

刘永清,刘文浩,陈爱妩. 基于演化博弈的电子废弃物回收产业链协同治理[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(1):104-114. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.013

LIU Y Q, LIU W H, CHEN A W. On Collaborative Governance of Electronic Waste Recycling Industry Chain Based on Evolutionary Game[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(1):104-114. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.013

基于演化博弈的电子废弃物回收 产业链协同治理

刘永清*, 刘文浩, 陈爱妩

(湖南科技大学 商学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 电子废弃物回收产业链的发展需要多方利益相关者的协同参与. 从协同治理视角出发, 分别构建市场机制下和政府调控下的“回收企业—生产企业”演化博弈模型, 通过复制动态方程得到博弈双方的稳定策略演化路径. 研究表明: 单一主体的收益最大化未必有利于产业的形成和回收产业效益的最大化; 博弈双方会基于自身成本收益禀赋和策略带来的增值量进行反复博弈, 从而使博弈系统形成不同的演化路径; 在市场机制下, 博弈系统趋于理想化均衡状态的条件较难得到满足, 政府调控可以快速地引导博弈系统向理想状态演化, 提升监管效率、加大补贴和对投机行为的惩罚力度能够促进回收产业链的良性发展.

关键词: 电子废弃物; 回收产业链; 协同治理; 演化博弈

中图分类号: F205; X705 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2024)01-0104-11

On Collaborative Governance of Electronic Waste Recycling Industry Chain Based on Evolutionary Game

LIU Yongqing, LIU Wenhao, CHEN Aiwu

(School of Business, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The construction and development of e-waste recycling industry need the joint efforts of multi-stakeholders. From the perspective of collaborative governance, the paper constructs the evolutionary game model of “recycling enterprise-production enterprise” under the market mechanism and government regulation, and obtains the stable strategy evolution path of both sides of the game by the copying and dynamic equation. Results show that the maximization of single subject's income may not necessarily lead to the industrial chain and its maximized benefit. Under the market mechanism, it is difficult to meet the condition that the game system area tends to an ideal equilibrium state. And both sides of the game will repeatedly play games based on the initial endowment and result of strategy, thus forming different evolutionary paths. Government regulation can quickly guide the game system to an ideal state. Increasing subsidies, improving regulatory efficiency and punishing speculative behavior can promote the development of the electronic waste recycling industry chain.

Keywords: electronic waste; recycling industry chain; collaborative governance; evolutionary game

收稿日期: 2022-02-22

基金项目: 湖南省社科基金重点资助项目(21ZDB020)

* 通信作者, E-mail: lyq19631991@163.com

随着科学技术的飞速发展及人民生活水平的不断提高,电子产品更新换代速度在持续上升,被淘汰和废弃的电子产品增加的速度越来越快.据工信部数据显示,我国每年主要电器电子产品报废量超2亿台,重量超500万t^[1].电子废弃物具有资源性和危害性双重属性,处理得当可实现资源可持续利用,反之将破坏生态环境和人体健康.那么在电子废弃物回收处理中,如何实现电子废弃物价值的有效转化?其中,探索电子废弃物回收系统中利益相关者的行为关系及其演化规律,研究多主体协同的演化机理,构建和完善回收产业链,能有效发挥电子废弃物的资源性,降低环境危害性,对推进我国生态文明建设进程意义重大.

1 文献评述与问题提出

目前,理论界对电子废弃物回收产业链治理的研究主要集中在电子废弃物回收系统利益相关者的关系、回收渠道决策、回收协同治理等问题.电子废弃物回收系统利益相关者的关系研究主要集中在2个方面:第一,在分析电子废弃物回收系统结构和流程时涉及利益相关者的研究.张科静等^[2]探讨4种典型的基于EPR的电子废弃物回收运作体系,侧重于关键利益相关者所承担的责任;李春发等^[3]依据利益相关者理论,界定系统利益相关者的构成,逐一分析各利益主体的责任与作用;GUI等^[4]研究电子废弃物回收中各利益相关者视角对EPR政策目标实现的影响;ATASU等^[5]通过比较2种立法对电子废弃物回收中不同利益相关者的影响,指出操作环境决定利益相关者偏好;第二,对电子废弃物回收参与主体的行为特征分析及其影响因素研究.MIAFODZYEVA等^[6]的研究表明回收主体的态度对回收行为起决定性作用;XAVIER等^[7]从产业链层面对电子废弃物回收影响因素进行了广泛研究;余福茂等^[8]对中国电子废弃物回收企业行为的影响因素进行分析.

在回收渠道决策和选择方面,HUANG等^[9]建立并研究零售商与第三方回收方组成的双渠道回收闭环供应链模型,认为双渠道回收比单渠道回收效益更好;GIOVANNI等^[10]建立两阶段闭环供应链模型,研究回收处理商自营回收业务还是将其该业务外包的回收渠道选择问题;李晓静等^[11]将闭环供应链置于市场竞争的环境之中,认为制造商对回收渠道结构的选择取决于产品的竞争强度,但零售商则不依赖于任何因素;苑希港等^[12]引入了“互联网+”的概念,通过动态博弈模型考察再制造商线上、线下回收渠道的选择策略问题,研究认为采用线上、线下相结合的混合回收渠道是更好的选择;刘永清等^[13]考虑互联网在回收行业的不断深入,消费者对电子废弃物回收渠道的偏向,建立了回收决策模型,探讨消费者回收行为对回收商、处置商回收决策的影响,得出了网络回收渠道的回收价格始终高于传统回收渠道的回收价格等重要结论.另外,谢天帅等^[14]研究电子废弃物押金返还政策策略问题,结果表明:只要非正规回收环境成本较高时,适当地提升押金返还额,会使消费者倾向于选择更加正规的回收渠道;余福茂等^[15]研究政府随机惩罚下非正规回收群体和正规回收企业的演化博弈问题,试图使双方能够达成良好的合作关系;DWIVEDY^[16]研究不同责任延伸制的经济利润问题,通过经济模型证明单个回收方案要优于集体回收方案.

电子废弃物回收治理研究最早来源于国外一些学者.SPICER等^[17]指出电子废弃物回收涉及制造商、销售商、消费者、回收处理商、第三方物流商各环节,研究认为作为延长生产者责任的解决方案是需要第三方回收主体的参与;BAUTISTA等^[18]指出政府部门在调整产业结构、引导企业发展等方面也发挥着不可替代的作用.目前,国内关于电子废弃物回收协同治理的研究相对较少,少数文献在政府干预^[8]、消费者参与及协同合作^[19]等方面涉及回收治理问题,或从不同视角对电子废弃物回收治理影响因素、形成机制和运行机制进行了分析^[20].在多主体协同演化机制方面,彭本红等^[21]构建“政府—生产企业—消费者”三方博弈模型,并利用Vesim仿真技术厘清了三方在电子废弃物回收产业链构建过程中所应扮演的角色;徐红等^[22]通过分析“生产企业—消费者”博弈模型,认为双方的初始策略选择倾向对整个博弈系统的演化路径有重大影响;李飏等^[23]基于无分类回收、处理商负责分类回收、回收商负责分类回收和集中决策这4种情形构建“处理商—回收商”博弈模型,研究提升废旧产品处理效率的有效机制.

综上所述,对于电子废弃物回收产业链,无论是从回收系统利益相关者关系、回收渠道决策,还是回收产业链治理,更多学者倾向将政府、生产企业、消费者作为研究主体,却鲜有学者对回收企业在链条中所应

扮演的角色进行研究,以及对回收企业与其他参与主体之间的博弈行为进行分析.基于此,本文将回收企业纳入电子废弃物回收产业链协同治理主体的研究范畴,立足电子废弃物回收产业链的整体效益,分别构建市场机制下和政府调控下的“回收企业—生产企业”演化博弈模型,并利用复制动态方程计算博弈系统的演化路径和稳定策略,探索政府、回收企业、生产企业三方在电子废弃物回收产业链中所扮演的角色,以填补现有研究空白,拓宽电子废弃物回收产业链治理的思路,为大力促进循环经济发展和加快推进生态文明建设提供理论指导.

2 博弈模型的建立

2.1 博弈策略分析与模型假设

电子废弃物回收产业链的良性运转,不仅需要通畅的回收渠道来保证稳定的“货源”,更要求有稳定的处理品销售渠道以提升回收企业的“自主造血”能力.在理想的回收产业链模式下,回收企业寻求与生产企业合作,生产企业积极参与回收产业链的构建.生产企业利用掌握的物流销售信息对终端用户淘汰的电子废弃物进行回收,然后将其出售给生产企业以获利.回收企业从生产企业手中购买“原材料”然后进行拆解回收利用,将处理品回售给生产企业以获利.由于电子电器设备具备模块化生产的特点,被回收拆解所获得的零部件能大大降低购买方(即生产企业)的生产成本.从整个回收产业链的角度考虑,由于回收渠道是由掌握销售物流信息的生产企业所经营,从而降低了回收过程产生的交易成本和信息搜寻成本;回收企业和生产企业形成的由供需关系主导的内部交易体系引进市场机制使得回收产业链实现经济资源配置最大化.然而,在电子废弃物回收产业链形成初期,回收企业往往需要为寻求与生产企业的合作付出一定的信息搜寻、协商沟通以及物流运输等一系列新增的合作成本;生产企业由于需要构建逆向回收系统和物流信息的跟进开发,也需要支付额外的营运成本.因此,我们可以提出如下假设.

假设 1:回收企业和生产企业是理性经济人,会依据自身的成本和收益水平,不断地调整自身的策略.回收企业可选择的策略为{合作,不合作},生产企业可选择的策略有{参与,不参与}.回收企业选择合作的概率 α 、生产企业选择参与的概率 β ,且 $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$.

假设 2:双方选择不同的博弈策略会带来不同的成本收益水平.回收企业选择不合作时的初始收益和成本分别为 R_1, S_1 ,选择合作策略时向生产企业售出处理品获得的收益 R_2 ,所付出的成本 S_2 .生产企业原本的收益和成本为 R_3, S_3 ,选择参与回收产业链构建后获得生产成本降低以及长期的绿色经济收入为 R_3' ,参与回收产业链付出的成本 S_2' ,向回收企业购买拆解后的原材料所支付金额为 R_2 .

假设 3:当博弈双方选择(参与,合作)的策略时,双方均能获得正向的收益水平,也即 $R_2 - S_2 > R_1 - S_1$, $R_3' - S_2' - R_2 - (R_3 - S_3) > 0$,否则,双方从一开始就不会考虑相互合作.

2.2 演化博弈模型的构建

依据上述博弈模型的假设、相关参数的定义和双方的供需关系,可以得出博弈双方的收益矩阵如表 1 所示.

表 1 市场机制下生产企业与回收企业的收益矩阵

策略选择		生产企业	
		参与(α)	不参与($1-\alpha$)
回收企业	合作(β)	$(R_2 - S_2, R_3' - S_2' - R_2)$	$(R_1 - S_2, R_3 - S_3)$
	不合作($1-\beta$)	$(R_1 - S_1, R_3 - S_2' - S_3)$	$(R_1 - S_1, R_3 - S_3)$

生产企业选择“参与”和“不参与”策略时,电子废弃物回收产业链构建时的期望收益分别为 U_1, U_2 ,其中,

$$U_1 = \beta(R_3' - S_2' - R_2) + (1 - \beta)(R_3 - S_2' - S_3) = \beta(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) + R_3 - S_2' - S_3;$$

$$U_2 = \beta(R_3 - S_3) + (1 - \beta)(R_3 - S_3) = R_3 - S_3.$$

根据上式可以得出生产企业的平均期望收益 U 为

$$U = \alpha U_1 + (1 - \alpha) U_2.$$

因此,生产企业的复制动态方程为

$$F(\alpha) = dU/dt = \alpha(1 - \alpha)(U_1 - U_2) = \alpha(1 - \alpha)[\beta(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2']. \quad (1)$$

同理,选择合作与不合作时,回收企业的期望收益分别为 V_1, V_2 , 其中,

$$V_1 = \alpha(R_2 - S_2) + (1 - \alpha)(R_1 - S_2) = \alpha(R_2 - R_1) + R_1 - S_2;$$

$$V_2 = \alpha(R_1 - S_1) + (1 - \alpha)(R_1 - S_1) = R_1 - S_1.$$

根据上式可以得到回收企业的平均期望收益 V 和复制动态方程为

$$V = \beta V_1 + (1 - \beta) V_2;$$

$$G(\beta) = dV/dt = \beta(1 - \beta)[\alpha(R_2 - R_1) + S_1 - S_2]. \quad (2)$$

令式(1)和式(2)取值为 0, 即 $F(\alpha) = G(\beta) = 0$, 可以解得 5 个复制动态均衡点 $(0,0), (1,0), (0,1), (1,1), (\alpha_0, \beta_0)$, 其中 $\alpha_0 = (S_2 - S_1)/(R_2 - R_1), \beta_0 = S_2'/(R_3' + S_3 - R_2 - R_3)$. 该复制动态方程组的雅可比矩阵 A 为

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial \alpha} & \frac{\partial F}{\partial \beta} \\ \frac{\partial G}{\partial \alpha} & \frac{\partial G}{\partial \beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 - 2\alpha)[\beta(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2'] & \alpha(1 - \alpha)(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) \\ \beta(1 - \beta)(R_2 - R_1) & (1 - 2\beta)[\alpha(R_2 - R_1) + S_1 - S_2] \end{pmatrix};$$

$$\det A = (1 - 2\alpha)[\beta(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2'](1 - 2\beta)[\alpha(R_2 - R_1) + S_1 - S_2] - \alpha(1 - \alpha)(R_3' + S_3 - R_2 - R_3)\beta(1 - \beta)(R_2 - R_1); \quad (3)$$

$$\text{tr } A = (1 - 2\alpha)[\beta(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2'] + (1 - 2\beta)[\alpha(R_2 - R_1) + S_1 - S_2]. \quad (4)$$

依据雅可比矩阵的 $\det A$ 和 $\text{tr } A$ 的, 可以判断博弈系统模型的演化路径和最终的策略形态, 将求解所得的 5 个均衡点代入式(3)和式(4)中, 可以得到各均衡点的稳定性表达式(见表 2). 当 $\det A > 0, \text{tr } A < 0$ 时, 该平衡点为稳定均衡点; 当 $\det A > 0, \text{tr } A > 0$ 时, 该平衡点为不稳定均衡点; 当 $\det A < 0$ 时, 该平衡点则为鞍点; 当 $\det A > 0, \text{tr } A = 0$, 并且同时满足 $(\alpha_0, \beta_0) \in (0, 1)$ 时, 该平衡点为中心点.

表 2 市场机制下博弈系统各均衡点的 $\det A$ 和 $\text{tr } A$ 值表达式

均衡点	$\det A$	$\text{tr } A$
$(0,0)$	$S_2' \times (S_2 - S_1)$	$S_1 - S_2 - S_2'$
$(0,1)$	$(R_3' + S_3 - R_2 - R_3 - S_2') \times (S_2 - S_1)$	$R_3' + S_3 - R_2 - R_3 - S_2' + S_2 - S_1$
$(1,0)$	$S_2' \times (R_2 - R_1 + S_1 - S_2)$	$S_2' + R_2 - R_1 + S_1 - S_2$
$(1,1)$	$(R_3' + S_3 - R_2 - R_3 - S_2') \times (R_2 - R_1 + S_1 - S_2)$	$-(R_3' + S_3 - R_2 - R_3 - S_2') - R_2 + R_1 - S_1 + S_2$
(α_0, β_0)	$-S_2' \times (S_2 - S_1) \times (1 - \alpha_0) \times (1 - \beta_0)$	0

由于假设 3, 我们知道: $R_2 - S_2 > R_1 - S_1, R_3' - S_2' - R_2 - (R_3 - S_3) > 0$, 也即当回收企业选择合作时获得的收益大于不合作时的收益时才会选择与生产企业合作构建电子废弃物回收产业链; 当生产企业选择参与时获得的收益大于不参与时的收益时才会主动参与电子废弃物回收产业链的构建中. 基于以上假设可以得到均衡点 $(0,0)$ 和 $(1,1)$ 为稳定点, $(0,1)$ 和 $(1,0)$ 为不稳定点, (α_0, β_0) 为鞍点. 该演化博弈系统存在 2 个稳定策略: (不合作, 不参与) 和 (合作, 参与), 其系统动态演化路径相位图如图 1 所示.

2.3 演化博弈模型分析

由于演化博弈模型存在 2 个稳定状态, 分别代表着不良状态和理想状态, 因此, 探讨双方在初始选择合作参与下策略如何朝着理想稳定状态演化. 由图 1 可知: 折线 $A-O-B$ 将整个博弈区域划分成 2 个部分, 当博弈的初始状态位于区域 S_{AODB} 时, 博弈双方的策略最终会收敛于 $(1,1)$ 点, 当初始状态位于区域 S_{A0BC} 时, 会最终收敛于 $(0,0)$ 点. 因此折线 $A-O-B$ 可以看成是 2 种稳定状态演化的临界线, 临界线两边区域的面积大小的不同会改变博弈系统收敛到不同稳定策略的可能性. 因此, 设该面积 S_{A0BC} 为 T_1 , 且其表达式为

$$T_1 = \frac{1}{2}(\alpha_0 + \beta_0) = \frac{1}{2}[(S_2 - S_1)/(R_2 - R_1) + S_2'/(R_3' + S_3 - R_2 - R_3)].$$

1) 从回收企业收益的角度出发, 因为 $\frac{\partial T_1}{\partial R_1} > 0$, 故 T_1 是 R_1 的单调增函数, 也即当回收企业的初始收益的增加, 整个博弈系统越容易稳定于不良状态; 因为 $\frac{\partial T_1}{\partial R_2}$ 的符号无法确定, 所以考察增量收益 $\Delta R = R_2 - R_1$, 则 $\frac{\partial T_1}{\partial \Delta R} < 0$, 故 T_1 是 ΔR 的单调减函数, 因此当 ΔR 增加时, S_{A0BC} 面积增变小, 系统收敛于 (1,1) 均衡点的概率增加. 这说明当初始收益禀赋越大时, 回收企业越不愿意参与回收产业链的建设合作, 因为选择合作策略意味着回收企业面临着经营风险和收益不确定的风险, 此时其更偏好于自主经营而厌恶不确定性风险. 同时, 由于 R_2 不单是回收企业选择合作策略的收益, 更是生产企业选择参与策略时所支付成本的一部分, 其变化具有很大的不确定性. 因此, 可以假设 R_2 保持不变, 在 R_1 不断减少时, 能保证 ΔR 的单调增加同时 T_1 递减, 此时的博弈系统趋向理想状态的概率增加, 这与前面的分析是一致的. 因此, 我们可以得出, 较低水平的 R_1 是保证博弈系统想着理想化状态演化的前提条件之一.

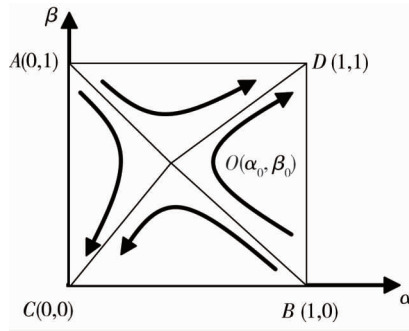


图1 演化路径相位图

2) 从回收企业的成本角度出发, 分别对 S_1 和增量成本 $\Delta S = S_2 - S_1$ 求偏导数: $\frac{\partial T_1}{\partial S_1} < 0$; $\frac{\partial T_1}{\partial \Delta S} > 0$, 因此, 函数 T_1 同时是 S_1 的减函数以及 ΔS 的增函数, 也即随着回收企业初始成本的增加或合作成本的减少, 博弈系统会有较大的概率向着理想状态演化; 当回收企业选择合作策略的增量成本增加时, 会导致 S_{A0BC} 增加, 博弈系统更容易向不良状态 (0,0) 发展, 说明当回收企业的初始成本在较高的水平, 或合作策略带来的增量成本较低时, 博弈系统往理想方向演化的概率变大, 反之则会打击回收企业参与电子废弃物回收产业链的动力, 是回收企业选择合作策略的负面影响因素, 这也与现实情况相一致.

3) 从生产企业的收益角度分析, 分别对初始收益 R_3 和增量收益 $\Delta R_1 = R_3' - R_3$ 求偏导数: $\frac{\partial T_1}{\partial R_3} > 0$; $\frac{\partial T_1}{\partial \Delta R_1} < 0$, 因此, 函数 T_1 同时是 R_3 的单调增函数和 ΔR_1 的单调减函数, 也即 S_{A0BC} 会随着生产企业初始收益的减少, 以及参与策略所带来的增量收益的增加而减少, 此时的博弈系统更容易向理想状态演化, 收敛于 (1,1) 点的概率增加. 由此可见, 从产业链整体的利益角度出发, 吸纳高市净率的企业参与回收产业链并不是整体策略的最优解, 反而有可能会在长期博弈中致使产业链的破裂; 同时, 在完全的理性经济人假设下, 整个产业链的效益必须使得生产企业在其中有利可图, 这也是在现实中回收产业链构建发展举步维艰的根本问题.

4) 从生产企业的成本角度出发, 对生产企业的初始成本求偏导数, 得 $\frac{\partial T_1}{\partial S_3} < 0$, 因 $\frac{\partial T_1}{\partial (S_2' - S_3)}$ 符号无法确定, 所以, 假设 S_3 保持不变, 变动 S_2' , 从而间接考察 $(S_2' - S_3)$ 带来的影响, 函数 T_1 对 S_2' 求偏导, 得 $\frac{\partial T_1}{\partial S_2'} > 0$, 即当生产企业的初始成本处于较高水平, 或者选择参与策略带来的增量成本减少时, 会使 S_{A0BC}

的面积较少,博弈系统易收敛于(1,1)点.由于在现实条件下,生产企业的成本受多方面因素的影响,具有很大的不确定性,因此,更应关注如何减少生产企业参与的增量成本,过高的增量成本会减弱生产企业参与回收产业链的热情,不利于回收产业链的良好构建与运行.

3 政府调控下博弈系统演化路径

3.1 模型假设

假设 1:由于政府承担着推动保护环境的社会职责,因此政府会一致地选择“监管”的策略.同时,由于信息不对称,政府会存在监管失效的情况,因此其监管效率为 θ 、对投机行为的罚金为 K .

假设 2:基于现实情况中回收企业普遍存在“自主造血”能力薄弱的问题,政府多是以帮扶为主.因此,仅仅考虑政府监管对生产企业策略选择的影响.

假设 3:在政府调控下,生产企业如果选择参与策略时会获得政府补贴 C_1 , 如果选择不参与策略时会获得风险收益,补贴的期望损失 θC_1 以及罚金的期望损失 θK . 其中,风险收益是指企业采取投机行为套取政府补贴所获得的收益,因此,其风险收益亦为 C_1 .

3.2 演化博弈模型的构建

根据以上假设和参数设定,可以得到政府调控下博弈双方的收益矩阵,如表 3 所示.

表 3 政府调控下生产企业与回收企业的收益矩阵

策略选择		生产企业	
		参与(α)	不参与($1-\alpha$)
回收企业	合作(β)	$(R_2 - S_2, R_3' - S_2' - R_2 + C_1)$	$[R_1 - S_2, R_3 + (1 - \theta)C_1 - S_3 - \theta K]$
	不合作($1-\beta$)	$(R_1 - S_1, R_3 - S_2' - S_3 + C_1)$	$(R_1 - S_1, R_3 + (1 - \theta)C_1 - S_3 - \theta K)$

同理,在引入政府调控因素后,相应的复制动态方程组为

$$F(\alpha) = dU/dt = \alpha(1 - \alpha)(U_1 - U_2) = \alpha(1 - \alpha)[\beta(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2' + \theta C_1 + \theta K];$$

$$G(\beta) = dV/dt = \beta(1 - \beta)[\alpha(R_2 - R_1) + S_1 - S_2].$$

令 $F(\alpha) = G(\beta) = 0$ 可以解得博弈矩阵均衡点分别为 $(0,0), (1,0), (0,1), (1,1), (\alpha_0, \beta_0)$, 其中 $\alpha_0 = (S_2 - S_1)/(R_2 - R_1), \beta_0 = (S_2' - \theta C_1 - \theta K)/(R_3' + S_3 - R_2 - R_3)$. 该复制动态方程组的雅可比矩阵 J 为

$$J = \begin{pmatrix} (1 - 2\alpha)[\beta(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2' + \theta C_1 + \theta K] & \alpha(1 - \alpha)(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) \\ \beta(1 - \beta)(R_2 - R_1) & (1 - 2\beta)[\alpha(R_2 - R_1) + S_1 - S_2] \end{pmatrix};$$

$$\det J = (1 - 2\alpha)[\beta(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2' + \theta C_1 + \theta K](1 - 2\beta)[\alpha(R_2 - R_1) + S_1 - S_2] - \alpha(1 - \alpha)(R_3' + S_3 - R_2 - R_3)\beta(1 - \beta)(R_2 - R_1);$$

$$\text{tr } J = (1 - 2\alpha)[\beta(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2' + \theta C_1 + \theta K] + (1 - 2\beta)[\alpha(R_2 - R_1) + S_1 - S_2].$$

将 5 个均衡点代入雅可比矩阵的行列式和迹的表达式之中,可得各个均衡点稳定性得分表达式(见表 4).

表 4 政府干预下博弈系统各均衡点的 $\det J$ 和 $\text{tr } J$ 值表达式

均衡点	$\det J$	$\text{tr } J$
$(0,0)$	$-(S_2' - \theta C_1 - \theta K)(S_1 - S_2)$	$-(S_2' - \theta C_1 - \theta K) + (S_1 - S_2)$
$(0,1)$	$[(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - (S_2' - \theta C_1 - \theta K)](S_2 - S_1)$	$[(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2' + \theta C_1 + \theta K] - (S_1 - S_2)$
$(1,0)$	$(S_2' - \theta C_1 - \theta K)(R_2 - R_1 + S_1 - S_2)$	$(S_2' - \theta C_1 - \theta K) + (R_2 - R_1 + S_1 - S_2)$
$(1,1)$	$[(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2' + \theta C_1 + \theta K](R_2 - R_1 + S_1 - S_2)$	$-[(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2' + \theta C_1 + \theta K] - (R_2 - R_1 + S_1 - S_2)$
(α_0, β_0)	$-[(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) - S_2' + \theta C_1 + \theta K] - (R_2 - R_1 + S_1 - S_2)$	0

3.3 演化博弈模型分析

从本课题组对电子废弃物回收产业链形成机理的质性研究表明:回收企业和生产企业参与博弈的前提是回收企业选择合作策略、生产企业选择参与策略的收益大于它们原本的收益,否则博弈便无从谈起,即 $R_2 - S_2 > R_1 - S_1, R_3' - S_2' - R_2 + C_1 - [R_3 + (1 - \theta)C_1 - S_3 - \theta K] > 0$. 因为,此时引入了政府干预因素,所以,应当区分 $S_2' - \theta C_2 - \theta K < 0$ 和 $S_2' - \theta C_2 - \theta K > 0$ 这 2 种情形进行讨论.

情形一:当 $S_2' - \theta C_1 - \theta K > 0$ 时,也即生产企业选择积极参与电子废弃物回收产业链策略的成本大于投机行为带来的惩罚时,此时可以得到 $(0,0)$ 和 $(1,1)$ 是博弈系统的 2 个稳定点, $(1,0)$ 和 $(0,1)$ 为不稳定均衡点, (α_0, β_0) 为鞍点. 与市场机制下的博弈模型相比,因为鞍点的 α_0 无发生变化,而 β_0 因为政府的干预而减少,导致鞍点位置向下移动,面积 S_{AODB} 增大. 因此相较于市场机制下的博弈系统而言,政府调控下的博弈系统更容易趋向于 $(1,1)$ 稳定策略,即经过长时间的博弈后,生产企业更易于选择参与策略,回收企业倾向于选择合作策略,其演化路径相位图如图 2 所示.

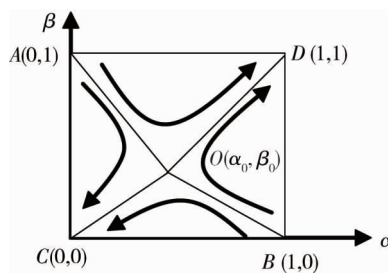


图 2 情形一下演化路径相位图

由于引入了 θ, C_2 和 K 变量,因此应当探讨政府调控下的新变量对博弈系统的影响. 同理,可以设面积 S_{AODC} 为 T_2 , 其表达式为

$$T_2 = \frac{1}{2}(\alpha_0 + \beta_0) = \frac{1}{2} \left[(S_2 - S_1)/(R_2 - R_1) + (S_2' - \theta C_2 - \theta K)/(R_3' + S_3 - R_2 - R_3) \right].$$

因为 $\frac{\partial T_2}{\partial \theta} < 0, \frac{\partial T_2}{\partial C_1} < 0, \frac{\partial T_2}{\partial K} < 0$, 因此 T_2 是 θ, C_2 和 K 的减函数,也即 S_{AODC} 会随政府的监管效率、补贴金额和惩罚力度的增加而减少,从而使整个博弈系统稳定于点 $(1,1)$ 的概率增加,这也是政府调控下博弈系统更易趋近于理想状态的原因所在.

情形二:当 $S_2' - \theta C_1 - \theta K < 0$ 时,均衡点 $(0,0), (1,0)$ 为鞍点,均衡点 $(0,1)$ 为不稳定点,均衡点 $(1,1)$ 为稳定点. 由于 $\beta_0 < 0$, 不满足 $(\alpha_0, \beta_0) \in (1,0)$, 因此 (α_0, β_0) 不是系统的均衡点,此时博弈系统只存在一个稳定点. 这表明,当生产企业参与电子废弃物回收产业链构建的成本小于投机行为所导致的政府惩罚时,企业有更积极的心态参与回收产业链,其演化路径相位图如图 3 所示.

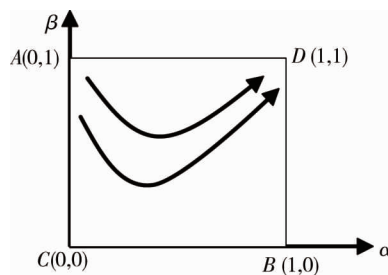


图 3 情形二下演化路径相位图

4 博弈系统的动态数值仿真与分析

上述分析探讨了模型的各个因素对于博弈系统演化路径的影响. 为了验证上述结果,同时使其更加可视化,本文运用 MATLAB 软件分别对市场机制下“回收企业—生产企业”博弈系统和政府调控下“回收企

业—生产企业”博弈系统进行动态仿真.仿真数值的选取则基于现实情况,在以往研究的基础上与相关专家学者进行了反复探讨,设置各参数数值如下(数值仅为相对值并不代表绝对数值):

$$S_2' = 1.5, R_3' = 6, S_3 = 1, R_3 = 3, R_2 = 1.55, S_2 = 0.7, R_1 = 0.55, S_1 = 0.5, C_1 = 0.15, K = 1, \theta = 0.1.$$

4.1 市场机制下回收企业的相关参数对博弈系统演化的影响

由本课题组前期相关研究分析得知,博弈系统的演化路径受到多方因素的影响.从回收企业的角度,选择不同策略的概率不但受到成本和收益的初始禀赋的影响,还受到策略带来的增量收益和增量成本的影响.为了验证前文的分析,在假定其他数值静止的情形下,对相关数值进行变动,通过考察变动前后的区别,可以对前文的分析进行检验.因此,将 S_1 的数值分别按照时间序列变动为 0.50, 0.55, 0.65 后,可以发现在相同的时间内博弈系统趋向于理想状态(1, 1)的概率变大;而在其他数值不变时,将 R_1 分别变动为 0.90, 1.00, 1.25 时,我们可以发现在单位时间演化博弈系统趋向于不良状态(0, 0)的速度加快(具体如图 4 所示,其中横轴代表博弈时间,纵轴代表整个博弈系统趋向于理想状态的概率,图 5~图 12 同).

当回收企业合作策略时,可以考察增量成本和增量收益对博弈系统演化路径的影响.由于 $\Delta S = S_2 - S_1$, 要研究增量成本 ΔS 带来的影响,只需在保持 S_1 和其他参数静止时,变动 S_2 的数值便可以直观地看出博弈系统的演化结果.当 S_2 分别取值 0.70, 0.80, 0.85, 0.90 时,系统的概率值不断减少,并且存在阈值的情况,即当 $S_2 \leq 0.80$ 时,系统会趋向于理想状态,但当 S_2 超过 0.80 后,系统会趋向于不良状态(如图 5 所示).

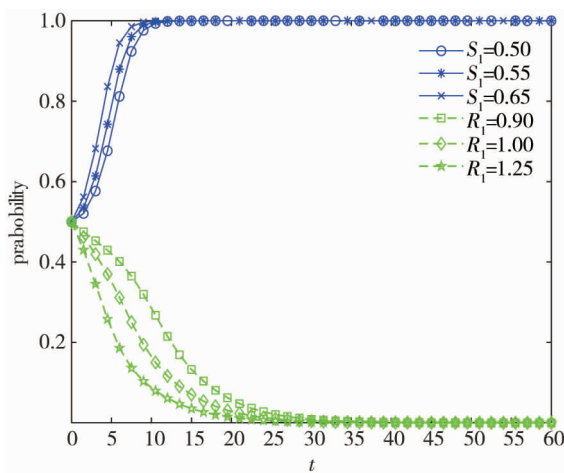


图 4 回收企业初始成本收益对博弈系统的影响

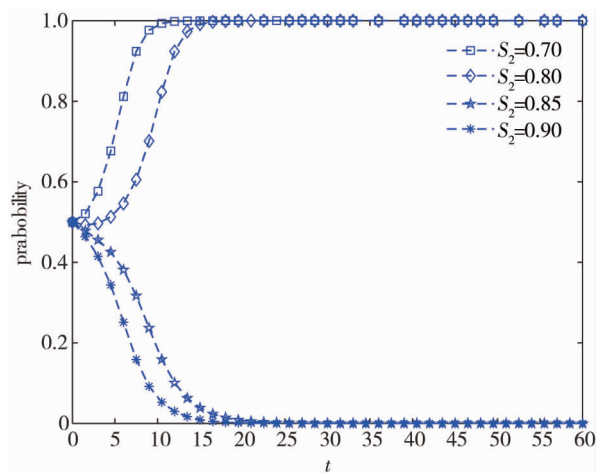


图 5 回收企业增量成本对博弈系统的影响

然而,不能简单变动 R_2 的值来验证 ΔR 对于演化博弈系统的影响.因为,当保持 R_1 为初始值不变且其他参数静止时,将 R_2 分别变动为 1.50, 1.85, 2.00, 2.35 后,会发现随着 R_2 增大,系统趋向于不良的稳定状态的概率增加,具体如图 6 所示.

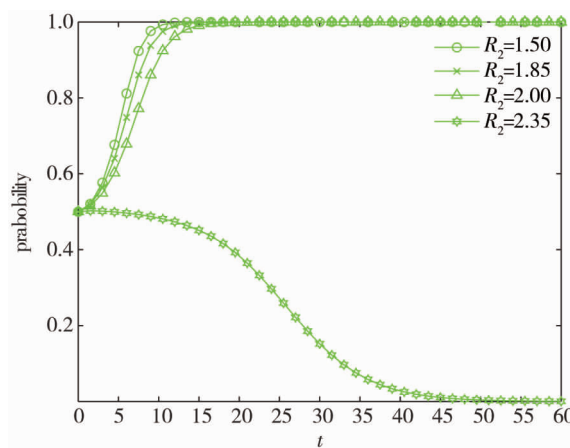


图 6 回收企业的合作收益对博弈系统的影响

因为 R_2 不单是回收企业选择合作策略的收益,还是生产企业选择参与策略时支付给回收企业的金额.其影响的并不单是回收企业的策略选择,它还会影响到生产企业是否选择参与电子废弃物回收产业链的构建,由于后者的盈利偏好强于前者,因此 R_2 对于生产企业策略的影响会大于前者.同时, R_2 也存在着阈值,当 R_2 小于 2 时,系统会趋向于理想状态,反之则会趋向于不良状态.这个阈值代表着生产企业所能承受的 R_2 的范围,当 R_2 超过了这个范围,生产企业就会退出回收产业链,导致回收产业链的破裂.因此,分析 ΔR 时,可以假定其他参数数值不变,使 R_1 单调增加,使得回收企业的增量收益单调减少,此时博弈系统趋向于不良状态的概率增加(具体结果如图 4 所示).

4.2 市场机制下生产企业的相关参数对博弈系统演化的影响

为了验证本课题前期相关研究中关于生产企业有关的因素对于演化博弈系统的影响分析,同理,我们可以在假定其他参数保持静止的情形下,变动目标参数的数值.对于生产企业初始成本收益的研究,我们可以按照时间顺序分别变动 R_3 和 S_3 的值,具体为:对 R_3 分别取数值 3.45, 3.75, 4.45, 对 S_3 分别取数值 1.00, 1.25, 1.45.可以得到:当 R_3 的数值越大时,系统趋向于不良状态的速度加快;当 S_3 的数值越大时,系统趋向于理想状态的速度加快.这也跟前文的分析结果相一致(具体如图 7 所示).

当生产企业在初始时间选择参与回收产业链构建的策略时,其增量成本和增量收益会对博弈系统的演化路径产生重大的影响.为了简化 MATLAB 的符号运算,我们可以假设 $S_2' = A_1, R_3' = A_2$, 同理,我们可以假设其他参数保持静止时变动 A_1, A_2 的值,对 A_1 分别取值:1.85, 2.00, 2.50, 对 A_2 分别取值:6.0, 6.5, 8.0.当 A_1 取值越大时,博弈系统更容易趋向于不良状态;当 A_2 越大时,博弈系统趋向理想状态的概率增加(具体如图 8 所示).

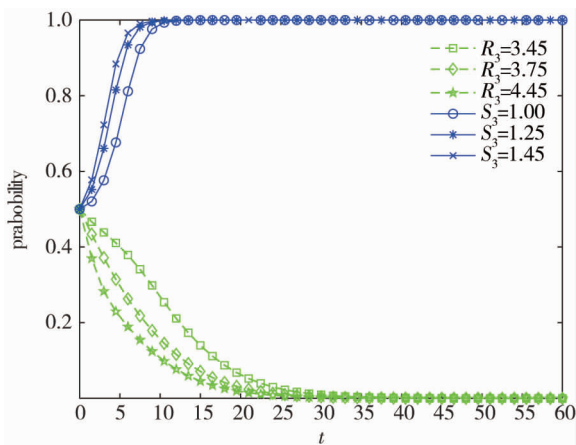


图 7 生产企业初始收益成本对博弈系统的影响

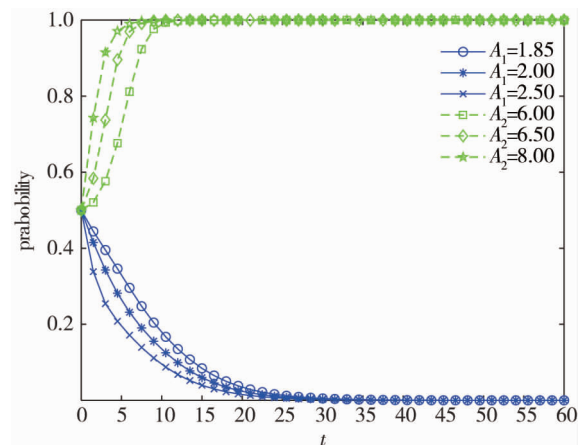


图 8 生产企业增量收益成本对博弈系统的影响

4.3 2 种博弈系统演化路径比较及政府相关参数对博弈系统的影响

依据前文分析,因为绿色经济具有巨大的社会效益,所以政府会对电子废弃物回收产业链的博弈系统进行干预,主要方式是对回收企业建立完善的奖惩机制,用补贴的方式鼓励生产企业积极参与,同时对其进行监管和对投机偷取政策补贴的企业进行惩罚,由此博弈系统纳入了新的参数.对 2 种博弈模型的演化路径进行仿真模拟分析后,可以得到:在政府调控下,有博弈系统趋向于理想状态的概率比市场机制下大大增加.这主要是因为政府的补贴减少了生产企业的选择参与策略时所带来的增量成本,以及投机行为带来的惩罚增加生产企业的初始成本禀赋,其中的初始成本不但包含实际金额支出,还包含着被政府监管成功的不确定性风险(具体如图 9 所示).

同时,保持其他参数数值静止不动,对新增的参数 C_1, θ, K 分别取不同的数值,可以得到:随着这些参数数值的增加,在相同时间内,博弈系统趋于理想状态演化的概率越高.这也从另一个角度解释了,政府调控下的博弈系统演化路径趋于理想状态的概率更大的原因(具体情形如图 10~图 12 所示).

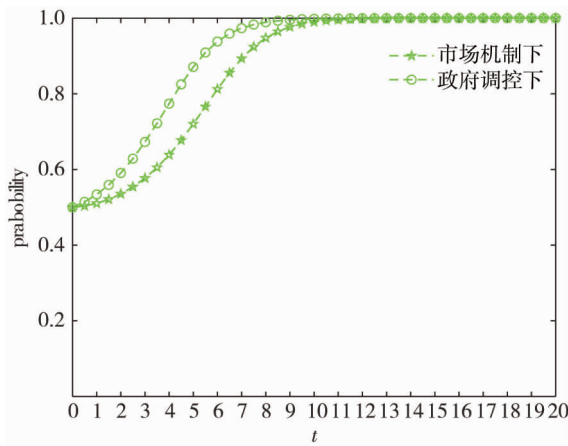


图9 2种博弈模型的演化路径

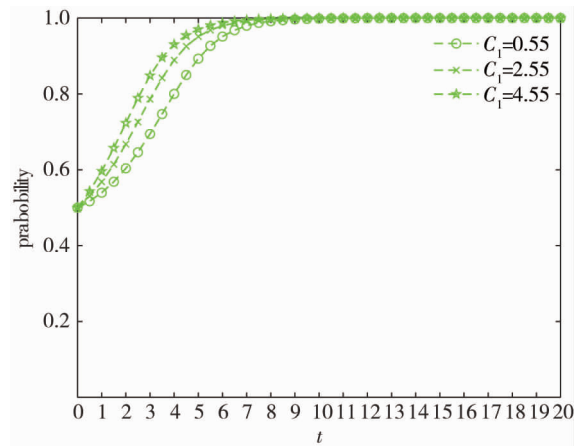


图10 政府补贴对博弈系统的影响

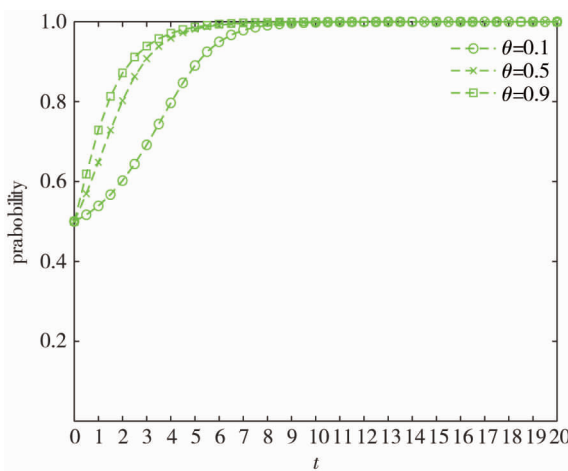


图11 政府监管效率对博弈系统的影响

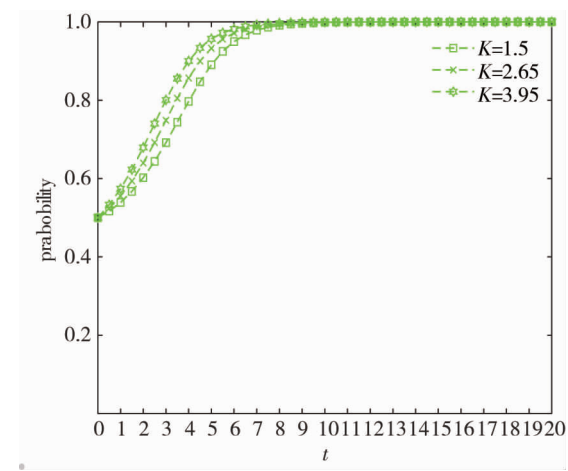


图12 政府的惩罚力度对博弈系统的影响

5 结论与启示

5.1 结论

1) 在市场机制下,选择初始成本较高或收益初始处于较低水平的双方作为博弈系统主体,在保证增量成本相对较低时,能有效促使回收产业链朝着理想方向演化。

2) 由于生产企业较高的盈利偏好,因此在考虑电子废弃物回收产业链的构建发展时,不能一味地追求回收企业的收益最大化,而应该使其保持在一定的阈值范围之内。

3) 由于市场机制下,满足电子废弃物回收产业链理想化构建和良好发展的条件太过苛刻,因此需要政府对此进行调控,由于现实情况中回收企业普遍存在收益较低和成本较高的现象,因此需要对生产企业进行调控,通过补贴降低生产企业的增量成本时,也提升了回收企业的增量收益,同时生产企业因受到政府的监管而做出更积极地参与行为。

5.2 启示

1) 电子废弃物回收产业链的构建需要寻找具有较低初始收益和较高初始成本的企业作为参与主体。相对于较高的成本禀赋而言,增量成本的相对数额较低,不容易打击参与主体的积极性;相对于较低收益,提升增量收益更容易实现,以促进产业链的构建和良性发展。

2) 积极发挥政府对于绿色经济的推动作用,立足于掌握收益、成本这2个着力点,娴熟掌握补贴、惩罚这2种手段,引导博弈双方朝着理想的方向发展,提升监管的效率和惩罚力度,促进电子废弃物回收产业链的良性发展。

3)企业责任是一家企业的立身之本,在追逐利益最大化的同时,应积极主动地承担相应的责任,且在生产经营活动中要注意到外部性的影响,同时也应响应政策号召,积极主动参与电子废弃物回收产业链的构建和发展之中。

参考文献:

- [1] 中国再生资源回收行业发展报告[R].北京:商务部流通业发展司,2019.
- [2] 张科静,魏珊珊.国外电子废弃物再生资源化运作体系及对我国的启示[J].中国人口·资源与环境,2009,19(2): 109-115.
- [3] 李春发,杨琪琪,韩芳旭.基于C2B的废弃电器电子产品网络回收系统利益相关者关系研究[J].科技管理研究,2014,34(23): 233-239,244.
- [4] GUI L Y, ATASU A, ERGUN Ö, et al. Implementing extended producer responsibility legislation[J]. Journal of Industrial Ecology, 2013, 17(2): 262-276.
- [5] ATASU A, ÖZDEMİR Ö, VAN WASSENHOVE L N. Stakeholder perspectives on E-waste take-back legislation [J]. Production and Operations Management, 2013, 22(2): 382-396.
- [6] MIAFODZYIEVA S, BRANDT N, ANDERSSON M. Recyclingbehaviour of householders living in multicultural urban area: a case study of Jarva, Stockholm, Sweden[J]. Waste Management & Research, 2013, 31(5): 447-457.
- [7] XAVIER L H, ADENSO-DÍAZ B. Decision models in E-waste management and policy: a review [M]//GUARNIERI P. Decision Models in Engineering and Management. Cham: Springer, 2015: 271-291.
- [8] 余福茂,钟永光,沈祖志.考虑政府引导激励的电子废弃物回收处理决策模型研究[J].中国管理科学,2014,22(5): 131-137.
- [9] HUANG M, SONG M, LEE L H, et al. Analysis for strategy of closed-loop supply chain with dual recycling channel[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144(2): 510-520.
- [10] DE GIOVANNI P, ZACCOUR G. A two-period game of a closed-loop supply chain[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 232(1): 22-40.
- [11] 李晓静,艾兴政,唐小我.竞争性供应链下再制造产品的回收渠道研究[J].管理工程学报,2016,30(3): 90-98.
- [12] 苑希港,张晓青.公平关切下绿色再制造商的混合渠道策略[J].控制工程,2020,27(12): 2191-2198.
- [13] 刘永清,刘文浩,丁文彬.基于消费者回收偏向的废旧家电回收决策博弈分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(4): 113-124.
- [14] 谢天帅,张菊,王付雪.中国电子废弃物押金返还政策决策模型及效应[J].运筹与管理,2017,26(1): 182-189.
- [15] 余福茂,杨灵曦.随机惩罚下电子废弃物回收主体间的演化博弈[J].杭州电子科技大学学报(社会科学版),2017,13(4): 8-14.
- [16] DWIVEDY M, SUCHDE P, MITTAL R K. Modeling and assessment of e-waste take-back strategies in India[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 96: 11-18.
- [17] SPICER A J, JOHNSON M R. Third-partydemanufacturing as a solution for extended producer responsibility[J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(1): 37-45.
- [18] BAUTISTA J, PEREIRA J. Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. An application to the metropolitan area of Barcelona[J]. Omega, 2006, 34(6): 617-629.
- [19] 彭本红,屠羽.社会资本嵌入视角的电子废弃物回收治理研究[J].管理工程学报,2020,34(2): 116-123.
- [20] 彭本红,武柏宇,谷晓芬.电子废弃物回收产业链协同治理影响因素分析:基于社会网络分析方法[J].中国环境科学,2016,36(7): 2219-2229.
- [21] 彭本红,谷晓芬,武柏宇.电子废弃物回收产业链多主体协同演化的仿真分析[J].北京理工大学学报(社会科学版),2016,18(2): 53-63.
- [22] 徐红,王辉,刘栩君.快递废弃物回收产业链演化仿真研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(1): 111-119.
- [23] 李彪,夏西强,赵强.博弈视角下分类回收对废旧产品回收影响研究[J].中国管理科学,2023,31(8): 261-268.