



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

数据市场制度建设的理论建模和动态分析

商希雪, 韩海庭, 朱郑州, 屈秀伟

引用本文

商希雪, 韩海庭, 朱郑州, 屈秀伟. [数据市场制度建设的理论建模和动态分析](#)[J]. 计算机科学, 2025, 52(8): 17-28.

SHANG Xixue, HAN Haiting, ZHU Zhengzhou, QU Xiuwei. [Theoretical Modeling and Dynamic Analysis of Institutional Construction in Data Markets](#) [J]. Computer Science, 2025, 52(8): 17-28.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于博弈论的混合粒子群的多无人机任务分配](#)

Multi-UAV Task Assignment Based on Hybrid Particle Swarms Algorithm with Game Theory
计算机科学, 2025, 52(7): 255-261. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240400079>

[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](#)

Study on Data Entry Transaction and Trusted Circulation System Construction Based on Multi-agent Evolutionary Game Equilibrium Model
计算机科学, 2025, 52(3): 127-136. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240200003>

[专利交易中区块链应用的三方演化博弈分析](#)

Tripartite Evolutionary Game Analysis of Blockchain Applications in Patent Transactions
计算机科学, 2024, 51(10): 432-441. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230800116>

[基于双默克尔树区块结构的交易粒度联盟链修改方案](#)

Transaction Granularity Modifiable Consortium Blockchain Scheme Based on Dual Merkel Trees Block Structure
计算机科学, 2024, 51(9): 408-415. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.231000054>

[基于知识图谱的家政服务课程推荐融合模型](#)

Fusion Model of Housekeeping Service Course Recommendation Based on Knowledge Graph
计算机科学, 2024, 51(2): 47-54. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221200149>

数据市场制度建设的理论建模和动态分析

商希雪¹ 韩海庭² 朱郑州³ 屈秀伟³

1 中国政法大学刑事司法学院 北京 100088

2 哥本哈根大学理学院 哥本哈根 FC1958

3 北京大学软件与微电子学院 北京 100871

(shangxixue@126.com)

摘要 在人工智能等技术涌现和飞速发展的新时期,数据已成为企业和社会的核心资产,但数据市场治理始终面临经济激励不足、科学量化评估难和隐蔽性侵权多等挑战。对此,基于演化博弈理论构建了包括数据提供方、需求方和监管平台在内的三方博弈框架。通过分析企业数据开发能力、公共监管强度,以及参与者不同策略选择等对数据市场演化的动态影响发现:提高企业数据开发能力是激活市场活力、提高社会福利的根本办法,也是导致企业违规行为的诱因之一;公共监管强度的增加可以规范市场秩序,但也可能会抑制部分企业的创新实践。通过理论求解和数值仿真,不仅揭示了监管效力、开发能力等要素的非线性特征,也为科学量化执法的实现提供了重要依据。通过“激励-约束-补偿”三位一体的动态监管机制和分析模型,可以有效预测市场演化特征,结合市场短期、中期和长期发展目标,改变“激励-约束-补偿”相关参数设定,使政策制定更科学,政策强度更精确。

关键词: 数据治理; 机制设计; 演化博弈; 数据市场

中图分类号 TP301.6; F062.5

Theoretical Modeling and Dynamic Analysis of Institutional Construction in Data Markets

SHANG Xixue¹, HAN Haiting², ZHU Zhengzhou³ and QU Xiuwei³

1 School of Criminal Justice, China University of Political Science and Law, Beijing 100088, China

2 School of Science, University of Copenhagen, Copenhagen FC1958, Denmark

3 School of Software and Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract In the new era marked by the emergence and rapid development of technologies like artificial intelligence, data has become a core asset for enterprises and society. However, data market governance continues to face challenges such as insufficient economic incentives, difficulties in scientific quantification and evaluation, and prevalent covert infringements. Based on evolutionary game theory, this study constructs a tripartite game framework encompassing data providers, demanders, and regulatory platforms. Through the dynamic impact of factors including enterprise data development capabilities, public regulatory intensity, and participants' strategic choices on the evolution of data markets, it finds that enhancing enterprise data development capabilities is fundamental to activating market vitality and improving social welfare, yet it is also one of the catalysts for corporate violations; increasing public regulatory intensity can standardize market order but may simultaneously suppress innovative practices among certain enterprises. Through theoretical solutions and numerical simulations, the study not only reveals the nonlinear characteristics of factors such as regulatory efficacy and development capabilities, but also provides a critical basis for achieving scientifically quantifiable law enforcement. By implementing a dynamic regulatory mechanism and analytical model featuring a “incentive-constraint-compensation” trinity approach, market evolution patterns can be effectively predicted. Aligning with short-, medium-, and long-term market development goals, adjusting parameter settings within this “incentive-constraint-compensation” framework will enhance the scientific rigor of policy formulation and the precision of policy intensity.

Keywords Data governance, Mechanism design, Evolutionary game, Data markets

1 引言

当前,数字经济的治理面临法治保障的困境:(1)在制度

层面,数字经济治理的基础立法和领域立法供给不足,难以满足新业态、新领域的法律规制需求;(2)在治理层面,单向度监管模式同新业态发展规律脱节,难以适应数字经济时代的治

到稿日期:2025-04-07 返修日期:2025-06-13

基金项目:中国政法大学青年教师学术创新团队支持计划“联合国打击网络犯罪公约刑事一体化研究”(25CXTD09)

This work was supported by the Program for Young Innovative Research Team in China University of Political Science and Law Under the Project “United Nations Convention on Cybercrime: Integrated Criminal Research”(25CXTD09).

通信作者:屈秀伟(h.han@insscd.org)

理效能需求^[1]。随着计算机科学、人工智能、大数据等信息通信技术的快速发展,计算能力、算法模型及其应用领域得到了显著拓展。“普适计算”概念的提出,突破了人类认知与生理能力的局限,通过多样化的方法、模型和技术手段,为复杂问题的分析与解决提供了系统性支持,同时也增强了人类应对复杂问题的信心与能力^[2]。计算科学不仅为科学研究提供了严格定义的语言表示体系,还为模糊评估与社会关系的量化分析提供了方法论支持。此外,计算思维的普及使得人类行为能够通过计算视角来解读^[3]。通过计算工具进行模拟与实验,可以推导出社会规则制定的最优策略或干预条件,将社会治理问题转化为工程化的系统设计与测试问题。该方式显著提升了社会治理的预测能力与可控性。结合计算思维深入研究数据市场治理机制及其存在的问题,对于准确描述与评估数据市场发展趋势,为市场治理提供技术支撑具有重要意义。

数据市场治理与数字经济的发展密切相关。作为数字经济的核心资产,数据在企业创新、竞争力提升及社会可持续发展中扮演着关键角色。有效的数据市场治理和制度设计能够优化数据资源配置,促进数据共享与协作,推动数字经济的健康发展。随着数据技术的飞速发展,数据市场的规模与复杂性持续增加,数据治理成为理论与实践中的双重难题。深入研究数据市场治理机制及其问题,可以为制度设计提供科学依据,助力应对数据时代的挑战,促进数字经济的可持续发展。

基于上述背景,本研究采用演化博弈论(Evolutionary Game Theory, EGT)作为分析工具,构建了数据提供者、数据需求者与监管平台三方参与的博弈模型,旨在探讨数据市场治理中的关键问题。具体而言,分析了企业数据开发能力、国家监管力度及惩罚措施对数据市场参与者行为及其经济绩效的影响,揭示了这些因素在数据市场中的作用机制。

与传统研究方法相比,基于EGT的研究方法能够更准确地刻画数据市场各方的战略选择与行为演化过程,为数据市场治理的内在机制提供新的理论视角。此外,进化博弈模型通过构建理论框架与模拟实验,避免了真实数据获取的限制,能够有效呈现参与者的行为模式、绩效表现及演化路径,从而显著提升新兴市场的治理能力与水平。本文期望能够深入理解数据市场的运行机制,并对数据市场参与者之间的互动关系进行建模分析。这不仅有助于适应计算时代的发展需求,还能为数据市场制度措施的制定提供理论支持与实践指导,从而促进数字经济的健康发展,最大化数据资产的价值。

2 相关工作

2.1 数据要素及其市场的特点与发展

数字经济的快速增长使数据成为宝贵的资产,其价值分配需要有效的经济机制来支撑^[4]。在美国、欧洲和中国等主要经济体,数据交易市场中的利益分配正逐渐受到立法的明确保护^[5]。各国正在形成一种政策共识,以激活数据要素的潜力,重点关注数据的“收集、访问和利用”。然而,与传统商品、资源和资产不同,其具有虚拟性^[6]、非排他性^[7]、非竞争性^[7]、可再生性及异构性^[8]等特征。这些特性对基于明确产权、合同约束和开放市场的传统交易系统提出了颠覆性挑战,导致数据交易市场的发展进程受阻。

2.2 数据流通市场的制度现状与治理挑战

数据流通市场面临制度设计和技术壁垒的双重制约。数据要素的所有权制度滞后是核心问题之一^[10-11]。当前,在法律规范体系下,获取数据存在极高的合规成本,双重成本极大阻碍了企业等行业实体投资和使用数据^[12]。数据要素参与收入分配涉及不同所有者之间的利益分配^[13],但产权规则和市场主体行为规范的不明确,导致数据收益分配的主体和边界模糊^[14-15]。

数据定价机制不成熟^[16-17],使卖方在交易中占优,可以对其数据收取较高的价格^[18]。当前的数据交易定价模式(如查询协商定价、API点击收费等)难以准确反映数据的经济价值^[19]。数据的价值与其多样性和质量密切相关,而非单纯依赖数量^[20],这导致数据要素的市场价格与其实际经济贡献之间存在偏差。也因此,数据收入分配的结构性失衡问题突出,包括数据提供者之间的利益分配不均、个人数据权利保护不足等^[21],加剧了市场的不公平性和柠檬市场。

个人缺乏直接参与数据交易收入分配的机制支撑^[22],平台对用户数据的聚集和积累进一步加剧了数据收入分配的不平等^[23]。数据的可替代性极大削弱了其唯一性和排他性,催生了数据垄断,损害了市场弱势群体(尤其是个人)的正当权益^[24]。数据要素的生产涉及劳动要素和知识要素,而这些要素往往以资本要素为主导。由资本引致的垄断可能导致数据控制者获取超额利润,从而损害数据市场和整个经济的增长^[25]。在此背景下,Cong等^[26]和Yu等^[27]设计了一系列旨在激励数据共享和实现数据利益公平分配的算法和举措。

上述挑战阻碍了数据市场的扩大和发展,还可能加剧数据垄断和市场力量的形成,阻碍市场有序竞争和科技创新^[28]。“数据所有权+数据定价+数据流通”的简单化模式缺乏综合治理能力,无法促进数据要素收入分配的公平和效率^[29]。

2.3 演化博弈论的引入及其优势

当前,全球数据市场仍处于发展初期,尚缺乏足够数据来支撑数据治理的实证分析和研讨。演化博弈论(Evolutionary Game Theory, EGT)作为一个经典的数学分析框架^[30],为研究数据市场治理提供了有力的理论工具。EGT通过模拟参与者的策略选择与行为演化,能够揭示市场动态规律,为政策设计提供科学依据。近年来,EGT在公共资源分配^[31]、知识联盟行为约束等领域取得了显著成果,其适应性和灵活性使其在数据市场分析中具有独特优势^[32]。

与依赖固定结构和效用假设的传统经济模型不同,EGT提供了灵活的框架来模拟不同条件下的市场动态^[33]。通过调整初始参数,模拟参与者行为的演变,从而揭示市场规律,以指导市场优化和政策设计。欧洲法律研究所(ELI)将数据市场的主要参与者分为数据提供者、数据需求者和监管机构,为分析数据市场动态和治理提供了基础模型^[34]。Dong等^[35]提出了三方进化博弈模型,用于分析数字政府基础设施建设中的数据共享策略,强调了数据安全与质量监管的重要性。Gao等^[36]通过构建数据提供者、平台与需求者的三方博弈模型,揭示了数据安全与规范治理对系统稳定性的关键作用。此外,Panagopoulos等^[37]探讨了医疗数据共享中的治理挑战,提出了基于货币化的激励机制以促进数据共享。这些研

究表明,EGT 应用于模拟数据市场参与者的行为演化,为市场治理提供理论支持与实践指导是可行的。

此外,Shang 等^[38]提出尽管用户对信息访问和披露具有绝对控制权利,但在数据需求者和监管者之间的博弈框架下,数据保护监管强度的演变对市场发展具有不同的影响。监管的复杂性为谈判和贸易提供了空间和机会^[39],使实践中对数据提供者的权利(包括隐私权)进行定价成为可能^[40],也为经济分析提供了客观依据。

现有研究在数据要素的特点、数据交易市场的挑战以及数据流动不畅的归因分析方面取得了显著进展,并充分定义了相应的治理活动:(1)保障数据安全和公民隐私^[41],防止消费者滥用与泄露数据^[42-43];(2)促进合法且高效的数据流通和交易^[44-45],释放数据的经济价值;(3)维护市场秩序,防止垄断和不正当竞争,保护消费者权益^[46];(4)通过公平的收入分配机制激励数据创造和利益分享^[47],构建公平、高效、安全、合法、可持续的数据市场体系。现有研究仍存在以下不足:

(1)理论框架的局限性。现有研究多基于传统经济学模型,难以全面刻画数据市场的动态演化特征,尤其是在参与者策略调整和行为学习方面的研究较为匮乏。

(2)实证数据的缺乏。由于数据市场仍处于发展初期,相关实证数据不足,因此许多研究局限于概念探讨和理论构建,缺乏计量分析方法对相关关系进行度量。

(3)综合治理机制的缺失。现有研究多聚焦于单一问题(如数据定价或数据权属),缺乏对数据市场综合治理机制的系统性探讨。

针对上述不足,本文拟采用进化博弈论(EGT)构建数据市场的三方博弈模型,涵盖数据提供者、数据需求者和监管平台,以揭示数据市场治理的内在机制。通过模拟不同参数条件下的市场动态,旨在为数据市场的优化设计和政策制定提供理论依据,同时为数据要素的公平分配和高效利用提供实践指导。下一步,将重点分析企业数据开发能力、国家监管力度及惩罚措施对数据市场参与者行为及其经济绩效的影响,以期数据市场的健康发展提供新的视角和解决方案。

3 研究方法

演化博弈论(EGT)的核心在于对有限理性主体间的交互行为进行动态建模,通过分析策略调整与收益变化的关联性,揭示群体行为的演化规律。群体中的个体通过反复交互形成稳定的行为模式,即演化稳定策略(Evolutionarily Stable Strategy, ESS)^[48]。ESS 是一种策略均衡状态,若被群体广泛采纳,则能抵御其他策略的入侵。在此基础上,Young^[49-50]引入随机稳定性理论,证明在具有局部交互和自适应学习的系统中,微小随机扰动可决定长期均衡状态的选择。这一理论为分析复杂市场动态提供了重要工具。

在数据市场场景中,市场的参与者行为具有显著的动态性与交互性,传统静态博弈模型难以刻画其长期演化特征。EGT 的适应性体现在 3 个方面:

(1)动态策略调整。参与者(如数据提供者、需求者与监管者)根据相对收益变化调整策略(如定价、共享或合规行为),形成动态博弈过程^[51]。

(2)有限理性假设。与传统博弈论不同,EGT 允许参与

者通过模仿或试错学习改进策略,更贴近真实市场行为^[52]。

(3)系统均衡分析。通过初始策略分布、收益结构及适应机制的建模,可预测系统向均衡态或周期态的演化路径。

通过引入 EGT 模型,本研究旨在揭示以下问题:

(1)数据市场参与者的策略演化路径如何受初始条件与外部干预的影响?

(2)监管政策(如惩罚力度)与市场机制(如数据定价)如何协同作用,以优化市场效率?

(3)如何通过参数调控,引导系统向公平、稳定的均衡状态演化?

3.1 博弈主体与策略空间

本研究基于 EGT 框架,构建包含数据提供者(Supply Side)、数据需求者(Demand Side)与监管平台(Regulatory Platform)的三方博弈模型。三者的策略选择相互影响,共同决定数据市场的均衡状态。数据提供者可选择“真实共享”(概率为 $x(t)$)或“虚假共享”(概率为 $1-x(t)$)策略;数据需求者可选择“合规运营”(概率为 $y(t)$)或“不合规运营”(概率为 $1-y(t)$)策略;监管平台则可选择“严格监管”(概率为 $z(t)$)或“宽松监管”(概率为 $1-z(t)$)策略。所有概率均为时间 t 的函数,满足 $0 \leq x(t), y(t), z(t) \leq 1$ 。为简化模型复杂性并确保逻辑一致性,提出了以下核心假设:

(1)隐私货币化:数据提供者的隐私泄露可通过经济补偿量化。例如,当数据需求者违规操作时,对数据提供者的隐私期待 L_p 的损失可通过监管平台的补偿机制部分挽回(补偿系数为 λ)。一般来说,包括个人偏好(如政治观点、购物行为和收入)、联系信息(姓名、地址等)、社交媒体数据在内的个人数据的价格不超过 20 欧元^[53]。

(2)可转移效用:所有参与者的行为与收益均以货币价值衡量,且货币效用具有同质性。用 L_p 表示隐私期待, E_p 表示数据需求者对数据提供者的补贴支付。当侵权事件发生时,数据提供者的基础收益为 $E_p - L_p$,这表明来源不同的货币化效用是可加的(可减的)。这对所有场景的经济分析都适用。

(3)数据能力保证:数据消费是指大数据信息挖掘,而非直接数据支持决策。消费者通过对数据的正确加工和处理,蒸馏出有用的知识和洞见,虚假数据无法产生有效的信息增益。此处假设数据消费者具有正确的数据清洗和挖掘技术,不会因脏数据和噪声影响产生负信息。因此,数据消费者仅能从数据中获取非负的经济价值,虚假数据无法为数据消费者创造负经济价值。

3.2 参数定义与收益结构

数据提供者的数据价值是整个研究的基础。Becker-DeGroot-Marschak (BDM) 方法和 Take-or-Leave-It (TIOLI) offers 等机制通常被用于评估个人数据的价格,但数据提供者的隐私期待为其私有信息。另外,用户也不知道自己的数据何时、为何或如何被收集,及其潜在的后果如何^[54]。这种信息的不对称或不完全,表明了 L_p 和 E_p 之间的区别,其中 L_p 通常超过 E_p 。在匿名或无法验证的环境中,数据提供者可能在不披露真实个人数据的情况下从事欺骗行为以获取利益,避免了隐私泄露。这种欺骗行为可能导致两种结果:(1)将数据需求者的利润减少到零或负值水平;(2)如果发现违规行为,将受到处罚和赔偿。将监管机构对提供虚假数据的提供

者处以罚款(S_p)作为一项标准的执法措施,可根据执法强度(a)进行调整,从而产生有效的罚款(S_p)。在这种情况下,供应商的净收益为 $E_p - aS_p$ 。

对数据需求者来说,从数据中获得的主要利益是市场活动的基础。虽然有些公司通过宣传“分享数据可以增强应用体验”等策略来避免为数据付费,但更有远见的企业选择为数据付费,以确保明确的所有权并降低法律风险。数据需求者同时承担构建基础设施和分析数据以产生见解和经济效益(R_d)的成本(C_d)。在正常情况下,付费企业的利润为 $R_d - C_d - E_p$ 。然而,当数据提供者提供虚假数据时, R_d 降为零。数据需求者还可能通过参与未经授权的再分发、超出预期目的的分析、疏忽等行为泄露数据来利用数据。2005年到2014年的历史数据显示,欧洲发生了229起数据泄露事件,泄露了2.27亿条个人记录,即每100人43条记录^[55]。在这些事件中,57%涉及组织错误或内部人员滥用,超过了外部黑客攻击事件(41%)。

监管平台在确保数据市场的稳定性和可持续性方面发挥着至关重要的作用^[56]。作为政府或非营利实体的运作行为,监管活动可以使用经济学进行有效性分析。适用严格的法规涉及执行成本(C_g),但这些措施也会产生威慑作用,在既定的监管框架下产生固定收益(R_g)。但当威慑失效并发生不当行为时, R_g 降至零,平台遭受声誉损失或付出社会成本^[57](虚假数据传播造成的社会损失表示为 L_{g1} ,不合规使用数据造成的社会损失表示为 L_{g2})。监管措施主要涉及罚款和赔偿,直接影响参与者的报酬。例如,对数据需求者的罚款(S_d)是根据一般市场效益水平进行校准的,并根据执法强度(a)进行调整,从而产生 aS_d 的罚款。罚款的一部分(λaS_d)用于补偿数据提供者的隐私泄露,而其余部分 $(1-\lambda)aS_d$ 则用于抵消监管机构的执法成本。 λ 和 a 都小于1,反映了对数据提供商非法侵害的比例补偿和执行机制。这一监管框架实现了一种平衡,既提高了市场效率,又确保了参与者的问责制。

为清楚地理解和应用数学形式化语言的描述,表1列出了本文所使用的参数符号和意义,三者的收益支付矩阵如表2所列。

表1 参数符号及意义说明

Table 1 Parameter symbols and meanings explanation

符号	意义说明
E_p	数据需求者对数据提供者给予的补贴
L_p	数据需求者不合规经营对分享真实数据的数据提供者造成的损失
R_d	数据需求者利用真实数据获得的收益
C_d	数据需求者固有经营成本
U	数据需求者违规经营,滥用数据提供者的真实数据,获得违规收益
L_d	数据需求者合规经营使用虚假数据造成的损失
a	监管平台监管强度
C_g	监管平台严格监管时的成本
L_{g1}	监管平台放任虚假信息传播造成的声誉损失
L_{g2}	监管平台放任数据违规使用造成的声誉损失
R_g	监管平台严格监管收益
λ	隐私侵害补偿系数, $\gamma \in (0,1)$
S_d	监管平台强监管对违规经营的数据需求者处罚金
β	脏数据补偿系数, $\beta \in (0,1)$
S_p	监管平台强监管对分享虚假信息的数据提供者处罚金
c	数据需求者违规经营,附加收益系数

表2 收益支付矩阵

Table 2 Payoff function matrix

数据提供者	数据需求者	监管平台	
		严格监管(z)	宽松监管($1-z$)
真实分享(x)	合规经营(y)	$\begin{bmatrix} E_p \\ R_d - C_d - E_p \\ R_g - C_g \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} E_p \\ R_d - C_d - E_p \\ 0 \end{bmatrix}$
	违规经营($1-y$)	$\begin{bmatrix} E_p - L_p + \lambda a S_d \\ R_d - C_d - E_p + U - a S_d \\ R_g + (1-\lambda) a S_d - C_g \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} E_p - L_p \\ R_d - C_d - E_p + U \\ -L_{g2} \end{bmatrix}$
虚假分享($1-x$)	合规经营(y)	$\begin{bmatrix} E_p - a S_p \\ -C_d - E_p - L_d + \beta a S_p \\ R_g + (1-\beta) a S_p - C_g \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} E_p \\ -E_p - C_d - L_d \\ -L_{g1} \end{bmatrix}$
	违规经营($1-y$)	$\begin{bmatrix} E_p - a S_p \\ -E_p - C_d - a S_d \\ R_g + a S_p + a S_d - C_g \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} E_p \\ -E_p - C_d \\ -L_{g1} - L_{g2} \end{bmatrix}$

3.3 博弈模型求解

3.3.1 对数据提供者的分析

设数据提供者选择“真实分享”策略的期望收益为 E_{11} ,选择“虚假分享”策略的期望收益为 E_{12} ,平均期望收益为 E_1 ,则:

$$E_{11} = yz E_p + y(1-z) E_p + z(1-y)(E_p - L_p + \lambda a S_d) + (1-z)(1-y)(E_p - L_p)$$

$$E_{12} = yz(E_p - a S_p) + y(1-z) E_p + z(1-y)(E_p - a S_p) + (1-y)(1-z) E_p$$

$$E_1 = x E_{11} + (1-x) E_{12}$$

根据 Malthusian 动态方程可得,数据提供者在“真实分享”策略下的复制动态方程为:

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{dx}{dt} = x(E_{11} - E_1) \\ &= x(1-x)(E_{11} - E_{12}) \\ &= x(1-x)(\lambda a S_d z - \lambda a S_d y z + L_p y - L_p + a S_p z) \end{aligned}$$

求解复制动态方程 $F(x)$ 对于 x 的偏导数,得到:

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} = (1-2x)(\lambda a S_d z - \lambda a S_d y z + L_p y - L_p + a S_p z)$$

令 $F(x) = 0$ 可得: $x = 0$, $x = 1$ 或 $z = z_0$, 其中 $z_0 = \frac{L_p - L_p y}{\lambda a S_d - \lambda a S_d y + a S_p}$ 。由微分方程稳定性定理可知,当且仅当

$F(x) = 0$ 且 $\frac{\partial F(x)}{\partial x} < 0$ 时,个人主体策略选择处于稳定状态。

命题1 当 $0 < z < z_0$ 时, $x = 0$ 是演化稳定状态;当 $z_0 < z < 1$ 时, $x = 1$ 是演化稳定状态。

证明: 当 $z = z_0$ 时, $F(x) = 0$, 即在此条件下个人主体选择真实分享策略的概率不随时间变化。当 $z \neq z_0$ 时, 此时应分为 $0 < z < z_0$ 和 $z_0 < z < 1$ 两种情形进行讨论。令 $h(y, z) = \lambda a S_d z - \lambda a S_d y z + L_p y - L_p + a S_p z$, 对 $h(y, z)$ 求关于 z 的一阶偏导数可得: $\frac{\partial h(y, z)}{\partial z} = \lambda a S_d - \lambda a S_d y + a S_p > 0$ 。因此, 函数 $h(y, z)$ 是关于变量 z 的单调递增函数。

$$(1) \text{ 当 } 0 < z < z_0 \text{ 时, } h(y, z) < 0, \left. \frac{\partial F(x)}{\partial x} \right|_{x=0} < 0,$$

$\left. \frac{\partial F(x)}{\partial x} \right|_{x=1} > 0$, 此时 $x = 0$ 是演化稳定状态, 即当监管平台选择严格监管策略的概率小于 z_0 时, 数据提供者最终会选择虚假分享策略。

$$(2) \text{ 当 } z_0 < z < 1 \text{ 时, } h(y, z) > 0, \left. \frac{\partial F(x)}{\partial x} \right|_{x=0} > 0,$$

$\frac{\partial F(x)}{\partial x} \Big|_{x=1} < 0$, 此时 $x=1$ 是演化稳定状态, 即当监管平台选择严格监管策略的概率大于 z_0 时, 数据提供者最终会选择真实分享策略。证毕。

3.3.2 对数据需求者的分析

设数据需求者选择“合规经营”策略的期望收益为 E_{21} , 选择“违规经营”策略的期望收益为 E_{22} , 平均期望收益为 E_2 , 则:

$$E_{21} = xz(R_d - C_d - E_p) + x(1-z)(R_d - C_d - E_p) + z(1-x)(\beta a S_p - C_d - E_p - L_d) + (1-x)(1-z)(-C_d - E_p - L_d)$$

$$E_{22} = xz[R_d - C_d - E_p + U - a S_d] + x(1-z)[R_d - C_d - E_p + U] + z(1-x)(-E_p - C_d - a S_d) + (1-x)(1-z)(-E_p - C_d)$$

$$E_2 = y E_{21} + (1-y) E_{22}$$

数据需求者在“合规经营”策略下的复制动态方程为:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{21} - E_2) = y(1-y)(\beta a S_p z - \beta a S_p x z + L_d x + a S_d z - L_d - U x)$$

求解复制动态方程 $F(y)$ 对于 y 的偏导数, 得到:

$$\frac{\partial F(y)}{\partial y} = (1-2y)(\beta a S_p z - \beta a S_p x z + L_d x + a S_d z - L_d - U x)$$

令 $F(y) = 0$ 得: $y = 0$, $y = 1$ 或 $x = x_0$, 其中 $x_0 = \frac{\beta a S_p z + a S_d z - L_d}{\beta a S_p z + U - L_d}$ 。由微分方程稳定性定理可知, 当且仅当

$F(y) = 0$ 且 $\frac{\partial F(y)}{\partial y} < 0$ 时, 数据需求者策略选择处于稳定状态。

命题 2 当 $0 < x < x_0$ 时, $y = 1$ 是演化稳定状态; 当 $x_0 < x < 1$ 时, $y = 0$ 是演化稳定状态。

证明: 当 $x = x_0$ 时, $F(y) = 0$, 即在此条件下数据需求者选择合规经营策略的概率不随时间变化。当 $x \neq x_0$ 时, 此时应分为 $0 < x < x_0$ 和 $x_0 < x < 1$ 两种情形进行讨论。令 $h(x, z) = \beta a S_p z - \beta a S_p x z + L_d x + a S_d z - L_d - U x$, 对 $h(x, z)$ 求关于 x 的一阶偏导数可得 $\frac{\partial h(x, z)}{\partial x} < 0$ 。因此, 函数 $h(x, z)$ 是关于变量 x 的单调递减函数。

(1) 当 $0 < x < x_0$ 时, $h(x, z) > 0$, $\frac{\partial F(y)}{\partial y} \Big|_{y=0} > 0$,

$\frac{\partial F(y)}{\partial y} \Big|_{y=1} < 0$, 此时 $y = 1$ 是演化稳定状态, 即当数据提供者选择真实分享策略的概率小于 x_0 时, 数据需求者最终会选择合规经营策略。

(2) 当 $x < x_0 < 1$ 时, $h(x, z) < 0$, $\frac{\partial F(y)}{\partial y} \Big|_{y=0} < 0$,

$\frac{\partial F(y)}{\partial y} \Big|_{y=1} > 0$, 此时 $y = 0$ 是演化稳定状态, 即当数据提供者选择真实分享策略的概率大于 x_0 时, 数据需求者最终会选择违规经营策略。证毕。

3.3.3 对监管平台的分析

设监管平台选择“严格监管”策略的期望收益为 E_{31} , 选择“宽松监管”策略的期望收益为 E_{32} , 平均期望收益为 E_3 , 则:

$$E_{31} = xy(R_g - C_g) + x(1-y)[R_g + (1-\lambda)aS_d - C_g] + (1-x)y[R_g + (1-\beta)aS_p - C_g] + (1-x)(1-y)(R_g + aS_p + aS_d - C_g)$$

$$E_{32} = x(1-y)(-L_{g2}) + (1-x)y(-L_{g1}) + (1-x)(1-y)(-L_{g1} - L_{g2})$$

$$E_3 = z E_{31} + (1-z) E_{32}$$

监管平台在“严格监管”策略下的复制动态方程为:

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(E_{31} - E_3) = z(1-z)(E_{z1} - E_{z2}) = z(1-z)[(R_g - \lambda a S_d x + \lambda a S_d x y - \beta a S_p y + \beta a S_p x y + a S_d - a S_d y + a S_p - a S_p x - C_g + L_{g1} + L_{g2} - L_{g1} x - L_{g2} y)]$$

求解复制动态方程 $F(z)$ 对于 z 的偏导数, 得到:

$$\frac{\partial F(z)}{\partial z} = (1-2z)(R_g - \lambda a S_d x + \lambda a S_d x y - \beta a S_p y + \beta a S_p x y + a S_d - a S_d y + a S_p - a S_p x - C_g + L_{g1} + L_{g2} - L_{g1} x - L_{g2} y)$$

令 $F(z) = 0$ 得: $z = 0$, $z = 1$ 或 $y = y_0$, 其中 $y_0 = \frac{R_g - \lambda a S_d x + a S_d + a S_p - a S_p x - C_g + L_{g1} + L_{g2} - L_{g1} x}{L_{g2} + a S_d - \beta a S_p x + \beta a S_p - \lambda a S_d x}$ 。由微

分方程稳定性定理可知, 当且仅当 $F(z) = 0$ 且 $\frac{\partial F(z)}{\partial z} < 0$ 时, 监管平台的策略选择处于稳定状态。

命题 3 当 $0 < y < y_0$ 时, $z = 1$ 是演化稳定状态; 当 $y_0 < y < 1$ 时, $z = 0$ 是演化稳定状态。

证明: 当 $y = y_0$ 时, $F(z) = 0$, 即在此条件下监管平台选择严格监管策略的概率不随时间变化。当 $y \neq y_0$ 时, 此时应分为 $0 < y < y_0$ 和 $y_0 < y < 1$ 两种情形进行讨论。令:

$$h(x, y) = R_g - \lambda a S_d x + \lambda a S_d x y - \beta a S_p y + \beta a S_p x y + (1-y)aS_d + (1-x)aS_p - C_g + (1-x)L_{g1} + (1-y)L_{g2}$$

求解 $h(x, y)$ 关于 y 的一阶偏导数可得: $\frac{\partial h(x, y)}{\partial y} = \lambda a S_d x - \beta a S_p + \beta a S_p x - a S_d - L_{g2} < 0$ 。因此, 函数 $h(x, y)$ 是关于变量 y 的单调递减函数。

(1) 当 $0 < y < y_0$ 时, $h(x, y) > 0$, $\frac{\partial F(z)}{\partial z} \Big|_{z=0} > 0$,

$\frac{\partial F(z)}{\partial z} \Big|_{z=1} < 0$, 此时 $z = 1$ 是演化稳定状态, 即当数据需求者选择合规经营策略的概率小于 y_0 时, 监管平台最终会选择严格监管策略。

(2) 当 $y_0 < y < 1$ 时, $h(x, y) < 0$, $\frac{\partial F(z)}{\partial z} \Big|_{z=0} < 0$,

$\frac{\partial F(z)}{\partial z} \Big|_{z=1} > 0$, 此时 $z = 0$ 是演化稳定状态, 即当数据需求者选择合规经营策略的概率大于 y_0 时, 监管平台最终会选择宽松监管策略。证毕。

4 稳定性分析

由于数据提供者、数据需求者和监管平台三方主体的策略选择是随时间不断演进的, 为求得均衡解及分析动态系统的策略稳定性, 联立三方主体的复制动态方程, 得到三维动力系统:

$$\begin{cases} F(x) = x(1-x)h(y, z) \\ F(y) = y(1-y)h(x, z) \\ F(z) = z(1-z)h(x, y) \end{cases}$$

令 $F(x)=0, F(y)=0, F(z)=0$ 求得三维动力系统的策略均衡点为 $E_{s1}(0,0,0), E_{s2}(0,0,1), E_{s3}(0,1,0), E_{s4}(0,1,1), E_{s5}(1,0,0), E_{s6}(1,0,1), E_{s7}(1,1,0), E_{s8}(1,1,1), E_{s9}(x_0, y_0, z_0)$ 。由于非对称博弈演化稳定策略为严格纳什均衡,故剔除均衡点 $E_{s9}(x_0, y_0, z_0)$,只讨论纯策略均衡点的稳定性。根据 Lyapunov 准则^[58],通过分析各均衡点对应的雅可比矩阵得到演化稳定策略。该系统的雅可比矩阵为:

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

其中,

$$\begin{cases} \frac{\partial F(x)}{\partial x} = (1-2x)(\lambda a S_d z - \lambda a S_d y z + L_p y - L_p + a S_p z) \\ \frac{\partial F(x)}{\partial y} = x(1-x)(L_p - \lambda a S_d z) \\ \frac{\partial F(x)}{\partial z} = x(1-x)(\lambda a S_d - \lambda a S_d y + a S_p) \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} = y(1-y)(-\beta a S_p z + L_d - U) \\ \frac{\partial F(y)}{\partial y} = (1-2y)(\beta a S_p z - \beta a S_p x z + L_d x + a S_d z - L_d - U x) \\ \frac{\partial F(y)}{\partial z} = y(1-y)(\beta a S_p - \beta a S_p x + a S_d) \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} = z(1-z)(-\lambda a S_d + \lambda a S_d y + \beta a S_p y - a S_p - L_{g1}) \\ \frac{\partial F(z)}{\partial y} = z(1-z)(\lambda a S_d x - \beta a S_p + \beta a S_p x - a S_d - L_{g2}) \\ \frac{\partial F(z)}{\partial z} = (1-2z)(R_g - \lambda a S_d x + \lambda a S_d x y - \beta a S_p y + \beta a S_p x y + a S_d - a S_d y + a S_p - a S_p x - C_g + L_{g1} + L_{g2} - L_{g1} x - L_{g2} y) \end{cases}$$

将三维动力系统的 8 个纯策略均衡点代入雅可比矩阵得到各均衡点对应的特征值,具体如表 3 所列。

表 3 系统均衡点及特征值

Table 3 Equilibriums and eigenvalues of evolving systems

稳定点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3
$E_{s1}(0,0,0)$	$-L_p$	$-L_d$	$R_g + a S_d + a S_p - C_g + L_{g1} + L_{g2}$
$E_{s2}(0,0,1)$	$\lambda a S_d + a S_p - L_p$	$\beta a S_p + a S_d - L_d$	$-R_g - a S_d - a S_p + C_g - L_{g1} - L_{g2}$
$E_{s3}(0,1,0)$	0	L_d	$R_g - \beta a S_p + a S_p - C_g + L_{g1}$
$E_{s4}(0,1,1)$	$a S_p$	$-\beta a S_p - a S_d + L_d$	$-R_g + \beta a S_p - a S_p + C_g - L_{g1}$
$E_{s5}(1,0,0)$	L_p	$-U$	$R_g - \lambda a S_d + a S_d - C_g + L_{g2}$
$E_{s6}(1,0,1)$	$-\lambda a S_d - a S_p + L_p$	$-U + a S_d$	$-R_g + \lambda a S_d - a S_d + C_g - L_{g2}$
$E_{s7}(1,1,0)$	0	U	$R_g - C_g$
$E_{s8}(1,1,1)$	$-a S_p$	$U - a S_d$	$-R_g + C_g$

根据 Lyapunov 准则可知,当局部稳定点对应的雅可比

矩阵所有特征值均为负时,该稳定点为系统的演化稳定策略。由此可知,纯策略点 $E_{s3}(0,1,0), E_{s4}(0,1,1), E_{s5}(1,0,0), E_{s7}(1,1,0)$ 为不稳定点。纯策略点 $E_{s1}(0,0,0), E_{s2}(0,0,1), E_{s6}(1,0,1), E_{s8}(1,1,1)$ 的稳定条件如表 4 所列。

表 4 纯策略点稳定条件

Table 4 Stability conditions for pure strategy points

稳定点	稳定条件
$E_{s1}(0,0,0)$	$R_g + a S_d + a S_p - C_g + L_{g1} + L_{g2} < 0$
$E_{s2}(0,0,1)$	$\lambda a S_d + a S_p - L_p < 0, \beta a S_p + a S_d - L_d < 0, -R_g - a S_d - a S_p + C_g - L_{g1} - L_{g2} < 0$
$E_{s5}(1,0,0)$	$-\lambda a S_d - a S_p + L_p < 0, -U + a S_d < 0, -R_g + \lambda a S_d - a S_d + C_g - L_{g2} < 0$
$E_{s8}(1,1,1)$	$U - a S_d < 0, -R_g + C_g < 0$

根据上述纯策略点 $E_{s1}(0,0,0), E_{s2}(0,0,1), E_{s5}(1,0,1), E_{s8}(1,1,1)$ 的稳定条件,将其划分为 4 种情形进行逐一分析,如图 1—图 4 所示。

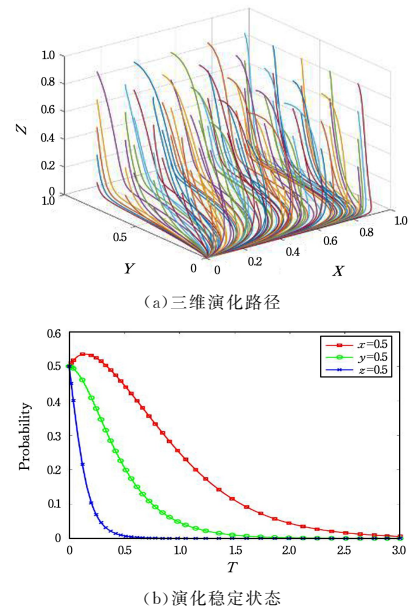


图 1 情形 1 三维演化路径和演化稳定状态图

Fig. 1 3D evolution path and evolutionary stable state diagram for scenario 1

情形 1 当满足条件 $R_g + a S_d + a S_p - C_g < -L_{g1} - L_{g2}$, 即监管平台选择“严格监管”策略的收益小于“宽松监管”策略的收益时,三维动力系统内各主体的最优策略选择集合为(虚假分享, 违规经营, 宽松监管)。此情形下的现实含义为:数据提供者选择虚假分享数据可能意味着提供的数据质量不可靠,可能包含错误性信息,从而增加了数据被滥用的风险。数据需求者选择违规经营可能会使用这些数据进行非法活动,如未经授权的广告定位、个人信息泄露等,导致个人隐私受到侵犯。监管平台选择宽松监管可能会导致监管措施不力,无法有效应对数据共享中出现的虚假数据和违规行为。这可能会导致监管机构面临更大的挑战,需要加强监管力度和制定更严格的规定来应对数据共享中的风险和问题。

在该情形中,监管平台进行严格监管的成本过高,导致其无法有效规范数据提供者和数据需求者的行为。因此,数据提供者和数据需求者在宽松监管的外部环境下的策略选择最终分别收敛于虚假分享和违规经营。该情形会导致管理缺位,使得数据隐私安全无法得到保障,在现

实情境中应杜绝这种模式的出现。

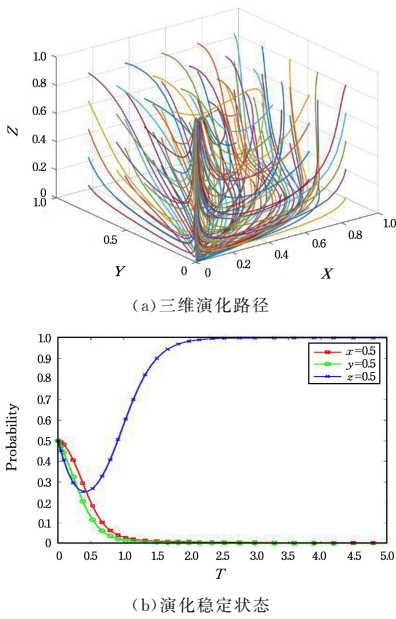


图2 情形2 三维演化路径和演化稳定状态图

Fig. 2 3D evolution path and evolutionary stable state diagram for scenario 2

情形2 当条件 $\lambda aS_d + aS_p - L_p < 0$, $\beta aS_p + aS_d - L_d < 0$ 且 $-R_g - aS_d - aS_p + C_g - L_{g1} - L_{g2} < 0$ 均满足时,三维动力系统的策略选择最终收敛于(虚假分享, 违规经营, 严格监管)。此情形表示的现实含义为:监管机构对数据共享活动的监管力度可能相对不足,监管政策和法规也可能存在漏洞。这会导致一些不法行为的出现,例如虚假分享和违规经营,严重影响了数据共享生态系统的健康发展。

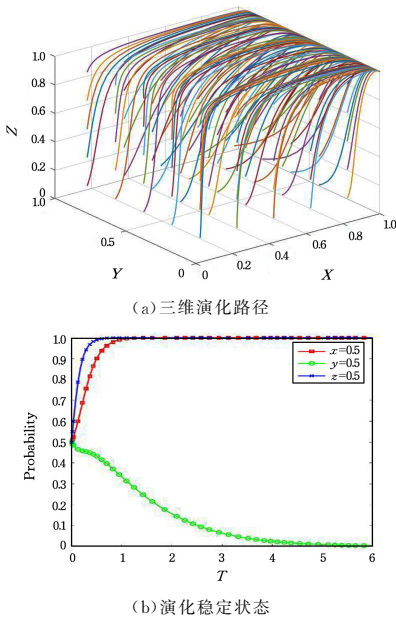


图3 情形3 三维演化路径演化稳定状态图

Fig. 3 3D evolution path and evolutionary stable state diagram for scenario 3

在该情形中,数据提供者选择虚假分享策略,因为虚假分享可能带来更高的经济利益或市场竞争优势。数据提供者认为虚假分享能够吸引更多的数据需求者或获取更多的利润。

数据需求者选择违规经营策略,因为违规经营可能会带来更大的数据收集、分析和利用的灵活性,从而获取更多的商业利益或竞争优势。数据需求者认为违规经营能够更快速地获取数据并实现商业目标,因此倾向于选择这一策略。监管平台选择严格监管,因为虚假分享和违规经营可能会对个人隐私和社会稳定造成严重的影响。为了保护公众利益、维护市场秩序和社会稳定,监管层面会采取更严格的监管措施,对违规行为进行严厉处罚,以遏制不当行为的发生,例如,某智能互动平台因非法爬取“小红书”数据进行牟利而构成犯罪。但在该情形中,可能会导致数据滥用、个人隐私泄露和市场不公平等问题,因此需通过进一步的政策和制度改革来解决。

情形3 当条件 $-\lambda aS_d - aS_p + L_p < 0$, $-U + aS_d < 0$ 和 $-R_g + \lambda aS_d - aS_d + C_g - L_{g2} < 0$ 均满足时,三维动力系统的策略选择最终收敛于(真实分享, 违规经营, 严格监管)。此情形下的现实含义为:尽管监管机构采取了严格的监管措施,但数据需求者仍然可能选择违规经营策略。这可能是商业利益驱动、监管执行力度不足、市场竞争压力以及法律风险认知不足等因素共同作用的结果。因此,监管机构需要进一步加强对违规行为的监督和处罚力度,提高违规行为的成本,从而减少数据需求者的违规行为。

此时,数据提供者出于对用户隐私的尊重和合规的考虑,会选择真实分享策略。数据需求者认为违规操作能够带来更高的收益或竞争优势,并且可以从数据提供者分享的真实信息中获得更多的附加价值,其策略选择最终收敛于违规经营。监管平台为保护用户隐私会选择严格监管策略,但对数据需求者的惩罚力度过低,导致数据需求者即使面临处罚风险,仍然选择违规经营。监管平台此时应加强对数据需求者的惩戒力度,规范数据需求者的经营行为。

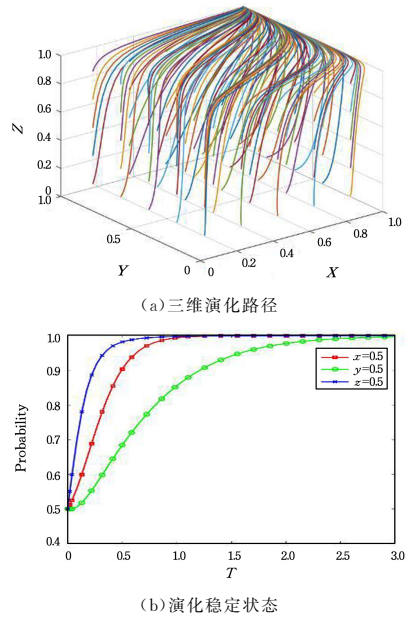


图4 情形4 三维演化路径演化稳定状态图

Fig. 4 3D evolution path and evolutionary stable state diagram for scenario 4

情形4 当条件 $U - aS_d < 0$, $-R_g + C_g < 0$ 均满足,即监管平台进行“严格监管”的收益大于“宽松监管”策略下的收益时,数据需求者选择“合规经营”的收益大于“违规经营”的

收益,数据提供者选择“真实分享”的收益大于“虚假分享”策略的收益。因此,策略组合(真实分享,合规经营,严格监管)为演化稳定策略。此情形的现实含义为:在数据提供者选择真实分享,数据需求者选择合规经营,监管平台选择严格监管的情况下,是数据共享生态系统得以加强数据安全和隐私保护,建立合作信任和可持续发展的基础,并且市场秩序和竞争环境得以规范,公众对数据共享的信心和社会认可度得以提升。

该情形为数据隐私保护的理想情形,监管平台通过制定合理的措施,监督并规范数据提供者与数据需求者的行为,进而有效减少数据滥用、个人隐私泄露等问题的发生。

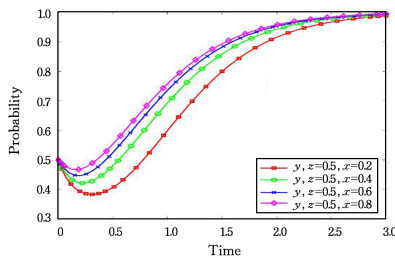
5 仿真实验与分析

从数据共享中隐私保护的过程来看,演化稳定点(1,1,1)是构建隐私保护体系的理想状态,原因在于:(1)数据提供者真实分享数据,能够有效减少虚假信息在个人与平台间的传播;(2)数据需求者选择合规经营,能够保护数据提供者提供的信息的隐私;(3)监管平台进行严格监管,能够规范数据提供者和数据需求者的行为,从根本上优化数据共享过程,保护隐私信息。

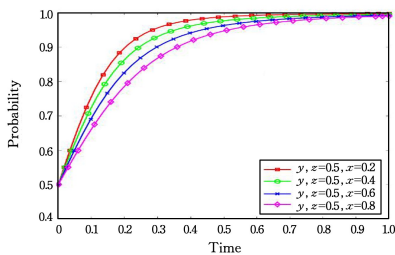
因此,本文基于理想状态(1,1,1)讨论参数变化对系统策略演化的影响,初识参数设定保证了当前市场状态符合演化稳定策略 $E_{ss}(1,1,1)$ 的场景设定。同时,不同参数之间由于量纲不同,仅表示相互之间的强度关系,不具有实际意义,可根据实际情况通过标准化进行处理。参数取值如下: $a=3$, $\lambda=0.1$, $S_d=2$, $L_p=2$, $S_p=2$, $\beta=0.1$, $L_d=3$, $U=4$, $R_g=5$, $C_g=8$, $L_{g1}=2$, $L_{g2}=3$ 。

5.1 各主体初始策略对演化结果的影响

本节将 y 和 z 的初始概率均设为 0.5,通过改变数据提供者初始策略选择的概率来分析其对系统演化的影响。其中, y , z 和 x 的关系分别为: $y = \frac{R_g - \lambda a S_d x + a S_d + a S_p - a S_p x - C_g + L_{g1} + L_{g2} - L_{g1} x}{L_{g2} + a S_d - \beta a S_p x + \beta a S_p - \lambda a S_d x}$, $z = \frac{L_d + U x - L_d x}{\beta a S_p - \beta a S_p x + a S_d}$ 。结果如图 5 所示。



(a) x 的变化对 y 演化的影响



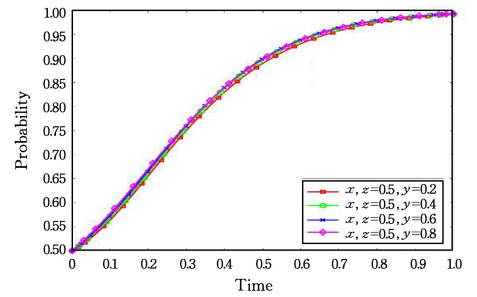
(b) x 的变化对 z 演化的影响

图 5 x 的变化对 y 和 z 演化的影响

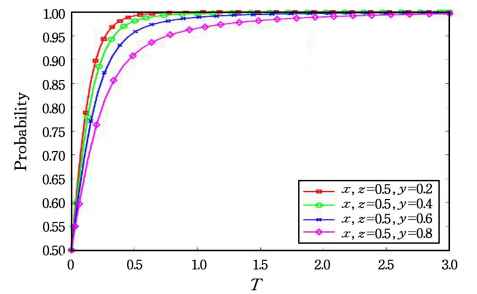
Fig. 5 Effect of x variation on y and z evolution

由图 5 可知, x 取值从 0.2 逐渐增加至 0.8 的过程中,数据需求者策略选择收敛于“合规经营”的速度越来越快,而监管平台收敛于“严格监管”策略的速度越来越慢。数据需求者对数据提供者策略选择的变化更加敏感,因为数据需求者依赖于数据提供者分享的数据开展商业活动。

本节将 x 和 z 的初始概率均设为 0.5,通过改变数据需求者初始策略选择的概率来分析其对系统演化的影响。其中, x , z 和 y 的关系为: $x = \frac{R_g - \beta a S_p y + a S_d - a S_d y + a S_p - C_g + L_{g1} + L_{g2} - L_{g2} y}{a S_p - \beta a S_p y - \lambda a S_d y + \lambda a S_d}$, $z = \frac{L_p - L_p y}{\lambda a S_d - \lambda a S_d y + a S_p}$ 。图 6 反映了数据需求者策略选择概率的变化对数据提供者和监管平台策略演化的影响。



(a) y 的变化对 x 演化的影响



(b) y 的变化对 z 演化的影响

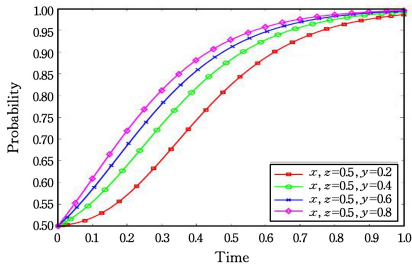
图 6 y 的变化对 x 和 z 演化的影响

Fig. 6 Effect of y variation on x and z evolution

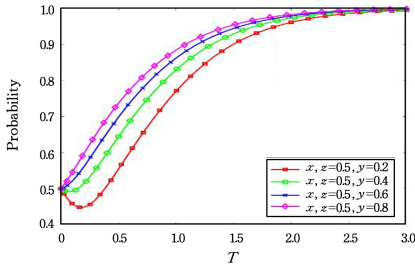
由图 6(a)可知,当数据需求者选择“合规经营”策略的概率由 0.2 增加到 0.8 时,数据提供者的策略选择收敛速度变化较小。在图 6(b)中,监管平台收敛于“严格监管”策略的速度与 y 值的变化呈负相关,表明监管平台认为在数据需求者的经营行为得到监督与引导后,会自发保持合规经营策略。

本节将 x 和 y 的初始概率均设为 0.5,通过改变数据需求者初始策略选择的概率来分析其对系统演化的影响。其中, x , y 和 z 的关系为: $x = \frac{\beta a S_p z + a S_d z - L_d}{\beta a S_p z + U - L_d}$, $y = \frac{\lambda a S_d z + a S_p z - L_p}{\lambda a S_d z + L_p}$ 。结果如图 7 所示。

由图 7 可知,当监管平台选择“严格监管”策略的概率由 0.2 上升至 0.8 时,数据提供者和数据需求者的策略选择分别快速收敛于“真实分享”和“合规经营”。这表明,监管平台的监管策略直接影响数据提供者和数据需求者的策略选择。在强监管环境下,数据提供者和数据需求者为避免被监管平台处罚均会选择合规行为。



(a) z 的变化对 x 演化的影响



(b) z 的变化对 y 演化的影响

图 7 z 的变化对 x 和 y 演化的影响

Fig. 7 Effect of z variation on x and y evolution

5.2 监管强度 a 对系统演化的影响

监管强度表示监管平台对数据提供者和数据需求者进行监管时的投入程度。由前文对 $E_{ss}(1,1,1)$ 的讨论可知,当 $a > \frac{U}{S_d}$, 即监管平台对数据需求者的监管强度能够覆盖数据需求者虚假经营收益时, $E_{ss}(1,1,1)$ 是系统的演化稳定点。本节保持其他参数不变,仅改变监管强度 a 来分析三维动力系统的演化过程,如图 8 所示。

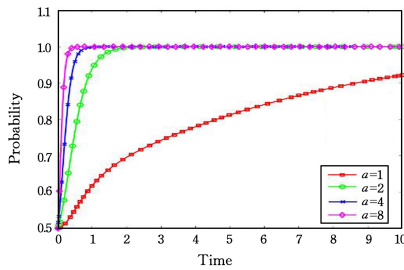


图 8 监管强度 a 对数据提供者策略演化的影响

Fig. 8 Influence of regulatory intensity a on data providers' strategy evolution

由图 8 可知,数据提供者的策略演化速度与监管强度 a 呈正相关,表明监管平台的监管政策决定了数据提供者的策略选择。随着监管强度 a 逐渐增加,数据提供者的策略选择收敛于“真实分享”且收敛速度进一步加快。当监管强度较小时,数据提供者对监管平台的监管政策持观望态度,策略演化速度相对较慢。这表明,数据提供者在决定向消费者分享数据时,会更加关注监管平台的监管投入力度,以及监管政策的稳定性和可预测性。

随着监管强度的增加,数据提供者逐渐意识到监管平台不会放松对数据行业的监管,因此他们开始更加倾向于选择“真实分享”的策略。这是因为在更加严格的监管环境下,“真实分享”不仅符合法规要求,还能够赢得消费者的信任,确保数据交易的合法性和可持续性。因此,监管强度的增加不仅

可以推动数据提供者更快地调整策略,更重要的是,它为数据行业的健康发展提供了稳定可靠的制度保障,促进了数据市场的规范化和良性竞争,如图 9 所示。

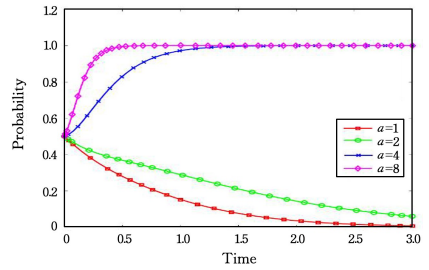


图 9 监管强度 a 对数据需求者策略演化的影响

Fig. 9 Influence of regulatory intensity a on data consumers' strategy evolution

由图 9 可知,监管平台的监管强度直接决定了数据需求者的策略选择。当监管强度 $a \leq 2$ 时,数据需求者认为监管平台的监管强度不够,即使被发现违规经营也不会遭受过大的损失,因此数据需求者的策略选择收敛于“违规经营”。当 $a > 3$ 时,数据需求者的策略选择收敛于“合规经营”。随着监管强度 a 的增大,数据需求者逐渐意识到违规经营所带来的风险与代价,因此他们开始更倾向于选择“合规经营”的策略。这种情况下,监管平台对违规经营行为采取严厉的处罚措施,使得数据需求者无法承担违规经营所带来的后果,最终他们选择了合规经营的道路。因此,监管强度的增加可以有效地促使数据需求者采取合规经营行为,从而维护了市场秩序和公平竞争环境。监管平台应提供更多的支持和指导,以帮助数据需求者更好地理解并遵守相关的法规和政策。不仅要违规行为进行严格监管,还要积极地促进合规经营的发展。通过提供培训、指导文件、咨询服务等方式,帮助数据需求者建立起规范的经营模式和管理体系,从而降低合规经营的风险,并提升市场的整体运行效率和稳定性。

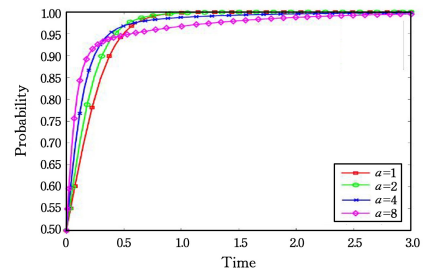


图 10 监管强度 a 对监管平台策略演化的影响

Fig. 10 Influence of regulatory intensity a on regulatory platforms' strategy evolution

由图 10 可知,监管平台策略选择的收敛速度受到其自身监管强度 a 的影响,但当监管强度过大时,其收敛于“严格监管”的速度逐渐变慢。监管平台在面临监管强度提升时,需要更多的资源和投入,以确保监管政策的有效实施。然而,过度强调监管力度可能会带来一些附加的成本和复杂性,这可能会削弱监管的效率。因此,监管平台在决定监管力度投入时需要权衡监管效率和监管效果之间的关系。监管力度投入的增加会带来监管效果的提升,但也可能导致监管效率下降。

在实际监管过程中,监管平台应采取动态监管机制,根据具体情况灵活调整监管力度的投入。这意味着监管平台需要及时分析潜在的风险和市场情况,并根据情境的变化决定适当的监管策略。这种动态监管机制可以帮助监管平台在实现监管效果的同时,尽可能地提高监管效率,从而达到监管效率和监管效果的最优平衡点。

5.3 脏数据补偿系数 β 对数据需求者演化的影响

脏数据补偿系数表示当数据提供者向数据需求者提供虚假数据时,监管平台会对合规经营的数据需求者进行补偿。

由图 11 可知,数据需求者的策略收敛速度与脏数据补偿系数 β 呈正相关,表明当合规经营的数据需求者因使用数据提供者分享的虚假数据造成经营损失时,监管平台对数据需求者的补偿程度直接决定了其策略收敛速度。这说明,监管平台在监管过程中,不仅要考虑监管投入,还应关注其作为管理者对数据需求方的兜底程度。合理的补偿机制能够降低合规经营消费者的风险,使其遵守法律法规,合法经营。

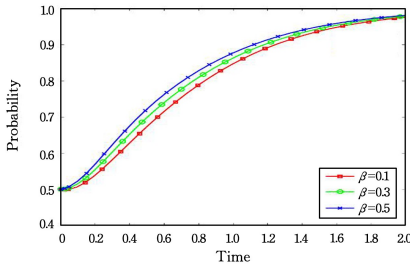


图 11 脏数据补偿系数 β 对数据需求者演化的影响

Fig. 11 Influence of coefficient β of compensation for providing noise data on data consumers' strategy evolution

5.4 违规经营附加收益系数 c 对数据需求者演化的影响

本节讨论数据需求者违规经营,使用真实数据时获得的附加收益对其策略演化的影响。假设其他参数取值保持不变,违规经营附加收益系数 c 的取值分别为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7。由前文分析可知,当 $c < \frac{\alpha S_d - R_d}{R_d}$ 时,数据需求者选择合规经营策略。其含义为,当数据需求者违规经营的收益小于被监管平台处罚时,数据需求者的行为逐渐收敛于合规经营。

由图 12 可知,当数据需求者使用真实数据违规经营时,附加收益系数越大,其收敛于合规经营策略的速度越慢,即当违规经营带来的收益越大时,数据需求者此时会选择观望监管平台的监管强度。如图 12 所示,数据需求者选择合规经营的概率均先下降再上升,且参数 c 越大,下降幅度越大。

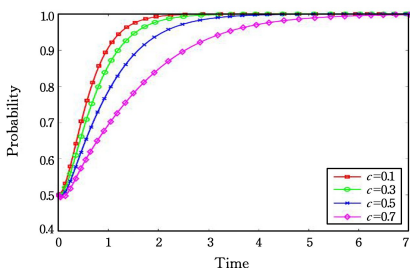


图 12 附加收益系数 c 对数据需求者演化的影响

Fig. 12 Influence of coefficient c of additional profitability for non-compliant operation on data consumers' strategy evolution

结束语 本研究通过构建三方演化博弈模型,系统分析了数据市场中数据提供者、消费者与监管平台的策略互动及其演化规律。研究表明,监管策略的强度与灵活性对市场行为的引导具有关键作用。(1)监管效力的非线性特征。监管平台选择“严格监管”策略的概率提升会显著加速数据提供者与消费者向合规行为的收敛,但其强度需与市场发展阶段相匹配。过高的监管强度可能导致边际效用递减,甚至引发市场僵化,这就凸显了动态调整监管力度的必要性。(2)补偿机制的双向激励。数据需求者策略的收敛速度与“脏数据”补偿系数 β 呈显著正相关。这表明,监管平台对合规运营商的权益保护不仅能抑制数据滥用,还能通过经济补偿激励数据质量的提升。(3)隐私货币化的制度可行性。本文通过将隐私泄露损失 L_p 量化为可补偿的经济参数,验证了隐私货币化在数据交易中的合法性基础,为解决数据权属模糊问题提供了理论依据。

此外,本研究通过演化博弈模型揭示了数据市场参与者的策略互动机制,突破了传统静态分析的局限,这对我国数据市场相关制度设计和治理具有重要的参考意义。(1)构建“激励-约束-补偿”三位一体的动态监管机制。结合技术手段(如数据交易登记系统、多方安全计算平台)提升治理效能,并通过周期性执法平衡市场活力与秩序。(2)实现科学化执法。将市场有效信息纳入三方博弈模型,有效预测市场演化特征,结合市场短期、中期和长期发展目标,改变“激励-约束-补偿”相关参数设定,使政策制定更科学,政策强度更精确。(3)构建由国家监管背书的数据中介(数据经纪人)制度。为数据需求者与监管者之间搭建一个可增强双方相互信任的中间桥梁。强化(数据提供者)数据共享透明度,加强(数据消费者)数字能力建设,以提升数据价值挖掘效率。

数据作为数字经济的核心生产要素,其市场化治理机制的完善是推动经济高质量发展的关键。未来,随着数据技术的持续革新与制度环境的逐步完善,如何通过多学科交叉研究实现数据要素的全局最优配置,将成为学术界与政策制定者的共同课题。

参考文献

- [1] FANG H Y. The legal guarantee of digital economy governance: the question of The Times, the theoretical response and the practical plan[J]. Journal of Fujian Normal University (Philosophy and Social Science Edition), 2024, 6: 159-168.
- [2] JEANNETTE M W. Computational thinking[J]. Communications of the ACM, 2006, 49(3): 33-35.
- [3] DENNING P J, TEDRE M. Computational Thinking [M]. Cambridge: MIT Press, 2019.
- [4] BHIMANI A, WILLCOCKS L. Digitisation, 'big data' and the transformation of accounting information [J]. Accounting and Business Research, 2014, 44(4): 469-490.
- [5] State Council of the People's Republic of China. China unveils guideline on improving market-based allocation of production factors [EB/OL]. [2020-04-09]. https://english.www.gov.cn/policies/latestreleases/202004/09/content_WS5e8e8d5-bc6d0c201c2cbf8a2.html.

- [6] DILLO I, TRELOAR A, LUSOLI W, et al. Business models for sustainable research data repositories [R]. 2017.
- [7] SAVONA M. The value of data; Towards a framework to redistribute it [R]. 2019.
- [8] ANTONIADIS P. Economic modelling and incentive mechanisms for efficient resource provision in peer-to-peer systems [D]. Athens: Athens University of Economics and Business, 2006.
- [9] MWATHA A G. Leveraging big data-based competitiveness in emerging markets: A dynamic capabilities perspective [D]. Nairobi: Kenyatta University, 2020.
- [10] SIVARAJAH U, KAMAL M M, IRANI Z, et al. Critical analysis of big data challenges and analytical methods[J]. Journal of Business Research, 2017, 70: 263-286.
- [11] DURRANT A, MARKOVIC M, MATTHEWS D, et al. How might technology rise to the challenge of data sharing in agri-food? [J]. Global Food Security, 2021, 28: 100493.
- [12] MARKS M. Biosupremacy; big data, antitrust, and monopolistic power over human behavior[J]. UC Davis Law Review, 2021, 55: 513.
- [13] SPIEKERMANN M. Data marketplaces; Trends and monetisation of data goods[J]. Intereconomics, 2019, 54(4): 208-216.
- [14] BOERDING A, CULIK N, DOEPKE C, et al. Data ownership—a property rights approach from a European perspective[J]. Journal of Civil Law Studies, 2018, 11: 323.
- [15] KOSTKOVA P, BREWER H, DE LUSIGNAN S, et al. Who owns the data? Open data for healthcare[J]. Frontiers in Public Health, 2016, 4: 7.
- [16] NGET R, CAO Y, YOSHIKAWA M. How to balance privacy and money through pricing mechanism in personal data market [J]. arXiv:1705.02982, 2017.
- [17] HECKMAN J R, BOEHMER E L, PETERS E H, et al. A pricing model for data markets[EB/OL]. <http://hdl.handle.net/2142/73449>.
- [18] YANG M X, WANG J D, DOU Y. Study on the institutional progression of data factor participation in income distribution in the context of digital economy[J]. E-Government, 2022(2): 31-39.
- [19] OYLE D, MANLEY A. What is the value of data? A review of empirical methods [J]. Journal of Economic Surveys, 2024, 38(4): 1317-1337.
- [20] ACEMOGLU D, MAKHDOUNI A, MALEKIAN A, et al. Too much data; Prices and inefficiencies in data markets[J]. American Economic Journal: Microeconomics, 2022, 14(4): 218-256.
- [21] LI G Q. Conceptualization of ownership; A historical character of ownership in modern private law[J]. Modern Law Science, 2009(4): 4.
- [22] PINCHOT J, CHAWDHRY A A, PAULLET K. Data privacy issues in the age of data brokerage; An exploratory literature review[J]. Issues in Information Systems, 2018, 19(3): 92-100.
- [23] YU H, LIU Z, LIU Y, et al. A sustainable incentive scheme for federated learning[J]. IEEE Intelligent Systems, 2020, 35(4): 58-69.
- [24] ACEMOGLU D, MAKHDOUNI A, MALEKIAN A, et al. Too much data; Prices and inefficiencies in data markets[J]. American Economic Journal: Microeconomics, 2022, 14(4): 218-256.
- [25] GUDMUNDSSON J, HOUGAARD J L, KO C Y. Sharing sequentially triggered losses: Automated conflict resolution through smart contracts[J]. Management Science, 2024, 70(3): 1773-1786.
- [26] CONG M, YU H, WENG X, et al. A VCG-based fair incentive mechanism for federated learning[J]. arXiv:2008.06680, 2020.
- [27] YU H, LIU Z, LIU Y, et al. A sustainable incentive scheme for federated learning[J]. IEEE Intelligent Systems, 2020, 35(4): 58-69.
- [28] MARKS M. Biosupremacy; Big data, antitrust, and monopolistic power over human behavior[J]. UC Davis Law Review, 2021, 55: 513.
- [29] NUCCIO M, GUERZONI M. Big data; Hell or heaven? Digital platforms and market power in the data-driven economy [J]. Competition & Change, 2019, 23(3): 312-328.
- [30] FRIEDMAN D, SINERVO B. Evolutionary Games in Natural, Social, and Virtual Worlds [M]. Oxford: Oxford University Press, 2016.
- [31] JARAMILLO K A R. Game theoretical models for clustering and resource sharing in macro-femtocells networks [D]. Montréal: École de technologie supérieure, 2019.
- [32] YIN H, ZHANG Y H. The inheritance imperative; A game-theoretic analysis of reverse tacit knowledge transfer[J]. Journal of the Knowledge Economy, 2024, 15: 18884-18929.
- [33] XIAO J, BAO Y, WANG J, et al. Knowledge sharing in R&D teams: An evolutionary game model[J]. Sustainability, 2021, 13(12): 6664.
- [34] COHEN N, WENDEHORST C. ALI-ELI Principles for a Data Economy - Data Transactions and Data Rights (ELI Final Council Draft) [EB/OL]. https://www.principlesforadataeconomy.org/fileadmin/user_upload/p_principlesforadataeconomy/Files/Principles_for_a_Data_Economy_ELI_Final_Council_Draft.pdf.
- [35] DONG C, LIU J, MI J. How to enhance data sharing in digital government construction: A tripartite stochastic evolutionary game approach[J]. Systems, 2023, 11(4): 212.
- [36] GAO Y, ZHU Z, YANG J. An evolutionary game analysis of stakeholders' decision-making behavior in medical data sharing [J]. Mathematics, 2023, 11(13): 2921.
- [37] PANAGOPOULOS A, MINSSEN T, SIDERI K, et al. Incentivizing the sharing of healthcare data in the AI era[J]. Computer Law & Security Review, 2022, 45: 105670.
- [38] SHANG X X, HAN H T, ZHU Z Z. Mechanism design of right to earnings of data utilization based on evolutionary game model [J]. Computer Science, 2021, 48(3): 144-150.
- [39] RAINIE L, DUGGIN M. Privacy and Information Sharing [R]. Pew Research Center Internet Project, 2016.
- [40] BERESFORD A R, KÜBLER D, PREIBUSCH S. Unwillingness to pay for privacy: A field experiment[J]. Economics Letters, 2012, 117(1): 25-27.
- [41] BERTINO E, FERRARI E. Big data security and privacy[C]//

A Comprehensive Guide Through the Italian Database Research Over the Last 25 Years. Cham: Springer, 2017; 425-439.

- [42] ALNEYADI S, SITHIRASENAN E, MUTHUKKUMARASAMY V. A survey on data leakage prevention systems[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 62: 137-152.
- [43] SHABTAI A, ELOVICI Y, ROKACH L. Data Leakage Detection/Prevention Solutions [M]. Berlin: Springer, 2012.
- [44] SHEN Y. Data governance in China's platform economy[J]. China Economic Journal, 2022, 15(2): 202-215.
- [45] KONG L. Data protection and transborder data flow in the European and global context[J]. European Journal of International Law, 2010, 21(2): 441-456.
- [46] OHLHAUSEN M K, OKULIAR A P. Competition, consumer protection, and the right [approach] to privacy[J]. Antitrust Law Journal, 2015, 80: 121.
- [47] FERNANDEZ R C. Data-sharing markets: Model, protocol, and algorithms to incentivize the formation of data-sharing consortia [J]. Proceedings of the ACM on Management of Data, 2023, 1(2): 1-25.
- [48] SMITH J M. Evolution and the theory of games[J]. American Scientist, 1976, 64(1): 41-45.
- [49] YOUNG H P. The evolution of conventions[J]. Econometrica, 1993(61): 57-84.
- [50] YOUNG H P. Individual Strategy and Social Structure: An Evolutionary Theory of Institutions [M]. Princeton: Princeton University Press, 2020.
- [51] FUDENBERG D, LEVINE D K. The Theory of Learning in Games, Vol. 2 [M]. Cambridge: MIT Press, 1998.
- [52] WEIBULL J W. Evolutionary Game Theory [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1995.
- [53] BENNDORF V, NORMANN H T. The willingness to sell personal data[J]. The Scandinavian Journal of Economics, 2018,

120(4): 1260-1278.

- [54] ACQUISTI A, TAYLOR C, WAGMAN L. The economics of privacy[J]. Journal of Economic Literature, 2016, 54(2): 442-492.
- [55] HOWARD P N, GULYAS O. Data breaches in Europe: Reported breaches of compromised personal records in Europe, 2005-2014[EB/OL]. <https://ssrn.com/abstract=2554352>.
- [56] PRIYADHARSHINI G, SHYAMALA K. Strategy and solution to comply with GDPR: Guideline to comply major articles and save penalty from non-compliance[C]// 2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC). IEEE, 2018: 190-195.
- [57] ACQUISTI A, FRIEDMAN A, TELANG R. Is there a cost to privacy breaches? An event study[C]// ICIS 2006 Proceedings, 2006.
- [58] SASTRY S. Lyapunov stability theory[C]// Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control. 1999: 182-234.



SHANG Xixue, born in 1987, Ph.D., associate professor. Her main research interests include legal protection for personal data and regulation approach to digital economy.



QU Xiuwei, born in 1989, master, engineer. His main research interests include data governance and data marketplace.

(责任编辑:何杨)