基于区块链的可信数据空间数据要素演化博弈研究

陈福[1,2]，周凯[1]，朱建明[1,2]，江航宇[1]，杨佳鑫[1]
（1. 中央财经大学信息学院，北京 102206；2. 国家金融安全教育部工程研究中心，北京 102206）

摘　要：数据要素流通是释放数据价值、推动数字经济发展的关键引擎。然而，当前的数据流通因多主体间的信息不对称、欺诈行为及黑灰产业链滋生而面临数据质量可信性挑战，严重制约了数据要素的广泛流通与应用。为此，提出了基于区块链的可信数据空间演化博弈模型，旨在构建高质量、透明且可信的数据流通新范式。以数据提供方、可信数据空间运营方和数据使用方三方为主体，引入复杂网络博弈理论，系统探讨多主体行为的演化稳定路径及其关键影响机制。理论分析与多方真实数据的实验结果表明，区块链驱动的数据流通模式，不仅有效抑制了数据提供方低质量供给行为，保障了流通的公平性和可信性；同时显著降低了数据使用方的交易风险与匹配成本，提升了其交易意愿；而对于可信数据空间运营方而言，是否引入区块链技术的关键在于实施成本与其在抑制低质量数据、维护系统稳定性中所获潜在收益之间的权衡。所提模型为可信数据空间的构建及数据要素的高效流通提供了新的博弈分析框架，并对推动数据要素市场的健康发展具有一定的理论与实践意义。

关键词：数据要素；可信数据空间；数据流通；区块链；演化博弈
中图分类号：TP393.0
文献标志码：A
DOI：10.11959/j.issn.1000–436x.2025185

Evolutionary game analysis of data elements in a blockchain-based trusted data space

CHEN Fu[1,2], ZHOU Kai[1], ZHU Jianming[1,2], JIANG Hangyu[1], YANG Jiaxin[1]
1. School of Information, Central University of Finance and Economics, Beijing 102206, China
2. Engineering Research Center of Ministry of Education of Financial Security, Beijing 102206, China

Abstract: The circulation of data elements serves as a key driver of data value and the digital economy, yet current mechanisms face challenges in ensuring data quality and trust due to information asymmetry, fraud, and illicit industrial chains, hindering their wide circulation and application. An evolutionary game model for a blockchain-based trusted data space was established to construct a high-quality, transparent, and trusted circulation paradigm. Taking data providers, trusted space operators, and data users as participants, complex network game theory was applied to analyze the evolutionary stability of multi-agent behaviors and their key influencing mechanisms. Analysis and experiments using multi-source real data show that the blockchain-driven model suppresses low-quality data supply, ensures fairness and trust, and reduces transaction risks and matching costs for users, thereby enhancing their trading willingness. For operators, blockchain adoption depends on the balance between implementation costs and benefits in suppressing low-quality data and maintaining system stability. The proposed model provides a novel game-theoretic framework for trusted data space construction and offers theoretical and practical insights into fostering the healthy development of the data element market.

Keywords: data element, trusted data space, data circulation, blockchain, evolutionary game

收稿日期：2025–08–14；**修回日期：**2025–10–19
通信作者：周凯，Mulberrychow@163.com
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.61672104, No.62372493）；中国高校产学研创新基金资助项目（No.2021FNA01002, No.2022IT014）
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61672104, No.62372493), The China University Industry University Research Innovation Fund (No.2021FNA01002, No.2022IT014)

0　引言

近年来，数据作为新型生产要素在资源配置、新质生产力发展以及数字经济增长中发挥着日益关键的作用，加快了我国数据要素市场的建设[1]。据国家数据局发布的《数字中国发展报告（2023 年）》显示，目前我国数据产量约为 32.85 ZB，然而据《全国数据资源调查报告（2023 年）》统计，数据产存转化率仅 2.9%，海量数据因质量问题而被弃用[2]。黄科满等[3]指出数据的质量直接决定数据价值的释放与决策的效率。在人工智能迅猛发展的背景下，高质量数据集已成为大模型训练、推理与验证的基础，其质量决定了大模型性能的上限[4]。例如，在医学大模型的训练中，即使仅 0.001% 的数据存在错误，也会导致生成内容出现严重偏差[5]。

当前，尽管数据交易市场日趋活跃，但以大数据交易所为代表的传统中心化平台在推动数据要素流通过程中仍存在显著的质量隐患[6]。一方面，受交易各方信息不对称及监管滞后影响，数据在传输和交付过程中易被篡改或窃取，导致数据质量污染[7-8]；另一方面，平台过度依赖第三方数据商甚至数据黑市，难以保障数据的真实性和可靠性[9-10]。因此，如何破解数据要素流通中的数据质量瓶颈，已成为推动数字经济高质量发展的核心挑战。

2024 年 11 月，国家数据局印发《可信数据空间发展行动计划（2024—2028 年）》，提出要利用区块链等新兴技术，构建安全、透明、高效的数据流通环境[11]。区块链凭借链式数据结构，多方参与的分布式账本及共识机制，可实现数据按时间序列的记录、传输和存储，保证数据流通的透明性、可靠性以及完整性，从而在源头上约束低质量数据行为[12-14]。同时，区块链的匿名性与智能合约机制，可实现链上监控与自动审计，为数据流通提供可信、可编程的运行环境[15-16]，进而有效防范交易欺诈并保障数据真实性[17-18]。

目前，国内外学者已开始探索区块链在数据要素流通中的应用。杨东等[19]提出通过自然语言处理技术将法律条款转化为智能合约逻辑，实现了 85% 以上条款的机器可执行化，显著提高了行业执行效率。刘业政等[20]总结了区块链技术在保障数据交易安全性、公平性与可追溯性方面的作用。刘明达等[21]利用区块链的去中心化和链式结构进行数据存储与验证，通过密码学技术提升数据真实性与交易公平性。此外，Maher 等[22]结合区块链技术，提出一种数字健康数据市场，使患者在不损害隐私与安全的前提下向研究机构出售健康数据。Toy 等[23]探讨了基于区块链的去中心化数据共享平台，在符合行业监管要求的前提下，实现安全、高效的数据流通。

综上所述，现有研究虽揭示了区块链在数据要素流通中的潜力，但仍存在明显不足。首先，大多数文献假设参与主体完全理性[24]，研究重点集中于单阶段博弈对数据流通的影响[25]。然而，现实中的数据流通涉及多主体交互，其决策过程受多阶段博弈与有限理性约束，目前尚缺乏在有限理性条件下多主体互动演化的研究。其次，现有研究多聚焦于区块链在隐私保护与激励机制等方面的应用[26-27]，对如何通过区块链抑制低质量数据行为、改善流通效率以及不同主体对区块链的偏好等问题，探讨仍不充分。最后，在传统非区块链的流通模式下，信息不对称常导致主体间对立与非合作行为[28-29]，从而造成流通低效、信任成本高[30]。该问题与博弈方法高度契合，但当前尚缺乏系统性对比区块链模式与非区块链模式下，多主体在信任与效率权衡中的策略差异与机制演化。

针对上述问题，本文在有限理性条件下构建了数据提供方、可信数据空间运营方（以下简称可信数据空间方）与数据使用方的三方演化博弈模型，系统分析区块链引入后各主体的策略演化路径与稳定性特征。本文的主要贡献如下。

1) 构建了基于区块链的可信数据空间演化博弈模型。运用演化博弈理论，刻画了区块链赋能数据要素流通场景中，数据提供方、可信数据空间方与数据使用方之间的动态互动关系，揭示了有限理性条件下多主体的策略演化规律与最优策略选择，为研究数据要素流通中信任建立与效率提升提供了一定的参考。

2) 揭示了关键约束因素与演化均衡稳定性。通过对复制动态方程推导与雅可比矩阵分析，论证了交易收益、隐瞒成本、实施成本及交易损失等关键因素对各主体演化均衡点稳定性的影响，证明了抑制低质量数据行为的前置约束条件的有效性。

3) 验证了区块链模式的可行性与优势。结合真实数据，量化了关键参数变化对演化路径与收敛速度的影响，对比了区块链与非区块链模式下各主体策略选择与动态演化过程。实验结果验证了，区

块链模式在降低交易风险、减少匹配成本与提升交易意愿方面的显著优势，为区块链驱动数据要素流通机制的设计提供了实证依据与参考。

1　系统模型构建

1.1　面向流通的数据要素架构

在数据要素流通体系中，数据提供方作为数据的生成和供应主体，负责对数据进行采集、归约、处理与分析，并在数据交易完成后按约分配收益[31-32]。数据使用方是数据资源的使用与消费主体，依据需求对数据进行查询、调用与使用[33-34]。可信数据空间方则承担系统的运营和管理职能，通过技术手段与制度规则，保障数据要素流通的安全性与合规性，并保留部分交易收益作为利润[35]。结合数据要素流通的实际应用场景，本文构建了基于区块链的可信数据空间演化博弈模型[36-38]，模型框架如图1所示。整体流程如下。

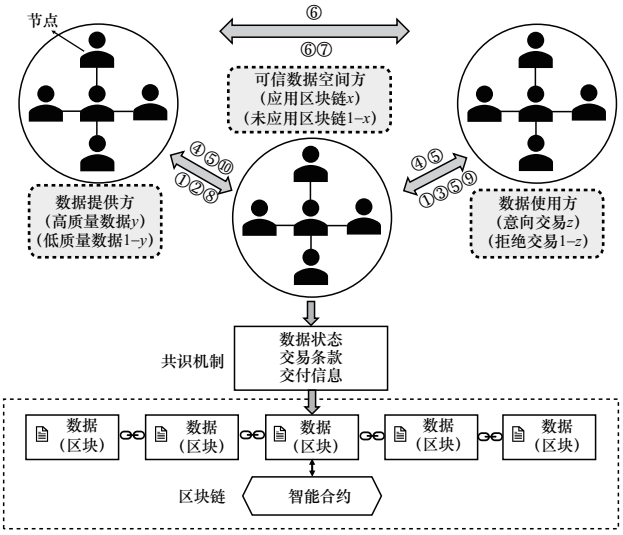


图1　基于区块链的可信数据空间演化博弈模型架构

1) 数据提供方和数据使用方在可信数据空间中注册身份，获取区块链系统的身份凭证。

2) 数据提供方向可信数据空间方提交数据要素资产登记申请，可信数据空间方对数据来源、质量、范围及权属等进行审核，核验通过后将数据要素资产上链并挂牌交易。

3) 数据使用方根据自身需求在可信数据空间中检索匹配目标数据，并通过匿名化机制向可信数据空间方匿名咨询数据详情。

4) 可信数据空间方为供需双方搭建基于区块链的加密通信通道，确保双方在安全可信的环境下进行数据交互与协商。

5) 经协商一致后，供需双方通过智能合约签署交易协议，明确数据使用、交付方式及权责约定。

6) 可信数据空间方利用区块链的安全散列算法-256（SHA-256）与共识机制，将交易与合约信息写入区块中，实现信息不可篡改与可追溯。

7) 数据使用方依据智能合约条款自动完成支付，资金实时结算至数据提供方账户。

8) 数据提供方根据协议向可信数据空间方支付相应的运营与服务费用。

9) 可信数据空间方通过区块链全程记录交易行为，实现数据流通可溯源。一旦发生纠纷，可即时进行链上取证与快速理赔。

10) 可信数据空间方经区块链系统检测到数据质量问题，将自动调整数据提供方的链上信用值。

数据质量的可靠性是数据要素高效流通的前提条件。低质量数据的泛滥不仅会降低数据要素的经济价值，还会阻碍数据要素的市场化进程。一般而言，低质量数据主要表现为以下3种形式[39-41]。

1) 准确性缺失。数据确权存疑，数据的访问和使用受限。

2) 真实性缺失。数据被恶意篡改或误操作，造成语义和结构的不可逆失真，原始数据质变。

3) 完整性缺失。数据字段缺漏、格式不统一或内容之间缺乏关联性。

与传统模式相比，基于区块链的流通模式，不需要依赖独立的第三方机构对数据进行认证。参与数据流通的上下游主体可共同构建联盟链并共享一份经加密签名的分布式账本。交易信息一旦发生变动，即可实时同步至链上所有节点，从而有效防范低质量数据的流通[42-44]。此外，链上智能合约将供需双方的协议条款与查询逻辑以可执行代码的形式记录上链，当预设条件被触发时，系统可自动执行合约内容，既减少了第三方干预，又显著提升了流通效率，同时降低了因数据质量问题引发的违约与惩罚风险[45]。在此过程中，区块间通过SHA-256算法实现信息加密，该算法具有高难度求解与低难度验证的特性，使得篡改数据方需付出极高算力，从而在机制层面保障了数据流通的安全性与可信性[46]。

1.2　模型假设与参数设置

为进一步研究数据要素流通的运行机制，需要分析各参与方在既定规则约束下，如何依托区块链技术实现数据要素的高效可信流通。为此，本节构建了基于区块链的可信数据空间演化博弈模型，并设定相应的参数与假设条件。

假设1：在基于区块链的可信数据空间演化博弈模型中，假设所有主体（数据提供方、可信数据空间方和数据使用方）均处于不完全信息条件下，依据有限理性不断调整自身策略以实现效用最大化。

假设2：假设可信数据空间方的策略集为{应用区块链，不应用区块链}。实际上，可信数据空间方依托区块链技术的分布式数据结构、共识机制及链上智能合约，能够有效缓解因信息不对称、欺诈行为及黑灰产业链所引发的数据质量问题。然而，区块链系统本身仍可能受到智能合约漏洞、共识攻击及节点作恶等风险的影响[47]。因此，区块链模式下的数据要素流通仍需与强化监管制度及建立互联互通机制协同配合，以充分发挥其在数据流通中的优势。假设可信数据空间方应用区块链的概率记为$x(0 \leqslant x \leqslant 1)$，不应用区块链的概率为$1-x$。交易达成时可信数据空间方的收益（佣金、链费以及技术支持等）记为$R_1(R_1>0)$，区块链模式下的实施成本（技术成本、设施建设成本）为$M_1(M_1>0)$，非区块链模式的实施成本为$M_2(M_2>0)$。应用区块链时交易低质量数据造成的损失（信誉损失等）记为L_{11}；未应用区块链时交易低质量数据造成的损失记为L_{12}。此外，区块链模式下对交易低质量数据的链上惩戒强度记为$\alpha(0 \leqslant \alpha \leqslant 1)$，非区块链模式的惩戒强度记为$\beta(0 \leqslant \alpha \leqslant \beta \leqslant 1)$。

假设3：假设数据提供方的策略集为{高质量数据，低质量数据}。数据提供方提供符合准确性、真实性及完整性的即为高质量数据，反之为低质量数据。假设交易高质量数据的概率记为$y(0 \leqslant y \leqslant 1)$，交易低质量数据的概率记为$1-y$。当数据提供方提供高质量数据并达成交易时，其收益记为$R_{21}(R_{21}>0)$，并需向可信数据空间方支付基础服务费$R_p(R_p>0)$。若以低质量数据完成交易，其收益记为$R_{22}(R_{22}>0)$，该收益包含因以次充好获取的额外非法所得。但提供低质量数据会降低其信用值，造成的损失记为$L_2\left(L_2>0\right)$。信用值作为一种链上监督机制，会被持续记录并影响其后续交易激励，促使数据提供方提供高质量数据[48]。在区块链模式下，若提供方试图隐瞒低质量数据，其隐瞒成本为$C_{21}\left(C_{21}>0\right)$；而非区块链模式下，其隐瞒成本为$C_{22}\left(C_{22}>0\right)$。由于区块链系统通常采用SHA-256算法与分布式账本结构，想要篡改链上数据需同时修改超过51%的节点数据副本，需消耗极大算力资源，因此$C_{21} \gg C_{22}$。

假设4：假设数据使用方的策略集为{意向交易，拒绝交易}。将数据提供方意向交易的概率设为$z(0 \leqslant z \leqslant 1)$，拒绝交易的概率为$1-z$。当交易达成时，数据使用方获得的收益为$R_3(R_3>0)$。在区块链模式下，因低质量数据导致的损失记为$L_{31}\left(L_{31}>0\right)$；非区块链模式下，损失为$L_{32}\left(L_{32}>0\right)$。由于区块链上的数据交易通常伴随数据哈希与零知识证明等可验证凭证，数据使用方可在支付或接收完整数据前，通过哈希值对比快速验证数据真伪，从而在交易初期有效规避低质量数据风险[49]。同时，智能合约可自动执行惩戒机制，当区块链验证数据不合格时，系统可自动将押金划转给使用方账户，显著提升交易后的精准追责能力。相比之下，在非区块链模式下，一旦发生数据质量问题，举证与追责过程复杂且成本高昂，数据使用方需投入大量时间与审计资源以确认责任归属。综上所述，区块链模式下的损失小于非区块链模式，即$L_{31}<L_{32}$。在区块链模式下，当数据使用方基于自身需求偏好达成交易时，其匹配成本记为$C_{31}\left(C_{31}>0\right)$；若未达成交易，则匹配成本为$\gamma C_{31}(0 \leqslant \gamma \leqslant 1)$，其中$\gamma$表示未达成交易时的成本降低比例。而在非区块链模式下，交易达成的匹配成本记为$C_{32}\left(C_{32}>0\right)$，未达成交易时的匹配成本记为$\gamma C_{32}(0 \leqslant \gamma \leqslant 1)$。非区块链模式中，由于信息不对称，数据使用方需要投入大量信任成本以验证数据的真实性、来源与质量。在区块链模式下，数据使用方仅需验证数据哈希值是否与承诺一致，即可快速、准确地确认数据的真实性和完整性，不需要依赖复杂的第三方审计流程。此外，非区块链模式中由于信息不透明，匹配和交易环节往往依赖人工操作或中心化平台的烦琐流程，不仅匹配效率低下，而且信任成本和时间成本显著增加。相比之下，区块链模式下的智能合约可预先编码数据使用方的偏

好参数（如数据类型、价格区间等），自动匹配符合条件的数据资产，大幅降低人工匹配的成本与潜在交易摩擦[50]。由此可得，区块链模式下的数据匹配成本显著低于非区块链模式，即$C_{31} < C_{32}$。所提模型中涉及的相关参数符号与含义如表1所示。

表1　所提模型中涉及的相关参数符号与含义

模型	参数符号	含义
可信数据空间方	x	应用区块链技术
	R_1	交易达成时获得的收益
	M_1	区块链模式下的实施成本
	M_2	非区块链模式的实施成本
	L_{11}	应用区块链时交易低质量数据造成的损失
	L_{12}	未应用区块链时交易低质量数据造成的损失
	α	区块链模式的惩戒强度
	β	非区块链模式的惩戒强度
数据提供方	y	交易高质量数据
	R_{21}	高质量行为下交易达成的收益
	R_{22}	低质量行为下交易达成的收益
	C_{21}	应用区块链技术下的隐瞒成本
	C_{22}	未应用区块链技术下的隐瞒成本
	R_p	达成交易时支付平台的费用
	L_2	交易低质量数据时的损失
数据使用方	z	意向交易
	R_3	交易达成时获得的收益
	C_{31}	应用区块链的搜索匹配成本
	C_{32}	未应用区块链的搜索匹配成本
	L_{31}	应用区块链时交易低质量数据造成的损失
	L_{32}	未应用区块链时交易低质量数据造成的损失
	γ	未达成交易时，数据使用方搜索匹配成本降低的比例

1.3　构建模型收益矩阵

在数据要素流通过程中，受有限理性与信息不对称约束，各参与主体的策略选择呈现出交互性与动态性，难以自发形成稳定的最优策略组合。因此，需要通过多方动态博弈不断调整与优化策略，以实现系统的演化均衡。基于前述模型假设与参数设定，构建了数据提供方、可信数据空间方和数据使用方三方主体的演化博弈收益矩阵，如表2所示。

表2　三方主体演化博弈收益矩阵

可信数据空间方	数据提供方	数据使用方：意向交易（z）	数据使用方：拒绝交易（$1-z$）
应用区块链技术（x）	高质量数据（y）	$R_1 - M_1$	$-M_1$
		$R_{21} - R_p$	0
		$R_3 - C_{31}$	$-\gamma C_{31}$
	低质量数据（$1-y$）	$R_1 - M_1 - \alpha L_{11}$	$-M_1$
		$R_{22} - C_{21} - R_p - \alpha L_2$	$-C_{21}$
		$R_3 - C_{31} - \alpha L_{31}$	$-\gamma C_{31}$
未应用区块链技术（$1-x$）	高质量数据（y）	$R_1 - M_2$	$-M_2$
		$R_{21} - R_p$	0
		$R_3 - C_{32}$	$-\gamma C_{32}$
	低质量数据（$1-y$）	$R_1 - M_2 - \beta L_{12}$	$-M_2$
		$R_{22} - C_{22} - R_p - \beta L_2$	$-C_{22}$
		$R_3 - C_{32} - \beta L_{32}$	$-\gamma C_{32}$

2　博弈优化策略

2.1　可信数据空间方的策略稳定性分析

根据表2，将可信数据空间方应用区块链技术的期望收益记为U_{11}，未应用区块链的期望收益记为U_{12}，平均期望收益记为$\overline{U_1}$，可得

$$U_{11} = yz\left(R_1 - M_1\right) + y(1-z)\left(-M_1\right) + (1-y)z\left(R_1 - M_1 - \alpha L_{11}\right) + (1-y)(1-z)(-M_1) \tag{1}$$

$$U_{12} = yz\left(R_1 - M_2\right) + y(1-z)\left(-M_2\right) + (1-y)z\left(R_1 - M_2 - \beta L_{12}\right) + (1-y)(1-z)(-M_2) \tag{2}$$

$$\overline{U_1} = xU_{11} + (1-x)U_{12} \tag{3}$$

由式(1)~式(3)可得，可信数据空间方博弈策略的复制动态方程为

$$F(x) = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = x(U_{11} - \overline{U_1}) = x(1-x)(M_1 - M_2 + \alpha z L_{11} - \beta z L_{12} - \alpha y z L_{11} + \beta y z L_{12}) \tag{4}$$

根据复制方程的稳定性可知，各方主体博弈均衡点需要满足2个条件，即复制动态方程$F(x) = 0$，以及$F'(x)<0$，由此可得

$$F'(x) = (2x-1)(M_1 - M_2 + \alpha z L_{11} - \beta z L_{12} - \alpha y z L_{11} + \beta y z L_{12}) \tag{5}$$

与此同时设定

$$G(z) = M_1 - M_2 + \alpha z L_{11} - \beta z L_{12} - \alpha y z L_{11} + \beta y z L_{12} \tag{6}$$

由于$\dfrac{\partial G(z)}{\partial z} = \alpha L_{11} - \beta L_{12} < 0$故$G(z)$是关于$z$

的减函数。因此，由博弈均衡条件可得

$$z^* = \frac{M_2 - M_1}{\alpha L_{11} - \beta L_{12}} \tag{7}$$

1) 若 $z = z^*$ 时，有 $F'(x) = 0$，$x \in [0,1]$ 上的任何值或者可信数据空间方选择应用区块链技术或未应用区块链技术的任意概率的稳定性不能确定。

2) 若 $z > z^*$ 时，有 $\frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x}|_{x=0} > 0$，$\frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x}|_{x=1} < 0$。故 x=1 为演化稳定点。此时，应用区块链策略为可信数据空间方的演化稳定策略（ESS, evolutionarily stable strategy）。

3) 若 $z < z^*$ 时，有 $\frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x}|_{x=1} > 0$，$\frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x}|_{x=0} < 0$。故 x=0 为演化稳定点。此时，未应用区块链技术为可信数据空间方的演化稳定策略。

基于上述分析，可得可信数据空间方的策略演化相位图。由图2(a)可见，曲面上半部分对应其应用区块链策略的概率分布，x 趋近于 1，表明在区块链模式下，实施成本、交易收益与交易损失的综合预期收益高于非区块链模式，策略最终收敛于选择应用区块链技术。相对地，曲面下半部分对应不应用区块链的概率分布，x 趋近于 0。当区块链投入成本较高且收益不足以抵消实施成本时，可信数据空间方在非区块链模式下可获得更高收益，策略逐步稳定于不应用区块链技术。

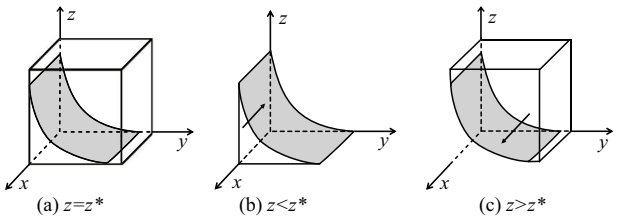


图2　可信数据空间方的策略演化相位曲线

2.2　数据提供方的策略稳定性分析

根据表2，将数据提供方选择交易高质量数据的期望收益记为 U_{21}，选择交易低质量数据的期望收益记为 U_{22}，平均收益记为 $\overline{U_2}$，于是则有

$$U_{21} = xz\left(R_{21} - R_p\right) + (1 - x)z\left(R_{21} - R_p\right) \tag{8}$$

$$U_{22} = xz\left(R_{22} - C_{21} - R_p - \alpha L_2\right) + x(1 - z)\left(-C_{21}\right) + (1 - x)z\left(R_{22} - C_{22} - R_p - \beta L_2\right) + (1 - x)(1 - z)(-M_2) \tag{9}$$

$$\overline{U_2} = yU_{21} + (1 - y)U_{22} \tag{10}$$

由式(8)~式(10)可知，数据提供方博弈策略的复制动态方程为

$$F(y) = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = y(U_{21} - \overline{U_2}) = y(1 - y)(C_{22} + zR_{21} - zR_{22} + xC_{21} - xC_{22} + \beta zL_2 + \alpha xzL_2 - \beta xzL_2) \tag{11}$$

根据复制方程稳定性可知，复制动态方程要满足，$F(y) = 0$，以及 $F'(y)<0$，由此可得

$$F'(y) = (1 - 2y)(C_{22} + zR_{21} - zR_{22} + xC_{21} - xC_{22} + \beta zL_2 + \alpha xzL_2 - \beta xzL_2) \tag{12}$$

与此同时设定

$$J(x) = C_{22} + zR_{21} - zR_{22} + xC_{21} - xC_{22} + \beta zL_2 + \alpha xzL_2 - \beta xzL_2 \tag{13}$$

由于 $\frac{\partial J(x)}{\partial x} = C_{21} - C_{22} + \alpha zL_2 - \beta zL_2 > 0$，因此 $J(x)$ 是关于 x 的增函数。因此，由博弈均衡条件可得

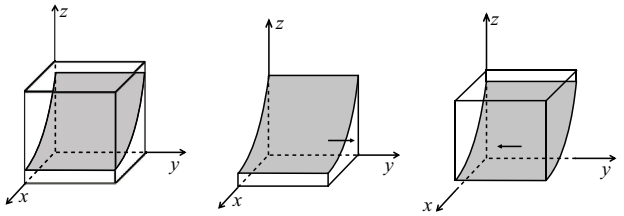
$$x^* = \frac{C_{22} - zR_{22} + zR_{21} + \beta zL_2}{C_{22} - C_{21} + \beta zL_2 - \alpha zL_2} \tag{14}$$

1) 若 $x = x^*$ 时，有 $F'(y) = 0$，$y \in [0,1]$ 上的任何值或数据提供方交易高质量数据（或交易低质量数据）的任意概率的稳定性不能确定。

2) 若 $x > x^*$ 时，有 $\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}|_{y=0} > 0$，$\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}|_{y=1} < 0$。故 $y = 1$ 为演化稳定点。此时，交易高质量数据策略为数据提供方的演化稳定策略。

3) 若 $x < x^*$ 时，有 $\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}|_{y=1} > 0$，$\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}|_{y=0} < 0$。故 $y = 0$ 为演化稳定点。此时，交易低质量数据策略为数据提供方的演化稳定策略。

数据提供方的策略演化相位曲线如图3所示。上半部分对应其选择交易低质量数据的概率分布，y 趋近于 0，表明在该情形下，隐瞒成本、交易收益与交易损失的综合预期收益高于高质量交易，策略最终收敛于低质量数据交易。相对地，下半部分对应高质量交易的概率分布，y 趋近于 1。此时，高质量交易带来的长期收益高于低质量交易的短期非法收益，后者难以抵消潜在惩罚与声誉损失，策略最终稳定于高质量数据交易。



(a) $x=x^*$　　(b) $x>x^*$　　(c) $x<x^*$

图3　数据提供方的策略演化相位曲线

2.3　数据使用方的策略稳定性分析

根据表2可知，将数据使用方意向交易数据的期望收益记为U_{31}，拒绝交易的期望收益记为U_{32}，平均收益记为$\overline{U_3}$，于是则有

$$U_{31}=xy\left(R_3-C_{31}\right)+x\left(1-y\right)\left(R_3-C_{31}-\alpha L_{31}\right)+\left(1-x\right)y\left(R_3-C_{32}\right)+\left(1-x\right)\left(1-y\right)\left(R_3-C_{32}-\beta L_{32}\right) \tag{15}$$

$$U_{32}=xy\left(-\gamma C_{31}\right)+x\left(1-y\right)\left(-\gamma C_{31}\right)+\left(1-x\right)y\left(-\gamma C_{32}\right)+\left(1-x\right)\left(1-y\right)\left(-\gamma C_{32}\right) \tag{16}$$

$$\overline{U_3}=zU_{31}+\left(1-z\right)U_{32} \tag{17}$$

由式(15)~式(17)可得，数据使用方博弈策略的复制动态方程为

$$F\left(z\right)=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=z\left(U_{31}-\overline{U_3}\right)=z\left(z-1\right)\left(-R_3+C_{32}-\gamma C_{32}+\beta L_{32}+xC_{31}-xC_{32}-\gamma xC_{31}+\gamma xC_{32}+\alpha xL_{31}-\beta xL_{32}-\beta yL_{32}-\alpha xyL_{31}+\beta xyL_{32}\right) \tag{18}$$

根据复制方程稳定性可知，复制动态方程需满足，$F\left(z\right)=0$，以及$F'\left(z\right)<0$，由此可得

$$F'\left(z\right)=\left(2z-1\right)\left(-R_3+C_{32}-\gamma C_{32}+\beta L_{32}+xC_{31}-xC_{32}-\gamma xC_{31}+\gamma xC_{32}+\alpha xL_{31}-\beta xL_{32}-\beta yL_{32}-\alpha xyL_{31}+\beta xyL_{32}\right) \tag{19}$$

与此同时设定

$$H\left(y\right)=-R_3+C_{32}-\gamma C_{32}+\beta L_{32}+xC_{31}-xC_{32}-\gamma xC_{31}+\gamma xC_{32}+\alpha xL_{31}-\beta xL_{32}-\beta yL_{32}-\alpha xyL_{31}+\beta xyL_{32} \tag{20}$$

由于$\frac{\partial H\left(y\right)}{\partial y}=-\beta L_{32}-\alpha xL_{31}+\beta xL_{32}<0$，因此$H\left(y\right)$是关于$y$的减函数。因此，由博弈均衡条件可得

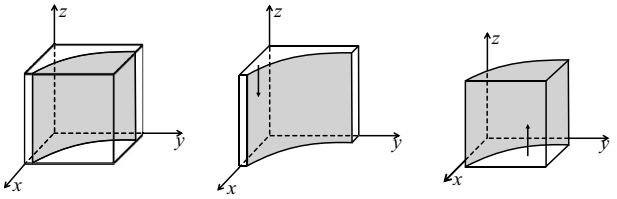
$$y^*=\frac{-R_3+C_{32}-\gamma C_{32}+\beta L_{32}+xC_{31}-xC_{32}-\gamma xC_{31}+\gamma xC_{32}+\alpha xL_{31}-\beta xL_{32}-\beta yL_{32}-\alpha xyL_{31}+\beta xyL_{32}}{\beta L_{32}+\alpha xL_{31}-\beta xL_{32}} \tag{21}$$

1) 若$y=y^*$时，有$F'\left(z\right)=0$，$z\in\left[0,1\right]$上的任何值或数据使用方意向交易或拒绝交易的任意概率的稳定性不能确定。

2) 若$y>y^*$时，有$\frac{\mathrm{d}F\left(z\right)}{\mathrm{d}z}\Big|_{z=0}>0$，$\frac{\mathrm{d}F\left(z\right)}{\mathrm{d}z}\Big|_{z=1}<0$。故$z=1$为演化稳定点，此时，选择交易数据策略为数据使用方的演化稳定策略。

3) 若$y<y^*$时，有$\frac{\mathrm{d}F\left(z\right)}{\mathrm{d}z}\Big|_{z=1}>0$，$\frac{\mathrm{d}F\left(z\right)}{\mathrm{d}z}\Big|_{z=0}<0$。故$z=0$为演化稳定点，此时，意向交易数据策略为数据使用方的演化稳定策略。

数据使用方的策略演化相位曲线如图4所示。曲面前半部分对应意向交易的概率分布，z趋近于1，表明当匹配成本、交易收益与交易损失的综合预期收益高于拒绝交易时，使用方更倾向于参与交易。相对地，曲面后半部分对应拒绝交易的概率分布，z趋近于0。此时，拒绝交易带来更高的预期收益，而意向交易将增加潜在风险与成本，策略最终稳定于拒绝交易状态。



(a) $y=y^*$　　(b) $y<y^*$　　(c) $y>y^*$

图4　数据使用方的策略演化相位图

2.4　三方演化博弈系统均衡渐近稳定性分析

以上分别分析了数据提供方、可信数据空间方和数据使用方在演化过程中达到稳定策略的均衡条件及其主要影响因素。然而，系统最终稳定状态并非由单一主体决定而是三方在动态博弈中的相互作用与策略协同的结果。基于此，本节进一步探讨三方协同作用下系统整体的稳定均衡条件。在所提模型中，系统的均衡点需同时满足，$F\left(x\right)=0,F\left(y\right)=0,F\left(z\right)=0$。经求解并舍去不确定及不可能的点后，得到系统均衡点为：$E_1\left(0,0,0\right)$、$E_2\left(0,0,1\right)$、$E_3\left(0,1,0\right)$、$E_4\left(0,1,1\right)$、$E_5\left(1,0,0\right)$、$E_6\left(1,0,1\right)$、$E_7\left(1,1,0\right)$、$E_8\left(1,1,1\right)$。

由复制动态方程求得的均衡点不一定是系统的演化稳定点，还需利用雅可比（Jacobia）矩阵对其稳定性进行进一步分析。该博弈系统的Jacobia矩阵（记为$\boldsymbol{J}$）为

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}\frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z}\\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z}\\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}(2x-1)G(z) & x(x-1)z(\beta L_{12}-\alpha L_{11}) & x(x-1)(1-y)(\alpha L_{11}-\beta L_{12})\\ x(x-1)(1-y)(\alpha L_{11}-\beta L_{12}) & (2y-1)J(x) & y(1-y)(R_{21}-R_{22})\\ z(1-z)M & z(1-z)(\beta L_{32}+\alpha xL_{31}-\beta xL_{32}) & (1-2z)H(y)\end{bmatrix} \tag{22}$$

其中，$G(z)=M_1-M_2+\alpha zL_{11}-\beta zL_{12}-\alpha yzL_{11}+\beta yzL_{12}$，$J(x)=C_{22}+zR_{21}-zR_{22}+xC_{21}-xC_{22}+\beta zL_2+\alpha xzL_2-\beta xzL_2$，$H(y)=R_3-C_{32}+\gamma C_{32}-\beta L_{32}-xC_{31}+xC_{32}+\gamma xC_{31}-\gamma xC_{32}-\alpha xL_{31}+\beta xL_{32}+\beta yL_{32}+\alpha xyL_{31}-\beta xyL_{32}$，$M=C_{32}-C_{31}+\gamma C_{31}-\gamma C_{32}-\alpha L_{31}+\beta L_{32}+\alpha yL_{31}-\beta yL_{32}$。

根据李雅普诺夫定理1~定理3可知，若一次近似方程的所有特征值实部均为负，则原方程零解渐近稳定；若至少存在一个特征值实部为正，则零解不稳定；若存在实部为零的特征值，则无法判断零解的稳定性[51]。因此，当Jacobia矩阵的特征值均小于零时，对应的局部均衡点为演化稳定点。以均衡点$E_1(0,0,0)$为例，其Jacobia矩阵为

$$\boldsymbol{J}_1=\begin{bmatrix}C_{22} & 0 & 0\\ 0 & M_2-M_1 & 0\\ 0 & 0 & R_3-C_{32}+\gamma C_{32}-\beta L_{32}\end{bmatrix} \tag{23}$$

可求得$\boldsymbol{J}_1$的特征值为$\lambda_1=C_{22}$，$\lambda_2=M_2-M_1$，$\lambda_3=R_3-C_{32}+\gamma C_{32}-\beta L_{32}$。由于$\lambda_2$的值是正数，显然，$\boldsymbol{J}_1$不是系统的稳定点。以此类推，可分别计算其余7个均衡点对应的Jacobian矩阵特征值，并以此判断特征值符号及稳定性，具体结果如表3所示。

由表3中各均衡点对应的Jacobian矩阵特征值可知，均衡点$E_1(0,0,0)$和$E_5(1,0,0)$的特征值$\lambda_1>0$。对于均衡点$E_6(1,0,1)$，由于前文假设条件$C_{21}\gg C_{22}$，其特征值λ_3在情形1~5中均大于0。因此，均衡点$E_1(0,0,0)$、$E_5(1,0,0)$和$E_6(1,0,1)$均为不稳定点。其余6个均衡点的稳定性需结合以下5种情形分别进行分析。

情形1：均衡点$E_2(0,0,1)$稳定策略需满足的条件$1(1-\gamma)C_{32}+\beta L_{32}<R_3$，$\beta L_{12}+M_2<\alpha L_{11}+M_1$，$R_{21}<R_{22}-C_{22}-\beta L_2$。当数据使用方意向交易且数据提供方选择交易低质量数据时，可信数据空间方在非区块链模式下的成本低于区块链模式$(\beta L_{12}+M_2<\alpha L_{11}+M_1)$，此时区块链实施成本超过了其带来的流程优化收益，可信数据空间方倾向于不引入区块链技术。在非区块链模式下，交易低质量数据

表3　　各均衡点的稳定性情况

均衡点	Jacobian矩阵特征值			特征值符号	稳定性
	λ_1	λ_2	λ_3		
$E_1(0,0,0)$	C_{22}	M_2-M_1	$R_3-C_{32}+\gamma C_{32}-\beta L_{32}$	(+,不定，不定)	不稳定
$E_2(0,0,1)$	$C_{32}-R_3-\gamma C_{32}+\beta L_{32}$	$M_2-M_1-\alpha L_{11}+\beta L_{12}$	$C_{22}+R_{21}-R_{22}+\beta L_2$	（—，—，—）	条件1，ESS
$E_3(0,1,0)$	M_2-M_1	$-C_{22}$	$R_3-C_{32}+\gamma C_{32}$	（—，—，—）	条件2，ESS
$E_4(0,1,1)$	M_2-M_1	$C_{32}-R_3+\gamma C_{32}$	$R_{22}-R_{21}-C_{22}-\beta L_2$	（—，—，—）	条件3，ESS
$E_5(1,0,0)$	C_{21}	M_1-M_2	$R_3-C_{31}+\gamma C_{31}-\alpha L_{31}$	(+,不定，不定)	不稳定
$E_6(1,0,1)$	$C_{31}-R_3-\gamma C_{31}+\alpha L_{31}$	$M_1-M_2+\alpha L_{11}-\beta L_{12}$	$C_{21}+R_{21}-R_{22}+\alpha L_2$	(不定，不定，+)	不稳定
$E_7(1,1,0)$	M_1-M_2	$-C_{21}$	$R_3-C_{31}+\gamma C_{31}$	（—，—，—）	条件4，ESS
$E_8(1,1,1)$	M_1-M_2	$C_{31}-R_3-\gamma C_{31}$	$R_{22}-R_{21}-C_{21}-\alpha L_2$	（—，—，—）	条件5，ESS

的收益高于交易高质量$\left(R_{21} < R_{22} - C_{22} - \beta L_2\right)$，数据提供方更倾向于选择交易低质量交易。同时，由于意向交易的效用高于拒绝交易$((1-\gamma)C_{32} + \beta L_{32} < R_3)$，数据使用方倾向于意向交易策略。

情形2：均衡点$E_3(0,1,0)$博弈稳定策略需满足的条件$2M_2 < M_1$，$R_3 < (1-\gamma)C_{32}$。当数据使用方拒绝交易且提供方交易高质量数据时，可信数据空间方在非区块链模式下的实施成本更低$\left(M_2 < M_1\right)$，因而更倾向于不应用区块链技术。在未应用区块链且使用方拒绝交易的情境下，数据提供方倾向于交易高质量数据。此时，由于数据使用方承担的交易成本高于交易带来的效用$\left(R_3 < (1-\gamma)C_{32}\right)$，其决策倾向于拒绝交易。为促进区块链在流通中的正向作用，可提高非区块链模式的合规成本（增大M_2），并为数据使用方降低匹配成本（如提供样本预览、数据试用等方式），以增强其交易意愿。

情形3：均衡点$E_4(0,1,1)$博弈稳定策略需满足条件$3M_2 < M_1$，$R_{22} - C_{22} - \beta L_2 < R_{21}$且$(1-\gamma)C_{32} < R_3$。当可信数据空间方引入区块链后，其实施成本超过了流程优化所带来的收益$\left(M_2 < M_1\right)$，说明区块链模式在此情形下的净效益低于非区块链模式。即使区块链能在一定程度上降低低质量数据交易引发的损失，但其收益增量仍不足以抵消额外的实施开销。定义$\Delta R = \left(\alpha L_{11} + M_1\right) - \left(\beta L_{12} + M_2\right)$，当$\Delta R < 0$说明区块链模式的净效益低于非区块链模式，可信数据空间方在成本收益权衡下更倾向于不应用区块链技术。当数据使用方意向交易且可信数据空间方未引入区块链时，数据提供方交易高质量数据的收益高于交易低质量数据$\left(R_{22} - C_{22} - \beta L_2 < R_{21}\right)$，因此，提供方倾向于提供高质量数据。当数据使用方的意向交易效用大于交易成本时$\left((1-\gamma)C_{32} < R_3\right)$，则选择意向交易策略。

情形4：均衡点$E_7(1,1,0)$博弈稳定策略需满足的条件$4M_1 < M_2$，$R_3 < (1-\gamma)C_{31}$。由于可信数据空间方通过区块链智能合约、加密算法等技术手段，在交易效率与可信度方面获得的节约效用超过了区块链的实施成本$\left(M_1 < M_2\right)$，因此，其倾向于区块链方案。在可信数据空间方未应用区块链且使用方拒绝交易的情况下，提供方更愿意提供高质量数据。当数据使用方的交易成本高于交易收益$\left(R_3 < (1-\gamma)C_{31}\right)$时，数据使用方倾向于拒绝交易。这反映出，即便可信数据空间方引入了区块链技术，但若区块链带来的效率与收益未能有效传导至数据使用方，其交易意愿仍会受限。为此，可通过降低交易费用与强化数据质量证明等机制，进一步提升数据使用方对区块链应用的感知价值，从而增强其参与意愿。

情形5均衡点$E_8(1,1,1)$博弈稳定策略需满足的条件5：$M_1 < M_2$，$R_{22} - C_{21} - \alpha L_2 < R_{21}$且$(1-\gamma)C_{31} < R_3$。区块链模式下的实施成本低于非区块链模式$\left(M_1 < M_2\right)$，因而可信数据空间方倾向于引入区块链技术。当交易低质量数据所带来的额外收益不足以弥补因篡改链上信息而造成的损失时$\left(R_{22} - C_{21} - \alpha L_2 < R_{21}\right)$，数据提供方在收益驱动下更倾向于交易高质量数据。此外，在可信数据空间方未应用区块链而提供方选择交易高质量数据时，数据使用方交易的效用高于其所承担的交易成本$\left((1-\gamma)C_{31} < R_3\right)$，其选择意向交易策略。

3 仿真分析

为验证上述演化博弈模型系统稳定性分析的有效性，利用Matlab R2016a进行演化过程仿真。根据各方主体演化博弈均衡情况分析，为保证均衡解的稳定性，将参数取值均设为大于0。对存在均衡点的情况进行赋值[52-53]，分别分析M_1、M_2、L_{11}、L_{12}、R_{21}、R_{22}、C_{21}、C_{22}、L_2、C_{31}、C_{32}、L_{31}、L_{32}、α、β、γ这17个变量对数据要素流通演化博弈过程结果的影响。

3.1 三方演化博弈行为的演化路径

本文将博弈模型的仿真初始值设置为5组（单位为万元）。为确保参数设定的合理性与可解释性，变量取值选取参考了既有文献、行业案例以及数据交易平台的调研数据。在仿真之前，对所有数据进行了预处理，使其能够更准确地反映现实中的对应关系。

1) 根据文献[54]的数据，私有链或联盟链的部署通常包括平台开发、节点搭建以及合规与安全审计环节，其实施成本因系统规模与复杂度的差异而有所不同，一般在80万~350万元。因此，本文在构建可信数据空间的区块链方案时，将实施成本M_1设定为180万元。相比之下，在非区块链方案下，根据部分数据交易平台的公开报告[55]，其成

本通常处于50万~250万元，因此本文将M_2设定为120万元，以更贴近实际情况。

2) 在区块链金融领域的相关研究中，基于97个真实样本的实验验证结果表明，引入区块链技术后，传统金融行业的处理成本可降低约23%[56]。据此，本文在模型设定中将参数L_{11}、L_{12}的初始值设为$(60,80)$，以反映区块链在降低交易成本方面的实际效应。

3) 根据《数据要素化白皮书（2022）》[57]部分公开交易案例，金融机构为风控建模所购买的合规企业画像数据集，其交易金额通常在80万~150万元。鉴于此，本文取中间值，将数据交易收益R_{21}设定为110万元。此外，依据《2022年数据资产泄露分析报告》以及《2024年数据泄露成本报告》可知，数据提供方将低质量数据伪装成高质量数据进行售卖的行为，符合报告中以次充好的欺诈模型。为此，本文将R_{22}设定为220万元，约为真实数据收益的2.5倍，符合报告中的欺诈模型设定。

4) 根据权益证明（PoS, proof of stake）的设定[58]，以太坊会根据节点作恶程度采取惩罚措施，对其质押代币进行部分或全部没收。基于此，本文在模型设定中将区块链模式下的惩戒程度参数α设定为$[0.8,1]$，并假定α随链上参与节点的信誉动态调整，以更符合实际运行机制。

5) 根据文献[59]所述，在非区块链方案中，惩戒强度主要取决于违规行为的影响范围与严重程度，通常通过行政处罚与市场约束等方式加以实施，其措施包括罚没至少50%的保证金和交易所得，严重情况下甚至会取消数据提供方的交易资格。基于此，本文在模型设定中将链下惩戒强度参数β取值为$[0.5,1]$，以反映现实制度安排下的惩戒机制。

6) 根据《中国区块链创新应用发展报告（2023）》的数据表明[60]，基于区块链技术的平台在数据检索效率提升近50%，而标准化接口与智能合约则可降低约60%的匹配成本。以蚂蚁链为例，其匹配成本下降约80%、主流L_2的费用下降90%~98%。基于上述事实，本文将成本降低比例γ设定为$[0.5,0.98]$。具体参数设置如表4所示，部分参数的初始赋值满足2.4节所述的5种不同均衡条件，以确保模型设定兼具现实意义与理论合理性。

各变量变化对演化博弈过程的具体影响如图5所示。由图5(a)可知，在满足$R_{21} < R_{21} - C_{22} - \beta L_2$，$(1-\gamma)C_{32} + \beta L_{32} < R_3$且$\beta L_{12} + M_2 < \alpha L_{11} + M_1$的条件下，系统的演化稳定点为$E_2(0,0,1)$；由图5(b)可知，在满足$M_2 < M_1$，$R_3 < (1-\gamma)C_{32}$的条件下，系统的演化稳定点为$E_3(0,1,0)$；由图5(c)可知，在满足$M_2 < M_1$，$R_{22} - C_{22} - \beta L_2 < R_{21}$且$(1-\gamma)C_{32} < R_3$的条件下，系统的演化稳定点为$E_4(0,1,1)$；由图5(d)可知，在满足$M_1 < M_2$，$R_3 < (1-\gamma)C_{31}$的条件下，系统的演化稳定点为$E_7(1,1,0)$；由图5(e)可知，在满足$M_1 < M_2$，$R_{22} - C_{21} - \alpha L_2 < R_{21}$且$(1-\gamma)C_{31} < R_3$条件下，系统的演化稳定点为$E_8(1,1,1)$。

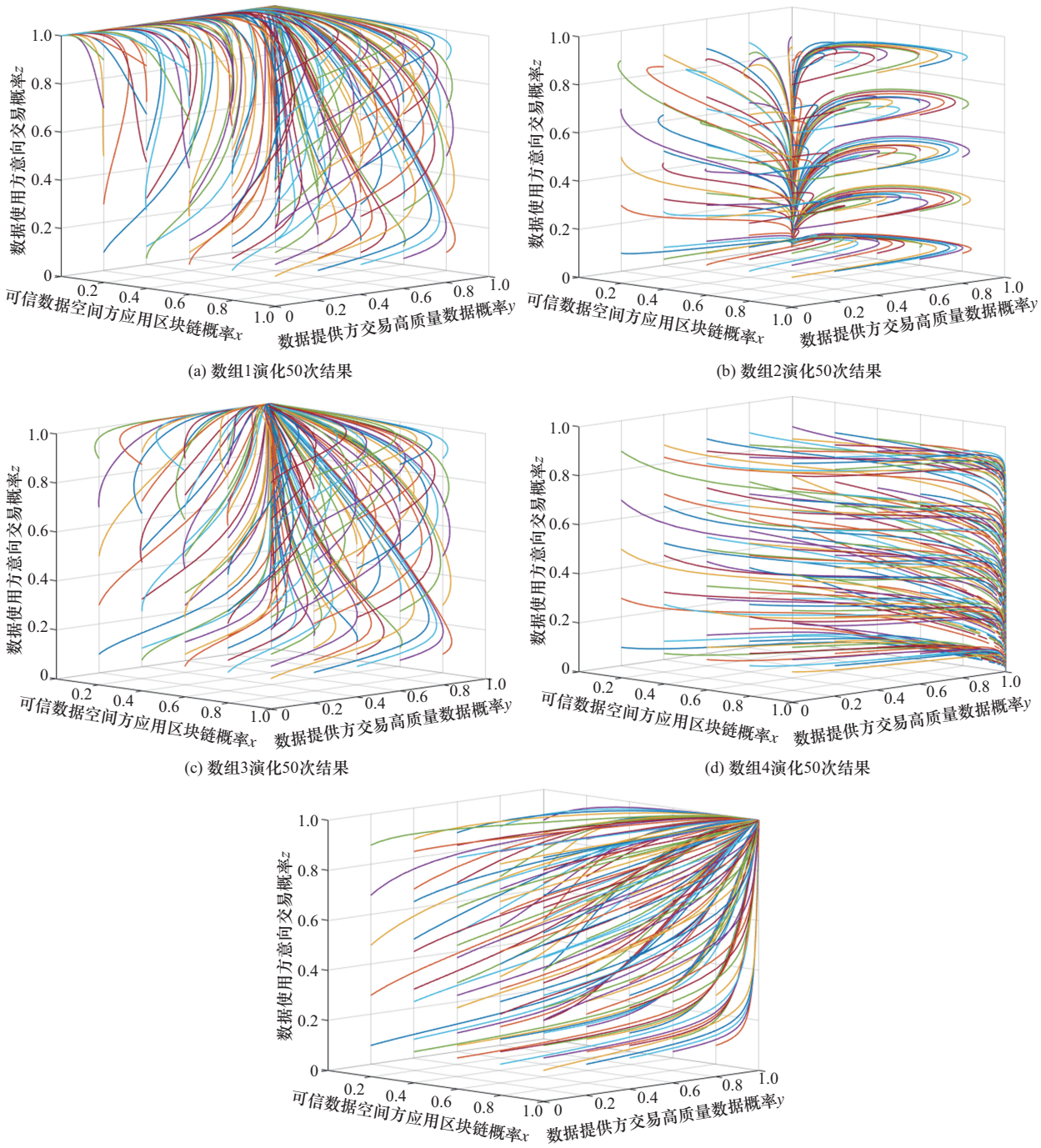
由此可见，可信数据空间方的实施成本与交易损失，数据提供方的交易收益、隐瞒成本及交易损失，以及数据使用方的交易收益、交易损失以及匹配成本等变量的变化，均会对演化博弈过程产生影响。在推动数据要素流通过程中，应重点关注上述核心变量的作用机制；不同变量初始值的设定亦会对博弈结果造成影响。通过设置多组不同参数的对比实验，不仅能够有效检验仿真结果的稳定性与鲁棒性，还可以进一步揭示参与方策略的演化路径，以及在不同初始状态下策略的动态调整过程与最终稳定均衡点情况。

3.2　可信数据空间方行为策略的影响因素分析

基于前文分析并结合5种情形下的仿真初始值，进一步探讨实施成本以及交易损失对可信数据

表4　　**不同数组下的仿真初始值**

数组	M_1	M_2	L_{11}	L_{12}	R_{21}	R_{22}	C_{21}	C_{22}	L_2	R_3	C_{31}	C_{32}	L_{31}	L_{32}	α	β	γ
1	180	120	60	80	110	250	300	110	20	90	15	30	30	50	0.6	0.8	0.5
2	180	120	60	80	110	250	300	150	20	30	30	120	30	60	0.6	0.8	0.5
3	180	120	60	80	110	250	300	150	20	90	30	80	30	50	0.6	0.8	0.5
4	120	180	60	80	110	250	300	120	20	30	80	90	30	60	0.6	0.8	0.5
5	120	180	30	80	110	250	300	150	20	90	30	80	30	60	0.6	0.8	0.5



(a) 数组1演化50次结果

(b) 数组2演化50次结果

(c) 数组3演化50次结果

(d) 数组4演化50次结果

(e) 数组5演化50次结果

图5　各变量变化对演化博弈过程的具体影响

空间方行为策略的影响。

1) 为分析实施成本变化对可信数据空间方行为策略的影响，分别将实施成本(M_1, M_2)设为$\{(180,150),(120,180),(90,210)\}$，仿真结果如图6(a)所示。在各个实验中，复制动态方程组均随时间演化50次，且初始点统一设定为(0.1,0.1,0.1)[61-62]。可见，当$M_2 < M_1$时，系统的演化稳定点收敛于$E_4(0,1,1)$，表明在此情形下可信数据空间方发现，较高的技术投入不具备经济效益，链下数据交易因能够节约成本而成为更优选择，即系统倾向于非区块链模式。当$M_1 < M_2$时，系统的演化稳定点渐进收敛于$E_8(1,1,1)$。由复制动态方程的原理可知，可信数据空间方在是否引入区块链的决策中，其内驱力来源于区块链模式与非区块链模式之间的净收益

差。设 $\Delta M = M_2 - M_1$，当 ΔM 增大时，区块链模式的成本优势愈发凸显，演化博弈中的可信数据空间方通过模仿与学习调整自身策略的速度加快，从而使系统更快收敛至稳定状态。结果说明，区块链的实施成本直接影响可信数据空间方的策略选择。因此，降低区块链技术成本可使数据上链成为一种经济可行且高效的方案。

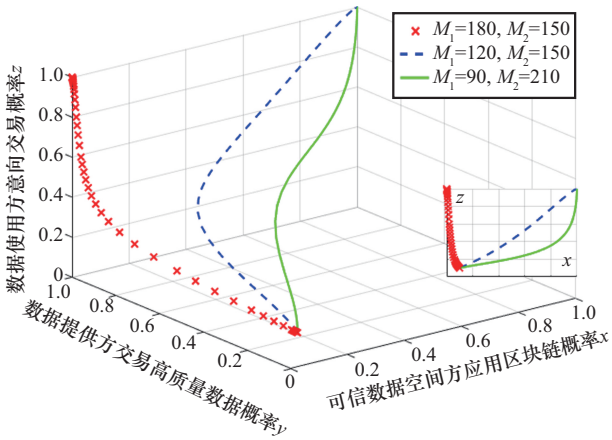
2) 为分析交易低质量数据行为造成的损失对可信数据空间方行为策略的影响，分别将变量（L_{11},L_{12}）设为{(40,50),(30,80),(15,160)}，其差值为 $\Delta L = L_{12} - L_{11}$，仿真结果如图 6(b)所示。可见，系统的演化稳定点收敛于 $E_8(1,1,1)$，同时随着 ΔL 值的增大，可信数据空间方达到均衡状态的速度加快，但 ΔL 的大小并不改变最终均衡结果。结果表明，各参与主体能够依托区块链的透明性以及信息共享优势，快速建立信任关系，从根源上减少低质量数据交易的发生，并降低因数据质量问题导致的潜在损失。进一步来看，数据质量隐患越大，可信数据空间方对区块链技术的引入越敏感。从演化博弈的视角看，区块链模式在长期收益上更具优势，可信数据空间方的自身策略将向高收益方向调整，从而加速区块链技术的落地与应用。

3.3　数据提供方行为策略的影响因素分析

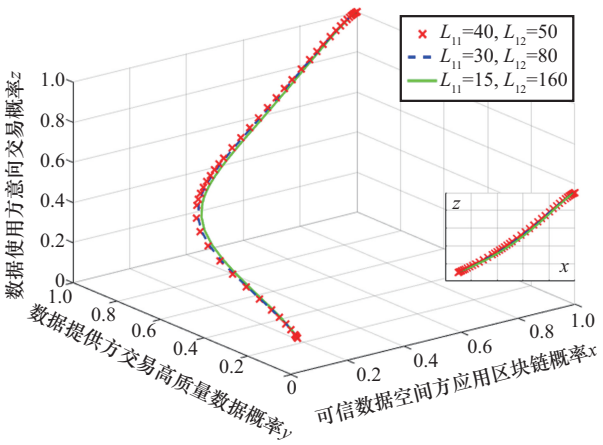
基于前文分析，并结合 5 种情形下的仿真初始值，进一步探讨交易收益、隐瞒成本以及交易损失对数据提供方行为策略的影响。

1) 为分析交易收益对数据提供方策略选择的影响，分别将交易收益（R_{21},R_{22}）设为{(50,300),(110,250),(200,230)}，其差值定义为 $\Delta R = R_{22} - R_{21}$，仿真结果如图 7(a)所示。当 ΔR 较小时，系统收敛于稳定点 $E_4(0,1,1)$，且随 ΔR 值的减小，曲线收敛速度进一步加快。结果表明，在收益差异较小时，高质量数据相较于低质量数据的优势并不显著，但在博弈的长期迭代学习中，高质量数据的长期收益逐渐凸显，促使数据提供方最终选择交易高质量的最优策略。相反，当 ΔR 较大时，数据使用方的策略发生明显转变，系统演化稳定点收敛于 $E_2(0,0,1)$。此时，在高额非法收益的驱动下，数据使用方倾向于选择交易低质量数据，进而导致数据提供方受短期逐利动机影响，市场逐步失衡，破坏了数据要素市场的健康发展。由此可见，为抑制因高非法收益驱动的低质量数据交易行为，有必要通过区块链等技术手段和制度约束进行有效引导与规范。

2) 为分析隐瞒成本对数据提供方策略选择的影响，将区块链模式下，数据提供方的隐瞒成本 C_{21} 分别设为(200,300,700)，仿真结果如图 7(b)所示。由图 7(b)可知，系统演化曲线逐渐向稳定点 $E_8(1,1,1)$ 收敛，且随惩戒力度增强，数据提供方面临的隐瞒成本显著增加，收敛速度明显加快。该过程促使数据提供方更快地转向高质量数据交易策略，以规避潜在处罚，从而推动系统更快地达到均衡状态。进一步分析表明，区块链通过密码学机制与链式数据结构显著提高了数据篡改与隐瞒的难度，有效增加了隐瞒成本。由此，低质量数据交易的相对收益迅速下降，而高质量数据交易的长期效益逐渐凸显，最终推动系统稳定演化至以高质量数据交易为主导的均衡状态。

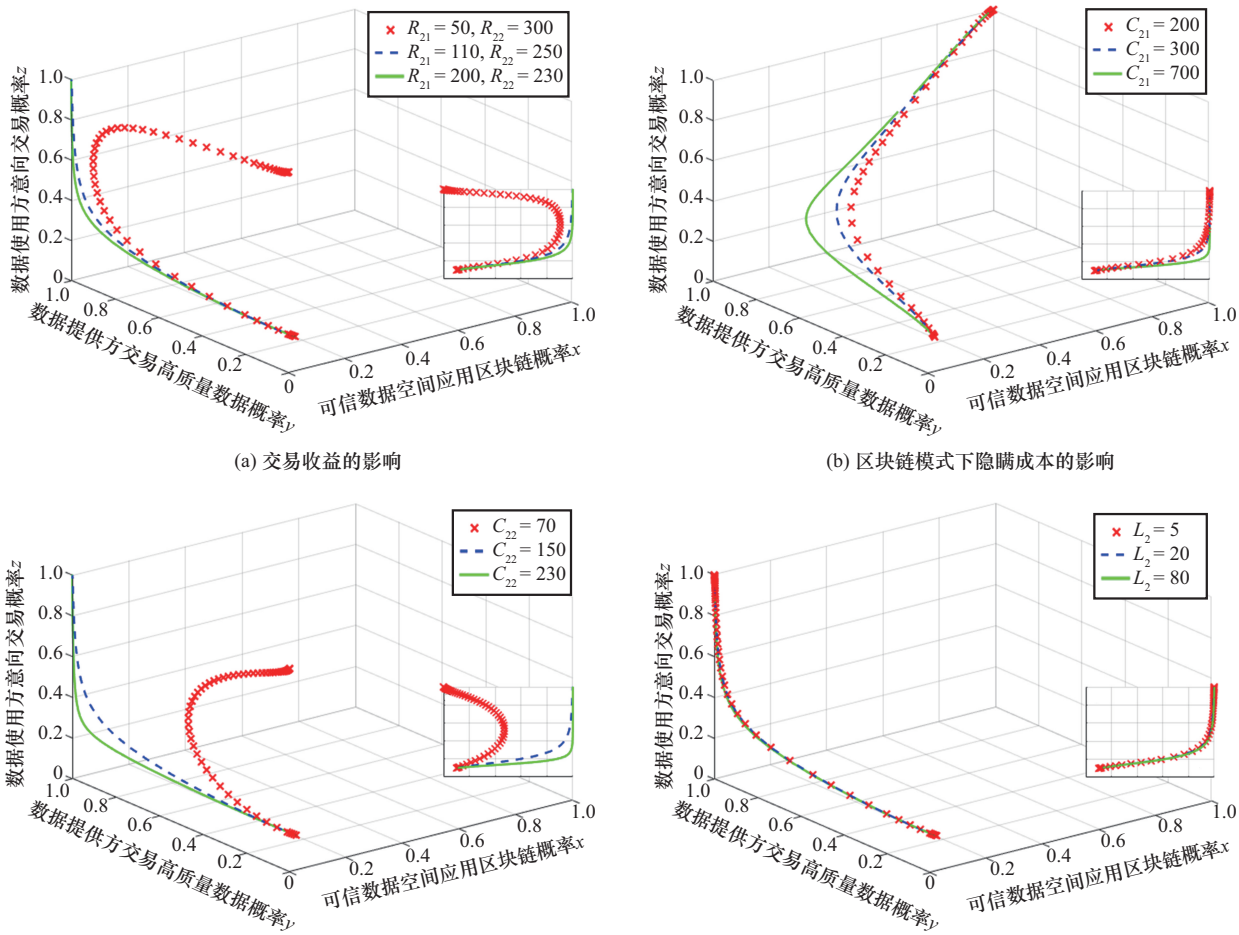


(a) 实施成本的影响



(b) 交易损失的影响

图 6　可信数据空间方行为策略的影响因素



(a) 交易收益的影响　(b) 区块链模式下隐瞒成本的影响

(c) 非区块链模式下隐瞒成本的影响　(d) 交易损失的影响

图7　数据提供方行为策略的影响因素

3) 在非区块链模式下，数据提供方的隐瞒成本 C_{22} 分别设为(70,150,230)，仿真结果如图7(c)所示。当隐瞒成本较低（图中为 $C_{22}=70$）时，系统在约40次迭代学习后收敛至稳定点 $E_8(1,1,1)$。此时数据提供方更倾向于选择交易低质量数据。随着隐瞒成本的逐步增加，数据提供方的策略选择发生转变，系统最终收敛于稳定点 $E_4(0,1,1)$，即数据提供方选择交易高质量数据。由此可见，隐瞒成本的高低直接影响数据提供方的策略选择：在宽松的惩戒环境下，合规压力较小，数据提供方更易产生违约行为，导致低质量数据交易频发；当惩罚力度增强时，违约风险与成本显著提高，使得通过篡改或隐瞒数据获取非法收益的动机大幅下降，从而推动系统向高质量交易策略转移。因此，健全的数据流通市场治理机制应通过提升隐瞒成本来约束违约行为，进而促进数据交易质量的提升与市场的健康发展。

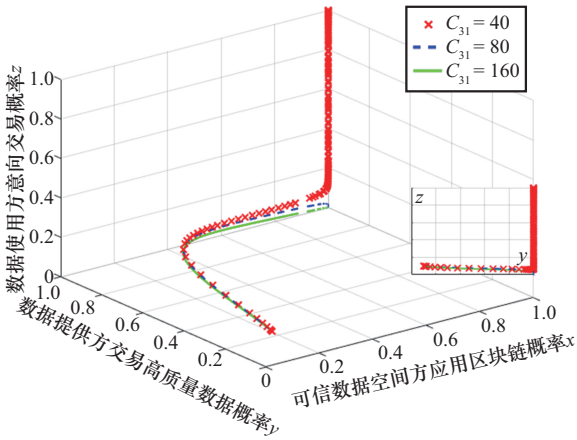
4) 为分析交易低质量数据对数据提供方造成的损失对其行为策略的影响，将损失 L_2 分别赋值为(5,20,80)，仿真结果如图7(d)所示。系统稳定于策略组合 $E_4(0,1,1)$，随着 L_2 的增大，曲线的收敛速度加快，数据提供方能够更快达到稳定均衡，但 L_2 的取值不会改变数据提供方的最终策略均衡。这是因为复制动态方程刻画了参与主体对不同策略收益差异的动态响应，博弈参与者的策略选择均以利益最大化为导向，当 L_2 增大时，低质量数据交易带来的净收益明显下降，加速了低质量数据策略的淘汰，进而推动系统更快收敛至高质量交易的稳定状态。因此，信誉损失和交易处罚等外部约束能够有效抑制低质量数据交易行为。可信数据空间方可通过推动技术创新与制度设计，提高数据流通的透明性与可信性，从根源上减少低质量数据交易风险，为数据要素市场的发展奠定基础。

3.4　数据使用方行为策略的影响因素分析

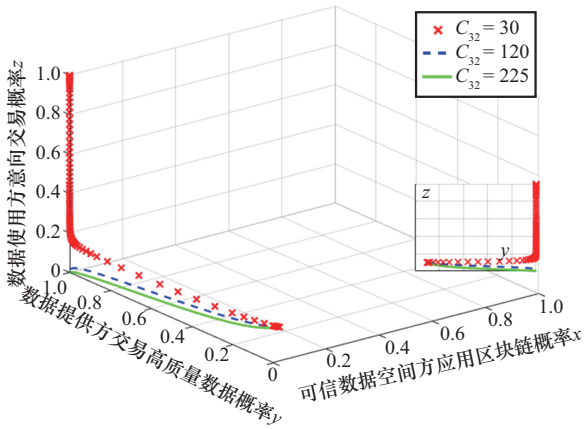
基于前文分析，并结合5种情形下的仿真初始

值，进一步探讨匹配成本、交易损失以及交易收益对于数据使用方行为策略的影响。

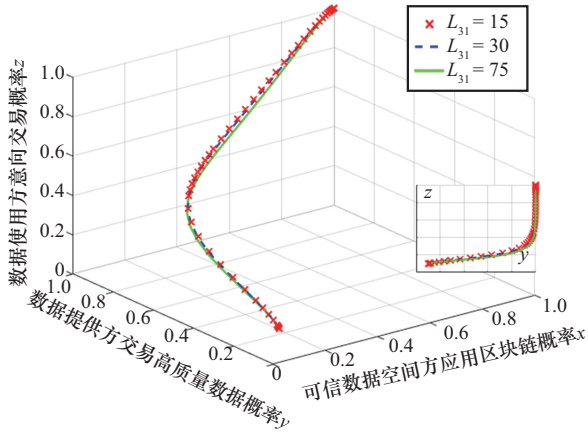
1) 为分析匹配成本对数据使用方行为策略的影响，在区块链模式下，将 C_{31} 赋值为(40,80,160)，仿真结果如图 8(a)所示。由图 8(a)可知，当数据使用方的匹配成本较高（C_{31} = 160）时，其策略倾向于拒绝交易；当 C_{31} 降至一定阈值以下（由 80 降至 40）时，系统的演化稳定策略发生明显转变，数据使用方逐渐倾向于意向交易，最终收敛于演化稳定点 E_8(1,1,1)。这一结果表明，区块链技术在降低匹配成本方面具有显著优势。一方面，区块链通过共识机制确保流通数据的真实性与不可篡改性，从而提高



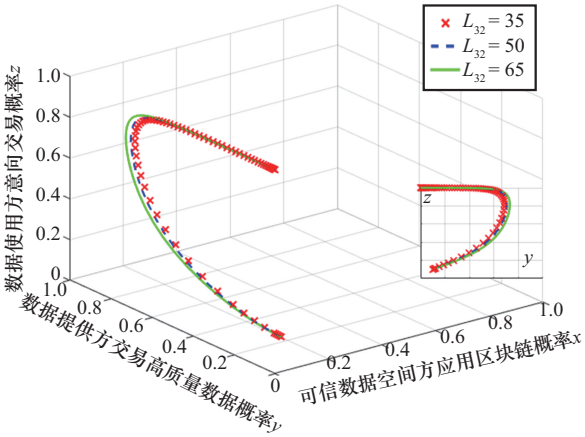
(a) 区块链模式下匹配成本的影响



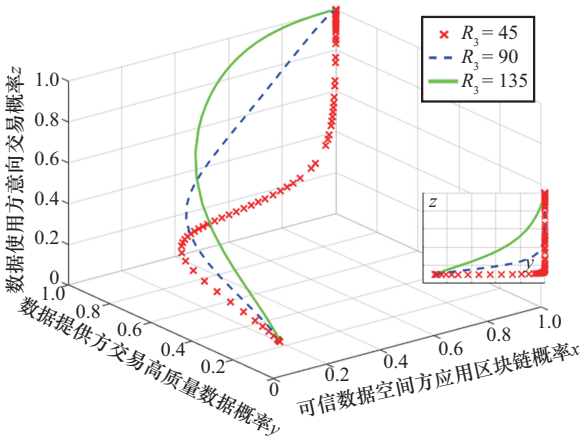
(b) 非区块链模式下匹配成本的影响



(c) 区块链模式下交易损失的影响



(d) 非区块链模式下交易损失的影响



(e) 交易收益的影响

图 8　数据使用方行为策略的影响因素

了交易的信任度；另一方面，智能合约的引入实现了交易流程的自动化执行，并辅以加密、匿名化和访问控制等机制，有效降低了数据使用方的匹配成本并提升流通效率。因此，推动区块链技术的落地与应用，不仅有助于增强数据使用方的交易意愿。

2) 在非区块链模式下，分别将C_{32}设为(30,120,225)，仿真结果如图8(b)所示。当匹配成本较低（$C_{32}=30$）时，系统演化稳定均衡点收敛于$E_4(0,1,1)$，此时数据使用方倾向于交易。随着C_{32}的增大，数据使用方的策略由意向交易逐步转变为拒绝交易，系统最终收敛于稳定点$E_3(0,1,0)$。结果表明，在其余变量保持不变的条件下，非区块链模式中匹配成本的高低对数据使用方的策略选择具有决定影响。当匹配成本较低时，数据使用方仍可通过交易获得正向收益；但当匹配成本超过一定阈值后，交易收益不足以弥补匹配成本支出，数据使用方趋向于放弃交易行为。由此可见，匹配成本是影响数据流通的关键因素。为促进数据要素的高效流通，可信数据空间方可通过引入区块链技术降低匹配成本，从而提升数据使用方的交易意愿与市场活跃度。

3) 为分析区块链模式下，交易低质量数据所造成的损失对数据使用方行为策略的影响，将L_{31}分别设为(15,30,75)，仿真结果如图8(c)所示。系统状态随时间逐渐收敛至稳定均衡点$E_8(1,1,1)$，且随L_{31}的减小，系统收敛速度明显加快。结果表明，区块链模式下的交易损失大小会加速或者延缓使用方达到均衡状态，交易的损失越低，使用方意向交易的倾向越明显。从长期来看，交易损失的变化并不改变系统的最终演化方向，供需双方最终均会选择最优策略并维持稳定均衡，即数据提供方选择交易高质量数据，数据使用方选择意向交易。其根本原因在于，区块链通过共识机制和加密技术显著提升了数据交易的真实性与安全性，有效降低了使用方在数据流通过程中可能面临的潜在损失，从而强化了市场的信任基础与交易稳定性。

4) 在非区块链模式下，将L_{32}分别设为(35,50,65)，仿真结果如图8(d)所示。由演化曲线可知，L_{32}值越小，系统向$E_2(0,0,1)$收敛的速度越快。结果表明，非区块链模式下的交易损失同样会影响数据使用方的策略选择，当交易的损失较低时，数据使用方更倾向于意向交易。然而，从图中演化过程可进一步观察到，非区块链模式下的供需双方最终均收敛于交易低质量数据的策略组合。这是因为在低合规约束条件下，供需双方会快速调整策略，以追求自身效用的最大化。由此可见，促进数据要素市场的长期稳定与健康发展，可信数据空间方应立足长远，持续优化系统架构，充分发挥区块链技术在提升数据交易可信度与合规性方面的核心支撑作用。

5) 为分析交易收益对数据使用方行为策略的影响，将R_3设定为(45,90,135)，仿真结果如图8(e)所示。由图8(e)可知，系统最终收敛至稳定均衡点$E_8(1,1,1)$，且数据使用方的交易意愿与交易收益成正相关关系：交易收益越高，数据使用方的交易意愿越强，系统向均衡点收敛的速度也越快。该结果表明，交易收益对数据使用方的策略选择具有显著的正向驱动作用。其根本原因在于，区块链技术的可信性保障了交易收益的可靠获取，从而增强了数据使用方的参与意愿与市场信任。由此可见，合理提升数据使用方的收益水平，对于强化交易激励机制、促进区块链赋能的数据要素市场建设具有重要的理论与实践意义。

4 结束语

在数字经济的背景下，如何在保障高质量数据的同时构建高效、可信的数据流通体系，已成为推动数字经济高质量发展的核心。本文以数据提供方、可信数据空间方与数据使用方为主体，构建了基于区块链的可信数据空间演化博弈模型，系统分析区块链在促进数据要素高效流通与信任构建中的作用机理。在此基础上，总结了以下结论与政策建议。一是强化违规惩戒与信用约束。数据提供方之所以选择交易低质量数据，源于其预期低质收益高于可能受到的惩罚。应充分利用区块链的可追溯特性强化全过程监管，健全信用惩戒机制，以技术与制度双重约束引导数据提供方调整风险偏好，推动形成稳定、公正的市场信用体系。二是加大可信数据空间方的技术投入与机制优化。数据上链可打破信息壁垒、提升透明度与信任度，但实施成本仍制约其广泛应用，应通过优化共识机制、提升智能合约性能、改进收益分配机制等措施实现降本增效，增强系统的可持续性。三是建立动态灵活的策略调整机制。数据流通主体间存在复杂博弈与非合作特征，应根据演化博弈结果动态调整策略，避免“一刀切”式政策引发市场失衡，促进合作共赢与系统稳定。

此外，政府在数据流通中扮演关键的政策引导与监管角色，未来研究可进一步将政府因素纳入博弈框架，探讨政策补贴与监管措施对市场均衡的影响。同时，区块链赋能虽增强了数据可信度，但其透明性亦带来隐私与合规挑战。因此，未来可引入政府角色以及进一步完善隐私保护机制，以实现安全、高效、可信的数据要素流通体系，为数字经济的高质量发展提供制度与技术支撑。

参考文献：

[1] 张妍, 赵宇翔. 面向数据要素价值共创的可信数据空间: 挑战、行动路径、学科实践[J]. 图书馆建设, 2025(2): 43-48.
ZHANG Y, ZHAO Y X. Trusted dataspace for data element value co-creation: challenges, action pathways and disciplinary practices[J]. Library Development, 2025(2): 43-48.

[2] 林怡静,高志鹏. 数据遗忘：数据要素流通的最后一道防线[J]. 中国计算机学会通讯,2025,21:10-14.
LIN Y J, GAO Z P. Data forgetting: the last line of defence for the circulation of data elements[J]. Communications of CCF, 2025,21:10-14.

[3] 黄科满, 杜小勇. 数据治理价值链模型与数据基础制度分析[J]. 大数据, 2022, 8(4): 3-16.
HUANG K M, DU X Y. Value chain model of data governance and its application on data governance regulation analysis[J]. Big Data Research, 2022, 8(4): 3-16.

[4] 刘学博, 户保田, 陈科海, 等. 大模型关键技术与未来发展方向: 从ChatGPT谈起[J]. 中国科学基金, 2023, 37(5): 758-766.
LIU X B, HU B T, CHEN K H, et al. Key technologies and future development directions of large language models: insights from ChatGPT[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37(5): 758-766.

[5] ALBER D A, YANG Z, ALYAKIN A, et al. Medical large language models are vulnerable to data-poisoning attacks[J]. Nature Medicine, 2025, 31(2): 618-626.

[6] 李凤华, 李晖, 牛犇, 等. 数据要素流通与安全的研究范畴与未来发展趋势[J]. 通信学报, 2024, 45(5): 1-11.
LI F H, LI H, NIU B, et al. Research category and future development trend of data elements circulation and security[J]. Journal on Communications, 2024, 45(5): 1-11.

[7] ZHANG J, BI Y, CHENG M, et al. A survey on data markets[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2411.07267, 2024.

[8] FERNANDEZ R C, SUBRAMANIAM P, FRANKLIN M J. Data market platforms: Trading data assets to solve data problems[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2002.01047, 2020.

[9] KOUTSOS V, PAPADOPOULOS D, CHATZOPOULOS D, et al. Agora: a privacy-aware data marketplace[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2022, 19(6): 3728-3740.

[10] KENNEDY J, SUBRAMANIAM P, GALHOTRA S, et al. Revisiting online data markets in 2022: a seller and buyer perspective[J]. ACM SIGMOD Record, 2022, 51(3): 30-37.

[11] 国家数据局. 可信数据空间发展行动计划（2024—2028年）[R].2024.
National Data Administration. Development action plan for trusted data spaces (2024-2028)[R]. 2024.

[12] 周凯, 陈福, 鲁添元, 等. 区块链共识算法综述[J]. 计算机科学,2025, 1-25.
ZHOU K, CHEN F, LU T Y, et al. Review of blockchain consensus algorithm[J]. Computer Science, 2025,1-25.

[13] 沈蒙, 车征, 祝烈煌, 等. 区块链数字货币交易的匿名性: 保护与对抗[J]. 计算机学报, 2023, 46(1): 125-146.
SHEN M, CHE Z, ZHU L H, et al. Anonymity in blockchain digital currency transactions: protection and confrontation[J]. Chinese Journal of Computers, 2023, 46(1): 125-146.

[14] SALMAN T, ZOLANVARI M, ERBAD A, et al. Security services using blockchains: a state of the art survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 858-880.

[15] GEORGIOS D. The law of blockchain[J]. Washington Law Review, 2020, 95(3): 1117-1192.

[16] NEISSE R, STERI G, NAI-FOVINO I. A blockchain-based approach for data accountability and provenance tracking[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Availability, Reliability and Security. New York: ACM Press, 2017: 1-10.

[17] 白银. 技术与制度协同: 数据可信流通治理因应之策[J]. 图书馆建设, 2025(4): 120-134.
BAI Y. Coordination of technology and institutions: governance strategies for trusted data circulation[J]. Library Development, 2025(4): 120-134.

[18] BAJOUDAH S, DONG C Y, MISSIER P. Toward a decentralized, trustless marketplace for brokered IoT data trading using blockchain[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain). Piscataway: IEEE Press, 2019: 339-346.

[19] 杨东, 白银. 数据“利益束”: 数据权益制度新论[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2024, 77(1): 65-77.
YANG D, BAI Y. “Bundle of interests” on data: a new theory on data rights and interests system[J]. Wuhan University Journal (Philosophy & Social Science), 2024, 77(1): 65-77.

[20] 刘业政, 宗兰芳, 周芦娟, 等. 数据要素流通交易的可信指标及测度方法[J]. 管理评论, 2024, 36(12): 26-36.
LIU Y Z, ZONG L F, ZHOU L J, et al. Trustworthy indicators and measurement methods for the circulation and trading of data elements[J]. Management Review, 2024, 36(12): 26-36.

[21] 刘明达, 陈左宁, 拾以娟, 等. 区块链在数据安全领域的研究进展[J]. 计算机学报, 2021, 44(1): 1-27.
LIU M D, CHEN Z N, SHE Y J, et al. Research progress of blockchain in the field of data security[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(1): 1-27.

[22] MAHER M, KHAN I, PRIKSHAT V. Monetisation of digital health data through a GDPR-compliant and blockchain enabled digital health data marketplace: a proposal to enhance patient’s engagement with health data repositories[J]. International Journal of Information Management Data Insights, 2023, 3(1): 100159.

[23] TOY T, LANGERMAN J. A design framework for a blockchain-based open market platform of enriched card-based transactional data for big data analytics and open banking[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Data Science, Technology and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 583-589.

[24] 王雪, 夏义堃, 裴雷. 国内外数据要素市场研究进展: 系统性文献综述[J]. 图书情报知识, 2023, 40(6): 117-128.

WANG X, XIA Y K, PEI L. Research progress in data element markets at home and abroad: a systematic literature review[J]. Documentation, Information & Knowledge, 2023, 40(6): 117-128.

[25] 江东, 张小伟, 袁野. 基于数据纯度的模型博弈定价方法[J]. 数据与计算发展前沿, 2023, 5(5): 63-73.
JIANG D, ZHANG X W, YUAN Y. A model game pricing method based on data purity[J]. Frontiers of Data & Computing, 2023, 5(5): 63-73.

[26] 徐恪, 凌思通, 李琦, 等. 基于区块链的网络安全体系结构与关键技术研究进展[J]. 计算机学报, 2021, 44(1): 55-83.
XU K, LING S T, LI Q, et al. Research progress of network security architecture and key technologies based on blockchain[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(1): 55-83.

[27] 莫梓嘉, 高志鹏, 杨杨, 等. 面向车联网数据隐私保护的高效分布式模型共享策略[J]. 通信学报, 2022, 43(4): 83-94.
MO Z J, GAO Z P, YANG Y, et al. Efficient distributed model sharing strategy for data privacy protection in Internet of vehicles[J]. Journal on Communications, 2022, 43(4): 83-94.

[28] 张宝, 田有亮, 高胜. 基于博弈论抗共谋攻击的全局随机化共识算法[J]. 网络与信息安全学报, 2022, 8(4): 98-109.
ZHANG B, TIAN Y L, GAO S. Global randomized consensus algorithm resist collusion attack based on game theory[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2022, 8(4): 98-109.

[29] 李剑, 易兰, 肖瑶. 信息不对称下基于区块链驱动的供应链减排信息共享机制研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(10): 131-139.
LI J, YI L, XIAO Y. Research on information sharing mechanism of emission reduction in supply chain based on blockchain under information asymmetry[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(10): 131-139.

[30] LI K P, LEE J Y, GHAREHGOZLI A. Blockchain in food supply chains: a literature review and synthesis analysis of platforms, benefits and challenges[J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(11): 3527-3546.

[31] 孙建军, 李阳. 信息资源管理学科视角下的数据要素研究[J]. 图书情报知识, 2024, 41(2): 6-12.
SUN J J, LI Y. Research on data elements from the perspective of the discipline of information resources management[J]. Documentation, Information & Knowledge, 2024, 41(2): 6-12.

[32] SUN H, XIAO M J, XU Y, et al. Privacy-preserving stable crowdsensing data trading for unknown market[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-10.

[33] CHAPMAN A, SIMPERL E, KOESTEN L, et al. Dataset search: a survey[J]. The VLDB Journal, 2020, 29(1): 251-272.

[34] 李恒, 李凤华, 史欣怡, 等. 面向数据跨域安全流通的访问控制研究综述[J]. 通信学报, 2025, 46(4): 238-254.
LI H, LI F H, SHI X Y, et al. Research on access control for secure cross-domain data circulation[J]. Journal on Communications, 2025, 46(4): 238-254.

[35] LAWRENZ S, SHARMA P, RAUSCH A. Blockchain technology as an approach for data marketplaces[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Blockchain Technology. New York: ACM Press, 2019: 55-59.

[36] 康朕玮, 李静, 朱建明. 专利交易中区块链应用的三方演化博弈分析[J]. 计算机科学, 2024, 51(10): 432-441.
KANG Z W, LI J, ZHU J M. Tripartite evolutionary game analysis of blockchain applications in patent transactions[J]. Computer Science, 2024, 51(10): 432-441.

[37] 李跃文, 王一祎, 章瑞. 基于三方演化博弈的数据质量优化策略研究[J]. 价格理论与实践, 2024(7): 109-114.
LI Y W, WANG Y Y, ZHANG R. Research on data quality optimization strategy based on tripartite evolutionary game theory[J]. Price (Theory & Practice), 2024(7): 109-114.

[38] 谢雪梅, 段莹莹. 基于三方演化博弈的数据交易市场治理研究[J]. 科技和产业, 2025, 25(1): 315-324.
XIE X M, DUAN Y Y. Research on data trading market governance based on tripartite evolutionary game theory[J]. Science Technology and Industry, 2025, 25(1): 315-324.

[39] 孙嘉睿, 安小米. 开放政府数据质量评估指标体系研究[J]. 情报理论与实践, 2023, 46(6): 94-100, 78.
SUN J R, AN X M. Research on open government data quality evaluation index system[J]. Information Studies (Theory & Application), 2023, 46(6): 94-100, 78.

[40] HOEREN T. Big data and the legal framework for data quality[J]. International Journal of Law and Information Technology, 2017, 25(1): 26-37.

[41] CAI L, ZHU Y Y. The challenges of data quality and data quality assessment in the big data era[J]. Data Science Journal, 2015, 14: 2.

[42] 李振宇, 丁勇, 易晨, 等. 面向数据要素流通的区块链数据加速交换方法[J]. 计算机研究与发展, 2024, 61(10): 2554-2569.
LI Z Y, DING Y, YI C, et al. A blockchain data acceleration exchange method for data element circulation[J]. Journal of Computer Research and Development, 2024, 61(10): 2554-2569.

[43] 张学旺, 黎志鸿, 林金朝. 基于公平盲签名和分级加密的联盟链隐私保护方案[J]. 通信学报, 2022, 43(8): 131-141.
ZHANG X W, LI Z H, LIN J Z. Privacy protection scheme based on fair blind signature and hierarchical encryption for consortium blockchain[J]. Journal on Communications, 2022, 43(8): 131-141.

[44] 唐长乐, 张晓娟. 建立数字信任: 数据要素可信流通的信任基础、内在逻辑与实现框架[J]. 图书馆论坛, 2025, 45(9): 136-145.
TANG C L, ZHANG X J. Building digital trust: trust foundation, intrinsic logic, and implementation framework for the circulation of trusted data elements[J]. Library Tribune, 2025, 45(9): 136-145.

[45] 欧阳丽炜, 王帅, 袁勇, 等. 智能合约: 架构及进展[J]. 自动化学报, 2019, 45(3): 445-457.
OUYANG L W, WANG S, YUAN Y, et al. Smart contracts: architecture and research progresses[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(3): 445-457.

[46] 王群, 李馥娟, 倪雪莉, 等. 区块链共识算法及应用研究[J]. 计算机科学与探索, 2022, 16(6): 1214-1242.
WANG Q, LI F J, NI X L, et al. Research on blockchain consensus algorithm and its application[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2022, 16(6): 1214-1242.

[47] 江沛佩, 王骞, 陈艳姣, 等. 区块链网络安全保障: 攻击与防御[J]. 通信学报, 2021, 42(1): 151-162.
JIANG P P, WANG Q, CHEN Y J, et al. Securing guarantee of the blockchain network: attacks and countermeasures[J]. Journal on Communications, 2021, 42(1): 151-162.

[48] 王蓓蓓, 王骐鑫, 李雅超, 等. 区块链环境下考虑信用的需求响应资源交易机制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 30-38.

WANG B B, WANG Q X, LI Y C, et al. Transaction mechanism of demand response resource considering credit in blockchain environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 30-38.

[49] 张川, 王子豪, 梁晋文, 等. 面向跨联盟链的隐私保护数据要素交易审计方案[J]. 计算机研究与发展, 2024, 61(10): 2540-2553.
ZHANG C, WANG Z H, LIANG J W, et al. A privacy-preserving data element trading audit scheme for cross-consortium-blockchains[J]. Journal of Computer Research and Development, 2024, 61(10): 2540-2553.

[50] OMAR I A, HASAN H R, JAYARAMAN R, et al. Implementing decentralized auctions using blockchain smart contracts[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 168: 120786.

[51] 张丽丽, 章政. 基于多主体演化博弈均衡模型的数据要素的进场交易与可信流通体系构建研究[J]. 计算机科学, 2025, 52(3): 127-136.
ZHANG L L, ZHANG Z. Study on data entry transaction and trusted circulation system construction based on multi-agent evolutionary game equilibrium model[J]. Computer Science, 2025, 52(3): 127-136.

[52] 朱立龙, 荣俊美, 张思意. 政府奖惩机制下药品安全质量监管三方演化博弈及仿真分析[J]. 中国管理科学, 2021, 29(11): 55-67.
ZHU L L, RONG J M, ZHANG S Y. Three-party evolutionary game and simulation analysis of drug quality supervision under the government reward and punishment mechanism[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(11): 55-67.

[53] 朱立龙, 荣俊美. “互联网+医疗健康”背景下考虑患者反馈机制的药品质量监管策略研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(5): 122-135.
ZHU L L, RONG J M. Drug quality supervision strategy considering patient feedback mechanism under the background of “Internet+medical health”[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(5): 122-135.

[54] 单志广, 张延强, 谭敏, 等. 区块链服务网络的构建机理与技术实现[J]. 软件学报, 2023, 34(5): 2170-2180.
SHAN Z G, ZHANG Y Q, TAN M, et al. Construction mechanism and technical implementation of blockchain-based service network[J]. Journal of Software, 2023, 34(5): 2170-2180.

[55] 中国信息通信研究院. 区块链白皮书(2023)[R]. 2023.
China Academy of Information and Communications Technology. Blockchain white paper (2023) [R].2023.

[56] 牟欣. 区块链技术对供应链金融的优化效应研究: 基于多案例分析[J]. 金融, 2023(1): 213-221.
MU X. Research on the optimization effect of blockchain technology on supply chain finance: based on multi cases analysis[J]. Finance, 2023(1): 213-221.

[57] 中国信息通信研究院. 数据要素化治理实践白皮书（2022）[R].2022.
China Academy of information and Communications Technology. White paper on data factorization governance practices (2022) [R]. 2022.

[58] KING S, NADAL S. Ppcoin: peer-to-peer crypto-currency with proof-of-stake[J]. Computer Science, 2012: 42319203.

[59] 高昊昱, 曹春杰, 白伊瑞, 等. 区块链安全监管研究综述[J]. 通信学报, 2025, 46(4): 49-70.
GAO H Y, CAO C J, BAI Y R, et al. Review of blockchain security regulation[J]. Journal on Communications, 2025, 46(4): 49-70.

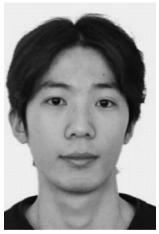
[60] 中央网信办信息化发展局. 中国区块链创新应用发展报告（2023）[R]. 2023.
Office of The Central Cyberspace Affairs Commission. China blockchain innovation application development report（2023）[R]. 2023.

[61] PATRO S, SHARDA C A M K. A Study on the impact of blockchain on international trade and Financial Business[J]. Universal Journal of Accounting and Finance, 2022, 10(1): 102-112.

[62] 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.
SUN G Q, XIE Y F. Blockchain technology, supply chain networks and data sharing: based on the perspective of evolutionary game[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(12): 149-162.

[作者简介]

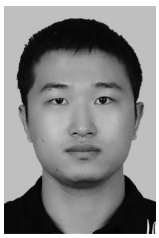
陈福（1973– ），男，辽宁朝阳人，博士，中央财经大学教授、博士生导师，主要研究方向为下一代互联网、数据科学等。



周凯（1995– ），男，山东日照人，中央财经大学博士生，主要研究方向为区块链与金融安全、数据安全与隐私保护。

朱建明（1965– ），男，山西太原人，博士，中央财经大学教授、博士生导师，主要研究方向为信息安全、区块链、金融科技等。

江航宇（1998– ），男，广东湛江人，中央财经大学博士生，主要研究方向为区块链与隐私保护、金融科技等。



杨佳鑫（1994– ），男，河南新郑人，中央财经大学博士生，主要研究方向为数字经济、数据资产定价等。