

## 基于 SD 演化博弈模型的数字货币扩散演化仿真研究

胡 俏<sup>1</sup>, 齐佳音<sup>2,3</sup>

(1. 上海外国语大学 国际工商管理学院, 上海 201620; 2. 上海对外经贸大学 人工智能与变革管理研究院, 上海 201620;  
3. 北京邮电大学 可信分布式计算与服务教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘 要** 以区块链技术为基础的数字货币已成为数字时代发展的必然产物; 数字货币的去中心化和匿名性等特性而引发的风险问题已经引起了社会和学界的广泛关注; 如何在发挥数字货币优势的同时抑制数字货币不法活动以控制风险已经成为数字经济发展的重要问题. 本文通过构建民众“参与”和政府“监管”数字货币的博弈模型、开展博弈演化路径分析; 通过构建 SD 演化博弈流率基本入树模型, 开展数字货币演化扩散情景模拟分析, 探索博弈主体策略的动态演化过程及其反馈机制, 厘清政府监管行为与民众参与行为关系, 以寻找数字货币的有效监管策略. 结果显示: 数字货币具有较强的扩散能力, 政府对数字货币的适度监管一定程度上抑制了数字货币相关不法活动; 但政府采取强硬“监管”措施不能从根本上杜绝民众参与私人数字货币挖掘、交易或持有行为及其相关不法活动; 政府策略是否收敛于“监管”取决于政府监管所带来的综合社会效用, 对私人数字货币的严格监管可能影响私人数字货币参与合法的全球性商品贸易, 最终降低“监管”的综合社会效用. 经过深入探讨, 研究认为寻找私人数字货币的替代货币媒介, 推动私人数字货币交易向法定数字货币交易过渡, 推进法定数字货币成为数字货币主流是发挥数字货币应用优势同时控制数字货币风险的有效策略.

**关键词** 数字货币; 演化博弈; 扩散; 系统动力学

## Cryptocurrency diffusion evolution simulation based on SD evolution game model

HU Qiao<sup>1</sup>, QI Jiayin<sup>2,3</sup>

(1. School of Business and Management, Shanghai International Studies University, Shanghai 201620, China; 2. Institute of Artificial Intelligence and Change Management, Shanghai University of International Business and Economics, Shanghai 201620, China; 3. Ministry of Education Key Laboratory of Trustworthy Distributed Computing and Service, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** Blockchain-based cryptocurrency has become an inevitable product of the digital age. The risk problems caused by the decentralization and anonymity of cryptocurrency have attracted wide attention the society and academia. How to restrain the illegal activities of cryptocurrency while exerting the advantage of cryptocurrency to control the risk has become an important issue in the development of digital economy. This paper constructs a game model between the public's "participation" and the government's "regulation", and analyzes evolution path of the game. By constructing the SD evolutionary game flow rate basic in-tree model, this paper carries out cryptocurrency diffusion evolution simulation analysis, explores the "cumulative" dynamic replication process of the public's "participation" in cryptocurrency and the

收稿日期: 2020-07-09

**作者简介:** 胡俏 (1989—), 女, 江西南昌人, 博士研究生, 研究方向: 数字金融, 数字货币; 通信作者: 齐佳音 (1972—), 女, 陕西洛南人, 博士, 教授, 博士生导师, 国家自然科学基金重大研究计划项目、国家社会科学基金重大项目、国家自然科学基金重点项目主持人, 研究方向: 数据科学与管理决策, 数字金融, 人工智能与管理变革等.

**基金项目:** 2020 年中国 - 中东欧国家高校联合教育项目 (202033)

**Foundation item:** 2020 China Central and Eastern European Countries University Joint Education Project (202033)

**中文引用格式:** 胡俏, 齐佳音. 基于 SD 演化博弈模型的数字货币扩散演化仿真研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(5): 1211–1228.

**英文引用格式:** Hu Q, Qi J Y. Cryptocurrency diffusion evolution simulation based on SD evolution game model[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2021, 41(5): 1211–1228.

government's "regulation" of cryptocurrency, in an effort to figure out the inherent motive mechanism as well as efficient regulation of cryptocurrency diffusion. The result shows that cryptocurrency has a comparatively strong capability of diffusion, and the government's moderate regulation of cryptocurrency has restrained illegal criminal activities such as money laundering, drug trading and speculation in the meantime. However, the strict "regulation" measures taken by the government can not fundamentally eliminate activities of cryptocurrency trading, mining and holding; and therefore, the only way to supervise or even prohibit cryptocurrency is to find substitute currency medium for private cryptocurrency. Whether the government's strategy converges to "regulation" depends on the comprehensive social utility brought by its regulation, it may affect legal trades such as proper global trades using cryptocurrency, and the rapid diffusion as well as development of blockchain technology could serve to compromise the comprehensive social utility of "regulation". After in-depth discussion, it is considered that finding alternative monetary media for private cryptocurrency and promoting the transition from cryptocurrency transaction to legal digital currency transaction, forming legal digital currency as the mainstream, the digital currency system in which legal and private digital currencies compete and promote each other, is an effective strategy to exert the advantage of cryptocurrency application and control the risk of cryptocurrency at the same time.

**Keywords** cryptocurrency; evolutionary game; diffusion; system dynamics

## 1 引言

在亚太经合组织第二十七次领导人非正式会议上习近平总书记指出：“数字经济是全球未来的发展方向”。数字货币具有发行成本低、交易效率高等诸多优势，是数字经济发展的基础。发展数字经济，加快推动数字产业化，需要进一步推进数字货币应用。习近平总书记在《国家中长期经济社会发展战略若干重大问题》一文中也强调：“积极参与数字货币、数字税等国际规则制定，塑造新的竞争优势”<sup>[1]</sup>。数字货币的重要意义得到了党和政府的高度重视。然而，数字货币由于其数字化环境特性，若监管不当将会对经济社会发展产生极大的负面影响。

数字货币 (digital currency) 主要是以区块链技术为基础的采取分布式记账方法来进行挖掘、创建、发行和流通的新型电子货币<sup>[2]</sup>。早在 1977 年，奥地利出生的诺贝尔经济学奖得主 Friedrich 便提出了一个设想，即用自由市场驱动的机制竞争性地发行货币，从而使社会信任集中在可管理数量的货币上<sup>[3]</sup>。1983 年，Chaum 提出了一种具有匿名性和不可追踪并包含随机配对盲化签名关键技术的数字货币解决方案<sup>[4]</sup>。1988 年，Chaum 又提出了基于密码学的电子支付系统 E-cash<sup>[5]</sup>。2008 年，Nakamoto 第一次提出了基于区块链技术的电子现金系统构架理念，使数字货币进入大众视野，2009 年，比特币系统正式发布<sup>[6]</sup>。

通常说的数字货币一般是指加密数字货币，其按主权背书分为私人数字货币和法定数字货币。私人数字货币由非国家主体发行，在被法律支持、大众广泛接受的支付环境中使用，如比特币和以太坊<sup>[7]</sup>。法定数字货币是基于国家信用且一般由一国央行直接发行的数字货币，是法币的数字化形式，如我国发行的央行数字货币人民币。

从发展历史看，由于法定数字货币发展缓慢，央行数字货币等法定数字货币直到现在也仅仅进入试点阶段，尚未大规模推广，使得私人数字货币长期成为数字货币的主要形式。依靠私人数字货币所具有的去中心化和匿名性等特性，部分参与者借助私人数字货币开展不法活动或投机活动，严重干扰了社会经济稳定运行。为此，中国对私人数字货币实施了严格的监管制度，2013 年，中国央行发布关于防范比特币风险的通知；2017 年，中国央行再次发布禁令，禁止数字货币公开交易，禁止 ICO (initial coin offering 首次币发行)；2018 年，北京市监管单位禁止 STO (security token offering 证券型代币发行) 发行。中国严格的私人数字货币限制与监管措施在一定程度上制约了私人数字货币相关不法活动的开展，但同时也影响了数字货币正常应用，使部分数字货币企业迁离中国，抑制了中国数字经济发展。为此，如何对数字货币进行有效监管，在发挥数字货币应用优势同时，抑制数字货币相关不法活动，以控制数字货币发展风险，从而推进数字经济建设，是现阶段中国数字经济发展所面临的重要现实问题。考虑到现阶段央行数字货币等法定数字货币多处于试点阶段，私人数字货币仍是数字货币市场的主流，也是现有研究的重点，为此本研究仍以私人数字货币交易为研究对象。

数字货币的出现，降低了交易成本，提升了交易效率，是数字经济发展的基础。Balvers 认为数字货

币的去中心化和匿名性等特性, 大大降低了交易的成本, 提高了效率<sup>[8]</sup>; Raskin 指出私人数字货币可以提供多样性, 继而能给人们带来福利, 刺激一个地区的经济发展<sup>[9]</sup>. 陈文等提出数字货币的推出将有望以市场化手段破解移动支付交易数据治理难题, 推动国家数字经济发展战略的有效落地<sup>[10]</sup>. 陈燕红等则直接点明数字货币是数字经济时代数字金融体系的重要基础<sup>[11]</sup>.

数字货币具有诸多优势, 但是由于其去中心化和匿名性等特性, 其实际应用也存在诸多风险. Yermack 等学者认为诸如比特币这样的数字货币的投资者基本都将数字货币作为投机性的资产而不是货币<sup>[12]</sup>; Kristoufek 也认为数字货币的投资风险比较大<sup>[13]</sup>; Iwamura 认为随着数字货币的快速发展, 数字货币也导致了敲诈、洗钱、偷税漏税和非法交易的风险<sup>[14]</sup>. 此外, 诸多学者认为数字货币存在犯罪<sup>[14]</sup>、信用<sup>[15]</sup>、盗窃<sup>[16]</sup>、技术<sup>[17]</sup>、声誉<sup>[18]</sup>、金融<sup>[19,20]</sup>、投机<sup>[21]</sup>等方面的风险.

学界在对数字货币发展过程、作用优势及所存风险进行探索的基础上, 普遍认为应当对数字货币进行监管, 以规避数字货币风险. 在数字货币监管研究方面, 多数研究立足于国家等监管主体, 就数字货币监管必要性及其监管逻辑等进行了分析. 如 Albrecht 指出加密数字货币削弱了金融中介的重要性, 其匿名性和点对点的交易形式也为犯罪分子提供了可乘之机<sup>[22]</sup>; 黄锐指出诸如数字货币、智能合约等金融区块链技术应用的快速发展引发了新的金融风险, 这给我国现行的金融监管体系带来了一系列挑战<sup>[23]</sup>; 郭晓敏等更为明确地指出数字货币会对国家安全产生冲击, 认为对其加强监管是非常必要的<sup>[24]</sup>. 也有学者进一步就加密数字货币监管行政逻辑<sup>[25]</sup>、监管机制<sup>[26,27]</sup>、数字货币的国际标准规范<sup>[28]</sup>等方面进行了分析.

综上, 可以看出, 数字货币作为学界研究的热点, 学者们就数字货币的发展、优势、风险进行了深入的探讨, 并对其监管问题进行了丰富讨论, 这对于数字货币的发展有着积极意义. 然而, 如前文所言, 不仅数字货币交易本身存在风险, 数字货币监管也存在一定风险, 即过度的监管可能对数字经济发展产生阻碍, 但现有研究多立足于数字货币监管的积极效应进行考虑, 较少对数字货币加强监管后所可能造成的影响进行深入探讨, 也未能回答实施监管后数字货币交易主体可能的反应, 即强力的监管是否能够有效制止私人数字货币交易并抑制其相关不法活动? 也少有学者讨论数字货币交易参与者这一实践主体, 更未有研究将政府监管行为与数字货币交易参与者行为进行统筹考量. 这使得现有研究虽然提出了一系列数字货币监管方法与策略, 但却难以准确考量这些方法与策略对数字货币交易参与者所产生的影响. 数字货币交易参与者是数字货币的实际应用者, 其参与数字货币交易的行为直接影响数字货币发展, 监管策略效果的实现也离不开数字货币交易参与者的支持.

为此, 本文以私人数字货币活动中的两大主体“政府”和“民众”(指参与私人数字货币交易的民众)为研究对象, 通过民众“参与”数字货币和政府“监管”数字货币之间的博弈策略选择, 构建博弈模型, 并通过演化博弈复制动态方程和系统动力学(SD)演化博弈流率基本入树模型开展情景模拟分析, 以探索民众“参与”数字货币和政府“监管”数字货币决策的动态演化过程, 从而厘清政府“监管”行为与民众“参与”行为间关系, 并探讨其演化过程反馈机制, 最后结合研究提出数字货币监管有效策略, 以推进数字经济建设. 相对现有数字货币监管研究, 本文实现了以下拓展: 1) 相对现有数字货币监管研究以理论分析为主, 本文应用博弈论方法、系统动力学方法, 探讨主体间策略选择, 推进相关研究量化及可视化, 以探讨不同情景下数字货币监管问题相关主体策略选择的动态演进过程; 2) 相对现有数字货币监管研究以宏观层次的探讨为主, 本文在考虑政府监管行为的同时, 充分考量参与数字货币交易的民众这一基础主体, 深入研究政府监管行为与数字货币交易参与者间关系.

## 2 数字货币演化扩散博弈

### 2.1 博弈模型假设

博弈论(game theory)是研究分析理性个体在交互过程中采取最优策略选择的理论, 普遍认为, 经典博弈论起源于1944年由普林斯顿大学出版社出版的Neumann和Morgenstern的著作《Theory of games and economic behavior》<sup>[29]</sup>. 1950年, Nash提出了纳什均衡(Nash equilibrium), 指出个体并不能通过改变自身的策略而提高个人的得益<sup>[30]</sup>.

1973 年 Maynard Smith 等在 Nature (自然) 杂志上发表《动物冲突的逻辑》指出同一种动物之间的冲突通常是“有限战争”型的, 引入进化稳定策略 (ESS) 的概念来描述博弈的稳定状态, 通过博弈论和计算机模拟分析表明, “有限战争”策略对动物个体和物种都有利<sup>[31]</sup>. 1978 年, Taylor 等提出了复制动态方程 (replicator dynamics, 通常也叫动态复制方程), 通过微分方程组等模拟了连续和离散情景下的博弈动力学<sup>[32]</sup>. 1982 年, Maynard Smith 在剑桥大学出版社出版专著系统地解释了“有限理性”的个体 (动物或植物) 通过演化博弈的一个长期过程发展出普遍性的特征, 开辟了演化博弈论<sup>[33]</sup>. Rogers 认为, 扩散是一种新技术 (创新) 如何通过各种渠道在社会系统成员之间的时间和空间上传播<sup>[34]</sup>. 换句话说, 扩散是一系列采用决策的累积结果, 这些决策通常在不确定性和有限信息下实施. 如果扩散超过某一临界值或临界质量, 这项技术就有可能起飞并被广泛采用; 一项技术无法起飞, 往往是由于现有技术的惯性或是由于出现了一项更先进的技术.

下面通过建立数字货币主体博弈模型, 开展数字货币参与主体和监管主体的博弈研究. 在数字货币扩散的过程中, 主要有两个群体, 一个是参与数字货币挖掘、交易或持有的使用者, 即民众; 另一个是担任监督管理角色的政府. 为便于研究的进行, 做出以下假设:

**假设 1** 博弈主体假设: 博弈过程中的参与者为参与数字货币挖掘、交易或持有的民众和负责监督管理的政府; 民众追求自身得益最大化 (个人利益的实现), 政府追求社会效用最大化.

**假设 2** 政府策略行为假设: 政府在博弈的过程中, 会出现两种行为: 一是监管, 政府会对民众参与数字货币的行为和数字货币市场实施严格的监管措施, 如关闭数字货币交易所、严惩数字货币交易行为等; 二是不监管, 即政府对民众参与数字货币的行为采取非强制性措施; 政府的策略集为 {监管, 不监管}.

**假设 3** 民众策略行为假设: 民众在博弈的过程中, 会出现两种行为: 一是参与, 参与的方式主要有三种, 包括: 数字货币挖掘 (如挖矿)、数字货币持有 (低价买入高价卖出)、通过数字货币进行交易 (数字货币充当货币媒介在全球进行商品贸易交易); 二是不参与, 即民众不参与数字货币挖掘、持有和交易; 民众的策略集为 {参与, 不参与}.

**假设 4** 民众“参与”的得益相关参数假设: 民众参与挖掘所获得的数字货币数量为  $n_0$ ; 挖掘单个数字货币的净得益为  $P$ ; 民众通过数字货币等所有货币媒介进行商品交易的所有交易得益为  $Q$ ; 民众通过数字货币以外的其他货币媒介进行交易的得益为  $Q_0$ ; 民众持有数字货币的数量为  $n$ ; 数字货币的价格波动幅度为  $r$ .

**假设 5** 政府“监管”的综合效用相关参数假设: 政府采取“监管”策略所需要的成本投入为  $b$ ; 政府采取“监管”措施后, 为民众“参与”数字货币挖掘、交易或持有等活动带来了一定的障碍, 给民众依然选择“参与”数字货币挖掘、交易或持有等活动增加了额外的成本  $e$ ; 政府采取“监管”措施后带来的社会效用和额外成本  $e$  呈相关关系, 相关系数设为  $\mu$ ;  $\mu e$  为政府采取“监管”策略的综合社会效用.

**假设 6** 策略关联假设: 数字货币挖掘、持有和交易过程中, 可能会发生洗钱、毒品交易及投机等违法犯罪和扰乱金融秩序的活动, 进而降低社会综合效用, 现有研究已经证明了数字货币交易中可能存在诸多不法活动<sup>[35,36]</sup>; 政府采取“监管”措施后, 给民众参与数字货币的挖掘、交易和持有增加了障碍, 会给民众选择“参与”比特币挖掘、交易或持有等活动增加额外的成本  $e$ , 也能够打击数字货币交易中的洗钱、毒品交易及投机等违法犯罪和扰乱金融秩序的行为, 现有研究也都指出政府监管措施对于抑制数字货币相关不法行为的开展有着重要意义<sup>[37,38]</sup>; 但同时, 政府监管落实也有可能阻碍民众参与数字货币合法的挖掘、交易和持有, 一定程度上影响数字货币相关的合法商品交易活动和跨国贸易, 制约数字经济发展.

**假设 7** 比例假设: 民众参与数字货币挖掘、交易、或持有的比例为  $x$ ; 政府采取“监管”措施的比例为  $y$ . 基本符号说明如表 1 所示.

## 2.2 博弈模型

根据假设和基本符号表, 进而得出了民众在 {参与, 不参与}策略集下和政府在 {监管, 不监管}策略集下的得益矩阵如表 2.

表 1 基本符号表

变量符号	变量名称	变量解释
$x$	民众参与比例	民众参与私人数字货币挖掘、交易、或持有的比例
$n_0$	挖掘数量	参与挖掘所获得的私人数字货币数量
$P$	单个数字货币挖掘得益	挖掘单个私人数字货币的净得益
$Q$	数字货币交易得益	民众通过私人数字货币等所有货币媒介进行商品交易的所有得益
$Q_0$	非数字货币交易得益	民众通过私人数字货币以外的其他货币媒介进行交易的得益
$n$	民众数字货币持有量	民众持有私人数字货币的数量
$r$	数字货币价格波动幅度	私人数字货币的价格波动幅度
$y$	政府监管比例	政府采取“监管”策略的比例
$b$	政府监管投入	政府采取“监管”策略所需要的成本投入, $b > 0$
$e$	额外成本	政府采取“监管”措施后, 为民众参与私人数字货币挖掘、交易或持有等活动带来了一定的障碍, 给民众选择“参与”数字货币挖掘、交易或持有等活动增加了额外的成本, $e > 0$
$\mu$	政府“监管”综合社会效用系数	政府采取“监管”措施后带来的社会效用和额外成本 $e$ 的相关系数
$\mu e$	政府“监管”综合社会效用	政府采取“监管”策略的综合社会效用

表 2 民众“参与”数字货币和政府“监管”数字货币策略集下的得益矩阵

主体策略	政府监管	政府不监管
民众参与	$Q - Q_0 + nr + n_0P - e, \mu e - b$	$Q - Q_0 + nr + n_0P, 0$
民众不参与	$0, -b$	$0, 0$

根据民众“参与”数字货币和政府“监管”策略集下的得益矩阵, 得出民众“参与”和“不参与”策略下的期望得益  $E_{x1}$ 、 $E_{x2}$  和平均得益  $\overline{E_x}$  为:

$$E_{x1} = (Q - Q_0 + nr + n_0P - e)y + (Q - Q_0 + nr + n_0P)(1 - y), \quad (1)$$

$$E_{x2} = 0, \quad (2)$$

$$\overline{E_x} = E_{x1}x + E_{x2}(1 - x) = E_{x1}x. \quad (3)$$

同样的, 得出政府“监管”和“不监管”策略下的期望得益  $E_{y1}$ 、 $E_{y2}$  和平均得益  $\overline{E_y}$  为:

$$E_{y1} = (\mu e - b)x - b(1 - x), \quad (4)$$

$$E_{y2} = 0, \quad (5)$$

$$\overline{E_y} = E_{y1}y + E_{y2}(1 - y) = E_{y1}y. \quad (6)$$

得民众“参与”数字货币挖掘、交易或持有比例  $x$  的复制动态方程

$$\frac{\partial x}{\partial t} = x(E_{x1} - \overline{E_x}) = x(E_{x1} - E_{x1}x) = x(1 - x)[(Q - Q_0 + nr + n_0P - e)y + (Q - Q_0 + nr + n_0P)(1 - y)]. \quad (7)$$

得政府“监管”比例  $y$  的复制动态方程

$$\frac{\partial y}{\partial t} = y(E_{y1} - \overline{E_y}) = y(E_{y1} - E_{y1}y) = y(1 - y)[(\mu e - b)x - b(1 - x)]. \quad (8)$$

进一步有

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= x(1 - x)(Qy - Q_0y + nry + n_0Py - ey + Q - Q_0 + nr + n_0P - Qy + Q_0y - nry - n_0Py) \\ &= x(1 - x)(Q - Q_0 + nr + n_0P - ey), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = y(1 - y)(\mu ex - b). \quad (10)$$

得民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的复制动态方程组为

$$\begin{cases} F(x) = \frac{\partial x}{\partial t} = x(1 - x)(Q - Q_0 + nr + n_0P - ey), \\ F(y) = \frac{\partial y}{\partial t} = y(1 - y)(\mu ex - b). \end{cases} \quad (11)$$

根据变量内涵, 令  $a$  为民众参与数字货币挖掘、交易和持有的综合效用,  $d$  为政府采取“监管”策略的综

合社会效用, 则有:

$$\begin{cases} Q - Q_0 + nr + n_0P = a, \\ \mu e = d. \end{cases} \quad (12)$$

**命题 1** 复制动态方程组 (11) 的均衡点为  $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ , 当  $0 < a < e$ ,  $0 < b < d$  时,  $(x^*, y^*)$  也是复制动态方程组 (11) 的均衡点, 其中,  $x^* = \frac{b}{d}$ ,  $y^* = \frac{a}{e}$ .

**证明** 对于复制动态方程组 (11), 分别令  $F(x) = 0$ ,  $F(y) = 0$ , 得出  $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$  为系统 (11) 的均衡点. 当  $0 < a < e$ ,  $0 < b < d$  时, 令  $x^* = \frac{b}{d}$ ,  $y^* = \frac{a}{e}$ , 将  $(x^*, y^*)$  代入复制动态方程组 (11), 此时,  $F(x) = 0$ ,  $F(y) = 0$ . 故  $(\frac{b}{d}, \frac{a}{e})$  也是系统 (9) 的均衡点, 证毕.

### 2.3 演化路径分析

利用雅克比矩阵的局部稳定性对复制动态方程组 (11) 进行分析, 对复制动态方程组 (11) 的微分方程组依次求关于  $x$  和  $y$  的偏导数, 得雅克比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} (1-2x)(a-ey) & x(x-1)e \\ y(1-y)d & (1-2y)(dx-b) \end{bmatrix}.$$

则矩阵的行列式为:

$$\det J = (1-2x)(a-ey)(1-2y)(dx-b) - x(x-1)ey(1-y)d. \quad (13)$$

矩阵的迹为:

$$\text{tr} J = (1-2x)(a-ey) + (1-2y)(dx-b). \quad (14)$$

根据命题 1, 将均衡点  $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(\frac{b}{d}, \frac{a}{e})$  代入矩阵  $J$  的行列式和矩阵  $J$  的迹, 得矩阵的行列式和矩阵迹的表达式如表 3.

表 3 各均衡点的行列式和迹表达式

均衡点 $(x, y)$	矩阵行列式和迹的表达式
$(0, 0)$	$\det J = -ab$ , $\text{tr} J = a - b$
$(0, 1)$	$\det J = (a - e)b$ , $\text{tr} J = a - e + b$
$(1, 0)$	$\det J = -a(d - b)$ , $\text{tr} J = -a + d - b$
$(1, 1)$	$\det J = (a - e)(d - b)$ , $\text{tr} J = -(a - e) - (d - b)$
$(\frac{b}{d}, \frac{a}{e})$	$\det J = -ab(\frac{b}{d} - 1)(1 - \frac{a}{e})$ , $\text{tr} J = 0$

**命题 2** 均衡点  $(0, 1)$  和  $(\frac{b}{d}, \frac{a}{e})$  不是演化稳定点.

**证明** 因为  $b > 0$ , 假定  $\det J = (a - e)b$  满足  $\det J > 0$ , 则  $a > e$ , 则  $\text{tr} J = a - e + b > 0$ ; 依据演化博弈理论, 当均衡点满足  $\det J > 0$ ,  $\text{tr} J < 0$  时, 均衡点为演化稳定点; 因此均衡点  $(0, 1)$  无法同时满足  $\det J > 0$ ,  $\text{tr} J < 0$  的演化稳定点条件; 对于均衡点  $(\frac{b}{d}, \frac{a}{e})$ , 因为  $\text{tr} J = 0$ , 所以均衡点  $(\frac{b}{d}, \frac{a}{e})$  也无法满足  $\det J > 0$ ,  $\text{tr} J < 0$  的稳定点条件. 故均衡点  $(0, 1)$  和  $(\frac{b}{d}, \frac{a}{e})$  不是演化稳定点.

**命题 3** 在情景 (一) “ $a > 0$ ,  $d > b$ , 且  $a > e$ ” 条件下, 均衡点  $(1, 1)$  为演化稳定点; 在情景 (二) “ $a < 0$ ” 条件下,  $(0, 0)$  为演化稳定点; 在情景 (三) “ $a > 0$ ,  $d < b$ ” 的条件下,  $(1, 0)$  为演化稳定点.

**证明** 依据演化博弈理论, 当均衡点满足  $\det J > 0$ ,  $\text{tr} J < 0$  时, 均衡点为演化稳定点. 在情景 (一) “ $a > 0$ ,  $d > b$ , 且  $a > e$ ” 条件下, 有均衡点  $(1, 1)$  对应的  $\det J = (a - e)(d - b) > 0$ , 对应的  $\text{tr} J = -(a - e) - (d - b) < 0$ ; 因此, 在  $a > 0$  的情景下, 当  $d > b$ , 且  $a > e$  时, 均衡点  $(1, 1)$  为演化稳定点. 在情景 (二) “ $a < 0$ ” 条件下, 因为  $b > 0$ , 则有均衡点  $(0, 0)$  对应的  $\det J = -ab > 0$ ,  $\text{tr} J = a - b < 0$ ; 因此, 在  $a < 0$  的情景下, 均衡点  $(0, 0)$  为演化稳定点. 在情景 (三) “ $a > 0$ ,  $d < b$ ” 条件下, 有均衡点  $(1, 0)$  对应的  $\det J = -a(d - b) > 0$ , 对应的  $\text{tr} J = -a + d - b < 0$ ; 因此, 在  $a > 0$  的情景下, 当  $d < b$  时, 均衡点  $(1, 0)$  为演化稳定点.

### 3 情景模拟

上文就民众 “参与” 和政府 “监管” 数字货币演化博弈进行了深入探讨, 下面结合系统动力学方法就不同情景下数字货币监管主体策略选择动态演进过程进行仿真, 并结合仿真结果分析不同情景下主体策略选择的反馈机制, 而后进行监管策略探讨. 相对其它演化博弈仿真方法而言, 应用系统动力学方法对系统行为演化

进行仿真, 能为相关研究提供系统的、可视化的、更便捷的仿真调控模型, 能更为直观反映不同情景下相关主体策略选择的动态演进过程, 近年来被诸多学者认可, 并在诸多演化博弈仿真研究中得到应用<sup>[39-43]</sup>. 通过建立民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树仿真模型, 分别模拟和分析情景(一)、情景(二)、情景(三), 即“命题3在情景(一)条件下, 均衡点(1, 1)为演化稳定点; 在情景(二)条件下, (0, 0)为演化稳定点; 在情景(三)的条件下, (1, 0)为演化稳定点.”

### 3.1 SD 演化博弈流率基本入树仿真模型的建立

系统动力学起源于20世纪50年代Forrester及其同事在麻省理工学院斯隆管理学院的工作, 是一门研究系统动态复杂性的学科<sup>[44,45]</sup>, 也是研究复杂系统问题的有力工具. 孙庆文等对非对称演化博弈均衡进行了稳定性分析<sup>[46]</sup>. 贾晓菁等为使得流图模型的因果链、仿真方程、仿真程序、仿真数值结果间的内在关系能较好地展示出来, 提出了系统动力学运算过程图分析方法, 该方法能直观展示仿真数值计算过程及系统动态变化规律<sup>[47]</sup>. 冷碧滨等将复制动态方程组和系统动力学流率流位系结合起来, 创建了系统动力学演化博弈流率基本入树模型, 为系统行为演化特别是演化博弈复制动态方程组提供了系统的、直观的、便捷的仿真调控模型和方法<sup>[48,49]</sup>. 为了对数字货币扩散演化的路径进行系统、直观的调控仿真分析, 本文利用系统动力学演化博弈流率基本入树模型对民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈过程进行仿真和情景模拟研究. 系统动力学演化博弈流率基本入树模型构建的相关定理如下:

**定理1** 任意的演化博弈复制动态方程组

$$\begin{cases} F(x_1) = \frac{\partial x_1(t)}{\partial t} = f_1[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), b_1(t), b_2(t), \dots, b_q(t)], \\ F(x_2) = \frac{\partial x_2(t)}{\partial t} = f_2[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), b_1(t), b_2(t), \dots, b_q(t)], \\ \vdots \\ F(x_m) = \frac{\partial x_m(t)}{\partial t} = f_m[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), b_1(t), b_2(t), \dots, b_q(t)]. \end{cases}$$

( $m \geq 2$ ) 均可视为流位流率系下的微分方程组模型, 其流位流率系

$$\{(L_1(t), R_1(t)), (L_2(t), R_2(t)), \dots, (L_m(t), R_m(t))\}.$$

可表示为

$$\left\{ \left( x_1(t), \frac{\partial x_1(t)}{\partial t} \right), \left( x_2(t), \frac{\partial x_2(t)}{\partial t} \right), \dots, \left( x_m(t), \frac{\partial x_m(t)}{\partial t} \right) \right\}.$$

**定理2** 任意的演化博弈复制动态方程组

$$\begin{cases} F(x_1) = \frac{\partial x_1(t)}{\partial t} = f_1[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), b_1(t), b_2(t), \dots, b_q(t)], \\ F(x_2) = \frac{\partial x_2(t)}{\partial t} = f_2[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), b_1(t), b_2(t), \dots, b_q(t)], \\ \vdots \\ F(x_m) = \frac{\partial x_m(t)}{\partial t} = f_m[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), b_1(t), b_2(t), \dots, b_q(t)]. \end{cases}$$

( $m \geq 2$ ) 均可视为以流率变量  $\frac{\partial x_i(t)}{\partial t}$  为根, 以流位变量  $x_i(t)$  为尾, 且流位变量和常数(参数)直接控制流率变量  $\frac{\partial x_i(t)}{\partial t}$  的系统动力学流率基本入树模型.

根据系统动力学演化博弈流率基本入树模型的构建定理, 以及民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的复制动态方程组(11), 得民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的系统流位流率对为:

$x, \frac{\partial x}{\partial t}$ ——民众“参与”的比例及其变化量;

$y, \frac{\partial y}{\partial t}$ ——政府“监管”的比例及其变化量.

因此, 民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的复制动态方程组的流位流率系为  $\{(x, \frac{\partial x}{\partial t}), (y, \frac{\partial y}{\partial t})\}$ .

其中外生变量有:

挖掘数量  $n_0$ ; 单个数字货币挖掘得益  $P$ ;

数字货币交易得益  $Q$ ; 非数字货币交易得益  $Q_0$ ;



民众数字货币持有量  $n$ ; 数字货币价格波动幅度  $r$ ;

政府“监管”投入  $b$ ; 额外成本  $e$ ; 政府“监管”综合社会效用系数  $\mu$ .

进而得民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的复制动态方程组的流位流率系  $\{(x, \frac{\partial x}{\partial t}), (y, \frac{\partial y}{\partial t})\}$  下的流率基本入树模型如图 1.

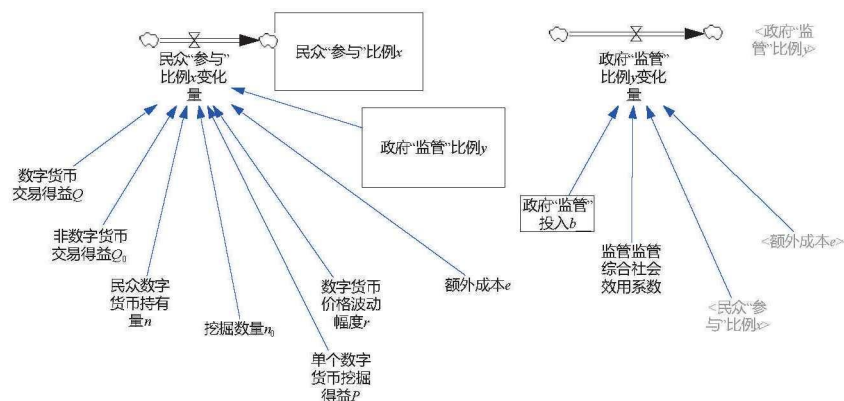


图 1 民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树模型

通过图 1 民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树模型, 能够非常直观地看出, 民众“参与”策略比例的影响因素有数字货币交易得益  $Q$ 、非数字货币交易得益  $Q_0$ 、民众数字货币持有量  $n$ 、数字货币挖掘量  $n_0$ 、单个数字货币挖掘得益  $P$ 、数字货币价格波动幅度  $r$  和政府采取“监管”措施给民众“参与”带来的额外成本  $e$  及政府“监管”的比例  $y$ . 政府“监管”策略比例的影响因素有政府采取“监管”策略的投入  $b$ , 政府采取“监管”措施给民众“参与”带来的额外成本  $e$  及政府“监管”综合社会效用得益系数  $\mu$  和民众“参与”的比例  $x$ .

### 3.2 情景分析

在初始值设定的基础上, 利用建立的系统动力学演化博弈流率基本入树模型, 来模拟命题 3 中的情景(一)、情景(二)、情景(三).

因为参与挖掘所获得的数字货币数量  $n_0$ , 单个数字货币的挖掘净得益  $P$ , 借助数字货币系统进行交易带来的得益  $Q$ , 通过数字货币外的其他货币进行交易的得益  $Q_0$ , 民众持有数字货币的数量  $n$ , 数字货币的价格波动幅度  $r$ , 政府的监管成本  $b$ , 政府采取监管措施后参与者交易成本增加值  $e$  和政府采取监管措施后综合社会效用系数  $\mu$  均为外生变量. 根据民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的复制动态方程组 (11) 和 (12), 进一步得民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树仿真模型简图如图 2.

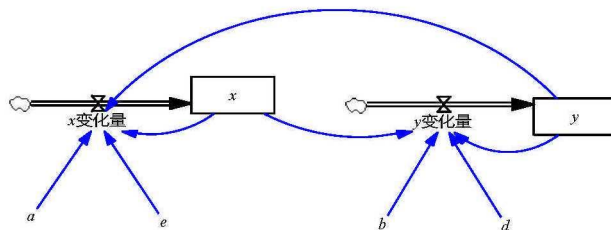


图 2 民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树仿真模型简图

#### 3.2.1 情景(一) 模拟分析

各国对比特币等加密货币的使用和交易的监管政策大多数仍然处于摸索阶段, 根据公开资料, 日本、西班牙、澳大利亚等国家和地区对私人数字货币持友好态度, 没有采取监管措施; 而中国、印度尼西亚等国家和地区对私人数字货币采取“严禁”等严格监管措施; 根据各国政府和地区现行公开的实际情况, 取政府“监管”比例  $y$  的初始值  $y = 0.2$ . 根据加密私人数字货币公开的相关数据和全球私人数字货币用户数, 取民众“参与”数字货币比例  $x$  的初始值  $x = 0.0031$ . 设  $Q - Q_0 + nr + n_0P = a$  为民众参与私人数字货币带来的交易得益、数字货币价格波动带来的得益和挖掘得益的总得益;  $\mu e = d$  为政府采取监管措施带来的综合社会

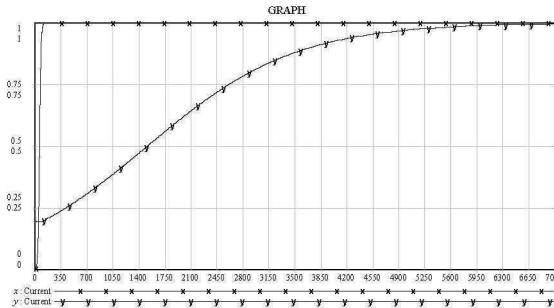


效用. 根据情景 (一) “ $a > 0, d > b$ , 且  $a > e$ ” 的条件, 取  $a = 0.1, e = 0.01, b = 0.001$ , 政府采取 “监管” 措施获得的综合社会效用系数  $\mu = 0.2$ ; 此时参数的设置满足情景 (一) 条件 “ $a > 0, d > b$ , 且  $a > e$ ”, 得民众 “参与” 和政府 “监管” 私人数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树模拟基本数据如表 4.

表 4 情景 (一) 模拟初始数据表

变量	$x$	$y$	$a$	$e$	$b$	$\mu$	$d$
取值	0.0031	0.2	0.1	0.01, 0.09	0.001	0.2	0.002

通过系统动力学 Vensim 程序, 将表 4 数据输入民众 “参与” 和政府 “监管” 数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树仿真模型, 得民众 “参与” 比例  $x$  和政府 “监管” 比例  $y$  的演化仿真结果如图 3.

图 3 情景一 ( $e = 0.01$ ) 演化路径

从图 3 民众 “参与” 和政府 “监管” 数字货币演化扩散仿真曲线图可以看出, 在时间节点  $t = 100$  左右的时候, 民众会以 1(100%) 的比例采取 “参与” 策略. 政府会在  $t = 7000$  左右的时候, 以 1(100%) 的比例采取 “监管” 策略, 政府的策略会收敛于 “监管”; 但是, 在政府策略收敛于 “监管” 策略的情景下, 民众的收敛策略依然是 “参与”; 这表明政府在采取 “监管” 策略的情况下, 民众依然选择 “参与” 数字货币交易等活动, 即政府监管措施并没有发挥预期效果, 并没有对民众选择产生显著影响; 这进一步验证了命题 3 中的在 “ $a > 0, d > b$ , 且  $a > e$ ” 的条件下, 均衡点 (1, 1) 为演化稳定点.

情景模拟显示, 在时间节点  $t = 100$  左右的时候, 民众会以 1(100%) 的比例采取 “参与” 策略, 这显示数字货币具有较强的扩散能力. 同时, 进一步发现, 在政府策略于  $t = 7000$  左右的时候以 1(100%) 的比例采取 “监管” 策略的情景下, 民众的收敛策略依然是 “参与”.

为全面直观分析各调控参数及变量和系统动态演化的相互作用关系, 根据  $Q - Q_0 + nr + n_0P = a$  和  $\mu e = d$ , 结合图 2 民众 “参与” 和政府 “监管” 数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树仿真模型简图, 构建民众 “参与” 和政府 “监管” 数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树仿真模型系统结构如图 4.

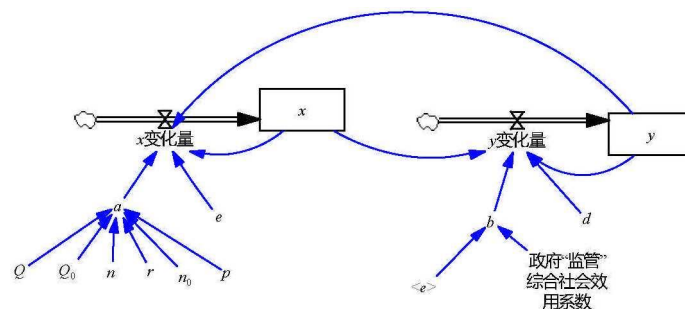


图 4 系统动力学演化博弈流率基本入树模型结构图

结合情景 (一) 的条件 “ $a > 0, d > b$ , 且  $a > e$ ”, 不难发现, 以区块链为基础的数字货币, 为全球商品交易的结算等带来了便利, 大大降低了交易费用和交易成本, 以数字货币为媒介的交易带来了额外的得益  $Q - Q_0$ ; 同时, 从近年来看, 虽然数字货币经历了涨涨跌跌, 经历了大起大落, 但从 2009 年至今, 数字货币总的价格趋势是不断增长, 给数字货币持有者带来了额外的得益  $nr$ ; 另外, 如果民众参与数字货币的挖掘, 能给民众带来挖掘得益, 这就为情景 (一) “ $a > 0$ ” 提供了条件. 而政府现有诸如关闭数字货币交易所、宣传数字货币风险等监管措施并没有给参与者带来较高的额外成本  $e$ , 这为情景 (一) 的条件 “ $a > e$ ” 提供了可能. 从政府角

度看, 虽然民众“参与”数字货币的积极性不断提升, 但是采取诸如关闭数字货币交易所、宣传数字货币风险等监管措施在一定程度上能够增加参与者的投入成本  $e$ . 随着政府监管措施的实施, 数字货币交易所关闭将直接制约数字货币投机、洗钱等违法活动的展开, 且相应风险宣传将提高数字货币交易参与者的防范意识并增强其对违法成本的认识, 从而在一定程度上打击数字货币的投机、洗钱等违法活动, 得以在一定程度上提升政府“监管”的综合社会效用  $d$ , 这为情景 (一) 的条件 “ $d > b$ ” 又创造了可能.

进一步地, 取  $e = 0.09$ , 即提升政府监管手段的效能, 得民众“参与”比例  $x$  和政府“监管”比例  $y$  的演化仿真结果, 如图 5. 此时, 政府收敛于“监管”的策略加快, 民众收敛于“参与”的策略放缓; 这表明, 政府对数字货币的适度监管一定程度上给民众“参与”数字货币交易等活动设置了更多的障碍, 提高了民众“参与”私人数字货币的交易成本, 在不考虑其他因素影响情况下, 政府监管措施能在一定程度上抑制民众“参与”私人数字货币交易的行为. 随着民众“参与”私人数字货币交易成本上升, 民众“参与”积极性将有所下降, 相应私人数字货币交易也将减少, 使得数字货币相关不法活动开展空间缩小, 从而在一定程度上抑制通过数字货币开展的洗钱、毒品交易和投机等不法活动.

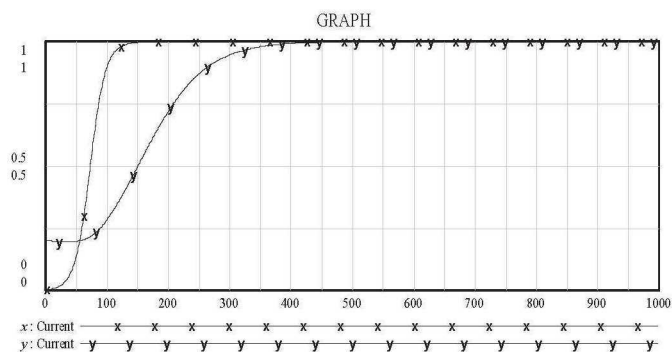


图 5 情景一 ( $e = 0.09$ ) 演化路径

### 3.2.2 情景 (二) 模拟分析

上文模拟了  $a > e$  及情景 (一) 的情形, 下面调整  $a$  和  $e$  之间的关系来模拟  $a < e$  及情景 (二). 在其他变量不变的情况下, 即  $x$  初始值取  $x = 0.0031$ , 初始值  $y = 0.2$ ,  $a = 0.1$ ,  $b = 0.001$ ; 通过调整  $a$  和  $e$  之间的关系来模拟  $a < e$  及情景 (二), 取  $e = 0.15$  和  $e = 0.5$ , 政府采取“监管”措施获得综合社会效用系数  $\mu = 0.2$ .  $a < e$  情景下民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树模拟仿真基本数据表 5.

表 5 情景 (二) 模拟初始数据表

变量	$x$	$y$	$a$	$e$	$b$	$\mu$	$d$
取值	0.0031	0.2	0.1	0.15, 0.5	0.001	0.2	0.02, 0.03, 0.1

假如政府对数字货币采取更强硬的监管措施, 给民众参与比特币交易、挖掘和持有活动造成更大的障碍和困难, 使得民众增加的额外成本为  $e = 0.15$  和  $e = 0.5$ , 得民众“参与”比例  $x$  和政府“监管”比例  $y$  的演化仿真结果如图 6.

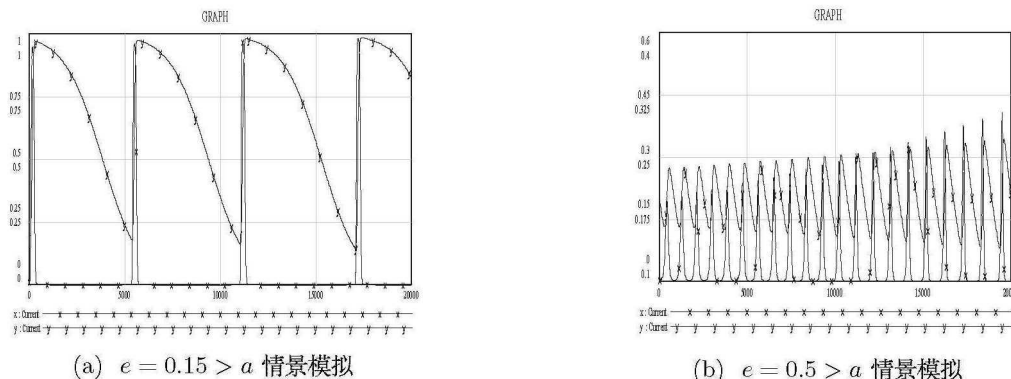


图 6  $e > a$  情景演化路径

通过图 6 可知, 当政府对数字货币采取强硬“监管”策略后, 给民众参与数字货币交易等活动造成了更大的障碍, 即大幅度提高民众参与数字货币活动的成本  $e$ , 民众的“参与”策略和政府的“监管”策略是震荡起伏的. 结果显示, 政府的强硬“监管”措施并没有让民众“参与”数字货币交易活动的比例收敛于  $x = 0$ , 民众的策略并没有收敛于“不参与”. 这表明, 在不考虑其他因素的情况下, 政府采取强硬“监管”措施并不能从根本上扼制数字货币交易等活动, 大幅度提高民众参与数字货币的额外成本  $e$  并不能从根本上扼制数字货币交易等活动, 也无法有效控制相关的非法活动; 这也进一步解释了为何部分国家对数字货币没有采取强硬监管措施, 而是选择观望等保守态度并积极考虑研发央行数字货币.

进一步的, 在  $e > a$  情景下, 通过降低民众“参与”数字货币交易带来的额外得益、数字货币价格波动带来的得益和挖掘得益的综合效用  $Q - Q_0 + nr + n_0P = a$ , 进一步模拟  $e > a$  的情景, 取  $a = -0.01$  即在满足情景 (二) 的条件“ $a < 0$ ”下, 得演化结果如图 7.

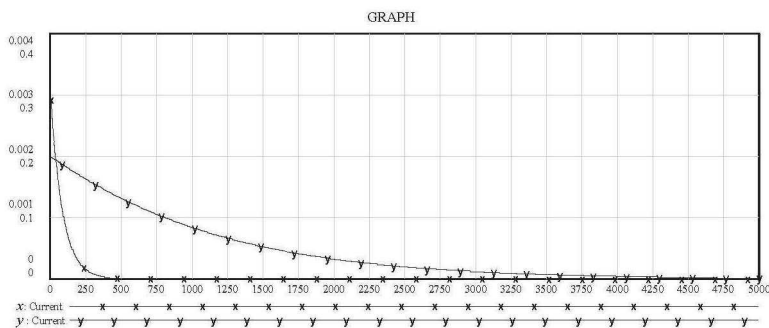


图 7 情景二 ( $a = -0.01$ ) 演化路径

由图 7 可知, 通过降低民众“参与”数字货币交易带来的额外得益、数字货币价格波动带来的得益和挖掘得益的总和  $Q - Q_0 + nr + n_0P = a$  到  $a = -0.01$  时, 民众的最终策略收敛于“不参与”. 根据“情景 (二):  $a < 0$ . 当  $a < 0$  时, 因为  $b > 0$ , 则有均衡点  $(0, 0)$  对应的  $\det J = -ab > 0$ ,  $\text{tr} J = a - b < 0$ ; 因此, 在  $a < 0$  的情景下, 均衡点  $(0, 0)$  为演化稳定点.”这也就进一步验证了命题 3 “在情景 (二) “ $a < 0$ ” 条件下,  $(0, 0)$  为演化稳定点”.

同时, 通过分析可知, 降低  $Q - Q_0 + nr + n_0P = a$  到负值, 可以使民众最终的策略收敛于“不参与”. 因此, 可以通过提升  $Q_0$  和降低  $Q + nr + n_0P$  来推动民众策略收敛于“不参与”. 由  $Q - Q_0 + nr + n_0P = a$  可知, 要实现民众策略收敛于“不参与”策略, 有四个途径: 一是提升通过私人数字货币外的其他货币进行交易得益  $Q_0$ , 二是降低借助私人数字货币系统进行交易带来的得益  $Q$ ; 三是降低民众持有私人数字货币带来私人数字货币价格波动的额外得益  $nr$ , 四是降低私人数字货币挖掘得益  $n_0P$ .

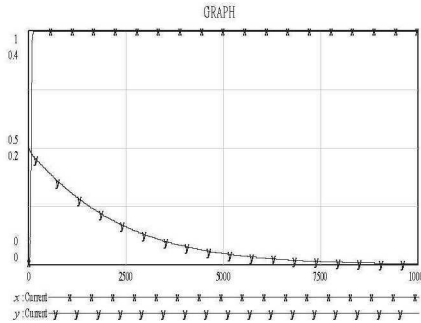
而现实情况中, 降低民众持有数字货币带来数字货币价格波动的额外得益  $nr$  和挖掘的得益  $n_0P$  等“堵”的方式不可行, 因为现在没有法律支持没收或注销数字货币账户; 事实上, 政府没收和注销数字货币账户的事件尚未发生过. 所以, 应当考虑通过引导民众从利用私人数字货币进行交易过渡到利用其他货币媒介交易, 进而提升通过私人数字货币外的其他货币进行交易的得益  $Q_0$ , 降低借助私人数字货币系统进行交易的得益  $Q$  以更好的限制民众参与私人数字货币交易. 这就需要私人数字货币的替代货币媒介, 以方便民众在全球范围内进行交易; 因此, 现阶段急需一种可替代的受认可的有锚地的法定数字货币来替代私人数字货币. 结合上文“政府采取强硬‘监管’措施不能从根本上扼制数字货币的交易等活动”的结论, 进一步可知, 寻找私人数字货币的替代货币媒介是政府有效监管私人数字货币的唯一出路和办法, 这也为非完全去中心化的 Libra 等数字货币寻找“法律执照”和推广提供了条件. 综上, 对数字货币采取禁止的这种完全“堵”的监管方式难以取得预期效果, 要监管禁止数字货币, 唯一的方式就是寻找到一种合法的、认可接受度高的其他货币媒介, 以便参与者能在全球范围内进行低成本的、便捷的贸易往来.

### 3.2.3 情景 (三) 模拟分析

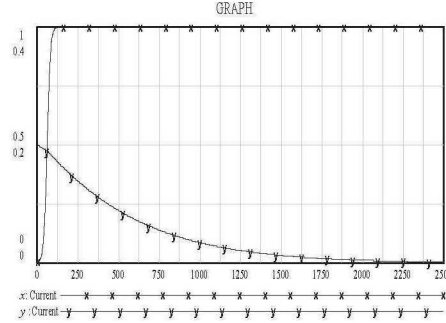
在其他变量不变的情况下, 即  $x$  初始值取  $x = 0.0031$ ,  $y$  的初始值  $y = 0.2$ ,  $a = 0.1$ ,  $e = 0.01$ ,  $b = 0.001$ , 通过调控政府采取“监管”措施获得的综合社会效益的系数  $\mu$  来模拟  $d < b$  的情景即情景 (三). 分别取

$\mu = 0.05$  和  $\mu = -0.1$  得民众“参与”比例  $x$  和政府“监管”比例  $y$  的演化仿真结果如图 8.

通过调控政府采取“监管”措施获得社会效用的系数  $\mu$  取  $\mu = 0.05$  和  $\mu = -0.1$ , 即模拟  $d = 0.0005 < b = 0.001$  和  $d = -0.001 < b = 0.001$  的情景, 结果如图 8, 在  $a = 0.1 > 0$ , 及  $d < b$  的情景下,  $(1, 0)$  为演化稳定点, 这就验证了命题 3 在情景 (三) “ $a > 0, d < b$ ”的条件下,  $(1, 0)$  为演化稳定点. 至此, 情景 (一)、情景 (二)、情景 (三) 的模拟全面验证了命题 3 “在情景 (一) “ $a > 0, d > b$ , 且  $a > e$ ”条件下, 均衡点  $(1, 1)$  为演化稳定点; 在情景 (二) “ $a < 0$ ”条件下,  $(0, 0)$  为演化稳定点; 在情景 (三) “ $a > 0, d < b$ ”的条件下,  $(1, 0)$  为演化稳定点.



(a)  $\mu = 0.05$  情景模拟



(b)  $\mu = -0.1$  情景模拟

图 8 情景三演化路径

图 8 模拟结果显示, 当降低政府的监管效用  $d$  时, 政府的策略会收敛于“不监管”; 在政府策略收敛于“不监管”策略的情景下, 民众的收敛策略依然是“参与”. 结合图 4 民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树仿真模型系统结构及图 8 结果可知, 政府的策略是否收敛于“监管”取决于政府采取“监管”后所带来的综合社会效用  $\mu e = d$ . 事实上, 政府不仅仅关心数字货币对社会的负面影响, 也会考虑其可能产生的积极作用. 就目前来看, 部分国家没有对数字货币采取“监管”措施, 而是持中立的观望态度; 这是因为对数字货币的监管和打击有可能影响到通过数字货币进行正当的商品交易以及正常的国际贸易往来, 也有可能打击到数字货币核心技术区块链技术的扩散和发展, 最终降低政府采取“监管”措施的综合社会效用  $d$ .

### 3.2.4 情景仿真总结

通过情景模拟, 可知:

1) 在政府策略收敛于“监管”策略的情景下, 民众的收敛策略依然是“参与”; 这表明政府在采取“监管”策略的情况下, 民众依然选择“参与”数字货币交易等活动; 说明数字货币具有较强的扩散能力, 政府对民众“参与”数字货币活动的“监管”没有从根本改变民众的“参与”策略.

2) 虽然民众“参与”数字货币的积极性不断提升, 但是采取关闭数字货币交易所、宣传数字货币风险等监管措施在一定程度上能够增加参与者的投入成本  $e$ , 从而打击数字货币相关的投机、洗钱等违法犯罪活动.

3) 提升政府采取“监管”措施给民众“参与”数字货币交易等活动带来的额外成本, 政府收敛于“监管”策略的速度会加快, 民众收敛于“参与”策略的速度会放缓; 政府对数字货币的适度监管一定程度上给民众“参与”数字货币交易等活动设置了障碍, 打击了民众“参与”数字货币交易等活动的积极性, 也抑制了通过数字货币进行的洗钱、毒品交易和投机等违法犯罪活动. 但即使政府采取强硬的“监管”措施, “监管”措施能够大幅度提高民众参与数字货币的成本, 民众的策略也没有趋于“不参与”, 而是和政府的“监管”策略一般震荡起伏, 显然, 政府强硬的“监管”措施并没有从根本上扼制数字货币交易活动. 这进一步证明了即使是强硬的“监管”也不能从根本上杜绝数字货币的交易、挖掘和持有等活动.

4) 通过降低民众“参与”数字货币交易带来的额外得益、数字货币价格波动带来的得益和挖掘得益, 能够有效抑制民众“参与”数字货币活动的积极性, 是民众策略最终收敛于“不参与”收敛条件. 情景模拟仿真结果显示, 引导民众从私人数字货币交易逐步过渡到其他货币媒介交易, 进而提升通过私人数字货币外的其他货币进行交易的得益  $Q_0$ , 提升通过私人数字货币外的其他货币进行交易的得益  $Q_0$  是民众“不参与”私人数字货币持有、交易和挖掘等活动的唯一途径.



5) 通过调控政府采取“监管”措施获得综合社会效用的系数, 分析发现政府的策略是否收敛于“监管”取决于政府监管所带来的综合社会效用. 对数字货币的监管一定程度上能够打击通过数字货币进行的洗钱、毒品交易等违法犯罪活动, 从而提高综合社会效用; 但是也有可能影响到参与者通过数字货币进行的正当的贸易活动和阻碍区块链技术的扩散和发展, 从而降低政府“监管”的综合社会效用; 这是部分国家采取观望态度, 选择“不监管”策略的原因.

### 3.3 系统反馈机制分析

系统动力学认为系统的行为模式与特性主要取决于其内部的动态结构与反馈机制. 下面结合上节情景仿真分析情况就民众“参与”和政府“监管”数字货币演化博弈系统的主体间反馈机制进行分析.

结合实际可知, 造成情景仿真过程中各主体策略选择变动的根本在于主体利益, 民众和政府都是为了实现主体利益, 即民众追求自身得益最大化, 政府追求社会效用最大化. 参与挖掘所获得的数字货币数量等外生变量也是通过影响民众和政府的主体利益而对最终博弈结果产生影响.

在演化过程中, 政府“监管”对民众“参与”产生负反馈, 即政府对私人数字货币活动实施监管会增加民众参与活动的成本, 造成民众参与意愿下降, 这是由于民众作为理性经济人其目的是追求个人得益, 当成本增加, 出于自身得益考量, 其参与意愿相对下降; 而民众“参与”对政府“监管”的反馈极性同样取决于利益变动. 当民众“参与”私人数字货币活动时, 若私人数字货币相关不法活动造成的综合社会效用损失大于数字货币活动带来的综合社会效用, 民众“参与”对政府“监管”则产生正反馈, 此时民众“参与”行为造成综合社会效用损失, 出于利益考虑, 政府将采取监管措施以降低社会综合效用损失. 相反, 民众“参与”对政府“监管”则产生负反馈. 下面, 结合仿真图像就政府“监管”与民众“参与”反馈情况进行分析.



图9 系统主体反馈情况分析

从情景一的仿真图3和图5可以看出, 随着民众“参与”意愿不断提高, 政府“监管”意愿也不断增强, 即  $X$  曲线收敛于1的速度快于  $Y$  曲线, 因为当民众“参与”意愿提高, 数字货币活动也将增加, 相关不法活动随之活跃, 而这将影响社会经济稳定, 造成综合社会效用损失, 为保障综合社会效用, 政府“监管”意愿将提升, 即民众“参与”对政府“监管”则产生了正反馈. 此时, 民众“参与”数字货币活动造成了综合社会效用损失, 从而促使政府采取监管措施.

从情景二的图6可以看出, 在仅考虑数字货币活动中政府与民众两个主体的情况下, 政府“监管”对民众“参与”产生了负反馈, 能够抑制民众“参与”意愿, 但是由于系统反馈内延迟存在, 使得政府“监管”效果在一段时期后才对民众“参与”行为产生抑制. 图6显示在一段时期后  $X$  曲线达到峰值开始下落, 因为在峰值之前政府“监管”效果尚未显现, 当政府“监管”效果显现之时, 民众“参与”成本增加, 其参与意愿将减少, 即  $X$  曲线趋于下行, 此时政府“监管”对民众“参与”产生了负反馈. 民众“参与”对政府“监管”则产生正反馈, 民众“参与”私人数字货币交易会造数字货币交易相关不法活动的活跃, 从而造成政府所期望的综合社会效用下降, 为保障主体利益, 政府将进一步采取强有力的监管活动, 但是由于系统内延迟的存在, 使得政府“监管”往往落后于民众“参与”, 当民众“参与”达到高峰时, 政府“监管”意愿将在其之后达到高峰, 故  $Y$  曲线峰值往往接近于  $X$  曲线峰值后, 此时民众“参与”对政府“监管”则产生了正反馈. 当政府“监管”效果显现, 由于成本增加, 民众“参与”意愿降低, 相关不法活动减少, 政府出于节省成本考量, 其“监管”意愿逐渐下降. 此时, 由于“监管”弱化, 数字货币活动成本降低, 出于利益考量, 民众“参与”意愿提升, 由此又进一步带来数字货币不法活动的活跃, 并再次引起政府“监管”的强化. 由于主体间信息沟通及系统反馈延迟的存在, 且主体对自身利益的追求具有持久性, 为此,  $X$  曲线与  $Y$  曲线处于震荡扩散状态. 情景二中的

图 7, 显示出由于民众“参与”私人数字货币的得益为负, 其“参与”意愿下降, 在图中显示为  $X$  曲线的下降, 而由于民众“参与”意愿降低, 相关不法活动所活动的空间减少, 政府的综合社会效用得以保障, 再加上监管成本的存在, 使得政府“监管”意愿也随之降低, 再次反映出民众“参与”对政府“监管”产生的正反馈。

情景三图 8 中民众“参与”意愿提高, 政府“监管”意愿下降, 这是由于此情景下数字货币正当交易活动所能带来的综合社会效用要高于其相关不法活动可能带来的综合社会效用损失, 此时对数字货币实施“监管”将影响其合法的商务活动, 制约数字经济发展, 从而造成综合社会效用损失, 政府出于综合社会效用最大化考虑, 不愿实施监管。此时民众“参与”对政府“监管”产生负反馈, 即当民众参与数字货币活动, 发挥数字货币优势能够提升综合社会效用时, 民众参与意愿越高, 政府所获得综合社会效用越高, 政府监管意愿越低。

### 3.4 策略讨论

现有研究多数要求对私人数字货币交易实施监管, 并从数字货币监管的逻辑、路径、方法、策略进行了分析, 以制约数字货币相关不法活动。但是现有研究忽略了民众的策略选择, 没有充分考量各种监管策略下民众的行为。

根据本研究情景仿真结论 (1)、(2)、(3) 可知, 仅仅通过加强监管的方式是难以有效控制私人数字货币中存在的的天活动。根据研究可知数字货币具有较强的扩散能力, 虽然政府“监管”对民众“参与”会产生负反馈, 但是政府对民众“参与”数字货币活动的“监管”没有从根本改变民众的“参与”策略; 且即使政府采取强硬的“监管”措施, “监管”措施能够大幅度提高民众参与数字货币的成本, 但民众的“参与”策略和政府的“监管”策略却是震荡起伏的, 政府采取的强硬“监管”措施并不能从根本上扼制数字货币交易等活动, 大幅度提高民众参与数字货币的额外成本并不能从根本上扼制数字货币交易等活动; 而私人数字货币交易的存在使得数字货币不法活动依然存在活动空间, 因此, 仅仅通过加强监管是无法有效的控制私人数字货币相关不法活动。

根据本研究情景仿真结论 (4)、(5) 可知, 民众参与行为及政府监管行为主要受利益驱动, 数字货币的有效监管策略应当引导民众与政府利益, 以实现数字货币交易活动的正常进行, 并有效抑制不法活动开展。根据研究可知, 通过降低民众“参与”数字货币交易带来的额外得益、数字货币价格波动带来的得益和挖掘得益, 能够有效抑制民众“参与”数字货币活动的积极性, 使得民众策略最终收敛于“不参与”; 政府的策略是否收敛于“监管”取决于政府监管所带来的综合社会效用, 当数字货币交易造成综合社会效用损失时, 民众“参与”对政府“监管”产生正反馈, 政府将采取监管以减少民众“参与”从而保障综合社会效用, 当数字货币交易能够提升综合社会效用时, 民众“参与”对政府“监管”产生负反馈, 政府此时没有实施监管的动力。有效的发展策略应当通过降低民众“参与”私人数字货币交易得益以引导民众自发退出私人数字货币交易, 并保障政府所期望的综合社会效用。

正如前文分析, 单纯的“堵”难以有效控制民众参与私人数字货币交易, 应当考虑通过引导民众从利用私人数字货币进行交易过渡到利用其他货币媒介进行交易, 进而提升通过私人数字货币外的其他货币进行交易的得益  $Q_0$ , 降低借助私人数字货币系统进行交易的得益  $Q$ 。这样, 在利益的趋势下, 民众将逐步自发退出私人数字货币交易, 而失去了足够的参与者, 依托于私人数字货币市场的不法活动也将随之减少。

为此, 要实现数字货币的有效监管, 在发挥数字货币应用优势同时控制数字货币风险, 寻找私人数字货币的替代货币媒介是唯一途径和办法, 即加快研究和发行法律上公允的, 技术上先进的, 操作上便捷的, 并能在全球范围内进行低成本贸易往来的货币媒介, 如具有信任基础的、价值锚定的法定数字货币, 例如我国的央行数字人民币等, 推动私人数字货币交易向法定数字货币交易过渡, 推进法定数字货币成为数字货币活动主流。一方面, 央行数字人民币等法定数字货币的使用保障了数字货币应用优势, 得以有效降低经济活动成本, 并促进交易效率提升, 数字货币参与者借助法定数字货币进行合法交易得以实现其利润增长; 同时, 在法定数字货币推行下私人数字货币交易利润必将受到影响, 从而有利于降低民众参与私人数字货币交易的积极性, 以限制私人数字货币相关不法活动的开展; 另一方面, 相对私人数字货币, 央行数字人民币等法定数字货币监管更为便利, 有助于抑制部分数字货币交易参与者依托数字货币去中心化和匿名性等特性所开展的不法活动。此外, 法定数字货币应用确保了数字货币优势得以继续发挥, 有利于推进数字经济发展, 保障综合社会效用。尤其央行数字人民币等法定货币的货币政策执行力要远高于私人数字货币, 其更能保障数字经济平稳

发展.

#### 4 结语

数字货币的快速发展已经引起了各国政府、相关金融机构和社会的广泛关注,如何发挥数字货币应用优势同时控制数字货币相关不法活动给经济社会带来的风险已经成为数字经济发展的重大问题.本文以私人数字货币活动中的政府和民众为研究对象,通过民众“参与”和政府“监管”之间的博弈策略选择,结合SD演化博弈模型开展民众“参与”数字货币和政府“监管”数字货币的路径仿真分析和情景模拟,探索了民众“参与”数字货币和政府“监管”数字货币决策的动态演化过程,认为:

1) 在现有条件下,数字货币具有较强的扩散能力,民众“参与”数字货币的积极性越来越高;在政府策略收敛于“监管”策略的情景下,民众的收敛策略依然是“参与”,显示以区块链为基础的数字货币,既为全球商品交易的结算等带来了便利,同时,以比特币等为代表的数字货币价格总体上不断上涨,为数字货币的持有和挖掘带来了额外的收入;这给民众参与数字货币的交易、持有及挖掘提供了扩散的条件和快速动态复制的土壤.随着数字时代和数字货币的快速发展,拥抱数字时代、数字货币和区块链等新兴技术成为中国数字经济发展的必然选择.

2) 政府的策略是否收敛于“监管”取决于政府监管所带来的综合社会效用,政府对数字货币的适度监管一定程度上打击了民众“参与”数字货币交易等活动的积极性,抑制了通过数字货币洗钱、进行毒品交易和投机等违法犯罪活动;但是也有可能影响到通过数字货币进行正当的全球贸易和阻碍区块链技术的快速扩散和发展,从而降低“监管”的综合社会效用;这是全球部分国家采取观望态度甚至“暧昧”态度等“不监管”的原因;建议在监管的措施上需要更加谨慎、精准.

3) 通过SD演化博弈流率基本入树模型,开展了 $a > e$ 和 $a < e$ 的全景模拟,模拟了情景(一)、情景(二)、情景(三)外的情景“ $e = 0.15 > a = 0.1$ 和 $e = 0.5 > a = 0.1$ ”,得出了“政府采取强硬的监管措施不能从根本上杜绝私人数字货币的交易、挖掘和持有等活动;寻找私人数字货币的替代货币媒介,推动私人数字货币交易向法定数字货币交易过渡,推进法定数字货币成为数字货币主流是发挥数字货币应用优势同时控制数字货币风险的有效策略.”这一结论.建议疏堵结合,加快研究和发行法律上公允的,技术上先进的,操作便捷的,并能在全球范围内进行低成本贸易往来的货币媒介,如具有信任基础的、价值锚定的法定数字货币等.

4) 研究为我国央行数字人民币的应用与推广提供了学术支撑.我国法定数字货币走在了世界前列,我国央行数字人民币正在进行试点,正如本研究所分析,推进央行数字人民币等法定数字货币成为数字货币主流是发挥数字货币应用优势同时控制数字货币风险的有效策略.建议加快我国央行数字人民币推广速度,在实践中,央行数字人民币可充分借鉴私人数字货币快速扩散的内在逻辑和相关技术,以更好地引导民众从通过私人数字货币开展交易过渡到通过央行数字人民币来开展贸易往来和商品交易;其次,充分依托我国在数字金融和移动支付领域的优势,通过数字人民币的密集试点来测试、完善和推动央行数字人民币落地应用;同时,加快建设我国数字货币监管与风险防控体系建设,确保数字金融安全.

本文针对数字货币的快速发展以及可能带来的风险和问题,通过民众“参与”和政府“监管”之间的博弈策略选择,借助SD演化博弈流率基本入树模型,构建了民众“参与”和政府“监管”的数字货币演化博弈的系统动力学流率基本入树模型,开展数字货币演化扩散和情景模拟研究,探索民众“参与”数字货币和政府“监管”数字货币决策的动态演化过程和有效的监管策略.由于数字货币相关数据获取的局限性,在博弈模型假设、变量及其关系确定等方面和现实有可能存在一定偏差,有待进一步完善;同时,针对数字货币的去中心化和匿名性所引发的洗钱、毒品交易和投机等违法犯罪活动的有效的、精准的监管措施有待进一步深入分析;另外,由于博弈假设将实际交易过程抽象化,而实际活动中政府监管行为与民众参与行为间复杂关系存在诸多影响,如可能影响两者关系的内生性问题,这些问题也应当在未来的研究中进行深入考量;此外,数字货币监管是一个十分复杂的系统工程,其涉及到诸多子系统,本文出于博弈研究需要仅仅探讨了政府与民众间关系,其余主体及各子系统间系统结构及反馈机制有待进一步深入研究.



## 参考文献

- [1] 习近平. 国家中长期经济社会发展战略若干重大问题 [J]. 求知, 2020(11): 4-7.  
Xi J P. Some major issues of the national medium- and long-term economic and social development strategy[J]. Seek Knowledge, 2020(11): 4-7.
- [2] 姚前. 数字货币的前世与今生 [J]. 中国法律评论, 2018(6): 169-176.  
Yao Q. The past and present of digital currency[J]. China Law Review, 2018(6): 169-176.
- [3] Von Hayek F A. Denationalization of money[M]. New York: Transatlantic Arts, 1977.
- [4] Chaum D. Blind signatures for untraceable payments[M]. Advances in cryptology. Springer, Boston, MA, 1983.
- [5] Chaum D, Amos F, Naor M. Untraceable electronic cash[C]// Conference on the Theory and Application of Cryptography. Springer, New York, NY, 1988.
- [6] Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system[EB/OL]. [2020-07-09]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [7] 朱烨辰. 数字货币论 —— 经济、技术与规制视角的研究 [D]. 北京: 中央财经大学, 2018.  
Zhu Y C. Research on digital currency — From the perspective of economy, technology and regulation[D]. Beijing: Central University of Finance and Economics, 2018.
- [8] Balvers R J, McDonald B. Designing a global digital currency[J]. Social Science Electronic Publishing, 2017, 111: 1-42.
- [9] Raskin M, Saleh F, Yermack D. How do private digital currencies affect government policy?[R]. National Bureau of Economic Research, 2019.
- [10] 陈文, 张磊, 杨涛. 数据治理视角下央行数字货币的发行设计创新 [J]. 改革, 2020(9): 68-79.  
Chen W, Zhang L, Yang T. Design innovation of central bank digital currency issue from the perspective of data governance[J]. Reform, 2020(9): 68-79.
- [11] 陈燕红, 于建忠, 李真. 央行数字货币的经济效应与审慎管理进路 [J]. 东岳论丛, 2020, 41(12): 121-128.  
Chen Y H, Yu J Z, Li Z. The economic effect of central bank digital currency and the approach of prudential management[J]. Dongyue Theory, 2020, 41(12): 121-128.
- [12] Yermack D. Is Bitcoin a real currency? An economic appraisal[M]// Handbook of Digital Currency. Elsevier, 2015: 31-44.
- [13] Kristoufek L. What are the main drivers of the Bitcoin price? Evidence from wavelet coherence analysis[J]. PLoS One, 2014, 10(4): 0123923.
- [14] Iwamura M, Kitamura Y, Matsumoto T, et al. Can we stabilize the price of a cryptocurrency?: Understanding the design of Bitcoin and its potential to compete with central bank money[J]. Hitotsubashi Journal of Economics, 2014: 41-60.
- [15] 林慰曾. 数字货币的监管困境与法律出路 [J]. 上海立信会计金融学院学报, 2018(2): 65-75.  
Lin W Z. regulatory dilemma and legal countermeasures of digital currency[J]. Journal of Shanghai Lixin University of Accounting and Finance, 2018(2): 65-75.
- [16] 祁明, 肖林. 虚拟货币: 运行机制, 交易体系与治理策略 [J]. 中国工业经济, 2014(4): 110-122.  
Qi M, Xiao L. Network virtual currency: Operation mechanism, trading system and governance strategy[J]. China Industrial Economics, 2014(4): 110-122.
- [17] Dorofeyev M, Kosov M, Ponkratov V, et al. Trends and prospects for the development of blockchain and cryptocurrencies in the digital economy[J]. European Research Studies Journal, 2018, 21(3): 429-445.
- [18] 谢平, 石午光. 数字货币的风险、监管与政策建议 [J]. 新金融评论, 2018(1): 132-149.  
Xie P, Shi W G. Digital currency: Risk, regulation and policy recommendations[J]. New Finance Review, 2018(1): 132-149.
- [19] Fry J. Booms, busts and heavy-tails: The story of Bitcoin and cryptocurrency markets?[J]. Economics Letters, 2018, 171: 225-229.
- [20] Borri N. Conditional tail-risk in cryptocurrency markets[J]. Journal of Empirical Finance, 2019, 50: 1-19.
- [21] Mills D J, Nower L. Preliminary findings on cryptocurrency trading among regular gamblers: A new risk for problem gambling?[J]. Addictive behaviors, 2019, 92: 136-140.
- [22] Albrecht C, Duffin K M, Hawkins S, et al. The use of cryptocurrencies in the money laundering process[J]. Journal of Money Laundering Control, 2019, 22(2): 210-216.
- [23] 黄锐. 金融区块链技术的监管研究 [J]. 学术论坛, 2016, 39(10): 53-59.  
Huang R. Regulatory research on financial block chain technology[J]. Academic forum, 2016, 39(10): 53-59.
- [24] 郭晓敏, 陈建奇. 数字货币如何影响国家安全: 逻辑、机制及应对 [J]. 财经问题研究, 2020(8): 48-55.  
Guo X M, Chen J Q. How digital money affects national security: Logic, mechanisms and responses[J]. Research on Financial Issues, 2020(8): 48-55.
- [25] 陈姿含. 加密数字货币行政监管的制度逻辑 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2020, 22(5): 134-143.  
Chen Z H. Institutional logic of administrative supervision of encrypted digital currency[J]. Journal of Beijing

- Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2020, 22(5): 134–143.
- [26] 赵炳昊. 加密数字货币监管的美国经验与中国路径的审视 [J]. 福建师范大学学报 (哲学社会科学版), 2020(3): 71–82+110+170.
- Zhao B H. The american experience of encrypted digital currency regulation and the review of China's path[J]. Journal of Fujian Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2020(3): 71–82+110+170.
- [27] 李苍舒, 沈艳. 数字经济时代下新金融业态风险的识别、测度及防控 [J]. 管理世界, 2019, 35(12): 53–69.
- Li C S, Shen Y. Identification, measurement and prevention and control of new financial form risk in the digital economy age[J]. Managing the world, 2019, 35(12): 53–69.
- [28] 赵越强. 公共和私有部门数字货币的发展趋势、或有风险与监管考量 [J]. 经济学家, 2020(8): 110–119.
- Zhao Y Q. Trends, risks and regulatory considerations in public and private sector digital currencies[J]. Economist, 2020(8): 110–119.
- [29] Neumann J, Morgenstern O. Theory of games and economic behavior[M]. Princeton: Princeton University Press, 1944.
- [30] Nash J F. Equilibrium points in n-person games[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1950, 36(1): 48–49.
- [31] Smith J R M, Price G R. The logic of animal conflict[J]. Nature, 1973, 246(5427): 15–18.
- [32] Taylor P D. Evolutionary stable strategies and game dynamics[J]. Mathematical Bio-sciences, 1978, 40(1): 145–156.
- [33] Smith J M. Evolution and the theory of games[J]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- [34] Rogers E M. Diffusion of innovations, fifth edition[M]. New York: Free Press, 2003.
- [35] 封思贤, 丁佳. 数字加密货币交易活动中的洗钱风险: 来源、证据与启示 [J]. 国际金融研究, 2019(7): 25–35.
- Feng S X, Ding J. Money laundering risk in digital encrypted currency transactions: Sources, evidence and implications[J]. International financial research, 2019(7): 25–35.
- [36] 谢玲. 暗网犯罪刑事治理研究 [J]. 学术论坛, 2020, 43(5): 13–24.
- Xie L. Research on criminal governance of cybercrime[J]. Academic forum, 2020, 43(5): 13–24.
- [37] 陈纯柱, 李昭霖. 数字货币犯罪风险的防范与应对 [J]. 重庆社会科学, 2019(10): 35–47.
- Chen C Z, Li Z L. Prevention and response to the risk of digital currency crime[J]. Chongqing Social Science, 2019(10): 35–47.
- [38] 尚柏延, 冯卫国. 法定数字货币的刑法问题及其立法完善 [J/OL]. 江淮论坛, 2021(1): 122–131. [2021–02–05]. <https://doi.org/10.16064/j.cnki.cn34-1003/g0.2021.01.016>.
- Shang B Y, Feng W G. The criminal law of legal digital currency and its legislative improvement[J/OL]. Jianghuai Forum, 2021(1): 122–131. [2021–02–05]. <https://doi.org/10.16064/j.cnki.cn34-1003/g0.2021.01.016>.
- [39] 刘宸希, 李艳. 数字货币对我国金融监管挑战及应对研究 —— 以 Libra 为例 [J]. 理论月刊, 2020(7): 74–81.
- Liu C X, Li Y. Research on the challenges and responses of digital currency to china's financial supervision — Taking libra as an example[J]. Theoretical monthly, 2020(7): 74–81.
- [40] 梁秀峰, 张飞涟, 颜红艳. 基于演化博弈的 PPP 项目绩效支付机制仿真与优化 [J]. 中国管理科学, 2020, 28(4): 153–163.
- Liang X F, Zhang F L, Yan H Y. Simulation and optimization of PPP project performance payment mechanism based on evolutionary game[J]. China Management Science, 2020, 28(4): 153–163.
- [41] 汪万, 杨坤. 责任式创新下多主体协同机制演化博弈研究 [J]. 软科学, 2020, 34(6): 17–25.
- Wang W, Yang K. Evolutionary game study of multi-agent cooperative mechanism under responsibility innovation[J]. Soft science, 2020, 34(6): 17–25.
- [42] 程敏, 刘亚群, 王洪强. 基于系统动力学的邻避设施 PPP 项目三方演化博弈分析 [J]. 运筹与管理, 2019, 28(10): 40–49.
- Cheng M, Liu Y Q, Wang H Q. Analysis of three-way evolution game of neighbor avoidance facility PPP project based on system dynamics[J]. Operations and Management, 2019, 28(10): 40–49.
- [43] 梁雁茹, 刘亦晴. COVID-19 疫情下医疗防护用品市场监管演化博弈与稳定性分析 [J/OL]. 中国管理科学: 1–11. [2021–02–05]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0448>.
- Liang Y R, Liu Y Q. Evolution game and stability analysis of medical protective equipment market supervision under COVID-19 outbreak [J/OL]. China Management Science: 1–11. [2021–02–05]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0448>.
- [44] Forrester J W. Principles of Systems[M]. Cambridge: MIT Press, 1968.
- [45] Senge P M. The fifth discipline — The art and practice of the learning organization[M]. USA: Century Business, 1993.
- [46] 孙庆文, 陆柳, 严广乐, 等. 不完全信息条件下演化博弈均衡的稳定性分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(7): 11–16.
- Sun Q W, Lu L, Yan G L, et al. Asymptotic stability of evolutionary equilibrium under imperfect knowledge[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2003, 23(7): 11–16.
- [47] 贾晓菁, 贾仁安, 祝琴. 系统动力学运算过程图分析方法 —— 以供应链模型参数调控延迟计算为例 [J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(12): 3270–3283.
- Jia X J, Jia R A, Zhu Q. Operation process graph analysis approach of system dynamics — Illustrated by

calculation of the delay regulated by parameters in a supply chain[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2020, 40(12): 3270–3283.

- [48] 冷碧滨, 吉雪强, 胡俏, 等. 系统自组织演化流率基本入树模型的构建和应用 —— 基于规模养殖生态能源系统的反馈仿真 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(10): 2689–2701.

Leng B B, Ji X Q, Hu Q, et al. Construction and application for self organizing evolution of system dynamics of based in-tree model — Based on the feedback simulation of scale breeding ecological energy system[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(10): 2689–2701.

- [49] 冷碧滨, 涂国平, 贾仁安. 系统动力学演化博弈流率基本入树模型的构建及应用 —— 基于生猪规模养殖生态能源系统稳定性的反馈仿真 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(5): 1360–1372.

Leng B B, Tu G P, Jia R A. Construction and application of system dynamics evolutionary game rate variable based in-tree model — Basing on feedback simulation of scale pig breeding ecological energy system stability[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2017, 37(5): 1360–1372.