

DOI:10.15918/j.jbitss1009-3370.2016.0210

电子废弃物回收产业链多主体协同演化的仿真分析

彭本红¹, 谷晓芬¹, 武柏宇²

(1.南京信息工程大学 经济管理学院, 南京 210044; 2.上海第二工业大学 上海电子废弃物资源化产学研合作开发中心, 上海 201209)

摘要: 电子废弃物的循环利用是一个庞大的系统工程,涉及到多方利益相关者。基于利益主体协同演化视角,构建电子废弃物回收产业链中多主体的协同演化博弈模型,并在 Vensim 平台上进行仿真模拟,研究多主体演化均衡状态以及演化驱动因素。仿真结果表明:电子废弃物回收产业链中三方主体最终在政府不监管、消费者选择正规回收途径、企业主动加大环保投入处达到稳定均衡状态;政府、消费者和企业电子废弃物回收产业链中分别充当系统演化的引导者、辅助者和推动者;政府的监管成本以及对企业的奖惩力度,企业获得的长期循环经济效益、成本和短期经济效益等因素是系统演化的主要驱动力。最后提出研究启示:在治理初期,政府对企业宜采取强硬手段;在治理中后期,政府对企业宜采取缓和手段;在治理全程,政府都应以强化消费者和企业的环保意识为重点。

关键词: 电子废弃物;回收产业链;演化博弈;多主体仿真分析

中图分类号: F224

文献标识码: A

文章编号: 1009-3370(2016)02-0053-11

目前,中国正处于电子产品更新换代的高峰期,电子废弃物(e-waste)或废弃电器电子产品(waste electronic & electrical equipment, WEEE)的数量惊人,据2012年电子垃圾处理行业报告显示,2012年中国电子垃圾数量占全球的22.7%,已经成为世界最大的电子垃圾生产国。2014年底,环保部、工信部就完善废弃电器电子产品处理基金补贴、规范企业生产作业和提高环境管理水平做出指导^[1]。2015年两会期间,针对电子垃圾回收处理问题,民进中央提出通过严格监管从源头减少电子垃圾总量、加强电子垃圾处理的制度设计、建立电子垃圾回收体系并重点扶持大型专业电子垃圾处理企业建设和技术改造^[2]。而面对电子废弃物大量存在这一事实,如何对电子废弃物进行有效的回收处理,实现废弃资源再利用,已成为发展绿色经济亟待解决的问题。

一、文献综述

目前国内关于电子废弃物的代表性研究主要集中在电子废弃物的资源化、回收处理现状、延伸生产者责任制以及立法等方面。孙云丽等(2007)^[3]给出了电子废弃物的定义、分类和来源,介绍了资源化研究的概况;赵亮等(2007)^[4]探讨了电子废弃物资源化的意义并重点研究了相关回收技术以及国内外资源再利用现状;梁波等(2007)^[5]分析了中国电子废弃物在回收、管理和利用方面的特性,并

对未来电子废弃物的产生量进行预测。陈苏等(2003)^[6]、邵诣臻等(2011)^[7]和龚允玉(2014)^[8]介绍了国内外电子废弃物的技术处理现状和管理现状。王兆华(2006)^[9]对生产者责任延伸制度的内涵及国际经验进行评析,并结合中国国情提出了推行生产者责任延伸制度的建议。李丹(2006)^[10]指出中国电子废弃物管理方面存在诸多问题,急需立法给予解决,提出了管理体制制度、生产者责任延伸制度、押金制度、产品成分标识制度等法律制度;姚凌兰等(2012)^[11]分析了中国电子废弃物回收管理在立法、执法和实际操作中存在的弊端,认为“以旧换新”政策依然存在生产者责任缺失、完全依赖国家财政支持等不足。中国在最近几年见证了电子废弃物的快速增长,但尚未使用适当的行政监督建立相应的回收和处理系统,不过在颁布法律法规上取得的进步是值得肯定的^[12]。

与国内研究不同,国际上关于电子废弃物的研究越来越倾向于通过定量的方法来寻找利益相关者的最优策略。Agamuthu 和 Dennis(2013)^[13]认为亚洲一些国家制定诸多政策工具来保证电子废弃物的管理可能存在过度依赖立法和简单借鉴发达国家策略的弊端,电子废弃物管理政策的制定不能脱离当地的政治、文化和经济。Nnorom 和 Osibanjo(2008)^[14]分析了发展中国家电子废弃物回收处理现状,认为政府态度的转变是电子废弃物回收处理的

收稿日期: 2015-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(71263040;71563030);上海电子废弃物资源化产学研合作开发中心2014年开放基金(2014-A-04)

作者简介: 彭本红(1969—),男,博士,教授,E-mail:pbb211@126.com

关键。Hosoda(2007)^[15]提倡把生产者责任延伸制应用于设备的零售商以及生产者,但是在“开环”结构中“生产者责任”很难实现,可以通过租赁、支付存款等新的商业模式,把开放的结构变为闭环系统^[16]。Zoeteman等(2010)^{[17]415-436}把全球电子废弃物回收分为4个阶段:当地倾倒、出口倾倒、全球开环低水平回收和区域闭环高水平回收,实证表明第4阶段可以实现经济效益和生态效益双赢,并需要行业采取主动以及政府创造有利条件。Gui等(2013)^[18]研究了电子废弃物回收系统中各利益相关者视角对生产者责任延伸政策目标实现的影响。Kuniko等(2012)^[19]通过定量方法计算出电子废弃物环境影响和成本效益,并试图对全球逆向物流提出适当的策略以降低环境影响。Vi等(2013)^[20]采用系统动力学方法来了解一家电子废弃物回收工厂的手机电子废弃物物流,分析表明公众意识在减少污染物中的影响最大。

文献研究表明,目前关于电子废弃物回收产业链的研究在内容上大多集中在电子废弃物回收处理的现状和政策、回收产业链中利益相关者关系^{[21]234-235}回收处理的补偿机制和激励机制等^{[22]45-46, [23]26-28}方面,对电子废弃物回收产业链中利益相关者演化的研究凤毛麟角;在方法上大多使用定性分析,即使有使用博弈论或系统动力学^[24-25]进行定量分析的,也存在仅分析两两博弈或忽视系统间协同作用的局限性的问题。而要完善电子废弃物回收系统,建立健全的电子废弃物回收产业链治理机制,就必须先对其发展演化的机理和内在动因有一个系统的了解才能对症下药^[26]。此外,电子废弃物回收处理过程中涉及政府、企业、消费者等多个子系统,它们的系统内部及系统之间均存在着协同作用^[27],在整个系统中,缺乏任何一方的配合与协作都会对电子废弃物的循环利用造成重大影响^[28]。因此,本文把电子废弃物回收产业链上多个利益相关者纳入研究体系,从演化博弈理论角度分析电子废弃物回收产业链多主体协同演化机理,并基于系统动力学对多主体演化趋势及演化驱动力进行模拟,进而结合实际总结管理启示。

二、电子废弃物回收产业链多主体协同演化博弈

演化博弈研究参与者的有限理性行为,分析其行为过程之间的稳定性,并判断其行为是否达到了Nash均衡,或者演化稳定策略(evolutionarily stable strategy, ESS)。在长时间的动态博弈过程中,每一次

博弈中具有较高收益的策略都会取代较低收益的策略,经过如此反复多次的博弈,博弈群体之间最终达到单个博弈群体的相对博弈最大化^[29]。本阶段应用演化博弈理论,旨在厘清电子废弃物回收产业链中多个利益相关者之间的博弈关系,探索影响各利益相关者策略选择的因素。

(一)各参与方的博弈关系

电子废弃物回收产业链中的行为主体主要涉及政府、企业和消费者3个方面,并且区域性闭环回收可以实现经济效益和生态效益双赢^{[17]415-436},是电子废弃物回收的高水平状态,因此,本文以区域为研究对象,把政府限定为地方政府、消费者限定为当地消费者,同时考虑到生产者延伸责任制中明确的产品废弃物回收处理、再处理利用的责任主体,把此处的企业限定为电子电器产品的生产者。另外,为了方便研究,本文假设所有的电子废弃物都是具有回收价值的。

1.政府与企业之间的博弈

政府是电子废弃物回收产业链中的调控监管者,企业是电子废弃物回收产业链中的执行者^[22]。政府与企业之间博弈关系主要涉及的是生产商责任延伸制的推广与落实问题。目前中国生产商的末端污染治理责任主要体现为经济责任,即生产商交纳废弃物回收处理基金,而并未真正参与到末端治理的过程中履行其实体责任^[30]。政府可以通过完善法规和奖惩机制、加强执法和监督激励企业履行其实体责任。政策法规具有强制性,被普遍认为是影响企业行为的有效途径^[31],但是政策法规也具有条文的局限性,难以观测企业的行为。为了针对性地对企业进行奖惩,政府可以选择监管企业。政府要为监管付出一定的成本,但也可以通过监管获得效益;而如果政府不监管,就无从得知企业的环保行为是否有效。因此,对于政府而言,政府要平衡监管成本与企业创造的回收效益。

2.政府与消费者之间的博弈

消费者是电子废弃物回收产业链中的实践者,其主要利益要求是获得回收利益、减少环境污染^{[21]235-236}。消费者处于回收产业链的起点,他们对电子废弃物回收处理的态度及其环保意识的高低决定了电子废弃物的回收率,直接关系到电子废弃物回收处理工作能否顺利开展^{[22]16-17}。由于经济状况和历史文化等原因,中国消费者考虑更多的是回收所得的经济利益而非环境与社会利益^[32]。正规回收部门回收手续多,回收地点分布散乱,回收价格也较低,无法吸引广大消费者的支持和参与,因此消费者大多数选

择将电子废弃物通过非正规途径贩卖。政府为了保护环境、缓解资源压力、促进WEEE回收的产业化,必定会想方设法激励消费者参与到电子废弃物回收活动中,比如加大环保宣传和经济激励。因此,对于消费者而言,在比较正规与非正规回收收益的同时,还要考虑政府激励带来的收益。

3. 企业与消费者之间的博弈

消费者是电子电器产品的最终使用者,在回收产业链中充当电子废弃物的供给方,而生产商却充当需求方,在闭环回收模式中,二者的供需角色相互转换,对电子废弃物回收的态度和行为相互影响。从短期来看,生产商加大环保投入不可避免地会带来企业成本增加和经济效益下降,多数企业缺乏对电子废弃物回收处理的动力;从长期来看,生产商在电子废弃物回收及资源的循环再生效率等方面具有明显优势,在废弃物的回收、循环、拆解、再资源化中加大投入,容易形成“资源-产品-废弃物-再生资源”的循环经济发展模式^{[23]31-32}。因此,对于企业而言,不仅要平衡环保投入的经济和时间成本以及循环经济带来的效益,还要考虑消费者行为对企业效益的影响。

综上所述,政府可选择的策略有{激励消费者参与,监管企业;激励消费者参与,不监管企业};消费者的策略有{正规途径;非正规途径};企业的策略有{主动加大环保投入;被动交纳回收处理基金}。本文用 α, β, γ 分别表示政府在激励消费者通过正

规途径处理电子废弃物情况下监管企业、消费者选择正规途径、企业选择主动加大环保投入的概率,其中 $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ 。

(二) 博弈模型参数与支付矩阵

根据博弈焦点分析,可以确定三方在演化博弈中涉及的主要参数。政府涉及的主要参数为:企业交纳的回收处理基金收入 R_1 、监管企业付出的成本 C_1 、对积极主动企业的奖励 B_1 、对被动无责任感企业的罚金 K 、不监管时给企业的补贴 S_1 ;消费者涉及的主要参数为:通过正规回收途径获得的收益 R_2 、通过正规回收途径获得的政府补贴 S_2 、通过正规回收途径花费的(时间、交通等)成本 C_2 、通过正规回收途径为主动加大环保投入的企业带来的间接效益 I 、通过非正规回收途径获得的收益 R_2' 、通过非正规途径对环境造成的损害 S_2' ;企业涉及的主要参数为:交纳的回收处理基金 R_1 、环保投入成本 C_3 (假设其中给予消费者的补贴为 I)、长期获得的循环经济效益 R_3 、短期获得的企业效益 R_3' 、表现良好获得的奖励 B_1 、投机取巧遭受的罚金 K 、获得的政府补贴 S_1 。

根据利益最大化原则,借鉴张维迎(2012)^[33]的分析方法,可分别列出政府监管企业和不监管企业情形下的三方博弈支付矩阵,结果如表1和表2所示。每一个表格中的第一个函数项表示政府的收益,第二个函数项表示消费者的收益,第三个函数项表示企业的收益。

表1 政府对企业采取监管策略(α)情况下三方博弈支付收益矩阵

消费者	企业	
	主动投入(γ)	被动交纳($1-\gamma$)
正规途径(β)	$(R_1 - C_1 - B_1 - S_2; R_2 - C_2 + S_2 + I; R_3 - C_3 - R_1 + B_1 + I)$	$(R_1 - C_1 + K - S_2; R_2 - C_2 + S_2; R_3' - R_1 - K)$
非正规途径($1-\beta$)	$(R_1 - C_1 - B_1; R_2' - S_2'; R_3 - C_3 - R_1 + B_1)$	$(R_1 - C_1 + K; R_2' - S_2'; R_3' - R_1 - K)$

表2 政府对企业采取不监管($1-\alpha$)策略情况下三方博弈支付收益矩阵

消费者	企业	
	主动投入(γ)	被动交纳($1-\gamma$)
正规途径(β)	$(R_1 - S_1 - S_2; R_2 - C_2 + S_2 + I; R_3 - C_3 - R_1 + S_1 + I)$	$(R_1 - S_1 - S_2; R_2 - C_2 + S_2; R_3' - R_1 + S_1)$
非正规途径($1-\beta$)	$(R_1 - S_1; R_2' - S_2'; R_3 - C_3 - R_1 + S_1)$	$(R_1 - S_1; R_2' - S_2'; R_3' - R_1 + S_1)$

(三) 多主体博弈的动态复制方程

本文用 u_{ij} 表示第 i 个参与主体选择 j 策略时的收益,其中, $i=g, c, e$,分别表示政府、消费者、企业; $j=1, 2$,分别表示主体的第一种策略和第二种策略。如 u_{g1} 表示政府选择监管企业时的收益; u_{g2} 表示政府选择不监管企业时的收益。

参照威布尔(2006)^[34]的演化博弈论中的动态复制方程方法,根据支付矩阵可计算出政府选择监管企业的期望收益函数为

$$u_{g1} = \beta\gamma(R_1 - C_1 - B_1 - S_2) + \beta(1-\gamma)(R_1 - C_1 + K - S_2) + (1-\beta)\gamma(R_1 - C_1 - B_1) + (1-\beta)(1-\gamma)(R_1 - C_1 + K) = R_1 + K - C_1 - \gamma(B_1 + K) - \beta S_2 \quad (1)$$

$$u_{g2} = \beta\gamma(R_1 - S_1 - S_2) + \beta(1-\gamma)(R_1 - S_1 - S_2) + (1-\beta)\gamma(R_1 - S_1) + (1-\beta)(1-\gamma)(R_1 - S_1) = R_1 - S_1 - \beta S_2 \quad (2)$$

政府的平均期望收益为

$$\bar{u}_g = \alpha u_{g1} + (1-\alpha) u_{g2}$$

根据式(1)和式(2)可得政府选择监管企业的

复制动态微分方程为

$$\frac{d\alpha}{dt} = \alpha(u_{g1} - \bar{u}_g) = \alpha(1-\alpha)(u_{g1} - u_{g2}) = \alpha(1-\alpha) [K + S_1 - C_1 - \gamma(B_1 + K)] \quad (3)$$

同理,消费者通过正规途径处理电子废弃物的期望收益函数为

$$u_{c1} = \alpha\gamma(R_2 - C_2 + S_2 + I') + \alpha(1-\gamma)(R_2 - C_2 + S_2) + (1-\alpha)\gamma(R_2 - C_2 + S_2 + I') + (1-\alpha)(1-\gamma)(R_2 - C_2 + S_2) = R_2 + S_2 - C_2 + \gamma I' \quad (4)$$

消费者通过非正规途径处理电子废弃物的期望收益函数为

$$u_{c2} = R_2' - S_2' \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可得消费者选择正规回收途径的复制动态微分方程为

$$\frac{d\beta}{dt} = \beta(u_{c1} - \bar{u}_c) = \beta(1-\beta)(u_{c1} - u_{c2}) = \beta(1-\beta) [R_2 + S_2 + S_2' + \gamma I' - C_2 - R_2'] \quad (6)$$

企业选择主动加大环保投入的期望收益函数为

$$u_{e1} = \alpha\beta(R_3 - C_3 - R_1 + B_1 + I) + \alpha(1-\beta)(R_3 - C_3 - R_1 + B_1) + (1-\alpha)\beta(R_3 - C_3 - R_1 + S_1 + I) + (1-\alpha)(1-\beta)(R_3 - C_3 - R_1 + S_1) = \alpha(B_1 - S_1) + \beta I + R_3 + S_1 - R_1 - C_3 \quad (7)$$

企业选择被动交纳回收处理基金的期望收益函数为

$$u_{e2} = \alpha\beta(R_3' - R_1 - K) + \alpha(1-\beta)(R_3' - R_1 - K) + (1-\alpha)\beta(R_3' - R_1 + S_1) + (1-\alpha)(1-\beta)(R_3' - R_1 + S_1) = R_3' + S_1 - \alpha(S_1 + K) \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)可得企业选择主动加大环保投入策略的复制动态微分方程为

$$\frac{d\gamma}{dt} = \gamma(u_{e1} - \bar{u}_e) = \gamma(1-\gamma)(u_{e1} - u_{e2}) = \gamma(1-\gamma) [R_3 - C_3 - R_3' + \alpha(B_1 + K)\beta I] \quad (9)$$

在电子废弃物回收产业链中,政府、消费者和企业的复制动态方程涉及到不同策略组合的收益、不同策略的比例分布,并且相关参数众多,难以通过分析雅克比矩阵判断特征值的稳定性分析方法获得解析解。为了更好地描述政府、消费者和企业之间协同演化所能达到的均衡状态,本文采用系统动力学仿真工具建立三方的演化博弈模型,研究三方的策略稳定情况,以及改变相关参数情况下期望收益的变化,从而判断影响电子废弃物回收的最相关因素。

三、电子废弃物回收产业链多主体协同演化仿真

(一)基于SD的演化博弈模型

本文运用 Vensim 软件,根据演化博弈分析构建

系统动力学模型,主要参照钟永光等(2013)^[35]的系统动力学分析方法及步骤。

1.由三方博弈焦点分析及支付矩阵确定系统涉及的主要变量,包括: α 、 R_1 、 C_1 、 B_1 、 K 、 S_1 、 u_{g1} 、 u_{g2} ; β 、 R_2 、 S_2 、 C_2 、 I 、 R_2' 、 S_2' 、 u_{c1} 、 u_{c2} ; γ 、 C_3 、 I' 、 R_3 、 R_3' 、 u_{e1} 、 u_{e2} (其中 u_{g1} 、 u_{g2} 分别代表政府监管和不监管的期望收益; u_{c1} 、 u_{c2} 分别代表者消费选择正规和非正规回收途径的期望收益; u_{e1} 、 u_{e2} 分别代表主动加大环保投入和被动交纳回收处理基金的期望收益;其他变量解释同本文第二部分参数解释一致)。

2.在因果回路图的基础上进一步区分变量(参数)的性质,画出存量流量图,其中 α 、 β 、 γ 代表存量,分别是3个速率变量;政府、消费者、企业策略的变化率对时间的积分; u_{g1} 、 u_{g2} 、 u_{c1} 、 u_{c2} 、 u_{e1} 、 u_{e2} 为6个中间变量; R_1 、 C_1 、 B_1 、 K 、 S_1 、 R_2 、 C_2 、 S_2 、 I 、 R_2' 、 S_2' 、 R_3 、 C_3 、 R_3' 为系统边界以外的变化因素,称为“外生变量”。

3.根据式(1)~式(9)写出模型中变量的关系式和方程,其中 $\frac{d\alpha}{dt}$ 、 $\frac{d\beta}{dt}$ 、 $\frac{d\gamma}{dt}$ 分别代表政府、消费者、企业三者策略的变化率,根据9个方程式可以清楚地描述出存量与速率变量、中间变量与存量、中间变量与外生变量之间的函数关系。

4.结合实际情况给外生变量赋初值。本研究假设所有外生变量均为正数,同时考虑到电子废弃物回收产业链具有公共物品性质,需要成本且不能在短期内带来直接的收益^{[23][29-31]},因此,政府、企业、消费者在初始时期的期望收益值可能为负。因此,对外生变量赋如下初始值: $R_1=40$ 、 $C_1=20$ 、 $K=25$ 、 $S_1=18$ 、 $B_1=25$ 、 $R_2=10$ 、 $C_2=8$ 、 $S_2=15$ 、 $I=13$ 、 $I'=12$ 、 $R_2'=30$ 、 $S_2'=18$ 、 $R_3=65$ 、 $C_3=28$ 、 $R_3'=46$,最终形成图1所示的三方演化博弈系统的SD仿真模型。

本文所有仿真值的选取均处于考虑各个相关因素的改变对政府、消费者、企业三者策略选择的敏感性分析,因此每个仿真值并不代表现实电子废弃物回收产业链中各方的支付或收益值,对不同的电子废弃物回收产业链可以根据实际实施情况赋值。

(二)纯策略博弈仿真分析

通过演化博弈分析模型可知系统会达到演化均衡,但并不能明晰达到均衡的原因和过程,不能明确均衡是否唯一和稳定。本文基于上述假设值以及变量之间的方程,利用SD的建模仿真方法,用 Vensim 软件对三方的动态博弈进行仿真。设置模拟周期为200, INITIAL TIME=0, FINAL TIME=200,

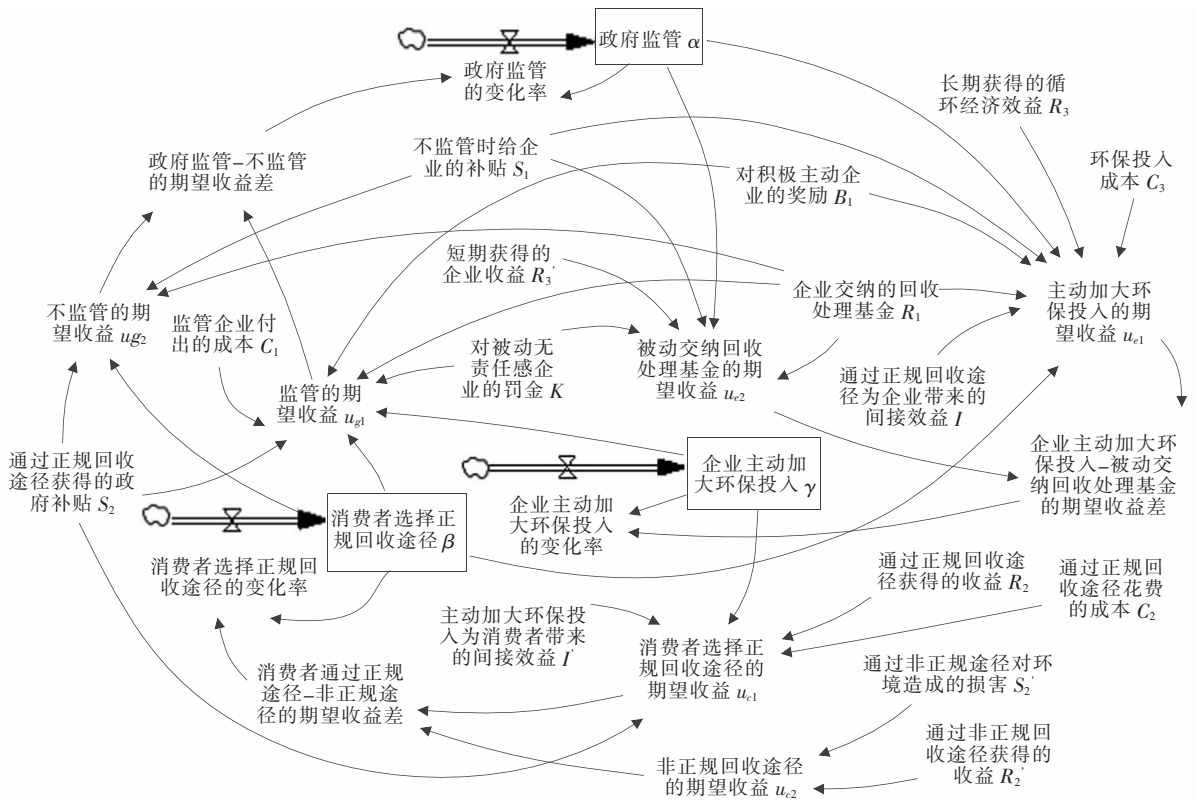


图1 政府、消费者、企业演化博弈系统的SD仿真模型

TIME STEP=0.5,并以3个主体的策略概率作为主要的衡量指标,从而对电子废弃物回收产业链中的相关影响因素进行分析。

当电子废弃物回收产业链中三方博弈主体的初始值均为某种纯策略时,参与主体的策略选择均有0和1两种,即(0,0,0),(1,0,0),(1,1,0),(0,1,0),(0,1,1),(1,1,1),(1,0,1),(0,0,1)这8种策略组合,软件模拟表明,当三方初始状态均为纯策略时,系统中没有任何一方愿意改变当前状态来打破平衡。但是一旦这三方做出微小改变,均衡状态就会被打破。为了把握三方的演化状态,本文让各方做出微小改变,以策略(0,0,0)为例,令其模拟初始值为(0.01,0.01,0.01),同理对于(1,1,1)策略,令其模拟初始值为(0.99,0.99,0.99),并根据政府的初始策略选择分两种情境进行分析。

情境1. 政府初始策略为选择不监管,即政府在初始状态下有极小的监管意愿。

在这种情况下,政府、消费者、企业有4种初始策略组合,三方主体的策略演化路径如图2~图5所示。当企业最初采取被动策略时(如图2或图4所示),政府选择监管的意愿会迅速提升,企业选择主动加大环保投入的可能性急剧上升,而当政府监管意愿逐渐降低时,企业采取主动策略的意愿仍然逐渐增强直至在主动策略处达到稳定,同时政府也向

不监管策略趋近直至稳定。对比图2和图4,消费者初始时刻选择正规回收途径的意愿越强烈,政府就越早在不监管处达到稳定,而企业策略演化路径大体一致。当企业最初采取被动策略时(如图3或图5所示),虽然政府一直采取不监管策略,但是企业的策略演化路径却大不相同,说明消费者对企业的策略选择有较大的影响。对比图3和图5可知,当消费者选择正规回收途径的意愿很强烈时,企业也会选择主动加大环保投入。但是当消费者初始策略为选择非正规回收途径时,企业选择主动加大环保投入的意愿降低,而随着消费者选择正规回收途径意愿的增强,企业也逐渐向主动策略回升。

结论1. 在政府初始监管意愿极低的情况下,三方主体最终会在(0,1,1)即(政府不监管,消费者选择正规回收途径,企业主动加大环保投入)处达到均衡。在企业最初选择被动策略的情况下,政府历经“不监管-监管-不监管”的策略演化路径,企业历经“被动-主动性急剧提升-主动”的策略演化路径,政府对企业的影晌具有时滞性。消费者环保意识提高可以辅助政府发挥“监管人”作用,驱使企业主动加大环保投入。

情境2. 政府初始策略为选择监管,即政府在初始状态下有强烈的监管意愿。

在这种情况下,政府、消费者、企业也有4种初

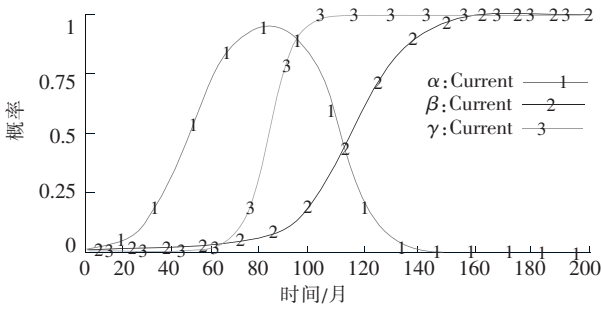


图2 初始策略组合为(0,0,0)时的策略演化路径

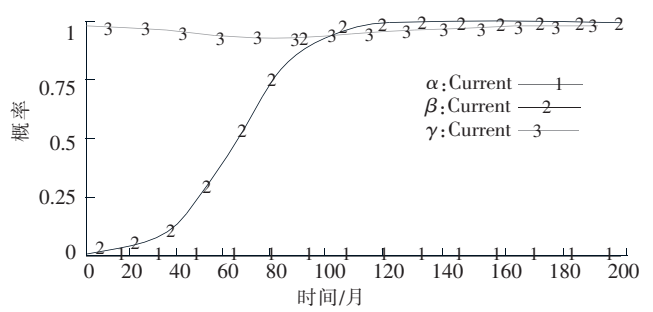


图3 初始策略组合为(0,0,1)时的策略演化路径

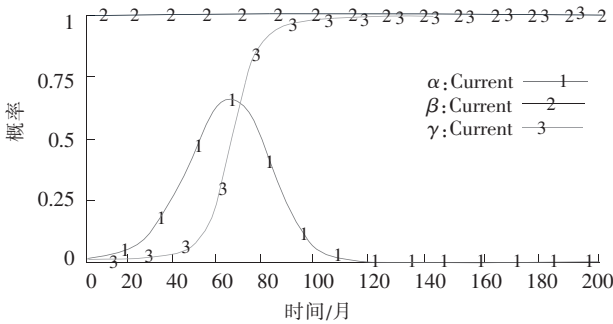


图4 初始策略组合为(0,1,0)时的策略演化路径

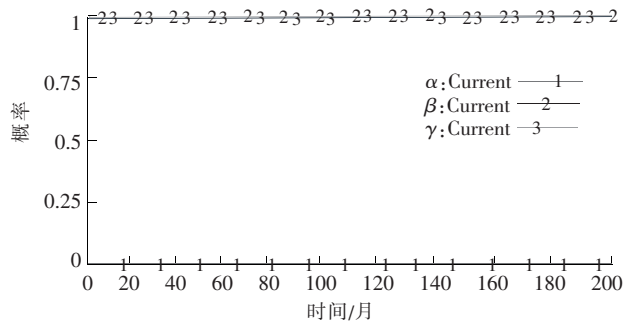


图5 初始策略组合为(0,1,1)时的策略演化路径

始策略组合,三方主体的策略演化路径如图6~图9所示。当企业最初采取被动策略时(如图6或图8所示),政府一直采取监管策略,而一旦企业在政府的监管下向主动策略转变直到完全采取主动策略,政府监管意愿就会逐渐降低,直至在不监管策略下达到稳定。对比图6和图8,在政府初始就选择监管的情境下,消费者初始策略选择正规回收途径,企

业就越早在主动策略处达到稳定,而对政府的策略选择及演化路径几乎无影响。当企业最初采取主动策略时(如图7或图9所示),就会一直采取主动策略,同时政府选择监管的意愿逐渐降低,直至在不监管处达到稳定。图7和图9再次印证了消费者的策略选择对政府的策略演化路径并无多大影响。

结论2. 在政府初始监管意愿较强烈的情况下,

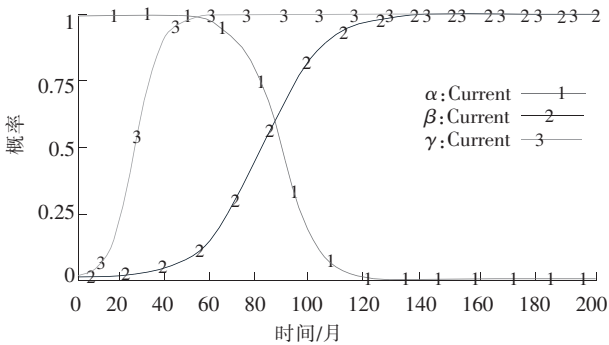


图6 初始策略组合为(1,0,0)时的策略演化路径

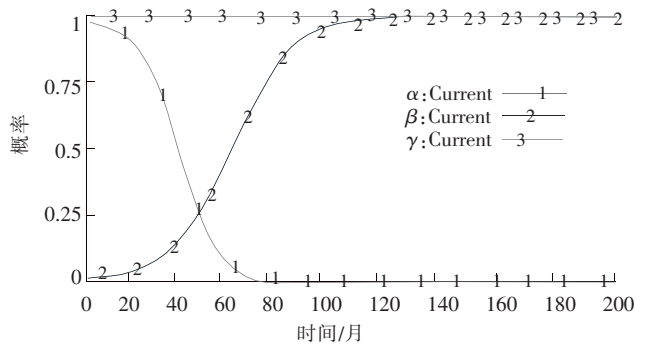


图7 初始策略组合为(1,0,1)时的策略演化路径

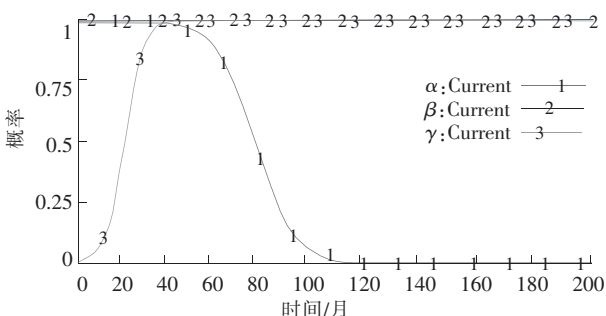


图8 初始策略组合为(1,1,0)时的策略演化路径

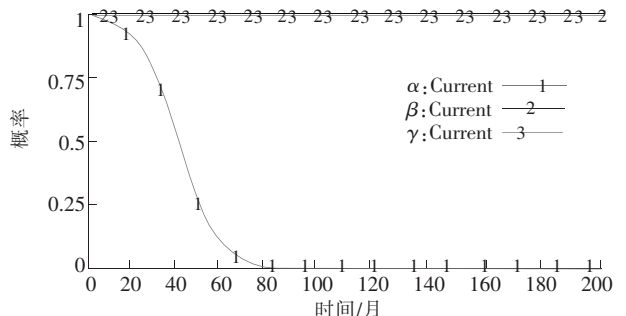


图9 初始策略组合为(1,1,1)时的策略演化路径

三方主体最终也会在(0,1,1)处达到均衡。在企业最初选择被动交纳回收处理基金的情况下,政府遵循“监管-不监管”的策略演化路径,企业遵循“被动-主动”的策略演化路径。三者的策略演化路径简单、具有单调性、达到稳定状态历时较短。

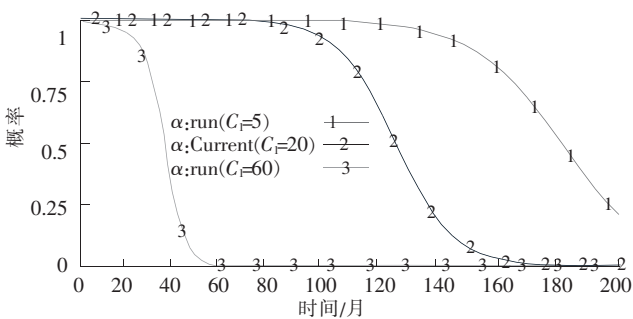
(三)主要影响因素仿真分析

为了进一步探讨各主体策略选择对外生变量的敏感程度,本文将改变各个外生变量的初始值,模拟其对主体策略选择的影响,从而找出主体演化的关键驱动力。考虑到不同策略组合最终演化稳定状态是一致的,本文仅选取初始策略组合(1,0,0)为仿真对象。通过仿真,选取 C_1 、 B_1 、 K 、 R_3 、 C_3 、 R_3 这6个具有较大影响力的变量进行详细分析。

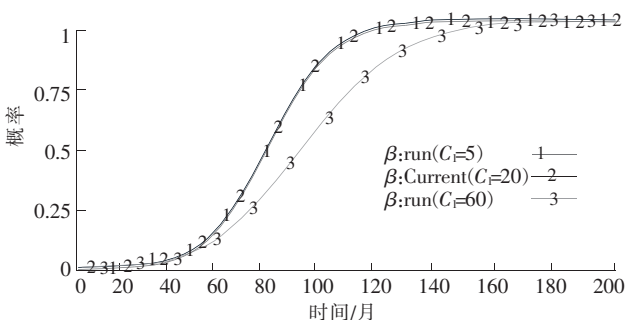
情境3. 政府监管企业付出的成本 C_1 发生变化。

政府监管企业付出的成本是政府是否选择监管策略需要考虑的必要因素。如果监管企业付出的成本大于或远远超过了监管所能获得的收益,那么政府会慎重考虑是否实施监管。如图10所示,随着 C_1 的增加,政府趋于不监管策略的用时越短,并且 C_1 在一定限度内不会影响消费者和企业的策略选择及其演化路径。然而当 C_1 增加到一定程度后,消费者趋于正规回收途径策略历时过长,甚至最终不能在正规回收途径达到稳定,同样,企业最终的策略选择也有较大波动,无法在主动策略处达到稳定,甚至最终会趋于被动策略。

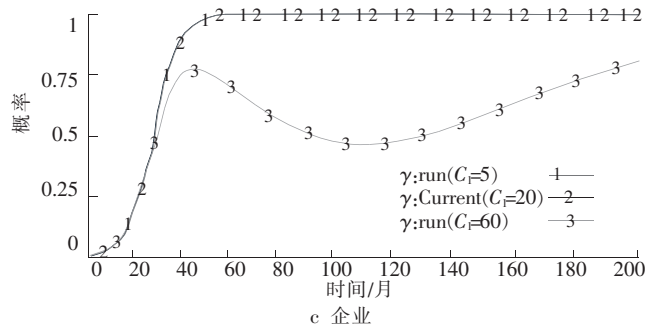
结论3. 当政府监管成本在一定限度内变动时,仅仅会影响政府的策略选择,而对消费者和企业策略无影响,但是监管成本过高不利于系统达到演化稳定。



a 政府



b 消费者

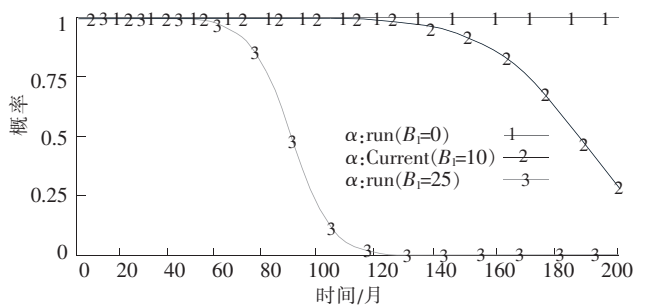


c 企业

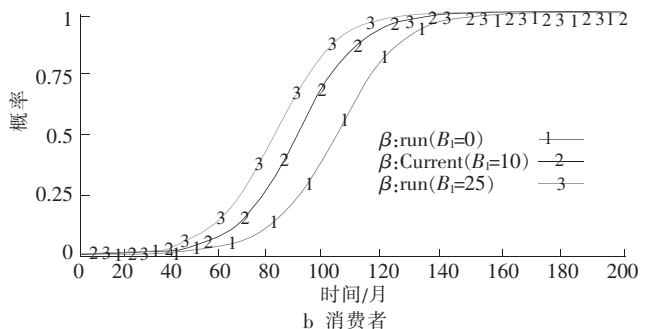
图10 不同监管成本下各主体策略选择演化路径

情境4. 政府对积极主动企业的奖励 B_1 发生变化。

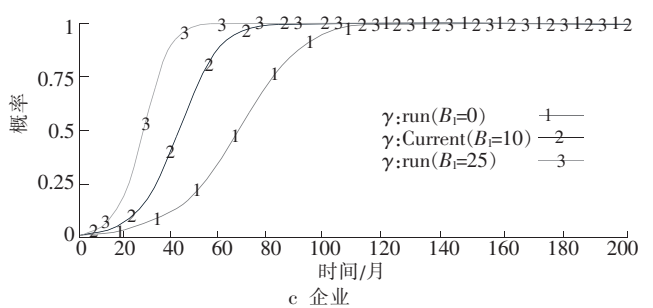
政府对积极主动的企业进行奖励是激励企业实施生产商责任延伸制度的重要手段。如果奖励制度不合理,会导致电子废弃物回收产业链的治理过分依赖国家财政支撑,无法充分调动企业和消费者的主动性。如图11所示,当政府不给企业任何奖励时($B_1=0$),相当于间接减少了政府的监管成本,因此政府会选择监管策略。同时,消费者会选择正规回收途径,企业也会在主动加大环保投入处达到稳定。随着政府给予企业奖励的增加,政府监管意愿逐渐降低,当奖励增加到一定值,政府策略在不监管处达到稳定,而消费者和企业的最终策略并未发生改变,只是达到演化稳定的状态历时更短。



a 政府



b 消费者



c 企业

图11 不同奖励程度下各主体策略选择演化路径

结论 4. 当政府没有奖励支出时, 会更倾向于选择监管策略, 而随着奖励支出增加, 政府选择不监管策略的意愿逐渐增强。政府对企业的奖励的多少对消费者和企业的策略演化趋势无显著影响, 但是可以有效缩短各方策略达到稳定的时间。

情境 5. 政府对投机取巧企业的罚金 K 发生变化。

政府对投机取巧的企业采取一定惩罚手段对推动企业参与电子废弃物回收处理、形成以生产者为主体的电子废弃物回收处理体系具有深远意义。如果惩罚力度不足, 可能不能让企业明晰电子废弃物回收的重要性, 从而间接向消费者传递一种“政府不够重视”的假象。如图 12 所示, 当政府不对企业进行任何惩罚时($K=0$), 相当于政府监管带来的直接利益减少, 因此政府最终选择不监管。而消费者仍然选择正规回收策略、企业也仍然选择主动策略。随着惩罚力度增加, 政府越早选择不监管, 消费者和企业也会越快达到稳定均衡状态, 并且企业的策略选择对惩罚力度更为敏感, 即惩罚力度对企业的策略选择有更强的影响。

结论 5. 政府对企业的惩罚力度越大, 就越早选

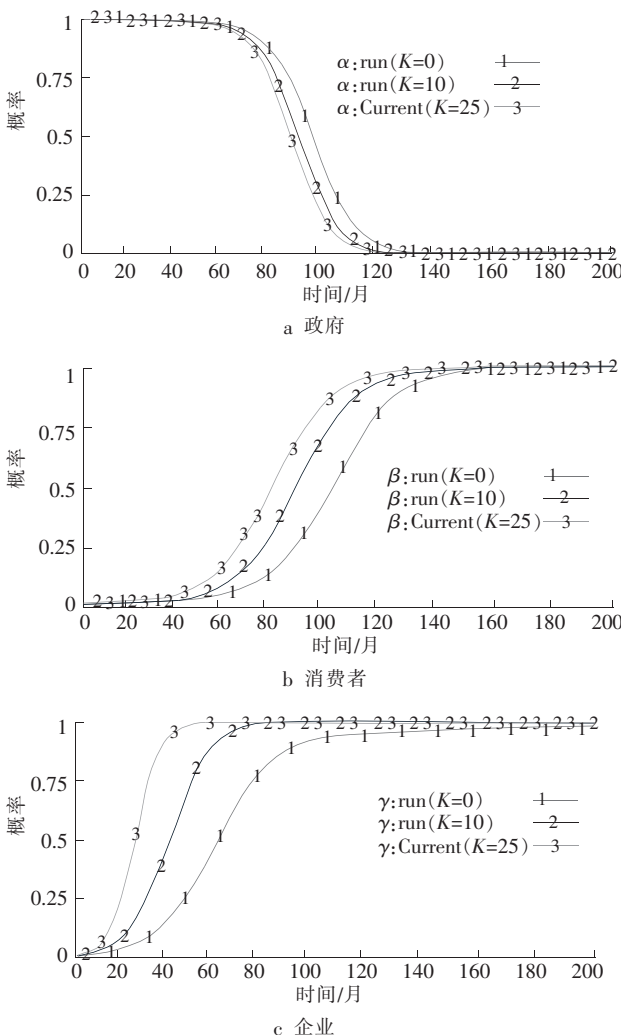


图 12 不同惩罚力度下各主体策略选择演化路径

择不监管策略。缺乏有力的惩罚机制可能会导致企业缺乏约束与引导, 使其选择被动策略, 从而间接影响消费者选择不利于系统稳定的非正规回收策略, 而稍微加大惩罚力度就可以迅速引导企业选择主动策略。

情境 6. 企业长期获得的循环经济效益 R_3 发生变化。

企业主动加大环保投入带来的长期循环经济效益是影响企业策略选择的重要因素。对于寻求可持续发展的企业来说, 潜在可观的循环经济效益是其选择加大环保投入的主要动力。如图 13 所示, 当主动加大环保投入带来的循环经济效益较低时, 政府选择监管企业, 因为此时较低的循环经济效益无法调动企业的主动性, 企业的被动态度使其无意吸引消费者选择正规回收途径, 因而消费者选择正规回收途径的概率降低。随着循环经济效益的增加, 企业迅速选择主动策略, 与此同时消费者也很快在选择正规回收途径处达到稳定, 政府逐渐放手监管策略。

结论 6. 循环经济效益的高低对政府、消费者和企业的策略选择都有很大的影响, 不仅会影响策略演化的时间, 也会影响选择何种策略。

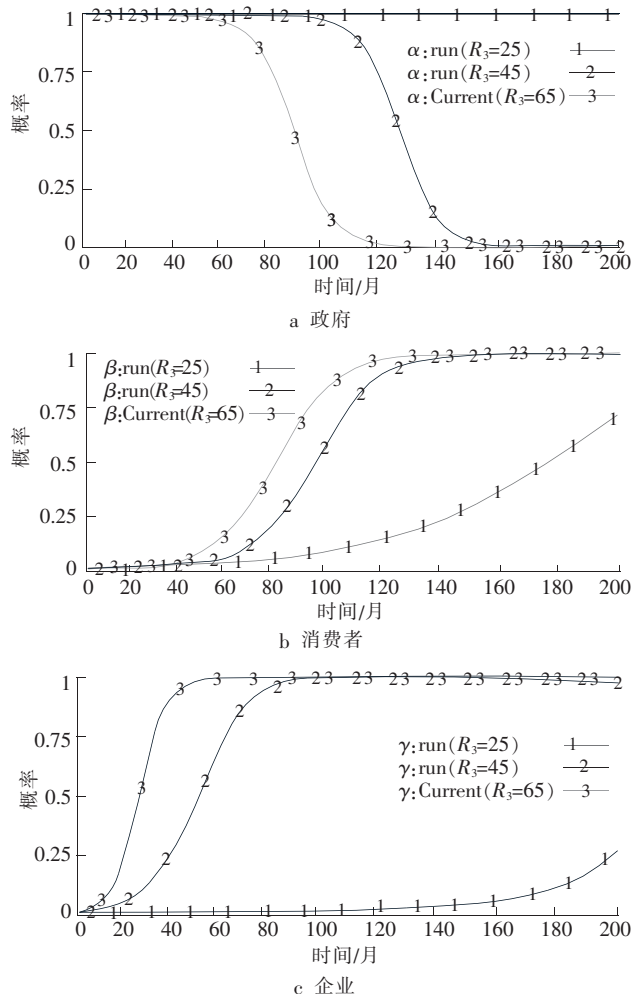


图 13 不同循环经济效益下各主体策略选择演化路径

情境 7. 企业环保投入成本 C_3 发生变化。

以生产商责任延伸制为指导, 建立闭环的电子废弃物回收产业链, 除了需要法规的威慑, 还需要提升企业主动参与回收的积极性。而履行生产商责任制的实体责任是一个耗资巨大、牵涉较广, 需要人、财、物紧密配合的系统工程, 企业作为履行实体责任的主体, 选择主动加大环保投入的成本越大, 企业就越不希望采取主动策略。如图 14 所示, 当成本在较小范围内变动时, 对政府、消费者和企业的策略演化路径影响较小, 当成本很大时, 企业和消费者都开始向 0 处倾斜, 而政府为了营造良好的社会及生态环境, 不得不通过监管继续向企业施压。

结论 7. 企业的策略选择对主动加大环保投入所付出的成本相当敏感, 尤其是当成本增加到一定值时, 即使有政府监管企业也会选择放弃主动策略, 而消费者受到企业消极行为的影响也会降低选择正规回收途径的意愿。

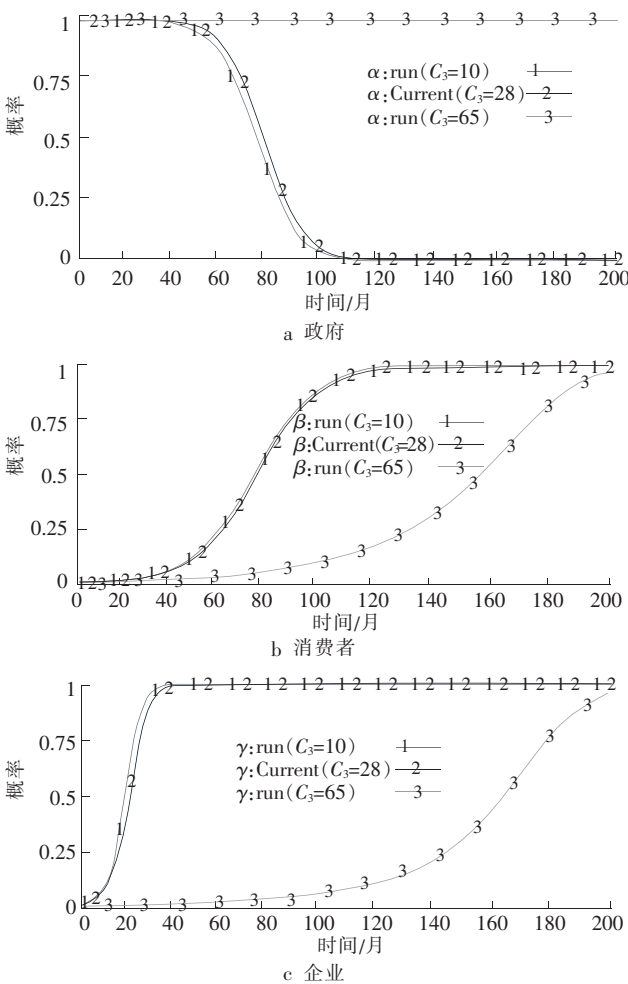


图 14 不同环保投入成本下各主体策略选择演化路径

情境 8. 企业获得的短期经济效益 R_3' 发生变化。

企业不主动加大环保投入在短期内可以节省一部分环保资金, 将这些资金投入提高企业竞争力

的其他方面, 从而创造短期可观的经济效益。如图 15 所示, 当短期经济效益较小时, 企业会在较短时间内选择主动加大环保投入以获得更多的长期循环经济效益, 消费者在企业的带动下也会在短期内选择正规回收途径, 政府则会逐渐向不监管处偏移。而当短期经济效益与长期的循环经济效益相等时 ($R_3'=R_3=65$), 企业仍然会选择主动加大环保投入, 当短期经济效益更大时, 企业则会屈从于短期利润, 放弃环保投入, 从而对整个系统的稳定造成一定的干扰。

结论 8. 企业被动策略下获得的短期经济效益越少, 三方达到稳定均衡状态的历时越短。过高的短期经济效益会使企业在最初选择被动策略, 但是随着时间的推进, 政府监管和消费者环保行为的影响日益凸显, 企业选择主动加大环保投入的动力增强。

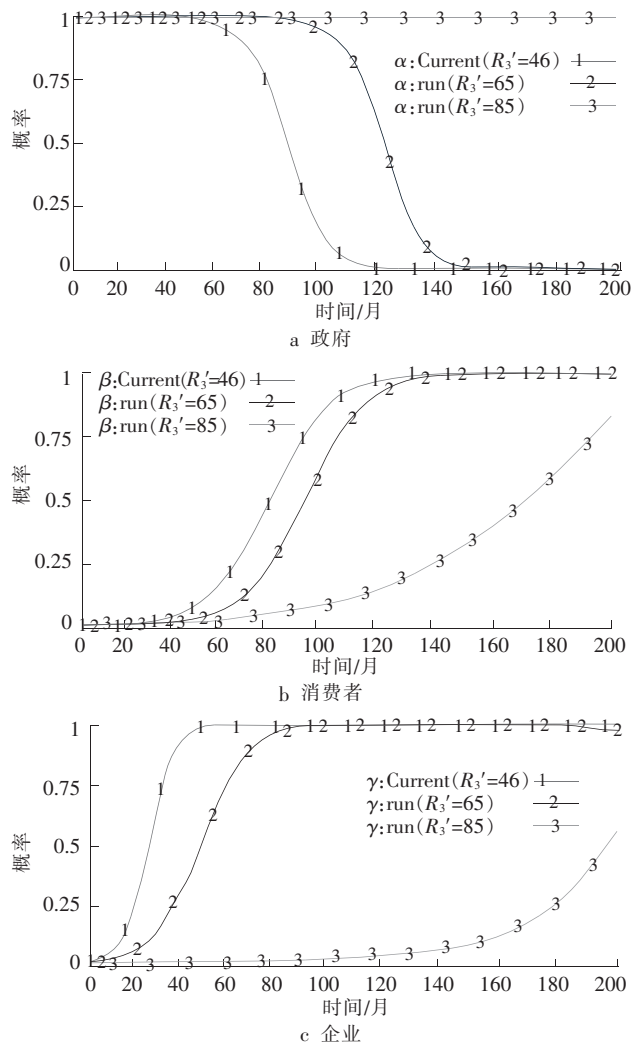


图 15 不同短期收益下各主体策略选择演化路径

四、研究结论及启示

在电子废弃物回收产业链治理过程中, 政府、消费者和企业是主要的利益相关者, 三者不断进行交易与协调, 以实现合理的利益让渡和责任分担,

并达到对各方都有利的稳定状态。为了进一步研究三方在电子废弃物回收产业链中协调演化的驱动因素,本文筛选出6个对三方策略演化均有显著影响的因素,并通过改变各个因素数值的大小,分析三方策略演化路径的变化。仿真结果表明:

第一,无论政府、消费者、企业的初始策略为何,经过一个不断博弈的过程,三方最终会在(政府不监管,消费者选择正规回收途径,企业主动加大环保投入)处达到稳定均衡,但是政府在初期选择监管策略会使各方的策略演化路径更简单直接。

第二,在多主体演化博弈过程中,政府、消费者和企业分别充当系统演化引导者、辅助者和推动者角色。政府的最初策略会决定企业的策略演化路径,并且政府对企业的行为影响具有滞后效应;消费者环保意识的提升使得消费者主动承担“监管人”角色,辅助政府促进企业向积极策略演化;而企业的初始策略又会影响政府的策略选择,同时也会加速或减缓消费者达到演化稳定,从而形成“政府引导+消费者辅助 \leftrightarrow 企业推动”的相互作用,推动系统演化。

第三,政府的监管成本、给予企业的奖励、对企业的罚金,企业获得的循环经济效益、采取主动策略付出的成本、短期获得的经济效益是系统演化的主要驱动力。其中政府的监管成本和给予企业的奖励直接影响政府的策略选择,从而间接影响消费者和企业的演化路径,而政府对企业的罚金虽然对政府的策略选择影响较小,但是对企业的策略选择却有很大影响;企业获得的循环经济效益、主动加大环保投入的成本和短期获得的经济效益都会直接影响企业的策略选择,进而影响政府和消费者的策略演化路径。

以上结论与其他学者的研究相比更倾向于从

动态视角找出不同利益相关者的演化均衡状态,更符合系统发展的动态规律;从利益相关者角度界定了不同相关方的角色,有利于摆正各方的职责地位;从协同层面识别出具有较大影响力的因素,为政府政策制定提供了理论基础。根据结论,提出以下几点启示:(1)在电子废弃物回收产业链治理初期,政府对企业宜采取强硬手段,实施监管策略,并以惩罚为主,奖励为辅。加强电子废弃物回收立法体系建设,加快电子废弃物回收专项法律法规建设进程,提高执法的规范性和严格性,明确企业及消费者责任,加大对违规企业的惩罚力度,同时对表现良好的企业给予适度奖励,以法律的强制性约束企业的行为、匡正消费者的态度。(2)在电子废弃物回收产业链治理中后期,政府对企业宜采取缓和手段,逐渐淡出监管策略,并将监管意识转移给消费者。加强对电子废弃物回收处理的财政和税收政策倾斜,加大对企业对逆向物流构建的资金扶持力度,降低企业实施逆向物流的成本,从而提高企业对长期循环经济效益的预期。(3)在电子废弃物回收产业链治理全程,政府都应以强化消费者和企业的环保意识为重点。对于企业,要以强化社会意识为重点,通过产业政策引导,加强产业链上下游企业对生产商的环保约束,促进生产商在环保压力的约束下主动加大环保投入,提升对电子废弃物回收处理的自主性;对于消费者,政府应运用媒体宣传优势,加强对消费者节能环保意识的引导,包括选购环保产品、节约并延长产品使用、废弃产品合理处置等,同时做好回收基础设施建设以加强消费者回收的便捷性和经济性,并整治非正规回收小作坊使其向正规途径转化,做到引导消费者走正规回收途径与阻断非正规途径“两手抓”。

参考文献:

- [1] 宁杰. 环境污染堪忧 电子垃圾同样不容马虎[EB/OL]. (2015-3-12). <http://news.feijiu.net/infocontent/html/20153/12/12326675.html>.
- [2] 李慧. 民进中央建议 规范电子垃圾处理[EB/OL]. (2015-3-16). <http://www.crrainfo.org/content-14-23992-1.html>.
- [3] 孙云丽,段晨龙,左蔚然,等. 电子废弃物的资源循环研究[J]. 中国资源综合利用, 2007, 25(3): 35-38.
- [4] 赵亮,刘春颖,王海京. 电子废弃物资源化的研究与进展[J]. 再生资源研究, 2007(3): 25-30.
- [5] 梁波,王景伟,徐金球. 我国电子废弃物资源化研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(1): 47-52.
- [6] 陈苏,付娟,陈朝猛. 电子废弃物处理现状与管理研究[J]. 南华大学学报:理工版, 2003, 17(1): 81-85.
- [7] 邵诣臻,黄菊文,李光明,等. 我国电子废弃物管理现状及对策研究[J]. 环境科技, 2011, 24(1): 87-90.
- [8] 龚允玉. 国内外电子废弃物环境管理与处置技术研究[J]. 环境与生活, 2014(12): 100-101.
- [9] 王兆华. 电子废弃物管理中的延伸生产者责任制度应用研究[J]. 工业技术经济, 2006, 25(4): 57-59.
- [10] 李丹. 电子废弃物管理立法研究[J]. 再生资源研究, 2006(4): 21-26.
- [11] 姚凌兰,贺文智,李光明,等. 我国电子废弃物回收管理发展现状[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(61): 410-414.
- [12] WANG Y C, RU Y H, VEENSTRA A, et al. Recent developments in waste electrical and electronics equipment legislation in China[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47(5-8): 437-448.

- [13] AGAMUTHU P, DENNIS V. Policy trends of e-waste management in Asia[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2013, 15(4): 411-419.
- [14] NNOROM I C, OSIBANJO O. Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations and their poor applications in the developing countries[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008(52): 843-858.
- [15] HOSODA E. International aspects of recycling of electrical and electronic equipment: material circulation in the East Asian region[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2007, 9(2): 140-150.
- [16] HAGELÜKEN C, CORTI C W. Recycling of gold from electronics: cost-effective use through 'design for recycling' [J]. *Gold Bulletin*, 2010, 43(3): 209-220.
- [17] ZOETEMAN B C J, KRIKKE H R, VENSELAAR J. Handling WEEE waste flows: on the effectiveness of producer responsibility in a globalizing world[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 47(5-8): 415-436.
- [18] GUI L, ATASU A, ERGU N, et al. Implementing extended producer responsibility legislation[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17(2): 262-276.
- [19] KUNIKO M, NOZOMU M, MASARU N. A study on an e-waste management strategy considering global inverse supply chain[C]// DAVID A D, BARBARA S L. *Leveraging Technology for a Sustainable World*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 161-166.
- [20] VI K S, CHARLES F, MATTHEW D. E-waste assessment in Malaysia[C]// ANDREW Y C N, BIN S, SOH-KHIM O. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Singapore: Springer Singapore, 2013: 389-395.
- [21] 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(23): 233-244.
- [22] 解青园. 废旧电子电器逆向物流的外部性及其补偿机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [23] 周颖. 基于激励策略的废弃电器电子产品回收逆向供应链研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [24] 孙明波, 张世勋. 电子废弃物回收企业经济补偿机制的系统动力学研究[J]. *科技管理研究*, 2012(23): 210-213.
- [25] 陈小青. 电子废弃物回收处理参与主体的激励机制研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
- [26] 苏程浩. 关于电子废弃物回收处理系统演化的分析[J]. *新西部*, 2015(3): 64-65.
- [27] 潘开灵, 白烈湖. 管理协同理论及其应用[M]. 北京: 经济管理出版社, 2006.
- [28] 陈魁, 姚从容. 电子废弃物的再循环利用: 企业、政府与公众的角色和责任[J]. *再生资源研究*, 2009(1): 18-22.
- [29] 张力方. 基于系统动力学的城中村改造的三方演化博弈研究[D]. 广东: 暨南大学, 2013.
- [30] 任鸣鸣. 电器电子废弃物末端污染治理的生产商激励问题研究[J]. *河南师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2012, 39(3): 94-97.
- [31] 周旭, 张斌, 王兆华. 企业履行废弃产品回收责任影响因素研究[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2014, 16(2): 24-32.
- [32] 邹松涛, 乌力吉图. 城市生活电子废弃物回收逆向物流研究[J]. *技术经济与管理研究*, 2009(4): 102-105.
- [33] 张维迎. *博弈论与信息经济学*[M]. 上海: 格致出版社, 2012.
- [34] 威布尔. *演化博弈论*[M]. 王永钦, 译. 上海: 上海人民出版社, 2006.
- [35] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖, 等. *系统动力学: 第2版*[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

Co-evolutionary Simulation Analysis of Multiple Stakeholders in the E-waste Recycling Industry Chain

PENG Benhong¹, GU Xiaofen¹, WU Baiyu²

(1. School of Management, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Shanghai Cooperative Centre for WEEE Recycling, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: The recycling of e-waste is a huge system engineering, which involves many stakeholders. From the co-evolutionary viewpoint of stakeholders, the paper built the co-evolutionary game model of multiple stakeholders in the e-waste recycling industry chain, and then made simulation analysis under the platform of Vensim, exploring the evolutionary equilibrium and the main driving factors of evolutionary. The simulation results showed that the e-waste recycling industry chain reached a stable state, in which the government's choice was supervision, the consumers' were formal recycling way and the companies took the initiative to increase investment in environmental protection; the government, consumers and companies respectively acted as guide, subsidiaries and pushers in the evolutionary process in the e-waste recycling industry chain; the government's supervision cost, the reward and the punishment, the enterprises' long-term circular economy benefit and cost and the enterprises' short-term economic benefits and so on were the main driving force of the evolution of the system. Finally, the research suggested that: in the early period of governance, government should take strong measures to supervise enterprises; in the middle and later period, government should adopt a moderate approach to enterprise; in the whole process, government should focus on strengthening the environmental awareness of consumers and enterprise.

Key words: e-waste; recycling industry chain; evolutionary game; multi-agent simulation analyses

[责任编辑: 宋宏]