

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. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.015

LIU Y Q, LIU W H, DING W B. Game Analysis of Recycling Decision-Making of Used Home Appliances Based on Consumer Recycling Bias [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(4): 113-124. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.015

基于消费者回收偏向的废旧家电回收决策博弈分析

刘永清*,刘文浩,丁文彬

(湖南科技大学 商学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:在互联网不断深入回收行业的大背景下,考虑消费者对回收渠道的偏向问题,假设消费者不同的回收行为情境,建立回收决策模型,探讨消费者回收行为对回收商、处置商回收决策的影响.研究表明:双渠道竞争回收时的回收价格、回收数量,在一定范围内均高于单一的传统渠道回收和双渠道合作回收,同时,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.考虑回收市场的持续性,回收商-处置商联盟回收方式具有最佳的回收价格、回收数量及回收主体利润决策.研究结论丰富了回收主体决策的理论内涵,对国内废旧家电回收处理体系的构建具有一定的理论指导与实践启示意义.

关键词:废旧家电;消费者回收偏向;回收决策;Stackelberg 博弈

中图分类号:X705; F713.1

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)04-0113-12

Game Analysis of Recycling Decision-Making of Used Home Appliances Based on Consumer Recycling Bias

LIU Yongqing, LIU Wenhao, DING Wenbin

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

Abstract: In the context of the Internet's continuous deepening of the recycling industry, taking into account the consumer's preference for recycling channels, the context of consumers' different recycling behaviors was assumed, a recycling decision model was established, and the impact of consumer recycling behavior on the recycling decision of recyclers and disposers was explored. The research results show that the recycling price and quantity of recycling in dual-channel competition are higher than that of single traditional channel recycling and dual-channel cooperative recycling within a certain range. At the same time, the recycling price of network recycling channels is always higher than that of traditional recycling channels price. Taking into account the continuity of the recycling market, the recycling method of the recycler-disposer alliance has the best recycling price, recycling quantity, and profit decision for recycling entities. The research conclusion enriches the theoretical connotation of the decision-making of the recycling subject, and has certain theoretical guidance and practical enlightenment significance for the construction of the domestic waste home appliance recycling system.

Keywords: used home appliances; consumer recycling bias; recycling decision; Stackelberg game

收稿日期:2021-02-03

基金项目:湖南省社科基金青年项目资助(19YBQ049)

*通信作者, E-mail: lyq19631991@163.com

随着我国电子信息产业的迅猛发展,废旧家电的产生和堆积也大量增加,中国已成为全球最大的电子垃圾生产国。2020年,我国全年电子产品理论报废量约有68 690万台,合计理论报废重量约700万t,且理论报废量将逐年增长^[1]。废旧家电的无序排放,不仅是对其中的金、银等贵金属资源的严重浪费,而且会给土壤、水及大气等生态环境带来污染。大量人群流行病学研究证明:废旧家电暴露会对人体健康造成损害,如肝肾损害、甲状腺功能异常、肺功能退化以及致癌风险增高等^[2]。目前,我国废旧家电约有80%被走街串巷的流动回收小贩收走,转卖、翻修或被小作坊粗暴拆解,而获政府审批的正规回收处理企业因无足够的货源而面临倒闭的困境。究其原因主要是回收渠道不明朗,与废旧家电回收相关的利益主体的责任意识不强、目标不明确,进而影响参与主体的决策。因此,研究废旧家电回收参与主体的目标与利益,分析其参与主体的决策行为,实现废旧家电回收模式创新,助推废旧家电流向正规回收渠道,对完善我国废旧家电回收处理体系,有效发挥废旧家电的资源性,降低环境危害性,推进我国生态文明建设进程有着非常重要的理论与现实意义。

目前,对废旧家电回收的研究多数是对其回收产业的政策法规^[3]、回收渠道决策^[4-5]、回收模式^[6]及回收激励机制^[7]等方面展开的。相关废弃物回收参与主体的研究中,Sudhir等^[8]基于循环经济分析利益机制,提出提高原生资源价格、给予负责废弃产品回收利用的生产者经济补贴等对策;Atasu等^[9]通过建立生产商与政府及消费者的博弈模型,分析了回收法规对环境、经济的影响,电子产品回收立法对相关主体成本和福利的影响;Kaya^[10]研究了制造商对回收商的激励和最优生产决策,设计了基于转移支付的线性合同协调机制;彭本红等^[11]基于利益主体协同演化视角,构建了废旧家电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;Sahar Parsaeifar等^[12]基于非合作博弈建立以单个制造商为回收市场主导,多个供应商、零售商追随其后的回收模型,发现零售商和供应商的竞争加剧导致的系统利润变化不一样,但市场整体的竞争加大是有利于整个回收供应链的。在废旧家电回收主体决策及其方法研究上,吴刚等^[13]在充分考虑政府补贴、规范回收率、拆解企业、废旧家电生成量之间错综复杂关系的基础上,构建废旧家电拆解补贴系统动力学模型,提出了经济发展优先、规范回收率优先和净补贴支出控制优先的3种废旧家电拆解补贴调控策略;费威^[14]利用优化模型,分析了由制造商、第三方回收者、零售商以及零供回收一体化负责的4种不同模式的废弃产品回收率、价格、销售量等相关决策,并对不同主体负责回收模式的相关主体利润进行了比较分析;许民利等^[15]基于单一的再制造商和2个竞争回收平台构成的逆向供应链系统,引入回收平台的双向公平关切行为,建立公平中性情形、再制造商关注和关注回收平台双向公平关切行为情形的3种定价决策模型,利用Stackelberg博弈理论分析各成员的均衡策略;原逸超等^[16]应用演化博弈理论研究政府与企业的互动,考察企业利用回收物生产新产品时的演化稳定策略,借助MATLAB进行了仿真分析;Zhe Wang等^[17]提出一个由政府、回收者和消费者3部分组成的三方演化博弈模型,确定了系统的收益矩阵,并计算各参与者的复制动态方程,得到系统的演化稳定策略,并分析其稳定条件,在废旧家电回收研究中既考虑了消费者行为,也考虑到其行为偏好;Wen Tong等^[18]建立演化博弈模型研究零售商、制造商演化行为,发现消费者对低碳产品的偏好是影响两者行为的关键因素;马祖军等^[19]研究政府规制下混合渠道销售与回收电器电子产品的闭环供应链时发现:消费者环保意识越高以及对WEEE回收价越敏感,越有助于各回收企业增加WEEE回收量,提高CLSC成员企业的利润;Xin Li等^[20]开创性地研究了订金退款计划对电动汽车电池回收的影响,发现随着消费者环保意识的提高,可以适当降低补贴金额来保持回收率的稳定;Feng等^[21]建立经销商主导、回收商追随的二级逆向供应链,发现对于经销商和系统,混合回收策略更优,并在回收领域引入消费者偏好因素提高经销商对收益共享契约的接受度,协调双方回收主体的决策;李春发等^[22]从WEEE网络回收系统利益相关者的关系出发,分析了回收网站交互性对消费者回收行为的影响。

综上所述,目前学术界对废旧家电回收主体决策的理论研究较多,在其决策的研究方法上主要涉及静态博弈和动态博弈,但这些研究成果对消费者回收行为偏向的考虑较少,尤其是考虑消费者对网络回收偏向的研究更少。然而,在当前的“互联网+”时代,实体经济与互联网融合是大势所趋,回收行业与互联网融

合更是走在其他行业的前头.因此,研究考虑消费者对回收渠道的网络回收偏向时的回收决策问题,使废旧家电在互联网不断深入回收行业的大背景下,充分考虑消费者行为,创新回收模式,提高回收效率.

1 问题描述与模型构建

废旧家电回收的参与主体大体上包括电器生产商、经销商(含分销商和零售商)、消费者、回收商、处置商和第三方回收平台.为了区分废旧家电持有者——消费者回收行为偏向的需要,将回收商主体分为传统的线下回收主体和专门的线上网络回收主体 2 类.废旧家电回收的逆向供应链上,各主体在做回收决策时会受到消费者回收行为的影响,当消费者的回收行为偏向于传统回收渠道时,回收商和处置商对废旧家电的回收价格、转移价格和回收数量都会做出相应的决策.同理,消费者回收行为偏向于选择现代的网络回收时也会对其回收价格等做出相应不同的决策.

1.1 问题描述

废旧家电回收处置的过程:由消费者提供,回收商回收再转卖给处置商处理,经过处置后重新回到消费者手中.因此,基于消费者回收行为的不同,建立消费者渠道选择偏向、回收价格以及回收数量的模型,利用博弈论探讨消费者不同回收行为对废旧家电回收商、处置商回收决策的影响.

基于消费者回收行为偏向,设置 4 种基于消费者不同回收行为的回收情境.情境 1:考虑由一个传统回收商和一个处置商以及市场组成的逆向供应链;情境 2:考虑由一个传统回收商和一个网络回收商竞争回收,以及一个处置商和市场组成的逆向供应链;情境 3:考虑由一个传统回收商与一个网络回收商合作回收,以及一个处置商和市场组成的逆向供应链;情境 4:考虑由一个传统回收商、一个网络回收商与一个处置商合作形成联盟,以及和市场组成的逆向供应链.废旧家电的回收流程如图 1 所示.

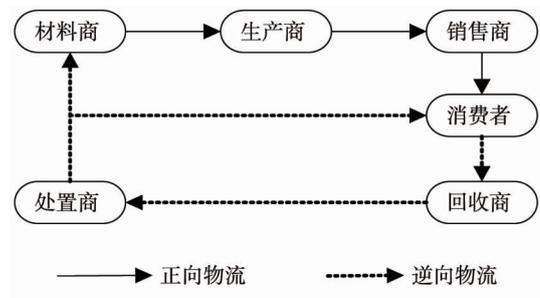


图 1 废旧家电回收流程

1.2 基本假设与回收决策模型构建

根据消费者、回收商、处置商所组成的三阶段逆向供应链以及各阶段的回收主体性质,设置的 4 种回收情境均以处置商为主导,传统回收商与网络回收商追随.由于网络回收渠道在回收时与传统回收渠道相比,在回收耗时、储存场所等营运方面具有优势,因此,网络回收渠道所需的回收成本要低于传统回收渠道的回收成本.为简化计算,将处置商对不同质量废旧家电的回收价格和处置成本的差异省去,但是在实际中不可以忽略.

为构建模型进行如下假设:

1) 设处置商通过网络回收渠道和传统回收渠道进行废旧家电回收时的单位成本分别为 c_1 和 c_2 , 且 $c_1 < c_2$. 此时,处置商通过网络回收渠道和传统回收渠道回收处理废旧家电的收益 w_1 和 w_2 满足: $w_1 = w - c_1, w_2 = w - c_2$, 且有 $w_1 > w_2$, 其中 w 为处置商回收处理废旧家电所得的单位收益.

2) 由于消费者对不同的回收渠道有不同的回收偏向,对废旧家电的回收价格期望也不同,且存在回收的期望价格为 $\nu \in (0, 1)$. 此时,设传统回收渠道的回收价格为 p_1 , 有 $p_1 \in (0, 1)$, 网络回收渠道的回收价格为 p_2 , 有 $p_2 \in (0, 1)$, 且有 Feng^[21] 的研究指出,电子产品的网络回收渠道的回收价格一般高于传统回收渠道的回收价格,即 $p_2 \geq p_1$.

3) 4 种回收情境中处置商均可全部接收回收商回收的废旧家电.

根据上述假设,消费者选择传统回收渠道时,由于消费者的利己性,当且仅当 $p_1 > \nu$ 时,消费者才会向传统回收商投交废旧家电,选择传统回收渠道时消费者的回收效用为 $U_1 = p_1 - \nu$, 传统回收商的回收量为 $Q_1 = \int_0^{p_1} d\nu = p_1$. 消费者选择网络回收渠道时,存在消费者的网络回收偏向程度 μ , 且 μ 满足大于 1, μ 越小代表消费者选择网络回收渠道的偏向越大,选择网络回收渠道时消费者的回收效用为 $U_2 = p_2 - \mu\nu$.

分析 μ 的取值范围,当 $\mu = 1$ 时,消费者选择传统回收渠道和网络回收渠道的偏好并没有差别,与设定不符;当 $0 < \mu < 1$ 时,恒有 $U_i > U_t$, 且有 $w_i > w_t$, 说明选择网络回收渠道时具有绝对的效用优势,此时不论消费者还是处置商均会选择网络回收渠道进行回收,不存在传统回收商与网络回收商之间的回收竞争,不符合设定情境,故只考虑 $\mu > 1$ 的情况.

当 $p_i - \mu\nu > 0$ 和 $p_i - \mu\nu > p_t - \nu$ 时,即 $\nu < \min\left[\left(\frac{p_i}{\mu}, \frac{p_i - p_t}{\mu - 1}\right)\right]$, 消费者选择网络回收渠道进行回收;

当 $p_t - \nu > 0$ 和 $p_t - \nu > p_i - \mu\nu$ 时,即 $\frac{p_i - p_t}{\mu - 1} < \nu < p_t$, 消费者选择传统回收渠道进行回收;当 $\nu = \frac{p_i - p_t}{\mu - 1}$

时,消费者选择传统回收渠道和网络回收渠道的效用并没有差别;当 $\nu > \max\left[\left(\frac{p_i}{\mu}, p_t\right)\right]$ 时,消费者选择不进行废旧家电的回收.

为确定 ν 的取值范围,讨论 $p_t, \frac{p_i}{\mu}, \frac{p_i - p_t}{\mu - 1}$ 三者的大小,为了简便计算,分别记为 ν_1, ν_2, ν_3 , 由消费者效用大于 0 可知 ν_1, ν_2 是传统回收渠道和网络回收渠道回收价格的临界值.当 $\nu_1 > \nu_2$ 时,比较得 $\nu_1 > \nu_2 > \nu_3$, 即当消费者的期望价格 $\nu \in (\nu_1, 1)$ 时,消费者的效用无法得到满足,消费者不进行回收;期望价格 $\nu \in (\nu_3, \nu_1)$ 时,消费者偏向传统回收渠道;期望价格 $\nu \in (0, \nu_3)$ 时,消费者偏向网络回收渠道.当 $\nu_1 < \nu_2$ 时,消费者选择传统回收渠道的效用恒小于选择网络回收渠道的效用,消费者将不会选择传统回收渠道,此时不用考虑 ν_3 的大小,且只有在 $\nu \in (0, \nu_2)$ 时消费者才会选择网络回收渠道进行回收.

由此求得,只存在传统回收渠道时,回收数量为 $Q_t = p_t$; 传统回收渠道与网络回收渠道同时存在时,回收数量分别为

$$Q_t = \begin{cases} p_t - \frac{p_i - p_t}{\mu - 1}, p_t \geq \frac{p_i}{\mu}; \\ 0, p_t < \frac{p_i}{\mu}. \end{cases} \tag{1}$$

$$Q_i = \begin{cases} \frac{p_i - p_t}{\mu - 1}, p_t \geq \frac{p_i}{\mu}; \\ \frac{p_i}{\mu}, p_t < \frac{p_i}{\mu}. \end{cases} \tag{2}$$

2 模型分析

由于假设的 4 种回收情境各不相同,存在不同的回收价格或收益,造成最终的回收决策也不同,为寻求最佳的回收决策,对设定的 4 种回收情境进行分析,探讨废旧家电回收商、处置商之间的最优回收价格、最优回收数量等问题.

情境 1: 根据处置商的主导地位,博弈顺序应该先确定处置商的回收价格以及最优决策,其次确定回收商的回收价格和最优决策.单一的传统渠道回收情境流程如图 2 所示.

在情境 1 的情况下,只存在传统回收商回收渠道的情境,记处置商的传统渠道回收价格为 p_{dt} , 则传统回收商的回收价格为 p_{tt} . 回收商、处置商的最佳决策函数分别为

$$\pi_{tt} = (p_{dt} - p_{tt}) Q_{tt}; \tag{3}$$

$$\pi_{dt} = (w_t - p_{dt}) Q_{tt}. \tag{4}$$

此时,传统回收商和处置商之间存在一个 Stackelberg 博弈,有 $Q_{tt} = p_{tt}$, 式(3)是关于回收价格 p_{tt} 的

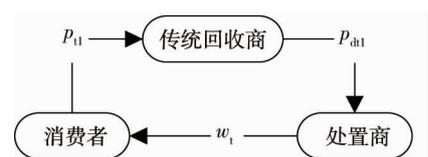


图 2 单一的传统渠道回收

凹函数,存在最大值,可求出传统回收商与处置商的最佳价格和最优回收数量,分别为 $p_{d1}^* = \frac{w_1}{2}, p_{i1}^* = \frac{w_1}{4}, Q_{i1}^* = \frac{w_1}{4}$. 此时存在传统回收商的最优利润 $\pi_{i1}^* = \frac{w_{i2}}{16}$, 处置商的最优利润 $\pi_{d1}^* = \frac{w_{i2}}{8}$.

情境 2: 随着我国互联网的深入运用,“互联网+”行业的新型运营模式已受到越来越多的关注和运用. 其中,对于资源回收再利用行业,如爱回收、淘绿网等网络回收平台大军突起,获得了众多消费者的关注和使用,与传统回收企业形成竞争. 传统渠道与网络渠道竞争回收情境流程如图 3 所示.

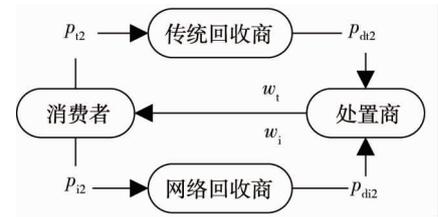


图 3 传统渠道与网络渠道竞争回收

在情境 2 的情况下,处置商的传统回收渠道和网络回收渠道废旧家电的回收价格分别为 p_{d12}, p_{d12} , 传统回收商和网络回收商的回收价格分别为 p_{i2}, p_{i2} . 此时传统回收商、网络回收商以及处置商的最佳决策函数分别为

$$\pi_{i2} = (p_{d12} - p_{i2}) Q_{i2}; \tag{5}$$

$$\pi_{i2} = (p_{d12} - p_{i2}) Q_{i2}; \tag{6}$$

$$\pi_{d2} = (w_i - p_{d12}) Q_{i2} + (w_i - p_{d12}) Q_{i2}. \tag{7}$$

根据上述传统回收商、网络回收商及处置商的回收决策函数,通过计算得结论如下:

定理 1 在情境 2 中,求得处置商的单位废旧家电最优回收价格分别为 $p_{d12}^* = \frac{w_1}{2}, p_{d12}^* = \frac{w_i}{2}$; 传统回收

商、网络回收商的最优回收价格分别为 $p_{i2}^* = \frac{2\mu w_1 + w_i}{2(4\mu - 1)}, p_{i2}^* = \frac{(2w_i + w_1)\mu}{2(4\mu - 1)}$.

证明: 式(5)是关于 p_{i2} 的凹函数,利用逆向求解法求最优值,对其求导并赋值为 0,得到传统回收商的回收价格 p_{i2} :

$$\frac{\partial \pi_{i2}}{\partial p_{i2}} = \frac{\mu p_{d12} + p_{i2} - 2\mu p_{i2}}{\mu - 1} = 0; \tag{8}$$

$$p_{i2} = \frac{\mu p_{d12} + p_{i2}}{2\mu}. \tag{9}$$

同理对式(6)求导并赋值为 0,得到网络回收商回收价格 p_{i2} :

$$\frac{\partial \pi_{i2}}{\partial p_{i2}} = \frac{p_{d12} - 2p_{i2} + p_{i2}}{\mu - 1} = 0; \tag{10}$$

$$p_{i2} = \frac{p_{d12} + p_{i2}}{2}. \tag{11}$$

根据式(9)和式(11)求得传统回收商与网络回收商的最优回收价格分别为

$$\begin{cases} p_{i2}^* = \frac{2\mu p_{d12} + p_{d12}}{4\mu - 1}; \\ p_{i2}^* = \frac{2\mu p_{d12} + \mu p_{d12}}{4\mu - 1}. \end{cases} \tag{12}$$

由式(12)可知: 此时传统回收商与网络回收商的回收量分别为 $Q_{i2} = \frac{\mu[(2\mu - 1)p_{d12} - p_{d12}]}{(\mu - 1)(4\mu - 1)}, Q_{i2} =$

$$\frac{(2\mu - 1)p_{d12} - \mu p_{d12}}{(\mu - 1)(4\mu - 1)}.$$

处置商的最优决策可表示为

$$\pi_{d2} = (w_i - p_{d12}) \frac{\mu[(2\mu - 1)p_{d12} - p_{d12}]}{(\mu - 1)(4\mu - 1)} + (w_i - p_{d12}) \frac{(2\mu - 1)p_{d12} - \mu p_{d12}}{(\mu - 1)(4\mu - 1)}. \tag{13}$$

求 π_{d2} 的 Hessian 矩阵得

$$|H_1| = \begin{vmatrix} \frac{-2\mu(2\mu-1)}{(\mu-1)(4\mu-1)} & \frac{2\mu}{(\mu-1)(4\mu-1)} \\ \frac{2\mu}{(\mu-1)(4\mu-1)} & -2(2\mu-1) \end{vmatrix} = \frac{4\mu[(2\mu-1)^2 - \mu]}{[(\mu-1)(4\mu-1)]^2}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_{d2}}{\partial (p_{d2})^2} = \frac{-2\mu(2\mu-1)}{(\mu-1)(4\mu-1)} < 0$, $\frac{\partial^2 \pi_{d2}}{\partial (p_{di2})^2} = \frac{-2(2\mu-1)}{(\mu-1)(4\mu-1)} < 0$, 且 $|H_1| > 0$, 故 π_{d2} 是关于 p_{d2} , p_{di2} 的严格凹函数, 即 π_{d2} 存在唯一最值. 此时, 对式(13)求导可得处置商的传统渠道与网络渠道的最优回收价格分别为

$$\begin{cases} p_{d2}^* = \frac{w_t}{2}; \\ p_{di2}^* = \frac{w_i}{2}. \end{cases} \tag{14}$$

最终求得传统回收商、网络回收商以及处置商的最佳利润分别为

$$\begin{cases} \pi_{i2}^* = \frac{\mu[(2\mu-1)w_t - w_i]^2}{4(\mu-1)(4\mu-1)^2}; \\ \pi_{i2}^* = \frac{[(2\mu-1)w_i - \mu w_t]^2}{4(\mu-1)(4\mu-1)^2}; \\ \pi_{d2}^* = \frac{(2\mu-1)(\mu w_{i2} + w_{t2}) - 2\mu w_i w_t}{4(\mu-1)(4\mu-1)}. \end{cases} \tag{15}$$

情境 3: 当传统回收商与网络回收商合作回收时, 形成回收商联盟协调回收商联盟成本, 使得处置商从回收商处获取废旧家电的成本相同, 即存在 w_3 (处置商处理废旧家电的单位收益). 传统渠道与网络渠道合作回收情境流程如图 4 所示.

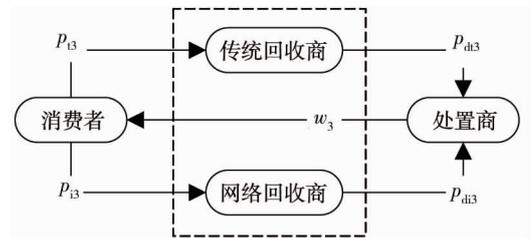


图 4 传统渠道与网络渠道合作回收

在情境 3 的情况下, 设回收商联盟回收的最佳决策函数 π_{i3} 为

$$\pi_{i3} = \pi_{i3} + \pi_{i3} = (p_{di3} - p_{i3}) \left(p_{i3} - \frac{p_{i3} - p_{i3}}{\mu - 1} \right) + (p_{di3} - p_{i3}) \frac{p_{i3} - p_{i3}}{\mu - 1}. \tag{16}$$

处置商的最佳决策函数为

$$\pi_{d3} = (w_3 - p_{di3}) Q_{i3} + (w_3 - p_{di3}) Q_{i3}. \tag{17}$$

定理 2 在情境 3 组成回收商联盟的情形下, 求得处置商的最佳回收价格为 $p_{di3}^* = p_{di3}^* = \frac{w_3}{2}$, 回收

商联盟的最佳回收价格为 $p_{i3}^* = p_{i3}^* = \frac{w_3}{4}$. 处置商的最优利润为 $\pi_{d3}^* = \frac{(w_3)^2}{8}$, 回收商联盟的最优利润为 $\pi_{i3}^* = \frac{(w_3)^2}{16}$. 即在回收商联盟情形下回收联盟及处置商的最优决策集为 $[(p_{i3}^*, p_{i3}^*), (p_{di3}^*, p_{di3}^*)]$.

证明: 由式(17), 求其 Hessian 矩阵如下:

$$|H_2| = \begin{vmatrix} \frac{-2\mu}{\mu-1} & 2 \\ 2 & \frac{-2}{\mu-1} \end{vmatrix} = 4.$$

由此可知: 回收商联盟的最佳决策函数 π_{i3} 是关于 p_{i3} , p_{i3} 的严格凹函数, 存在唯一最值. 决策函数 π_{i3}

分别对 p_{i3} , p_{i3} 求导并赋值为 0 得

$$\frac{\partial \pi_{i3}}{\partial p_{i3}} = \frac{\mu p_{di3} - p_{di3} - 2\mu p_{i3} + 2p_{i3}}{\mu - 1} = 0; \tag{18}$$

$$\frac{\partial \pi_{i3}}{\partial p_{i3}} = \frac{-p_{di3} + p_{di3} - 2p_{i3} + 2p_{i3}}{\mu - 1} = 0. \tag{19}$$

求得传统回收商与网络回收商的回收价格分别为

$$\begin{cases} p_{i3} = \frac{p_{di3}}{2}; \\ p_{i3} = \frac{p_{di3}}{2}. \end{cases} \tag{20}$$

此时,将式(20)代入处置商的最优决策函数 π_{d3} 中,求其 Hessian 矩阵:

$$|H_3| = \begin{vmatrix} -2\mu & 2 \\ 2(\mu - 1) & 2(\mu - 1) \\ 2 & -2 \\ 2(\mu - 1) & 2(\mu - 1) \end{vmatrix} = 4.$$

根据 π_{i3} 的算例,同理可得处置商传统渠道与网络渠道的最优回收价格分别为

$$p_{di3}^* = p_{di3}^* = \frac{w_3}{2}. \tag{21}$$

由此,求得传统回收商与网络回收商的最优回收价格分别为 $p_{i3}^* = p_{i3}^* = \frac{w_3}{4}$, 处置商和回收联盟的最优

利润分别为 $\pi_{d3}^* = \frac{(w_3)^2}{8}$, $\pi_{i3}^* = \frac{(w_3)^2}{16}$.

情境 4:当回收商与处置商结盟形成回收商-处置商联盟时,为追求联盟整体的最优决策,联盟统一协调处置商和回收商的回收价格,此时处置商对废旧家电的回收价格与传统回收商、网络回收商的回收价格一致,分别为 p_{i4} , p_{i4} , 联盟的单位回收收益为 w_4 . 回收商-处置商联盟回收情境流程如图 5 所示.

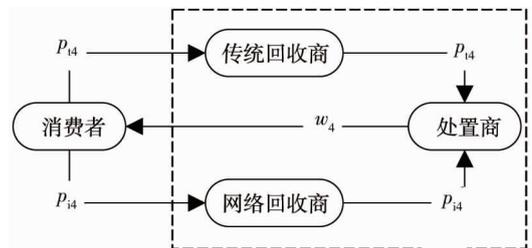


图 5 回收商-处置商联盟回收

联盟整体最优决策为

$$\pi_4 = (Q_{i4} + Q_{i4}) w_4 - Q_{i4} p_{i4} - Q_{i4} p_{i4}. \tag{22}$$

定理 3 集中决策下回收商-处置商联盟的最优回收价格为 $p_{i4}^* = p_{i4}^* = \frac{w_4}{2}$, 最优利润为 $\pi_4^* = \frac{(w_4)^2}{4}$.

证明:求 π_4 的 Hessian 矩阵得

$$|H_4| = \begin{vmatrix} -2 + \frac{-2}{\mu - 1} & \frac{2}{\mu - 1} \\ \frac{2}{\mu - 1} & -2 \end{vmatrix} = \frac{4}{\mu - 1}.$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_4}{\partial (p_{i4})^2} < 0$, $\frac{\partial^2 \pi_4}{\partial (p_{i4})^2} < 0$, 且 $H_4 > 0$, 由此可知回收商-处置商联盟的决策函数 π_4 是关于回收

价格 p_{i4}, p_{i4} 的严格凹函数.求 π_4 对 p_{i4}, p_{i4} 的一阶导并赋值为 0 得

$$\frac{\partial \pi_4}{\partial p_{i4}} = w_4 - 2p_{i4} + \frac{2p_{i4} - 2p_{i4}}{\mu - 1}; \tag{23}$$

$$\frac{\partial \pi_4}{\partial p_{i4}} = \frac{2p_{i4} - 2p_{i4}}{\mu - 1}. \tag{24}$$

此时,求得传统回收商与网络回收商的最优回收价格分别为 $p_{i4}^* = p_{i4}^* = \frac{w_4}{2}$, 联盟的最佳利润为 $\pi_4^* = \frac{(w_4)^2}{4}$.

4种回收情境的最佳决策结果如表1所示.

表1 4种回收情境的最佳决策结果

变量	情境1 传统回收渠道	情境2 分散决策	情境3 集中决策	情境4 回收商-处置商联盟
传统回收商最优回收价格	$\frac{w_1}{4}$	$\frac{2\mu w_1 + w_i}{2(4\mu - 1)}$	$\frac{w_3}{4}$	$\frac{w_4}{2}$
网络回收商最优回收价格		$\frac{(2w_i + w_1)\mu}{2(4\mu - 1)}$	$\frac{w_3}{4}$	$\frac{w_4}{2}$
处置商传统回收最优价格	$\frac{w_1}{2}$	$\frac{w_1}{2}$	$\frac{w_3}{2}$	
处置商网络回收最优价格		$\frac{w_i}{2}$	$\frac{w_3}{2}$	
传统回收商最优利润	$\frac{w_{i2}}{16}$	$\frac{\mu[(2\mu - 1)w_1 - w_i]^2}{4(\mu - 1)(4\mu - 1)^2}$	$\frac{(w_3)^2}{16}$	
网络回收商最优利润		$\frac{[(2\mu - 1)w_i - \mu w_1]^2}{4(\mu - 1)(4\mu - 1)^2}$		$\frac{(w_4)^2}{4}$
处置商最优利润	$\frac{w_{i2}}{8}$	$\frac{(2\mu - 1)(\mu w_{i2} + w_{i2}) - 2\mu w_i w_1}{4(\mu - 1)(4\mu - 1)}$	$\frac{(w_3)^2}{8}$	

3 模型对比分析

通过对上述4种回收模型进行分析,得出消费者回收行为对废旧家电回收决策的影响.比较4种模型的不同回收价格、回收数量及各自利润得到以下结论:

1) 根据情境2的回收商废旧家电的回收价格式(12)可知:消费者渠道偏向 $\mu > 1$ 且回收商的回收价格随着 μ 的增大而减小.但是根据情境3和情境4的回收价格式(20)~式(24)可以得出:当只存在传统渠道或者2类回收商形成回收商联盟时,消费者对回收渠道的偏向程度 μ 不再成为影响因素,因为此时消费者没有多余的选择或者选择没有差异性.

2) 传统渠道与网络渠道竞争回收优于单传统渠道回收.传统回收渠道与网络回收渠道竞争回收时,传统回收商的回收价格提高.

$$\text{证明: } \Delta p_{i2} = p_{i2}^* - p_{i1}^* = \frac{2\mu w_1 + w_i}{2(4\mu - 1)} - \frac{w_1}{4} = \frac{2w_i + w_1}{4(4\mu - 1)} > 0. \tag{25}$$

由式(25)可得:传统渠道与网络渠道竞争回收废旧家电时的回收价格高于单传统渠道的回收价格,有利于消费者参与废旧家电的回收.

证毕.

3) 传统渠道与网络渠道竞争回收时,废旧家电的总回收量增加.

证明:

$$\Delta Q_2 = Q_{a2}^* - Q_{a1}^* = \frac{2\mu w_1 + w_i}{2(4\mu - 1)} - \frac{w_1}{4} = \frac{2w_i + w_1}{4(4\mu - 1)} > 0. \tag{26}$$

式中: Q_{a2}^* 为传统渠道与网络渠道竞争回收的总回收量; Q_{a1}^* 为单传统渠道回收的总回收量.

由式(26)可得:传统渠道与网络渠道竞争回收能够提高废旧家电的回收数量,高于单传统渠道回收时的回收数量.

证毕.

4) 传统渠道与网络渠道竞争回收时,回收商的收益增加且传统渠道与网络渠道竞争有利于处置商的利益,使处置商利润增大.

证明:

$$\Delta\pi_2 = \pi_{i2}^* - \pi_{i1}^* = \frac{\mu[(2\mu-1)w_1 - w_i]^2}{4(\mu-1)(4\mu-1)^2} - \frac{w_{i2}}{16} = \frac{(8\mu^2 - 5\mu + 1)w_{i2} + 4\mu[w_{i2} - 2(2\mu-1)w_1w_i]}{16(\mu-1)(4\mu-1)^2} > 0; \quad (27)$$

$$\Delta\pi_{d2} = \pi_{d2}^* - \pi_{d1}^* = \frac{(2\mu-1)(\mu w_{i2} + w_{i2}) - 2\mu w_i w_1}{4(\mu-1)(4\mu-1)} - \frac{w_{i2}}{8} = \frac{(3\mu-1)w_{i2} + (4\mu-2)w_{i2} - 4\mu w_i w_1}{8(\mu-1)(4\mu-1)^2} > 0. \quad (28)$$

由式(27)和式(28)可得:传统渠道与网络渠道竞争的双渠道回收能够提高废旧家电回收商和处置商的利益,优于单传统渠道回收.

证毕.

5) 相对于分散决策,即传统回收商与网络回收商各自为政,只思考自身而非整体的利益,集中决策更能提升回收系统的整体利益.传统回收商与网络回收商合作回收形成回收商联盟时,能够降低回收价格.

证明:

$$\Delta p_{i3} = p_{i3}^* - p_{i2}^* = \frac{w_3}{4} - \frac{2\mu w_1 + w_i}{2(4\mu-1)} = \frac{4\mu(w_3 - w_1) - w_3 - 2w_i}{4(4\mu-1)} < 0; \quad (29)$$

$$\Delta p_{i3} = p_{i3}^* - p_{i2}^* = \frac{w_3}{4} - \frac{(2w_i + w_1)\mu}{2(4\mu-1)} = \frac{4\mu(w_3 - w_1) - w_3 - 2\mu w_1}{4(4\mu-1)} < 0. \quad (30)$$

由式(29)和式(30)可得:传统渠道与网络渠道合作回收形成回收商联盟能够降低废旧家电的回收价格,相对传统渠道与网络渠道竞争回收更有利于回收商的利益.

证毕.

6) 传统渠道与网络渠道合作回收形成的回收商联盟会导致废旧家电回收数量的减少.

证明:

$$\Delta Q_3 = Q_{a3}^* - Q_{a2}^* = \frac{w_3}{4} - \frac{2\mu w_1 + w_i}{2(4\mu-1)} = \frac{(4\mu-1)w_3 - 4\mu w_1 - 2w_i}{4(4\mu-1)} < 0. \quad (31)$$

式中: Q_{a3}^* 为传统渠道与网络渠道合作回收的总回收量.

由式(31)可得:传统渠道与网络渠道形成回收商联盟使回收价格降低,导致联盟废旧家电回收数量减少.

证毕.

7) 传统渠道与网络渠道合作回收使得回收商联盟的整体收益增大,但处置商的利润在回收商联盟情境下减少.

证明:

$$\Delta\pi_3 = \pi_{i3}^* - \pi_{i2}^* - \pi_{d2}^* = \frac{(w_3)^2}{16} - \frac{\mu[(2\mu-1)w_1 - w_i]^2}{4(\mu-1)(4\mu-1)^2} - \frac{[(2\mu-1)w_1 - \mu w_i]^2}{4(\mu-1)(4\mu-1)^2} = \frac{(w_3)^2(\mu-1)(4\mu-1)^2 - 4\mu[(2\mu-1)w_1 - w_i]^2 - 4[(2\mu-1)w_1 - \mu w_i]^2}{16(\mu-1)(4\mu-1)^2} > 0; \quad (32)$$

$$\Delta\pi_{d3} = \pi_{d3}^* - \pi_{d2}^* = \frac{(w_3)^2}{8} - \frac{(2\mu-1)(\mu w_{i2} + w_{i2}) - 2\mu w_i w_1}{4(\mu-1)(4\mu-1)} = \frac{(w_3)^2(\mu-1)(4\mu-1) - 2(2\mu-1)(\mu w_{i2} + w_{i2}) - 4\mu w_i w_1}{8(\mu-1)(4\mu-1)} < 0. \quad (33)$$

由式(32)和式(33)可得:2类回收商形成回收商联盟时,有利于其自身的整体利益,但是却会损害处置商的利益.

证毕.

8)当回收商与处置商结盟,即形成回收商-处置商联盟时,废旧家电的逆向供应链达到最优利润,此时,回收商与处置商协调回收、处理废旧家电是最佳的企业状态.

4 数值分析

为验证上述回收情境的有效性,利用 MATLAB 软件进行数值分析,通过赋值,研究在消费者网络回收偏向 μ 取不同值时,各回收情境中废旧家电的回收价格 p 、回收数量 Q 以及回收主体的利润 π 的变化,以此选择废旧家电的最佳回收策略.根据回收情境的特点,选取不同回收情境中处置商的收益作为主要研究因素赋值模拟.取 $w_1 = 1.6, w_2 = 1.7, w_3 = 2.5, w_4 = 3$.

4.1 消费者网络回收偏向 μ 对价格 p 的影响

消费者网络回收偏向 μ 与价格 p 的关系如图 6 所示.由图 6 可知:当传统回收渠道与网络回收渠道竞争回收时,传统回收价格与网络回收价格在一定范围内均高于双渠道合作回收的价格,且双渠道竞争回收时,网络回收价格总是高于传统回收价格;但随着消费者网络回收偏向的增加,传统回收价格和网络回收价格均会下降,因为当消费者对网络回收偏向达到一定值时,网络回收商不用担心失去货源而降低回收价格,传统回收商为减少成本支出也会降低回收的价格.

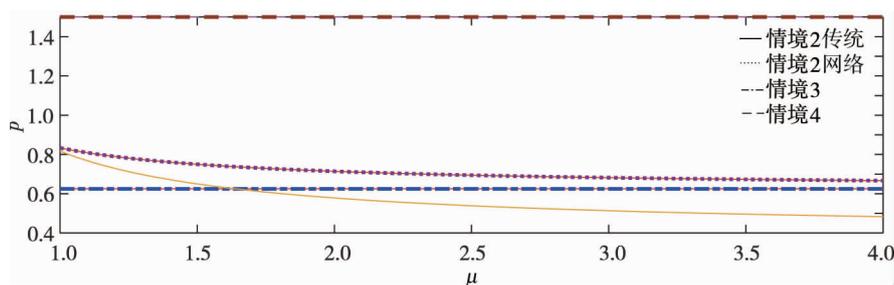


图 6 消费者网络回收偏向 μ 与价格 p 的关系

4.2 消费者网络回收偏向 μ 对回收数量 Q 的影响

消费者网络回收偏向 μ 与回收数量 Q 的关系如图 7 所示.由图 7 可知:回收情境 1 的单传统渠道回收所收取的废旧家电数量是最少的,不利于废旧家电市场的发展;回收情境 2 的双回收渠道竞争回收只有在一定消费者网络回收偏向范围,才能收取比情境 3 的双向回收渠道合作回收模式更多的废旧家电数量;而情境 4 回收商-处置商联盟收取的废旧家电数量是最多的.

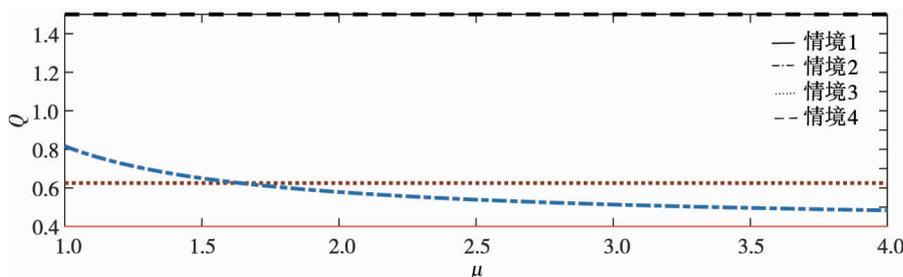


图 7 消费者网络回收偏向 μ 与回收量 Q 的关系

4.3 消费者网络回收偏向 μ 对回收主体利润 π 的影响

消费者网络回收偏向 μ 与回收主体利润 π 的关系如图 8 所示.由图 8 可知:废旧家电回收在情境 1、情境 3 和情境 4 中回收主体的利润都是定值,不受消费者网络回收偏向程度的影响,即当只存在传统回收渠道或回收商、处置商形成合作时,系统整体的利润是不变的,且在情境 4 回收商-处置商联盟时系统整体

获得的利润最大.当存在传统渠道与网络渠道竞争回收时,在一定消费者网络回收偏向范围内,系统的整体利润显著增加.

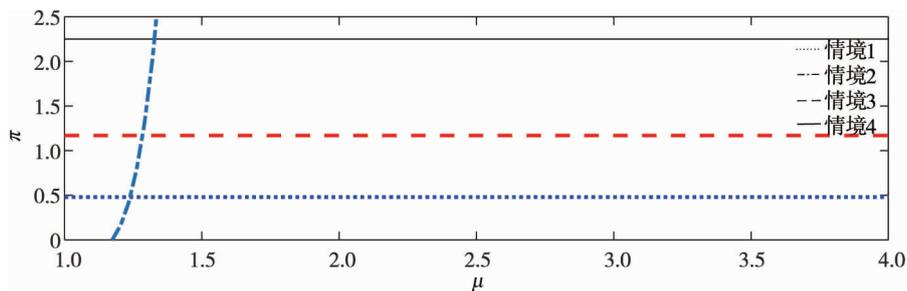


图8 消费者网络回收偏向 μ 与回收主体利润 π 的关系

5 结论与启示

1) 双渠道竞争回收时,在一定的消费者网络回收偏向范围内,回收价格高于单一的传统回收渠道的回收价格,并且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.双渠道竞争回收时的回收数量和回收主体的利润相较单一的传统回收渠道有所提高,但消费者行为偏向超过一定范围后,回收数量会随着消费者网络回收偏向程度的增大而减少.

2) 双渠道合作回收时,消费者的网络回收偏向不再是影响回收主体决策的重要因素.在此情境下,消费者选择传统回收渠道和网络回收渠道具有无差异性.此时的回收价格和回收数量,在一定的消费者网络回收偏向下,均低于双渠道竞争回收的情境.

3) 回收商-处置商形成联盟时,回收数量和回收价格都是最高的,并且在一定消费者网络回收偏向下,回收主体的利润也最高,即此时逆向供应链系统达到最优决策,取得最优回收利润、最高回收价格和回收数量.

根据上述研究结论所得相关管理启示如下:

1) 传统回收企业可拓展网络回收市场,增加网络回收占比,采用双渠道回收方式增强企业回收能力,提高企业市场竞争力.网络回收企业也可积极联合传统回收企业共同回收,形成双渠道竞争回收模式.同时,回收企业可向消费者宣传废旧家电回收的重要性以及网络回收的优势,体现网络回收相对传统回收的便利性和更高的经济效益.回收企业也可设计和制定相应的消费者回收奖励机制,加大消费者对废旧家电网络回收的接受程度.

2) 家电回收行业可加强与网络的融合,创新回收模式,形成回收行业中可复制的“互联网+回收”模式.充分考虑消费者的回收行为导向,以消费者为核心,通过设立网络回收平台,加强横向整合,联合小微回收企业及回收商,扩大回收市场,形成回收行业整体的双渠道竞争回收.家电回收行业通过创新和构建“互联网+”回收模式,提高回收效率,增加回收数量,同时规范回收价格,避免企业间的价格竞争.

3) 政府可联合回收行业龙头企业,牵头形成回收联盟,构建联盟回收平台,加强纵向整合,鼓励回收行业上下游企业的合作,加深回收企业与处置企业的联系,提高回收价格、回收数量和回收系统的整体收益,取得最佳决策.政府还可通过经济补贴的方式,激励小微企业完成正规化改造,加入回收联盟,促进废旧家电回收市场的整体平衡.

参考文献:

- [1] 华经产业研究院. 2021—2026年中国废弃电器电子产品回收处理市场发展前景预测及投资战略咨询报告[R/OL]. (2021-01-27)[2021-02-01]. <https://www.huaon.com/channel/proenv/684134.html>.
- [2] Grant K, Goldizen F C, Sly P D, et al. Health consequences of exposure to e-waste: a systematic review[J]. Lancet Global

- Health, 2013,1(6):e350-e361.
- [3] Zhang S, Ding Y, Liu B, et al. Challenges in legislation, recycling system and technical system of waste electrical and electronic equipment in China [J]. Waste Management, 2015,45: 361-373.
- [4] 刘永清,谢紫微,丁文彬,等.基于灰数 DEMATEL 的 WEEE 回收渠道决策影响因素分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2018,33(2):95-102.
- [5] 刘永清,杨青云,谢紫微.废旧电器处理商选择回收渠道决策的演化博弈[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(3):116-122.
- [6] 刘慧慧,刘涛.电器电子产品基金补贴和市场合作对正规回收渠道的影响研究[J].中国管理科学,2017(5):87-96.
- [7] 公彦德.互联网+回收模式激励机制创新——以百度回收站为例[J].中国流通经济,2019,33(4):65-75.
- [8] Sudhir V, Srinivasan G, Muraleedharan V R. Planning for sustainable solid waste management in urban India [J]. System Dynamics Review, 1997,13(3): 223-246.
- [9] Atasu A, Özdemir - Akyildirim Ö, Wassenhove L V. Stakeholder perspectives on E - Waste Take - Back legislation [J]. Production and Operations Management, 2012,22(2): 382-396.
- [10] Kaya O. Incentive and production decisions for remanufacturing operation [J]. European Journal of Operational Research, 2010,20(2): 442-453.
- [11] 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.
- [12] Parsaeifar S, Bozorgi-Amiri A, Naimi-Sadigh A, et al. A game theoretical for coordination of pricing, recycling, and green product decisions in the supply chain [J]. 2019, 226:37-49.
- [13] 吴刚,陈兰芳,张仪彬,等.废旧家电拆解补贴模型与策略优化研究[J].系统科学学报,2017,25(4):54-59.
- [14] 费威.不同主体负责回收的废弃产品回收决策分析[J].软科学,2018(6):113-118.
- [15] 许民利,王洁,简惠云.竞争回收平台双向公平关切下逆向供应链的决策分析[J].管理学报,2020(9):1402-1411.
- [16] 原逸超,石岩然.基于演化博弈理论的 WEEE 方面政府环境规制策略研究[J].数学的实践与认识,2018(16):55-63.
- [17] Wang Z, Wang Q, Chen B, et al. Evolutionary game analysis on behavioral strategies of multiple stakeholders in E-waste recycling industry [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2020,155(4): 212-221.
- [18] Tong W, Mu D, Zhao F, et al. The impact of cap-and-trade mechanism and consumers' environmental preferences on a retailer-led supply Chain [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019,142(4):88-100.
- [19] 马祖军,胡书,代颖.政府规制下混合渠道销售/回收的电器电子产品闭环供应链决策[J].中国管理科学,2016,24(1):82-90.
- [20] Li X, Mu D, Du J, et al. Game-based system dynamics simulation of deposit-refund scheme for electric vehicle battery recycling in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020,157(6):104788.
- [21] Feng L, Govindan K, Li C. Strategic planning: Design and coordination for dual-recycling channel reverse supply chain considering consumer behavior [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 260(2): 601-612.
- [22] 李春发,刘一非,王帅.C2B 平台竞价回收博弈研究[J].科技管理研究,2016(4):229-233.