穿透式监管数据治理及资产化技术研究”

## 0 引言

数字经济的快速发展,打破了物理因素对传统经济发展模式的限制,从根本上改变了商业实体的运行机制和价值创造方式<sup>[1]</sup>。对于企业而言,数字化技术帮助企业打破资源要素的壁垒,有效解决资源约束和信息不对称等问题<sup>[2-3]</sup>。在流通领域,数字技术有力赋能供应链的高质量发展,不仅提高供应链的治理水平,还增强了上下游各参与方之间的协作程度,形成数据驱动下的供应链新型价值流通体系<sup>[4]</sup>。不同于传统供应链的供给主导型管理模式,数字化转型增加了供应链集成实现的多样性,降低了供应链内部和各环节之间的成本,使得供应链上下游参与方的纵向关联愈发凸显<sup>[5-6]</sup>。

数字供应链运行模式下,企业是供应链平台生态系统的参与主体,数据作为核心流通要素,通过作用于供应链信息技术中台架构,为企业间的生产经营提供更为高效的信息共享、业务协同及战略联盟等协作方式<sup>[7-8]</sup>。近年来,先进技术的出现和应用,进一步地使企业由传统的业务驱动逐步向数据驱动下的智能服务业务模式转型,增强供应链的韧性和适应性。其中,区块链凭借信息可溯源、数据不可篡改等特点<sup>[9]</sup>,能够有效为供应链交易中信息不对称和数据安全问题提供良好解决方案,并精准把控上下游业务协同过程中的系统性潜在风险<sup>[10]</sup>。目前,已有研究多围绕区块链赋能供应链新兴业务模式展开。例如在保理业务方面,邓爱民等<sup>[11]</sup>提出将供应链保理与区块链智能合约技术结合的设想,并阐述了区块链下供应链保理业务模式的实施流程。赵昌平等<sup>[12]</sup>引入区块链,论证了区块链技术对保理信用风险控制的作用机理。在权证登记方面,已有学者<sup>[13-14]</sup>设计了区块链赋能知识产权的交易架构,提出了基于区块链的原创成果登记、交易与保护机制。也有学者<sup>[15-16]</sup>基于区块链分布式存储结构的技术特点,从技术角度探究区块链对数据要素访问控制和隐私保护等解决方案。

然而,区块链技术本身虽然能确保数据的不可篡改性和可追溯性,但并不能对内部参与方的数据治理层面提供支持,难以对供应链参与方的数据质量、价值共创等方面展开优化建设,例如,为提升供应链参与方的多方参与数据价值分配问题,孙国强等<sup>[17]</sup>针对现有供应链网络自发形成的数据共享模式存在的诸多弊端,通过引入区块链技术,构建政府与供应链网络上下游子群三方演化博弈模型,并分析其博弈均衡策略。部分学者<sup>[18-20]</sup>以机器学习、联邦学习等人工智能技术赋能,对区块链多方数据的公平性参与激励问题

展开优化,保障了数据要素供应链下供给方利益分配的公平性与资源配置的可信性。郑荣等<sup>[21]</sup>采用“技术框架搭建—平台模型构建—运行机理剖析”的研究范式,以全国碳排放交易供应链为实际应用场景,阐释平台在政府数据协同治理中的价值。其他相关研究<sup>[22-23]</sup>则多关注基于区块链的政务数据治理问题,并分别提出了对应优化方案,以推动政府公共数据供应链的有序发展。

综上所述,尽管近年来关于数据要素的研究较为丰富,但基于流通视角的数据交易平台发展研究较少,而交易平台对数据要素流通具有重大影响<sup>[24]</sup>。已有文献为开展数字供应链下区块链应用策略的研究提供了理论基础,但尚存在一些不足。首先,现有研究对数字供应链中区块链应用博弈问题的研究尚不充分,大多探讨区块链如何赋能数字供应链,但较少关注是否采纳区块链,也没有比较一般模式与区块链模式下数据共享主体行为策略的差异。其次,数字供应链环境下,在多方数据协作和共享过程中可能会存在“搭便车”等不公平行为,即参与方存在共享低质量数据以获取不当得利的可能性,长期会导致供应链交易环境中形成“柠檬市场”下的负外部性市场效应,影响数据要素在供应链上下游的高质量流转。

本文着眼于数字供应链中区块链应用的演化博弈问题,分析区块链在数字供应链中的作用和采纳机制,并构建以数据供给主体、参与客体以及供应链共享管理平台所组成的三方演化博弈模型,综合讨论不同主客体的共享行为策略,为数字供应链下数据共享实践中区块链应用决策提供理论支撑。

## 1 模型假设与构建

针对数字供应链下是否采纳区块链以及采纳后的策略问题,本文考虑数据供给主体、参与共享客体以及供应链共享管理平台所组成的三方演化博弈模型,综合讨论不同主客体的共享行为策略,并进行数值仿真验证。其中,供应链各参与方由于在资源禀赋和数据算力上的差异,使得他们有着不同的上下游定位和责任分工。因此,数据共享主体具有将其本身具有的数据资产进行出售获取利益的需求;数据共享客体作为需求方支付所购买数据模型的费用;交易平台是供应链参与方之间的数据共享载体,提供安全高效的信息供需渠道,同时由监管部门发挥信息共享平台的组织与监管作用。结合供应链内数据共享的实际情况,基于三方演化博弈的假设如下。

**假设 1:** 数字供应链下数据共享三方参与主体分

别为数据供给主体 A、参与共享客体 B 以及供应链共享平台运营方 C, 同时设定所有参与者均为有限理性。平台运营方 C 具有采纳区块链和不采纳区块链两种行为策略, 策略集合为 {采纳区块链, 不采纳区块链}, 设定平台采纳区块链的概率为  $x(0 \leq x \leq 1)$ , 不采用区块链的概率为  $1-x$ ; 数据供给主体 A 存在共享高质量数据和低质量数据两种行为策略, 其共享策略空间为 {共享高质量数据, 共享低质量数据}, 其中选择高质量数据的共享策略概率为  $y(0 \leq y \leq 1)$ , 选择低质量数据的共享策略概率为  $1-y$ ; 参与共享客体 B 存在接受数据共享和不接受数据共享两种行为策略, 其策略空间为 {接受共享, 不接受共享}, 选择接受数据共享策略的概率为  $z(0 \leq z \leq 1)$ , 选择不接受数据共享策略的概率为  $1-z$ 。其中,  $x, y, z$  均为时间  $t$  的函数。

**假设 2:** 当数据供给主体 A 不采纳区块链技术赋能数据共享时, 参与方主体在数据共享完成后会获得一定效用, 由于不同参与主体所具备资源禀赋和数据质量的不同, 从彼此间的数据共享中挖掘出的价值也存在差异性。本文分别以  $r_A$  和  $r_B$  表示参与双方的数据共享效用系数,  $k_A$  和  $k_B$  表示主客体参与方的基础效用, 其中  $r_A > r_B$ 。同时以  $d_A$  作为参与主体 A 向参与客体 B 共享的数据量。此外, 考虑到传统中心化架构在数据共享过程中存在系统性攻击和数据篡改风险, 可能会损害数据的完整性和准确性, 本文引入风险系数  $\rho$  来表示数据在共享过程中的风险因子, 其中  $\rho < 1$ 。

**假设 3:** 当供应链参与方采纳区块链共享模式进行业务优化时, 由于区块链的链式存储和去中心化架构颠覆了传统中心化存储机制, 同时一致性共识机制也使得参与方想要篡改已有数据需付出高昂成本, 因而能够有效地防止数据被作恶的风险。由于参与方在区块链平台上进行数据共享时也会存在各种持续支出, 例如设备维护、技术咨询、数据转换等, 相对于中心化数据共享平台, 本文以  $m_A$  和  $m_B$  表示参与方通过区块链技术进行共享模式优化或重构时的增加成本, 其中  $m_A > m_B$ 。虽然基于区块链的业务革新需要付出一定的技术成本, 但智能合约和共识机制使工作全流程实现数字化的同时也规避了风险系数, 增加了参与方的额外效用。本文以  $R_A$  和  $R_B$  来表示供应链主客体参与方使用平台区块链技术后的增量效用, 包括采纳区块链技术后系统兼容性和运行效率的提升, 以及在行业内知名度提升所带来的增益。

**假设 4:** 监管部门主导负责区块链平台建设需要的成本, 假设供应链数据共享平台运营方 C 的基础效用为  $k_C$ ; 每一笔数据共享完成后会获得效用  $R_C$ , 平台

采用区块链的边际运营成本为  $u$ , 采用现有成熟中心架构的边际运营成本为  $v$ 。此外, 在基于采用区块链和不采用区块链的共享平台下, 参与方的低质量数据共享行为会使得不同类型的平台各自遭受一定损失  $L_{C1}$  和  $L_{C2}$ , 平台也会对数据共享主客体采取相应的惩罚措施, 并以惩罚系数  $\beta_A$  和  $\beta_B$  来表示, 其中  $\beta_A + \beta_B > 1$ 。同时对于积极参与高质量数据共享的主客体, 平台也会采取相应的激励措施, 并以  $a_A$  和  $a_B$  表示数据共享激励系数, 其中  $a_A + a_B \leq 1$ ,  $a_B < a_A$ ,  $\beta_B < \beta_A$ 。

结合博弈主体的参数设定以及对上述供应链数据共享流程和区块链技术赋能作用的分析, 本文构建了三方演化博弈矩阵, 如表 1 所示。数据共享平台方以及数据共享的主客体参与方作为演化博弈的三方主体, 具有有限理性、信息不对称的特征, 且彼此之间的策略相互影响, 因此在演化博弈过程中需要逐渐调整其策略以达到博弈均衡。

表 1 数字供应链下数据共享三方博弈效用矩阵

供应链数据共享平台 C		数据共享主体 A	数据共享客体 B	
			接受共享 ( $z$ )	不接受共享 ( $1-z$ )
采用区块链 ( $x$ )	高质量数据 ( $y$ )		$k_C + (a_A + a_B)R_C - u$	$k_C - u$
			$k_A + r_A d_A - a_A R_C - m_A + R_A$	$a_A k_A - m_A$
	低质量数据 ( $1-y$ )		$k_B + r_B d_A - a_B R_C - m_B + R_B$	$k_B - m_B$
			$k_C + (\beta_A + \beta_B)R_C - u - L_{C1}$	$k_C - u - L_{C1}$
不采用区块链 ( $1-x$ )	高质量数据 ( $y$ )		$k_C + (a_A + a_B)R_C - v$	$k_C - v$
			$k_A + \rho r_A d_A - a_A R_C$	$a_A k_A$
	低质量数据 ( $1-y$ )		$k_B + \rho r_B d_A - a_B R_C$	$k_B$
			$k_C + (\beta_A + \beta_B)R_C - v - L_{C2}$	$k_C - v - L_{C2}$

## 2 演化稳定策略分析

### 2.1 平台方稳定策略分析

在构建出数字供应链主客体和数据共享平台的三方演化博弈矩阵基础上, 本文通过构建效用期望函数来计算和求解演化稳定策略, 将平台采纳区块链和不采纳区块链的期望效用设定为  $U_{C1}$  和  $U_{C2}$ , 平均效用为  $\bar{U}_C$ , 可得:

$$U_{C1} = yz [k_C + (a_A + a_B)R_C - u] + y(1-z)(k_C - u) + (1-y)z [k_C + (\beta_A + \beta_B)R_C - u - L_{C1}] + (1-y)(1-z)(k_C - u - L_{C1}) \quad (1)$$

$$U_{C2} = yz [k_C + (a_A + a_B)R_C - v] + y(1-z)(k_C - v) +$$

$$(1-y)z[k_C + (\beta_A + \beta_B)R_C - v - L_{C2}] + (1-y)(1-z)(k_C - v - L_{C2}) \quad (2)$$

$$\bar{U}_C = xU_{C1} + (1-x)U_{C2} \quad (3)$$

通过对上述期望函数的设定, 本文对供应链数据共享平台方 C 采纳区块链策略的复制动态方程表示为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{C1} - \bar{U}_C) = x(1-x)(v-u+L_{C2}-L_{C1}-yL_{C2}+yL_{C1}) \quad (4)$$

(1) 若  $y = (v-u+L_{C2}-L_{C1})/(L_{C2}-L_{C1})$ , 则  $F(x) = 0$ , 平台为稳定策略, 不随时间推移而改变。

(2) 若  $y \neq (v-u+L_{C2}-L_{C1})/(L_{C2}-L_{C1})$ , 则令  $F(x) = 0$ , 得到  $x=0$  和  $x=1$  两个稳定状态。对  $F(x)$  求导可得:

$$F'(x) = (1-2x)(v-u+L_{C2}-L_{C1}-yL_{C2}+yL_{C1}) \quad (5)$$

令  $\omega = (v-u+L_{C2}-L_{C1})/(L_{C2}-L_{C1})$ , 针对不同情况分别进行讨论。当  $\omega < y < 1$  时, 则  $F'(x)|_{x=0} < 0$ ,  $F'(x)|_{x=1} > 0$ , 故  $x=0$  为演化稳定点; 当  $0 < y < \omega$  时, 则  $F'(x)|_{x=0} > 0$ ,  $F'(x)|_{x=1} < 0$ , 故  $x=1$  为演化稳定点。

**推论 1:** 综上所述, 可以总结得出在三方演化过程中, 供应链平台方采用区块链的意愿会随着  $v$  和  $L_{C1}$  的增大以及  $u$  和  $L_{C2}$  的减小而提升。此外, 存在着数据主体参与方共享高质量数据的概率  $y$  越低, 平台方采纳区块链技术进行迭代革新的意愿也会越强。推论 1 表明, 现有中心化管理平台下供应链参与方共享过程中存在着数据质量低、数据孤岛问题严重以及跨机构流通成本高等问题。区块链技术凭借其自身的链式存储结构和区块可追溯的特性, 能够大幅度地提升系统安全性, 降低长期系统运维的边际成本。此外, 若参与主体长期地共享低质量数据, 则会使得系统参与方之间出现互信弱、共享难以及安全风险系数高等问题。这不仅会使平台方面临高昂的潜在损失和运维成本, 也会逐渐地造成“劣币驱逐良币”的供应链数据流转生态环境。因此, 供应链平台为了能够实现持续化运营, 会通过引入区块链技术, 打造数据安全、流程可靠、监管合规的新型多方上下游数据共享信任通道。

## 2.2 数据共享主体稳定策略分析

对于参与方数据共享主体 A, 其在演化博弈过程中选择高质量数据共享和低质量数据共享的期望效用  $U_{A1}$ 、 $U_{A2}$  以及平均效用函数  $\bar{U}_A$  分别可以表示为:

$$U_{A1} = xz(k_A + r_A d_A - a_A R_C - m_A + R_A) + x(1-z)(a_A k_A - m_A) + (1-x)z(k_A + \rho r_A d_A - a_A R_C) + (1-x) \cdot$$

$$(1-z) a_A k_A \quad (6)$$

$$U_{A2} = xz(k_A + r_A d_A - \beta_A R_C - m_A + R_A) + x(1-z)(\beta_A k_A - m_A) + (1-x)z(k_A + \rho r_A d_A - \beta_A R_C) + (1-x)(1-z) \beta_A k_A \quad (7)$$

$$\bar{U}_A = yU_{A1} + (1-y)U_{A2} \quad (8)$$

通过对上述期望函数的设定, 本文将参与方主体 A 共享高质量数据策略的复制动态方程表示为:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_{A1} - \bar{U}_A) = y(1-y)[(1-z)(a_A k_A - \beta_A k_A) + z(\beta_A R_C - a_A R_C)] \quad (9)$$

若  $z = \frac{k_A}{k_A + R_C}$ , 则  $F(y) = 0$ , 参与方数据共享主体为稳定策略, 不随时间推移而改变。

若  $z \neq \frac{k_A}{k_A + R_C}$ , 则令  $F(y) = 0$ , 得到  $y=0$  和  $y=1$  两个稳定状态。对  $F(y)$  求导可得:

$$F'(y) = (1-2y)[(1-z)(a_A k_A - \beta_A k_A) + z(\beta_A R_C - a_A R_C)] \quad (10)$$

令  $\omega = \frac{k_A}{k_A + R_C}$ , 分别针对不同情况进行讨论。当  $0 < z < \omega$  时, 则  $F'(y)|_{y=0} > 0$ ,  $F'(y)|_{y=1} < 0$ , 故  $y=1$  为演化稳定点; 当  $\omega < z < 1$  时, 则  $F'(y)|_{y=0} < 0$ ,  $F'(y)|_{y=1} > 0$ , 故  $y=0$  为演化稳定点。

**推论 2:** 综上所述, 可以总结得出在三方演化过程中, 数据供给主体 A 选择共享高质量数据的概率与其在现有中心化系统下获取的基础效用呈正相关, 与平台在采纳区块链下抽取每笔数据共享的中介费用呈负相关。此外, 存在着参与客体选择接受共享数据的概率越高, 参与主体共享高质量数据的意愿也会越弱。推论 2 表明, 在演化博弈过程中, 参与主客体在经济中均会按照收益最大化的原则参与市场决策。当数据共享的边际成本过高时, 参与主体更倾向于选择低质量数据共享来维护自身的利益。此外, 数据共享主体作为供应链下的有限理性参与者, 本身具备一定的投机性和自利性。这就导致在监管力度不足的环境下, 当参与客体在一段时间内采取积极的数据接受策略时, 参与主体会逐渐地尝试增加低质量数据在平台间共享和流通的可能性。因此, 供应链监管部门要通过基于区块链的约束机制, 使得信息可审计和流程透明化成为供应链参与方数据共享的先决条件。

## 2.3 数据共享客体稳定策略分析

对于参与方数据共享客体 B, 其在演化博弈过程中选择接受共享和不接受共享的期望效用  $U_{B1}$ 、 $U_{B2}$  以及平均效用函数  $\bar{U}_B$  分别可以表示为:

$$U_{B1} = xy(k_B + r_B d_A - a_B R_C - m_B + R_B) + x(1 - y)(k_B + r_B d_A - \beta_B R_C - m_B + R_B) + (1 - x)y(k_B + \rho r_B d_A - a_B R_C) + (1 - x)(1 - y)(k_B + \rho r_B d_A - \beta_B R_C) \quad (11)$$

$$U_{B2} = xy(k_B - m_B) + x(1 - y)(k_B - m_B) + (1 - x)yk_B + (1 - x)(1 - y)k_B \quad (12)$$

$$\bar{U}_B = zU_{B1} + (1 - z)U_{B2} \quad (13)$$

通过对上述期望函数的设定, 本文将共享参与方客体 B 接受共享数据策略的复制动态方程表示为:

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(U_{B1} - \bar{U}_B) = z(1 - z)(xr_B d_A + xR_B - ya_B R_C + \rho r_B d_A - \beta_B R_C - x\rho r_B d_A + y\beta_B R_C) \quad (14)$$

若  $x = \frac{ya_B R_C - y\beta_B R_C + \beta_B R_C - \rho r_B d_A}{r_B d_A + R_B - \rho r_B d_A}$ , 则  $F(z) = 0$ , 参与方数据共享客体为稳定策略, 不随时间推移而改变。

若  $x \neq \frac{ya_B R_C - y\beta_B R_C + \beta_B R_C - \rho r_B d_A}{r_B d_A + R_B - \rho r_B d_A}$ , 则令  $F(z) = 0$ , 得到  $z = 0$  和  $z = 1$  两个稳定状态。对  $F(z)$  求导可得:

$$F'(z) = (1 - 2z)(xr_B d_A + xR_B - ya_B R_C + \rho r_B d_A - \beta_B R_C - x\rho r_B d_A + y\beta_B R_C) \quad (15)$$

令  $\omega = \frac{ya_B R_C - y\beta_B R_C + \beta_B R_C - \rho r_B d_A}{r_B d_A + R_B - \rho r_B d_A}$ , 分别针对不同情况进行讨论。当  $0 < x < \omega$  时, 则  $F'(z)|_{z=0} < 0$ ,  $F'(z)|_{z=1} > 0$ , 故  $z = 0$  为演化稳定点; 当  $\omega < x < 1$  时, 则  $F'(z)|_{z=0} > 0$ ,  $F'(z)|_{z=1} < 0$ , 故  $z = 1$  为演化稳定点。

**推论 3:** 综上所述, 可以总结得出在三方演化过程中, 参与客体选择接受共享数据的概率  $z$  与共享平台采纳区块链的概率  $x$  和参与主体共享高质量数据的

概率  $y$  均呈正相关关系。推论 3 表明, 在演化博弈过程中, 当平台方尽到应有的监管责任时会降低系统性风险, 并提升供应链上下游成员间的信任度构建。此外, 无论是是否采纳区块链作为数据共享平台, 当供应链内主客体参与方均倾向于采取积极的数据共享策略时, 将会形成一种合作竞争的博弈机制。在这种情况下, 即使平台方不借助区块链技术作为监管工具, 数字供应链内上下游参与方依然会逐渐形成良好的数据共享运营环境。

**推论 4:** 参与客体选择接受共享数据的概率  $z$  与平台对参与者的激励措施  $a$  和惩罚力度  $\beta$  正相关, 与风险系数  $\rho$  呈负相关, 即监管部门在平台建设的基础上, 通过加大激励与惩罚力度, 并降低数据共享生态环境下的系统性风险可以抑制参与主体的投机行为。因此, 平台管理部门要深化区块链技术应用程度以降低数据共享边际成本和投机收益来提升参与客体的接受共享意愿。

演化博弈可以通过雅可比矩阵的局部稳定性分析得出演化稳定策略, 由数据共享平台方、数据共享参与主客体的复制动态方程  $F(x)$ 、 $F(y)$  和  $F(z)$  及其偏微分方程, 可以得到三方演化博弈的雅可比矩阵, 如式 (16) 所示。基于雅可比矩阵, 令  $F(x) = F(y) = F(z) = 0$ , 得到局部均衡点:  $E_1(0, 0, 0)$ ,  $E_2(0, 0, 1)$ ,  $E_3(0, 1, 0)$ ,  $E_4(0, 1, 1)$ ,  $E_5(1, 0, 0)$ ,  $E_6(1, 0, 1)$ ,  $E_7(1, 1, 0)$ ,  $E_8(1, 1, 1)$ 。

根据 Lyapunov 判别法, 当雅可比矩阵的特征值均为负数时, 对应的局部均衡点为演化稳定点, 表 2 为各均衡点对应的雅可比矩阵特征值。

$$\begin{bmatrix} (1 - 2x) \begin{pmatrix} v - u + L_{C2} \\ -L_{C1} - yL_{C2} \\ +yL_{C1} \end{pmatrix} & x(1 - x)(L_{C1} - L_{C2}) & 0 \\ 0 & (1 - 2y) \begin{pmatrix} (1 - z)(a_A k_A - \beta_A k_A) \\ +z(\beta_A R_C - a_A R_C) \end{pmatrix} & y(1 - y) \begin{pmatrix} \beta_A k_A - a_A k_A \\ +\beta_A R_C - a_A R_C \end{pmatrix} \\ z(1 - z) \begin{pmatrix} r_B d_A + R_B \\ -\rho r_B d_A \end{pmatrix} & z(1 - z)(\beta_B R_C - a_B R_C) & (1 - 2z) \begin{pmatrix} xr_B d_A - ya_B R_C + xR_B \\ +\rho r_B d_A - \beta_B R_C \\ -x\rho r_B d_A + y\beta_B R_C \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (16)$$

表 2 雅可比矩阵的特征值

均衡点	特征值 $\lambda_1$	特征值 $\lambda_2$	特征值 $\lambda_3$
$E_1$	$v - u + L_{C2} - L_{C1}$	$a_A k_A - \beta_A k_A$	$\rho r_B d_A - \beta_B R_C$
$E_2$	$v - u + L_{C2} - L_{C1}$	$\beta_A R_C - a_A R_C$	$\beta_B R_C - \rho r_B d_A$
$E_3$	$v - u$	$\beta_A k_A - a_A k_A$	$\rho r_B d_A - a_B R_C$
$E_4$	$v - u$	$a_A R_C - \beta_A R_C$	$a_B R_C - \rho r_B d_A$
$E_5$	$L_{C1} - L_{C2} + u - v$	$a_A k_A - \beta_A k_A$	$r_B d_A + R_B - \beta_B R_C$
$E_6$	$L_{C1} - L_{C2} + u - v$	$\beta_A R_C - a_A R_C$	$\beta_B R_C - r_B d_A - R_B$
$E_7$	$u - v$	$\beta_A k_A - a_A k_A$	$r_B d_A - a_B R_C + R_B$
$E_8$	$u - v$	$a_A R_C - \beta_A R_C$	$a_B R_C - r_B d_A - R_B$

在实际应用场景下, 相较于传统供应链的模式结构, 区块链技术的出现变革了上下游参与方之间的合作模式, 促进不同层级参与方之间的远程协作和资源下沉, 降低了机构间的运营成本<sup>[16]</sup>, 因此平台采纳区块链模式的边际运营成本应满足  $u < v$ 。通过对表 3 的博弈均衡点稳定性分析, 可以得到三个特征值:  $E_1(0, 0, 0)$ 、 $E_5(1, 0, 0)$ 、 $E_8(1, 1, 1)$  在满足一定条件时为演化稳定点 (ESS), 本文兼顾穷尽性

与不相容性原则，分三种情况讨论供应链参与方演化博弈的稳定性。

表3 三方演化博弈均衡点及稳定性分析

均衡点	情况1		情况2		情况3	
	特征值符号	稳定性	特征值符号	稳定性	特征值符号	稳定性
$E_1$	(+, -, ±)	鞍点	(-, -, -)	ESS	(+, -, -)	鞍点
$E_2$	(+, +, ±)	鞍点	(-, +, +)	鞍点	(+, +, +)	不稳定点
$E_3$	(+, +, ±)	鞍点	(+, +, ±)	鞍点	(+, +, ±)	鞍点
$E_4$	(+, -, ±)	鞍点	(+, -, ±)	鞍点	(+, -, ±)	鞍点
$E_5$	(±, -, ±)	鞍点	(+, -, ±)	鞍点	(-, -, -)	ESS
$E_6$	(±, +, ±)	鞍点	(+, +, ±)	鞍点	(-, +, +)	鞍点
$E_7$	(-, +, +)	鞍点	(-, +, ±)	鞍点	(-, +, -)	鞍点
$E_8$	(-, -, -)	ESS	(-, -, -)	ESS	(-, -, +)	鞍点

(1) 当 $a_B R_C - r_B d_A - R_B < 0$ ，即当数据共享客体在供应链区块链平台下接受高质量数据共享所获得的净效用为正时，均衡点 $E_8(1, 1, 1)$ 的特征值均为负值。此时，{采用区块链，高质量数据共享，接受共享}为演化稳定策略。

(2) 当 $v - u + L_{C2} - L_{C1} < 0$ ， $0 < a_B R_C - r_B d_A < R_B$ ，即当供应链平台方在采纳区块链技术下的边际运营成本和低质量数据共享而导致的平台损失之和大于其在现有中心化平台下相应的成本和损失之和（即 $u + L_{C1} > v + L_{C2}$ ），同时数据共享客体在区块链平台下接受高质量数据共享获得的净支出为正（即 $a_B R_C - r_B d_A > 0$ ）且小于其增量效用（即 $a_B R_C - r_B d_A < R_B$ ）时，均衡点 $E_1(0, 0, 0)$ 和 $E_8(1, 1, 1)$ 的特征值均为负值。此时，{不采用区块链，低质量数据共享，不接受共享}和{采用区块链，高质量数据共享，接受共享}为演化稳定策略。

(3) 当 $v - u + L_{C2} - L_{C1} > 0$ 且 $r_B d_A + R_B - a_B R_C < 0$ ，即当供应链平台方在采纳区块链技术下的边际运营成本和低质量数据共享而导致的平台损失之和小于其在中心化平台下相应的成本和损失之和（即 $u + L_{C1} < v + L_{C2}$ ），同时参与客体在区块链平台下接受高质量数据共享所获得的净效用为负时，均衡点 $E_5(1, 0, 0)$ 的特征值均为负值。此时，{采用区块链，低质量数据共享，不接受共享}为演化稳定策略。

### 3 实验设计与仿真

#### 3.1 三方博弈行为的演化路径

为验证上述分析的有效性，更加直观地分析各因素对供应链参与方数据共享行为策略稳定性的影响，

本文基于上述模型假设，结合实际应用场景以及文献[17, 25]对参数的设定，将博弈模型变量集合 $\theta = (a_A, a_B, \beta_A, \beta_B, d_A, R_A, R_B, R_C, L_{C1}, L_{C2}, \rho, k_A, r_B, u, v)$ 的预设初始值分为3组，并利用MATLAB R2023a进行演化过程仿真，实验结果如图1所示。

情况1:  $\theta_1 = (0.4, 0.2, 0.8, 0.6, 20, 150, 100, 100, 20, 40, 0.2, 20, 10, 100, 150)$

情况2:  $\theta_2 = (0.5, 0.3, 0.9, 0.7, 20, 150, 100, 100, 100, 50, 0.2, 10, 5, 100, 120)$

情况3:  $\theta_3 = (0.6, 0.4, 0.9, 0.7, 10, 150, 20, 200, 50, 100, 0.2, 10, 5, 100, 120)$

由仿真实验可知，基于区块链技术模式下的供应链参与方数据共享演化博弈过程中，会受到来自平台方激励和惩罚机制、共享数据量、增量效用、潜在损失和运营成本等多种潜在因素的影响。当变量间的等式约束条件发生改变时，三方演化博弈的结果也将发生变化；而在相同约束条件下变量的初始数值改变时，则演化博弈的稳定收敛速度也会发生变化。同时可以得出以下结论：

(1) 当平台方倾向于采纳基于区块链技术模式时，供应链主客体参与方采取积极的数据共享策略的初始意愿就越强，其趋近于1的收敛速度越快，即在区块链的技术加持下，更有利于营造多方共赢的供应链上下游合作局面；

(2) 若供应链数据共享主体共享高质量数据的意愿程度越低，则无论供应链平台方是否采纳区块链赋能模式创新，参与客体的演化策略最终都倾向于不接受数据共享。

综上所述，相较于传统中心化系统架构，基于区块链的技术架构模式下，存在供应链所有参与方均采取积极的数据共享策略。在有限的约束条件达到阈值状态时，区块链赋能下的供应链参与方数据共享模式具有极大的优势，能够推进供应链上下游良性数据共享环境形成。

#### 3.2 参与方博弈策略影响因素分析

##### (1) 平台博弈策略影响因素分析

在供应链组织内的数据共享业务流程中，不同平台由于技术架构、业务成本和运营模式的不同，当参与方在数据共享过程中存在消极共享策略或投机主义行为时，会造成平台不同的额外损失。为综合分析供应链平台运营损失对其演化策略的影响，进行两组赋值，探讨不同平台对低质量数据流通下潜在损失差异对采纳区块链模式的影响，赋值如下：

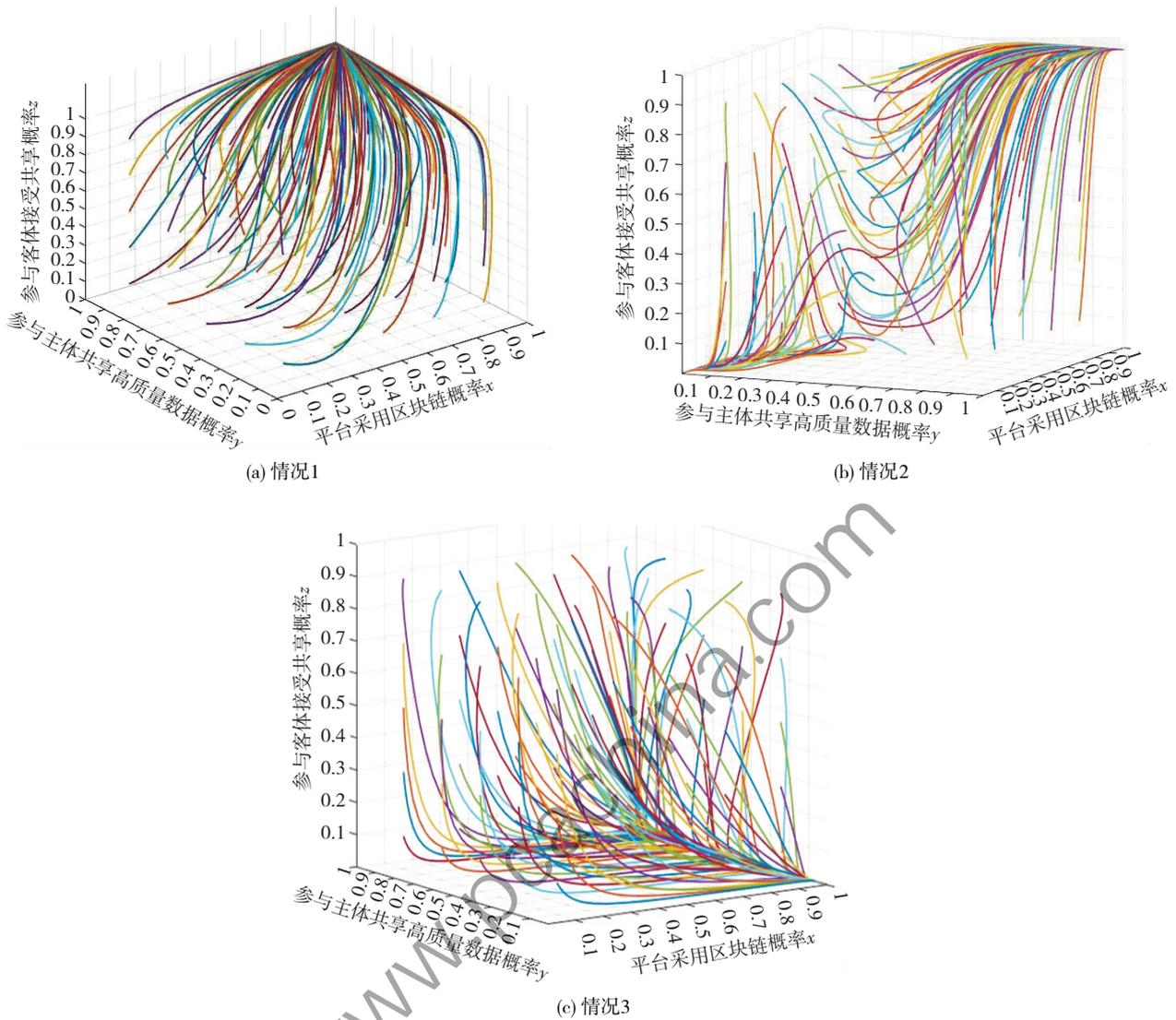


图1 三方博弈演化结果

$$(L_{c1}, L_{c2}) = \{(20, 30), (20, 60), (20, 100)\}, L_{c1} < L_{c2}$$

$$(L_{c1}, L_{c2}) = \{(30, 20), (40, 20), (60, 20)\}, L_{c1} > L_{c2}$$

由图 2 (a) 可知, 当  $L_{c1} < L_{c2}$  时,  $(L_{c1}, L_{c2})$  的差距越大, 越能够推动基于区块链下供应链数据共享平台的迭代更新。因此, 对平台而言, 供应链参与主客体基于低质量数据共享造成的平台成本损失是其选择区块链运营模式的关键因素。同时由图 2 (b) 可以得出, 即使在实际应用过程中存在  $L_{c1} > L_{c2}$  的情况, 当两者差距在一定的阈值范围内, 平台方也会倾向于使用区块链作为数字供应链的运行机制。事实上, 区块链通过去中心化自治、信息可追溯、数据防篡改等特性赋能供应链下上下游多方协作模式, 能够有效地降低数据传输中外部性系统风险的同时, 也约束了参与方主客体的自利性行为。

## (2) 主客体参与方博弈策略影响因素分析

考虑到供应链主客体参与方在数据共享过程中数据量的差异性, 针对供应链参与方主客体的数据量  $d_A$ , 通过赋值  $d_A = \{20, 40, 80\}$  来探究参与方间共享数据量的变化对供应链主客体共享策略的影响, 如图 3(a) 所示。可以看出在博弈演化过程中, 数据量  $d_A$  的增大不仅可以提升参与方主客体的数据共享和接受意愿 (其中对数据共享客体的接受行为意愿提升更为显著), 同时也可以更快速地收敛至  $(1, 1, 1)$  的演化均衡。区块链作为信息传递的二元载体, 承载着供应链参与方主客体的数据价值, 并能够充分发挥数据作为新型生产要素的作用。

此外, 在供应链数据共享的业务模式流程下, 收益系数  $r_A$  和  $r_B$  的差异性可能会影响参与方的共享行为

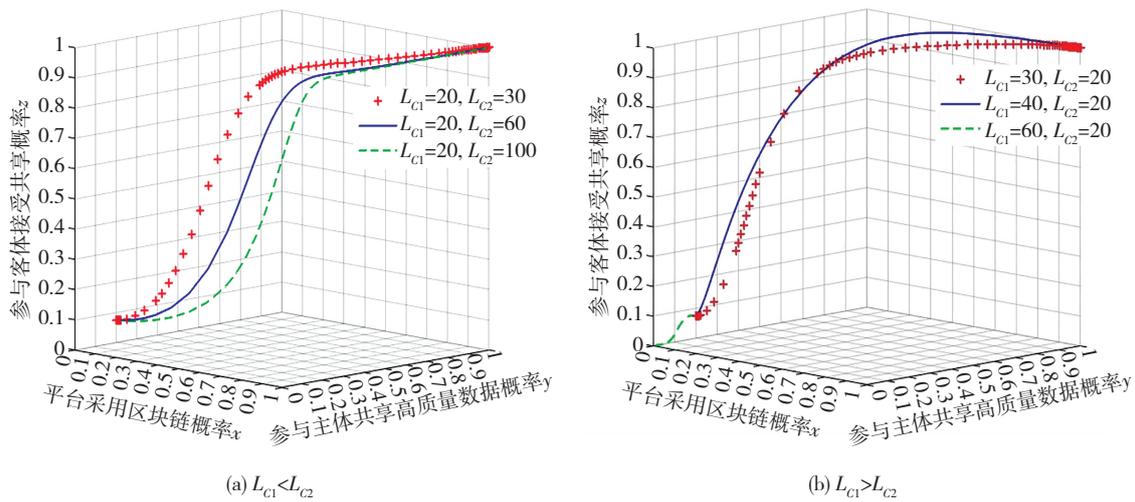


图2 平台不同策略下影响因素

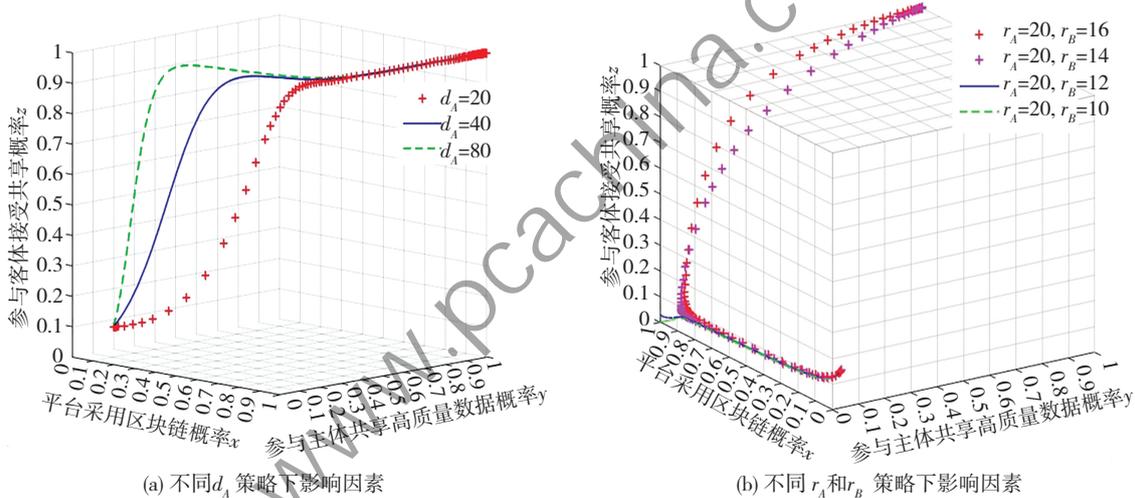


图3 主客体参与方不同策略下影响因素

意愿。为综合分析不同平台模式下参与方共享系数的差距变化对其共享策略的影响，分别赋值主客体共享系数  $(r_A, r_B) = \{(20, 16), (20, 14), (20, 12), (20, 10)\}$ ，并进行仿真结果对比，如图3(b)所示。可以看出， $r_A$  和  $r_B$  的差距能够影响供应链参与主客体的共享行为意愿。当两者收益系数在一定阈值范围内时，供应链参与主客体的数据共享和接受意愿会随着平台实施基于区块链的赋能而提升，当其收益系数差距过大时，即使在区块链技术赋能模式创新的增量效用加持下，供应链参与主客体最终也将会收敛于消极的数据共享和接受策略。因此，平台应依据现有数据的价值衡量和利益分配机制，动态调整供应链参与主

客体的利益分配制度，以充分调动数据共享主客体参与数据共享意愿的积极性，促进区块链下供应链数据治理和应用模式的可持续发展。

## 4 结论

本研究通过阐述区块链赋能数字化供应链下的主客体数据共享行为，构建了由数据供给主体、参与共享客体以及供应链共享平台运营方组成的三方演化博弈模型，探讨了关键因素对系统演化的影响，并研究供应链各参与主体在区块链采纳策略下的数据共享行为演化策略。除上述研究推论外，还发现如下结论：

(1) 数字供应链参与方在三方演化博弈过程中，会受到来自平台方激励和惩罚机制、参与主客体共享

数据量和增量效用、潜在损失和运营成本等多种潜在因素的影响。当这些变量的初始值发生变化时,供应链平台的数据共享演化稳定策略也将发生变化,当这些因素满足常态化组合约束条件时,供应链参与方都倾向于采纳区块链作为信息共享平台。并且可以得出,区块链赋能下的平台建设更加有助于构建供应链上下游良性数据共享生态环境。

(2) 供应链参与主客体基于低质量数据共享造成不同平台成本损失的差异性,是平台方是否采纳区块链平台运营模式的关键因素。即使在实际应用过程中存在区块链平台运营成本高于传统平台的情况,当两者没有显著性差距时,平台方也会倾向于使用区块链作为供应链运营平台。

(3) 供应链参与主客体收益系数差异可能会影响参与方的共享行为意愿。当两者收益系数在常态化阈值范围内,主客体数据共享参与度会随着基于区块链平台的赋能而提升;当收益系数差距过大时,无论何种平台下,供应链参与主客体都将会采取消极的数据共享策略。因此,平台可在适当范围内对供应链平台完善服务收费制度,并依据现有数据共享的利益分配机制,动态调整供应链参与主客体的利益分配制度。

本文探讨了数字供应链下区块链应用的三方演化博弈问题,研究结论反映了供应链参与主体的数据共享行为策略,为构建供应链下数据要素治理和交易实践提供参考。未来的工作中,可进一步对供应链参与主客体的利益分配和激励机制进行细化研究,同时可基于多源平台数据进行实证分析,进一步探讨区块链技术实施前后博弈行为主体的策略选择和影响机理。

### 参考文献

[1] BERTANI F, PONTA L, RABERTO M, et al. The complexity of the intangible digital economy: an agent-based model [J]. *Journal of Business Research*, 2021, 129: 527 - 540.

[2] 吴非, 胡慧芷, 林慧妍, 等. 企业数字化转型与资本市场表现——来自股票流动性的经验证据 [J]. *管理世界*, 2021, 37 (7): 130 - 144.

[3] 陈磊, 彭理云, 单博深, 等. 重要数据安全国家标准的设计思路 [J]. *网络安全与数据治理*, 2023, 42 (11): 53 - 57.

[4] 夏杰长, 马慧洁. 数字技术与制度变革: 发展壮大新质生产力的内生动力 [J]. *科学管理研究*, 2024, 42 (6): 12 - 20.

[5] 秦峥, 刘帅, 李育涛. 数据要素驱动下的工业互联网平台创新发展与应用研究 [J]. *网络安全与数据治理*, 2024, 43 (11): 1 - 6.

[6] KAMBLE S S, GUNASEKARAN A, PAREKH H, et al. Digital

twin for sustainable manufacturing supply chains: current trends, future perspectives, and an implementation framework [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, 176: 121448.

[7] 李玥, 马湘莹, 姚锋敏. 新兴产业创新服务平台生态系统协同创新演化博弈分析 [J]. *计算机集成制造系统*, 2024, 30 (7): 2506 - 2515.

[8] 李琦, 刘力钢, 邵剑兵. 数字化转型、供应链集成与企业绩效——企业家精神的调节效应 [J]. *经济管理*, 2021, 43 (10): 5 - 23.

[9] 韩俊华, 韩贺洋, 周全. 基于区块链技术的数字金融风险监管 [J]. *科学管理研究*, 2024, 42 (2): 137 - 145.

[10] LIPTON A. Blockchains and distributed ledgers in retrospective and perspective [J]. *Journal of Risk Finance*, 2017, 19 (1): 4 - 25.

[11] 邓爱民, 李云凤. 基于区块链的供应链“智能保理”业务模式及博弈分析 [J]. *管理评论*, 2019, 31 (9): 231 - 240.

[12] 赵昌平, 陈曦, 龚宇. 区块链技术下反向保理融资博弈分析 [J]. *供应链管理*, 2021, 2 (9): 43 - 58.

[13] 周衍平, 赵雅婷, 陈会英. 基于区块链的知识产权交易探索与机制设计 [J]. *经济体制改革*, 2021 (6): 112 - 119.

[14] ZHU P, HU J, ZHANG Y, et al. Enhancing traceability of infectious diseases: a blockchain-based approach [J]. *Information Processing & Management*, 2021, 58 (4): 102570.

[15] 刘晓辉, 罗娜, 邢斌, 等. 基于属性可搜索加密的农产品区块链追溯隐私数据访问控制方法 [J]. *农业机械学报*, 2024, 55 (10): 433 - 443.

[16] 叶进, 庞承杰, 李晓欢, 等. 基于区块链的供应链数据分级访问控制机制 [J]. *电子科技大学学报*, 2022, 51 (3): 408 - 415.

[17] 孙国强, 谢雨菲. 区块链技术、供应链网络与数据共享: 基于演化博弈视角 [J]. *中国管理科学*, 2023, 31 (12): 149 - 162.

[18] 张沁楠, 朱建明, 高胜, 等. 基于区块链和贝叶斯博弈的联邦学习激励机制 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2022, 52 (6): 971 - 991.

[19] 胡业飞, 陈美欣, 张怡梦. 价值共创与数据安全的兼顾: 基于联邦学习的政府数据授权运营模式研究 [J]. *电子政务*, 2022 (10): 2 - 19.

[20] 林强, 刘名武, 邹梓琛. 不同激励契约下嵌入区块链的供应链碳减排与定价决策 [J]. *计算机集成制造系统*, 2024, 30 (4): 1506 - 1517.

[21] 郑荣, 高志豪, 魏明珠, 等. 基于联盟区块链的政府数据协同治理平台框架研究——以全国碳排放权交易市场为例 [J]. *情报学报*, 2022, 41 (10): 1071 - 1084.

[22] 赵晓丹, 庞英智. 基于区块链技术的政府数据治理模型构建 [J]. *情报科学*, 2024, 42 (1): 101 - 105.

- [23] 胡剑, 戚湧. 基于区块链跨链机制的政务数据安全治理体系研究 [J]. 现代情报, 2023, 43 (9): 85-97.
- [24] 朱海洋. 基于数据要素流通视角的数据交易平台发展现状与对策 [J]. 中国流通经济, 2024, 38 (2): 24-33.
- [25] 焦媛媛, 闫鑫, 杜军, 等. 区块链赋能视角下保理融资三方演化博弈研究 [J]. 管理学报, 2023, 20 (4): 598-609.

(收稿日期: 2025-08-26)

作者简介:

康博涵 (1993-), 通信作者, 男, 博士, 工程师, 主要研究方向: 区块链与数字经济、博弈论。E-mail: kangbh.postgra@qq.com。

周剑桥 (1978-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 计算机网络与信息安全、数字化转型。

张焯通 (1997-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 数字化转型、供应链建设与管理。

www.pcachina.com

# 版权声明

凡《网络安全与数据治理》录用的文章，如作者没有关于汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权等版权的特殊声明，即视作该文章署名作者同意将该文章的汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权授予本刊，本刊有权授权本刊合作数据库、合作媒体等合作伙伴使用。同时，本刊支付的稿酬已包含上述使用的费用，特此声明。

《网络安全与数据治理》编辑部

www.pcachina.com